Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne

Chloé Lamy

▶ **To cite this version:**

Chloé Lamy. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne. Géographie. Université Rennes 2, 2013. Français. NNT : 2013REN20025 . tel-01059818

HAL Id: tel-01059818
https://theses.hal.science/tel-01059818

Submitted on 2 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE / UNIVERSITE RENNES 2
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne
pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE RENNES 2
Mention : Géographie
Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par
Chloé Lamy
Préparée à l'Unité Mixte de recherche 6554 CNRS
LETG-RENNES COSTEL
Université Rennes 2

Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne

Thèse soutenue le 28 juin 2013
devant le jury composé de :

Yves Richard
Professeur, Université de Bourgogne / *rapporteur*

Jean-Michel Soubeyroux
Ingénieur, Direction de la climatologie, Météo-France, Toulouse / *rapporteur*

Neli de Mello-Théry
Professeure, Université de São Paulo / *examinatrice*

Pierre Carrega
Professeur, Université de Nice / *examinateur*

Hervé Nicolas
Professeur, Agrocampus Ouest / Co-directeur de thèse

Vincent Dubreuil
Professeur, Université Rennes 2 / Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier mes directeurs de thèse Vincent Dubreuil et Hervé Nicolas pour m'avoir permis de travailler sur un sujet aussi passionnant. Merci Vincent pour tes nombreux conseils avisés qui m'ont guidé au cours de cette thèse. Merci également d'être resté disponible malgré ton emploi du temps très chargé et tes quelques déplacements au Brésil. Merci Hervé pour avoir apporté un point de vue différent à ce travail et pour m'avoir donné des conseils toujours pertinents.

Merci à Pierre Carrega, Neli de Mello-Théry, Yves Richard et Jean-Michel Soubeyroux d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et d'évaluer mon travail.

Je tiens également à remercier la Région Bretagne pour le financement de cette thèse. Ce travail s'est également inscrit dans le programme CLIMASTER. Je remercie ainsi Philippe Mérot en tant que directeur de ce programme pour m'avoir permis de communiquer sur ma thèse auprès de différentes structures.

Je remercie Laurence Hubert-Moy, ancienne directrice du laboratoire COSTEL, et Hervé Quénol, actuel directeur, de m'avoir accueilli au laboratoire. Je tiens également à remercier Roselyne, Marie-France, Nicole et Sébastien pour leur aide administrative. Je remercie tous les membres du laboratoire COSTEL pour leur sympathie. Un merci particulier à Olivier Planchon pour m'avoir éclairé de ses grandes connaissances climatologiques, ainsi qu'à Valérie Bonnardot avec qui j'ai toujours eu plaisir à échanger sur le climat, les sorties de modèles climatiques et l'Afrique du Sud. Je tiens à remercier Johan Oszwald qui m'a apporté une aide notable en ce qui concerne la géostatistique. Je remercie également les doctorants du laboratoire qui, à un moment ou un autre, m'ont apporté leur aide : Cyril, Xavier, Florian, Pauline et Julie. Merci aux « anciens » doctorants : Clémence, Emilie et Sébastien auprès de qui j'ai pu avoir de nombreux conseils sur la gestion de la fin de la thèse. Merci à Nathan et Heloisa pour avoir apporté un peu de la chaleur du Brésil avec eux. Vous m'avez vraiment donné envie de visiter votre pays. Je souhaite également remercier les experts SIG du laboratoire : Maxime et Alban, qui m'ont aidé sur des problèmes SIG mineurs ou majeurs, et toujours avec le sourire. Enfin, merci à Jean Nabucet pour son aide technique, sa disponibilité et sa bonne humeur.

Je souhaite remercier Météo-France d'avoir accepté que j'utilise leurs bases de données (publithèque et indice d'humidité des sols SWI) dans cette thèse. Je tiens également à remercier le CERFACS pour l'accès à leurs données désagrégées pour les projections climatiques. Un merci particulier à Christian Pagé qui a toujours été disponible pour répondre à mes nombreuses questions et qui m'a ainsi permis d'utiliser au mieux ces données.

Je remercie Christian Walter, Blandine Foucault-Lemercier et Lionel Berthier du laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest de m'avoir permis d'utiliser leur base de données pédologique pour cette thèse.

Merci à mes parents et ma sœur d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir soutenu dans mes études. Je tiens à remercier mes amis (Antoine, Marc, Séverine, Elodie, Karine, Julie, Delphine, Magalie, Solène, Gérald...) de m'avoir rappelé qu'il n'y a pas que la thèse et la sécheresse (surtout en Bretagne !) dans la vie.

Je remercie également celui qui partage ma vie et avec qui j'ai partagé l'expérience de cette thèse. Merci pour ton aide dans la programmation informatique, pour ton soutien dans les quelques moments difficiles, pour avoir toujours cru en moi.

Merci à toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de cette thèse.

« Les espèces qui survivent ne sont pas les espèces les plus fortes, ni les plus intelligentes, mais celles qui s'adaptent le mieux aux changements. »
Charles Darwin

« Il n'y a qu'un passé et il n'existe qu'un seul présent, par contre il y a une multitude de futurs, mais seul l'un d'eux se réalise. »
Philippe Geluck

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AGRESTE	Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt
AR	Assessment Report
ARIDE	Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNFCCC en anglais)
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CLC	CORINE Land Cover
CLIMATOR	Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces
CLIMSEC	Impact du changement CLIMatique en France sur la SECheresse et l'eau du sol
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COCEB	COnférence des Chambres Economiques de Bretagne
CORINE	Programme européen de COoRdination de l'INformation sur l'Environnement
COSTEL	Climat et Occupation du Sol par TELédétection
CRPF	Centres Régionaux de la Propriété Forestière
CYCLOPES	Carbon cYcle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites
DE	Déficit d'Evaporation
DRAAF	Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt
EOF	Empirical Orthogonal Functions
EP	Excédent de Précipitations
ETM	EvapoTranspiration Maximale
ETP	EvapoTranspiration Potentielle
ETR	EvapoTranspiration Réelle
EVI	Enhanced Vegetation Index
FACE	Free Air-CO_2 Enrichment
FAO	Food and Agriculture Organization
FNSEA	Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles
GES	Gaz à Effet de Serre
GICC	Gestion et Impact du Changement Climatique
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IGCS	Inventaire, Gestion et Conservation des Sols
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, version Anglophone du GIEC
ISBA	Interactions entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
MCG	Modèle Climatique Global

MCR	Modèle Climatique Régional
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODCOU	Modèle hydrologique
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAO	North Atlantic Oscillation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OS	Occupation du Sol
P	Précipitations
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PIB	Produit Intérieur Brut
PNM	Pression au Niveau de la Mer
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RCP	Representative Concentration Pathways
RH	Réserve Hydrique
RU	Réserve Utile
SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques de la Neige
SAU	Surface Agricole Utile
SIG	Système d'Information Géographique
SIM	SAFRAN - ISBA - MODCOU
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRES	Special Reports on Emission Scenarios (*Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emission* en français)
SSP	Shared Socio-ecosystem Pathways
STICS	Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard
SWI	Soil Wetness Index
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
WG	Working Group

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS iii

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vii

SOMMAIRE ix

INTRODUCTION GENERALE 1

PARTIE 1 - VULNERABILITE DU TERRITOIRE BRETON FACE AUX SECHERESSES, ETUDIER LE PASSE POUR CERNER LE FUTUR 7

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE 9

CHAPITRE 1 - LES SECHERESSES EN BRETAGNE AU 20EME SIECLE, VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE 11

CHAPITRE 2 - IMPACT DES SECHERESSES : SENSIBILITE D'UN TERRITOIRE ET VULNERABILITE D'UNE ACTIVITE ECONOMIQUE MAJEURE EN BRETAGNE : L'AGRICULTURE 31

CHAPITRE 3 - LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : OBSERVATIONS ET PERCEPTIONS AU 20EME SIECLE, SIMULATIONS DES EVOLUTIONS POSSIBLES AU 21EME SIECLE 51

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE 73

PARTIE 2 - METHODES DE MODELISATION DES SECHERESSES A L'INTERFACE ENTRE LE SOL ET L'ATMOSPHERE, A PARTIR DE PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LE 21EME SIECLE 75

INTRODUCTION DE LA SECONDE PARTIE 77

CHAPITRE 4 - LA MODELISATION DU CLIMAT : DES MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX AUX PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES 79

CHAPITRE 5 - LA MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE EN BRETAGNE : UN OUTIL D'IDENTIFICATION DES SECHERESSES DU 20EME SIECLE AU 21EME SIECLE 107

CONCLUSION DE LA SECONDE PARTIE 135

PARTIE 3 - DU CLIMAT PASSE AU CLIMAT FUTUR : EVOLUTION DE LA FREQUENCE ET L'INTENSITE DES SECHERESSES EN BRETAGNE ET SES CONSEQUENCES POUR L'AGRICULTURE 137

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE 139

CHAPITRE 6 - FREQUENCE ET INTENSITE DES SECHERESSES AU 20EME SIECLE 141

CHAPITRE 7 - EVOLUTION DE LA FREQUENCE ET DE L'INTENSITE DES SECHERESSES AU COURS DU 21EME SIECLE 159

CHAPITRE 8 - SUIVI DES SECHERESSES SELON DEUX INDICES, ET DE LEURS CONSEQUENCES SUR L'AGRICULTURE 195

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE 231

CONCLUSION GENERALE 233

BIBLIOGRAPHIE 239

LISTE DES FIGURES 261

LISTE DES TABLEAUX 269

TABLE DES MATIERES 271

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

Introduction générale

Si le climat a constamment évolué à l'échelle des temps géologiques, du fait de la variation de la position de la Terre par rapport au soleil (Berger *et al.*, 1990a et 1990b ; Berger, 1991 ; Berger, 1995), on observe actuellement des changements climatiques particulièrement rapides qui ne sont pas d'ordre astronomique. Ces modifications sont observées depuis la fin du 19ème siècle. Elles sont dues aux activités humaines qui, en modifiant la composition chimique de l'atmosphère, ont entraîné une augmentation de l'effet de serre. Parmi les gaz à effets de serre on retrouve la vapeur d'eau qui contribue à plus de 60 % à l'effet de serre naturel. A cet effet naturel se rajoute une variante anthropique, liée à la présence dans l'atmosphère de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4), de protoxyde d'azote (N_2O) et de chlorofluorocarbure (CFC) principalement. L'origine de ces gaz vient majoritairement de la combustion et des pertes extractives d'énergies fossiles, du déboisement, de la combustion de la biomasse et de la fermentation entérique des élevages de bovins (Dunglas, 1993). Dès les années 1960, de nombreux scientifiques ont travaillé sur l'estimation de l'impact du CO_2 sur l'augmentation des températures (Kaplan, 1960 ; Gebhart, 1967 ; Bryson, 1970 ; Manabe, 1970 ; Robinson et Robbins, 1970 ; Broecker, 1975 ; Madden et Ramanathan, 1980 ; Kellogg et Schware, 1981 ; Ramanathan *et al.*, 1985). Rapidement cette approche a été complétée par une analyse de l'effet du CO_2 sur le climat de manière plus générale (Smagorinsky *et al.*, 1965 ; Manabe, 1969 ; Manabe et Brian, 1969 ; Manabe et Wetherald, 1980 ; Watts, 1980).

Les résultats de ces diverses études ont conduit à la création du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du climat (GIEC) en 1988. Il regroupe des chercheurs travaillant sur les causes et les conséquences du changement climatique ainsi que sur des pistes d'adaptation et d'atténuation. Les membres du GIEC travaillent ainsi depuis la fin des années 1980 à l'établissement d'une plus grande connaissance des conséquences des GES sur le climat. Ils ont établi des scénarios d'évolution socio-économiques pour lesquels on peut prévoir des concentrations différentes en GES. Ces scénarios couvrent différentes orientations politico-socio-économiques allant d'une consommation massive de l'énergie fossile (cas du scénario A2), à une utilisation importante de technologies propres (scénario B1), en passant par un système énergétique équilibré entre les ressources fossiles et renouvelables (scénario A1B) (Wilkerson, 1995 ; Gallopin et al., 1997 ; SRES, 2000 ; IPCC, 2007). A partir de ces estimations des concentrations en GES selon divers scénarios, les physiciens du climat travaillent sur les conséquences de ces gaz sur le bilan radiatif et sur le système climatique. Ces deux notions sont très complexes et les modèles numériques de circulation générale qui permettent de reproduire la circulation atmosphérique sont en constante évolution depuis leur création dans les années 1960. Les modèles numériques de circulation générale ont une résolution adaptée à l'analyse climatique à l'échelle de la planète. Ils permettent ainsi de cerner les grandes tendances d'évolution du climat à l'échelle des continents sans réellement préciser ces tendances à l'échelle régionale. Depuis les années 1980 de nombreux scientifiques ont travaillé à la régionalisation de ces modèles (Mearns *et al.*, 1984 ; Giorgi et Mearns, 1991 ; Bardossy et Plate, 1992 ; Wilks, 1992 ; Wilson *et al.*, 1992 ; Corte-Real, 1995 ; Oelschlägel, 1995 ; Zorita *et al.*, 1995 ; Enke et Spekat, 1997 ; Wilby *et al.*,

1999 ; Plaut et Simonnet, 2001 ; Quintana Segui *et al.*, 2010 ; Timbal *et al.*, 2009 ; Tolika *et al.*, 2008) pour obtenir des modèles numériques de circulation régionale permettant l'analyse du changement climatique à l'échelle infra-continentale. Les divers rapports du GIEC présentent ainsi les tendances qui ressortent de l'utilisation des modèles numériques de circulation globale et du climat régional, à l'échelle de grandes régions. Cette tendance à la régionalisation de l'étude du changement climatique et de ses conséquences s'observe également par le nombre croissant d'études réalisées à l'échelle de pays (Wedgbrow *et al.*, 2002 ; Fuhrer *et al.*, 2006 ; Parey *et al.*, 2007 ; Lhomme *et al.*, 2009 ; Mavromatis, 2010 ; Benitez-Gilabert *et al.*, 2010 ; Bothe *et al.*, 2011 ; Sanchez *et al.*, 2011 ; Tsanis *et al.*, 2011 ; Zahid et Rasul, 2012). **Pour autant, les tendances globales du changement climatique sont encore peu traduites régionalement.** Pour la France la plus petite résolution des données régionalisées de modèle climatique est de 8 km. Cela permet de produire des analyses nationales du changement climatique et de ses conséquences, comme c'est le cas avec le programme CLIMSEC mené par Météo-France (Soubeyroux *et al.*, 2011). On peut également utiliser ces données pour des études régionales (Ducharne *et al.*, 2003 ; Somot, 2005 ; Commeaux *et al.*, 2010 ; Lamy et Dubreuil, 2011 ; Piazza *et al.*, 2011). Il faut cependant être conscient des limites des données utilisées puisqu'un jeu de données de résolution spatiale de 8 km n'est pas adapté à des études infrarégionales. Pour des analyses plus locales du changement climatique, comme pour des secteurs viticoles par exemple, on utilise d'autres techniques de descente d'échelle permettant d'avoir des données de résolution infra-kilométrique (Neethling *et al.*, 2008 ; Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Madelin *et al.*, 2010 ; Planchon *et al.*, 2010 ; Quénol, 2010 ; Powell *et al.*, 2011).

Le changement climatique tend à augmenter la fréquence des aléas climatiques voire à faire apparaitre de nouveaux risques à l'échelle des territoires. **En domaine océanique le risque sécheresse est assez peu étudié du fait d'une faible occurrence et intensité. Pour autant ce risque existe et a eu par le passé des conséquences importantes sur des activités socio-économiques telles que l'agriculture** (Mounier, 1965 et 1977 ; Dubreuil 1994 et 1997). Ce fut notamment le cas en 1976 et en 1989 où la France a connu des sécheresses très intenses ayant provoqué des pertes agricoles très importantes. La Bretagne a été particulièrement touchée par ces épisodes secs, d'autant plus que l'agriculture occupe une part importante de l'économie régionale. Cette vulnérabilité a permis de rappeler que les sécheresses sont un risque pouvant sévir en domaine océanique. Il est donc important de suivre l'évolution de cet aléa en termes de fréquence et d'intensité, dans le contexte du changement climatique.

Cette thèse propose ainsi une analyse régionale, à l'échelle de la Bretagne, du risque sécheresse en domaine océanique dans le contexte du changement climatique. Cette étude est financée par la région Bretagne qui s'intéresse à la sensibilité de son territoire face aux sécheresses et à la vulnérabilité des activité socio-économiques. Ce travail est également intégré dans le projet CLIMASTER (Changements climatiques, systèmes agricoles, ressources naturelles et développement territorial) financé par le programme PSDR GO (Programme Pour et Sur le Développement Régional en Grand Ouest) de l'INRA. Parmi les objectifs de ce programme on retrouve également des objectifs portés par cette thèse. C'est le cas, par exemple, de la volonté de caractériser le changement climatique dans le grand ouest, de modéliser et analyser l'influence du changement climatique sur la ressource en eau.

La Bretagne ne bénéficie pas de ressources hydriques souterraines importantes, comme cela peut-être le cas dans le bassin parisien. La ressource en eau est donc principalement superficielle, comme en témoigne le réseau hydrographique dense couvrant 30000 km de la région (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2009). Le stockage de l'eau se fait au niveau des sols, selon la taille de la réserve utile. Ainsi, on s'intéresse particulièrement à la modélisation du comportement de l'eau entre les sols et l'atmosphère, plaçant l'occupation du sol au cœur du système. L'outil permettant le suivi de l'eau à cet interface est le bilan hydrique (Mounier, 1965 et 1977 ; Dubreuil 1994 et 1997). Il permet de suivre la teneur en eau dans les réserves hydriques des sols à différents pas de temps. Le bilan hydrique permet également le calcul d'un indice de sécheresse : le déficit d'évaporation. Ce type d'indice met en évidence les sécheresses pédologiques, qui sont les évènements les plus impactant pour l'agriculture. Le bilan hydrique utilisé ici peut constituer un outil d'aide à la décision intéressant pour l'activité agricole. **Cette thèse propose de réaliser ce bilan hydrique sur la base des données climatiques et pédologiques fournies par le CERFACS et le laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest respectivement, ainsi que des données d'occupation du sol** d'après CORINE Land Cover. Il s'agit également de réaliser une analyse plus précise du comportement hydrique à l'échelle de la parcelle : cela est rendu possible par le caractère adaptatif du bilan qui peut prendre en compte différentes bases de données, telles que l'occupation du sol parcellaire acquise par télédétection. **Pour intégrer le changement climatique dans cette étude on utilise des sorties désagrégées du modèle ARPEGE-Climat, fournies par le Centre Européen de Recherches et de Formation Avancée en Calculs Scientifiques (CERFACS).** Ces sorties de résolution de 8 km sont intégrées dans le modèle de bilan hydrique. Ces données couvrent la période 1950-2100. Aussi elles ont été comparées avec les données observées avant de réaliser des analyses prospectives sur le 21ème siècle. Les différentes méthodologies développées sont également reprises dans un schéma explicatif ci-après (figure 1).

Cette thèse poursuit ainsi deux objectifs. Le premier est de cerner le comportement climatique moyen du 20ème siècle et les conséquences sur la fréquence et l'intensité des sécheresses. Le second consiste en l'estimation de l'évolution des épisodes secs dans le contexte du changement climatique d'après trois scénarios du GIEC (B1, A1B et A2). Cette approche régionale des conséquences du changement climatique en termes de sécheresses est unique à l'échelle de la Bretagne. Ce travail permet donc de poser des bases qui pourront être amenées à évoluer avec les connaissances en constante évolution du changement climatique et de ses impacts. La vulnérabilité de l'agriculture face aux sécheresses, observée par le passé, justifie l'intérêt de suivre l'impact du changement climatique sur l'intensité et la fréquence de cet aléa. **Ceci d'autant plus que l'agriculture occupe une part importante de l'économie bretonne et nationale. Ainsi, les connaissances sur les impacts du changement climatique sur les systèmes agricoles actuels peuvent servir de support à l'établissement de pistes d'adaptation.**

La thèse est structurée en trois parties :

- La première partie « **Vulnérabilité du territoire breton face aux sécheresses, étudier le passé pour cerner le futur** », composée de trois chapitres, a pour objectif de présenter le contexte de la thèse. Le premier chapitre expose le risque sécheresse en France et en

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

Bretagne. Il présente également la diversité des climats bretons. Il permet aussi de présenter le bilan hydrique en tant qu'outil de suivi des sécheresses. Le second chapitre montre les impacts des sécheresses passées afin de mettre en évidence la vulnérabilité de l'agriculture face aux épisodes secs. Ce chapitre est également l'occasion de présenter l'agroclimatologie et les avancées permises par cette discipline sur les liens entre l'agriculture et le climat. Cette partie se termine par un troisième chapitre exposant le changement climatique depuis la formalisation de la notion de gaz à effet de serre jusqu'aux projections climatiques en passant par la présentation des scénarios SRES du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

- La seconde partie « **Méthodes de modélisation des sécheresses à l'interface entre le sol et l'atmosphère, à partir de projections climatiques sur le 21ème siècle** » se déroule en deux chapitres traitant chacun des points particuliers de la méthodologie abordée dans cette thèse. Le premier chapitre aborde les données climatiques en présentant les techniques de régionalisation des modèles climatiques globaux. Il présente également les sorties désagrégées du CERFACS. Une comparaison des simulations avec les observations permet de tester la cohérence du jeu de données pour une analyse des sécheresses. Le second chapitre se focalise sur le suivi des sécheresses en présentant les différentes données utilisées pour calculer le bilan hydrique. On retrouve également dans ce chapitre une description de deux indices de sécheresses étudiés dans cette thèse : le déficit d'évaporation et l'indice d'humidité des sols (*SWI pour Soil Wetness Index*), utilisé par Météo-France. Une présentation de l'effet du dioxyde de carbone sur l'évapotranspiration potentielle y est également proposée.
- La troisième partie « **Du climat passé au climat futur : évolution de la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne et ses conséquences pour l'agriculture** » est divisée en trois chapitres. Le premier chapitre traite des sécheresses dans le contexte du 20ème siècle afin de présenter le comportement moyen du climat breton avant que le changement climatique ne se ressente. Le second chapitre aborde les possibles évolutions des sécheresses dans le contexte du changement climatique. Dans ces deux chapitres les mêmes paramètres sont suivis : le déficit d'évaporation et la teneur hydrique des sols. Le troisième chapitre de cette partie offre une ouverture sur d'autres paramètres en proposant une comparaison entre le déficit d'évaporation et l'indice d'humidité des sols. Les sécheresses en Bretagne sont également abordées à travers une étude plus agronomique. Dans la deuxième partie de ce chapitre on trouve ainsi une étude d'impact de plusieurs types de cultures pour trois secteurs caractérisés par un même climat et une même taille de réserve utile. L'objectif de cette approche est de percevoir si une culture serait moins demandeuse en eau, et donc plus durable, pour un contexte climatique et pédologique précis.

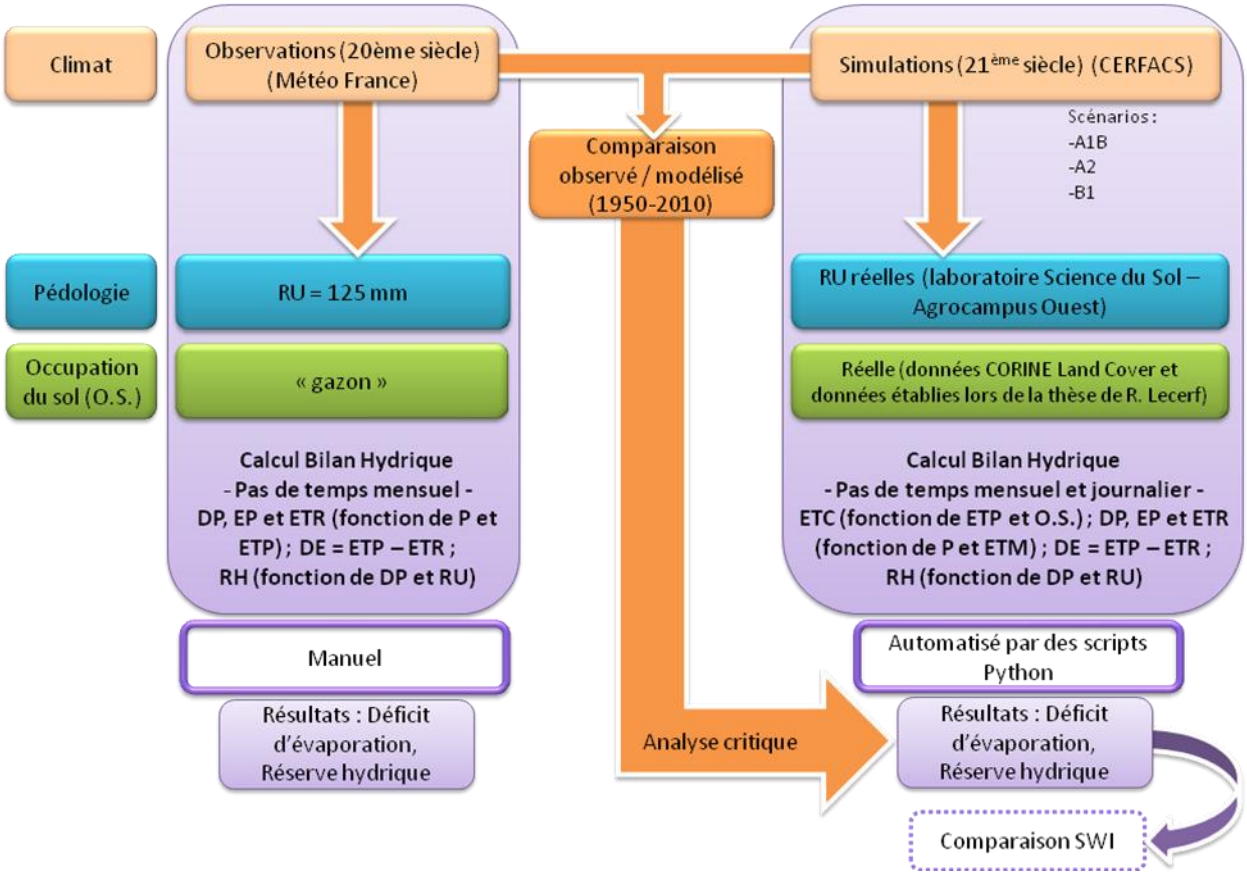


Figure 1 Schéma récapitulatif des méthodes de travail développées dans la thèse (RU : réserve utile ; SWI : Soil Wetness Index (indice d'humidité des sols de Météo-France) ; DP : déficit pluviométrique ; EP : excédent pluviométrique ; ETP : évapotranspiration potentielle ; ETM : évapotranspiration maximale ; ETR : évapotranspiration réelle ; DE : déficit d'évaporation ; RH : réserve hydrique)

PARTIE 1

Vulnérabilité du territoire breton face aux sécheresses, étudier le passé pour cerner le futur

SOMMAIRE

Chapitre 1 - Les sécheresses en Bretagne au 20ème siècle, variabilité spatiale et temporelle 11
Chapitre 2 - Impact des sécheresses : sensibilité d'un territoire et vulnérabilité d'une activité économique majeure en Bretagne : l'agriculture 31
Chapitre 3 - Le changement climatique : observations et perceptions au 20ème siècle, simulations des évolutions possibles au 21ème siècle 51

Introduction de la première partie

Cette partie aborde la question des sécheresses et leurs conséquences pour le territoire breton. Le sous-sol breton ne présente pas de réelles nappes phréatiques mais plutôt des réseaux d'aquifères liés aux fractures du socle granitique. L'accès à la ressource en eau n'est donc pas toujours facile, ce qui explique l'importance de la réserve hydrique des sols pour les diverses occupations territoriales. Ainsi, l'assèchement de ces réserves, que l'on qualifie de sécheresses pédologiques, agricoles ou encore édaphiques, a des impacts sur la végétation en place et, par conséquent, sur les activités qui en dépendent, telle que l'agriculture. Cette partie présente ainsi les différents climats bretons qui vont influencer l'occupation du sol et les activités socio-économiques de la région. Elle est également l'occasion de présenter les scénarios socio-économiques SRES utilisés pour intégrer la notion de changement climatique à cette étude. Les objectifs de cette première partie sont de comprendre la répartition des sécheresses dans le temps et l'espace à l'échelle de la région, à partir de l'analyse de la diversité climatique bretonne ; de cerner les conséquences des sécheresses sur l'agriculture qui est une des activités économiques majeures du territoire ; et de présenter la façon dont le changement climatique est considéré par les scientifiques, depuis les émissions de gaz à effet de serre jusqu'à l'établissement de projections climatiques.

Dans le chapitre 1 il est ainsi question de présenter le risque sécheresse en Bretagne et ses conséquences à l'échelle d'un territoire. La description des sécheresses pédologiques qui y est faite permet d'introduire le bilan hydrique en tant qu'outil pour le suivi de ce type de sécheresse. Du fait des conséquences des sécheresses sur l'agriculture, ce chapitre aborde également les concepts de durabilité de l'agriculture dans le contexte du changement climatique. La diversité des climats bretons est également discutée, afin de présenter la diversité spatiale de la vulnérabilité du territoire face aux sécheresses.

Le chapitre 2 traite des impacts des sécheresses sur l'agriculture. On focalise sur cette activité socio-économique du fait de son importance dans l'économie régionale et nationale. Les conséquences des sécheresses sont abordées dans un premier temps d'un point de vue historique grâce à des analyses dendrochronologiques et des recueils d'écrits historiques. Puis, dans un second temps, d'un point de vue agroclimatologique, afin de mieux cerner les effets du climat sur l'agriculture en Bretagne. Cela amène à réfléchir sur la gestion de l'eau entre ses différents usagers.

Le chapitre 3 présente les réflexions sur le changement climatique qui ont mené aux projections climatiques utilisées pour cette thèse. Il décrit les principales étapes historiques de la compréhension des conséquences des gaz à effet de serre (GES) sur le climat, qui ont par la suite servi à établir les scénarios SRES du GIEC. Les trois scénarios SRES (A1B, A2 et B1) considérés dans cette thèse sont présentés dans ce chapitre. Cela permet d'expliquer pourquoi ces scénarios ont été retenus et de présenter les nouveaux scénarios récemment développés par le GIEC qui seront introduits dans le prochain rapport. Pour terminer, ce chapitre fait le lien entre les

scénarios SRES du GIEC et les projections climatiques utilisées en données d'entrée du bilan hydrique.

CHAPITRE 1

LES SECHERESSES EN BRETAGNE AU 20EME SIECLE, VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE

Sommaire

Introduction 12

1.1 Le risque sécheresse et ses conséquences régionales dans le contexte du changement climatique 12

1.2 Le risque sécheresse en France 13

1.3 Le risque sécheresse en Bretagne 14

1.4 Le changement climatique de l'échelle globale à l'échelle régionale 15

1.5 Agriculture durable et changement climatique 17

1.6 Les sécheresses : définition et étude grâce au bilan hydrique 18

1.6.1 Définition des sécheresses 18

1.6.2 Un outil d'identification de la sécheresse pédologique : le bilan hydrique 20

1.7 Les climats bretons façonnés par la géographie de la péninsule 22

1.7.1 Les grandes tendances à l'échelle du territoire 22

1.7.2 Le climat du littoral : une influence maritime variable 23

1.7.3 Le climat des terres marqué par la diminution de l'influence océanique 25

1.8 Spatialisation de l'aléa sécheresse en Bretagne 27

Synthèse : Un climat océanique, sensible aux sécheresses, riche en nuances à l'échelle de la région Bretagne 29

Introduction

La région Bretagne, du fait de sa position par rapport à l'océan Atlantique, de sa grande façade maritime et des circulations atmosphériques dominantes, connait des hivers doux et humides et des étés frais et moins arrosés. En termes de pluviométrie, le territoire breton reçoit en moyenne entre 700 et 1000 mm d'eau par an, ce qui place cette région dans la moyenne française. Les pluies bretonnes étant généralement caractérisées par une faible intensité et une longue durée, l'image de région humide est ancrée dans l'esprit populaire. Ainsi, cette méconnaissance *a priori* des climats bretons rend l'aléa sécheresse en Bretagne difficile à concevoir. Dans les années 1980, le modèle agricole breton, fort d'une pluviométrie importante sur le territoire, faisait ainsi la part belle à des cultures très demandeuses en eau, tel que le maïs, sans s'inquiéter de l'alimentation en eau sur la période estivale (Carrega *et al.*, 2004). Les grandes sécheresses de 1976, 1989 et 1990, pour ne citer qu'elles, ont ainsi permis une prise de conscience générale de la vulnérabilité de l'agriculture face aux sécheresses (Dubreuil, 1994, 1996 et 1997). Au-delà de la démonstration de la fragilité d'un système économique, les phénomènes climatiques extrêmes révèlent des problèmes latents tels que la surexploitation de la ressource en eau. Dans le contexte du changement climatique, où les températures tendent à augmenter et les précipitations à diminuer l'été (SRES, 2001), la ressource en eau est un enjeu majeur pour le bon développement de l'agriculture. La problématique de la sécheresse doit donc être appréhendée dans la perspective du développement durable, afin d'aller vers une gestion raisonnée des ressources et des divers systèmes économiques. Dans un rapport de l'ONU, Brundtland (1987) définit le développement durable comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins* ».

Ce chapitre expose dans un premier temps un état des connaissances sur les sécheresses en France et en Bretagne, permettant d'introduire la vulnérabilité de l'agriculture. Cette vulnérabilité est alors mise en relation avec le changement climatique, pour amener la question de la durabilité de l'agriculture face au changement climatique. Puis, différentes définitions des sécheresses seront abordées, précédant une rapide présentation du bilan hydrique en tant qu'outil d'identification des sécheresses. Le territoire breton est ensuite décrit dans sa diversité géographique afin d'amener une présentation des divers climats bretons qui sont traités à travers leur variété et variabilité. Il est également question, dans un quatrième point, de l'évolution des sécheresses passées, en termes de fréquence et d'intensité, mais également du point de vue de la répartition spatiale, puisque le territoire breton ne présente pas une vulnérabilité uniforme face aux sécheresses.

1.1 Le risque sécheresse et ses conséquences régionales dans le contexte du changement climatique

Quand on parle de sécheresses on se projette plus facilement sur des territoires africains, asiatiques ou encore australiens. En effet, en Asie, la forte dépendance de l'agriculture à l'eau d'irrigation (El-Sherbini, 1977 ; Burns, 1993 ; Rosegrant, 1993) a rapidement amené les scientifiques à se questionner sur l'augmentation de la fréquence des sécheresses avec le changement climatique (Jacobs, 1996 ; Miehe, 1996 ; Smit et Cai, 1996 ; Lal *et al.*, 1999 ; Zou *et al.*,

2005) et l'augmentation de l'occurrence d'El Niño (Garnett et Khandekar, 1992 ; Harger, 1995a ; Harger, 1995b ; Bates *et al.*, 2008). Les sécheresses sont également un risque régulier en Australie où les impacts sur l'agriculture peuvent être catastrophiques (Peake *et al.*, 1979 ; Unwin et Kriedemann, 1990 ; Foran et Stafford Smith, 1991 ; Chapman *et al.*, 1993). La grande sensibilité écologique du Sahel face aux sécheresses explique la volonté des chercheurs à identifier les causes de cet aléa (Greene, 1974 ; Bruins *et al.*, 1986 ; Odhiambo, 1991 ; Buchanan-Smith et Downing, 1992). Les conséquences importantes sur la population dans ces régions du monde expliquent l'intérêt de son suivi. Le changement climatique annoncé par les chercheurs du GIEC dans leurs différents rapports (1990, 1995, 2001 et 2007) fait état d'une augmentation des températures à l'échelle globale ainsi qu'une modification des régimes pluviométriques. Ainsi, sur des régions déjà sensibles au risque sécheresse, la situation pourrait empirer tandis que des régions encore peu atteintes par cet aléa à l'heure actuelle y deviendraient également sensibles. L'importance de la ressource en eau pour la vie, la santé et l'économie fait donc de la sécheresse un aléa climatique important à prendre en compte dans de nombreuses régions du globe.

1.2 Le risque sécheresse en France

La France fait notamment partie de ces régions sensibles à cet aléa climatique. Le climat tempéré qui y règne limite l'apparition d'évènements climatiques extrêmes par rapport à d'autres régions du monde. Les épisodes secs y apparaissent moins dévastateurs que dans d'autres régions. Il n'empêche que les sécheresses ont eu des impacts notables et variés en France, en faisant un aléa important à suivre (Brochet, 1977 ; Courault *et al.*, 1994 ; Blanchard *et al.*, 2007 ; Najac *et al.*, 2010). Dans le rapport intermédaire du projet CLIMSEC, Vidal (2009) présente des cartes de la variation de l'indice d'humidité des sols SWI (Soil Wetness Index) à l'échelle de la France (figure 1.1). Cet indice permet d'illustrer la teneur en eau des sols et est ainsi révélateur de l'intensité des épisodes de sécheresses. Les tendances visibles à l'échelle du pays mettent en évidence des différences régionales. Les régions Pays de la Loire et Centre, ainsi que le sud-est français connaissent des sécheresses pédologiques plus précoces et plus longues que le reste de la France. Durant les mois de juillet, août et septembre, toute la France est touchée par une sécheresse des sols, excepté en montagne (Massif Central, Alpes, Jura, Vosges, Pyrénées). Cette différence de sensibilité fait que l'aléa sécheresse est étudié différemment d'une région à l'autre. En région méditerranéenne, tout comme dans le sud-ouest de la France, du fait d'épisodes secs réguliers, les chercheurs s'intéressent plus particulièrement au suivi de leur durée et intensité (Douguedroit, 1980 ; Galloy, 1982 ; Lambert *et al.*, 1990 et 1991 ; Iglesias *et al.*, 2007), ainsi qu'à leur impact sur l'agriculture, lié à l'irrigation, et le tourisme principalement (Laaidi, 1997 ; Ducreux, 1991, Margat et Vallée, 1999). Les sécheresses en montagne, bien que plus rares, font également l'objet d'études du fait de leurs effets sur l'agriculture et l'industrie hydro-électrique (Blanchard, 1922 et 1942 ; Gex, 1925 ; Blanchet, 1977 et 1992 ; Aussenac, 1978 ; Sanson, 1950 ; Nettier, 2010 ; Astrade *et al.*, 2011 ; RHyTMME, 2011). Une autre région française, le Centre, est sensible aux sécheresses de part son économie agricole (liée à la nappe de Beauce) et nucléaire (donc dépendante du débit de la Loire).

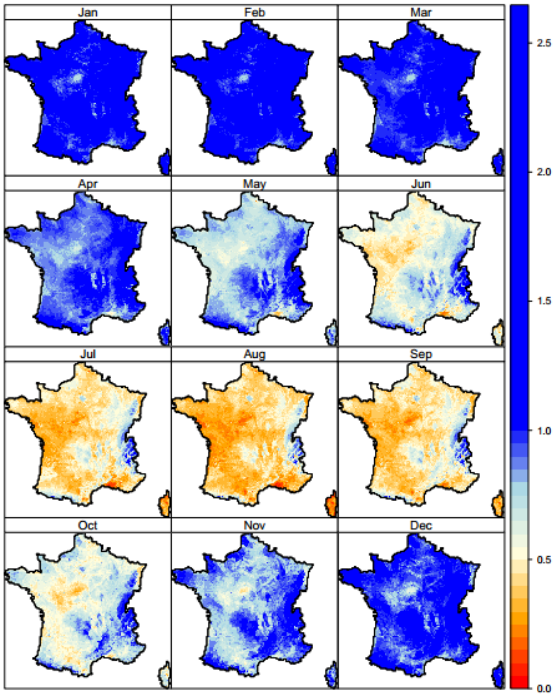


Figure 1.1 Moyennes mensuelles du SWI sur la période 1958-2008 (Vidal, 2009)

1.3 Le risque sécheresse en Bretagne

Pour une région où les précipitations sont bien réparties au cours de l'année, telle que la Bretagne, on s'intéresse autant à la fréquence d'occurrence de l'évènement sec qu'à sa durée et son intensité. Parmi les études majeures des sécheresses en Bretagne on peut notamment citer les travaux de Mounier (1965 et 1977) dans lesquels il s'est appuyé, entre autres, sur les formules d'évapotranspiration potentielle (ETP) de Thornthwaite (1948) pour étudier les effets des sécheresses sur le couvert végétal. Encore peu utilisée dans les années 1960, l'évapotransporation potentielle devient rapidement le paramètre à prendre en compte dans toute analyse édaphique des sécheresses (Yao, 1974 ; Reicosky and Deaton, 1979 ; Mogensen, 1980 ; Riou et Seguin, 1990). Dans la lignée de ce type d'étude, Dubreuil (1994 et 1997) s'est également intéressé aux sécheresses agricoles en Bretagne en intégrant l'utilisation des images satellites. Les géographes s'intéressant aux conséquences du manque d'eau sur l'occupation du sol peuvent en effet s'appuyer sur la télédétection, qui s'avère être un bon outil d'analyse dans ce contexte (Tucker, 1980 ; Tucker et Choudhury, 1987 ; Lepoutre et Vidal, 1989 ; Jacqueminet, 1990 ; Seguin *et al.*, 1991 ; Câmara *et al.*, 1996 ; James, 1996 ; McViccar et Jupp, 1998 ; Dubreuil *et al.*, 2010 ; Guyet *et al.*, 2012). Mounier et Dubreuil, dans leurs études respectives des sécheresses en Bretagne, prennent en compte une situation pédologique moyenne à l'échelle du territoire. Les bilans hydriques qu'ils ont utilisés fonctionnent sur la base d'une taille de réserve utile fixe de 125 mm. Soubeyroux *et al.* (2011) précisent ce point en affirmant que les études sur les sécheresses réalisées avant les années 2000 focalisent sur les précipitations et ne prennent pas en compte les caractéristiques hydriques des sols. Or cette donnée prend toute son importance quand on connait la diversité spatiale pédologique et climatique en Bretagne. Celle-ci est notamment décrite par Verheye (1991) : les sols de l'est du territoire breton ont principalement un régime xérique atténué, c'est-à-dire qu'ils sont affectés par une sécheresse d'été prolongée, qui ne peut être

compensée par l'humidité du sol. Au nord, les sols ont un régime humide continu du fait d'une bonne répartition de la pluviosité au cours de l'année ; le centre et le sud-ouest du territoire connaissent une variante de ce régime, où le climat humide est bénéfique à des sols peu profonds qui, du fait d'une faible réserve hydrique, tendent à s'assécher l'été. L'alimentation en eau de la végétation dépend de la réserve utile des sols, qui est liée à la nature des sols. Les réservoirs hydriques sont donc très variables spatialement. Aussi le suivi des sécheresses présenté ici intégrera la pédologie régionale afin de proposer des résultats au plus près de la réalité du territoire. La simulation du climat au 21ème siècle apportant son lot d'incertitudes, il est important de représenter au mieux les autres paramètres étudiés afin de limiter les biais.

Si la Bretagne bénéficie d'une image de territoire humide dans l'esprit populaire, elle en reste tout de même sensible aux grandes sécheresses. Au cours de la période 1942-1949 qui fût très sèche à l'échelle nationale, le territoire breton a principalement ressenti la succession d'épisodes secs à partir de 1946 (Pardé et Sanson, 1950). Cette succession d'années sèches a eu pour conséquence un abaissement des nappes phréatiques, une diminution du débit des cours d'eau, ainsi qu'un début de dépérissement des grands arbres. Dans la deuxième moitié du 20ème siècle, trois années ont été particulièrement sèches dans les régions de l'ouest et du nord-ouest : 1959, 1976 et 1989, où le déficit en eau eut notamment des effets désastreux sur l'agriculture au nord-est de la Bretagne (Macé et Meynier, 1978 ; Leroux *et al.*, 1992 ; Dubreuil et Planchon, 2009 ; Lamy et Dubreuil, 2010) et sur la forêt (Aussenac, 1978). Mounier (1977) a ainsi mis en évidence une trop forte demande en eau de la végétation en Bretagne orientale, par rapport à la quantité disponible. L'utilisation d'eau d'irrigation pour assurer une bonne croissance des végétaux est dès lors étudiée comme recours en cas de sécheresse sévère (Linder *et al.*, 1987 ; Itier *et al.*, 1989 ; Ruelle *et al.*, 1991 ; Bootsma *et al.*, 1996 ; Morardet *et al.*, 1998 ; Stone *et al.*, 2001 ; Bouarfa *et al.*, 2011). Sanson (1944) recense également les sécheresses intenses qui ont eu lieu depuis le 14ème siècle jusqu'à la première moitié du 20ème siècle. On notera ainsi les années 1536 et 1540 où « *la plupart des fontaines bretonnes se sont taries et où les grosses rivières sont devenues de faibles ruisseaux dès le printemps et jusqu'à la fin de l'été* ». Ces années-là, les moissons commencèrent en juin en Bretagne. Les chaleurs et la sécheresse de 1762 ont eu pour conséquence la destruction complète des récoltes de blé noir en Bretagne. En 1906 une grande partie du territoire français connaît une sécheresse presque absolue au mois de juin ; on ne recueille que 10 mm d'eau à l'intérieur de la Bretagne entre le 1er juin et le 21 juillet. De février à novembre 1921 le régime des précipitations équivalait au quart des normales régionales dans le nord-ouest du pays.

L'agriculture est, parmi les activités en lien avec la nature, la plus dépendante du climat (Monteith, 2000). On a en effet pu remarquer la forte sensibilité des herbages et maïs fourrager à des évènements secs estivaux importants (Carrega *et al.*, 2004).

1.4 Le changement climatique de l'échelle globale à l'échelle régionale

Les projections du changement climatique, telles que proposées par le GIEC, sont réalisées à l'échelle du globe par des modèles climatiques globaux (MCG). La descente d'échelle est dès lors obligatoire pour toute étude régionale car l'utilisation de MCG ne peut être effectuée à l'échelle locale (von Storch *et al.*, 1992). En effet, les MCG ne permettent ni de traduire les évènements de

type orageux ni de rendre compte de l'effet de l'orographie et de l'occupation du sol sur le climat à méso-échelle (Schneider, 1992). Les MCG, qui peuvent convenir à de grandes régions uniformes telles que la savane ou une forêt tropicale, ne sont donc pas adaptés à des régions hétérogènes telles que la Bretagne. Le passage des MCG aux modèles climatiques régionaux (MCR) se fait par descente d'échelle selon diverses techniques (Giorgi et Mearns, 1991, Hewitson et Crane, 1996), où l'emboîtement d'échelle peut être contraint par la géographie locale, comme l'explique Hewitson (1992), notamment avec l'effet du relief sur l'écoulement des basses couches. Les méthodes de régionalisation les plus utilisées sont la méthode dynamique et statistique. La méthode dynamique est globalement privilégiée (Wood *et al.*, 2004 ; Rummukainen *et al.*, 2001) car elle offre de meilleurs résultats mais son coût en temps et matériel explique l'attrait de la méthode statistique (Oelschlägel, 1995 ; Corte-Real, 1995 ; Enke et Spekat, 1997 ; Quintana Segui *et al.*, 2010 ; Timbal *et al.*, 2009 ; Wilby *et al.*, 1999 ; Tolika *et al.*, 2008). Les MCR permettent dès lors aux scientifiques et aux décideurs locaux d'étudier les impacts du changement climatique sur des activités socio-économiques à l'échelle d'un territoire. C'est notamment le cas du programme RegIS (Holman *et al.*, 2002) qui traite des impacts du changement climatique sur une partie du Royaume-Uni et qui a permis de mettre en évidence l'attrait des cultures de printemps par rapport à celles d'hiver. Cet attrait est dû au réchauffement et requiert cependant un apport d'eau par irrigation, notamment pour la betterave et les pommes de terre. A plus grande échelle, le projet Européen ARIDE (Demuth et Stahl, 2001) s'intéresse à l'évolution des sécheresses hydrologiques avec le changement climatique. Pour cela, un des objectifs est de comprendre les processus conduisant à des sécheresses étendues sur l'Europe à travers le suivi des précipitations et des écoulements, entre autres. En France, le programme CLIMSEC mené par Météo-France (Soubeyroux *et al.*, 2011) s'intéresse aux trois types de sécheresses (météorologiques, agricoles et hydrologiques) à l'échelle de la France métropolitaine. Différents indices, adaptés à l'identification des trois types de sécheresses, sont ainsi étudiés sur une période de passé récent mais aussi sur des futurs probables au 21ème siècle selon trois scénarios du GIEC. L'évolution de la ressource en eau avec le changement climatique est une question importante du fait de son impact socio-économique (Arnell, 2004 ; Breshears *et al.*, 2005 ; Miles *et al.*, 2000).

Les résultats du 4ème rapport du GIEC révèlent une augmentation de la température moyenne annuelle en Bretagne comprise entre 2 et 3°C à la fin du 21ème siècle, par rapport à la fin du siècle précédent, selon le modèle MMD et le scénario A1B. En termes de variation saisonnière les températures augmenteraient l'hiver de 2°C tandis que l'été l'augmentation serait comprise entre 2,5 et 3,5°C. De plus, la répartition plus épisodique des précipitations engendrerait une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses (Knapp *et al.*, 2008). La détérioration de la végétation (Briske *et al.*, 2005) rendant les élevages vulnérables aux sécheresses (Graux, 2011), toute l'agriculture peut être touchée par des épisodes secs sévères. Le changement climatique observé dès les années 1970 a une conséquence notable sur les sécheresses en France, puisque de 1976 à 2005 au moins une région a connu une sécheresse 2 années sur 5 (Itier, 2008) ce qui est le double de la situation observée sur la première moitié du 20 siècle. Des études récentes ont confirmé le risque d'augmentation des sécheresses et des vagues de chaleur en France (Moisselin *et al.*, 2006 ; Caballero et Noilhan, 2007). Le GIEC (AR4, chapitre 11) propose des projections du climat en Europe selon un découpage Europe du Nord et Europe du Sud -

Méditerranée. La Bretagne étant située à la limite de ces deux secteurs, il est nécessaire de suivre les analyses proposées pour le nord et le sud de l'Europe pour cerner les possibilités d'évolution climatique à l'interface de ces deux secteurs. On peut notamment voir les différences entre la partie Nord de l'Europe et la partie Sud avec la figure 1.2 qui présente l'évolution attendue sur disponibilité de l'eau et le rendement du blé, en fonction de l'augmentation globale de la température. Entre des tendances à l'augmentation pour le nord de l'Europe et à la diminution au sud, la situation de la Bretagne mérite donc d'être étudiée par des analyses plus fines.

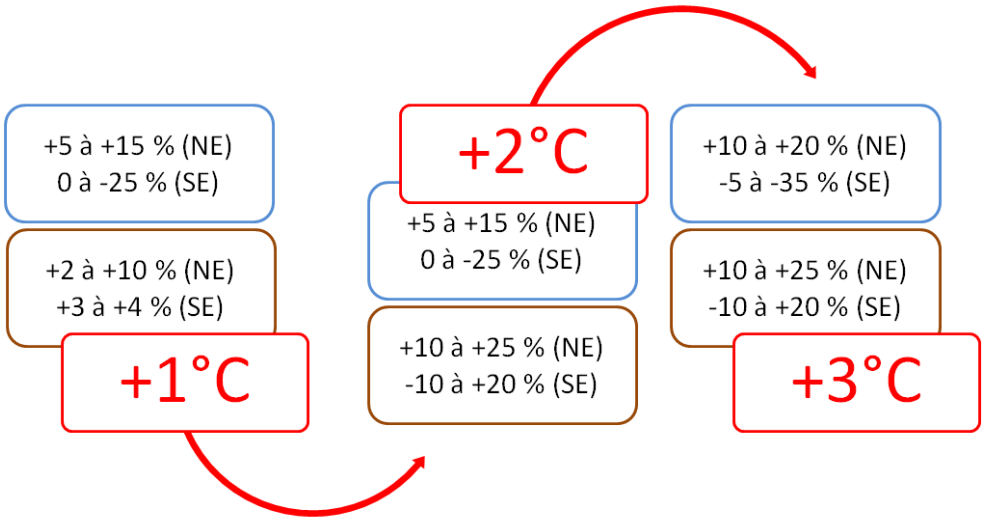


Figure 1.2 Conséquence de l'augmentation de la température globale (rouge) par rapport à la période 1980-99 sur la disponibilité de l'eau (bleu) et sur le potentiel de rendement de blé (marron), pour l'Europe du Nord (NE) et du Sud (SE) d'après le 4ème rapport du GIEC

Que ce soit à l'échelle de la France, ou d'une région comme la Bretagne, la vulnérabilité de l'économie face à l'aléa sécheresse a bien été prouvée par le passé. Dans le contexte d'un climat changeant il est donc important de mieux comprendre la vulnérabilité de ces activités, telle que l'agriculture, face à la diminution de la disponibilité de la ressource en eau.

1.5 Agriculture durable et changement climatique

Face au changement du climat, l'Homme ne peut que chercher à atténuer ces changements et à adapter son mode de vie et ses systèmes économiques. Le développement durable, qui s'est imposé en une quinzaine d'années au niveau politique et économique, fait partie des concepts porteurs pour les hommes, d'un développement pacifiste et viable en lien avec l'environnement (Godard et Hubert, 2002). La prise en compte de la nature en tant que patrimoine commun et espace fini est effectuée à différents niveaux depuis l'international jusqu'au local. Godard et Hubert (2002) rappellent également les conséquences du développement durable sur l'agriculture qui devra s'adapter à des évolutions du climat, mais également à l'évolution des demandes des consommateurs, ainsi qu'à l'évolution des règles du commerce international. L'explication de la large acceptation du développement durable par divers milieux tient du fait de ses contours flous, faisant que chacun y trouve un intérêt. Cependant, si le développement durable prend de l'ampleur d'un point de vue scientifique et politique, la population, pas toujours bien informée, peut prendre peur face à ces changements annoncés peu clairement. Le développement durable,

pour être accepté et intégré, doit donc bénéficier d'études poussées mais aussi d'une bonne communication.

Fort de cette dynamique, la déclaration de Cork (novembre 1996) fait du développement durable le cœur de la réflexion sur le développement rural à l'échelle de l'Union européenne (Landais, 1998). Selon Thompson (1997) on peut distinguer deux approches durables s'appliquant à l'agriculture : la suffisance des ressources et l'intégrité fonctionnelle. La première consiste en la quantification des ressources pour améliorer, entre autres, leur rendement ; la seconde prend en compte les activités humaines influant sur les modes de gestion des ressources. Selon ce dernier type, la durabilité est fonction, non pas de la ressource en tant que telle, mais du système complet, intégrant un volet social, économique et technique s'appuyant sur des ressources. Godard et Hubert (2002) proposent dès lors une définition de l'agriculture durable intégrant deux composantes : la viabilité d'une agriculture qui entretient les fonds et capacités dont elle dépend, incluant l'adaptation aux changements climatiques, politiques et économiques ; la contribution de l'agriculture à la durabilité des territoires et des collectivités notamment par insertion dans l'économie locale, régionale et nationale, en prenant en compte ses effets positifs (fixation du carbone atmosphérique) et négatifs (pollutions diverses) sur l'environnement. En ce qui concerne les voies d'adaptation sur l'agriculture, Itier (2008) en mentionne plusieurs basées sur l'agronomie ou la génétique. Pour ce dernier il mentionne les techniques d'esquive et d'évitement. Alors que la première méthode consiste à utiliser des variétés précoces à cycle court, la seconde se focalise sur une croissance aérienne diminuée, ou souterraine augmentée, pour augmenter la quantité d'eau perçue par le végétal et diminuer les pertes par transpiration. Sur le plan agronomique, Itier (2008) distingue de nouveau une technique d'esquive, basée sur des cultures d'hiver, de celle d'évitement ou tolérance qui s'intéressent à des espèces résistantes à la sécheresse. Ces pistes d'adaptation vont amener les agriculteurs et décideurs locaux à confronter deux approches opposées que sont l'augmentation de la tolérance à la sécheresse du maïs et l'augmentation de la productivité du sorgho (Itier, 2008).

1.6 Les sécheresses : définition et étude grâce au bilan hydrique

1.6.1 Définition des sécheresses

Etudier les sécheresses sous nos latitudes semble moins pertinent que dans des régions de basses latitudes, où des durées d'ensoleillement plus fortes et des pluies plus rares engendrent des évènements secs plus réguliers. Il faut dès lors distinguer la notion d'aridité de la sécheresse. Le terme aride est attribué à un climat où les précipitations sont insuffisantes pour assurer le maintien de la végétation, car toujours inférieures à l'évapotranspiration (Glossaire International d'Hydrologie). Le terme sécheresse caractérise une situation temporaire, ou saisonnière, de déficit en eau qui peut se produire sous des conditions climatiques humides, comme le climat océanique. On distingue la sécheresse relative, représentant le manque d'eau par rapport aux besoins locaux, de la sécheresse absolue, caractérisée par une absence d'eau (Hufty, 2001). A partir de cette définition générale, on peut spécifier plusieurs types de sécheresses (Lambert, 1996) :

- Météorologique, aussi appelée atmosphérique, caractérisée par un déficit de précipitations sur une période déterminée par le climat d'une région. En France on parle de sécheresse à partir de 15 jours où les précipitations sont inférieures à 1 mm/jour.
- Pédologique, aussi appelée agricole ou édaphique, est la conséquence d'une sécheresse atmosphérique importante. On observe dans ce cas un déficit anormal de l'humidité du sol (réserve hydrique) entrainant un stress hydrique pour la végétation en place.
- Hydrologique, qui fait suite à une sécheresse pédologique avancée. L'assèchement des sols peut conduire à un étiage plus ou moins sévère des cours d'eau, ainsi qu'à une baisse du niveau des nappes souterraines et des retenues.

Ces différents niveaux de sécheresse interagissent entre eux selon le diagramme présenté par la figure 1.3. Cette représentation des interactions entre les différents types de sécheresses reste théorique et, pour un espace donné, la situation observée peut être différente.

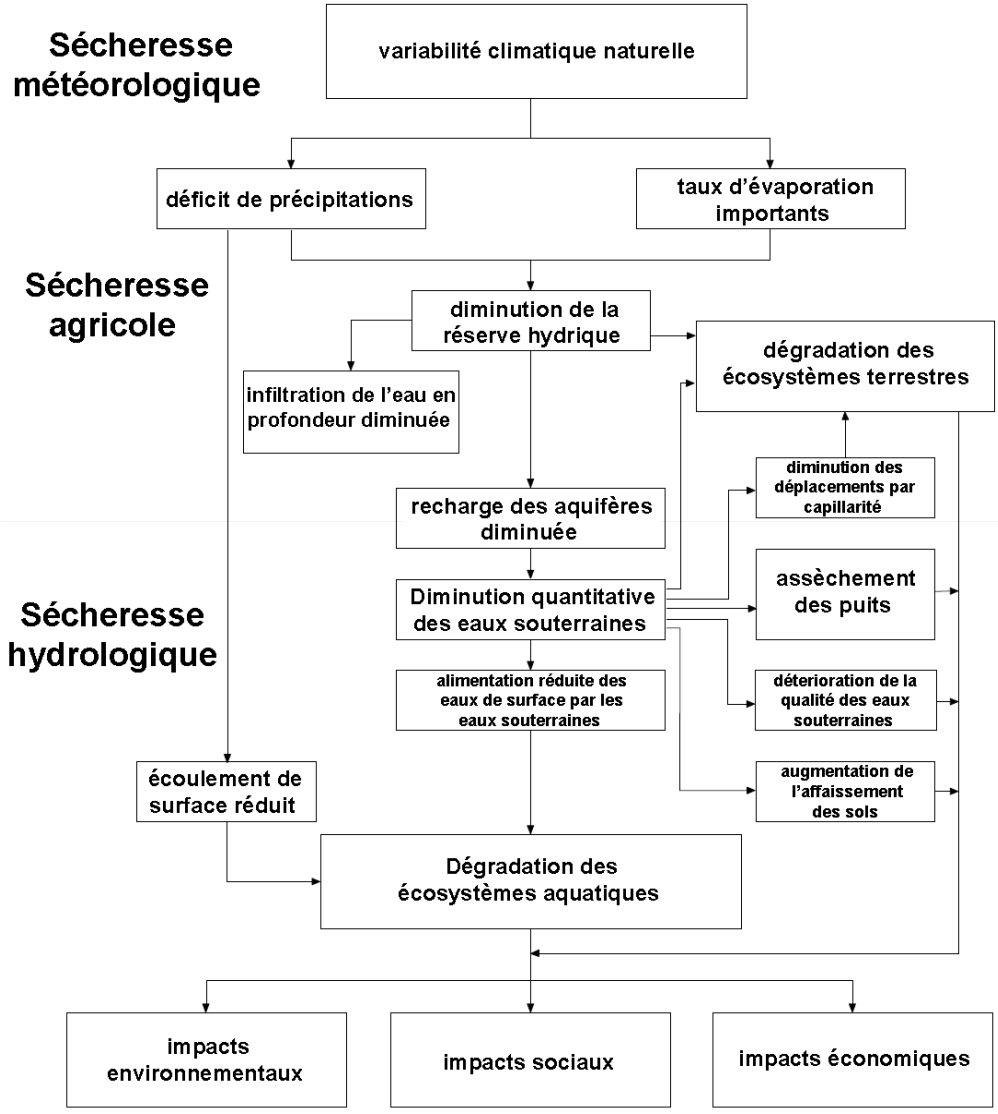


Figure 1.3 Représentation schématique des liens entre les différents types de sécheresse (d'après van Lanen et Peters, 2000)

Les sécheresses pédologiques, de par leur définition, traduisent les impacts d'un déficit de pluie prolongée à l'interface sol – atmosphère d'un territoire. C'est donc le type de sécheresse à suivre si l'on veut identifier la vulnérabilité des activités socio-économiques territoriales en lien avec le sol, telle que l'agriculture.

Différents indices permettent de suivre les sécheresses pédologiques en estimant l'eau disponible pour la végétation à partir de formules plus ou moins complexes. On compte, parmi les plus complexes, l'indice de sévérité des sécheresses de Palmer (PDSI) utilisé aux Etats-Unis d'Amérique. Cet indice prend en compte les différences cumulées pondérées entre les précipitations réelles et requises. Ces dernières dépendent, entre autres, de la recharge du sol, de l'évapotranspiration et du ruissellement (Palmer, 1965). L'indice de Palmer varie de 0 à -2 pour des périodes humides à très légèrement sèches ; de -2 à -4 pour des sécheresses modérées à sévères ; au-delà de -4 le niveau de sécheresse est classé comme extrême. En France, les sécheresses pédologiques sont suivies par Météo-France (Soubeyroux *et al.*, 2008) grâce au Standardized SWI (SSWI) qui dépend de l'indice d'humidité des sols SWI (Soil Wetness Index). Cet indice est calculé au sein de la chaîne de traitement SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU), comprenant un modèle atmosphérique : SAFRAN, un modèle de surface : ISBA, et un modèle hydrologique : MODCOU. Le calcul du SWI est fonction de la teneur en eau du sol, de la teneur en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ (Najac *et al.*, 2010). Le SWI varie globalement de 0 à 1 mais peut dépasser ces valeurs. Quand la valeur de l'indice tend vers 0 cela représente un état sec du sol, voire très sec si l'indice devient négatif. Quand le SWI tend vers 1 ou le dépasse, le sol est dit humide et peut atteindre un état de saturation.

Parmi les indices de sécheresses moins complexes à calculer on peut citer le déficit climatique et le déficit d'évaporation. Le déficit climatique correspond à la différence de précipitations avec l'évapotranspiration potentielle. Il illustre ainsi le manque d'eau éventuel pour combler la demande climatique. Le déficit d'évaporation (DE), également basé sur une formule peu complexe (1), prend cependant en compte un système plus complet que le déficit climatique puisqu'il intègre l'état pédologique. En effet, le calcul du déficit d'évaporation dépend de l'évapotranspiration réelle (ETR) qui est obtenue par calcul du bilan hydrique.

$$DE = ETP - ETR \quad (1)$$

Le bilan hydrique correspond à un cycle partiel de l'eau (Pédelaborde, 1968 ; Franquin et Forest, 1977 ; Lambert, 1996) et est détaillé dans la partie suivante du fait de son intérêt pour le suivi des sécheresses. Ce type de bilan est en effet particulièrement utilisé pour suivre le comportement de l'eau à l'interface sol - atmosphère afin d'en déduire les vulnérabilités aux sécheresses de la végétation (Vaadia *et al.*, 1961 ; Mounier, 1965 ; Choisnel, 1977 ; Mahboubi, 1980 ; Dubreuil, 1994 ; Milly, 1994 ; Granier *et al.*, 1995 ; Ritchie, 1998 ; Soltani et Sinclair, 2012).

1.6.2 Un outil d'identification de la sécheresse pédologique : le bilan hydrique

La sécheresse atmosphérique s'estime facilement à partir de la quantité de précipitations tombée sur un secteur sur une période donnée. Pour repérer les sécheresses pédologiques la situation est

plus complexe puisqu'il faut faire interagir les données climatiques avec des données pédologiques. Le bilan hydrique est dès lors particulièrement adapté au suivi des sécheresses des sols, puisque dans sa version complète il intègre les précipitations, l'évaporation, l'écoulement (gravitaire et latéral) et l'humidité du sol et du sous-sol (Pédelaborde, 1968 ; Trzpit, 1978, Turc et Trzpit, 1985). L'humidité du sol est perçue à travers la réserve utile du sol qui correspond à la capacité d'un sol à retenir l'eau et traduit la quantité d'eau maximale utilisable par les plantes (Pédelaborde, 1968). La taille des réserves utiles est fournie par des pédologues à l'issue de campagnes de terrain au cours desquelles ils récoltent des informations relatives à la texture du sol, la granulométrie, la teneur en éléments grossiers et en matière organique, la profondeur du sol et la densité apparente (Bruand *et al.*, 1996 ; Trouche et Morlon, 1999). Tous ces renseignements permettent de calculer la réserve utile du sol. On distingue donc la réserve utile, fixe dans le temps car fonction de la nature du sol, de la réserve hydrique des sols, qui traduit la teneur en eau du sol à un moment donné. Dans une version simplifiée du bilan hydrique (figure 1.4), qui sera utilisée dans cette thèse, l'écoulement horizontal n'est pas pris en compte.

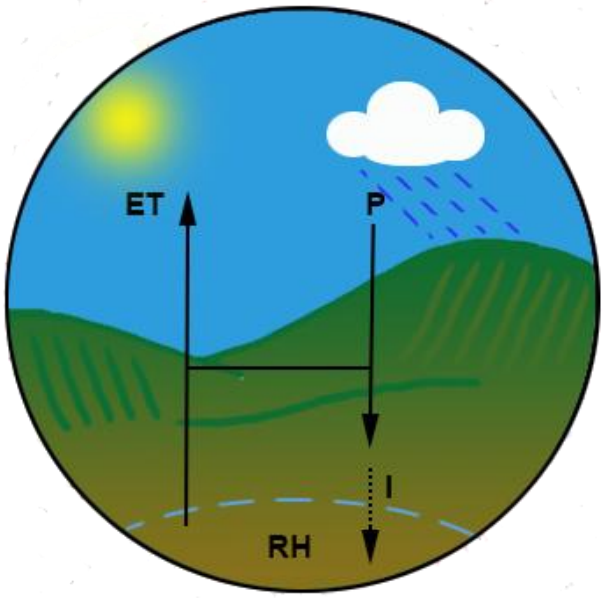


Figure 1.4 Modèle de bilan hydrique

Le bilan hydrique traduit ainsi un système où les précipitations (P) non évaporées vont s'infiltrer dans le sol (I) et alimenter la réserve hydrique des sols (RH). L'évapotranspiration (ET) est alimentée par l'eau des pluies ainsi que par celle contenue dans la réserve utile, mais également par la transpiration des végétaux. Le bilan hydrique peut être utilisé à différentes échelles de temps : quotidien, décadaire, mensuel. Les variables climatiques et pédologiques interagissent dans un bilan hydrique selon les formules détaillées ci-dessous. Tout d'abord l'ETR est calculée à partir de l'évapotranspiration potentielle, des précipitations et de la réserve hydrique (2). Une fois l'ETR obtenue on calcule la valeur de réserve hydrique après alimentation de la végétation. Ce calcul pouvant vite devenir complexe à expliquer, les formules de RH sont détaillées en deux temps. La formule 3 présente l'assèchement estival (P < ETR) au cours duquel la valeur de RH va diminuer. La formule 4 illustre une situation hivernale (P > ETR) où, grâce à des précipitations plus importantes et une ETP plus faible, la teneur en eau des sols augmente.

$Si\ P < ETP : ETR = P - RH_i$ $\qquad$ $Si\ P > ETP : ETR = ETP$ (2)

$Si\ P < ETR :$

$Si\ ETR - P < RH_{i-1}\ alors : RHi = RH_{i-1} - (ETR - P)\ ;\ sinon : RH_i = 0$ } (3)

$Si\ P > ETR :$

$Si\ P - ETR > (RU - RH_{i-1})\ alors : RH_i = RU\ ;$

$sinon : RH_i = RH_{i-1} + (P - ETR)$ } (4)

avec RH_i : état de la réserve hydrique actuel ; RH_{i-1} : état de la réserve hydrique antérieur ; RU : taille de la réserve utile.

On estime généralement que la réserve hydrique est à son maximum à la fin de l'hiver (Amat *et al.*, 2008). Ce qui permet de commencer le cycle annuel du bilan hydrique au mois de mars avec $RH_i = RU$. Au cours du printemps et de l'été RH va diminuer, pour se recharger à l'automne. On a ainsi un cycle annuel de la réserve hydrique (Lambert, 1996).

1.7 Les climats bretons façonnés par la géographie de la péninsule

1.7.1 Les grandes tendances à l'échelle du territoire

Le climat d'une région est fortement dépendant de sa géographie. Dans le cas de la Bretagne, l'influence de l'océan, de l'orientation des côtes et du relief génère une diversité climatique importante à l'échelle de la région. Le climat général de la Bretagne est qualifié de tempéré océanique de façade ouest. Il se caractérise par des hivers doux et humides et des étés frais généralement moins arrosés. Ainsi en janvier les températures moyennes sont généralement comprises entre 4 et 7°C et en juillet-août entre 15 et 20°C. Les précipitations annuelles, comprises le plus souvent entre 600 mm et 1000 mm, présentent une importante variation quant à leur répartition spatiale, ainsi Mounier (1979) estime que « *le tiers à peine de la péninsule reçoit plus de 1000 millimètres d'eau par an* ». Ces pluies sont plus abondantes durant l'automne et l'hiver qu'en été, le minimum étant atteint à la fin de l'été et le maximum au début de l'hiver. Mais les régimes purement océaniques cèdent souvent la place, à l'intérieur des terres et vers l'est, à un régime moins net où tous les mois connaissent des hauteurs d'eau moyennes très voisines et où l'amplitude thermique est plus importante (figure 1.5) : « *Si l'arrière pays est moins élevé, ce qui est le cas dans l'ouest français, les précipitations tendent à s'uniformiser selon les saisons (...). On passe, dans ces régions, d'un climat océanique pur, limité à peu près au littoral, à un régime océanique confus* » (Péguy, 1970). L'été est généralement plus chaud en s'éloignant de la côte, tandis que l'hiver les températures sont plus basses à l'intérieur des terres, surtout sur les principaux reliefs qui, mêmes modestes, suffisent à abaisser de quelques degrés les températures moyennes.

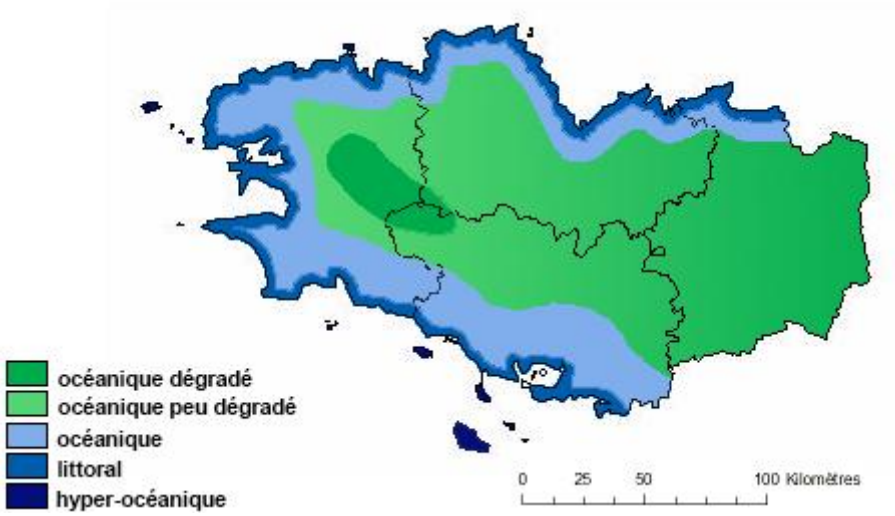


Figure 1.5 Schéma simplifié des limites des climats bretons (d'après les cartes climatiques détaillées de St Brieuc-Lorient, Brest, Rennes et Nantes, source : CNRS - équipe de recherche n°30, 1980)

De façon générale, l'hypsométrie continue de jouer le rôle déterminant dans la répartition des précipitations mais, très vite, l'éloignement de la mer et la situation topographique par rapport au flux humide deviennent tout aussi importants. Ainsi les bassins topographiques, même de dimensions modestes, sont sensiblement moins arrosés que les hauteurs environnantes : près de 300 millimètres d'écart entre Rennes et Paimpont, davantage encore entre la côte de Penthièvre et les hauteurs du Mené. Les gradients pluviométriques ne sont donc pas négligeables et entraînent une réelle diversité des conditions régionales et locales. Le climat océanique se dégradant très rapidement avec l'éloignement à la côte, on commence à parler d'un « climat océanique dégradé » à l'est de la ligne St Brieuc - Vannes. De ce fait, les conditions climatiques du bassin de Rennes se rapprochent davantage de celles observées dans le centre du bassin Parisien que dans la partie occidentale de la Bretagne (Brisse *et al.*, 1982 ; Pagney, 1988 ; Dauphiné et Ottavi, 1995). A Nantes, du fait d'une plus grande proximité à l'océan par rapport à Rennes et d'une situation plus méridionale, le rythme pluviométrique est comparable à celui de la Bretagne occidentale mais avec un volume de précipitations légèrement inférieur.

Chacune de ces grandes tendances climatiques connaît des variations locales. Celles-ci peuvent être liées au relief entraînant l'existence de corridors naturels pour le vent par exemple, mais aussi à l'orientation des côtes pouvant protéger des terres par rapport aux vents dominants. Les températures moyennes variant peu à l'échelle du territoire breton, ce sont les précipitations qui permettent le mieux de distinguer des nuances à l'intérieur du domaine de climat océanique. Les climats du littoral et des terres vont ainsi être présentés dans leur diversité dans les paragraphes suivants.

1.7.2 Le climat du littoral : une influence maritime variable

Alors que le climat océanique concerne une grande partie de la France, l'influence maritime est limitée à quelques dizaines de kilomètres sur la bordure du continent (Planchon, 1994, 1997 et 1998). En Bretagne, on observe ainsi un climat océanique à influence maritime pour les stations de Brest, Lorient et Dinard, tandis que cette influence maritime s'atténue puis disparaît pour les

villes se trouvant plus à l'intérieur telles que Nantes et surtout Rennes (Mounier, 1964). Le climat du littoral est donc, avec sa variante hyper-océanique, le plus doux de la région du fait de l'influence maritime. La présence de l'océan encadrant la Bretagne joue également sur la variabilité du climat, les vents faisant se succéder, parfois rapidement, des épisodes pluvieux et des ciels clairs. Cependant, les côtes bretonnes présentent également des variations climatiques, plus ou moins fortes, entre elles. Celles-ci sont dues à l'indentation et à l'orientation des côtes par rapport aux vents dominants. Ainsi les côtes du Finistère, directement exposées aux vents d'ouest, sont les plus venteuses et les plus arrosées de Bretagne, tandis que les côtes du Morbihan, plus protégées, se trouvent être les plus ensoleillées de la région. Entre ces deux situations se trouve le littoral nord, bordant la Manche, qui présente une partie orientale relativement ensoleillée. Pour illustrer les particularités du climat du littoral breton, des diagrammes ombrothermiques ont été réalisés pour les stations de Brest, Lorient et Dinard (figure 1.6). Les données utilisées proviennent de la base de Météo-France pour la période 1951-1980, afin de présenter la situation avant les années 1980 où le changement climatique commence à se voir plus nettement.

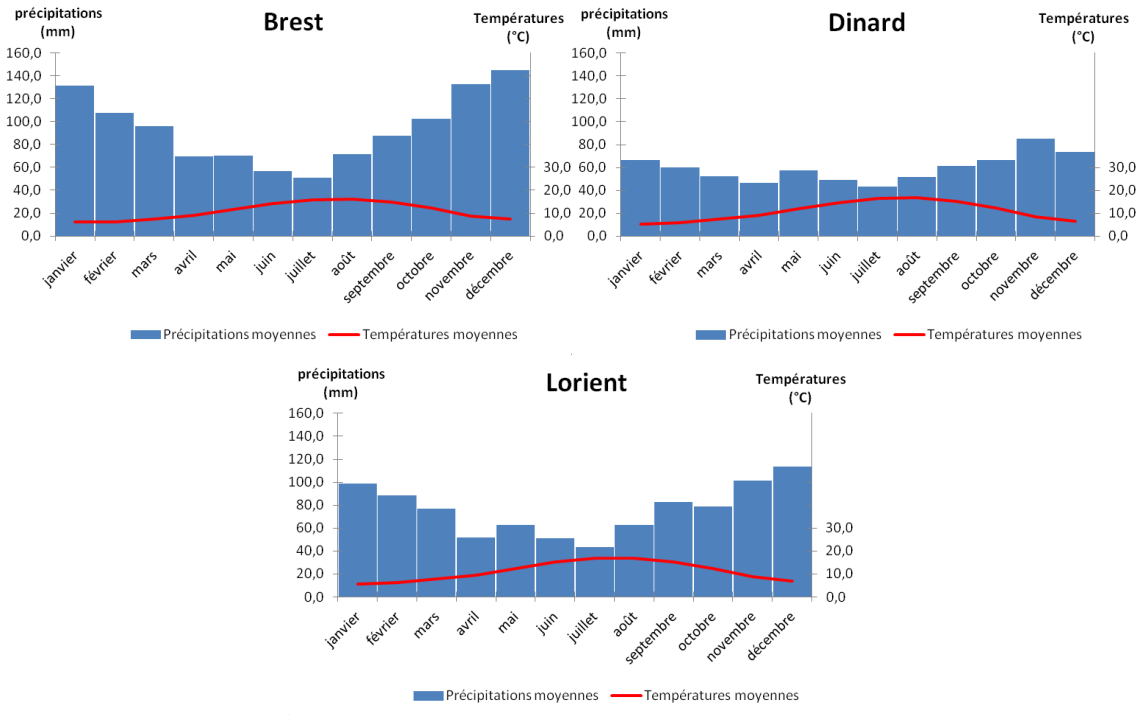


Figure 1.6 Diagrammes ombrothermiques de 3 stations littorales bretonnes : Brest, Dinard et Lorient pour la période 1951-80 (source des données : Météo-France)

Sur ces diagrammes ombrothermiques on remarque que les régimes pluviométriques de Brest et Lorient sont proches, la principale différence se situant au niveau des maxima mensuels qui sont d'environ 140 mm en janvier et décembre à Brest tandis qu'à Lorient, pour ces mêmes mois, le total mensuel maximal n'est que légèrement supérieur à 100 mm. Le diagramme ombrothermique de la station de Dinard présente des précipitations inférieures à celles de Brest et Lorient. La variabilité pluviométrique intra-annuelle est cependant similaire aux deux autres stations puisque l'on retrouve les mois les plus pluvieux sur la période hivernale, tandis que le printemps et l'été sont plus secs. On observe ainsi l'influence de l'océan sur le climat océanique pour les stations de Brest, Lorient et Dinard.

1.7.3 Le climat des terres marqué par la diminution de l'influence océanique

Le climat des régions intérieures de la Bretagne, moins soumis à l'influence maritime que le littoral, conserve tout de même des caractéristiques climatiques océaniques. La figure 1.7 présente ainsi les tendances climatiques de deux stations situées dans les terres : Rennes et Nantes. Tout comme pour les stations littorales, ces diagrammes sont construits à partir d'observations du réseau de Météo-France sur la période 1951-1980. Un des effets les plus notables de la perte progressive de l'influence de l'Océan Atlantique sur les terres bretonnes est l'augmentation de l'amplitude thermique moyenne annuelle.

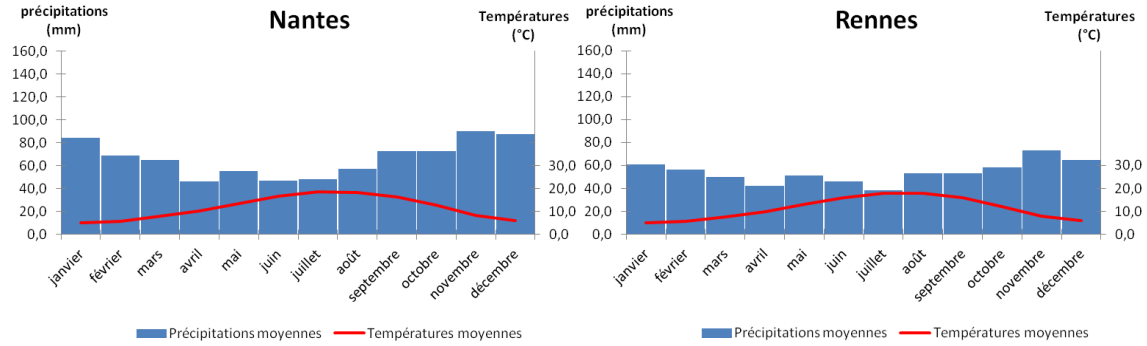


Figure 1.7 Diagrammes ombrothermiques de 2 stations des terres bretonnes : Rennes et Nantes pour la période 1951-80 (source des données : Météo-France)

Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral les hivers sont plus froids et les étés plus chauds. Le second effet que l'on peut mesurer est sur les précipitations qui varient moins que sur la côte et qui sont globalement plus faibles. Le régime pluviométrique de Rennes est, en effet, légèrement différent de ceux de Brest et Lorient, même si on retrouve des similitudes au niveau de l'allure générale du rythme pluviométrique pour les trois stations. Ces stations sont effectivement en moyenne plus arrosées en automne, un peu moins en hiver. Le printemps et l'été sont les saisons les moins arrosées, ponctuées par une pointe pluviométrique en mai (Mounier, 1964). A Rennes les maxima mensuels sont compris entre 60 et 70 mm et correspondent à la période automnale. Cette station a la particularité d'avoir des valeurs de précipitations mensuelles qui varient moins, amplitude de 30 mm, en comparaison des stations de Brest et Lorient, où les amplitudes sont respectivement de 100 et 70 mm. Le diagramme de Nantes se rapproche de celui de Rennes quand on observe les variations mensuelles, mais les précipitations plus abondantes à Nantes, surtout en saison fraîche, traduisent une ambiance maritime que ne connaît pas Rennes.

Le relief a également un impact notable sur le climat. Certes la Bretagne n'est pas la région française la plus accidentée, mais nul besoin d'être en montagne pour observer ses effets sur le climat. Les vallées, creusées par le réseau hydrographique, présentent une amplitude thermique plus importante qu'en altitude (Hufty, 2001). Le relief canalise également le vent et peut en diminuer la vitesse. Les plus hauts reliefs bretons, 385 m dans les Monts d'Arrée, trop modestes pour engendrer un climat montagnard, présentent tout de même un climat différent du reste de la Bretagne occidentale. Les vents y sont plus forts et les températures plus basses que sur le littoral

finistérien, pourtant proche. Les précipitations y sont également plus importantes que sur le reste du territoire breton, puisque le cumul annuel brut de 1100 mm de pluie est régulièrement atteint (Le Lannou, 1950). Le déficit d'évaporation est donc plus faible sur les reliefs bretons que dans les plaines (Dubreuil, 1997). La géologie et le climat des Monts d'Arrée en font un endroit peu propice au développement de l'agriculture principalement occupé par la lande, comme on peut le voir au Ménez Hom (figure 1.8), sommet isolé des Monts d'Arrée mais présentant les mêmes caractéristiques géologiques et climatiques.

Figure 1.8 Panorama depuis le Ménez Hom, alt. 330 m (29) (Crédit photo : Chloé Lamy)

La diversité climatique spatiale ainsi appréciée permet de mettre en évidence des secteurs *a priori* plus sensibles à la sécheresse que d'autre, à l'échelle de la Bretagne. Cet aspect est approfondi dans la partie suivante, où les sécheresses passées sont étudiées à travers leurs fréquences et intensités, mais aussi de leur répartition spatiale pour mieux cerner le risque sécheresse actuel.

L'importance du bocage, avec près de 180 000 km de linéaire de haies en 2008 (DRAAF de Bretagne, 2008) a un effet notable sur le climat breton. Mérot et Desbrosse (1996) mentionnent ainsi l'hétérogénéité climatique parcellaire induite par l'orientation des haies en fonction des vents dominants. Guyot (1983) précise que la hauteur de la haie et sa densité ont un impact sur le comportement du vent suite au passage de la haie (figure 1.9). Il explique ainsi que la longueur de la surface protégée par les haies est proportionnelle à leur hauteur. La figure 1.9 illustre ses propos en mettant en évidence la turbulence du vent au passage d'une haie imperméable (donc dense) qui peut occasionner des dégâts sur la végétation. Tandis qu'au passage d'une haie perméable le comportement du vent est plus stable et est dévié sur une plus grande distance.

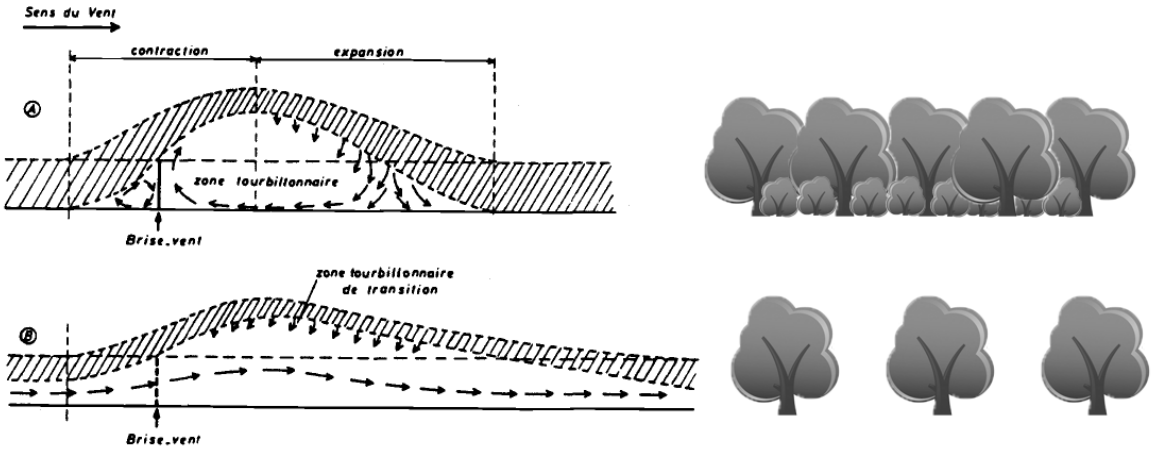


Figure 1.9 Comportement du vent au passage d'une haie, en fonction de sa perméabilité (Guyot, 1983)

C'est la perméabilité de la base de la haie qui est la plus importante car en cas de perméabilité progressive avec la hauteur, la haie se comporte comme une haie imperméable. Alors qu'une haie

peu dense à sa base par rapport à la cime des arbres aura le même effet qu'un brise-vent perméable (Charfi, 1980). Une haie est dite perméable à partir d'une porosité de 25 %.

Dans ses travaux, Guyot (1983) témoigne aussi de l'effet des haies brise-vent sur les microclimats à travers leurs conséquences sur le bilan radiatif. La modification de la vitesse du vent peut, en effet, modifier l'ensemble des échanges énergétiques au voisinage de la surface du sol. Les haies ont également un impact sur les températures (Van Eimern *et al.*, 1964 ; Guyot *et al.*, 1976), l'évapotranspiration potentielle et donc sur les sécheresses. Pour les précipitations c'est l'association au vent qui va occasionner une répartition spatiale modifiée par la présence de haie. En effet, la face au vent de la haie reçoit plus de pluie que la face sous le vent (Guyot, 1983).

1.8 Spatialisation de l'aléa sécheresse en Bretagne

Le risque sécheresse a déjà été étudié dans le nord-ouest français suite aux grandes sécheresses de la seconde moitié du 20ème siècle, qui ont rappelé la sensibilité de ce territoire aux évènements secs. Ainsi Dubreuil (1997) a réalisé le bilan hydrique de plusieurs stations de Bretagne et Normandie afin de mettre en évidence, sur une période moyenne 1961-1990, le déficit mensuel d'évaporation (figure 1.10).

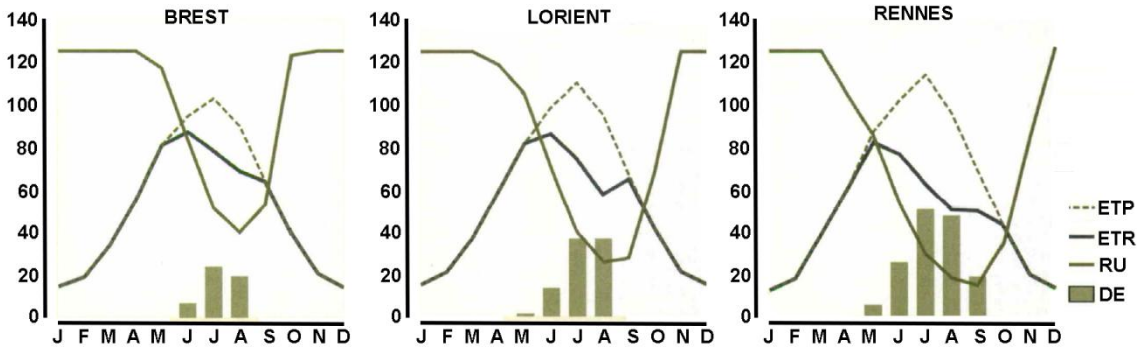


Figure 1.10 Bilans hydriques de 3 stations bretonnes : Brest, Lorient, Rennes, pour la période 1961-1990 calculé sur la base d'une réserve utile identique, égale à 125 mm (Dubreuil, 1997)

Le bilan hydrique utilisé prend en compte une même taille de réserve utile pour les 3 stations, 125 mm, afin de ne suivre que l'aspect climatique des sécheresses. La durée et l'intensité du déficit d'évaporation (DE) varient entre les trois stations. A Brest, la période sèche où l'on observe un DE positif dure 3 mois et reste inférieur à 30 mm mensuel, seuil à partir duquel un mois est dit subsec. A Lorient, la saison sèche commence un mois plus tôt et deux mois sont classés subsecs avec un déficit d'évaporation mensuel tout de même inférieur à 40 mm. A Rennes, la saison sèche dure cinq mois : de mai à septembre, et est plus intense qu'à Lorient avec des totaux mensuels de déficit de l'ordre de 50 mm en juillet et août. Ces graphiques illustrent ainsi un climat plus propice à la sécheresse pour la Bretagne méridionale et orientale (Lorient et Rennes), par rapport à la partie occidentale de la région (Brest).

Mounier (1965) a spatialisé le déficit d'évaporation moyen de la période 1950-64 sur la péninsule bretonne pour les mois d'été. La figure 1.11 révèle ainsi qu'en juillet le manque d'eau est plus important à l'est (30 à 69 mm) qu'à l'ouest (10 à 29 mm) dans les terres. Le littoral présente des valeurs intermédiaires et relativement uniformes sur tout la région.

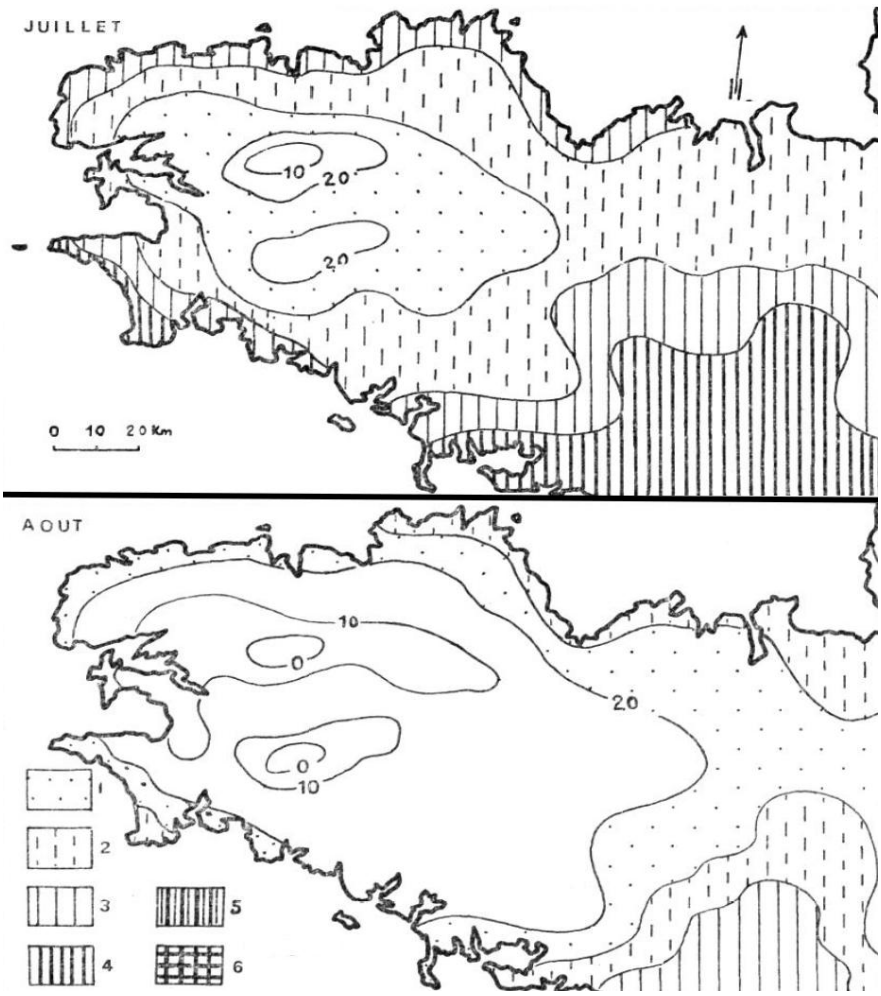


Figure 1.11 Valeurs moyennes du déficit d'évaporation sur la période 1950-64, isorithmes pour les valeurs inférieures à 20 mm, 1 de 20 à 29 mm, 2 de 30 à 39 mm, 3 de 40 à 49 mm, 4 de 50 à 69 mm, 5 de 70 à 89 mm, 6 de 90 à 110 mm (Mounier, 1965)

En août, comme en juin, les valeurs de déficit d'évaporation sont plus faibles qu'en juillet. On retrouve toujours la séparation Haute Bretagne / Basse Bretagne en ce qui concerne l'intensité des périodes sèches.

La sécheresse est un risque climatique important à l'échelle du territoire breton qui peut avoir des conséquences notables sur les activités socio-économiques. C'est pourquoi on présente, dans le chapitre suivant, la sensibilité d'un territoire à ce risque, en s'attardant plus particulièrement sur la vulnérabilité de l'agriculture.

Synthèse : Un climat océanique, sensible aux sécheresses, riche en nuances à l'échelle de la région Bretagne

Malgré l'image de territoire humide qui colle à la Bretagne, les sécheresses vécues par le passé ont mis en évidence la vulnérabilité de l'agriculture face à ces phénomènes difficilement prévisibles. Les sécheresses de 1959, 1976 et 1989 ont notamment eu des effets forts sur l'agriculture au nord-est de la Bretagne et sur la forêt. L'importance de l'agriculture dans l'économie bretonne et nationale, font de cet aléa une contrainte importante à prendre en compte pour l'avenir. En effet, le changement climatique, déjà engagé depuis quelques décennies, amènerait une augmentation de 2 à 3°C à l'horizon 2100, d'après les projections du GIEC. Ce qui, conjugué à une répartition plus épisodique des pluies, augmenterait l'occurrence des sécheresses, engendrant une vulnérabilité notable sur les prairies et par conséquent sur les élevages.

Pour suivre les évènements secs impactant l'agriculture, on s'intéresse aux sécheresses pédologiques qui se traduisent par une diminution de l'humidité du sol entraînant un stress hydrique pour la végétation en place. Parmi les indices permettant de quantifier les sécheresses pédologiques, on utilise ici en particulier le déficit d'évaporation qui s'obtient par le calcul d'un bilan hydrique.

Le climat de la Bretagne, tempéré océanique de façade ouest, présente une grande diversité régionale. On distingue ainsi une tendance maritime, limitée à quelques dizaines de kilomètres le long des côtes, où le climat varie en fonction de l'orientation des côtes et de leur indentation. Dans les terres, la perte progressive de l'influence de l'océan occasionne une plus grande amplitude thermique et des précipitations moindres. Au sein de cet ensemble des climats locaux émergent au profit du relief et du paysage bocager, entre autres.

Cette diversité climatique est un élément qui participe des différences de vulnérabilité aux sécheresses observées à l'échelle du territoire. Le sud de la Bretagne connait ainsi des épisodes sec plus intenses et plus fréquents, par rapport au nord de la région où les sécheresses sont moins intenses et un peu plus rares. Le déficit d'évaporation dure entre trois (au nord et à l'ouest) et six mois (au sud et à l'est) et atteint les valeurs les plus élevées (plus de 60 mm mensuel) au sud. Les grandes sécheresses qui ont marqué la France au cours du 20ème siècle : 1921, 1976, 1955, 1989 ont été ressenties également en Bretagne plus ou moins fortement selon les secteurs. Les plus impactés étant généralement situés au sud et à l'est du territoire.

CHAPITRE 2

IMPACT DES SECHERESSES : SENSIBILITE D'UN TERRITOIRE ET VULNERABILITE D'UNE ACTIVITE ECONOMIQUE MAJEURE EN BRETAGNE : L'AGRICULTURE

Sommaire

Introduction 32

2.1 Les sécheresses historiques majeures et leurs impacts 32

2.1.1 Les sécheresses rapportées dans les écrits historiques 33

2.1.2 Les sécheresses observées par dendrochronologie 34

2.2 Les impacts des grandes sécheresses du 20ème siècle 34

2.3 L'agriculture bretonne, vulnérable face aux sécheresses 38

2.3.1 Importance de l'agriculture dans l'économie régionale et nationale 39

2.3.2 Diversité spatiale de l'agriculture face à la ressource atmosphérique en eau 40

2.4 L'apport de l'agrométéorologie et l'agroclimatologie pour étudier la vulnérabilité des systèmes agricoles aux sécheresses 41

2.4.1 Les effets du climat sur les cultures bretonnes 43

2.4.2 L'agroclimatologie appliquée aux forêts 45

2.4.3 La vulnérabilité de l'élevage breton face au climat 46

2.5 Les enjeux de la gestion de l'eau pour l'agriculture en Bretagne 47

Synthèse : L'apport des sécheresses passées et de leurs enseignements quant à la vulnérabilité de l'agriculture 50

Introduction

Des sécheresses majeures ont touché la France plus ou moins sévèrement par le passé. Elles ont eu des effets notables sur l'environnement, sur la santé humaine et sur l'économie. L'économie agricole, plus particulièrement, s'est révélée vulnérable à une diminution de la quantité d'eau disponible. L'eau d'irrigation, longtemps considérée comme dernier recours en cas de sécheresse sévère, n'est pas si disponible quand la sécheresse atteint un seuil hydrologique et que les rivières sont à l'étiage. Or la sécheresse, comme toute risque climatique, est difficile à prévoir dans sa fréquence, son intensité et sa durée. Ce qui tend à amplifier la vulnérabilité de l'agriculture aux épisodes secs.

L'importance de l'agriculture dans l'économie bretonne et française, associée à sa forte vulnérabilité à la disponibilité de l'eau, en fait un enjeu majeur dans l'étude des conséquences des sécheresses. L'agriculture bretonne est principalement orientée vers l'élevage et la polyculture, destinée avant tout à l'alimentation animale. La ressource en eau est donc utilisée pour la croissance et la maturation des cultures mais aussi pour la consommation du bétail. Ainsi, il est important d'étudier les conséquences des sécheresses passées pour construire les fondements d'une approche prospective sur l'évolution des évènements secs à l'échelle régionale. En effet, comprendre comment l'agriculture a été impactée par les sécheresses passées peut permettre de tester les conséquences des sécheresses futures à partir des scénarios d'évolution probable du climat.

Ce chapitre a ainsi pour premier objectif d'exposer les impacts agricoles des sécheresses passées en France et en Bretagne à travers les indices perçus par dendrochronologie et les récits historiques. La diversité du système agricole breton et son importance dans l'économie régionale et nationale seront ensuite présentées. Puis une discussion sur l'agroclimatologie permettra de comprendre la vulnérabilité du système agricole breton actuel aux épisodes secs.

2.1 Les sécheresses historiques majeures et leurs impacts

Plusieurs possibilités s'offrent au géographe qui veut étudier les sécheresses passées. Il est ainsi possible d'utiliser la base de données de Météo-France, si la période d'intérêt commence, au plus tôt, au début du 19ème siècle. Pour étudier des périodes antérieures les recueils d'hommes lettrés peuvent fournir des informations sur le climat depuis le moyen-âge. Une autre approche de l'analyse climatique sur de longues périodes concerne l'utilisation de la dendrochronologie. La dendrochronologie permet de remonter très loin dans le passé, comme l'attestent les travaux de Durost (2008) qui a pu étudier les variations du climat au 1er siècle avant J-C.

2.1.1 Les sécheresses rapportées dans les écrits historiques

Les sécheresses citées dans cette partie proviennent de deux ouvrages (Sanson, 1944 ; Leroy-Ladurie, 2004) et d'une publication de Marchand *et al.* (2011) reprenant les écrits de Guillaume Le Doyen. Sanson (1944) recense des années caractérisées par d'intenses sécheresses, à partir d'écrits d'hommes d'églises et de lettres. Il cite notamment des sécheresses touchant toute la France en 1305, 1473, 1476 et 1479. Dans son ouvrage Leroy-Ladurie (2004) mentionne, à partir du 15ème siècle, des années exceptionnelles par leur record de chaleur ou de froid. Parmi les années chaudes il met en lumière le triennat 1471-1473 dont l'année 1473 a eu pour conséquence une précocité des récoltes de vin et de seigle. Les textes et travaux recueillis par Leroy-Ladurie mettent en évidence le lien entre la qualité des vendanges et du vin et le climat. Cet aspect a ainsi permis à Marchand *et al.* (2011) d'identifier des types de temps à partir d'écrits de Guillaume Le Doyen, notable lavallois, qui recensait scrupuleusement la quantité et qualité du vin de la région de Laval de 1481 à 1537. Il a ainsi pu construire une chronique présentant l'humidité et la chaleur du printemps et de l'été pour chaque année de cette période (figure 2.1). Sur la période 1527-1535 il note ainsi trois printemps sur neuf subsecs, les six autres années le printemps est humide. Sur cette même période l'été est humide seulement une année, subsec sur trois années et cinq années présentent une saison sèche sur tout ou partie de l'été : 1528, 1529, 1532-34. On note également les années 1536 et 1540 où « *la plupart des fontaines bretonnes se sont taries et où les grosses rivières sont devenues de faibles ruisseaux dès le printemps et jusqu'à la fin de l'été* ». Ces années-là les moissons commencèrent en juin en Bretagne, soit plus d'un mois en avance. « *Depuis le mois de février jusqu'au 19 septembre 1540 il ne plut que 6 fois* ». L'année 1556, du fait de fortes chaleurs, détient le record de précocité des cultures. « *En 1573, la moisson fût encore plus précoce qu'en 1540 puisqu'elle eut lieu à Pâques. Les chaleurs et la sécheresse de 1762 ont eu pour conséquence la destruction complète des récoltes de blé noir en Bretagne* ». Au 20ème siècle la culture du sarrasin a diminuée avec l'introduction du maïs. Au 18 et 19ème siècle, a son apogée, elle couvrait près de 370 000 ha (Nassiet, 1998) et constituait une part importante de l'alimentation et de l'économie bretonne. Entre l'automne 1784 et le 22 juillet 1785 aucune pluie notable n'est enregistrée en Bretagne, engendrant une grande sécheresse dans le Trégor. La chaleur de l'été 1811 ne fut pas bénéfique puisque de nombreuses cultures furent perdues du fait de l'échaudage et d'une mauvaise récolte de blé. A la fin du petit âge glaciaire les décennies 1860 et 1890 ont connu plusieurs étés chauds.

En 1906 une grande partie du territoire français connaît une sécheresse presque absolue au mois de juin ; on ne recueille que 10 mm d'eau à l'intérieur de la Bretagne entre le 1er juin et le 21 juillet. De février à novembre 1921 le régime des précipitations équivalait au quart des normales régionales dans le quart nord-ouest du pays. En utilisant la méthode de classification climatique de Köppen, l'année 1921 fut la seule année « semi-aride » à Nantes depuis 1851, avec un total annuel de 418 mm (Quénol *et al.*, 2008a). Plus récemment la décennie 1940 fut également très riche en beaux étés, dont la canicule de 1947 et la sécheresse de 1949. Dans la deuxième moitié du 20ème siècle, deux années ont été très sèches dans les régions de l'Ouest et du Nord-Ouest : 1959 et 1976, où le déficit en eau eut notamment des effets importants sur l'agriculture au nord-est de la Bretagne. Les années 1976, 1983, la décennie 1990 et l'année 2003 ont aussi été très chaudes (Leroy-Ladurie, 2005).

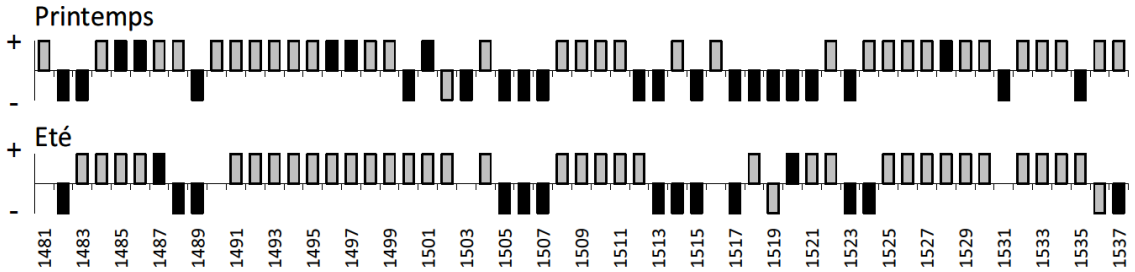


Figure 2.1 Succession des années climatiques de 1481 à 1537, gris : année sèche, noir : année humide, positif : année chaude, négatif : année fraiche, pour le printemps et l'été (Marchand *et al.*, 2011)

Les recueils historiques peuvent ainsi nous renseigner sur le climat passé, que ce soit à travers des observations purement climatiques « *l'été fut si sec qu'il fut trois mois sans pleuvoir* » (Sanson, 1944) ou de second ordre, agronomique par exemple, qui nécessitent d'être réinterprétées « *De vin ne fust grande abondance en tout ce pays* » (G. Le Doyen, 1512, cité par Marchand *et al.*, 2011).

2.1.2 Les sécheresses observées par dendrochronologie

Une analyse dendrochronologique a été effectuée par Planchon *et al.* (2007) à partir de chênes du quart nord-ouest de la France sur la période 1880-1980, pour laquelle des données de températures et de précipitations sont disponibles. Le chêne (Quercus sp.) présente l'intérêt d'être synchronisé sur une grande partie de l'Europe, ce qui facilite la datation des évènements climatiques (Munaut, 1979). Les travaux de Masson-Delmotte *et al.* (2005) et de Planchon *et al.* (2007) ont permis d'identifier 19 années caractérisées par une période de sécheresse, parmi lesquelles on distingue quatre types. Le premier traduit des sécheresses continues et intenses où la végétation en place est très impactée et concerne les années 1896, 1900, 1911, 1921, 1949 et 1976. Le type 2 regroupe les années à sécheresse d'été faisant suite à un printemps normalement arrosé : 1898, 1928, 1933, 1952, 1959, les années à sécheresse sans échaudage : 1885 et 1887, ou à sécheresse discontinue en été : 1919. Le type 3 fait référence aux sécheresses hivernales et met en évidence les années 1891, 1905 et 1934. Le dernier type regroupe quant à lui des années sans mois secs, c'est-à-dire où les précipitations en mm sont inférieures à deux fois la température en degré celsius, mais avec des mois subsecs, ayant eu un réel impact sur la végétation : 1915, 1972. Cette analyse dendrochronologique a été confrontée aux observations de la base de Météo-France qui a globalement permis de conforter la justesse des résultats. Cependant les années 1898 et 1919 perçues comme sèches par l'étude des cernes des arbres, ne sont finalement pas classées comme sèches si l'on réalise un bilan hydrique à partir des observations climatologiques. A l'inverse, des années sèches d'après le réseau d'observation national n'ont pas eu d'impacts notables sur la croissance des arbres (1892, 1893, 1901, 1906, 1909, 1938, 1943, 1954).

2.2 Les impacts des grandes sécheresses du 20ème siècle

En 1921 un évènement sec de grande ampleur a touché principalement la France de l'Est. On parle ici de sécheresse hydrologique puisque l'agriculture a été peu impactée du fait d'une bonne répartition des pluies, contrairement aux sources qui ont été très diminuées (Blanchard, 1922).

Cet épisode sec a également été ressenti sur une partie du territoire breton. La sécheresse de 1949 (Fouchardière, 1949 ; Sanson, 1950), tout comme celle de 1989 (Blanchet, 1992 ; Dorize, 1990) a également été étudiée pour ses conséquences nationales et régionales. Parmi elles on compte notamment les effets sur le régime hydraulique des cours d'eau ainsi que sur l'agriculture. Pour autant dans certaines régions l'agriculture a peu souffert du fait d'importants apports en eau d'irrigation. Les impacts de la sécheresse de 1959 sur le nord de la France sont visibles à travers les questions concernant l'agriculture lors des débats parlementaires (Assemblée Nationale, 1959) où il est question de classer le département de la Manche et quelques cantons d'Ile-de-France en zone sinistrée.

La sécheresse historique de 1976 a été très médiatisée du fait de ses conséquences importantes sur l'agriculture et sur le débit des rivières (figure 2.2). Dès qu'une sécheresse de printemps a lieu en France, les médias rappellent les dégâts connus en 1976 en termes de comparaison d'intensité de l'épisode sec. Ce fut notamment le cas en 2011, où la sécheresse de printemps a fait craindre le pire : « *La FNSEA, premier syndicat agricole, estime que la sécheresse qui sévit actuellement menace d'être plus grave qu'au printemps 1976, printemps alors le plus sec depuis 1959* » (Le Monde, 30 mai 2011).

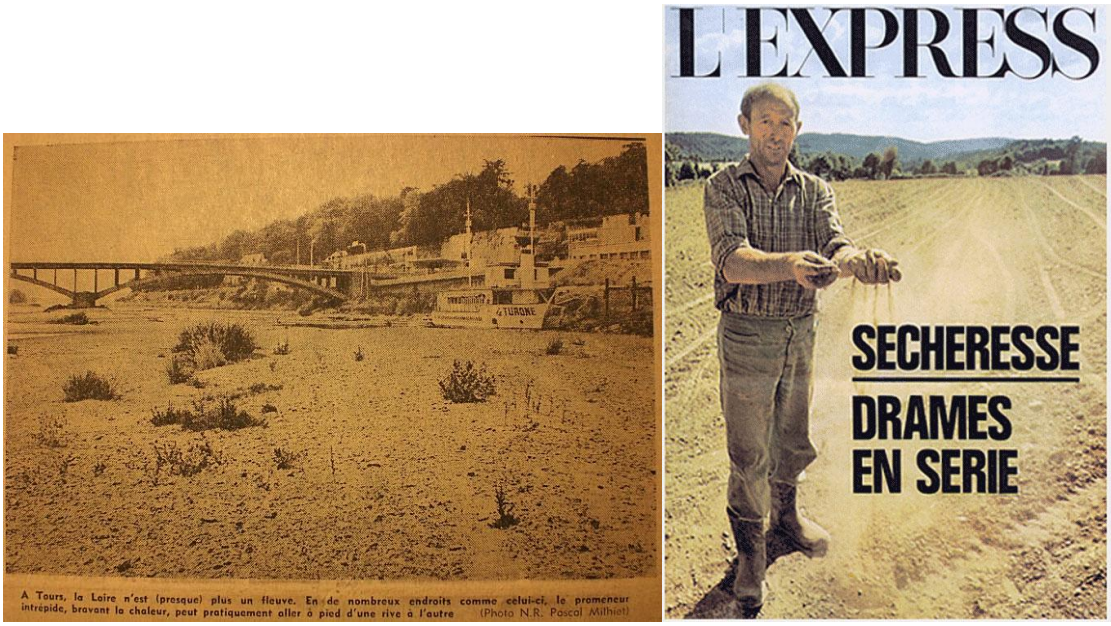


Figure 2.2 Médiatisation de la sécheresse de 1976 et de ses conséquences : photo de la Loire à sec à Tours (La Nouvelle République, 28 juin 1976) et couverture du journal l'Express du 28/06/1976 (n°1303)

Les impacts de certaines de ces sécheresses récentes sont visibles dans les coupures de presses (figure 2.3) recueillies par Reynald Artaud pour le site internet Météo Passion.

Figure 2.3 Coupures de presse sur les impacts de diverses sécheresses en France (source : Reynald Artaud, www.meteopassion.fr)

Parmi ces coupures on remarque une illustration opposant les « gagnants » de la sécheresse de 1976 tels que les vendeurs de glaces et boissons froides, aux « perdants » que sont les agriculteurs qui ont vu leurs cheptels et récoltes diminués. L'impact de la sécheresse de 1976 sur l'agriculture est rappelé dans de nombreux articles, notamment à travers une caricature de Piem montrant les conséquences de la sécheresse sur l'économie agricole. Une photo de 1961 rappelle que les sécheresses ne touchent pas que les pays du tiers-monde et que le manque d'eau peut affecter des villes françaises. Plus récemment, la canicule de 2003 a engendré des besoins très importants en irrigation pour l'agriculture. En plus des conséquences sur la végétation, les sécheresses ont également des effets sur les animaux pour plusieurs raisons : alimentation réduite du fait de faibles stocks de fourrages, la qualité et quantité de l'eau s'appauvrit au fur et à mesure que l'épisode sec se prolonge. Les vagues de chaleur qui peuvent accompagner une sécheresse ont également des effets dévastateurs sur les animaux, qui voient leur condition de vie dégradée, ce qui peut avoir des conséquences négatives allant parfois jusqu'à la mort d'une partie d'entre eux.

Ces grandes sécheresses qui ont touché la France mais aussi, dans certains cas, des pays voisins, ont alerté la population face au risque de pénurie d'eau. C'est toute une communauté scientifique qui s'est intéressée à ces sécheresses, leurs particularités, leurs fréquences d'apparition, etc. La sécheresse de 1976, qui fit couler beaucoup d'encre, marqua les mentalités par l'impact que peut avoir le climat sur l'économie, chose qui n'était pas imaginée jusqu'alors (Marchand *et al.*, 1986). C'est ainsi qu'à partir de cette année les sécheresses devinrent un intérêt, voire une inquiétude, pour l'économie, ce qui explique l'essor des publications scientifiques à ce propos. Concernant la sécheresse de 1976, on s'intéressa autant à son aspect climatique (Brochet 1977 ; Namias, 1978) qu'hydrologique (Lecarpentier, 1977) ainsi qu'aux conséquences sur la forêt (Aussenac, 1978 ;

Harranger, 1978) et sur l'agriculture (Baculat *et al.*, 1976 ; Hallaire, 1977 ; Henrion et Pecquet, 1977 ; INRA, 1977, Luquet *et al.*, 1977). Byé et Pernet (1976) proposent une étude sur la place de l'agriculture dans l'économie française. Alors que Blanchet (1977) s'intéresse aux effets de la sécheresse 1976 sur la région Rhône-Alpes, Mounier (1977) fournit une étude plus générale sur les sécheresses, portée par les effets dévastateurs des évènements secs de 1976. Les conséquences de cette sécheresse sur de nombreux secteurs économiques sur une grande partie de l'Europe occidentale ont également été traitées par Comte (1987).

La sécheresse de 1976 est toujours étudiée, notamment en termes de comparaison avec des sécheresses plus récentes (Breda *et al.*, 2004 ; Lefebvre, 2011). Debaeke et Bertrand (2008) ont suivi les effets des sécheresses de 1976, 2003, 2005 et 2006 sur l'agriculture française. La figure 2.4 illustre ainsi l'impact de ces sécheresses sur les rendements de quelques variétés culturales.

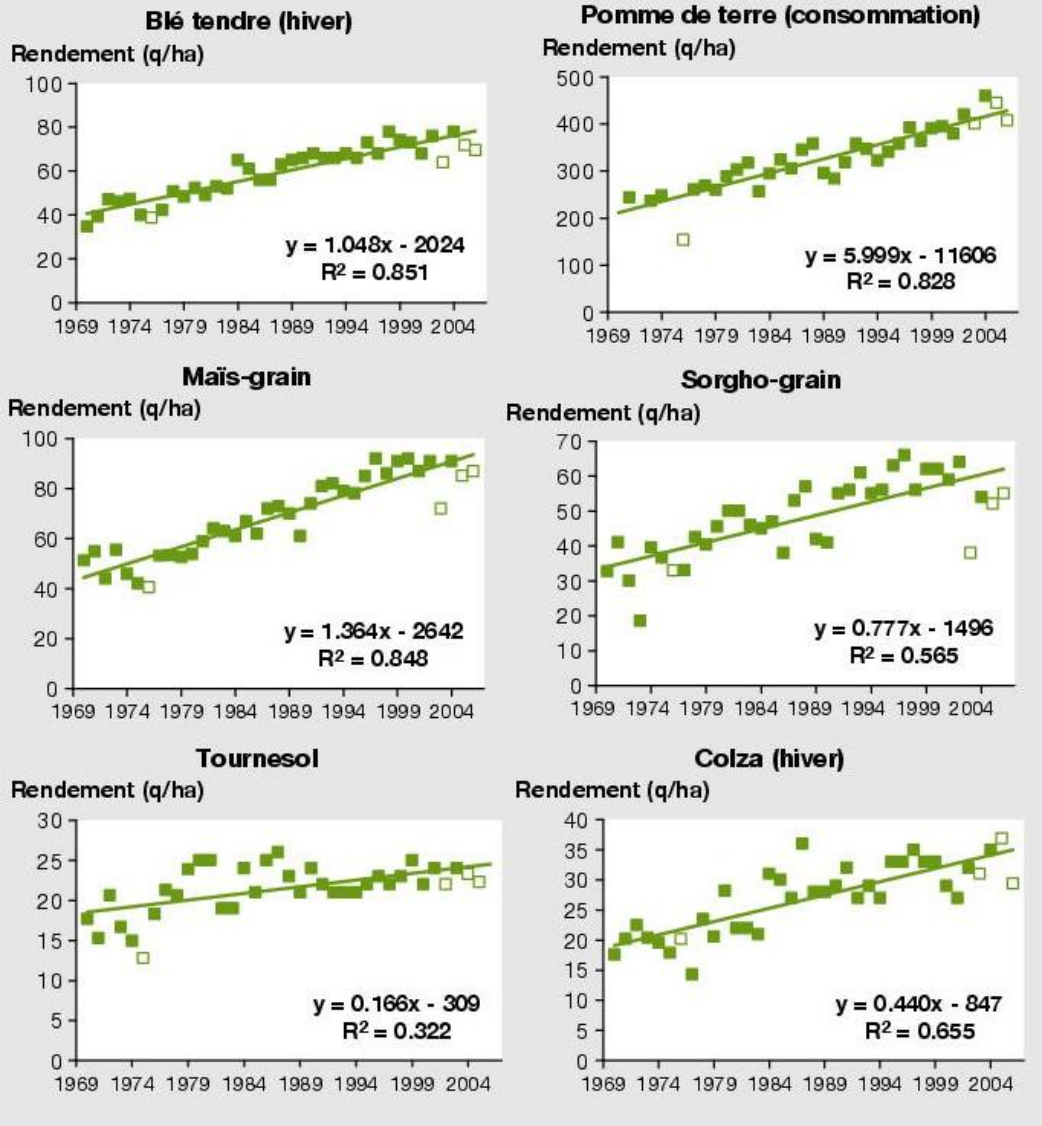


Figure 2.4 Graphiques de rendement de plusieurs cultures en France de 1969 à 2006 (en carré vides les grandes sécheresses de 1976, 2003, 2005 et 2006) (Debaeke et Bertrand, 2008)

Les sécheresses ayant eu les impacts économiques les plus forts ont conduit les élus à réfléchir à la mise en place d'assurances ou d'indemnités pour les victimes économiques telles que les agriculteurs par exemple. A la suite de la sécheresse de 1976, l'Etat a décidé de mettre en place un

impôt sécheresse de 2,2 milliards de francs (414 millions d'euros) pour soutenir les agriculteurs. Depuis, dès qu'un épisode sec précoce se produit en France, la crainte d'avoir une sécheresse de la même ampleur que celle de 1976 amène la question d'un nouvel impôt exceptionnel de solidarité nationale. La sécheresse de 2011, similaire à celle de 1976 au printemps mais qui n'a pas été aussi longue, a conduit à ce type d'inquiétude dès le mois de mai.

D'après les informations recueillies à travers les analyses dendrochronologiques et les recueils historiques, on peut donc identifier les sécheresses majeures ayant impacté la France et la Bretagne. Le tableau 2.1 liste quelques unes de ces sécheresses pour lesquelles des conséquences majeures ont été ressenties en Bretagne. Ceci souligne la vulnérabilité de l'agriculture face aux épisodes secs intenses.

Tableau 2.1 Liste des sécheresses majeures observées par dendrochronologie ou recueillies dans des ouvrages historiques ayant eu des impacts en France et en Bretagne

Année	Impacts observés
1540	Sécheresse hydrologique : les cours d'eau bretons sont asséchés, les fontaines taries. Les moissons furent précoces.
1762	Sécheresse néfaste pour l'agriculture bretonne. Le blé noir ne résistera pas à la saison sèche qui dura plusieurs mois.
1785	Sécheresse sévère en France et en Bretagne, impactant des régions réputées humides telles que le Trégor.
1921	Sécheresse sévère en France de l'est principalement. La répartition des pluies fait que l'agriculture souffre peu, contrairement à l'eau d'alimentation qui fut très affectée par le tarissement de nombreuses sources.
1949	Sécheresse hydrologique avec diminution du niveau des rivières en Ille-et-Vilaine. Des cultures ont été anéanties, certains arbres (jeunes ou vieux) sont sévèrement impactés.
1959	Sécheresse importante pour le nord de la France. Importants dégâts sur des parcelles agricoles d'Ile-de-France et sur une majeure partie du département de la Manche.
1976	Sécheresse extrême sur tout le territoire français ayant des impacts sur divers secteurs économiques.
1989	Impacts inégaux sur l'agriculture régionale, le maïs est la culture la plus touchée. En Bretagne, au Limousin et en Provence les réserves en eau sont sévèrement asséchées.

2.3 L'agriculture bretonne, vulnérable face aux sécheresses

L'impact des sécheresses sur la végétation et donc sur l'agriculture est indiscutable à la vue des expériences passées. La vulnérabilité aux sécheresses de cette activité socio-économique majeure en France et en Bretagne est donc un enjeu important actuellement et pour l'avenir.

2.3.1 Importance de l'agriculture dans l'économie régionale et nationale

La place de l'agriculture dans l'économie bretonne et nationale est à prendre en considération, quand on sait sa vulnérabilité face aux sécheresses. Avec 15,4 % des établissements (figure 2.5), l'agriculture est la troisième activité en Bretagne, derrière les services (49,1 %) et le commerce (17%).

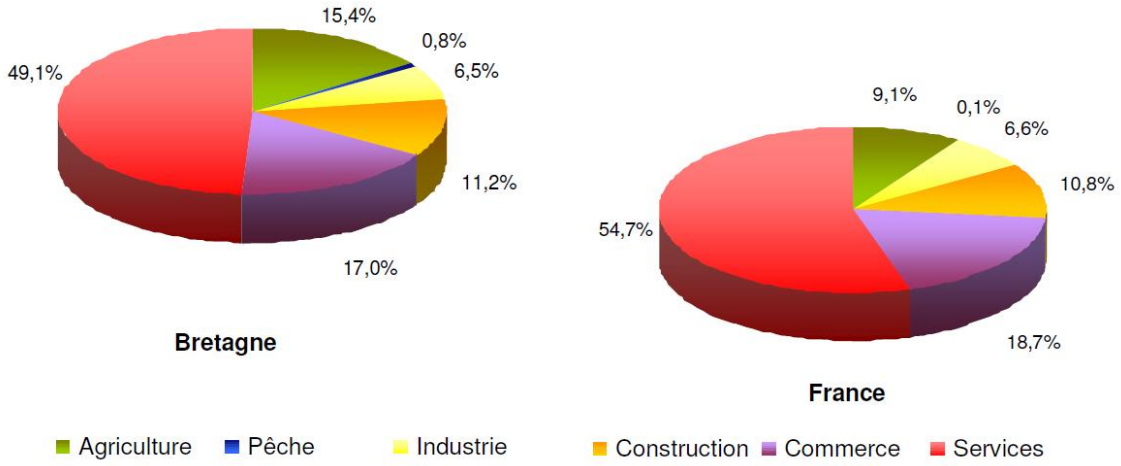


Figure 2.5 Répartition des établissements par secteurs d'activité, comparaison de la Bretagne avec la France (COCEB, 2010)

Le poids de l'agriculture dans l'économie de la région est également visible avec le récapitulatif présenté dans le tableau 2.2 où l'on voit qu'avec 30000 exploitations agricoles, soit 7,8 % des exploitations nationales, la Bretagne est une des premières régions agricoles françaises (COCEB, 2010) et la première en ce qui concerne les productions animales.

Tableau 2.2 Part des différents secteurs d'activités dans l'économie bretonne et nationale (COCEB, 2010)

Activité	Nombre d'entreprises bretonnes	Nombre établissements bretons	Poids de la région dans l'ensemble national (en % d'établissements)
Agriculture	30257	30257	7,8 %
Pêche	1480	1496	28,9 %
Industrie	11420	13218	4,6 %
Construction	21963	22856	4,2 %
Commerce	22624	28760	4,8 %
Services	47632	54857	4,1 %

En 2009 un rapport de l'AGRESTE (2010) fait état de 58 % du tonnage de viande porcine national, 33% pour la viande de volaille, 41 % du volume d'œufs et 21 % du volume de lait nationaux, produits par la région Bretagne. Il ne faut pas pour autant oublier la production légumière bretonne qui constitue 80 % du tonnage français de choux-fleurs, échalotes et artichauts, et environ 30 % des petits pois, haricots verts et tomates nationaux (AGRESTE, 2010). Les céréales produites en Bretagne comptent quant à elle pour 6 % de la production nationale en 2008 et les cultures fourragères pour 25 % (AGRESTE, 2008). Il faut également compter sur l'importance de l'économie agricole avec les emplois qui y sont liés indirectement, comme les emplois du secteur industriel parmi lesquels plus de 30 % d'emplois sont dans l'agroalimentaire, donc dépendant de l'agriculture.

2.3.2 Diversité spatiale de l'agriculture face à la ressource atmosphérique en eau

Dans un récent rapport du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (AGRESTE, 2010) la diversité agricole de la Bretagne est présentée à travers une carte des orientations technico-économique des communes, synthétisée dans la figure 2.6. On voit ainsi une grande majorité d'élevage à l'échelle du territoire. Parmi les communes orientées vers l'élevage, on retrouve des secteurs plutôt tournés vers les élevages porcins (est des Côtes-d'Armor et Finistère) ou vers l'aviculture (Côtes-d'Armor et Morbihan) ainsi que les élevages bovins, principalement à vocation de production laitière. Ces derniers sont plus répartis sur le territoire, même si on les retrouve majoritairement en Ille-et-Vilaine et dans le Finistère. Hormis l'élevage, l'autre grande orientation agricole bretonne est la polyculture. Celle-ci ayant pour vocation première d'alimenter les animaux, on trouve donc une grande majorité de cultures fourragères en Bretagne. Au niveau du littoral on retrouve principalement des cultures légumières sous serre ou en plein champ.

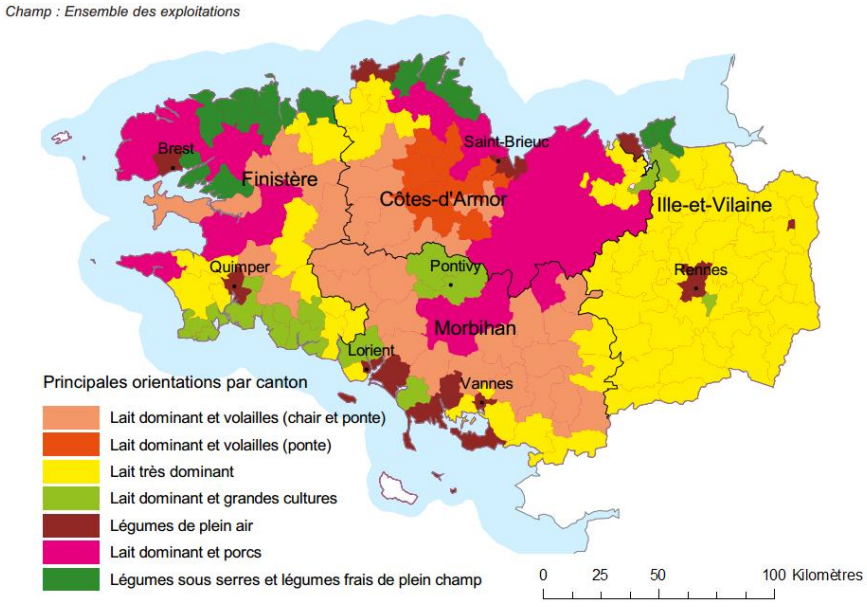


Figure 2.6 Orientations agricoles des communes de Bretagne (Source : Agreste - DRAAF Bretagne - Recensement agricole 2010 - Typologie SRISE)

La répartition de ces orientations agricoles peut s'expliquer, entre autres, par la qualité des sols. Cette notion varie selon les intérêts sociaux des sols pour la production ou l'environnement (Chaussod, 1996). La notion de qualité du sol varie donc dans le temps et l'espace en fonction des pratiques culturales et des modifications éventuelles de l'environnement (Boiffin et Monnier, 1989). Les sols de bonne qualité, c'est-à-dire avec une bonne capacité nutritive pour les végétaux et une bonne capacité à retenir l'eau sont en général des sols cultivés. Tandis que les sols de moins bonne qualité sont utilisés pour des activités diverses, autres que la culture. L'évolution des techniques de production fait que les sols agricoles sont particulièrement suivis par les pédologues puisque la qualité du sol évolue avec son utilisation. Cependant, le sol ne fait pas tout. Il est important également de prendre en compte le climat, afin de s'assurer de la cohérence entre celui-ci et l'activité au sol.

Les orientations agricoles récentes, basées sur une politique d'agriculture intensive, n'ont pas forcément pris en compte les climats régionaux. Pour autant « *il y a peu de sciences aussi intimement connectées entre elles que la météorologie, l'agriculture et l'horticulture* » (Mawley, 1898). Il est donc important, à l'heure actuelle où de nouvelles politiques agricoles sont à l'étude (Conseil Régional, 2011), d'intégrer les climats locaux dans les réflexions sur l'adaptation de l'agriculture. De fait, l'agrométéorologie et l'agroclimatologie sont riches en enseignements quant aux effets du climat sur l'agriculture.

2.4 L'apport de l'agrométéorologie et l'agroclimatologie pour étudier la vulnérabilité des systèmes agricoles aux sécheresses

Les premières expériences agricoles ont été recensées au néolithique avec la sédentarisation. A cette époque, l'écriture n'étant pas encore apparue, les savoirs se transmettaient oralement et le repérage dans le temps se faisait à partir de structures rocheuses organisées telles que NewGrange, Ballochroy et Brainport Bay en Irlande, Goseck en Allemagne et Stonehenge en Angleterre (Ruggles, 1999). Avec l'arrivée de l'écriture les premiers manuels agricoles firent leur apparition, ce qui permit aux agriculteurs d'apprendre de leurs expériences et de maximiser leurs récoltes par temps idéal ou minimiser les pertes par mauvais temps (Monteith, 2000). Parmi ces écrits on retrouve les chants de Thiru Idaikkadar Swamigal qui permettaient en Inde en 3500 av. J-C d'appréhender l'arrivée des moussons, ainsi que les carnets de notes de Fan Sheng-Chih qui retraçaient les cycles annuels de cultures à partir d'études phénologiques (OMM, 2009).

L'importance du lien entre la météorologie et l'agriculture a été reconnue, à l'échelle internationale, en 1935 lors de la première rencontre internationale des directeurs des services météorologiques européens (OMM, 2009). La météorologie agricole, telle que connue actuellement, existe depuis les années 1920 mais s'est significativement développée dans les années 1960 (OMM, 2006). Fischer (1925) fut le premier à mettre en évidence le lien entre les précipitations et le rendement des cultures. La définition de l'agrométéorologie proposée par Austin Bourke (1968) fait référence à l'utilisation de la météorologie dans l'objectif d'aider les agriculteurs à utiliser le plus efficacement leur environnement pour améliorer leurs productions, en quantité et qualité. Dans les diverses définitions disponibles dans la littérature on retrouve systématiquement la notion d'utilité pour l'agriculture. On peut interpréter le lancement du

journal *Agricultural and Forest Meteorology*, en 1984, comme l'aboutissement de la création de cette filière scientifique. Cette discipline traite de plusieurs paramètres : les précipitations et leurs déplacements, la radiation et la circulation de l'atmosphère dans le contexte de la production agricole et forestière. C'est au début du 20ème siècle que l'on fit en premier le lien entre les variations interannuelles du rendement agricole avec les variations du climat (Decker, 1994).

Un des premiers objectifs de l'agrométéorologie annoncés en 1967 par l'Organisation Mondiale de Météorologie, était le suivi des sécheresses pédologiques du fait de leurs conséquences sur les cultures et le bétail. Le risque sécheresse pour l'agriculture est pris en compte à travers des précipitations réduites et une radiation élevée, entraînant des fortes températures. Les applications de l'agrométéorologie et l'agroclimatologie sont diverses et variées, allant de la gestion des microclimats sur les cultures à l'atténuation des effets du climat sur les productions agricoles, en passant par les avertissements liés à l'arrivée et la propagation de maladies pour la végétation (OMM, 2006). L'agrométéorologie est également particulièrement adaptée au suivi direct des ressources naturelles pour des systèmes agricoles durables. Alors que l'agrométéorologie s'intéresse au suivi en temps réel du temps et de ses impacts sur l'agriculture, l'agroclimatologie se focalise sur l'interaction du climat moyen passé, actuel ou futur, avec l'activité agricole.

Pour cela l'agroclimatologie utilise des données moyennes du climat, généralement sur trente ans, à partir d'une approche statistique. C'est donc l'information du climat passé qui sert de support à la planification des orientations agricoles. Cependant l'arrivée des modèles climatiques pour le 21ème siècle permet l'utilisation de l'agroclimatologie à des fins d'adaptation de l'agriculture au changement du climat. Les paramètres climatiques majeurs ayant des impacts sur l'agriculture sont les précipitations, pour les sécheresses ou inondations qui en découlent, la période de gel et d'ensoleillement, ainsi que les degrés-jours déterminants pour la croissance des végétaux. L'agroclimatologue considère le climat et l'agriculture comme un système interactif, ainsi l'étude d'une donnée climatique n'est pas isolée mais réalisée en fonction de la phénologie du végétal d'intérêt. Par exemple, pour le maïs qui requiert une grande quantité d'eau lors de sa phase de floraison, on s'intéressera au suivi des précipitations essentiellement sur les mois de juillet et août (Waggoner et Simmonds, 1966). Mais l'eau alimentant le maïs se trouvant également dans les sols, il faut prendre en compte les précipitations printanières qui ont rempli la réserve hydrique des sols, donc le scientifique considère également la pluviométrie des mois de mai et juin. De plus, le maïs craignant le gel et ne poussant qu'au-delà d'un certain seuil thermique (+6 à +8°C), l'analyse des températures est également importante (Moule, 1971).

Pour suivre les sécheresses on s'intéresse à l'évapotranspiration et aux précipitations. Cependant, l'évapotranspiration étant un paramètre plus homogène dans le temps et l'espace que les précipitations, c'est sur ce dernier que l'on se focalise pour étudier l'occurrence des évènements secs. La grande variabilité des précipitations fait que l'on ne peut pas prévoir des averses dans deux villes éloignées d'une vingtaine de kilomètres, alors qu'il est aisé d'interpoler la variabilité saisonnière des précipitations d'une station, à partir de l'autre (Conrad et Pollak, 1950).

2.4.1 Les effets du climat sur les cultures bretonnes

Les cultures principales pratiquées en Bretagne sont les céréales (27 % de la SAU en 2008) et les cultures fourragères (20 % de la SAU en 2008) (AGRESTE, 2008). Le blé et le maïs grain comptent pour 80 % de la production céréalière. Le blé semble plus adapté au climat de la région que le maïs, puisqu'il requiert une importante quantité d'eau au printemps, période généralement plus humide que l'été en Bretagne. A l'inverse le maïs, avec sa forte demande en eau sur la période estivale, peut potentiellement poser quelques problèmes dans des secteurs déjà sensibles à la sécheresse pendant l'été. Le lien entre le climat et ces deux cultures sera ainsi détaillé ici, à partir, pour la plupart, du chapitre 10 du Guide pour les pratiques agrométéorologiques (GaMP, *Guide to agricultural Meteorology Practices*) de l'Organisation Météorologique Mondiale publié en 2010, dirigé par Brunini et Stigter.

Le blé est une des céréales les plus largement cultivées à l'échelle mondiale, occupant 22 % des surfaces agricoles attribuées aux céréales (FAO, 2007). La France est le 5ème producteur mondial de blé, derrière la Chine, l'Inde, les Etats Unis d'Amérique et la Russie. La surface de récolte en France, environ 5200 km², est nettement moins importante que ces quatre grands pays. Cependant, un meilleur rendement, de l'ordre de 7 t/ha contre une moyenne de 2,4 t/ha pour les premiers du classement, permet de produire plus de 37 millions de tonnes de blé (moyenne 2004-2005) soit seulement 10 millions de moins que la Russie (FAO, 2007). Les pays du nord de l'Europe ont des rendements similaires à celui de la France, mais du fait d'une moins grande superficie allouée à la récolte du blé la production est nettement inférieur à la France. De tous les paramètres climatiques étudiés en agrométéorologie, la température, l'évapotranspiration et les précipitations sont ceux ayant le plus d'impacts sur le blé. La figure 2.7 montre ainsi que les étapes de croissance (émergence à anthèse) et de maturation du blé sont dépendantes de la température et des précipitations. Pour le blé de printemps en France, le semis a lieu au mois de mars, l'épiaison se faisant en juin et la maturation en juillet, la récolte a lieu en août. Pour le blé d'hiver le semis se fait sur la période octobre-novembre, l'épiaison se produit en mai et la maturation en juin, permettant la récolte sur la période juillet-août.

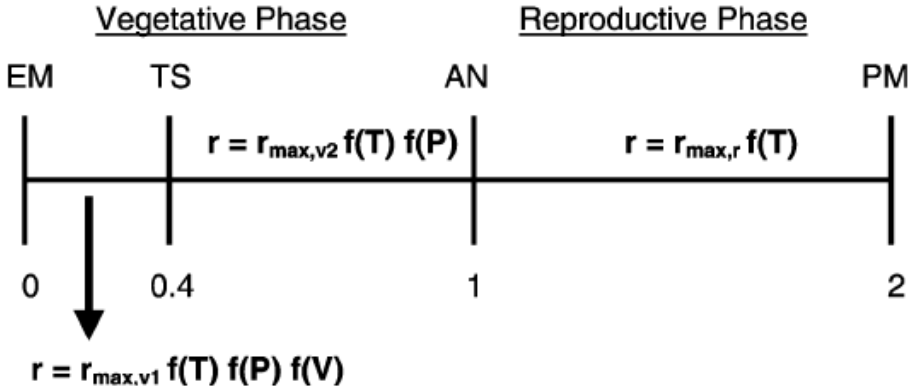


Figure 2.7 Schéma modifié basé sur le modèle de Wang et Engel (Wang et Engel, 1998). Les étapes de développement sont : EM = émergence ; TS = formation terminale de l'épillet ; AN = anthèse ; PM = maturité physiologique (Streck *et al.*, 2003)

Les températures limites pour le blé varient avec la variété et les étapes de croissance de la culture. On peut tout de même distinguer une température minimale de 0°C et maximale de 35°C au-delà desquelles le blé ne croît plus. Les températures optimales pour la croissance sont comprises entre 18 et 24°C. En termes de précipitations, le blé est peu exigeant puisqu'il pousse dans des régions où les cumuls annuels des pluies varient de 250 mm à 1750 mm, ainsi que dans des régions semi-arides. Cependant un manque d'eau, atmosphérique et pédologique, lors d'une étape critique de la croissance du blé, telles que la germination et l'émergence, aura pour conséquence une réduction du rendement final (McMaster *et al.*, 2002). La viabilité du pollen, influant sur l'étape de fertilisation, est sensible à la ressource en eau et à la chaleur, rendant cette étape de la croissance du blé vulnérable à la sécheresse. Si le manque d'eau lors des premières étapes de développement du blé peut être critique pour la récolte finale, il s'avère moins néfaste, voire bénéfique, s'il a lieu après la formation terminale de l'épillet.

Le maïs, troisième culture mondiale derrière le blé et le riz, est principalement utilisé pour l'alimentation humaine dans les pays en voie de développement et pour l'alimentation du bétail dans les pays industrialisés. Deux tiers de la production mondiale du maïs vient de Chine (environ 190 millions de tonnes) et des Etats Unis d'Amérique (environ 300 millions de tonnes). Derrière ces deux gros producteurs se trouvent le Brésil et l'Europe qui se partagent la troisième place au gré des aléas climatiques impactant la production. Actuellement environ 3,5 millions d'hectares sont attribués à la culture du maïs en France, avec une répartition sur la moitié ouest du territoire majoritairement (figure 2.8).

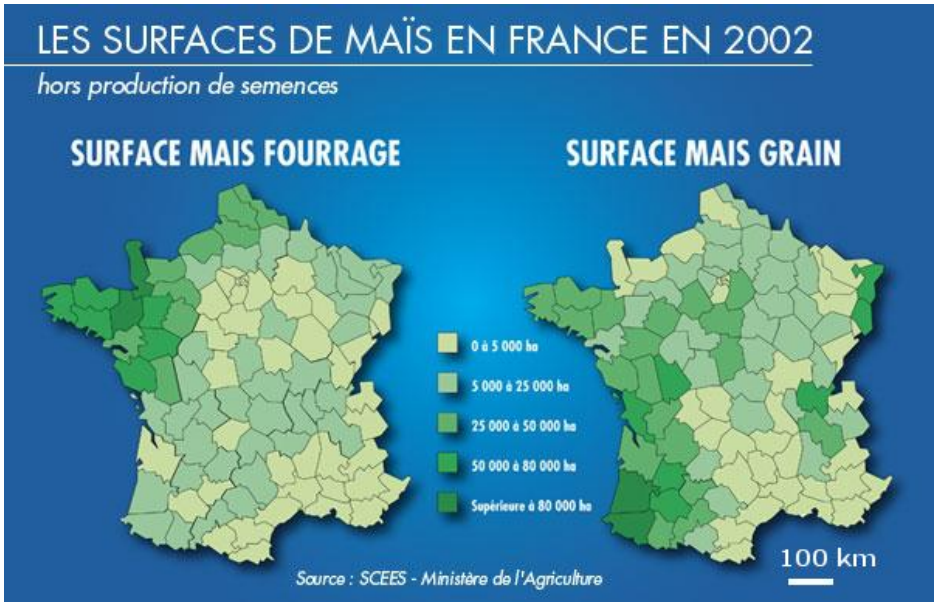


Figure 2.8 Surfaces agricoles attribuées à la culture du maïs en France en 2002, cas de deux types : maïs fourrage et maïs grain (SCEES - Ministère de l'Agriculture, 2002)

Le maïs nécessite une grande quantité d'eau au cours de son développement, idéalement un maintien de 50 % de la teneur en eau du sol au cours de sa période de croissance assure un rendement maximal. Pour les régions tempérées où le régime des précipitations n'est pas forcément favorable à ce maintien, il faut au minimum assurer une bonne quantité d'eau lors de la phase d'anthèse, d'où le recours fréquent à l'irrigation. Le stress hydrique peut avoir des

conséquences très importantes sur la réduction du rendement du maïs. Il peut être compensé par des systèmes d'irrigation, mais tous les agriculteurs n'en ont pas les moyens financiers ou techniques. Une autre solution réside dans une gestion adaptée au risque sécheresse basée sur des cultures précoces, sur une limitation du nombre de plants pour que ceux restants aient accès à une plus grande quantité d'eau et sur le contrôle des mauvaises herbes qui entrent en compétition avec le maïs pour l'accès à l'eau en période de sécheresse.

2.4.2 L'agroclimatologie appliquée aux forêts

La forêt en Bretagne couvre 13 % du territoire, soit environ 350 000 ha, avec une majorité (70 %) de feuillus (CRPF Bretagne, 2011). La forêt bretonne est majoritairement constituée de chênes, pins, châtaigniers et hêtres (CRPF Bretagne, 2006). Ces arbres, comme des centaines d'espèces vivantes, s'adaptent déjà au changement climatique de manière progressive. L'adaptation de la forêt peut passer par l'introduction d'espèces peu vulnérables à la chaleur aux dépens d'espèces plus sensibles, tel le Pin sylvestre. Pour cette essence les modèles prévoient un net recul de son aire de répartition en France (figure 2.9), avec une disparition quasi-complète dans le quart nord-ouest français (Cheaib *et al.*, 2012) du fait d'un climat défavorable. C'est également le cas pour le hêtre dont l'évolution de l'aire de répartition au cours du 21ème siècle a été modélisée par l'INRA pour le projet Carbofor (Badeau *et al.*, 2005). Les cartes résultant de cette étude (figure 2.10) montrent qu'actuellement le hêtre est présent sur toute la France sauf le pourtour de la mer Méditerranée. Cette présence est faible dans le grand ouest et plus importante au nord de la France et au niveau des massifs montagneux. A l'horizon 2100, dans le cas du scénario B2, la présence du hêtre serait grandement réduite en France. Cette essence serait cantonnée aux seules régions montagneuses et plus rarement aux plaines du nord de la France (Badeau *et al.*, 2005).

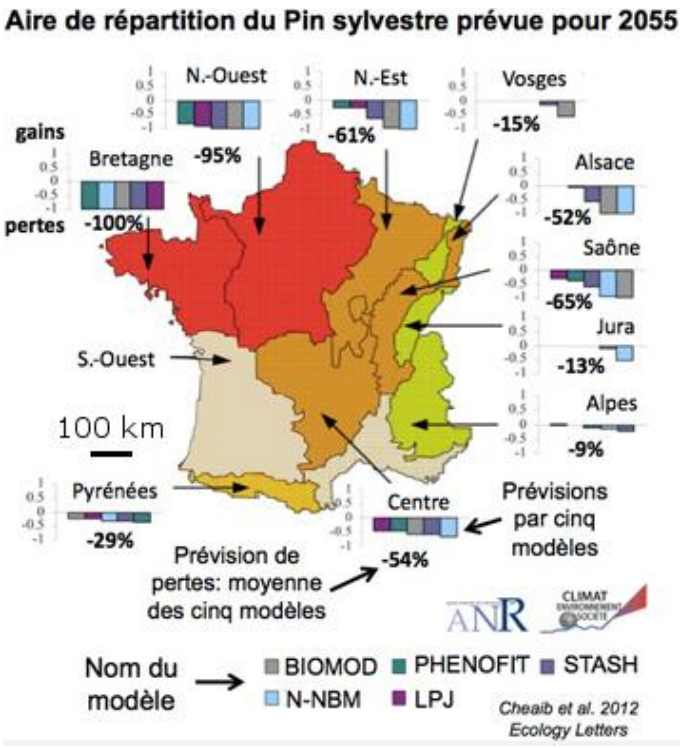


Figure 2.9 Evolution de l'aire de répartition du Pin sylvestre en 2055 par rapport à la situation actuelle (Cheaib *et al.*, 2012)

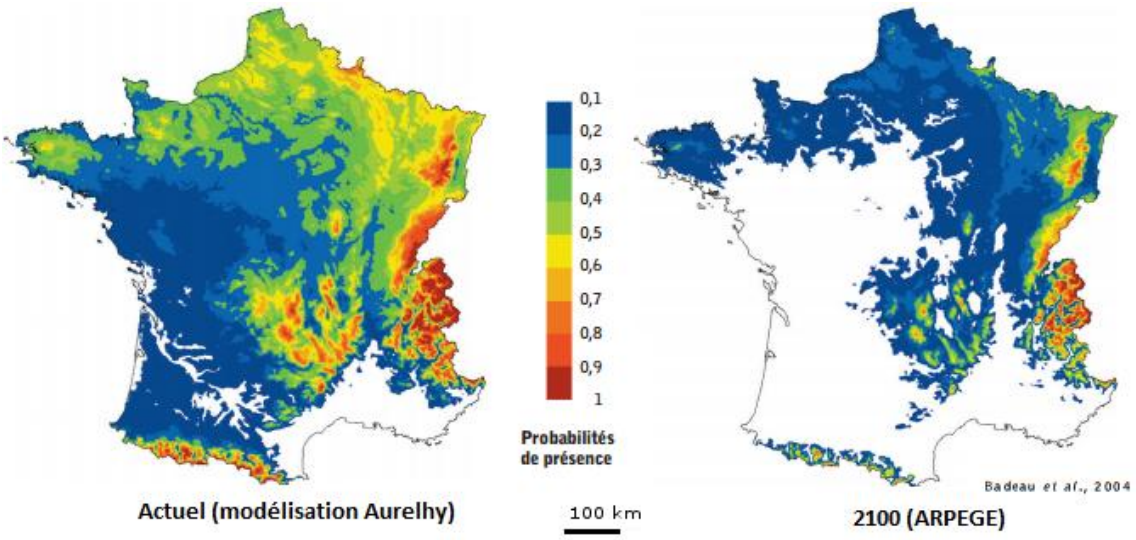


Figure 2.10 Evolution de l'aire de répartition du hêtre en France entre la situation actuelle (modèle Aurelhy) et en 2100 (d'après le modèle ARPEGE et le scénario B2) (Badeau *et al.*, 2004)

Une autre des conséquences observées du changement climatique est le déplacement vers le nord, et en altitude, des essences. Ce déplacement est dû, principalement, à l'augmentation des températures. En effet, les aires de répartition des espèces d'arbres dans le monde sont contraintes par le climat. On observe ainsi une population végétale typique du pourtour méditerranéen qui a « avancé » vers le nord (Rigolot, 2008).

Un des effets positifs du changement climatique pourrait tenir en l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique qui a pour effet de protéger les arbres des sécheresses, du fait de son interaction dans les processus de transpiration des végétaux (Cheaib *et al.*, 2012). Cependant la vulnérabilité à la sécheresse est réelle pour les arbres. La disponibilité en eau du sol a des conséquences sur l'assimilation du carbone et la respiration, dont les modifications vont altérer la croissance de l'arbre. Ce phénomène aura un impact notable sur la production de bois, des feuilles et racines et affectera aussi la nature du sol (Hanson et Weltzin, 2000).

Une des caractéristiques des arbres leur permettant de s'adapter à la disponibilité de l'eau dans le sol est le profil racinaire (Hanson et Weltzin, 2000). Les arbres ayant des racines profondes, tels le chêne, vont ainsi supporter les périodes de sécheresse atmosphérique en pompant l'eau stockée dans les couches profondes du sol (Dawson, 1996 ; Weltzin et McPherson, 1997). Cependant un arbre dépense beaucoup d'énergie pour maintenir un système racinaire profond. Les arbres avec un réseau racinaire superficiel, tel le pin, vont être plus sensibles aux fluctuations du régime pluviométrique. Ils souffriront ainsi plus facilement des évènements secs, ce qui limitera la photosynthèse de l'arbre (Hanson et Weltzin, 2000).

2.4.3 La vulnérabilité de l'élevage breton face au climat

Les animaux n'ont pas tous la même capacité à résister à la chaleur et l'humidité. Mahadevan (1966) rappelle ainsi que ce qui caractérise la capacité d'un animal à s'adapter au climat réside en sa capacité à transpirer pour réduire la température de son corps, ou à réduire sa production de chaleur en adaptant son métabolisme. Au-dessus de 18°C la capacité de l'animal à supporter la

chaleur dépend de l'humidité ambiante (Johnson *et al.*, 1963) et au-dessus de 29°C la chaleur est telle que l'animal est obligé de compenser en augmentant sa respiration. Dans le cas des vaches laitières, très présentes en Bretagne, la température de confort est comprise entre 5 et 25°C (Roenfeldt, 1998). En cas de températures trop élevées, la production et la qualité du lait sont diminuées (Kadzere *et al.*, 2002). L'augmentation de la température affecte également les cochons qui modifient leur comportement par une augmentation des excrétions, engendrant une dégradation de leur milieu de vie. De plus ils ont tendance à rechercher la fraicheur des sols en caillebotis (Hillmann *et al.*, 2001 ; Huynh *et al.*, 2005 ; Aarnink *et al.*, 2006).

2.5 Les enjeux de la gestion de l'eau pour l'agriculture en Bretagne

Les effets du climat sur l'agriculture, la forêt et l'élevage sont ainsi révélateurs des enjeux de la gestion de l'eau à l'échelle régionale, dans le contexte du changement climatique. Les enjeux majeurs correspondent à la période estivale où les besoins en eau potable s'ajoutent aux besoins hydrauliques (respect des débits d'étiages) et aux besoins hydriques (croissance du maïs par apport d'eau d'irrigation). Cette concurrence engendre une demande en eau supérieure aux ressources disponibles et entraîne une surexploitation des ressources non renouvelables (Blum, 2005). Debaeke et Amigues (2007) proposent plusieurs stratégies d'adaptation à la pénurie d'eau pour l'irrigation. Une première se base sur l'ajustement entre l'offre et la demande en créant des ressources supplémentaires; une seconde approche serait d'ajuster la demande à l'offre par des solutions plus économiques sur les plans agronomiques, socio-économiques ou génétiques entre autres. Une troisième stratégie serait la mise en place d'une gestion concertée entre les acteurs locaux sur la question du partage de la ressource en eau. En dernier recours, ils proposent l'indemnisation des pertes de production par l'utilisation d'un fond de calamité agricole.

L'irrigation est donc une étape importante en Bretagne, qui doit être adaptée aux stades phénologiques. On utilise ainsi préférentiellement l'eau d'irrigation lors des étapes critiques de montaison, floraison et remplissage des grains (Debaeke, 2007). La figure 2.11A montre ainsi que l'irrigation ne compte que pour 8 % de la consommation d'eau en Bretagne, soit 3 % de plus que l'utilisation industrielle mais nettement moins que les usages domestiques (87 %). Les surfaces irriguées ont augmenté entre 1988 et 2000 dans le Finistère et le Morbihan (figure 2.11B).

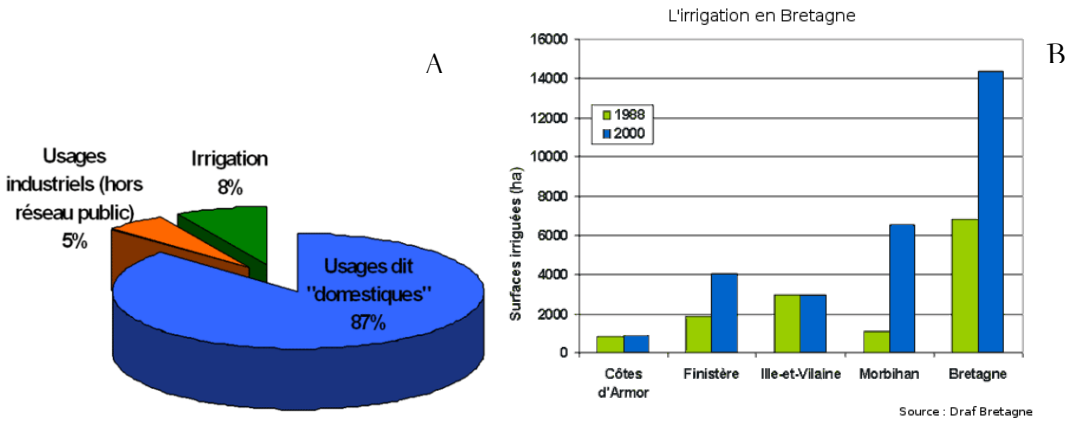


Figure 2.11 A : Répartition des consommations d'eau en Bretagne par secteurs d'activité en 2006 (source : agence de l'eau Loire-Bretagne) ; B : Evolution des surfaces irriguées en Bretagne entre 1988 et 2000

Pour autant en 2009, avec un volume de 10 878 millions de m^3, la Bretagne a le 6ème taux le plus bas du pays en termes de quantité d'eau utilisée pour irrigation (Commissariat Général du Développement Durable, 2012).

Lors des années de sécheresses, l'eau d'irrigation ne doit pas être utilisée pour assurer un rendement identique aux années moyennes, mais plutôt pour permettre un rendement minimal. Cependant l'irrigation ne peut pas être pensée comme solution durable, car elle utilise une ressource limitée à partager avec de multiples usagers (alimentation humaine, santé, etc.) et d'autres pistes doivent être creusées. Il peut être alors intéressant d'utiliser des variétés précoces ou moins demandeuses en eau d'une même céréale, ou d'implanter de nouvelles céréales aux propriétés nutritives similaires. Ces différentes pistes d'économie en eau d'irrigation ont été testées dans leur efficacité (tableau 2.3). Cette information permet de hiérarchiser les méthodes, puisque l'on privilégiera les techniques les plus efficaces et qui sont également parmi les moins couteuses. D'après Debaeke (2007) on voit ainsi que les techniques les plus efficaces concernent la diversification des cultures, où l'on cherche à utiliser des cultures d'été moins demandeuses en eau par exemple.

Tableau 2.3 Appréciation des mesures agronomiques vis-à-vis de l'économie en eau d'irrigation (Debaeke, 2007)

Objectifs	Méthodes	Efficacité
Mieux utiliser l'eau d'irrigation disponible	Limiter les pertes par évaporation	+
	Choix des matériels + réglages	++
	Suivi des avertissements irrigation	+
	Outils d'aide à la décision (stratégie,	++
Réduire le besoin en irrigation	Calendriers restrictifs	++
	Variétés précoces	++
Diversifier l'assolement	Cultures d'été à plus faible besoin	+++
	Cultures d'hiver à irrigation décalée	++++

Le changement du climat tel qu'annoncé par les membres du GIEC fait état, à l'échelle du globe, d'une augmentation des températures et d'une répartition différente des précipitations. Ainsi, des cultures très demandeuses en eau, comme le maïs, pourraient être amenées à être moins utilisées dans les régions affectées par ce type de changement climatique, notamment par des petits exploitants agricoles qui pourraient manquer de ressources (Brunini et Stigter, 2010). Le réchauffement global peut également avoir pour effet un déplacement vers le Nord des zones productrices de cette céréale.

Les questions que l'on se posait dans les années 1970 quand on cherchait à mettre en place une culture dans une nouvelle région, sur l'ensoleillement, la période de gel, les précipitations et le nombre de degrés-jours (Waggoner, 1966), sont de nouveau d'actualité avec le changement climatique.

On peut en effet se demander si une culture qui pousse actuellement sans trop de problèmes dans une région, sera toujours autant adaptée, en termes de pluviométrie par exemple, dans quelques décennies. Les agriculteurs ont, la plupart du temps, mis en place des cultures ou élevages en tenant compte des conditions climatiques. Or, dans le contexte du changement climatique, les agriculteurs s'interrogent sur l'évolution locale du climat. L'apport des modèles est alors décisif pour prendre en compte les changements à venir dans les stratégies agricoles.

Synthèse : L'apport des sécheresses passées et de leurs enseignements quant à la vulnérabilité de l'agriculture

Le savoir accumulé depuis les débuts de l'agriculture a permis de saisir les liens forts qui l'unit au climat, mettant en évidence une certaine vulnérabilité. L'agroclimatologie se base sur un climat moyen, passé présent ou futur, comme support à la planification des pratiques agricoles. Cette science permet de connaitre la vulnérabilité des cultures aux variabilités du climat, notamment l'effet des sécheresses sur certains stades phénotypiques. Pour le maïs, par exemple, la phase d'anthèse est très dépendante de la ressource en eau. De fait, pour que le rendement soit correct il faut assurer une alimentation en eau convenable lors de cette phase de croissance du végétal. L'agroclimatologie renseigne également sur la sensibilité des arbres aux racines superficielles aux évènements secs de plus ou moins grande durée. Cette caractéristique pouvant expliquer la disparition progressive du pin d'ici l'horizon 2060 dans le quart nord-ouest français. Cette discipline s'intéresse également aux effets de la chaleur et l'humidité sur la vie animale, pouvant affecter le confort et le milieu de vie du bétail.

Les sécheresses passées ont confirmé cette vulnérabilité de l'agriculture et de l'environnement de manière générale. Leur étude à travers des récits historiques et grâce à la dendrochronologie a permis d'apprécier les impacts des sécheresses sur l'occupation du sol depuis le 16ème siècle. Au 20ème siècle, la Bretagne et plus généralement la France ont été affectées par des évènements secs variables dans leur intensité, durée et apparition dans l'année. Bien que la majorité des sécheresses se soient produites sur la période estivale, certaines ont démarré au printemps et ont eu des impacts très importants. C'est le cas par exemple de la sécheresse de 1976, qualifiée encore actuellement de sécheresse historique, qui marqua les esprits de par ses conséquences dramatiques sur l'agriculture. Le système agricole breton, intensif par choix socio-politico-économique, fut dès lors remis en question dans sa durabilité si des évènements de cette ampleur venaient à être plus fréquents.

L'importance de l'agriculture dans l'économie bretonne rend compte de la gravité que l'aléa sécheresse peut avoir en Bretagne. Le changement climatique amène une contrainte supplémentaire sur laquelle les scientifiques peuvent aider les agriculteurs en indiquant des scénarios probables de changements à moyen et long termes permettant de réfléchir à des pistes d'adaptation de l'agriculture.

CHAPITRE 3

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : OBSERVATIONS ET PERCEPTIONS AU 20EME SIECLE, SIMULATIONS DES EVOLUTIONS POSSIBLES AU 21EME SIECLE

Sommaire

Introduction....52

3.1 De la notion d'effet de serre à la conceptualisation du changement climatique....52

3.2 Observations et perceptions du changement climatique au 20ème siècle....57

3.3 Les scénarios socio-économiques du GIEC....58

3.3.1 La famille A2....59

3.3.2 La famille A1....60

3.3.3 La famille B1....61

3.3.4 Discussion sur le choix de ces scénarios et de leur représentativité....63

3.3.5 Présentation des nouveaux scénarios....65

3.4 Lien entre scénarios d'émission de gaz à effet de serre et projections climatiques....67

3.5 Les projections climatiques pour le 21ème siècle....69

Synthèse : Le changement climatique au 20ème et 21ème siècle, de l'observation à la modélisation....72

Introduction

Les effets du climat sur de nombreuses activités socio-économiques font du changement climatique un phénomène auquel l'Homme va devoir s'adapter. Les premières publications du GIEC sur la question de l'évolution du climat datent de 1992, mais sa perception par l'Homme est plus précoce. Les changements observés du climat ont donné lieu à de nombreux débats et conférences, dont la conférence de Rome en 1961 co-organisée par l'OMM. Les réflexions sur l'évolution du climat ont continué dans l'optique d'en comprendre plus sur la situation actuelle et future. Fort de cet élan, la création du GIEC en 1988 a permis la mise en place d'une synergie mondiale pour l'étude et le suivi des changements climatiques globaux, leurs causes et conséquences.

La perception de ces changements s'est ressentie avant les années 1980, période à laquelle on attribue généralement le début de la perturbation du climat. C'est principalement par l'étude de la végétation que les premières tendances ont été mises en évidence, ce qui fait de l'agriculteur, du forestier et de toute personne travaillant au quotidien avec la végétation, les premiers témoins de ces changements.

Le GIEC propose des scénarios d'évolutions probables des émissions de gaz à effets de serre basés sur des orientations politiques et économiques diverses sur le 21ème siècle. Continuellement affinés, approfondis et améliorés, les modèles utilisés permettaient dans un premier temps de conclure sur les modifications du climat à l'échelle globale. De récents progrès, tant techniques que scientifiques, ont permis d'affiner la précision des modèles jusqu'à une échelle régionale, plus propice à l'établissement de politiques régionales d'adaptation.

Ce chapitre présente ainsi un bref historique sur les recherches scientifiques ayant permis de mettre en évidence le concept de changement climatique. Puis les perceptions et observations du changement climatique au cours du 20ème siècle sont discutées, pour ensuite proposer une présentation du GIEC et de leurs travaux en termes de conceptions de scénarios prospectifs.

3.1 De la notion d'effet de serre à la conceptualisation du changement climatique

Joseph Fourier, en comparant l'héliothermomètre créé par De Saussure en 1774 à l'atmosphère fut le premier, en 1824, à comprendre l'interaction de l'homme sur le climat à travers l'effet de serre. Il explique ainsi que « *l'établissement et le progrès des sociétés humaines, l'action des forces naturelles, peuvent changer notablement et dans de vastes contrées, l'état de la surface du sol, la distribution des eaux et les grands mouvements de l'air. De tels efforts sont propres à faire varier, dans le cours de plusieurs siècles, le degré de la chaleur moyenne* ». Mathématicien et physicien, ses théories sur la propagation de la chaleur ont constitué une base solide pour la thermodynamique et ont ainsi conduit à la première définition de l'effet de serre. Cette approche de la question de la variabilité du climat sous l'influence de facteurs extérieurs fut approfondie par la suite avec les travaux d'Arrhenius. Son expertise en physique et chimie ont permis à Arrhenius d'aller plus loin en traitant de l'influence de la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique sur la température de la Terre et en proposant pour la

première fois une quantification de l'augmentation thermique (1896). Il prédit ainsi une augmentation de 5°C environ dans le cas d'un doublement du taux de CO_2 dans l'atmosphère (Arrhenius et Waltz, 1990).

La conférence de Rome, organisée par l'UNESCO et l'OMM en 1961, est ensuite l'occasion d'aborder la question du changement climatique, ses causes et conséquences avec des scientifiques compétents sur la question. Les actes de cette conférence (UNESCO, 1963) regroupent ainsi des communications traitant des changements observés par les observations météorologiques, mais aussi à plus grande échelle depuis le quaternaire jusqu'à nos jours, ainsi que des articles basés sur les causes et conséquences des changements du climat. L'utilisation d'observations météorologiques récentes pour suivre les variations du climat a l'avantage, comme le précise Sutcliffe (1963), de s'affranchir de plusieurs variables à long terme, astronomiques par exemple, qui compliquent le problème. A cette époque, certains scientifiques expliquaient le changement du climat par les seules modifications internes du climat, liées à l'océan par exemple ou à la répartition des nuages et des glaces à la surface de la Terre (Sutcliffe, 1963). Cependant, lors de cette même conférence, d'autres scientifiques émirent l'hypothèse d'influences externes sur le système climatique. Ces hypothèses arrivent quelques années après l'étude de Keeling (1958) qui s'intéressa au suivi des concentrations en CO_2 atmosphérique à Mauna Loa et qui permit d'avoir une vision globale du comportement de ce gaz à effet de serre. Les travaux de Keeling ont conduit à la mise en place du premier réseau d'observation du CO_2 atmosphérique. Ce réseau a ainsi servi de support aux scientifiques s'intéressant aux effets anthropiques sur la concentration en CO_2 atmosphérique. Lors de la conférence de Rome, Flohn (1963) proposa ainsi la théorie de l'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère sous l'action de pollutions humaines diverses (industrie, agriculture, feux de forêt). Il s'appuie, pour cela, sur les travaux d'Arrhenius. Dès lors il avance l'hypothèse de conséquences irréversibles sur le climat et l'environnement, du fait de l'action de l'Homme, variant dans leur intensité à l'échelle du globe. Flohn aborde ainsi la plus grande sensibilité aux changements climatiques des régions tropicales ou humides, qui tendraient à s'assécher avec l'évolution du climat.

Lors de cette conférence d'autres travaux ont permis de mettre en évidence les conséquences des changements climatiques sur l'environnement, et en particulier sur l'agriculture. Whyte (1963) distingue quatre types de variations climatiques, en fonction de leur durée, et s'intéresse principalement à celles variant sur de courtes périodes (10 à 50 ans) et à leurs impacts. Il estime en effet que ce sont ces variations qui ont l'impact le plus fort sur l'agriculture. Pour le bétail, avoir un cycle de vie court et une reproduction rapide, comme le mouton et la chèvre, permet de vivre dans des régions où il pleut moins de cent millimètres (Tixeront, 1963). En période de sécheresse le bétail se nourrit de la végétation aérienne consommable jusqu'aux racines superficielles, après épuisement de la végétation le troupeau se déplace ou voit sa population diminuer. Quand les précipitations redeviennent plus importantes la végétation repart et le troupeau augmente rapidement grâce à son cycle de reproduction rapide (Tixeront, 1963). L'altération du cycle de l'eau a donc des conséquences notables sur l'agriculture dans les zones semi-arides. La végétation naturelle s'adapte au climat (précipitation et évapotranspiration) ainsi qu'à la capacité du sol à retenir l'eau (Tixeront, 1963). Ainsi, quand l'évapotranspiration est supérieure aux précipitations, la végétation est discontinue dans l'espace ou le temps. Si l'Homme

peut sélectionner un couvert végétal, grâce à l'agriculture, il doit être conscient des besoins en eau de celui-ci et vérifier leur compatibilité avec le sol et le climat.

Ces diverses approches du changement climatique, influencé par des facteurs internes ou externes, ont fait leurs chemins dans les travaux des scientifiques qui continuèrent à s'interroger sur la quantification du phénomène et la détermination de ses causes et conséquences. L'impact du CO_2 sur l'augmentation des températures a été particulièrement étudié dès les années 1960 (Kaplan, 1960 ; Gebhart, 1967 ; Bryson, 1970 ; Manabe, 1970 ; Robinson et Robbins, 1970 ; Broecker, 1975 ; Madden et Ramanathan, 1980 ; Kellogg et Schware, 1981 ; Ramanathan *et al.*, 1985). Les modèles climatiques développés également dans les années 1960 (Smagorinsky *et al.*, 1965) intègrent alors rapidement les gaz à effet de serre pour estimer leurs impacts sur les changements climatiques (Manabe, 1969 ; Manabe et Brian, 1969 ; Manabe et Wetherald, 1980 ; Watts, 1980). Les conséquences du CO_2 sur le climat amènent la question de l'impact de l'Homme, puisque l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique s'explique majoritairement par la pollution industrielle. Ainsi, dans les années 1970, des chercheurs proposent des réflexions sur l'impact de l'Homme sur le changement climatique qui commence à s'observer dans une grande diversité de milieux socio-économiques et sous des climats variables (Keeling, 1970 ; Landsberg, 1970 ; Bach, 1976 ; Wang *et al.*, 1976 ; Flohn, 1977 ; Flohn et Fantechi, 1984a).

Mais les scientifiques s'intéressant à l'identification des causes du changement climatique ne s'interrogent pas exclusivement sur les impacts des gaz à effet de serre. Les influences internes au système climatique sont également étudiées. Flohn (1980) explique en effet à travers un schéma (figure 3.1), le fonctionnement du système climatique global constitué de plusieurs éléments s'influençant les uns les autres de manière plus ou moins forte. On voit ainsi nettement les interactions entre l'atmosphère et l'océan dont la durée de l'effet mémoire varie fortement. Alors que des changements atmosphériques vont se ressentir pendant une semaine environ, des modifications impactant l'océan peuvent influencer le système pendant plus d'un millier d'années. Forts de ces connaissances sur les sous-systèmes climatiques et leurs liens, des chercheurs creusent également la question de l'évolution du climat à travers l'étude des bilans d'énergie dépendant des circulations atmosphériques et océaniques (Vowinckel et Orvig, 1967 ; Robock, 1978 ; Ramanathan, 1981 ; Bucha, 1986).

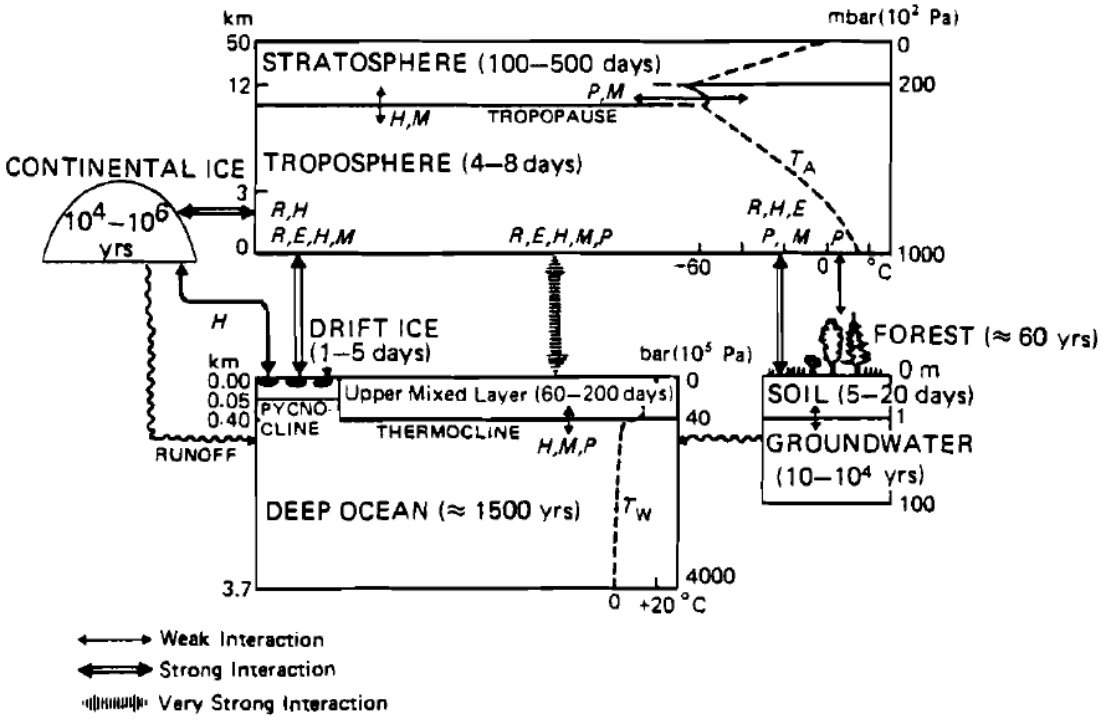


Figure 3.1 Présentation du système climatique avec les caractéristiques d'échelles temporelles des sous-systèmes et les liens les unissant. R : radiation ; H : chaleur ; E : évaporation ; M : dynamisme ; P : particules ou gaz ; *Tw* : température de l'eau ; T_A : température de l'air (Flohn, 1980)

A partir des années 1970 on note une prise de conscience généralisée des conséquences du changement climatique, impactant divers milieux socio-économiques. La vulnérabilité de la végétation, de manière générale, aux aléas climatiques est ainsi étudiée, mais plus particulièrement pour les conséquences sur l'agriculture et les productions céréalières du fait de leur importance dans l'économie mondiale (Budyko, 1972 ; Thompson, 1975 ; Katz, 1977 ; Parry, 1978 ; Thompson, 1980 ; Flohn et Fantechi, 1984b ; Ritchie, 1986). Les conséquences plus générales du changement climatique sont également suivies, notamment pour en déduire la vulnérabilité de l'Homme (Schneider, 1977 ; Kates, 1979 ; Hansen *et al.*, 1981 ; Warrick et Riebsame, 1981 ; Butzer, 1983 ; Kates, 1985 ; Riebsame *et al.*, 1986).

L'ampleur prise par ce récent concept et les conséquences négatives pour l'environnement ont conduit l'OMM et le PNUE, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, a mettre en place un groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat en 1988, le GIEC (IPCC en anglais pour Intergovernmental Panel on Climate Change). Il est ainsi défini que le premier objectif du GIEC est de présenter un examen compréhensible des connaissances sur le changement climatique afin d'apporter des recommandations sur les impacts socio-économiques de ces changements, de proposer des stratégies d'adaptation ainsi que d'appuyer les éléments sur lesquels il faudrait se baser lors d'une possible convention sur le climat. Les chercheurs membres de ce groupe, actuellement au nombre de 500, proviennent des différents pays membres des Nations Unies. Les objectifs du GIEC sont régulièrement discutés afin de s'adapter à l'évolution du climat et de ses enjeux sociétaux. Aujourd'hui un autre rôle est ainsi attribué au GIEC, mettant en avant la volonté d'établir des rapports scientifiques, techniques et socio-économiques rédigés de façon objective, transparente et compréhensible (IPCC, 2012). Le GIEC est organisé en trois

groupes de travail : le Groupe I qui étudie les principes physiques du système climatique et du changement climatique ; le Groupe II qui travaille sur les impacts et les notions d'adaptation et de vulnérabilité face aux changements climatiques ; le Groupe III qui étudie les moyens d'atténuer les changements climatiques. En 1990 le premier rapport d'évaluation du GIEC a mis en évidence l'intérêt de traiter le changement climatique et ses conséquences à l'échelle mondiale. Ce premier rapport, suivi à l'heure actuelle par trois autres et disponible sur le site internet de l'organisation *www.ipcc.ch*, a conduit à la formation de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC, UNFCCC en anglais), traité international majeur sur la question du changement climatique et de ses conséquences. Un cinquième rapport est prévu pour 2014 dans lequel les scénarios utilisés par le GIEC ont été repensés pour mieux correspondre à l'évolution de l'Homme et des sociétés. Ces nouveaux scénarios sont présentés dans ce chapitre à la suite des scénarios utilisés dans les quatre premiers rapports.

Dès lors, plusieurs rencontres entre scientifiques et hommes politiques ont été organisées afin de réfléchir à la mise en place d'actions mondiales pour lutter contre les conséquences de l'évolution de l'Homme sur l'environnement. Le sommet de la Terre à Rio (PNUE, 1992) basé sur la déclaration de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement (Stockholm, 1972) aboutit à l'établissement de 27 principes ayant pour objectifs d'assurer une évolution de la société respectant les intérêts de tous, tout en protégeant l'environnement. Cette mise en place d'un développement durable se base sur une diminution de la pauvreté, le droit pour tous à une vie saine, ainsi que l'intégration complète de l'environnement dans le processus de développement d'un pays. Ces principes mentionnent à de nombreuses reprises les droits des citoyens du monde et des politiques nationales, mais la notion de devoir est très réduite. Ces principes n'ont eu qu'un très faible impact mondial sur la prise de conscience de la vulnérabilité de l'environnement. Le sommet de la Terre a tout de même permis la validation de la création du CCNUCC qui est entrée en vigueur en 1994. Depuis sa création, les pays membres se rencontrent régulièrement pour discuter de directives à mettre en place dans le contexte du changement climatique. C'est ainsi que le Protocole de Kyoto a été signé en 1997 par certains pays ayant ratifié le CCNUCC. Mis en place en 2005 il a pour objectif une diminution des émissions de GES de l'ordre de 5 % sur la période 2008-2012. Difficile à mettre en place pour les pays émergents et inconcevable pour certains Etats dont le sous-sol est riche en pétrole, ce protocole a surtout été accepté et défendu par l'Union Européenne et les pays sensibles à la montée des eaux. Les moyens pour parvenir à cette diminution des émissions de GES ont été l'objet des accords de Bonn et Marrakech en 2001. A la suite de cet élan plusieurs rencontres ont eu lieu à travers le monde : Bali en 2007, Copenhague en 2009, Cancun en 2010 et Durban en 2011. Cependant, du fait d'un développement plus tardif, de nombreux pays ne sont pas prêts à établir les mêmes stratégies que des pays développés qui ont plus de moyens pour aller vers les énergies renouvelables, par exemple. Ainsi ces accords mondiaux peinent à être fixés et acceptés et aboutissent généralement à des principes peu contraignants pour les pays.

Pour autant, le changement climatique observé depuis les années 1960 ne s'atténue pas. Les premières perceptions, qui ont conduit à la mise en place du GIEC et du CCNUCC, se sont même intensifiées au cours de la seconde moitié du 20ème siècle.

3.2 Observations et perceptions du changement climatique au 20ème siècle

Le premier rapport du GIEC présente, dans le chapitre 7, les observations mesurées de l'évolution du climat depuis la fin du 19ème siècle jusqu'aux années 1980. L'évolution des températures observée à l'échelle mondiale varie d'un hémisphère à l'autre. Dans l'Hémisphère Nord, l'augmentation présente des discontinuités. Ellsaesser *et al.* (1986) détaillent l'évolution sur cent ans en une première période d'augmentation des températures de l'ordre de 0,3°C jusqu'en 1930, suivie d'une diminution d'environ 0,2°C jusqu'au milieu des années 1960 (Houghton *et al.*, 1990). L'augmentation des températures dans les années 1970 a été particulièrement forte, puisqu'elle a varié de 0,3°C en moins de dix ans. Les tendances sur cent ans montrent une augmentation de 0,53°C sur la période 1881-1989 sur les surfaces terrestres du globe (Jones, 1988). Dans l'Hémisphère Sud les températures varient peu, la seule période où l'on note une augmentation est au début du 20ème siècle jusqu'à la fin des années 1930, avant et après aucune tendance ne s'observe (Houghton *et al.*, 1990). L'augmentation sur cent ans est mois importante que dans l'Hémisphère Nord avec 0,45°C. En ce qui concerne la température des océans, Helland-Hansen et Nansen (1920) ont mis en évidence une période de refroidissement jusque dans les années 1920, suivie par une rapide augmentation des températures dans l'Hémisphère Nord. Les variations des températures des océans coïncident avec celles des températures des terres, en prenant en compte un décalage dû au temps de réaction des océans plus important que l'atmosphère (Houghton *et al.*, 1990). Pour les océans de l'Hémisphère Sud les températures ont surtout augmenté dans les années 1970, à la suite d'une longue période de stabilité. L'augmentation moyenne pour les deux hémisphères est de 0,4°C en cent ans. En ce qui concerne les précipitations, leur évolution sur les parties terrestres des deux hémisphères ont été étudiées à grande échelle (Bradley *et al.*, 1987 ; Diaz *et al.*, 1989 ; Vinnikov et Yeserkepova, 1991). Il a ainsi été mis en évidence que, sur les dernières décennies, les précipitations augmentaient dans les régions de latitudes moyennes, et diminuaient au niveau des tropiques (Houghton *et al.*, 1990). A une échelle plus fine une plus grande variabilité s'observe. L'Europe par exemple semble divisée en deux, avec une partie nord où les précipitations tendent à augmenter et une partie sud où elles diminuent (Schönwiese et Birrong, 1990). En Afrique de l'Est et en Inde on remarque une grande variabilité décadaire pour lesquelles cependant aucune tendance ne se détache. En Inde des tendances notables sont tout de même observées en ce qui concerne l'évolution des sécheresses. Gadgil (1988) et Gregory (1989) ont ainsi mis en évidence des sécheresses fréquentes sur la période 1890-1920, peu fréquentes de 1930 à 1964 et de nouveau régulières à partir de 1965 pour les régions humides du nord-est du pays. Ces tendances doivent cependant être modérées du fait de l'utilisation de données sur une longue période où les techniques de mesure ont beaucoup évolué et du fait des différentes techniques appliquées d'un pays à l'autre, rendant parfois difficile l'homogénéisation (Houghton *et al.*, 1990).

Malgré tout, ces observations mettent en évidence des variations notables des précipitations et des températures à l'échelle du globe engendrant une altération du cycle de l'eau, que ce soit par l'augmentation d'épisodes secs ou d'inondations par exemple. Ces modifications, associées à l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique, ont des conséquences notables sur

l'environnement : forêt, agriculture, rivières, et sur la santé humaine du fait de la potabilité de l'eau.

3.3 Les scénarios socio-économiques du GIEC

Le GIEC est principalement connu pour son travail de constitution de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) à partir de situations politico-économiques, publié dans le rapport spécial des scénarios d'émissions SRES, *Special Report for Emissions Scenario* (IPCC, 2000). Les quarante scénarios SRES sont regroupés dans six groupes de scénarios, inclus dans quatre familles, elles-mêmes résultant de quatre canevas qualitatifs : A1, A2, B1 et B2 (figure 3.2).

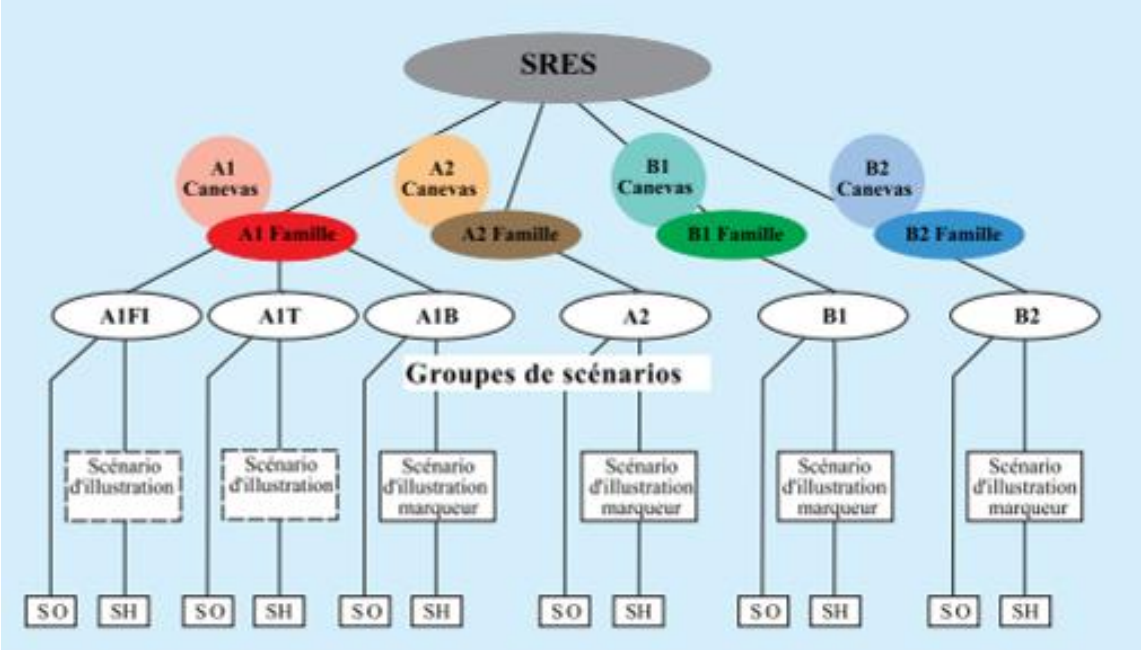


Figure 3.2 Hiérarchisation des quatre canevas et scénarios SRES (IPCC, 2000)

Les quarante scénarios SRES reflètent des futurs probables selon les orientations économiques et politiques prises par les pays développés et les pays émergents. Ces scénarios nous renseignent sur l'évolution des GES à longue durée de vie, ceux-ci étant les éléments ayant le plus fort forçage radiatif sur le climat (IPCC, 2007). Les évolutions des GES et des aérosols ont des conséquences sur l'absorption, l'émission et la diffusion du rayonnement dans l'atmosphère et à la surface terrestre, entraînant ainsi des changements du climat (IPCC, 2007). Aucun des membres du GIEC ne fait état d'une plus forte probabilité d'occurrence d'un scénario par rapport à un autre. Il est en effet impossible d'établir des certitudes quant à l'avenir, quel qu'il soit.

Face à la quantité de scénarios proposée par le GIEC, un choix a été fait pour ne prendre en compte que les plus pertinents pour cette étude. Etant donné l'utilisation majoritaire des trois familles de scénarios : A1B, A2 et B1 dans la littérature, ce sont ces familles qui sont utilisées dans le cadre de cette thèse et qui sont donc présentées dans les paragraphes suivants à partir d'une publication du GIEC : *Special Reports on Emission Scenario* (2000).

3.3.1 La famille A2

Au sein de la famille A2 se trouve un seul groupe de scénarios appelé A2, correspondant à une évolution du monde très hétérogène. Ces changements reposent sur l'autosuffisance des peuples et la préservation des identités locales. Le développement et la croissance économique plutôt lents, associés à la forte croissance démographique engendreraient une pollution au CO_2 particulièrement importante, augmentant la teneur en GES dans l'atmosphère. Les experts du GIEC décrivent plus particulièrement la famille A2 comme correspondant à un avenir où l'autonomie face aux ressources énergétiques est privilégiée par rapport aux droits économiques, sociaux et culturels des différentes régions du globe. Certaines régions développent, ou maintiennent, tout de même une protection sociale assez forte où les inégalités de revenus sont réduites, contrairement à des régions ne prenant pas en compte cet aspect et qui présentent donc des revenus plus hétérogènes. Les différences de développement à l'échelle de la planète sont telles que l'écart de revenu entre les pays industrialisés et ceux en voie de développement sont très importants. De manière générale les idées et capitaux sont peu mobiles engendrant des différences de productivité et de revenus d'un pays à l'autre. Ainsi les régions bénéficiant de ressources énergétiques et minérales en abondance vont les utiliser de manière intensive, tandis que les pays plus pauvres de ce point de vue chercheront à limiter leur dépendance face à ces ressources en privilégiant l'innovation technologique (SRES, 2000). Il y aurait ainsi une évolution à deux niveaux : les pays où le PIB est important mais où les ressources sont limitées se tourneraient vers les énergies renouvelables (ou nucléaires), les pays à faible PIB et riches en ressources resteraient sur une utilisation de technologies fossiles. La baisse relative de la fécondité reste suffisamment faible pour occasionner une des populations les plus importantes parmi les quatre familles de scénarios, avec 15 milliards d'habitants à l'horizon 2100. Cette augmentation importante de la population met en évidence l'importance de la subvention aux besoins alimentaires mettant la productivité agricole comme enjeu majeur au 21ème siècle. L'innovation et la recherche seraient ainsi particulièrement dédiées à l'agriculture et à l'environnement de manière plus générale. La pollution de l'eau et l'érosion des sols peuvent être amenés à s'intensifier du fait du développement d'une agriculture à haut rendement, les contraintes sur l'environnement seraient cependant étudiées mais pas de la même manière selon les régions. Globalement les préoccupations environnementales sont limitées même si des tentatives de contrôle de la pollution sont mises en place (SRES, 2000).

Bien que le monde dépeint par les économistes du GIEC pour le scénario A2 n'apparaisse pas comme idéal pour l'Homme et son environnement, les chercheurs ne jugent pas les dynamiques sous-jacentes comme bonnes ou mauvaises. Il est difficile de présenter un bilan de chaque scénario en termes de points positifs et négatifs. Dans le cas du scénario A2 un des points positifs les plus forts toucherait les sociétés puisque l'on verrait une tendance croissante au pluralisme culturel et à l'acceptation des différences.

Cette famille correspond à une évolution particulièrement pessimiste du climat, avec une augmentation de la température attendue pour 2100 de 3,4°C à l'échelle de la planète (figure 3.3) et une augmentation du niveau de la mer de 0,23 à 0,51 mètres pour la fin du 21ème siècle par rapport à la fin du 20ème siècle. Ce n'est cependant pas le pire des scénarios proposés par le GIEC,

puisque le scénario A1FI, inclus dans la famille A1 détaillée ci-après, aboutirait à une augmentation de la température de 4°C et du niveau de la mer de 0,26 à 0,59 mètres à l'horizon 2100, par rapport à la période 1980-1999 (SRES, 2000).

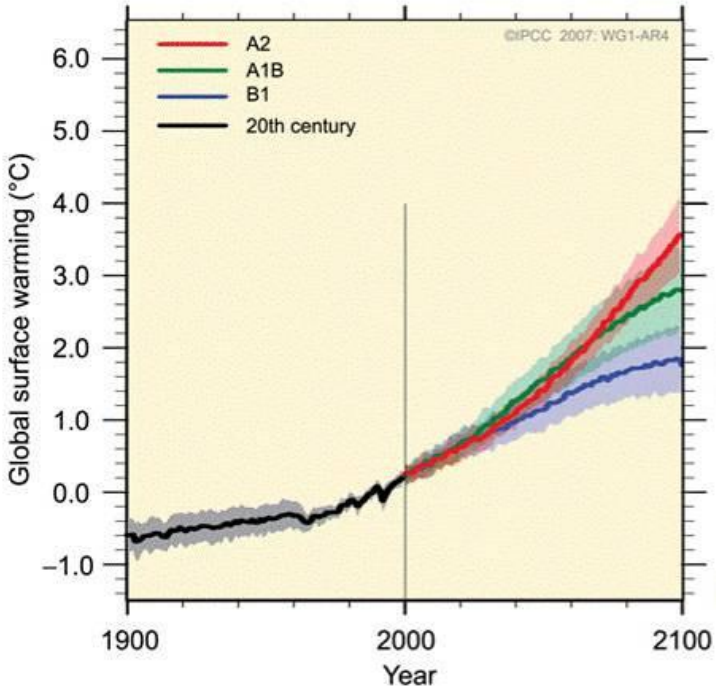


Figure 3.3 Augmentation de la température du globe selon les trois scénarios d'intérêt (IPPC, 2007)

3.3.2 La famille A1

La famille A1 présente l'hypothèse d'une croissance économique mondiale très rapide associée à un pic de la population mondiale au milieu du 21ème siècle et à l'utilisation de nouvelles technologies plus efficaces. Les revenus moyens par pays tendent à s'homogénéiser. Cette famille de scénarios repose notamment sur des taux élevés d'investissement et d'innovation dans l'éducation et les technologies, ainsi que sur une mobilité internationale des personnes, idées et technologies (SRES, 2000). La croissance de la productivité et de la diffusion des technologies sont favorisées par les progrès sur les transports et communications et les changements de politiques nationales concernant l'immigration et l'éducation. Le groupe de scénario A1 apparait comme le plus représenté dans la littérature (Shinn, 1985 ; Schwartz, 1991 ; Peterson, 1994 ; Glenn et Gordon, 1997 et 1999 ; Hammond, 1998). Ces scénarios sont caractéristiques d'une dominante entrepreneuriale européenne et américaine où d'importants progrès sont réalisés dans les technologies de communication. Certains scénarios de cette famille reposent sur une hypothèse de progrès technologiques rapides, de libéralisation des marchés commerciaux et d'une hausse des revenus (Nakićenović *et al.*, 1998). Ces progrès technologiques permettent d'assurer des ressources énergétiques et minérales abondantes puisqu'ils réduisent les coûts de production en termes de ressources et augmentent les réserves économiquement récupérables. De plus, ils permettent d'utiliser les ressources naturelles à d'autres fins que la satisfaction des besoins humains qui sont majoritaires actuellement. Les tendances économiques étant étroitement liées

aux tendances démographiques, on observerait, dans le cas d'un scénario de la famille A1, un impact de l'augmentation de la richesse sur les taux de mortalité et de fécondité qui diminueraient. On aurait ainsi un pic de population mondiale à 9 milliards à l'horizon 2050 suivi d'une diminution pour atteindre 7 milliards en 2100. L'augmentation de l'âge moyen de la population aurait des conséquences sur les systèmes sociaux de retraite et d'assurance maladie par exemple. L'économie mondiale se développerait selon les mêmes tendances que depuis 1850 pour atteindre un revenu moyen mondial par habitant de 21000 $ US en 2050. L'augmentation des revenus conduit à des habitudes alimentaires tournées vers la viande et les produits laitiers qui pourrait diminuer par la suite du fait des conséquences sur la santé d'une population vieillissante. La hausse de la qualité du niveau de vie associée à un développement économique rapide n'empêche pas certains problèmes. Ces scénarios intègrent ainsi le risque d'exclusion sociale pour de nombreuses communautés, comme ce fut le cas au cours du 20ème siècle dans les pays aisés (SRES, 2000).

L'approche qualitative de l'environnement, actuellement basée sur la conservation de la nature, évoluerait en une gestion active des services environnementaux et naturels, augmentant ainsi la résilience écologique. Les revenus élevés rendent l'accès aux voitures plus facile pour plus de personnes, conduisant à un développement tentaculaire des banlieues et à une densification des réseaux de transports à l'échelle nationale et internationale. Le développement énergétique reste incertain dans cette hypothèse d'un monde où les technologies évoluent rapidement. Certains scénarios correspondent à une consommation importante des énergies carbonées pour les pays où les ressources en charbon sont abondantes, c'est le cas par exemple du scénario A1FI. D'autres scénarios font état d'une intensification de la consommation de pétrole et de gaz naturel (SRES, 2000). Cependant, d'autres hypothèses prennent en compte les énergies renouvelables et le nucléaire. Ce type d'énergie est soit majoritaire comme dans le cas du scénario A1T, soit intégré dans un système équilibré avec l'utilisation des ressources fossiles, ce qui correspond au scénario A1B. Prendre en compte ces différentes pistes d'évolution en ce qui concerne les ressources fossiles ou renouvelables engendre différentes hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre.

Le scénario A1B, qui a été retenu pour cette étude, prévoit une augmentation de la température de 2,8°C à l'échelle du globe à l'horizon 2100 (figure 3.3). Cette hypothèse de changement climatique propose ainsi une situation intermédiaire aux scénarios A2 et B1. Ce scénario prévoit également une augmentation du niveau de la mer de 0,2 à 0,48 mètres pour la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999 (IPCC, 2007).

3.3.3 La famille B1

La famille de scénarios B1 est nettement plus optimiste sur l'évolution du climat car elle repose sur une forte conscience environnementale et sociale intégrée dans une politique mondiale de développement durable. Selon cette hypothèse scénaristique, les gouvernements, entreprises, médias et citoyens portent une grande attention au développement durable. Au sein de cette famille on retrouve des scénarios qui intègrent des modes de vie respectueux de l'environnement basés sur des technologies propres (Wilkerson, 1995 ; Gallopin *et al.*, 1997). Ce respect de l'environnement pourrait toucher l'économie d'ici 2050 selon Glenn et Gordon (1997) grâce à

l'éducation. Le développement durable intégré à l'échelle de la planète se traduirait par un partage plus équitable des ressources dans l'intérêt de tous et pour une plus grande sécurité de l'humanité (Glenn et Gordon, 1997). Tout comme pour le scénario A1, le monde selon B1 serait en mutation rapide où le développement économique serait équilibré et les revenus convergeant. Cependant les investissements économiques du monde B1 privilégieraient une dématérialisation associée à une meilleure protection de l'environnement et des institutions sociales. Ce qui diffère de l'univers A1 qui se focalise principalement sur une forte croissance économique. Du point de vue social une protection forte limiterait l'exclusion liée à la pauvreté, mais des inégalités seraient tout de même visibles à l'échelle du monde (SRES, 2000). Rechercher l'équilibre social par la redistribution des revenus et l'établissement d'un grand nombre de taxes pourrait nuire à l'économie et aux marchés mondiaux. La recherche et développement bénéficie d'un intérêt croissant du fait de l'importance de la mise en place de technologies propres. La combinaison de l'évolution technologique avec de nouvelles mesures organisationnelles telles que le recyclage permet de faire des économies d'énergie notables et de réduire la pollution. La prise de conscience globale de l'environnement conduirait à une anticipation importante des aspects négatifs de l'évolution du climat qui seraient gérés à l'échelle locale, nationale et internationale. Cela amènerait une élimination à long terme des pluies acides, une meilleure gestion de l'occupation du sol et de ses impacts sur l'environnement. Le développement des villes ne serait pas tentaculaire mais compact, privilégiant les transports publics non motorisés (SRES, 2000).

La démographie évoluerait comme dans le cas de la famille A1 avec un faible taux de mortalité et de fécondité. Cependant les raisons ne sont pas les mêmes. Dans le cas de la famille B1 cette évolution serait motivée par des préoccupations sociales et environnementales. La population mondiale atteindrait ainsi 9 milliards en 2050 puis décroitrait pour passer à 7 milliards en 2100. Le revenu global par habitant progresserait vers une situation d'égalité internationale et nationale et serait de 13 000 dollars en 2050. Les dépenses évolueraient également pour se focaliser sur des achats de services plutôt que de biens matériels et privilégiant la qualité à la quantité. Cette mutation serait favorisée par la mise en place d'une fiscalité environnementale sur les prix des ressources.

La transition vers des systèmes d'énergie alternatifs se ferait progressivement du fait du déclin des ressources en pétrole et en gaz (SRES, 2000). Le gaz, énergie fossile la plus propre, serait fortement utilisé du fait de cette caractéristique, mais les préoccupations environnementales conduiront rapidement à l'utilisation d'énergie post-fossiles. De fortes motivations pour la mise en place d'une agriculture à faible impact avec de faibles apports, ainsi que l'entretien de vastes zones de nature sauvage, contribuerait à des prix élevés des denrées alimentaires. Cela engendrerait une consommation de viande beaucoup plus faible que celle occasionnée par les politiques d'un scénario de type A1. Ces dynamiques locales et régionales de politiques environnementales conduiraient à des émissions de GES relativement faibles, même sans interventions explicites pour atténuer le changement climatique.

La famille de scénarios B1 est ainsi la plus optimiste de celles proposées par le GIEC, avec une augmentation de la température de 1,8°C et une élévation du niveau de la mer comprise entre 0,18 et 0,38 mètres prévues en 2100 par rapport à la fin du 20ème siècle (IPCC, 2000). Cependant,

cet optimisme semble de plus en plus utopique à l'heure actuelle puisqu'en 2012 il semblerait que les taux d'émissions de GES aient dépassés ceux prévus dans le cas d'un scénario de type B1.

3.3.4 Discussion sur le choix de ces scénarios et de leur représentativité

Aucun des scénarios SRES ne s'est vu affecter un niveau de probabilité (IPCC, 2000). Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC précise également que tous les scénarios présentent le même niveau de fiabilité.

Du fait de son caractère modéré et de sa grande présence dans la littérature, le scénario A1B est donc présenté ici. Il correspond à une situation médiane en termes d'évolution de l'utilisation des ressources énergétiques. Bien que la consommation énergétique mondiale soit principalement tournée vers les ressources fossiles (figure 3.4), le développement des énergies renouvelables à l'échelle du globe (figure 3.5) laisse présager la faisabilité de ce scénario.

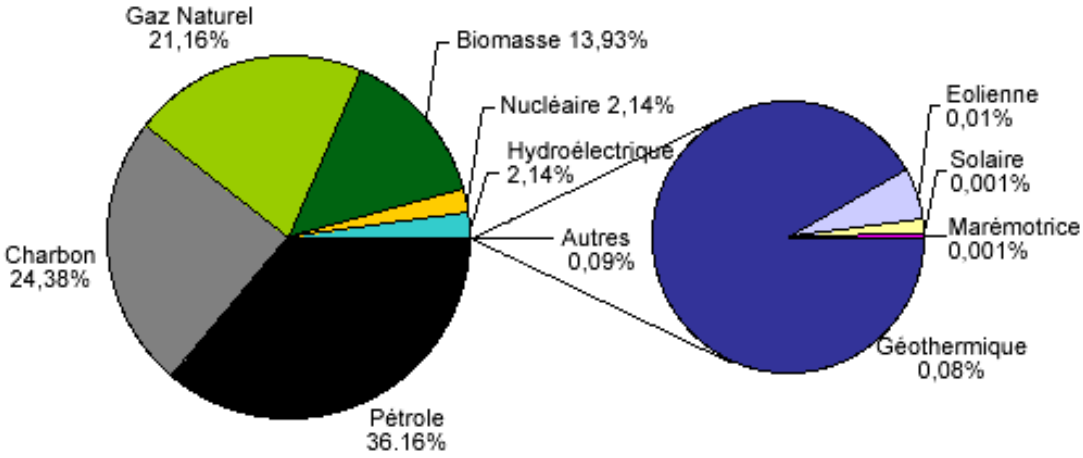


Figure 3.4 Consommation mondiale des différents types d'énergie en pourcentage (Ramage, 1997)

Cependant, l'incertitude de l'avenir doit nous amener à considérer des évolutions différentes. Il est en effet possible que les politiques de développement durable soient bien intégrées, ce qui rendrait la famille de scénario B1 possible. Une tendance à la consommation toujours plus importante des énergies fossiles, notamment avec les récentes avancées technologiques permettant l'extraction du gaz de schiste, peut également être envisageable, ce qui conduirait à une évolution du climat selon la famille de scénarios A2.

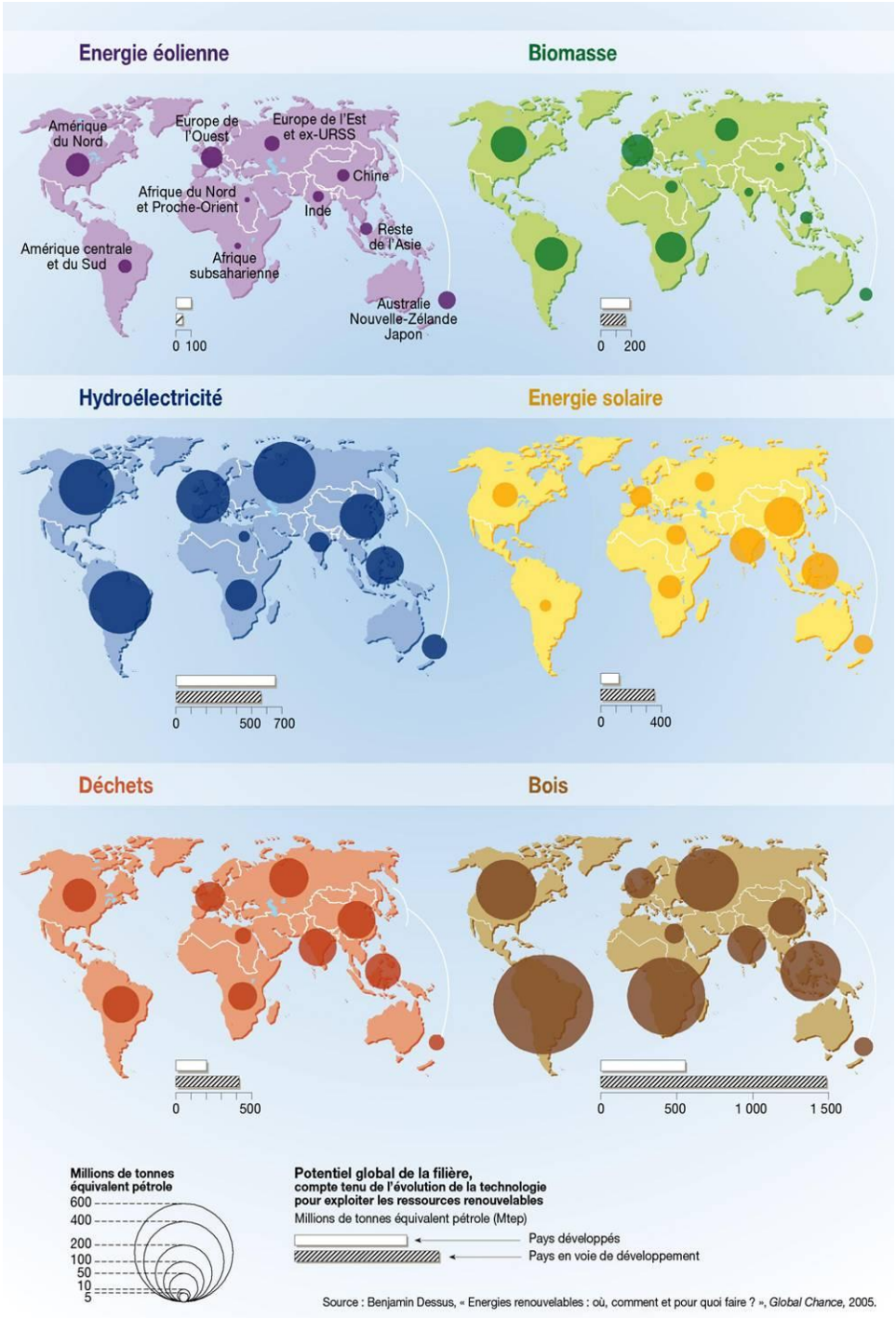


Figure 3.5 Production d'énergies renouvelables en tonnes équivalent pétrole à travers le monde (Dessus, 2005)

L'utilisation des trois groupes de scénarios A1B, A2 et B1 permet ainsi d'avoir une vision assez complète sur l'avenir probable de la planète en termes d'émission de gaz à effet de serre. Cependant, il est important de cerner les incertitudes de ce niveau de données du fait de leur position initiale dans la chaîne de données. Cet aspect sera notamment développé dans la partie 2.

3.3.5 Présentation des nouveaux scénarios

Les nouveaux scénarios du GIEC interviennent dans le cinquième rapport d'évaluation. Il n'est donc pas possible de les utiliser à l'heure actuelle pour faire des projections régionales du changement climatique induit par ces nouvelles hypothèses d'évolution. Cependant, cette innovation importante sera bientôt communiquée et mérite dès lors que l'on s'y intéresse. Leur présentation dans cette partie se base sur la synthèse du séminaire intitulé « Mieux comprendre les nouveaux scénarios du GIEC » (GICC, 2011).

Basés sur la situation des sociétés dans les années 1990, les scénarios utilisés jusqu'à présent n'intègrent pas l'évolution récente de l'Homme et de nos connaissances sur le climat. Ils ne prennent donc pas en compte l'évolution importante des pays émergents ni les révisions à la baisse de l'augmentation de la population à l'horizon 2100. Ces nouveaux scénarios peuvent ainsi être considérés comme une mise à jour des idées sur le changement climatique et ses impacts. En plus de ces réflexions, les nouveaux scénarios innovent de par leur méthodologie. Alors que les anciens scénarios présentaient une évolution linéaire, les nouveaux sont caractérisés par des analyses simultanées et en parallèle. Les scientifiques travaillent toujours à partir de quatre hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre (RCP). Les climatologues en déduisent des projections climatiques, tandis que les socio-économistes produisent des scénarios socio-économiques pour vérifier la justesse des hypothèses d'émissions de GES. Les scénarios de référence (RCP) dépendent du forçage radiatif sur la période 2006-2300. Ces forçages représentent un changement du bilan radiatif sous l'effet des GES dans les basses couches de l'atmosphère, exprimés en W/m². Ces quatre scénarios de référence ont été sélectionnés sur la base de 300 scénarios décrits dans la littérature dont 10 % sont inférieurs au scénario le plus favorable : RCP 2.6, et 10 % supérieurs au scénario le plus pessimiste : RCP 8.6 (GICC, 2011). Les noms de ces scénarios font référence au forçage radiatif correspondant : RCP 2.6 correspond à un pic à 2,6 W.m² ; RCP 4.5 et RCP 6 à une stabilisation après 2100 à 4,5 et 6 W.m² respectivement et RCP 8.5 qui correspond à une croissance continue dépassant les 8,5 W.m² en 2100 (Moss *et al.*, 2010).

Si l'on compare ces quatre nouveaux scénarios aux anciens (figure 3.6), on voit que le scénario RCP 2x est plus optimiste que les trois autres. Il intègre en effet les politiques de réduction des émissions pouvant limiter le réchauffement à 2°C (GICC, 2011). Ce nouveau scénario confirme ainsi l'intérêt de travailler avec le scénario B1, même s'il a pu sembler que les seuils d'émissions de gaz à effet de serre qui lui étaient caractéristiques étaient dépassés en 2012. Les trois autres scénarios RCP sont très proches des trois scénarios SRES. On voit en effet qu'ils suivent à peu près les mêmes tendances jusqu'en 2100. RCP 8.5 est plus fort que SRES A2 et continue de croitre sur 200 ans ce qui aboutirait à un réchauffement global de 12°C à l'horizon 2300 ; RCP 6 est légèrement inférieur au SRES A1B et présente une situation stable de 2100 à 2300 ; RCP 4.5 est similaire au SRES B1 et est prolongé jusqu'en 2300 par une période de stabilisation également.

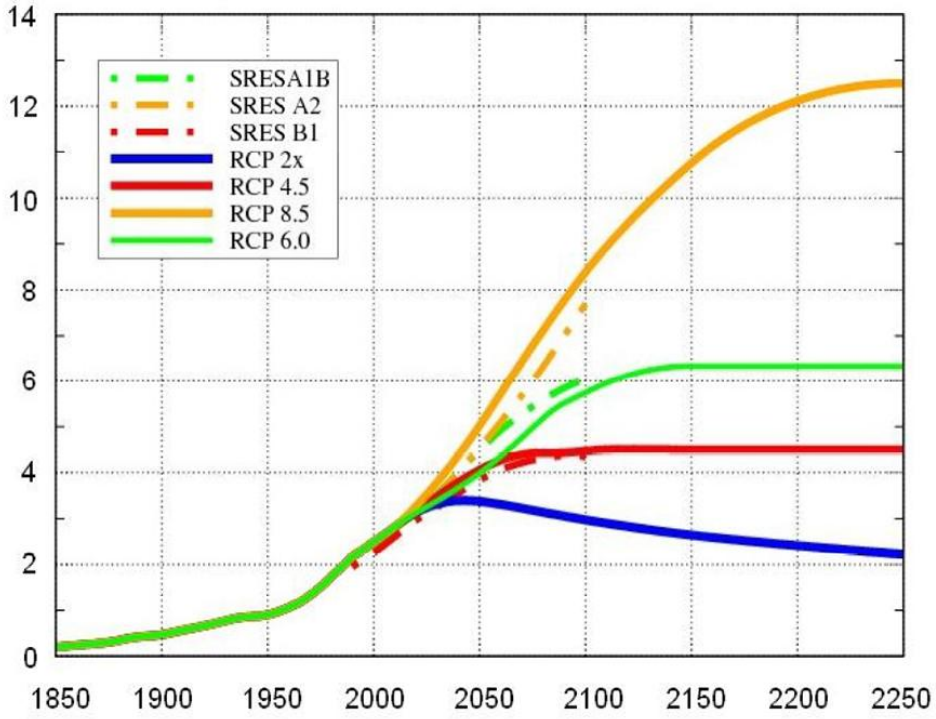


Figure 3.6 Evolution de la température globale selon les nouveaux scénarios du GIEC, en comparaison avec les scénarios SRES (GICC, 2011)

Ces nouveaux scénarios de forçage radiatif sont établis en lien avec des scénarios socio-économiques (SSP). Ces scénarios sont moins développés que les scénarios climatiques et ne sont présentés, pour le moment, que dans les grandes lignes. La figure 3.7 illustre ainsi leurs caractéristiques selon deux critères : la capacité d'atténuation et la capacité d'adaptation. Les SSP1, SSP2 et SSP3 correspondent respectivement à une capacité faible, moyenne et forte pour les deux critères.

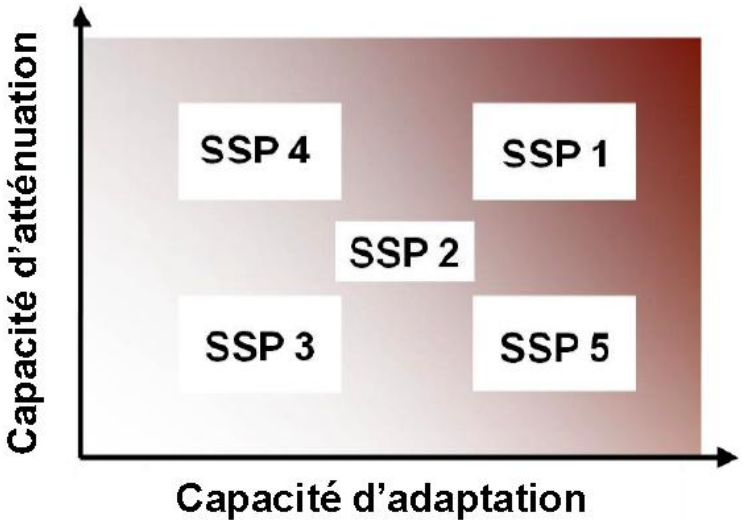


Figure 3.7 Répartition des scénarios selon la capacité d'adaptation et d'atténuation (d'après le GICC, 2011)

Le SSP4 traduit une faible capacité d'adaptation mais une forte capacité d'atténuation, du fait d'une forte inégalité entre les pays où une élite, limitée, participerait à la majorité des émissions de GES, favorisant ainsi la mise en place de politiques d'atténuation. Le SSP5, à l'inverse du SSP4

correspond à une bonne capacité d'adaptation et une faible capacité d'atténuation. Ces caractéristiques seraient dues à un développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement utilisant des énergies et technologies émettrices de carbone. Cependant, la hausse de niveau de vie généralisée favoriserait la capacité d'adaptation (GICC, 2011).

3.4 Lien entre scénarios d'émission de gaz à effet de serre et projections climatiques

Dans les gaz à effet de serre on considère la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone. La vapeur d'eau, dont les concentrations n'ont pas évolué avec l'industrialisation, peut-être considérée comme assurant un effet de serre de base, rendant la température de la Terre viable pour l'être humain. Le dioxyde de carbone a crû de plus de 100 ppm depuis l'industrialisation (IPCC, 2000). Bien que son pouvoir réchauffant soit nettement inférieur à celui de la vapeur d'eau, sa durée de vie dans l'atmosphère et sa connexion avec les activités humaines rend ce gaz important à suivre pour toute analyse des conséquences des GES. Les gaz à effet de serre ont un impact sur le bilan radiatif engendrant une augmentation de la température. Ces conséquences sont visibles avec la figure 3.8 qui illustre le comportement du rayonnement solaire et terrestre dans l'atmosphère en fonction des aérosols et des gaz à effet de serre.

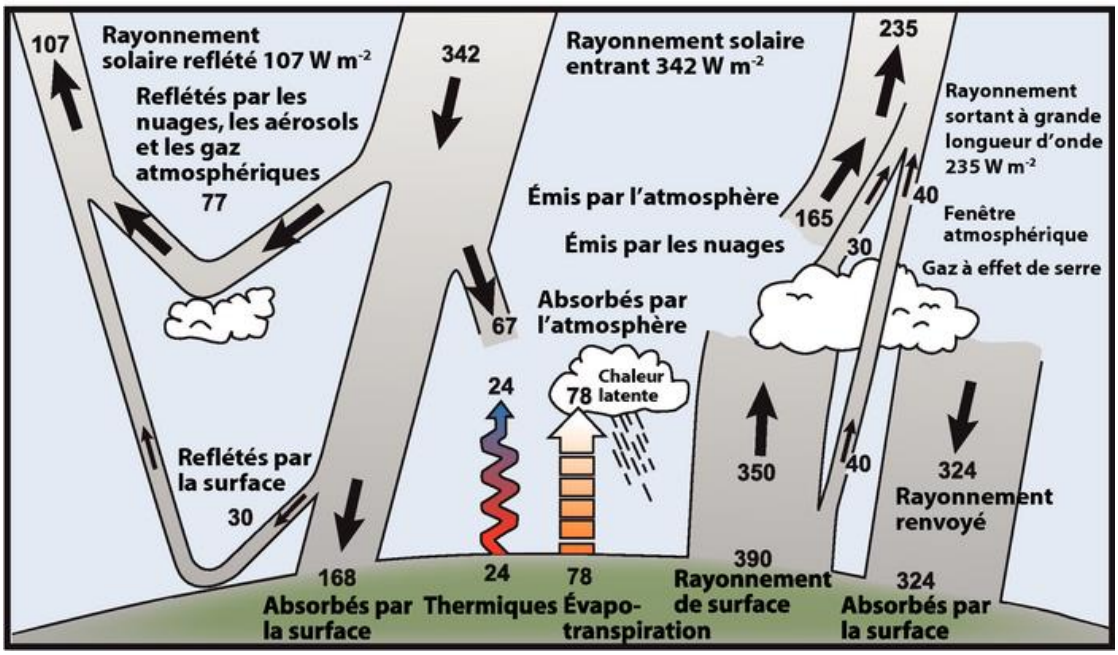


Figure 3.8 Moyenne mondiale du bilan énergétique de la Terre (/an). La moitié du rayonnement solaire entrant, absorbée par la surface de la Terre, est retransmise vers l'atmosphère par les rayonnements à grande longueur d'onde qui sont absorbés par les nuages et les gaz à effet de serre. L'atmosphère renvoie l'énergie à grande longueur d'onde vers la Terre et vers l'espace (Kiehl et Trenberth, 1997)

Les scientifiques du GIEC travaillent ainsi sur l'estimation de l'altération du bilan radiatif liée aux variations de concentrations en GES dans l'atmosphère. De manière générale 30 % des rayons du soleil sont réfléchis vers l'espace majoritairement du fait des nuages et des aérosols et minoritairement par les surfaces terrestres à fort albédo. Les 70 % restant du rayonnement solaire réchauffent l'atmosphère et le sol à hauteur de 240 W/m² environ (IPCC, 2000). La chaleur

perçue à la surface de la Terre n'est pas seulement issue du rayonnement solaire, mais également du rayonnement de grande longueur d'onde émis par la planète. C'est ce rayonnement qui est bloqué par les gaz à effet de serre. Donc une plus forte concentration en dioxyde de carbone, du fait des activités humaines, va augmenter la part de rayonnement émis par l'atmosphère. C'est ainsi que le bilan radiatif se trouve altéré. Les prévisions du GIEC dans le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES, 2000) font, de plus, état d'une augmentation de 25 à 90 % des émissions mondiales de GES entre 2000 et 2030.

Les scientifiques peuvent dès lors calculer le forçage radiatif, fonction de l'évolution de la concentration en GES par rapport à une situation initiale. Ces calculs simulent les variations complexes d'absorptions et d'émissions de gaz à effet de serre dans le système atmosphérique et plus particulièrement au niveau de la troposphère (IPCC, 1990). Cependant, la stratosphère, couche atmosphérique située au-dessus de la troposphère, est également affectée par ces changements. L'augmentation du CO_2 dans la stratosphère y fait baisser la température, tandis qu'une augmentation de chlorofluorocarbures entraine une augmentation de la température dans cette couche atmosphérique (Wang *et al.*, 1990). Ces variations au sein de la stratosphère doivent donc être prises en compte, au même titre que les changements dans la troposphère, dans le calcul du forçage radiatif.

Comprendre les conséquences des gaz à effet de serre sur le bilan radiatif est donc encore assez ardu. Cependant ce n'est pas la seule difficulté pour les physiciens du climat qui sont confrontés à un système complexe où les connexions entre l'atmosphère, la cryosphère et les océans et leurs effets sur le climat sont encore à l'étude. Le système climatique est composé d'éléments « lents » tels que les océans et d'éléments « rapide » tels que l'atmosphère, s'influençant mutuellement (IPCC, 1990). Ainsi à l'échelle centennale voire millénaire certains composants du système climatique apparaissent stables, quand d'autres varient de manière chaotique. Si les données atmosphériques peuvent être considérées comme stables, leurs variations sur une importante échelle horizontale font que le système atmosphérique est considéré comme chaotique (IPCC, 1990). Cette stabilité amène les scientifiques à penser que le système climatique répond de manière stable aux forçages par les GES. Cela conduit à l'idée que le système climatique est en équilibre, ce qui est la base de la prédiction climatique. Ainsi, les phases de modification du climat, où le système n'est pas en équilibre, sont considérées comme transitoires, le climat tendant toujours à se stabiliser. C'est cette stabilité qui a permis aux scientifiques de détecter le signal du changement climatique en considérant de longues périodes, pour s'affranchir de la variabilité naturelle, à partir de tests statistiques (von Storch et Zwiers, 1988 ; Zwiers, 1988 ; Hasselmann, 1988 ; Santer et Wigley, 1990).

Dans le premier rapport du GIEC (IPCC, 1990) deux méthodes étaient présentées comme permettant de prédire le climat futur. La première, par analogie, consiste à reconstruire les climats passés à partir de données paléo-climatiques pour cerner les futurs probables par comparaison. La seconde consiste en l'utilisation de Modèles numériques de Circulation Générale (MCG, GCM en anglais pour General Circulation Model) qui proviennent de modèles de prévision météorologique. Au fil du temps c'est cette deuxième méthode qui a été privilégiée. La méthode analogique ne sera donc pas détaillée ici.

Les MCG sont basés sur les lois physiques de conservation qui décrivent les mouvements atmosphériques de chaleur et de vapeur d'eau. Ils résolvent ainsi des équations sur le comportement mécanique et thermodynamique des fluides dans les trois dimensions de l'espace et le temps (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 2003) sur un corps rotatif (la Terre) prenant en compte la différence de chaleur entre l'équateur et les pôles (IPCC, 1990). La seule façon de résoudre ces équations est d'utiliser des modèles numériques qui découpent l'atmosphère verticalement en couches discrètes au sein desquelles les variables sont calculées. Au sein de chacune de ces couches la variation horizontale est considérée à des points de grille. La distance entre les points de grille était de 300 à 1000 km à la fin des années 1980 (IPCC, 1990) et est maintenant de l'ordre de 1 à 2° soit 150 à 300 km environ (IPCC, 2007). Ces modèles ont été continuellement améliorés tant du point de vue de la résolution que par l'amélioration des connaissances sur le système climatique et leur intégration dans les formules mathématiques des modèles (IPCC, 2007). Chaque variable étudiée dans les mailles de ces modèles est contrainte par des conditions aux frontières des mailles, telles que le rayonnement solaire, l'orographie et la proximité à l'océan, l'albédo, la rugosité en surface et les caractéristiques de la végétation (IPCC, 1990).

Les MCG ont ainsi une résolution adaptée à l'analyse du climat à l'échelle de la planète et non aux tendances régionales. Pour avoir une vision plus fine il faut utiliser des modèles régionaux (MCR) obtenus par descente d'échelle à partir des MCG. Cet aspect est présenté dans le chapitre 4 à la suite d'une présentation plus poussée des MCG et leur évolution depuis les années 1980 et qui permet ainsi d'introduire les modèles régionaux.

3.5 Les projections climatiques pour le 21ème siècle

Les projections du changement du climat ont quelque peu évolué depuis le premier rapport du GIEC en 1990, jusqu'au dernier en 2007. Afin de présenter les projections climatiques les plus récentes cette partie fait état des avancées sur cette question provenant du rapport le plus récent des scientifiques du GIEC (IPCC, 2007). Les avancements dans les politiques d'atténuation, ou non-avancement, confirment que les émissions mondiales de gaz à effet de serre continueront de croître lors des prochaines décennies. Parmi les incertitudes des modèles climatiques, un point concerne particulièrement la teneur en GES dans l'atmosphère. Un des aspects les plus difficiles à modéliser est la rétroaction entre le climat et le cycle du carbone qui pourrait être importante. Certains modèles estiment ainsi que le réchauffement empêcherait la fixation du CO_2 atmosphérique dans les terres et océans ce qui augmenterait la teneur en GES dans l'atmosphère (IPCC, 2007).

En l'absence de nouvelles politiques climatiques, les émissions de GES continueront à croître à leur rythme actuel voire plus rapidement, ce qui devrait accentuer le réchauffement et impacter le climat du 21ème siècle de manière plus importante qu'au 20ème siècle. Si les concentrations en GES restaient constantes depuis leur niveau des années 2000, la température à l'échelle du globe augmenterait de 0,3 à 0,9°C en cent ans. Cependant, cette probabilité est quasi nulle et l'augmentation de la température mondiale dépasserait les 1°C d'ici la fin du 21ème siècle.

Ces modifications des températures à l'échelle globale engendreraient des changements à l'échelle régionale présentés dans le Résumé à l'intention des décideurs, préparé par le Groupe de travail II du GIEC (2007). Parmi les conséquences du réchauffement global on note en particulier la diminution de la couverture neigeuse et de glace pouvant ainsi libérer le méthane contenu sous les pergélisols russes, par exemple. Les eaux de l'Arctique seraient libres de glace sur une période de plus en plus longue autour de l'été, facilitant le déplacement des bateaux dans cette région du monde ce qui amplifierait l'impact de l'Homme sur l'écologie locale. Les tempêtes extratropicales auraient tendance à se déplacer vers les pôles engendrant des modifications quant à la répartition des températures, vents et précipitations. Ces dernières seraient ainsi réparties différemment à l'échelle du globe, avec une augmentation dans les latitudes élevées et une diminution au niveau des régions subtropicales. Cette répartition des précipitations, associée à l'augmentation généralisée des températures, occasionnerait une augmentation de l'aléa sécheresse dans les régions sèches des latitudes moyennes et des tropiques, ainsi que dans les secteurs semi-arides du pourtour méditerranéen, de l'Afrique et du Brésil, tout comme l'ouest des Etats-Unis et l'Australie. La ressource en eau serait cependant plus disponible aux hautes latitudes et dans les régions tropicales humides. Les conséquences du réchauffement climatique sur l'eau, visibles sur la figure 3.9, ont des impacts sur la production alimentaire *via* l'agriculture, ainsi que sur la santé notamment avec la propagation d'infections du fait de l'insalubrité occasionnée par les sécheresses. Ces effets sont présentés dans la figure 3.9 selon qu'ils apparaissent ou sont amplifiés par l'augmentation de la température et sont donc corrélés aux scénarios majeurs du GIEC. On peut ainsi voir que dans le cas du scénario B1 l'agriculture et la santé seraient peu impactées, alors que le réchauffement attendu d'après le scénario A2 aurait de sévères conséquences sur la santé et le rendement agricole.

Alors que l'Afrique souffrirait d'une augmentation de la superficie des terres arides de 5 à 8 % d'ici 2080 et que l'Asie serait de plus en plus sensible aux inondations, l'Europe serait également touchée mais dans une moindre mesure, du fait d'un climat plus tempéré. Les différences régionales en Europe seraient amplifiées notamment entre le nord et le sud en termes de ressource en eau et donc de vulnérabilité aux sécheresses. L'économie locale serait également affectée : alors que le tourisme estival entrerait en compétition avec l'agriculture dans le sud de l'Europe en termes de ressource en eau, le tourisme hivernal serait atteint par la diminution de la couverture neigeuse et l'altération de l'écologie locale. Les écosystèmes locaux sont plus ou moins sensibles au changement climatique. Parmi les plus sensibles on retrouve en Europe les marais et le littoral de manière générale, soumis à la montée des eaux, et les zones tributaires de la fonte de la neige et de la glace dans les montagnes.

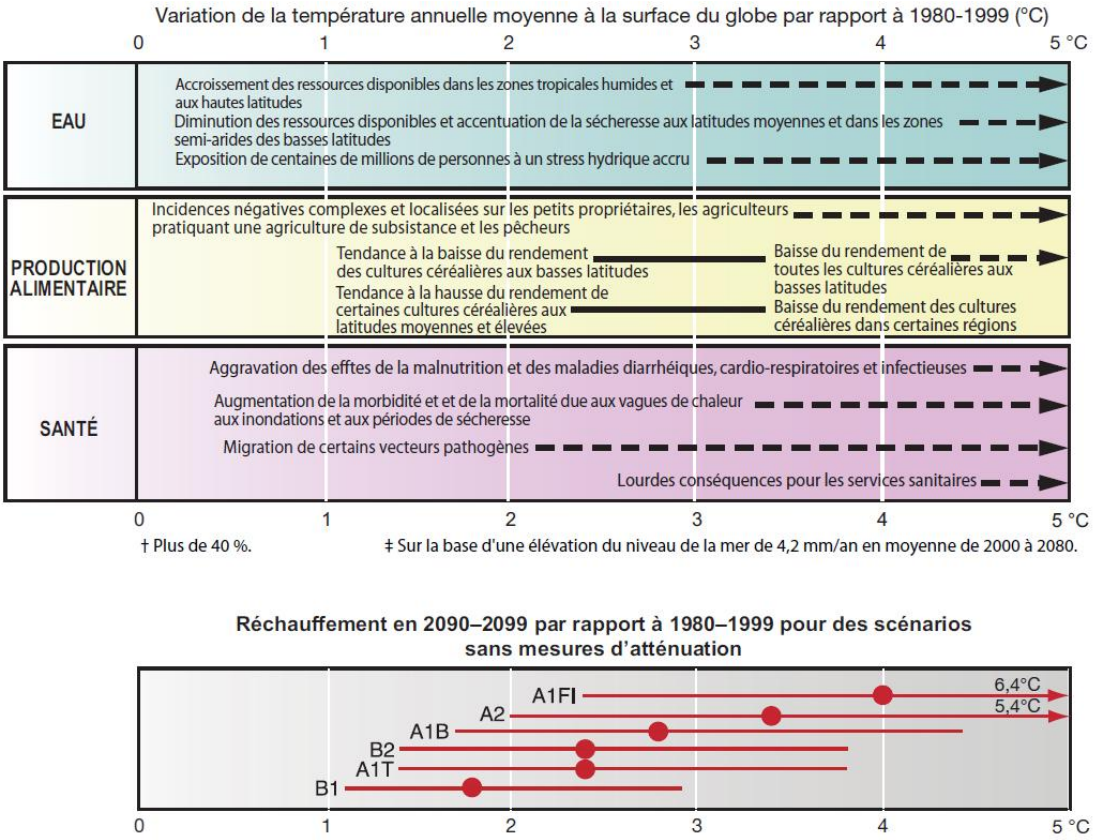


Figure 3.9 Exemple des conséquences du réchauffement global sur la ressource en eau et ses dérivées sur l'alimentation et la santé (IPCC, 2007)

Certains phénomènes sont présentés dans le Résumé à l'intention des décideurs préparés par le Groupe de travail II du GIEC (2007) de manière à détailler les conséquences sur différents secteurs, tels que l'agriculture et la ressource en eau. On peut ainsi voir que la diminution du nombre de jours et nuits froids et l'augmentation de la température entrainerait une hausse des rendements agricoles dans les régions froides et une diminution dans les régions chaudes. Les vagues de chaleur plus fréquentes augmenteraient le stress hydrique dans les régions chaudes, ainsi que le risque d'incendie et impacteraient la qualité de l'eau notamment avec la prolifération d'algues, comme avec les micro-algues que l'on voit proliférer le long des côtes durant l'été. L'augmentation des fortes précipitations, de type orageux, impacterait sérieusement l'agriculture du fait de l'érosion des sols engendrée et de la perte des cultures. Les ressources en eau seraient également touchées par une pollution liée au ruissellement de l'eau lessivant les polluants jusque dans les zones naturelles de stockage. La progression de la sécheresse aurait un impact notable sur l'agriculture, comme cela a pu être détaillé dans le chapitre précédent, tel que la dégradation des sols, la baisse des rendements ou perte de récoltes et la mortalité plus fréquente du bétail. Il est donc intéressant de suivre ce risque dans un contexte de changement climatique *a priori* propice à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses.

Synthèse : Le changement climatique au 20ème et 21ème siècle, de l'observation à la modélisation

La conférence de Rome (1961) a permis de mettre en évidence l'amorce du changement climatique à l'échelle globale, notamment à travers l'augmentation du CO_2 du fait des activités anthropiques. Dans les années 1960 ces questions ne sont encore étudiées que par une petite communauté. La prise de conscience des conséquences du changement climatique sur les divers milieux scientifiques et socio-économiques se généralise au cours des années 1970. Ce qui conduit progressivement à la création du GIEC en 1988 dont les travaux sur la quantification des changements climatiques et de leurs impacts à l'échelle du globe leur permettra d'obtenir le Prix Nobel de la Paix en 2007.

Les scientifiques du GIEC sont répartis en plusieurs groupes de travail dont les intérêts convergent vers l'étude de la vulnérabilité de la nature et de l'Homme face aux variations anthropiques du climat. Dans un premier temps des socio-économistes ont conçu des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre à partir d'évolutions politiques mondiales et régionales concernant les sources d'énergies majoritairement utilisées. Les scénarios A2, A1B et B1 sont les scénarios les plus cités dans la littérature du fait de leur caractères respectifs pessimiste, intermédiaire et optimiste. A partir de ces scénarios d'émissions de GES, un forçage radiatif est établi permettant de déduire le réchauffement attendu selon la concentration en dioxyde de carbone principalement. Les forçages radiatifs découlant des différents scénarios sont ensuite intégrés dans des modèles climatiques globaux utilisés par des physiciens de l'atmosphère afin de retranscrire les mouvements atmosphériques.

Bien que nécessitant une étape de descente d'échelle pour retranscrire les projections climatiques à l'échelle régionale, les MCG rendent tout de même possible l'analyse des impacts à l'échelle mondiale et des continents. Les conséquences ainsi attendues pourraient être inédites ou correspondre à une intensification ou modification d'évènements déjà existant. Le réchauffement global entrainerait ainsi la fonte des neiges et glaces libérant les eaux de l'Arctique sur une plus grande partie de l'année et altérant la nature des pergélisols canadiens et russes. La modification de la répartition des pluies assècherait des secteurs déjà secs (Afrique, Etats-Unis, Australie) et amplifierait l'aléa sécheresse dans des zones sensibles à ce risque telle que le pourtour méditerranéen. La ressource en eau est un enjeu majeur dans certaines régions du globe où l'impact sur la salubrité et donc la santé est très important. Un des secteurs économiques les plus vulnérables à cet aspect reste l'agriculture qui présenterait des rendements céréaliers très variables selon les différentes régions impactées. Aux hautes latitudes, une plus grande disponibilité de l'eau amènerait de meilleurs rendements, tandis qu'aux latitudes moyennes les rendements seraient plus faibles du fait d'une moins bonne disponibilité de l'eau, mais également de la prolifération des insectes ravageurs avec l'augmentation de la température.

Conclusion de la première partie

L'importance de la façade maritime à l'échelle de la région Bretagne, le relief et le paysage bocager, impactent la répartition des températures et précipitations, générant ainsi une grande diversité régionale des climats bretons. Le suivi des sécheresses passées à partir des analyses dendrochronologiques, d'écrits historiques, ou plus récemment avec le développement des réseaux de stations météorologiques, a mis en évidence des variations d'intensité des sécheresses à l'échelle du territoire breton. Les épisodes secs tendent à être plus intenses et plus longs au sud et à l'est de la Bretagne, par rapport au nord et à l'ouest. Ces études des sécheresses passées permettent également de différencier les impacts des sécheresses estivales et printanières. Ces dernières, plus précoces, vont avoir des conséquences plus importantes sur la végétation en place sur une période plus longue, comme ce fût le cas en 1976.

L'agriculture bretonne est une activité économique majeure à l'échelle régionale et nationale qui est cependant particulièrement vulnérable au risque sécheresse. Parmi les trois types de sécheresses existants l'agriculture est principalement sensible aux sécheresses pédologiques qui représentent les conséquences d'un manque de précipitations sur la réserve hydrique des sols. Grâce à l'agroclimatologie les impacts du climat sur l'agriculture sont bien connus et ils ont permis, par exemple, de générer des outils pour le suivi des risques. Pour suivre ce type de sécheresse on utilise ainsi un bilan hydrique qui permet de quantifier l'évolution de la réserve hydrique en fonction des conditions climatiques et agricoles. Le bilan hydrique calcule divers paramètres dont le déficit d'évaporation qui, en estimant le stress hydrique de la végétation en place, permet d'apprécier l'intensité des sécheresses pédologiques.

La vulnérabilité de l'agriculture face aux sécheresses établie par l'analyse d'évènements passés est également à replacer dans le contexte du changement climatique. Les premières études sur les gaz à effets de serre, leurs causes anthropiques et leurs conséquences se mettent en place dans les années 1960. Ceci conduit dans les années 1970 à une prise de conscience des changements climatiques liés aux gaz à effets de serre qui aboutit en 1988 à la création du GIEC. Ce regroupement de climatologues a travaillé à l'établissement de scénarios d'émission de gaz à effets de serre basés sur l'évolution des politiques mondiales sur la question des ressources énergétiques. Les scénarios les plus étudiés actuellement sont les scénarios A2, A1B et B1, respectivement pessimiste, neutre et optimiste en termes de réchauffement climatique. Les forçages radiatifs établis à partir de ces tendances socio-économiques servent ensuite de supports à la modélisation des mouvements atmosphériques au sein de modèles climatiques globaux.

Si les effets des gaz à effets de serre sur le climat entrainent une augmentation des températures et modifient la répartition des précipitations, l'augmentation de leurs concentrations au 21ème siècle aura des conséquences importantes en termes de risque sécheresse. Ces changements pourraient amener des situation inédites en certaines régions du globe, ou bien correspondre à

des intensifications d'évènements déjà existants. La modification de la répartition des pluies pourrait, par exemple, amplifier l'assèchement de régions déjà très sèches (Afrique, Etats-Unis, Australie), voire amplifier la fréquence et l'intensité du risque sécheresse dans des zones sensibles (pourtour méditerranéen). Si la ressource en eau a majoritairement un impact sur la salubrité et la santé, des activités socio-économiques telles que l'agriculture sont également dépendante de sa disponibilité. Le changement climatique est donc une contrainte supplémentaire pour l'agriculture. Les travaux des climatologues sur les scénarios probables de changements climatiques peuvent être considérés comme des supports à la réflexion sur l'adaptation de l'agriculture. Il est donc important d'essayer de quantifier le risque sécheresse lié au changement climatique pour le système agricole breton actuel.

PARTIE 2

Méthodes de modélisation des sécheresses à l'interface entre le sol et l'atmosphère, à partir de projections climatiques sur le 21ème siècle

SOMMAIRE

Chapitre 4 - La modélisation du climat : des modèles climatiques globaux aux projections climatiques régionalisées 79

Chapitre 5 - La modélisation du bilan hydrique en Bretagne : un outil d'identification des sécheresses du 20ème siècle au 21ème siècle 107

Introduction de la deuxième partie

Cette deuxième partie expose la méthodologie utilisée pour quantifier l'évolution de la fréquence et l'intensité des sécheresses dans le contexte du changement climatique. Elle est divisée en deux chapitres traitant de la régionalisation des projections climatiques et de l'utilisation d'un bilan hydrique stationnel et spatialisé.

Le chapitre 4 aborde la notion de régionalisation en commençant par une présentation des modèles climatiques globaux. Les deux principales techniques de régionalisation : dynamique et statistique sont ensuite abordées. On s'attardera plus particulièrement sur la méthode statistique qui est une des plus utilisées pour les différentes études régionales du changement climatique. Les projections climatiques utilisées pour cette thèse sont fournies par le CERFACS qui se sert de la descente d'échelle statistique pour désagréger les sorties du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Une présentation détaillée de cette base de données est ainsi proposée dans ce chapitre et est complétée par une comparaison des sorties désagrégées avec l'observé pour tester la rigueur du modèle ARPEGE-Climat et de la descente d'échelle. En conclusion à ce chapitre on traite de la possibilité d'affiner encore plus les données climatiques à partir d'une interpolation basée sur la distance à la mer et la latitude.

Le chapitre 5 consiste en une présentation du bilan hydrique utilisé. Le bilan hydrique permet de suivre l'évolution de la teneur en eau dans les sols et donc des sécheresses pédologiques. Dans un premier temps les différents paramètres qui le composent sont explicités. Ceci permet d'enchainer sur les deux utilisations du bilan hydrique proposées selon deux approches : stationnelle et spatialisée. Cette seconde méthode nécessite l'utilisation de jeux de données supplémentaires. La précision apportée par ces données pédologiques et d'occupation du sol est ainsi explicitée dans ce chapitre. Le bilan hydrique permet de calculer le déficit d'évaporation, qui rend possible la quantification de l'intensité des sécheresses. En conclusion à ce chapitre cet indice de sécheresse ainsi qu'un second indice, le SWI utilisé par Météo-France, sont présentés afin de proposer une comparaison de deux indices utilisés pour suivre les sécheresses en France.

CHAPITRE 4

LA MODELISATION DU CLIMAT : DES MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX AUX PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES

Sommaire

Introduction 80

4.1 Les modèles climatiques globaux 80

4.2 La régionalisation des projections climatiques 82

4.2.1 La régionalisation dynamique 83

4.2.2 La régionalisation statistique 83

4.3 Les simulations climatiques : méthodologie et qualité des données 84

4.3.1 Le modèle ARPEGE-Climat 85

4.3.2 La désagrégation statistique CERFACS 86

4.3.2.1 Base de données SAFRAN 89

4.3.2.2 Le logiciel Dsclim 89

4.3.2.3 Limitations et avantages des données simulées 90

4.3.3 Comparaison des données observées (Météo-France) et des données désagrégées CERFACS 91

4.4 L'interpolation des données climatiques : affiner la résolution des données climatiques jusqu'à 1 km 101

Synthèse : Utilisation des projections climatiques régionalisées 106

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

Introduction

Les scénarios du GIEC, présentés dans le chapitre 3, ont permis depuis de nombreuses années de modéliser les tendances climatiques potentielles du 21ème siècle à l'échelle de la planète à l'aide de modèles climatiques globaux (MCG). Les résultats de ces analyses, présentés dans les différents rapports du GIEC, révèlent des tendances variables à la surface de la Terre. La régionalisation des modèles climatiques, aussi appelée descente d'échelle, vient compléter les lacunes des modèles régionaux, en proposant une meilleure résolution spatiale et temporelle des sorties de modèles. Cette méthode permet de lier les variables climatiques locales ou régionales à des forçages atmosphériques de plus grande échelle (Hewitson et Crane, 1996).

Les modèles climatiques globaux, qui ont été principalement développés dans les années 1960-70, sont une évolution directe des modèles numériques de prédiction météorologique créés dans les années 1940. La méthode de descente d'échelle, adaptée des techniques de la climatologie synoptique, est apparue dans les années 1960 mais ne s'est vue appliquée aux MCG que dans les années 1990 (Hewitson et Crane, 1996). L'utilisation de cette méthode présente un effet négatif qui est d'ajouter de nouveaux biais aux sorties des MCG, lié aux calculs supplémentaires réalisés. Il est donc important de connaitre les forces et faiblesses des sorties de modèles utilisées pour une étude d'impact.

Suite à la présentation des avancées techniques de la descente d'échelle, ce chapitre abordera la qualité d'un jeu de données simulées utilisé pour cette thèse. Ces données qui proviennent du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) ont été comparées aux observations sur une période contemporaine afin de connaitre les limites éventuelles des analyses qui seront réalisées.

4.1 Les modèles climatiques globaux

Le développement des ordinateurs entre 1945 et 1965 a révolutionné la prévision météorologique (Edwards, 2010a) qui devint la première application non militaire des ordinateurs. La vitesse des traitements informatiques a permis de révéler le grand potentiel de cette méthode. Les scientifiques qui ne cherchaient à modéliser le temps futur que sur de courtes périodes (jour, semaine) ont dès lors cherché à couvrir de plus longues périodes (années, décades,...) (Edwards, 2010a). L'utilisation de ces modèles a pris son essor dans les années 1960 quand des météorologues et informaticiens ont cherché à modéliser le climat sur toute la planète, de la même façon qu'avec les modèles de prévision météorologique (Edwards, 2010b). Ces modèles reposent sur la théorie de circulation atmosphérique à grande échelle qui comprend les cellules de Hadley, les ondes de Rossby, la cellule de Ferrel ainsi que le courant jet par exemple. La possibilité de paramétrer certaines variables impliquées dans le système climatique a ensuite permis de passer à une nouvelle étape de la modélisation du climat : la simulation prospective.

Les modèles climatiques globaux sont des simulations en trois dimensions intégrées dans le temps. Ils comprennent un modèle de bilan énergétique basé sur la distribution et la circulation de l'énergie, donc la température, à l'échelle de planète. Ce bilan prend en compte le rayonnement

solaire, l'albédo, l'absorption et le rayonnement par l'atmosphère pour modéliser une température radiative globale. Les MCG intègrent également un modèle radiatif-convectif, qui traite des transferts verticaux d'énergie par des processus radiatifs ou convectifs (Edwards, 2010b). Suite à la conception des MCG, les scientifiques ont cherché à améliorer les sous-ensembles du modèle, en commençant par les modèles radiatifs-convectifs (Manabe et Möller, 1961 ; Manabe et Strickler, 1964 ; Manabe et Wetherald, 1967) avant de s'intéresser au modèle de bilan énergétique (Edwards, 2010b). Les MCG simulent également de nombreux paramètres comme les mouvements de l'atmosphère (courant jet, cellule de Hadley), l'insolation, les échanges de chaleur, l'humidité, etc. (Edwards, 2010b). Si l'importance de l'océan dans le système climatique est établie, celui-ci n'est pas été véritablement intégré, au début, dans les modèles climatiques.

Les premiers modèles climatiques globaux (MCG) couplés à des modèles océaniques ont été établis à la fin des années 1960 au laboratoire *NOAA's Geophysical Fluid Dynamics* de Princeton (New Jersey, Etats Unis) par Manabe et Bryan (1969). Leur utilisation dans les années 1970 a permis d'évaluer le réchauffement climatique à une résolution approximative de 500 km (Manabe et Wetherald, 1980). Ce modèle, unique à cette époque, a conduit au développement de dizaines de modèles utilisés dans des domaines divers allant de la prédiction saisonnière au changement climatique d'origine anthropique (HadCM2, Johns *et al.*, 1997; ECHAM5_MPI-OM, Roeckner *et al.*, 2003; CNRM-CM3, Salas-Mélia *et al.*, 2005; IPSL-CM4, Marti *et al.*, 2005). L'évolution de la complexité des modèles est visible à travers la figure 4.1 (WG1, GIEC, 2007) qui illustre les processus intégrés dans les MCG depuis le milieu des années 1970 jusqu'en 2007.

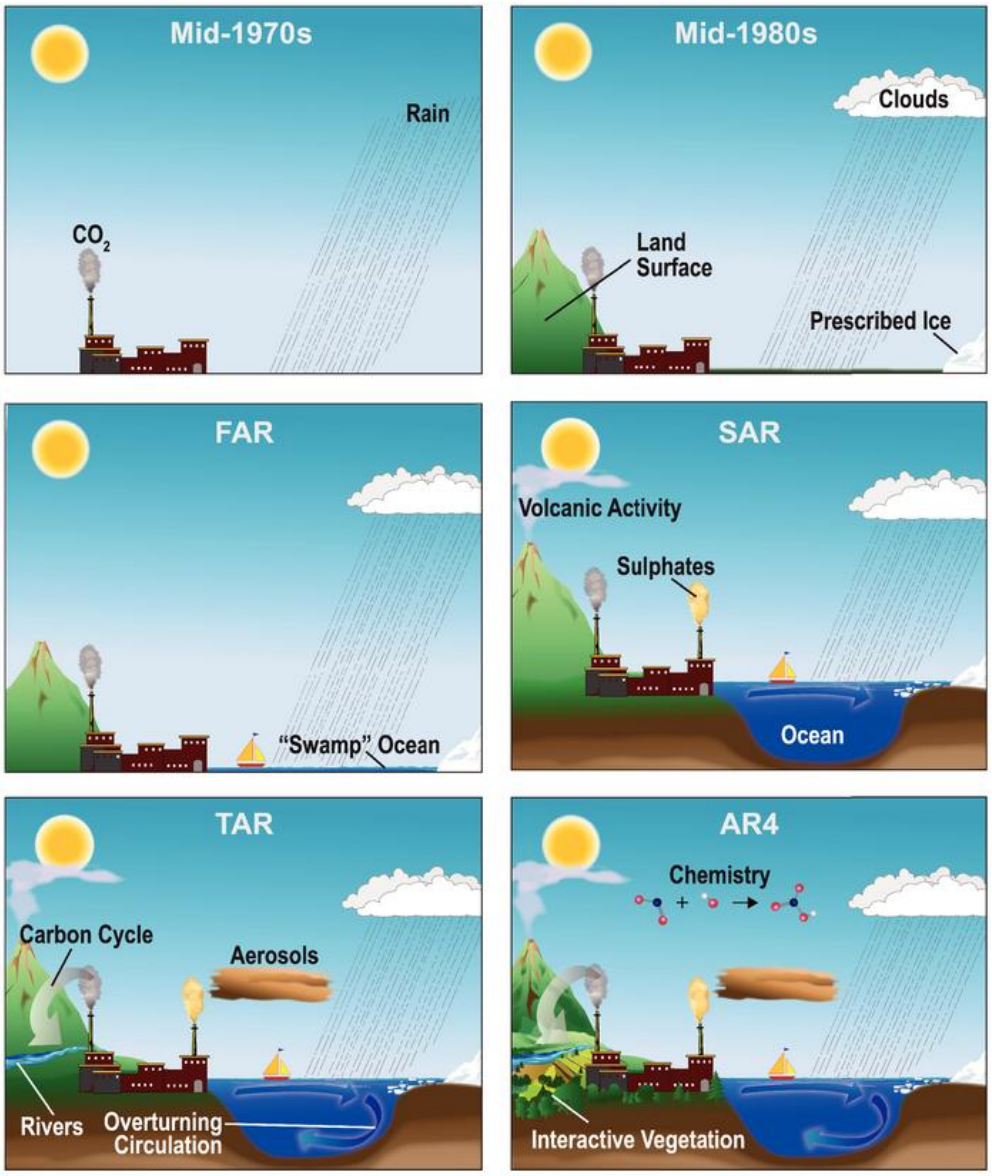


Figure 4.1 Evolution de la complexité des modèles climatiques sur les 30 dernières années (source : Working Group 1, GIEC, 2007)

Ces développements ont permis d'améliorer les connaissances des scientifiques quant aux interactions entre l'atmosphère et les océans. La complexification des modèles qui en résulte permet d'améliorer la justesse des modèles tout en travaillant à leur régionalisation.

4.2 La régionalisation des projections climatiques

La descente d'échelle, ou régionalisation, prend ses racines dans la climatologie synoptique. Celle-ci consistant en l'établissement d'un lien entre un état de circulation atmosphérique et une situation climatique locale, Hewitson et Crane (1996) y voient ainsi l'amorce de la technique de descente d'échelle. Cependant, à ses débuts dans les années 1960, la descente d'échelle était utilisée de manière discrète engendrant une perte d'information sur l'aspect continu du système climatique. Une des évolutions majeures qui a mené à la régionalisation telle qu'on la connait

actuellement est l'intégration de la continuité temporelle de la circulation atmosphérique (Hewitson et Crane, 1996).

La régionalisation des projections climatiques obtenues à partir des modèles climatiques globaux peut être effectuée selon deux méthodes. La première, qualifiée de dynamique, consiste en la traduction des situations climatiques de grande échelle en situation locale grâce à des modèles numériques. La seconde, dite statistique, contraint les MCG à partir de formules mathématiques pour reproduire une situation climatique locale.

4.2.1 La régionalisation dynamique

La régionalisation dynamique consiste en un modèle climatique régional (MCR) qui est contraint en ses limites par les sorties d'un modèle climatique global (Quintana Segui *et al.*, 2010). Les MCR ont généralement une résolution de 25 à 50 km, qui peut être encore plus affinée par emboîtement d'échelle si nécessaire. En plus d'avoir une résolution plus fine, les MCR utilisent une modélisation physique de l'atmosphère plus sophistiquée que les modèles climatiques globaux (Beniston, 2009). Ils ont également une meilleure prise en compte de la situation de surface à travers le relief, l'occupation du sol et l'hydrologie par exemple, qui sont des paramètres ayant un impact fort sur le climat. Ils peuvent ainsi être considérés comme des « *interpolateurs intelligents* » (Beniston, 2009). Cette richesse d'information intégrée dans les MCR rend ces modèles plus fiables que les MCG pour la représentation d'évènements de petite échelle spatiale et temporelle tels que les orages (Beniston, 2009). Les MCR modélisent numériquement l'évolution des variables climatiques grâce à deux cœurs de calculs : un cœur dynamique et un physique qui communiquent à chaque pas de temps (Cretat *et al.*, 2011). Le cœur dynamique simule les mécanismes atmosphériques de large échelle à partir des lois de la mécanique des fluides. Il renseigne ainsi les variables climatiques de température, pression, humidité et vent. Les paramètres de plus petite taille, inférieurs à la taille de la maille tels que les nuages et la convection atmosphérique, sont gérés par le cœur physique par des paramétrisations empiriques (Cretat *et al.*, 2011). La paramétrisation des MCR permet ainsi de descendre jusqu'à des échelles inférieures à 10 km. La résolution spatiale des modèles climatiques régionaux étant corrélée à la résolution temporelle, la modélisation à échelle fine est très couteuse en données et en temps.

La méthode dynamique est la méthode de régionalisation qui offre les meilleurs résultats, ce qui fait d'elle la méthode principalement privilégiée (Giorgi et Mearns, 1991 et 1999 ; Laprise *et al.*, 1998 ; McGregor et Walsh, 1994 ; Sasaki *et al.*, 1995 ; Jones *et al.*, 1995 ; Christensen *et al.*, 1997 et 1998 ; Rummukainen *et al.*, 2001 ; Wood *et al.*, 2004). Cependant, le coût élevé de cette méthode ne permet pas de traiter un grand nombre de scénarios et rend l'évaluation de l'incertitude plus limitée qu'avec l'approche statistique.

4.2.2 La régionalisation statistique

Le coût en temps et en matériel de l'approche dynamique de la descente d'échelle, rendent la régionalisation statistique attrayante pour étudier les effets du changement climatique à l'échelle locale sur une longue période. La possibilité de traiter un ensemble de modèles est également un

atout de cette méthode. Ce type de régionalisation est donc très répandu puisqu'il ne requiert pas d'ordinateurs aussi puissants que pour la régionalisation dynamique (Corte-Real, 1995 ; Oelschlägel, 1995 ; Enke et Spekat, 1997 ; Wilby *et al.*, 1999 ; Quintana Segui *et al.*, 2010 ; Timbal *et al.*, 2009 ; Tolika *et al.*, 2008).

La descente d'échelle statistique consiste en la traduction sous forme de fonctions mathématiques des liens unissant la circulation atmosphérique avec le climat local (Hewitson et Crane, 1996). Ces fonctions sont établies à partir des données observées grâce à des relations mathématiques ou statistiques. Pour une étude prospective du changement climatique, les fonctions mathématiques sont obtenues *via* des données observées et appliquées aux données de circulation atmosphérique d'un MCG. Cela permet ainsi d'avoir des informations à l'échelle locale qui sont cohérentes par rapport au modèle climatique global (Hewitson et Crane, 1996). La régionalisation statistique se base sur différentes approches mathématiques : l'analyse de régression (Kim *et al.*, 1984 ; Klein et Bloom, 1989 ; Karl *et al.*, 1990 ; Hewitson et Crane, 1994), l'analyse de corrélation canonique (von Storch *et al.*, 1993) et les réseaux de neurones (Crane et Hewitson,1997). Certains paramètres climatiques, comme les températures, sont appropriés à de telles techniques de corrélation du fait de leur continuité spatiale et temporelle. Pour les précipitations et d'autres paramètres variant plus dans le temps et l'espace, la corrélation peut être plus limitée (Kidson et Thompson, 1998). Cette particularité importante a conduit les scientifiques à établir une autre approche basée sur l'utilisation d'algorithmes de types de circulations couplés à des générateurs stochastiques de temps (Mearns *et al.*, 1984 ; Bardossy et Plate, 1992 ; Wilks, 1992 ; Wilson *et al.*, 1992 ; Zorita *et al.*, 1995 ; Plaut et Simonnet, 2001).

Ces deux types de régionalisation peuvent être utilisés séparément, mais il est également possible de les combiner. C'est notamment le cas des projections climatiques utilisées dans le cadre de cette thèse qui sont des sorties d'un modèle climatique régional, désagrégées ensuite statistiquement pour obtenir une résolution encore plus fine. Les projections climatiques régionales obtenues par descente d'échelle permettent aux scientifiques, comme aux élus, d'étudier les impacts des changements climatiques sur des activités socio-économiques à l'échelle des territoires (RegIS, Holman *et al.*, 2002; CLIMSEC, Soubeyroux *et al.*, 2011; ARIDE European Project, Demuth et Stahl, 2001). L'utilisation de modèles pour établir des politiques locales d'adaptation au changement climatique est rendue possible par la qualité des jeux de données que l'on y injecte. Cependant la justesse des modèles n'est pas garantie et c'est pour cela qu'il faut bien connaitre les données que l'on utilise lorsque l'on fait une analyse prospective. A cette fin, la suite de ce chapitre va présenter les données climatiques utilisées dans cette thèse. La comparaison des données simulées et observées sur une période contemporaine permet ainsi d'apprécier la justesse du modèle.

4.3 Les simulations climatiques : méthodologie et qualité des données

Les données que l'on utilise pour représenter le changement climatique proviennent du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). Elles consistent en une désagrégation statistique des sorties du modèle ARPEGE-Climat (Déqué *et al.*, 1994), modèle climatique régional de résolution horizontale de 50 km, pouvant être étirée

localement. Ce sont donc des données obtenues à partir d'une utilisation conjointe de régionalisation dynamique et statistique. Cela permet d'affiner la résolution spatiale des simulations. Limitée à 50 km avec la descente d'échelle dynamique, elle peut descendre jusqu'à 8 km grâce à l'utilisation complémentaire de la méthode statistique. Au sein de cette partie on présentera ainsi le modèle ARPEGE-Climat, puis la technique de descente d'échelle statistique utilisée au CERFACS.

4.3.1 Le modèle ARPEGE-Climat

Le modèle ARPEGE-Climat fait partie, avec le modèle ARPEGE-Aladin, de la suite ARPEGE (Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle) développée au Centre National de Recherche Météorologique (CNRM). Le CNRM est porté par le CNRS et Météo-France, il constitue ainsi le service de recherche de Météo-France. Les deux modèles ARPEGE ont des finalités différentes : ARPEGE-Climat représente la base de la modélisation climatique pour la communauté française (Déqué *et al.*, 1994) et ARPEGE-Aladin fournit les prévisions météorologiques à la résolution de 14.4 km (Pailleux *et al.*, 2000).

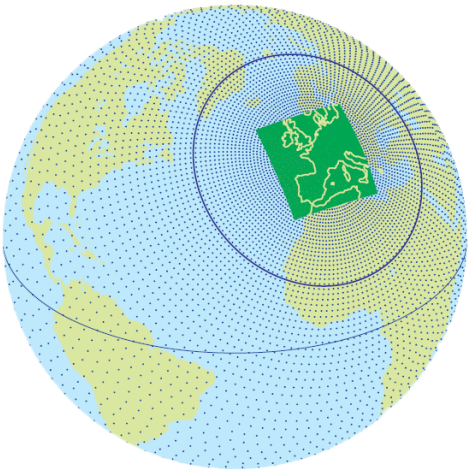


Figure 4.2 Grilles du modèle ARPEGE en service au début de l'année 2000. Le pôle d'ARPEGE est situé sur la France (pôle d'intérêt) et la grille est étirée. Seul un point sur seize est représenté (source : Pailleux *et al.*, 2000)

La suite de modèle ARPEGE a été conçue pour remplacer des modèles plus anciens (Emeraude et Péridot), moins rigoureux dans la modélisation atmosphérique et de résolution spatiale plus grossière (Déqué, 1994). La figure 4.2 illustre la particularité de la résolution du modèle ARPEGE qui est dite étirée. Le pôle de dilatation se situe en 46,5°N 2,6°E, soit vers Montluçon (Pailleux *et al.*, 2000). La taille des mailles varie ainsi de 19,6 km au plus proche du pôle de dilatation à 234 km au plus loin. Une des nouveautés du modèle par rapport à ceux précédemment utilisés par Météo-France réside dans le couplage entre un modèle général de circulation océanique fourni par le Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie et un modèle général de circulation atmosphérique fourni par le CERFACS et le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) (Déqué, 1994).

La partie physique du modèle permet d'établir la pression de surface, la température, les composantes horizontales du vent et l'humidité spécifique de l'atmosphère à partir d'équations pronostiques (Pailleux *et al.*, 2000). Le relief est défini pour chacune des mailles où il prend la valeur de la moyenne orographique à laquelle est ajoutée l'écart type du relief (Pailleux *et al.*, 2000).

Dans leur rapport sur les modèles ARPEGE et Aladin, Pailleux *et al.* (2000) détaillent les paramétrisations physiques des modèles. On y retrouve des calculs radiatifs simplifiés permettant de décrire les réactions entre sol et rayonnement ainsi qu'entre les nuages et le rayonnement à

chaque pas de temps. Les phénomènes de convection et de turbulence sont également intégrés, ainsi que les effets du relief sur l'écoulement de l'atmosphère *via* les ondes de relief et les précipitations stratiformes. Le sol est également intégré dans la chaîne de traitement grâce au modèle ISBA (Noilhan et Planton, 1989 ; Giard et Bazile, 2000).

4.3.2 La désagrégation statistique CERFACS

Les données fournies par le CERFACS correspondent à trois scénarios de gaz à effet de serre (A1B, A2 et B1), à plusieurs modèles climatiques (GIEC et ARPEGE). En ce qui concerne la descente d'échelle on retrouve dans la littérature principalement deux méthodes : la méthode Quantile-Quantile et celle des types de circulations.

La méthode Quantile-Quantile (Déqué, 2007) fonctionne comme une méthode de correction de biais des modèles climatiques globaux. Elle s'appuie sur une correction appliquée sur le modèle quantile par quantile, à raison d'une division en 100 quantiles (figure 4.3). Pour les précipitations, une correction saisonnière est réalisée seulement si une différence marquée entre les saisons apparait.

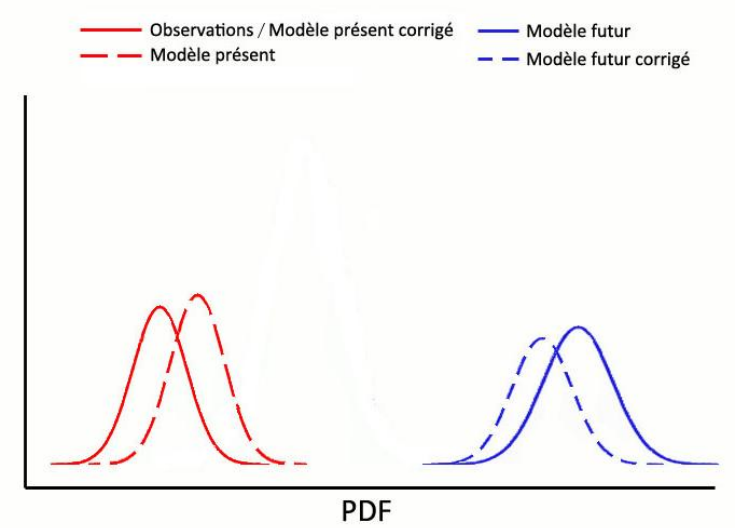


Figure 4.3 Schéma explicatif de la correction quantile-quantile, d'après C. Pagé (PDF : *probability density functions,* densité de probabilité)

Les données désagrégées fournies par le CERFACS dans le cadre d'une convention avec le laboratoire COSTEL sont obtenues par la seconde méthode : les types de circulations. Pour cela dix types de circulations sont définis (Pagé et Terray, 2010). Pour chacun d'eux on détermine la moyenne de la circulation atmosphérique pour chacun des jours associés à ce type de temps. La moyenne pour les jours observés est ensuite comparée à la moyenne pour les jours modélisés. La figure 4.4 présente les variations de précipitations à l'échelle de la France durant l'hiver (décembre, janvier et février) selon les types de circulations 0 à 8.

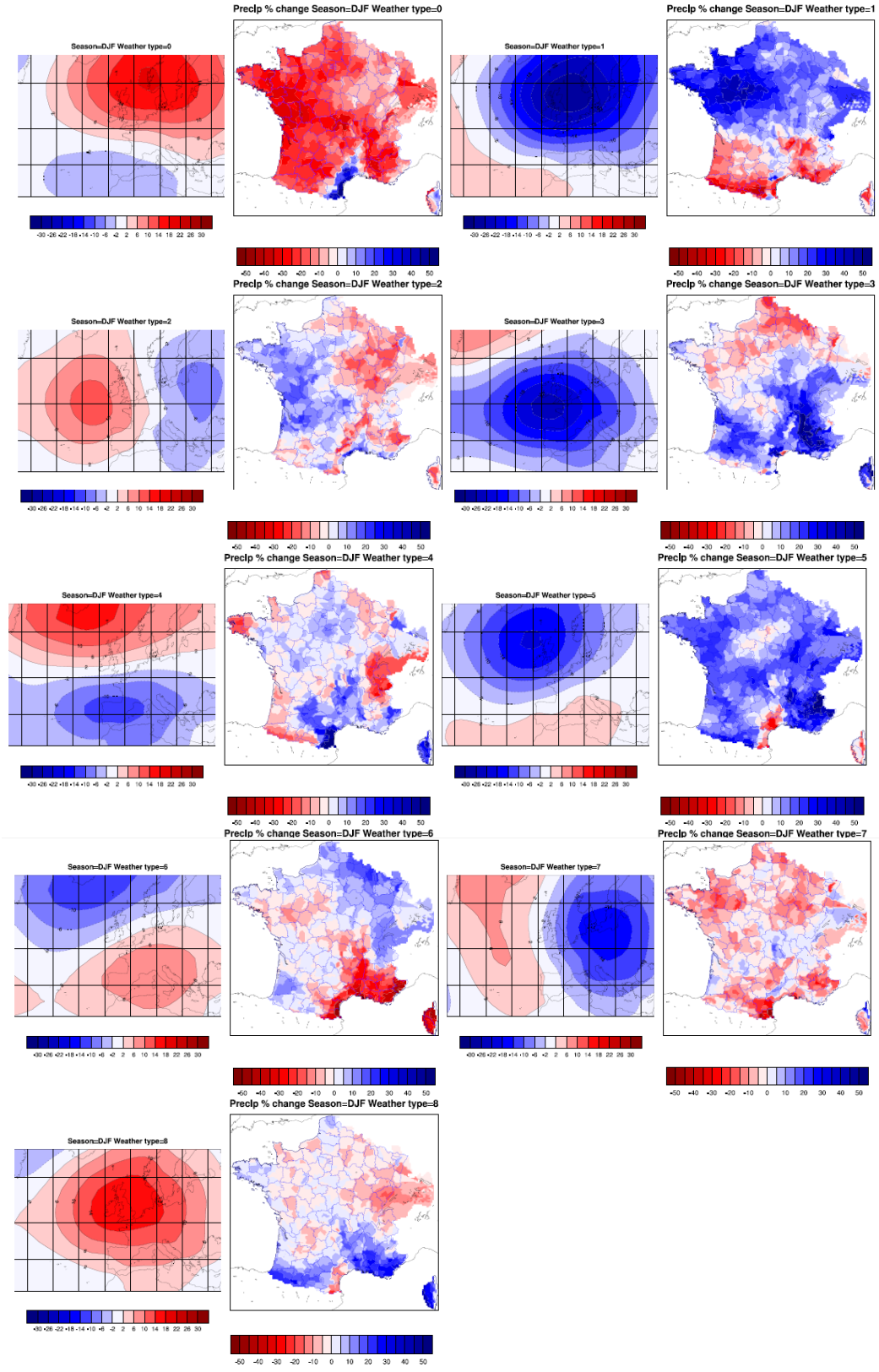


Figure 4.4 Représentation des types de circulations 0 à 8 à travers l'anomalie de la pression moyenne au niveau de la mer (hPa) et des précipitations (%) pour la période hivernale (Pagé *et al.*, 2010)

Le principe de la descente d'échelle statistique est de concevoir un modèle statistique qui traduit une circulation climatique de grande échelle (prédicteurs) en un état climatique local (prédictant). Pour cela, une analyse classique en régime de temps (Vautard, 1990) ou en type de temps (Plaut *et*

al., 2001) est utilisée. Cette dernière étant la plus employée. Elle concerne la région de la France étendue et a connu une classification préliminaire multi-variée à partir de la pression au niveau de la mer (PNM) et des précipitations. Dans cette analyse des centroïdes de types de circulations sont calculés. Chaque jour est affecté au centroïde le plus proche en termes de type de temps. On a 10 types de circulations par saison. Ce travail se fait sur la période 1981-2005 avec des réanalyses NCEP pour les PNM et des analyses SAFRAN pour les précipitations. Concrètement ce sont les pressions atmosphériques moyennes journalières qui sont classées en groupes définis par un centroïde, chaque jour étant plus ou moins proche du centroïde de son groupe. La fréquence d'occurrence des types de circulations est très proche entre le modèle climatique ARPEGE et une réanalyse NCEP des observations.

Ces types de circulations sont la base de la descente d'échelle, il est donc important que ceux-ci soient discriminants afin que les liens physiques soient significatifs entre une répartition spatiale de la précipitation et un certain type de circulation atmosphérique. Cette méthode peut engendrer une variabilité des précipitations qui peut s'expliquer par des modifications inter-groupes (changement de la fréquence d'occurrence des groupes) ou intra-groupe (modification de la distribution des jours à l'intérieur des groupes).

Cette désagrégation statistique repose sur trois hypothèses principales liées aux : i. Prédicteurs, existence de liens forts avec le climat local qui sont simulés correctement par le modèle ; ii. Stationnarité, les relations statistiques sont valides également en cas de climat perturbé ; iii. Changement climatique, les prédicteurs réagissent au signal du changement climatique. Les changements de circulations atmosphériques ne permettant pas de prédire les changements de température, ce paramètre est utilisé aussi comme prédicteur.

Les premiers retours sur la qualité du modèle ont mis en évidence une descente d'échelle statistique globalement meilleure en hiver qu'en été, car l'occurrence des pluies d'orage liées à la convection est moins dépendante de la circulation atmosphérique à grande échelle. Selon les modèles, et pour la même méthode de descente d'échelle, on va avoir des erreurs absolues relatives moyennes des pluies par saisons, qui varient. Cette remarque étant observée à l'échelle du pays, il est possible qu'un modèle soit meilleur pour une région spécifique ou un autre paramètre que les précipitations.

Pour ce qui est de la stationnarité, celle-ci a été vérifiée en s'appuyant sur une phase d'apprentissage, obtenue par le modèle ARPEGE sur la période 1950-1999 pour la PNM et les précipitations simulées. A partir des données de ces deux paramètres, un modèle statistique est créé. Dans un second temps une deuxième simulation est lancée afin d'obtenir de nouvelles PNM et précipitations simulées. Le modèle statistique précédemment conçu va alors s'appuyer sur la PNM simulée pour obtenir une précipitation désagrégée. Cette dernière est ensuite comparée à la précipitation simulée. Finalement, la tendance des précipitations est plutôt bien corrélée (entre 0.5 et 0.9). La stationnarité est donc confirmée partiellement : avec la PNM on peut reproduire correctement les caractéristiques principales des précipitations dans un climat perturbé tel qu'il est simulé par le modèle.

4.3.2.1 Base de données SAFRAN

La régionalisation statistique utilisée au CERFACS s'appuie sur les données SAFRAN. De ce fait la descente d'échelle ne pourra pas être meilleure que les données SAFRAN dont la qualité varie sur le territoire national. Une étude sur la validation de la réanalyse SAFRAN a été produite par Vidal *et al.* (2010). Les données SAFRAN sont principalement utilisées car elles représentent la base de données la plus complète à l'échelle de la France. La base de données SAFRAN est donc présentée ici afin de comprendre la méthodologie d'obtention de ces données pour en saisir les éventuelles limites.

Les données SAFRAN sont des données de Météo France, concernant le climat du passé récent au présent à l'échelle spatiale de 8 km. Elles utilisent les données d'observation de la Base de données climatologique de Météo-France (BD Clim) et les ébauches des modèles de Prévision Numérique du Temps (PNT) pour les profils verticaux avec un système d'assimilation pour corriger l'analyse. Elles correspondent à une analyse méso-échelle sur la France Métropolitaine, sur la période 1958-2008. La résolution spatiale de 8 km est réalisée à partir de régions climatiques homogènes, appelées zones symposium. Les coordonnées des mailles sont en Lambert II étendu (Quintana-Segui *et al.*, 2007). Ces polygones ne sont pas réguliers, de ce fait la moyenne sur chaque région est calculée et complétée par une interpolation. Il faut donc être conscient que ces données sont déjà prétraitées. Les données SAFRAN sont au pas de temps horaire et couvrent différents paramètres :

- Les précipitations solides et liquides (générées à partir des données journalières). Ce sont ces paramètres qui sont mesurés par le plus grand nombre de stations sur le territoire français.
- Les températures à 2 mètres, générées selon le cycle diurne à partir des données toutes les 6 heures.
- La vitesse du vent à 10 mètres, qui s'avère être un paramètre peu précis.
- La radiation infra-rouge et la radiation visible, incidente à la surface. Ces deux paramètres étant réanalysés à partir d'un modèle car toutes les stations n'ont pas d'information sur la radiation.
- L'humidité spécifique.

4.3.2.2 Le logiciel Dsclim

Le logiciel Dsclim utilisé au CERFACS est open source et téléchargeable en ligne à l'adresse www.cerfacs.fr/~page/work/dsclim. Il consiste en une approche modulaire basée sur des librairies externalisables. Il possède un grand nombre de paramètres de configuration détaillés dans un fichier syntaxe XML de configuration ainsi que dans des fichiers de documentations divers. Ce logiciel, très efficace et performant, est écrit en langage C. Il utilise exclusivement le format de fichier NetCDF avec la convention CF-1.0. Les données nécessaires à son utilisation doivent être à la fréquence journalière. On distingue deux types de données : les longues séries

temporelles d'observations de variables climatiques d'intérêt à l'échelle locale (prédictant), telles que les précipitations et température à 2m ; les variables de grande échelle (prédicteurs) représentant la circulation atmosphérique de grande échelle, telles que la PNM et la température à 2 mètres, le géopotentiel à 500 hPa, ou d'autres variables. Ces dernières données doivent couvrir complètement la région couverte par les observations.

Dans un premier temps, le logiciel Dsclim est utilisé pour une phase de pré-processing. Cette phase se divise en deux temps : 1. Interpolation des variables de grande échelle sur la région d'intérêt 2. Calcul de la fonction EOF (*Empirical Orthogonal Function* ou décomposition orthogonale aux valeurs propres) de la circulation de grande échelle (prédicteur) et de la variable climatique locale (prédictant). On défini 10 EOF, un plus grand nombre n'étant pas significatif (ces 10 EOF ne sont pas liés aux types de circulations). Une deuxième phase, nommée « apprentissage », est ensuite effectuée une seule fois tant que la région utilisée à grande échelle ne change pas, que les prédicteurs et prédictants restent les mêmes, que le jeu de données est inchangé et que la période d'étude reste fixe. Au cours de cette phase une normalisation des EOF de la PNM est effectuée pour la période complète. Puis les indices de températures à 2 mètres et des précipitations sont calculés.

Concernant les aspects stochastiques, ils résident notamment dans le choix aléatoire du jour analogue parmi les 11 jours les plus proches : ceci est nécessaire car parfois les jours analogues les plus proches peuvent être identiques plusieurs jours désagrégés de suite, ce qui sous-estime la variabilité journalière.

Ce logiciel a déjà été utilisé afin de désagréger des projections climatiques utilisant trois scénarios SRES : A1B, A2 et B1, pour 15 modèles climatiques ainsi que plusieurs modèles ARPEGE. La plus grande incertitude résidant dans les différents modèles climatiques avant le milieu du 21ème siècle, tandis que pour la fin de siècle les principales sources d'incertitudes sont les scénarios SRES ainsi que les modèles climatiques. Les données du CERFACS sont utilisées dans des projets sur le changement climatique appliqués à des contextes tels que la question de l'eau : sécheresse ou inondation, mais également pour l'agriculture ou la gestion des usages des sols.

4.3.2.3 Limitations et avantages des données simulées

Des limitations existent dans cette méthode de descente d'échelle, notamment car celle-ci ne convient pas à l'étude des extrêmes, principalement parce qu'elle est basée sur le ré-échantillonnage de jours passés, et que chaque jour est traité indépendamment. Les variables, autres que précipitations et températures, ne sont pas toujours de bonne qualité et dépendantes de la qualité du jeu de données d'observations. Des incertitudes résident également dans les modèles climatiques globaux qui possèdent leurs propres limites, notamment en été, période de l'année la moins bien modélisée principalement au niveau des précipitations.

Cependant la désagrégation statistique a ses avantages : les variables utilisées sont cohérentes entre elles ; il est possible de produire des données horaires ; la variabilité est bien représentée. Travailler à haute résolution spatiale est de plus, particulièrement utile pour les études d'impacts. Cette méthode a également l'avantage de pouvoir traiter des données externes différentes de

celles utilisées pour la période d'apprentissage. Les données sont de bonne qualité et sont ainsi plus facilement valorisables que les sorties des modèles climatiques globaux non corrigés. Cette méthode possède aussi l'avantage d'être rapide et hautement configurable, ce qui permet de traiter un grand nombre de projections pour une meilleure évaluation des incertitudes.

Ces analyses sont valables à l'échelle de la France (Quintana-Segui *et al.*, 2008). Afin de tester la rigueur du modèle pour une analyse régionale en Bretagne, une comparaison a été effectuée sur la base d'observations en utilisant les données de Météo-France.

4.3.3 Comparaison des données observées (Météo-France) et des données désagrégées CERFACS

L'objectif de cette partie est de comparer les sorties du modèle ARPEGE-Climat en Bretagne, pour la période 1971-2010, avec les données observées du réseau de Météo-France. La comparaison présentée ici focalise sur les précipitations et l'évapotranspiration du fait de l'importance de ces paramètres pour l'étude des sécheresses et également du fait du caractère « intégrateur » de l'ETP. En effet, l'ETP dépend de la température, de la vitesse du vent, de la pression, de l'insolation, de la radiation et la pression de vapeur d'eau. En complément de l'analyse sur les précipitations et l'évapotranspiration, on s'intéresse également à un indice de sécheresse : le déficit d'évaporation DE. Pour calculer cet indice il est donc nécessaire de prendre en compte la taille de la réserve utile, afin de l'intégrer dans un bilan hydrique. Pour rester sur une comparaison climatique, la taille moyenne de la réserve utile bretonne, 125 mm (Mounier, 1965 ; Dubreuil, 1994), a été utilisée pour chacune des stations.

Les données observées proviennent de la base de données Météo-France. Du fait de ses frontières et de son histoire maritime, la Bretagne possède plus de stations météorologiques sur la côte que dans les terres. Une sélection a été faite sur les stations météorologiques pour conserver les stations synoptiques en fonctionnement sur la période 1971-2010, situées sur la côte et dans les terres, pour avoir une base cohérente. Dix stations, visibles sur la figure 4.5, ont été retenues. L'évapotranspiration potentielle est obtenue selon la formule (1) Penman-Monteith modifiée par Météo-France (Ducharne, 2002). Les données simulées correspondent aux sorties désagrégées CERFACS.

$$ETP_{MF} = ETP_1 + ETP_2 \quad (1)$$

$$ETP_1 = \frac{\Delta}{(\Delta+\gamma)} \frac{R_n}{\lambda}$$

$$ETP_2 = \frac{\gamma}{(\Delta+\gamma)} \frac{0{,}26\,(1 + 0{,}4U_{10})(e_s - e_a)}{\tau}$$

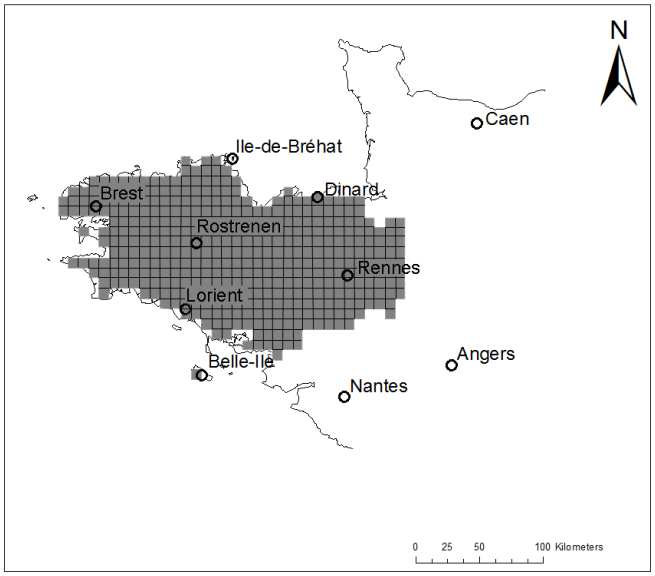


Figure 4.5 Localisation des stations météorologiques sélectionnées à partir de la base de Météo-France et des données modélisées en Bretagne de maille 8 km

Le tableau 4.1 présente les moyennes annuelles pour les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et réelle et le déficit d'évaporation, pour la période 1971-2010 pour les données observées et modélisées. Les différences d'évapotranspiration et de précipitations, en mm et en pourcentage, sont faibles pour la majorité des 10 stations. En effet, elles sont globalement comprises entre -10 % et +10 %. Le calcul du déficit d'évaporation repose sur l'évapotranspiration potentielle et réelle, en lien donc avec les précipitations. Ainsi les biais de ces variables vont se cumuler lors du calcul du déficit d'évaporation. On obtient donc des différences plus importantes pour le déficit d'évaporation. Cependant les différences observées pour le second indice de sécheresse qu'est P-ET sont également importantes et montrent ainsi que la modélisation du déficit d'évaporation est correcte et acceptable.

Les scientifiques s'accordent sur la plus grande difficulté à modéliser les précipitations que les températures, ce qui s'observe dans le tableau 4.1 à la vue des différences moindres pour l'évapotranspiration potentielle que pour les précipitations. Afin de confirmer cette interprétation à l'échelle de la région Bretagne, une corrélation entre les précipitations moyennes mensuelles modélisées et observées a été réalisée afin de calculer le coefficient de détermination R et l'indice de détermination R^2 obtenu par régression linéaire (tableau 4.2). Un même type de régression a été réalisé pour l'évapotranspiration et a donné des valeurs comprises entre 0.98 et 0.99, liées à la stabilité de la température dans l'espace. Le déficit d'évaporation semble également bien modélisé, avec un R^2 compris entre 0.94 et 0.99 (tableau 4.2). Pour les précipitations, le tableau 4.2 montre de bons résultats, tout de même inférieurs à ceux obtenus avec l'évapotranspiration, compris entre 0.84 et 0.98.

Tableau 4.1 Valeurs annuelles en mm pour les 10 stations, P : précipitations, ETP : évapotranspiration potentielle, ETR : évapotranspiration réelle, DE : déficit d'évaporation, diff : différence modélisé - observé

		Angers	Belle-Ile	Ile-de-Bréhat	Brest	Caen	Dinard	Lorient	Nantes	Rennes	Rostrenen
P	obs	673	692	750	1166	730	750	921	800	675	1095
	mod	668	781	723	1133	711	754	1081	782	674	1067
	diff (mm)	-5	89	-27	-34	-19	4	160	-18	-1	-29
	diff (%)	-1	11	-4	-3	-3	0	15	-2	0	-3
ET	obs	811	731	651	655	702	732	715	816	775	632
	mod	739	745	683	655	692	754	726	783	706	629
	diff (mm)	-73	14	32	0	-10	22	11	-32	-69	-4
	diff (%)	-10	2	5	0	-1	3	2	-4	-9	-1
ETR	obs	558	520	534	577	571	584	624	574	550	536
	mod	529	546	538	572	549	576	597	557	525	534
	diff (mm)	-29	26	4	-6	-22	-7	-27	-16	-25	-2
	diff (%)	-6	5	1	-1	-4	-1	-5	-3	-5	0
DE	obs	252	210	117	77	130	147	147	241	224	96
	mod	209	199	145	82	142	177	129	226	181	94
	diff (mm)	-44	-11	28	5	12	29	-19	-16	-44	-2
P-ET	obs	-138	-39	99	511	28	18	206	-16	-100	463
	mod	-71	36	40	478	19	0	355	-1	-32	438
	diff (mm)	67	75	-59	-33	-9	-18	149	15	68	-25

Tableau 4.2 Valeur de l'indice de détermination R^2 pour les 10 stations, obtenu à partir des précipitations observées et modélisées (P) ou du déficit d'évaporation observé et modélisé (DE)

Stations	Angers	Belle-Ile	Bréhat	Brest	Caen	Dinard	Lorient
R^2 (P)	0.95	0.86	0.90	0.84	0.97	0.94	0.89
R^2 (DE)	0.97	0.96	0.98	0.95	0.97	0.96	0.95
Stations	**Nantes**	**Rennes**	**Rostrenen**				
R^2 (P)	0.95	0.98	0.91				
R^2 (DE)	0.98	0.99	0.94				

Ces résultats confirment la difficulté à modéliser les précipitations par rapport à des variables plus stables dans le temps et l'espace, notamment lors d'épisodes de précipitations plus convectives. Ils mettent en évidence une meilleure modélisation des précipitations mensuelles pour les stations dans les terres par le modèle. Cependant le modèle est plus efficace pour représenter la variabilité intra-annuelle pour les stations orientales.

Ces premiers résultats ne présentent pas la variabilité saisonnière ou mensuelle, qui est amenée par les figures 4.6 et 4.7. La figure 4.6, illustrant la différence en mm pour l'évapotranspiration, révèle des écarts plus importants l'été, là où les quantités sont les plus importantes et la composante convective plus importante. La différence en pourcentage, non présentée, modère ces premiers résultats, en indiquant des taux compris entre -5 % et 5 % pour la majorité des stations, dont Brest, Dinard, Nantes et Caen. Les stations hyperocéaniques, telles que Bréhat et Belle-Ile, présentent des courbes légèrement faussées du fait de la localisation insulaire de la station météorologique d'observation par rapport à la maille sélectionnée, prise dans les terres pour limiter l'influence de l'océan dans le climat modélisé. La figure 4.8 montre les deux mailles de la grille des données climatiques simulées couvrant l'Ile-de-Bréhat. On voit ainsi nettement l'importance de l'océan dans ces mailles, qui se ressent dans le climat moyen modélisé. La sous-estimation de l'évapotranspiration par le modèle peut être expliquée par un biais froid général du modèle statistique du CERFACS (Bluhm et Plante, 2010), lié au biais froid des sorties SAFRAN. C'est notamment le cas des stations de Rennes et Angers, où l'on observe une sous-estimation de l'évapotranspiration modélisée par SAFRAN, engendrant une sous-estimation des sorties désagrégées CERFACS.

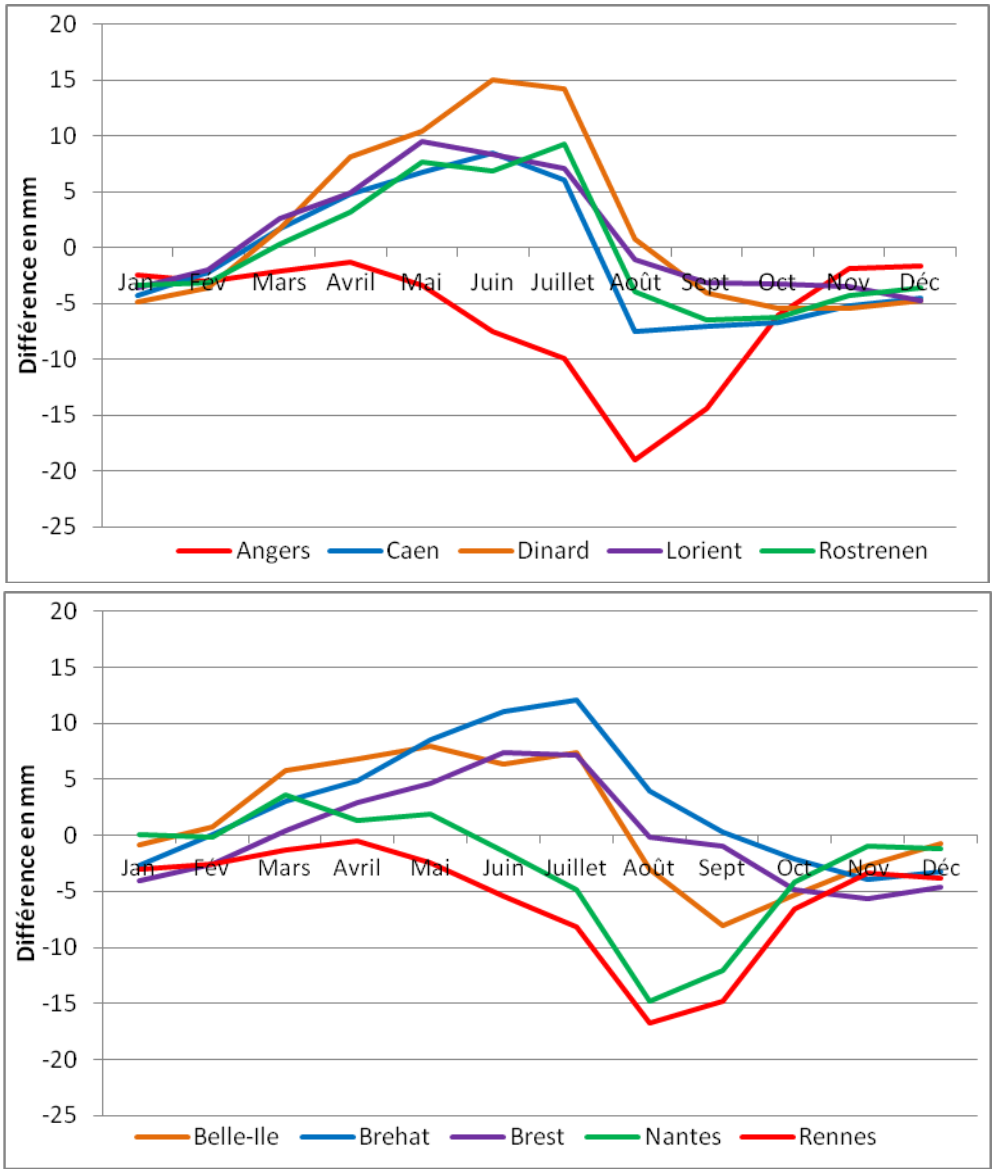


Figure 4.6 Différence en mm entre l'évapotranspiration modélisée et observée sur la période 1971-2010, pour les 10 stations du nord-ouest de la France

En comparant l'ETP mensuelle des trois bases de données on a pu se rendre compte de deux grandes tendances à l'échelle régionale (figure 4.7). La première (figure 4.7a) qui concerne les stations situées dans les terres représente une sous-estimation générale de l'ETP par la modélisation SAFRAN, engendrant une sous-estimation sur toute l'année de l'ETP CERFACS. La seconde situation (figure 4.7b), caractéristique du littoral, révèle une sous-estimation par le modèle SAFRAN sur une grande partie de l'année, qui se trouve limitée par une surestimation au cours du printemps-été. Les valeurs estivales de l'ETP étant les plus fortes, la surestimation l'emporte sur la sous-estimation à l'échelle de l'année. On peut également penser que le modèle a du mal à prendre en compte l'influence de l'océan sur la vitesse des vents, puisque les stations côtières présentent une évapotranspiration potentielle surestimée par le modèle, tandis que les valeurs des stations situées dans les terres sont sous-estimées. Cela démontre que le modèle surestime les vents sur la côte et sous-estime ceux des terres. La continentalisation du climat pour les stations situées dans les terres semble également moins bien traduites.

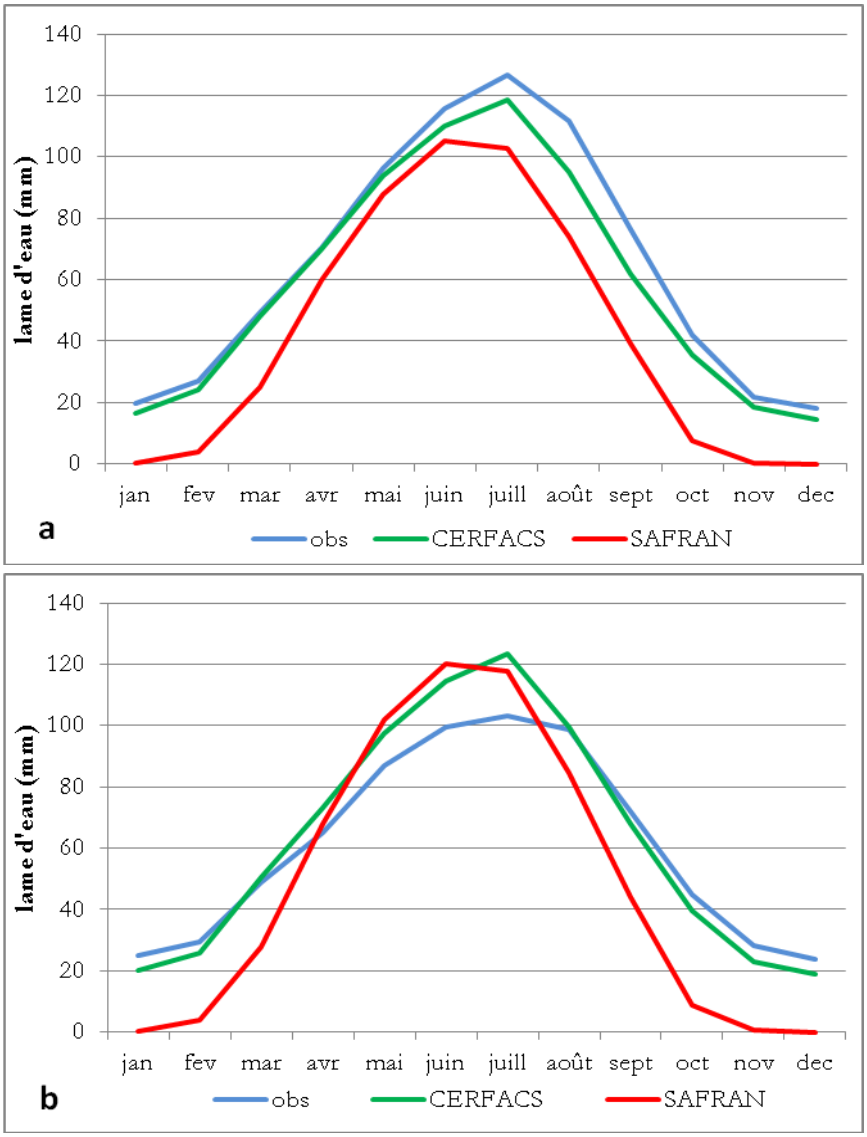


Figure 4.7 Evolution de l'ETP selon 3 bases de données : observées, CERFACS et SAFRAN. (a) station d'Angers représentative des stations situées dans les terres ; (b) station de Dinard représentative du littoral

Figure 4.8 Localisation des mailles de 8 km prenant en compte l'Ile-de-Bréhat

La même comparaison a été réalisée pour les précipitations sur les 10 stations bretonnes. Cette comparaison doit être faite en considérant les difficultés à modéliser les précipitations par rapport à l'évapotranspiration, plus homogènes dans le temps et l'espace. Les écarts entre précipitations observées et modélisées sont visibles avec la figure 4.9, de la même façon que pour l'évapotranspiration. Tout comme l'évapotranspiration, les précipitations modélisées ne semblent pas concorder avec l'observation pour les stations littorales, avec une différence de 10 à 20 mm soit 10 à 20 % (Bréhat, Belle-Île). Cependant, on remarque pour ces stations, comme pour la majorité des 10 stations étudiées ici, des différences moindres sur la saison estivale que sur les autres mois de l'année. Cela s'avère positif ici puisque l'on s'intéresse aux sécheresses, qui se produisent majoritairement l'été dans cette partie de la France. Les stations de Nantes et Rostrenen montrent une tendance visible sur une majeure partie du territoire avec des différences en « dents de scie », passant ainsi d'une différence positive à négative d'un mois sur l'autre. Sur la période estivale, qui nous intéresse particulièrement, la différence est inférieure à 5 mm pour 5 stations pour le mois de juin, 6 stations en juillet et 9 en août. Ce qui correspond à des chiffres similaires pour le seuil de 5 % avec 4 stations pour le mois de juin comprises sous cette barre, 5 stations en juillet et en août. Pour une moyenne de 8 stations sur 10 les différences de précipitations estivales sont négatives, ce qui traduit une sous-estimation du modèle.

Si l'on met de côté la période hivernale, les plus fortes différences interviennent en juin pour les stations littorales (Belle-Ile, Bréhat, Dinard et Caen) et une station plus continentale (Angers) et en juillet pour quelques stations sans distinction sur la proximité à la mer (Nantes, Rostrenen, Bréhat et Brest). Au maximum, l'écart mensuel atteint environ -25 % pour Angers en juin, soit -9 mm, et pour Brest en juillet, ce qui correspond à -13 mm. Cette sous-estimation perçue en Bretagne semble cohérente, puisque la même observation a été faite à l'échelle de la France, du fait d'une faiblesse du modèle quant à la représentation des précipitations convectives (Pagé *et al.*, 2008). La station de Lorient est la seule station sur les dix où le modèle surestime les précipitations sur toute la période estivale. Les tendances révélées par la figure 4.9 montrent des résidus plus importants pour les stations côtières que pour les stations dans les terres.

Comme l'objectif de cette étude est de tester la rigueur du modèle pour le suivi des sécheresses, une comparaison a également été faite entre le DE obtenu à partir des données modélisées et celui obtenu avec les données observées. La figure 4.10 illustre les différences entre l'indice DE modélisé et observé pour 4 stations représentatives. Les différences observées à Bréhat et Angers représentent les extrêmes des 10 stations, les 8 autres stations ont un écart de DE compris entre +7 et -12 mm par mois. Ce qui est acceptable pour un suivi des sécheresses dans le contexte du changement climatique. Les pics de différences se produisent essentiellement en juillet (5 stations) et en septembre (3 stations), un peu plus rarement en août et exceptionnellement en juin.

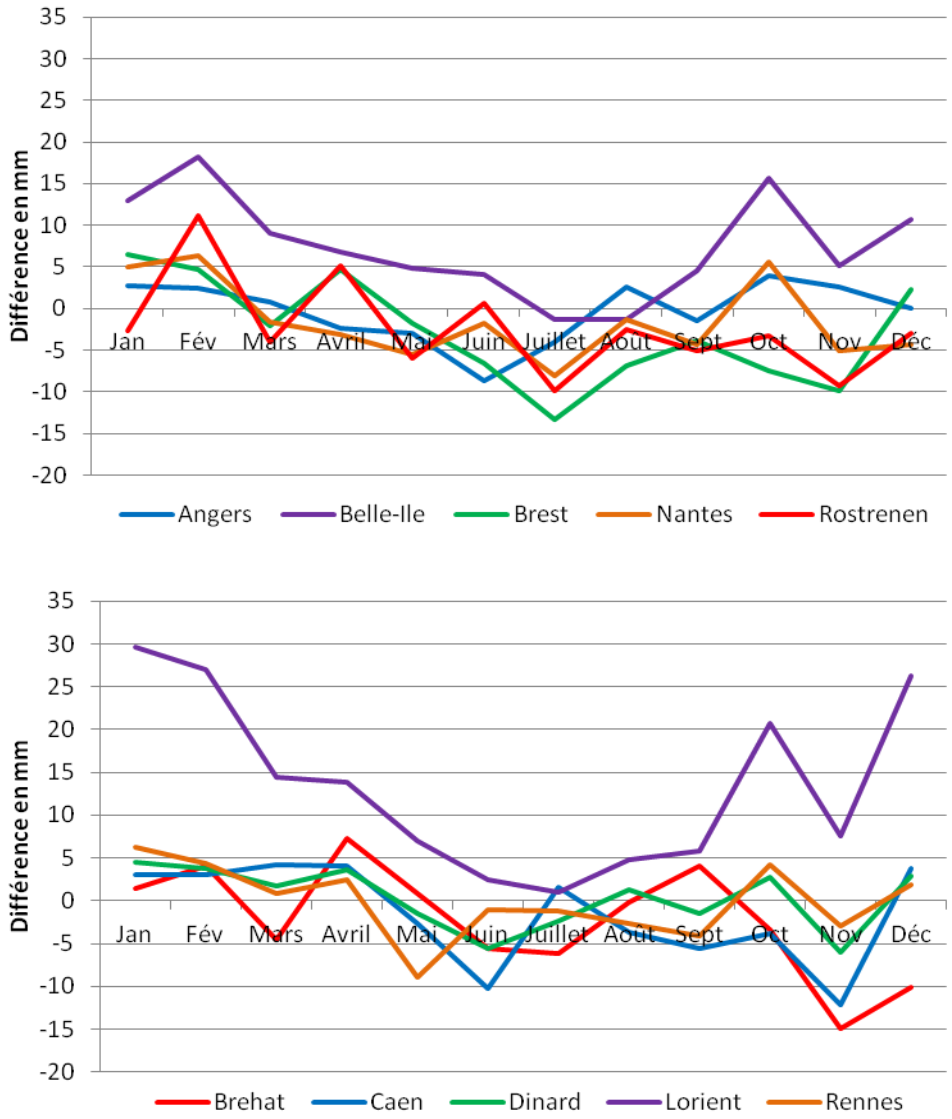


Figure 4.9 Différence en mm entre les précipitations modélisées et observées sur la période 1971-2010, pour les 10 stations du nord-ouest de la France

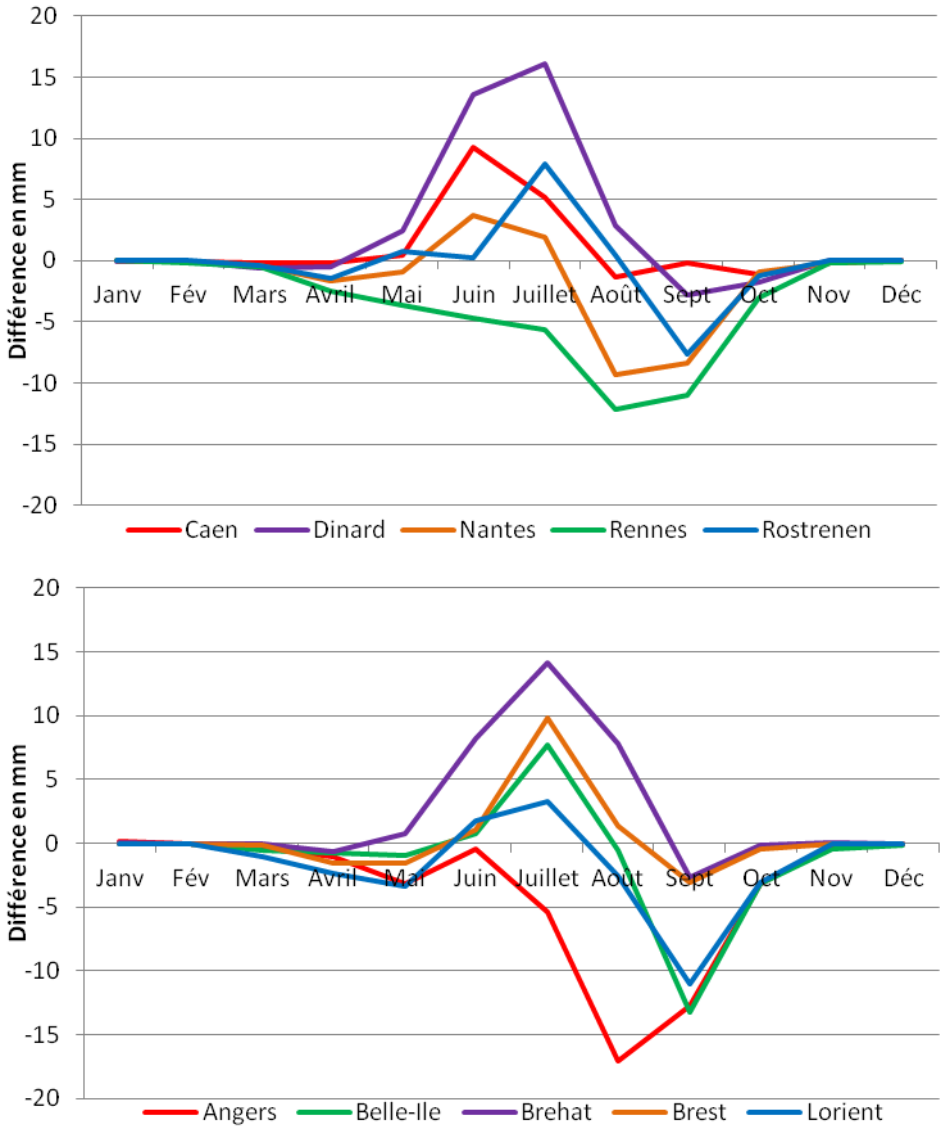


Figure 4.10 Différence en mm entre le déficit d'évaporation modélisé et observé pour les 10 stations

En ce qui concerne les pourcentages d'erreurs correspondants, le tableau 4.3 révèle des biais plus importants sur les stations côtières de Bréhat, Brest, Caen et Dinard, où la surestimation estivale de l'ETP est importante dans la base SAFRAN. Le pourcentage assez élevé observé en août à Rostrenen s'explique par des valeurs d'ETP assez basses qui engendrent des pourcentages importants même pour une différence faible. En complément de la comparaison des paramètres purement climatiques, ces résultats révèlent les impacts des biais du modèle dans le contexte d'une étude sur les sécheresses. On remarque ainsi une surestimation du déficit d'évaporation par le modèle au début de l'été (juin-juillet) du fait d'une sous-estimation des pluies et une sous-estimation à la fin de l'été (août-septembre) liée au biais froid du modèle. Les plus fortes surestimations apparaissent, majoritairement, pour les stations côtières, tandis que les plus fortes sous-estimations concernent principalement les stations plus continentales. Etudier les sécheresses dans le contexte du changement climatique doit donc être fait avec précaution, principalement quand les résultats sont communiqués à des décideurs locaux.

Tableau 4.3 Différence en % entre le déficit d'évaporation modélisé et observé pour les 10 stations sur la période estivale

Différence (%)	Juin	Juillet	Août
Angers	-1	-8	-24
Belle-Ile	2	12	-1
Bréhat	28	30	19
Brest	6	30	6
Caen	31	12	-3
Dinard	34	28	7
Lorient	6	7	-6
Nantes	7	3	-14
Rennes	-11	-9	-19
Rostrenen	1	21	2

La comparaison des paramètres climatiques, précipitation et évapotranspiration potentielle, offre un premier aperçu des différences entre les données modélisées par le modèle ARPEGE-Climat désagrégées par le CERFACS et l'observé à l'échelle régionale. Les graphiques montrent comment la géographie d'une maille de 64 km² peut affecter le climat moyen modélisé. En effet, pour les stations hyperocéaniques et quelques stations côtières le climat moyen modélisé est différent de l'observé du fait de la présence de l'océan dans la maille.

Pour les 10 stations étudiées, les écarts sur les précipitations et l'évapotranspiration sont de 10 % ou moins sur 8 mois en moyenne, et entre 10 % et 20 % sur 2 à 3 mois. Au regard des conclusions de précédentes études (Habets *et al.*, 2011) ces différences peuvent trouver leur explication dans le calcul de l'ETP dont la grande sensibilité peut conduire à des écarts de l'ordre de 20 %. Les écarts sur l'évapotranspiration potentielle peuvent également s'expliquer par le biais froid du modèle qui peut traduire une difficulté pour le modèle à prendre en compte l'influence de l'océan. En effet, le modèle tend à surestimer la douceur des stations côtières et à sous-estimer la chaleur estivale des stations situées plus dans les terres. La continentalisation du climat par perte de l'influence océanique est donc mal estimée dans la modélisation de l'évapotranspiration. Les écarts observés peuvent également être dus à la méthodologie de la comparaison puisque l'on compare une situation climatique moyenne sur une surface de 64 km² avec une situation en un point précis. En ce qui concerne les résultats pour les précipitations, cela peut être expliqué par la structure même du modèle qui prend difficilement en compte les précipitations de convection. En effet, les événements orageux, dus à des phénomènes de convection, ne sont pas bien représentés par le modèle qui prend principalement en compte la circulation atmosphérique, la convection étant fréquemment le résultat de phénomènes de plus petite échelle. La comparaison des sorties du modèle ARPEGE-Climat avec l'observé réalisée à l'échelle de la France (Déqué, 2007) a permis la mise en évidence de sa cohérence. Ici, pour une application à la Bretagne, les

résultats de la comparaison sont différents de ceux obtenus au niveau du pays. En effet, les résultats mettent en évidence la difficulté pour le modèle à prendre en compte le gradient océanique régional, phénomène important pour le climat breton du fait de l'importance des limites maritimes de la Bretagne. Ces différences ont un impact sur l'indice de sécheresses DE, étant donné qu'il est obtenu à partir des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Les biais du modèle sont ainsi cumulés et conduisent à des écarts se situant majoritairement sous la barre des 10 mm par mois. Ces seuils étant acceptables, cette étude permet de confirmer la faisabilité d'une utilisation des sorties des modèles ARPEGE-Climat pour une étude des sécheresses dans le contexte du changement climatique.

4.4 L'interpolation des données climatiques : affiner la résolution des données climatiques jusqu'à 1 km

Les données fournies par le CERFACS, de résolution spatiale de 8 km, permettent d'avoir une bonne vision prospective des changements climatiques attendus à l'échelle d'une région comme la Bretagne. Cependant, pour une analyse hydrique du territoire il pourrait être intéressant d'avoir des données de résolution plus fine.

Pour une analyse spatiale encore plus fine il faut prévoir d'établir une interpolation des données climatiques. Il existe deux types majeurs d'interpolation : géostatistique où l'on considère que la valeur de la variable étudiée dépend de celles des points autour et de la distance à ces points ; multicritère où l'on prend en compte des facteurs non-climatiques pouvant influencer une variable climatique (Madelin *et al.*, 2002). Le lien entre la géographie au sol et la climatologie fait que de nombreux auteurs privilégient la deuxième approche (Carrega, 1994 ; Fury et Joly, 1995 ; Madelin *et al.*, 2002). On peut également utiliser les images satellites pour l'interpolation (Dubreuil *et al.*, 2002).

La relation entre les précipitations et l'altitude a été étudiée à partir de 13 stations météorologiques sur la période 1961-2009. Ces stations ont globalement une altitude comprise entre 20 et 100 m. La plus haute station, Rostrenen, culmine à 262 m d'altitude. Un graphique par mois a été établi afin de prendre en compte la saisonnalité dans l'effet de l'altitude sur les précipitations. Le graphique obtenu pour le mois de janvier (figure 4.11) montre des tendances observées toute l'année sauf durant l'été, qui est présenté par la figure 4.12. Pour l'été la droite de tendance matérialisant la régression linéaire entre les précipitations et l'altitude ou la longitude n'est pas très précise puisque le R^2 est respectivement égal à 0,24 et 0,38. Durant le reste de l'année, et surtout l'hiver, les précipitations semblent mieux corrélées à la longitude ($R^2 = 0,63$) qu'à la latitude ($R^2 = 0,27$).

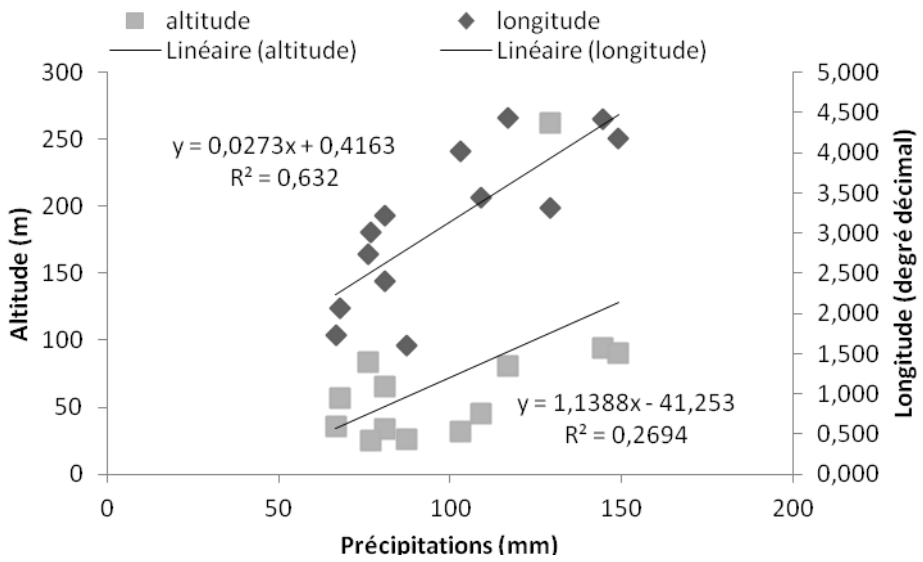


Figure 4.11 Régression linéaire des précipitations en fonction de l'altitude et de la longitude en janvier (d'après des données de la période 1961-2009)

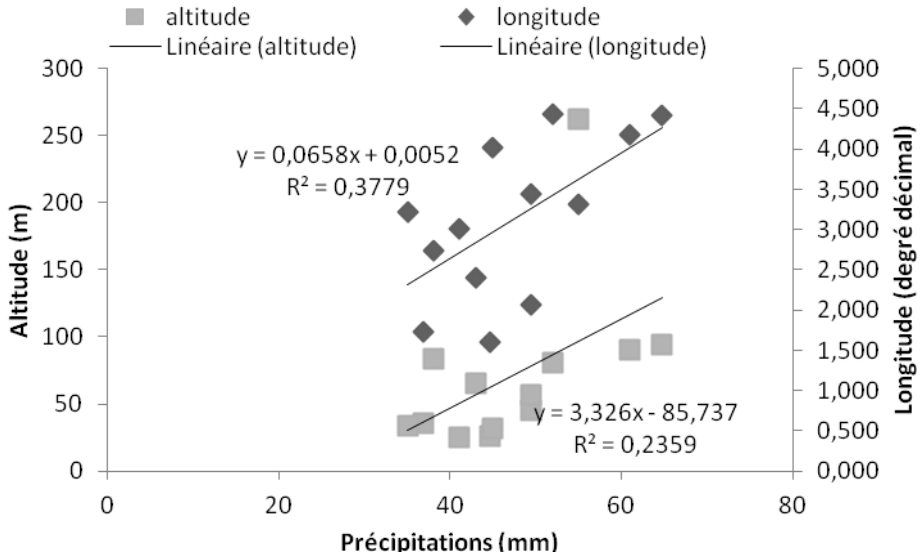


Figure 4.12 Régression linéaire des précipitations en fonction de l'altitude et de la longitude en août (d'après des données de la période 1961-2009)

Il est dès lors difficilement concevable d'utiliser cette technique pour interpoler les données, alors qu'elle s'avère peu fiable l'été. On utilisera donc l'approche géostatistique à partir du logiciel ArcGis.

Dans un premier temps nous avons pensé réaliser un krigeage des données climatiques, voire un co-krigeage en intégrant l'altitude *via* un MNT (Modèle Numérique de Terrain) du fait des effets de la topographie sur la répartition des précipitations (modèle Aurelhy, Benichou et Lebreton, 1987). La figure 4.13 présente ainsi les résultats obtenus d'après ces deux méthodes (C et D) pour les précipitations moyennes du mois de juin pour la période 2020-2040 d'après le scénario A1B. On peut ainsi remarquer que les résultats du co-krigeage avec le MNT n'ajoutent peu ou pas d'informations en plus du krigeage ordinaire.

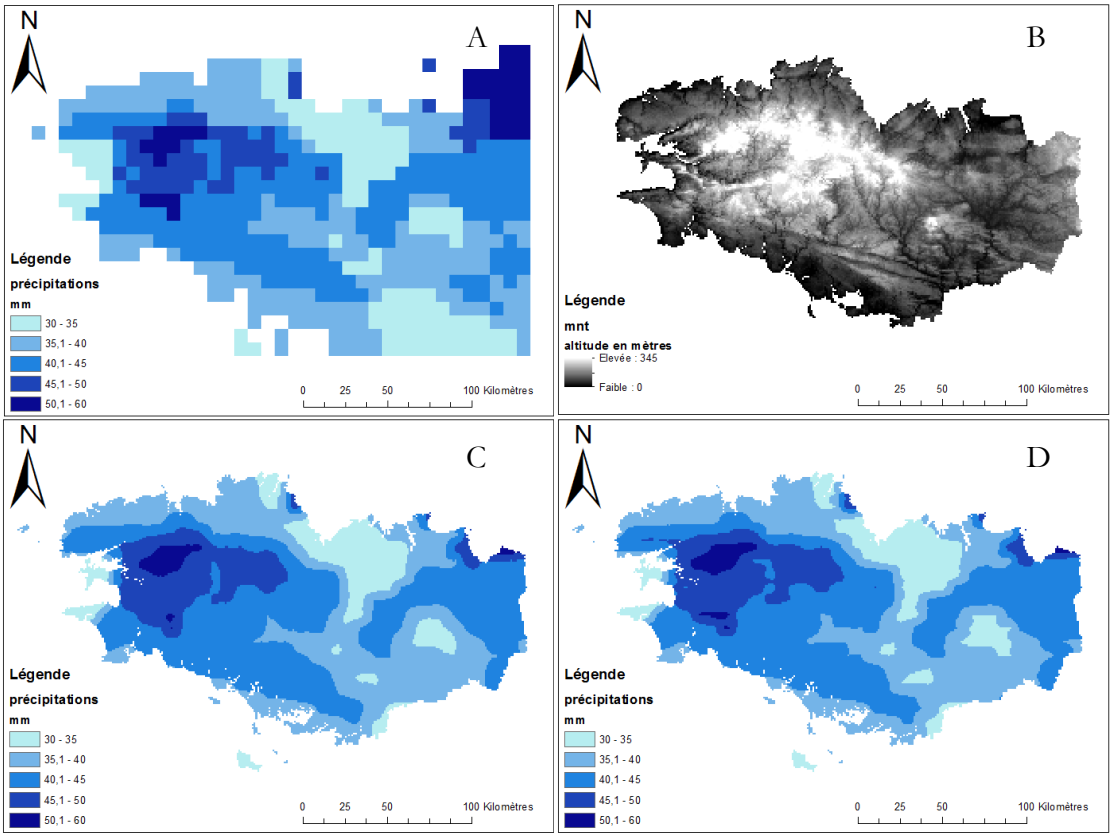


Figure 4.13 Résultats de deux krigeages différents (C : krigeage ordinaire ; D : co-krigeage avec MNT) d'après les précipitations moyennes du mois de juin à 8 km (A) et un MNT à 1 km (B) sur la période 2020-2040 d'après le scénario A1B

De plus, en analysant le semivariogramme utilisé par le logiciel ArcGIS pour générer le krigeage ordinaire et le covariogramme utilisé pour le co-krigeage avec MNT (figure 4.14), on remarque la présence d'un effet pépite pour le co-krigeage. Cela signifie que l'ajout du MNT entraîne une absence de logique spatiale dans les données. Pour expliquer ces résultats il faut s'intéresser aux données brutes que nous utilisons, qui ont été traitées par différents processus pour être à la résolution de 8 km. Au sein de ces processus de modélisation et désagrégation ayant permis d'obtenir les données climatiques à 8 km, l'altitude est déjà prise en compte en tant que contrainte spatiale. De fait, rajouter une contrainte avec le MNT lors du co-krigeage ne fait qu'ajouter un biais aux données climatiques.

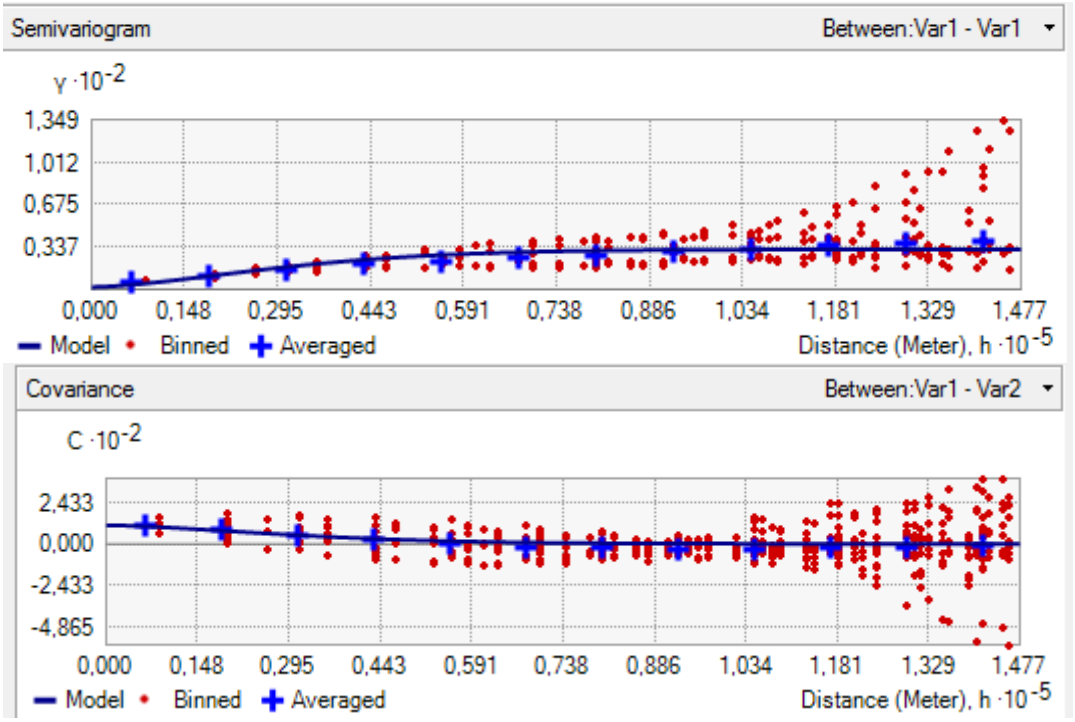


Figure 4.14 Représentation du semivariogramme utilisé pour le krigeage des précipitations (haut) et du covariogramme utilisé pour le co-krigeage avec MNT (bas)

On peut également expliquer ces résultats par rapport au caractère plus ou moins discriminant du relief selon les régions. A Lyon par exemple (Renard et Comby, 2006), l'orientation du relief et sa pente progressive ne conditionnent que très peu le climat. Pour la Bretagne ces résultats pourraient laisser penser que la proximité du littoral joue un rôle plus fort sur le climat que le relief.

Face aux résultats peu concluants du krigeage et étant donné la densité du jeu de données couvrant la Bretagne, il peut être envisagé de passer par une méthode d'interpolation plutôt que par un krigeage. Dans ce cas il peut être judicieux d'utiliser la théorie des splines qui s'avère être un juste milieu entre krigeage et minimum de distance. Une courbe spline est une fonction polynômiale par morceaux (Métais, 2000). Les morceaux correspondant à un segment entre 2 points, défini par un polynôme. Cette méthode s'est principalement développée dans les années 1960 quand des mathématiciens ont réalisé l'intérêt de ces fonctions pour modéliser le processus physique de lissage de courbe (Métais, 2000). Actuellement une des utilisations des splines est l'interpolation d'images pixelisées pour lesquelles on cherche à connaître plus d'informations. Les splines permettent en effet d'affiner la résolution d'une image en considérant l'environnement proche d'un pixel (Métais, 2000).

La méthode d'interpolation par les splines est détaillée sur le site internet d'Esri. Cette approche s'appuie sur le fait que les valeurs sont déterminées à l'aide d'une fonction mathématique réduisant la courbure globale des surfaces afin de restituer une surface lisse passant par les points d'entrées. La fonction mathématique prend en entrée les points les plus proches, tout en passant par les points d'échantillonnage. Sur la page « interpolation spline » du site Esri on retrouve une distinction entre deux approches « régularisée » et « tension ». L'approche « régularisée » s'utilise si la deuxième dérivée de la surface interpolée doit être calculée. L'approche « tension » n'ajoute que

les termes de première dérivée dans les critères de minimisation. C'est donc cette approche que nous utiliserons. L'approche « tension » est contrôlée par un paramètre de poids qui varie généralement de 0 à 10. Plus le poids est important plus le rendu de l'interpolation apparaîtra de manière grossière en termes de contours, les valeurs restent pour autant toujours identiques aux points de contrôle. Pour autant la régularité du jeu de données traité (un point tous les 8 km) associé à un nombre de points assez important considéré pour l'interpolation spline (12) et une résolution finale de 1 km, conduit à un faible impact du poids dans le rendu final. La figure 4.15 montre ainsi la différence entre une interpolation spline « tension » de poids 0.1 (gauche) et de poids 5 (droite).

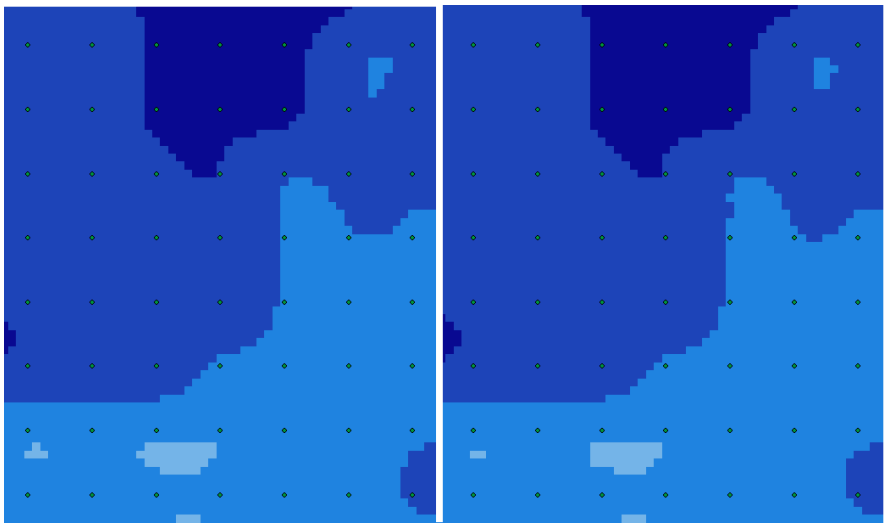


Figure 4.15 Résultats d'interpolation par spline « tension » avec un poids de 0.1 (gauche) et 5 (droite), la distance entre les points étant de 8 km

Ici nous utilisons l'interpolation par les splines avec l'approche tension proposée par ArcGis pour laquelle le poids a été fixé à 5. Le nombre de points utilisé pour l'approximation locale reste sur la valeur par défaut : 12. La carte obtenue par cette méthode (figure 4.16A) présente des structures spatiales qui semblent plus précises que le cokrigeage (figure 4.16B) révélatrices de la topographie régionale.

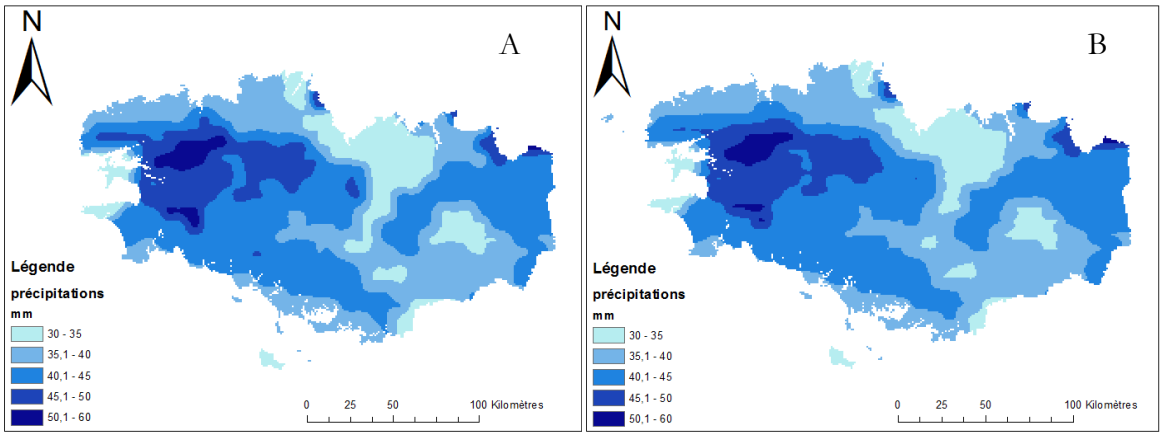


Figure 4.16 Interpolation par spline (A) comparée au résultat du co-krigeage avec MNT (B)

Les données climatiques présentées ici sont utilisées en entrée du bilan hydrique qui est détaillé dans le chapitre suivant.

Synthèse : Utilisation des projections climatiques régionalisées

Les modèles climatiques globaux peuvent être utilisés pour des analyses des changements du climat à l'échelle de la planète ou pour des territoires homogènes sur le plan géographique. Quand on s'intéresse à des territoires plus petits et plus hétérogènes, tels que la Bretagne, la régionalisation des sorties des modèles climatiques globaux est nécessaire.

Les différentes méthodes de descente d'échelle (dynamique ou statistique) ont chacune leurs avantages et inconvénients. Les scientifiques privilégient ainsi une méthode à l'autre en fonction de leurs besoins et de leurs ressources. Cette étape de régionalisation apporte un biais supplémentaire aux sorties de modèles qu'il est important de connaître ou d'estimer. En effet, dans le cas d'une communication sur des sorties de modèles à des décideurs locaux par exemple, il faut être conscient des limites des données utilisées. La comparaison des données mises à disposition pour cette étude par le CERFACS, désagrégées statistiquement, avec les données observées a mis en évidence des biais systématiques mais modérés. Les biais ainsi observés sur les précipitations et l'évapotranspiration se retrouvent dans d'autres paramètres dépendant de ces variables climatiques tels que le déficit d'évaporation. Ces erreurs, principalement inférieures à 10 %, n'empêchent pas pour autant l'utilisation des projections climatiques régionalisées pour une analyse des sécheresses à l'échelle d'un territoire.

Les sorties désagrégées par le CERFACS sont à une résolution de 8 km. Elles sont donc bien adaptées à une étude nationale ou régionale. Pour avoir une vision plus fine de l'aléa sécheresse en Bretagne il est tout de même possible de travailler sur la résolution de ces données, notamment par des techniques d'interpolation. L'interpolation par les splines est adaptée au jeu de données utilisé ici qui est dense et régulier. Cette méthode peut être vue comme une approche complémentaire entre le krigeage et la prise en compte des minimums de distance. Cette technique d'interpolation convient tout à fait à l'affinement de la résolution d'une image puisqu'elle considère l'environnement proche d'un pixel. Les cartes de résolution d'1 km obtenues par cette méthode ont révélé des résultats plus concluants qu'avec les techniques de krigeage et co-krigeage avec un MNT. L'interpolation par les splines met plus nettement en évidence les relations entre les variables climatiques et la topographie ou la distance à la côte.

CHAPITRE 5

LA MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE EN BRETAGNE : UN OUTIL D'IDENTIFICATION DES SECHERESSES DU 20EME SIECLE AU 21EME SIECLE

Sommaire

Introduction....108

5.1 Présentation des paramètres du bilan hydrique 108

5.1.1 L'évapotranspiration : paramètre climatique majeur du bilan hydrique 108

5.1.1.1 L'évapotranspiration potentielle 109

5.1.1.2 L'évapotranspiration maximale 111

5.1.2 L'occupation du sol 111

5.1.2.1 La base CORINE Land Cover 113

5.1.2.2 Les données issues de la télédétection 115

5.1.3 La réserve hydrique des sols 117

5.1.3.1 L'évapotranspiration réelle 118

5.1.4 Cycle de l'eau et sécheresse 118

5.2 Spatialisation du bilan hydrique 119

5.2.1 Evolution du calcul du déficit d'évaporation....119

5.2.2 Le bilan hydrique mensuel 119

5.2.3 Le bilan journalier.... 122

5.2.4 L'apport de la carte pédologique détaillée.... 124

5.2.5 L'apport de l'occupation du sol dans un bilan hydrique 128

5.3 Le paramètre d'intérêt : DE, et un équivalent utilisé par d'autres scientifiques : SWI. 129

5.4 Effet du CO_2 dans le processus de photosynthèse des végétaux, conséquences pour l'ETP.... 129

Synthèse : Utilisation d'un bilan hydrique à l'échelle régionale....133

Introduction

Les problèmes de sécheresses ne concernent pas les seuls manques de précipitations. Les activités socio-économiques sont également vulnérables aux sécheresses pédologiques, qui dépendent d'une absence de pluie mais également d'une carence en eau dans la réserve hydrique des sols. En cela, le bilan de l'eau permet donc de cerner cet aléa, puisqu'il suit le comportement de l'eau à l'interface entre le sol et l'atmosphère. Au-delà du suivi des sécheresses atmosphériques par la prise en compte des précipitations, le bilan hydrique intègre le retour de l'eau vers l'atmosphère grâce à la notion d'évapotranspiration, permettant d'étudier les sécheresses pédologiques. Il permet concrètement de modéliser les entrées et sorties d'eau contenue dans le sol sous l'influence des conditions climatiques et de la végétation en place. Pour cela il croise des variables climatiques avec des variables pédologiques à différentes échelles de temps et d'espace possibles. Le bilan hydrique peut ainsi être utilisé de manière spatialisée à l'échelle d'une région, mais aussi de manière stationnelle pour une station climatique particulière. Les données en entrée peuvent correspondre à des observations ou des simulations, ce qui le rend adapté à une analyse prospective dans le contexte du changement climatique.

Ce chapitre commence ainsi par une présentation détaillée du bilan hydrique utilisé dans la thèse, pour ensuite décrire son utilisation selon les approches stationnelles et spatialisées. Au sein de cette sous-partie deux jeux de données supplémentaires sont présentés du fait de leur intérêt pour augmenter la précision du bilan hydrique. Le paramètre de déficit d'évaporation, résultant de l'utilisation d'un bilan hydrique et permettant de quantifier l'intensité des sécheresses, sera également exposé afin de cerner l'utilité du bilan hydrique quant au suivi de cet aléa. Un second indice, le SWI utilisé par Météo-France, sera également introduit afin de proposer une comparaison de deux indices utilisés pour suivre les sécheresses en France.

5.1 Présentation des paramètres du bilan hydrique

Le bilan hydrique fait interagir des paramètres climatiques avec la réserve hydrique du sol. Ainsi, la présentation du bilan commence par la description des paramètres climatiques utilisés et des bases de données les concernant. Un second point présente ensuite l'occupation du sol et la réserve hydrique fournie par le Laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest.

5.1.1 L'évapotranspiration : paramètre climatique majeur du bilan hydrique

Les paramètres climatiques utilisés en tant que données d'entrées dans un modèle de bilan hydrique sont les précipitations et l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration regroupe deux phénomènes traduisant une restitution d'eau à l'atmosphère. L'évaporation, phénomène physique, représente la transformation de l'eau liquide en gaz pour des surfaces telles que les lacs, rivières, chaussée, sols et végétation humide (Allen *et al.*, 1998). La transpiration, phénomène physiologique, représente la vaporisation de l'eau contenue dans les tissus d'un végétal. La transpiration se fait au niveau des feuilles et est contrôlée par l'ouverture

des stomates (Allen *et al.*, 1998). Pour les cultures, le taux de transpiration va dépendre du type de la culture, de l'environnement ainsi que des pratiques agricoles.

5.1.1.1 L'évapotranspiration potentielle

On distingue plusieurs types d'évapotranspiration selon ce que l'on cherche à représenter. L'évapotranspiration potentielle, établie en premier lieu, illustre les besoins en eau d'un couvert végétal en condition climatique idéale (Thornthwaite, 1948). C'est-à-dire que l'eau n'est pas un facteur limitant. Il faut ainsi voir à travers ce paramètre la possibilité d'établir la quantité d'eau nécessaire à la croissance d'un végétal pour un contexte climatique précis. L'évapotranspiration potentielle représente le pouvoir évaporant d'un climat local (Mounier, 1983). Elle traduit ainsi une situation pour une couverture végétale très précise, par défaut, un gazon ras couvrant complètement le sol (Perrier, 1977).

Trois formules sont majoritairement utilisées pour estimer l'évapotranspiration potentielle. La formule de Thornthwaite (1) la plus simple des trois présentées ici. Celle de Turc (2) dont la formule est ici adaptée à une humidité relative supérieure à 50 % (moyenne mensuelle). Celle de Penman-Monteith (3), qui consiste en un bilan d'énergie.

$$ET_0 = 1{,}6 \left(\frac{10}{I}\right)^a * t^a * f \quad (1)$$

$$ET_0 = 0{,}4 \frac{t}{t+15}(Ig + 50) \quad (2)$$

$$ET_0 = \frac{0{,}408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2\,(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)} \quad (3)$$

La formule de Thornthwaite ne prend ainsi en compte que la température *via* la température moyenne mensuelle t et l'indice thermique I. Le facteur de correction f est fonction de la durée astronomique du jour pendant le mois considéré (Thornthwaite, 1948). La formule de Turc représente une situation assez simplifiée mais est tout de même plus précise du fait de l'ajout de la radiation solaire globale I_g à la température t. Le premier élément de la formule : 0,4 est fonction du mois de l'année concerné et prend la valeur 0,37 pour le mois de février (Turc, 1954).

La formule de Penman-Monteith traduit un bilan d'énergie de surface représentant les échanges entre le sol, la plante et l'air. Ce bilan d'énergie résulte du principe de conservation de l'énergie. Il intègre le rayonnement net R_n, le flux de chaleur latente G, le flux de chaleur sensible dans l'air et le flux de conduction (fonction de la température T, de la vitesse du vent à 2m U_2, de la pente de la relation de Clausius-Clapeyron Δ, de la pression de vapeur d'eau à 2m e_a et à saturation e_s et la constante psychrométrique γ) (Penman, 1948 ; Monteith, 1965 ; Payen et Jacquart-Romon, 1985). Les trois derniers flux sont censés dissiper l'énergie disponible au niveau de la surface R_N (Dubreuil, 1994). Choisnel (1988) explique ainsi que les flux sont estimés par unité de surface en $W.m^{-2}$ selon une norme déterminant comme positif un flux représentant un gain pour la surface et négatif dans le cas contraire.

Cette formule est donc la plus la plus complète des trois puisqu'elle prend en compte 8 paramètres climatiques. La formule de Penman-Monteith est recommandée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, *Food and Agriculture Organisation*). Cependant elle n'est pas facilement utilisable car les variables requises ne sont pas toujours disponibles. Dans ces cas là la formule de Turc offre un bon compromis.

La formule que nous utilisons ici est la formule de Penman-Monteith. Météo-France n'utilisant que cette formule pour estimer l'évapotranspiration, il est nécessaire d'utiliser la même méthode afin d'avoir un jeu de données cohérent et de pouvoir comparer des données obtenues de la même manière. Cependant Météo-France a établi une formule de Penman (4) adaptée au territoire français et vérifiée sur le site de Courcy (Ducharne, 2002).

$$\left.\begin{aligned} ETP_{MF} &= ETP_1 + ETP_2 \\ ETP_1 &= \frac{\Delta}{(\Delta+\gamma)} \frac{R_n}{\lambda} \\ ETP_2 &= \frac{\gamma}{(\Delta+\gamma)} \frac{0.26\,(1. + 0.4U_{10})(e_s - e_a)}{\tau} \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

La différence avec la formule originelle concerne la résistance minimale imposée par la végétation. Explicitement incluse dans la formule de base, la résistance est dès lors implicite au niveau des paramètres de la fonction du vent calibrés à partir de mesures d'ETP (Perrier, 1977 ; Choisnel, 1988).

5.1.1.2 L'évapotranspiration maximale

Pour être plus précis par rapport au couvert végétal il est possible d'intégrer un coefficient cultural (figure 5.1).

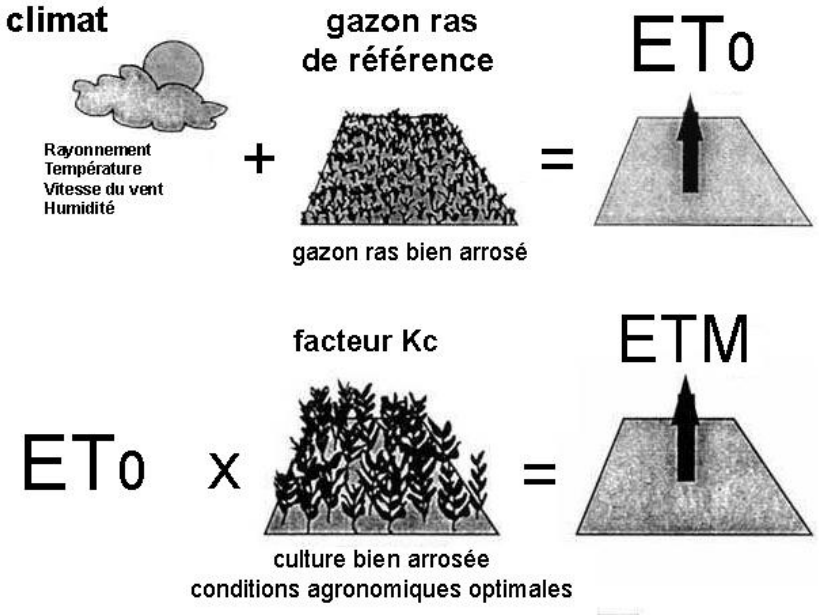


Figure 5.1 Représentation de l'évapotranspiration potentielle (ET_0) et maximale (ET_M) selon la méthode de la FAO-56 (Allen *et al.*, 1998)

Ce coefficient cultural consiste en un facteur multiplicatif appliqué à l'évapotranspiration potentielle. Il illustre les besoins en eau du végétal au cours de l'année en fonction de ses phases de développement. On obtient ainsi une évapotranspiration en condition standard, aussi appelée évapotranspiration maximale (ETM). Perrier (1977) explique ainsi que l'ETM correspond à la quantité maximale d'eau qu'une culture est susceptible d'évaporer dans des conditions idéales d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ. Il précise qu'elle est fonction de la couverture du sol par la culture et de son état physiologique. Alors que l'ETP révèle un potentiel atmosphérique, L'ETM représente la situation du côté du végétal, au sens éco-physiologique du terme.

5.1.2 L'occupation du sol

L'occupation du sol impacte le bilan de l'eau à travers le paramètre d'évapotranspiration maximale. Ce paramètre est obtenu à partir du coefficient cultural Kc, qui traduit les besoins en eau d'un végétal selon son stade phénologique (figure 5.2). Le Kc est ainsi faible durant le stade initial $K_{c\ ini}$, il augmente au cours de la phase de développement pour atteindre son maximum entre les phases de floraison et de maturation $K_{c\ mid}$, pour ensuite décroître sur la période de la fin de vie de la culture $K_{c\ end}$.

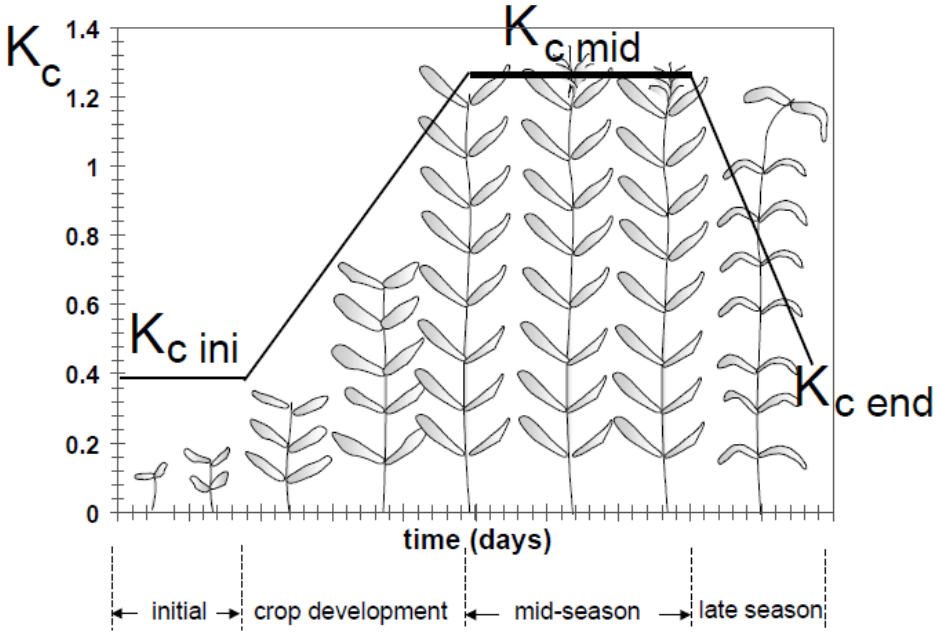


Figure 5.2 Evolution du coefficient cultural Kc selon les stades phénologiques d'une culture (Allen *et al.*, 1994)

Pour cette étude ce coefficient a été fixé pour 9 types d'occupation du sol représentatifs de la diversité bretonne (tableau 5.1). Les valeurs ont été établies à partir du bulletin de la FAO-56 (Allen *et al.*, 1994) et vérifiées comme adaptées au climat océanique breton par Jean Grall, agronome à la chambre d'agriculture de Bretagne.

Tableau 5.1 Valeurs mensuelles du coefficient cultural pour 9 types d'occupation du sol représentatifs de la Bretagne (d'après Allen *et al.*, 1994)

Occup. sol	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Prairie, eau libre	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Urbain	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5
Légumes	0,5	0,6	0,8	1	0,6	0,6	0,7	0,8	1	0,8	0,6	0,5
Landes	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5
Forêt feuillus	0,5	0,5	0,5	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,5	0,5	0,5
Forêt conifères	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1	1	1
Forêt mixte	0,8	0,8	0,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8	0,8
Blé	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	1,2	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Maïs	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,8	1,2	1,2	0,6	0,5	0,5

Le coefficient cultural est donc associé à différents types d'occupations du sol obtenus à partir de deux jeux de données de précisions différentes : CORINE Land Cover et un jeu de données interne au laboratoire COSTEL obtenu par télédétection dans le cadre de la thèse de Rémi Lecerf (2008). Ce coefficient est ensuite appliqué à l'évapotranspiration potentielle afin d'obtenir l'évapotranspiration maximale.

5.1.2.1 La base CORINE Land Cover

La base de données CORINE Land Cover (CLC) a été utilisée pour le bilan hydrique mensuel de résolution de 8 km. La description de ce jeu de données est établie à partir d'informations lues sur le site internet du ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (http://www.developpement-durable.gouv.fr). Cette base de donnée étant établie pour être cohérente à l'échelle de l'Europe, on observe quelques approximations à l'échelle régionale. Il n'est donc pas judicieux d'utiliser ce jeu de données pour le bilan hydrique de résolution kilométrique. Cette base européenne distingue l'occupation du sol à travers 44 classes regroupées en 14 familles et correspondant aux zones urbanisées, terres arables, cultures permanentes, forêts et zones humides par exemple. Ces informations sont obtenues à partir d'images satellitaires haute résolution SPOT et Landsat. Le premier inventaire a été réalisé à partir d'images couvrant la période 1989-1994. Il a, par la suite, été mis à jour en 2000 puis en 2006. Nous utilisons ici la version la plus récente. En Bretagne on retrouve vingt classes qui sont présentées dans le tableau 5.2. La carte d'occupation des sols de la base CLC a été transformée au format raster en considérant l'occupation majeure à l'intérieur de chacun des pixels de 8 km². Au sein de la classe « céréale » des distinctions ont été apportées à partir des informations relevées dans l'ouvrage de Canévet (1992) qui aborde les trajectoires locales de l'agriculture. Ainsi, dans la carte d'occupation des sols que nous utilisons ici la classe 3 correspond au blé et la classe 11 aux cultures fourragères (maïs). De même la classe « sols nus » de la base CLC a été modifiée d'après les cartes de Canévet (1992) au profit des cultures légumières et céréalières.

La carte d'occupation des sols ainsi obtenue (figure 5.3) révèle une majorité de cultures fourragères à l'échelle de la région (41 %), suivie par les prairies (19 %) et cultures légumières (13,6 %). Viennent ensuite les forêts (12,7 %) et cultures céréalières (11,7 %). Si l'on regarde les chiffres de l'année 2000 établis par l'ADRESTE, en ce qui concerne la culture on note près de 50 % de cultures fourragères et céréales diverses et 12 % de cultures légumières et horticoles. D'après le CRPF la forêt bretonne couvre près de 14 % de la région. Les pourcentages utilisés à partir de la base CORINE Land Cover semblent donc cohérents avec la réalité du territoire.

Tableau 5.2 Classes du bilan hydrique adaptées du CORINE Land Cover pour le territoire breton

Code	Catégorie	Classes CLC correspondantes
1	Prairie	Aéroports (124) Equipements sportifs et de loisirs (142) Prairie (231) Zone incendiée (334) Marais intérieur (411) Marais maritime (421) Plans d'eau (512) Estuaires (522)
3	Céréales	Systèmes culturaux et parcellaires complexes (242) Surfaces essentiellement agricoles, interrompus par des espaces naturels importants (243)
4	Landes et broussailles	Landes et broussailles (322)
5	Sol urbain	Tissu urbain discontinu (112) Zones industrielles et commerciales (121)
6	Forêt feuillus	Forêts de feuillus (311)
7	Forêt conifères	Forêts de conifères (312)
8	Forêt mixte	Forêt mélangée (313) Forêt et végétation arbustive en mutation (324)
9	Eau libre	Zones intertidales (423) Mers et océans (523)
10	Cultures légumières	Terres arables hors périmètres d'irrigation (211)
11	Cultures fourragères	Systèmes culturaux et parcellaires complexes (242) Surfaces essentiellement agricoles, interrompus par des espaces naturels importants (243)

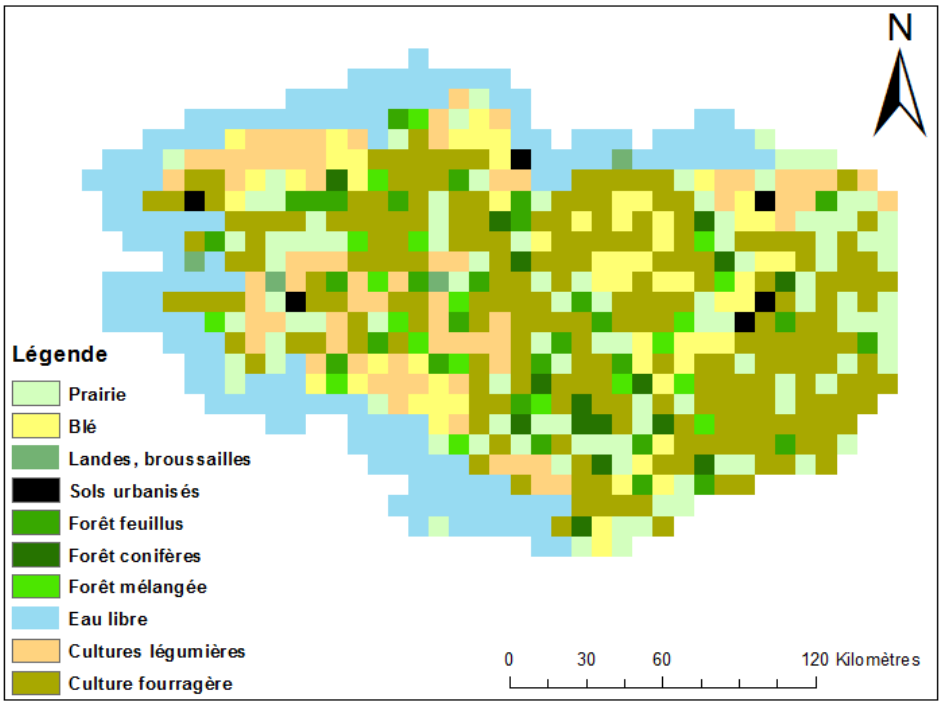


Figure 5.3 Occupation du sol d'après la base CORINE Land Cover complétée par l'analyse de Canévet (1992)

5.1.2.2 Les données issues de la télédétection

Les données disponibles au laboratoire COSTEL suite aux travaux de Rémi Lecerf sont obtenues par télédétection. Le travail réalisé s'appuie principalement sur des images issues du capteur MODIS de la NASA. Ces images ont par la suite été traitées pour obtenir des informations de végétation, avec des images de résolutions spatiales différentes et issues d'autres capteurs (Lecerf, 2008). Parmi les données ainsi utilisées on compte les images MODIS de basse et moyenne résolution qui renseignent sur la luminance en haut de l'atmosphère, la réflectance corrigée de l'atmosphère, les indices de végétation NDVI et EVI et les variables biophysiques pour la période 2000-2008 (Lecerf, 2008). Des synthèses d'images de réflectance MERIS ainsi que les données biophysiques CYCLOPES ont également été utilisées pour permettre une comparaison avec les données MODIS. La validation de ces données a été réalisée à partir d'images à haute résolution spatiale : Landsat, ASTER, SPOT et QUICKBIRD qui couvrent la période 2000-2006 (Lecerf, 2008). La base de donnée CORINE Land Cover a également permis de valider les données obtenues après traitement des images MODIS. L'occupation du sol a ensuite été attribuée par une méthode de classification des données permettant d'établir l'occupation dominante au sein du pixel. Au final, les classes obtenues distinguent les landes, les forêts de feuillus, les forêts de résineux, les surfaces d'eau libre, les surfaces artificialisées, les prairies permanentes, les terres labourables au sein desquelles sont différenciées les légumes, les prairies temporaires et fourrages, les céréales hors maïs et le maïs.

A partir de cette base de données on obtient une série de carte « hiver » et une série « été » contenant chacune une carte par année pour la période 2000-2007. Afin d'utiliser une carte moyenne de la situation du début du siècle en Bretagne, les changements d'occupation du sol d'une carte à l'autre ont été analysés. Les surfaces en forêt et prairies évoluant peu d'une année sur l'autre, on s'intéresse principalement ici à l'évolution des surfaces agricoles. On peut ainsi voir deux évolutions alterner, globalement, d'une année sur l'autre : la diminution des surfaces en sols nus au profit des surfaces cultivées, et inversement une augmentation des surfaces en sols nus. On note cependant une absence d'évolution à l'échelle régionale entre les hivers 2003-04 et 2004-05, si ce n'est une augmentation des zones urbaines. C'est en 2006-07 que les surfaces agricoles sont les plus importantes et donc que les sols nus sont les plus limités. Pour travailler avec une situation moyenne du début du 21ème siècle on utilise les données de l'hiver 2003-04 (figure 5.4) qui présente un ratio surfaces agricoles/sols nus moyen pour la période 2000-2007.

En ce qui concerne la situation estivale on observe une légère augmentation des cultures de maïs entre l'été 2000 et 2001 et qui diminue assez nettement au cours de l'année suivante, en 2002. En 2003 le maïs reprend un peu plus de poids face aux autres céréales, notamment dans l'est de la région. L'année suivante, 2004, connait de nouveau une légère tendance à la diminution des surfaces cultivées en maïs qui est ensuite contrebalancée par une légère augmentation au cours de l'année 2005. La situation en 2005 est ainsi très proche de celle de 2003. En 2006 les surfaces en maïs perdent de nouveau de leur importance au profit des autres céréales mais dans des proportions relativement faibles. En 2007 la situation est similaire à l'année 2006. D'après ces observations l'année 2004 (figure 5.5) présente une situation moyenne de la période 2000-2007 et

c'est donc cette année qui a été choisie pour représenter le scénario d'occupation estivale des sols en Bretagne qui sera intégré dans le bilan hydrique prospectif. La carte d'occupation du sol moyenne estivale (figure 5.5), qui correspond à l'année 2004, présente une situation relativement en accord avec l'occupation du sol décrite par la base CLC. Les céréales et cultures fourragères occupent entre 35 et 55 % du territoire, contre 52 % d'après les données de CLC. Une classe de légende regroupant des prairies et des fourrages, il est difficile d'avoir une idée précise de la surface occupée par les céréales et cultures fourragères. En ce qui concerne la forêt on est ici proche des informations issues de CORINE Land Cover, de 12 % environ. Pour la culture de légumes en revanche la représentation est franchement sous-estimée ici avec 2 % du territoire, contre 13 % estimé par CORINE. Un biais relativement important s'observe donc ici sur la culture légumière. La seule différence entre la carte de la situation estivale (figure 5.5) et hivernale (figure 5.4) concerne le maïs qui n'est pas présenté sur la carte hivernale. Deux nouvelles classes apparaissent pour la situation hivernale : l'interculture et les sols nus, qui ne sont pas représentés par la base CORINE Land Cover.

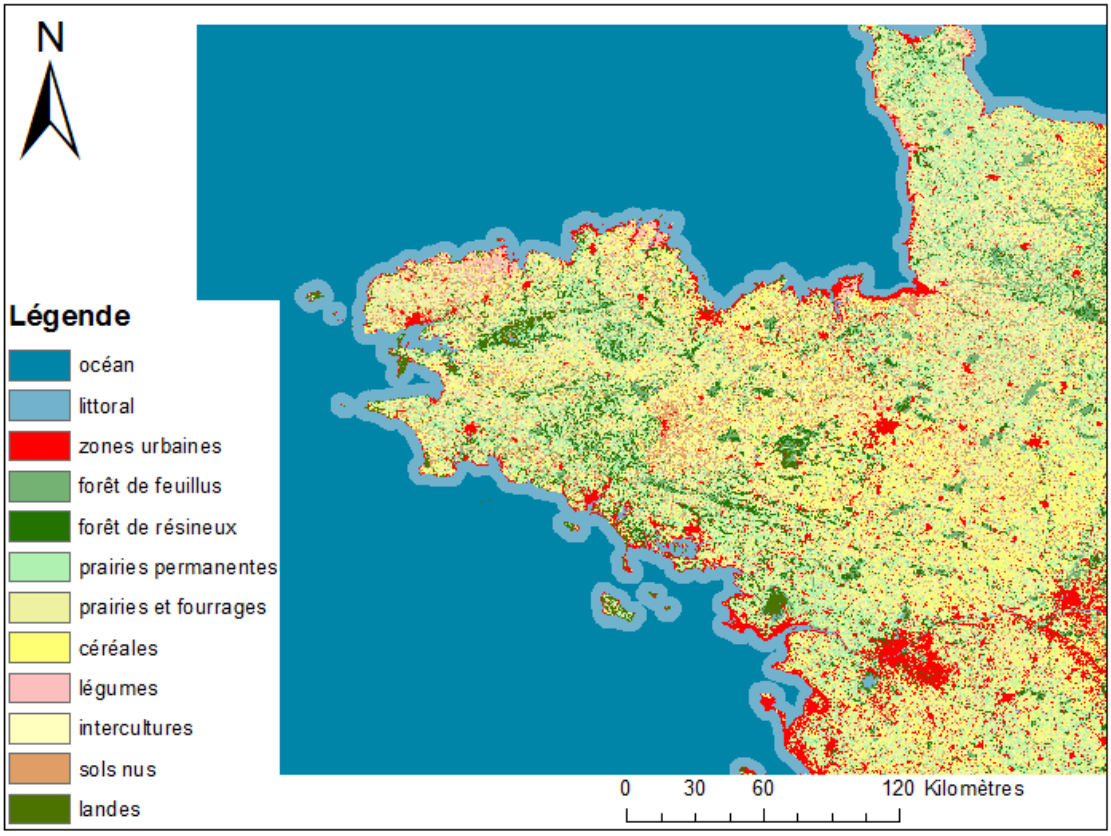


Figure 5.4 Carte de l'occupation du sol moyenne hivernale pour le début du 21ème siècle (d'après les données issues de la thèse de Rémi Lecerf)

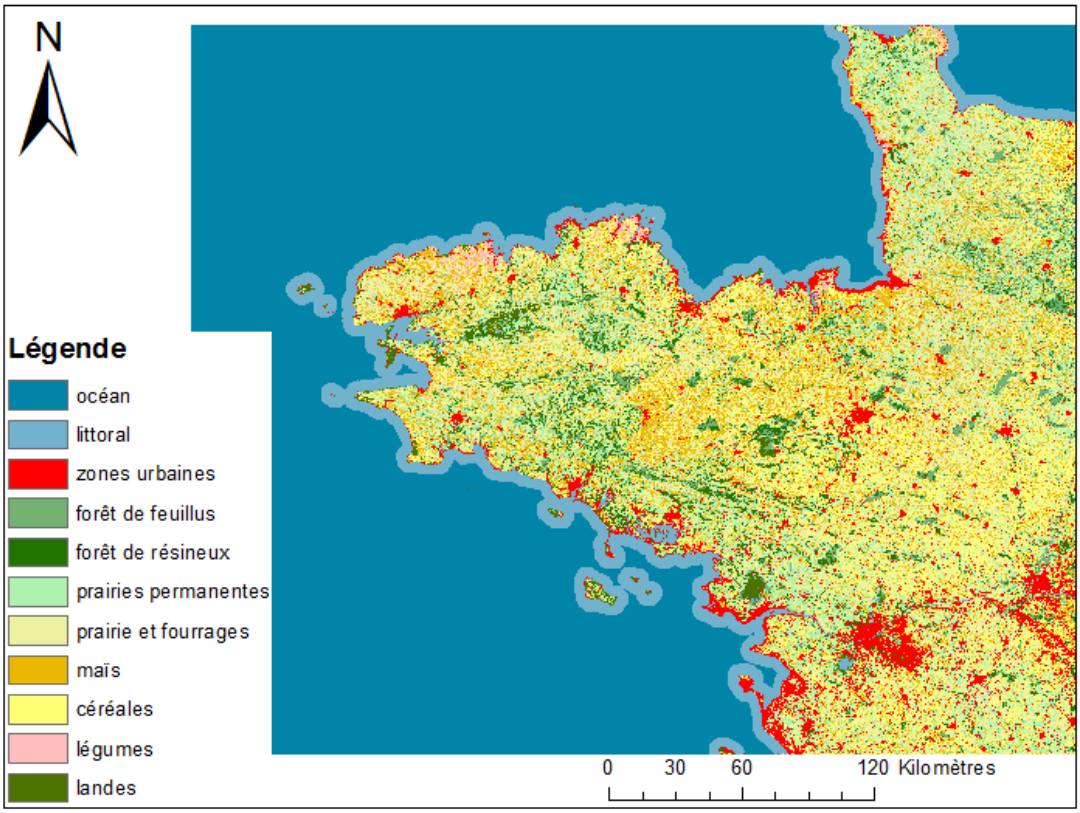


Figure 5.5 Carte de l'occupation du sol moyenne estivale pour le début du 21ème siècle (d'après les données issues de la thèse de Rémi Lecerf)

5.1.3 La réserve hydrique des sols

La réserve hydrique des sols représente la quantité d'eau retenue dans les sols par capillarité et qui va être rendue à l'atmosphère par évaporation ou transpiration (Hallaire, 1968). C'est la nature du sol qui détermine sa teneur maximale en eau, aussi appelée réserve utile, qui correspond à la différence entre la capacité au champ du sol et son point de flétrissement. Au sein de la réserve utile, la réserve hydrique varie ainsi entre le point de flétrissement, son minimum, et la capacité au champ, son maximum. Au-delà du point de flétrissement le sol est trop sec pour alimenter la plante. Ce stock se recharge durant l'automne et l'hiver grâce aux précipitations. Au cours du printemps et de l'été la croissance des plantes requiert de plus grandes quantités d'eau, qui ne sont pas satisfaites par les précipitations, aussi la plante va puiser dans les sols pour combler ses besoins. L'eau retenue dans les sols est maintenue aux particules par des forces d'adhésion très fortes. Ainsi, moins il y a d'eau dans les sols, plus elle est difficile à mobiliser (Carrega, 1987) et donc la réserve hydrique diminue « *d'autant moins qu'elle est basse* » (Dubreuil, 1994).

Les travaux de Vovič (1968) ont permis de mettre en évidence l'incidence de la nature du sol sur les paramètres du bilan hydrique. La figure 5.6 illustre ainsi deux situations, la première (graphique de gauche) correspond à un sol où la capacité d'infiltration augmente avec la capacité de rétention, tandis que la seconde (graphique de droite) traduit un sol où la capacité d'infiltration augmente au détriment du pouvoir de rétention. Pour la première situation l'évapotranspiration augmente jusqu'à une valeur seuil, l'écoulement diminue également de manière logarithmique. En

revanche, dans le second cas on observe une évolution en cloche de l'évapotranspiration et de l'écoulement total.

Face à la grande diversité des sols à l'échelle d'une région, il est parfois difficile d'établir la taille de réserve utile de tous les sols. En l'absence de données il est commun de considérer une taille de réserve utile moyenne à l'échelle de la région. En Bretagne cette valeur a été établie à 125 mm (Pihan, 1976 ; Mounier, 1977 et 1983 ; Cosandey, 1983).

L'occupation du sol et la réserve hydrique vont permettre le calcul de l'évapotranspiration réelle qui est fonction de l'eau disponible dans le système sol - atmosphère.

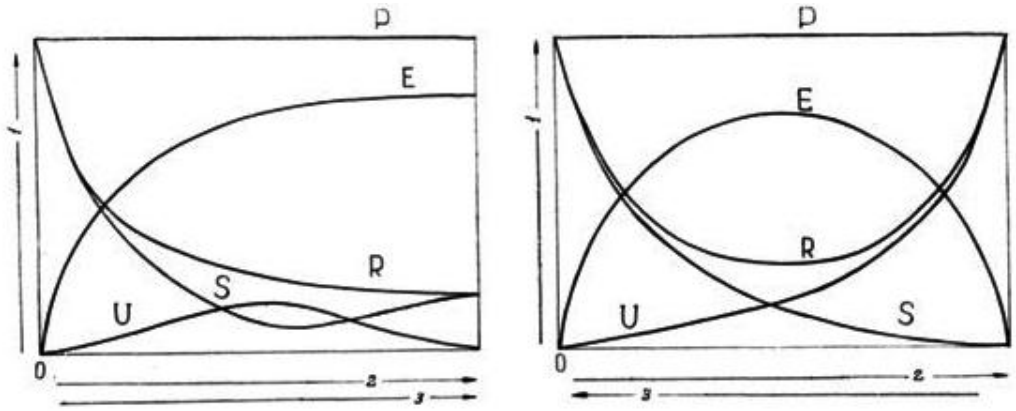


Figure 5.6 Vision théorique de l'effet de la nature du sol sur les différents paramètres du bilan hydrique (P : précipitations, R : écoulement total, S : écoulement superficiel, U : écoulement souterrain, E : évaporation, 1 : éléments du bilan, 2 : capacité d'infiltration du sol, 3 : pouvoir de rétention du sol) (Vovič, 1968)

5.1.3.1 L'évapotranspiration réelle

Une fois l'évapotranspiration potentielle, ou en condition standard, établie il est possible de définir l'évapotranspiration réelle. L'évapotranspiration réelle représente l'eau véritablement transpirée par le végétal et non plus une valeur théorique. Celle-ci est égale à l'évapotranspiration potentielle quand l'eau est pleinement disponible, que ce soit à travers les précipitations où la réserve hydrique des sols. Quand les précipitations diminuent et ne peuvent plus subvenir aux besoins de la plante, celle-ci va puiser dans la réserve du sol jusqu'à épuisement de ce stock si les conditions climatiques défavorables se prolongent. Dans ces cas-là l'évapotranspiration réelle ne sera plus égale à l'évapotranspiration potentielle mais égale à l'eau disponible dans le système sol - atmosphère. Cette diminution de l'évapotranspiration est rendue possible par le contrôle de l'ouverture des stomates, à l'échelle de la minute, par la plante, permettant à la plante de s'adapter aux fluctuations climatiques (Braque, 1988).

5.1.4 Cycle de l'eau et sécheresse

Le cycle de l'eau normal correspond au parcours de l'eau dans le sol et l'atmosphère en quantité suffisante pour les besoins des plantes. Les variations saisonnières permettent de compenser une saison sèche estivale (où l'ETP est forte et les précipitations faibles) par la saison hivernale plus

humide où l'évapotranspiration potentielle est faible. Le manque d'eau estival va donc nécessiter l'utilisation du stock d'eau hivernal pour satisfaire les besoins des hommes et des plantes.

Les sécheresses correspondent à une perturbation de ce cycle. Celui-ci est d'abord altéré par une diminution des précipitations qui entraine un appauvrissement de l'infiltration et du ruissellement. Généralement les diminutions de précipitations sont associées à une augmentation des températures, conduisant à une augmentation des besoins en eau des plantes. Le dessèchement des sols et des cours d'eau ainsi provoqué va réduire l'alimentation en eau de l'atmosphère, ce qui tend à alimenter les situations anticycloniques, engendrant ainsi une stabilisation de cette perturbation (Dubreuil, 1994).

5.2 Spatialisation du bilan hydrique

Le bilan hydrique a, dans un premier temps, été utilisé de manière stationnelle, pour quelques stations bretonnes. Pour ce faire, un fichier Excel reprenant les formules établies par Dubreuil (1994) a été utilisé. Initialement conçus autour de la formule d'évapotranspiration potentielle de Turc, les fichiers ont été modifiés afin de calculer l'évapotranspiration d'après la formule de Penman-Monteith. Cette modification a été effectuée au regard de l'utilisation de plus en plus importante de cette formule plus complète.

Par la suite ce bilan hydrique a été spatialisé en utilisant le logiciel ArcGis (version 9.3 puis 10.0). La spatialisation du bilan requiert des modifications de données, voire des données supplémentaires. Les données climatiques utilisées sont toujours les sorties désagrégées du CERFACS pour les scénarios A1B, A2 et B1. Les données pédologiques ont été modifiées pour prendre en compte la diversité spatiale du territoire breton. Un nouveau jeu de données concernant l'occupation du sol a été ajouté. L'amélioration du bilan hydrique grâce à ces changements et ajouts de données est explicitée par la suite.

5.2.1 Evolution du calcul du déficit d'évaporation

Le déficit d'évaporation calculé lors du bilan hydrique stationnel se base sur les évapotranspirations potentielle et réelle, puisque l'occupation du sol n'est pas prise en compte. Pour le bilan spatialisé l'occupation du sol est connue. Ainsi l'évapotranspiration réelle est estimée à partir de l'évapotranspiration maximale et non plus d'après l'évapotranspiration potentielle. Il en va de même pour le déficit d'évaporation qui correspond dès lors à la différence entre l'évapotranspiration maximale et réelle.

Cette transition méthodologique permet d'avoir un bilan hydrique spatialisé au plus près des conditions réelles. Les différences engendrées par ces deux méthodes de calcul du déficit d'évaporation sont explicitées dans le chapitre 6.

5.2.2 Le bilan hydrique mensuel

Dans un premier temps le bilan hydrique spatialisé à été réalisé au pas de temps mensuel. Cela a tout d'abord nécessité d'établir des valeurs moyennes mensuelles pour les paramètres

précipitations et évapotranspiration potentielle sur des périodes de 20 ans pour le 21ème siècle, pour les 1104 points couvrant la Bretagne et les alentours. Pour cela un premier script en langage Python a été codé. Il consiste en 2 étapes successives schématisées en figure 5.7. Ce script nécessite en données d'entrées le fichier au format .csv (csv pour *comma separated values*) regroupant les projections climatiques des précipitations journalières ou de l'évapotranspiration potentielle journalière pour les 1104 points étudiés. Chaque scénario (A1B, B1 et A2) est ainsi caractérisé par un jeu de deux fichiers .csv. Il faut donc préciser en paramètre d'entrée le modèle que l'on souhaite traiter (reticB1, reticA1B ou reticA2) puis le paramètre voulu (« prcp » pour précipitation ou « evapn » pour évapotranspiration) ainsi que la période que l'on souhaite traiter. Un message est affiché à l'écran si la période choisie est inférieure à 20 ans ou si elle commence avant 2020. L'objectif est d'informer l'utilisateur des paramètres qu'il a rentré en cas d'erreur de sa part, puisqu'une période inférieure à 20 ans ne correspond pas à la durée requise pour une étude climatique. De plus, les sorties des modèles climatiques avant les années 2020 restent assez critiquées pour leur justesse, du fait d'une dépendance encore trop marquée avec les paramètres initiaux des modèles climatiques. Le script ne sera pas pour autant bloqué afin de laisser la possibilité à l'utilisateur d'établir les moyennes mensuelles de projections climatiques pour des attentes différentes de celles convenues ici. Pour cette étude nous avons choisi quatre périodes de référence pour lesquelles les moyennes ont été calculées : 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099. Ces périodes ont été déterminées à la suite de l'analyse de l'évolution du déficit d'évaporation au cours du 21ème siècle. Le paramétrage des périodes reste tout de même modulable, de façon à ce que le script créé pour cette étude puisse être utilisé par un utilisateur qui aurait des attentes différentes.

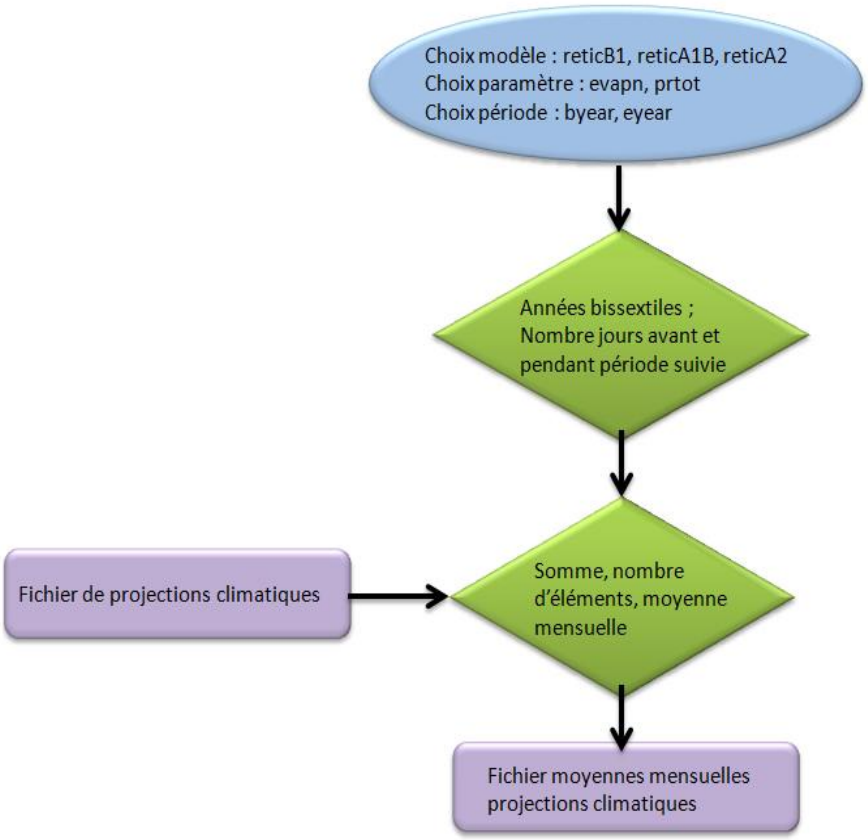


Figure 5.7 Schéma de l'algorithme du script calculant les moyennes mensuelles sur des périodes de 20 ans d'après les projections climatiques du CERFACS

Les données ainsi obtenues ont été générées au format raster pour servir de données d'entrées à un second script python dont l'algorithme est illustré en figure 5.8. Celui-ci retraduit exactement les formules utilisées pour le bilan stationnel de façon à garder la même méthodologie de calcul. Des paramétrages relatifs au scénario choisi et à la période d'intérêt sont à réaliser avant de lancer le programme. Ce script calcule dans un premier temps l'évapotranspiration maximale à partir de l'évapotranspiration potentielle et du coefficient cultural. Puis il va calculer tous les paramètres intermédiaires du bilan hydrique permettant d'obtenir les valeurs du déficit d'évaporation et de la réserve hydrique : excédent et déficit pluviométrique (EP et DP), variation du niveau d'eau dans la réserve des sols (ru1, ru2 et dru) et évapotranspiration réelle (ETR). Ce script enregistre au format raster toutes ces informations, et pas seulement les informations finales attendues (DE et RH), de façon à garder une trace de tous les calculs du bilan hydrique pouvant être utiles à différents profils d'utilisateurs. Tout comme le script précédent, ce script fonctionne pour n'importe laquelle des périodes de référence, à la condition que les moyennes mensuelles pour la période choisie aient bien été calculées avant, et pour les trois scénarios SRES.

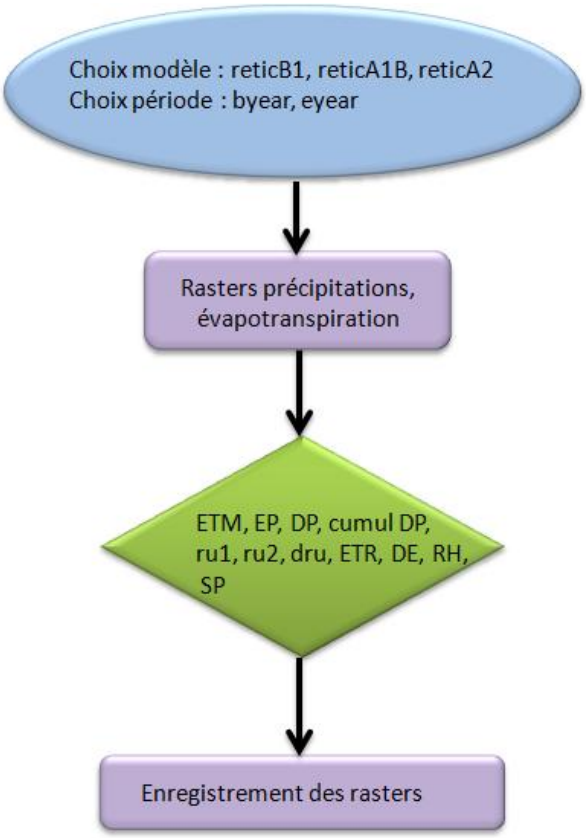


Figure 5.8 Schéma de l'algorithme du script calculant le bilan hydrique à partir des moyennes mensuelles sur des périodes de 20 ans d'après les projections climatiques du CERFACS

5.2.3 Le bilan journalier

Pour le bilan journalier l'approche utilisée est identique au bilan mensuel. Les moyennes journalières ont été calculées pour chacune des périodes de vingt ans. Les valeurs ainsi obtenues pour les précipitations et l'évapotranspiration potentielle ont permis par la suite de calculer le bilan hydrique au pas de temps journalier.

Le bilan journalier nécessite trois étapes préliminaires gérées par trois scripts différents. La première étape consiste en la génération de fichiers .xls journaliers à partir des fichiers .csv regroupant les moyennes journalières de précipitation ou d'évapotranspiration pour les trois scénarios selon les quatre périodes établies. L'algorithme de ce script est présenté par la figure 5.9. De la même façon que pour le bilan mensuel, ces scripts prennent en paramètres d'entrée le scénario et la période voulue. Les périodes choisies doivent être comprises entre 2020 et 2099. L'inscription d'un message à l'écran permet d'avertir l'utilisateur qui cherche à faire tourner le modèle sur une période trop courte, inférieure à 20 ans. Pour autant le script n'est pas arrêté.

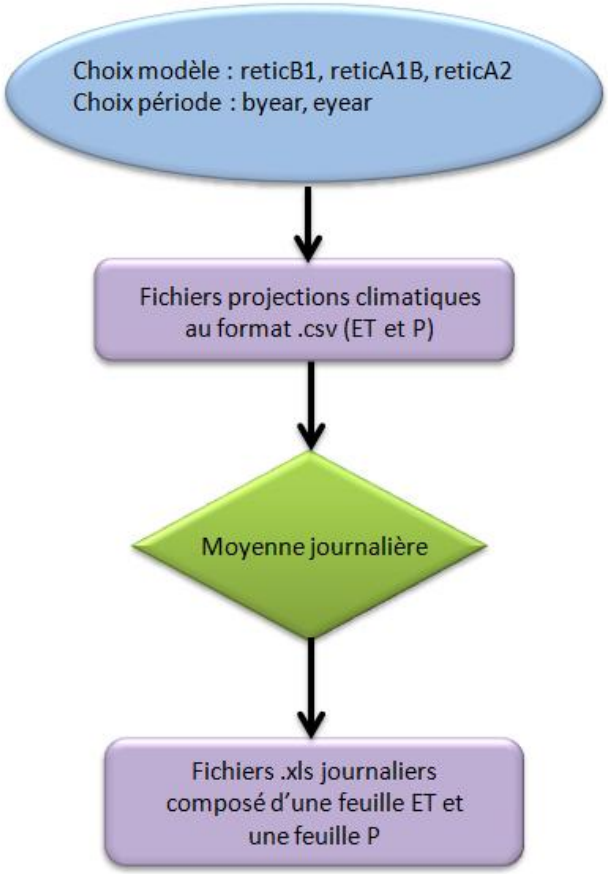


Figure 5.9 Schéma de l'algorithme du script permettant le calcul des moyennes journalières au format .xls à partir du fichier .csv regroupant toutes les données

Ce script extrait la date indiquée en en-tête du fichier .csv pour l'indiquer dans le nom du fichier .xls généré, ainsi qu'en en-tête du fichier, de façon à ce que l'utilisateur ait toujours un moyen de s'assurer de la date de la journée traitée.

Ensuite un second script récupère les données des fichiers .xls pour les transformer en shapefiles. Ce script transforme les informations au format excel contenu dans deux feuilles d'un même fichier au format shapefile. Un troisième script transforme les shapefiles en raster à 1 km à partir d'une interpolation spline. L'algorithme de ce script est présenté par la figure 5.10. Après définition des paramètres d'entrées habituels, le script va créer, à partir des deux shapefiles (pour les deux paramètres climatiques : précipitation et évapotranspiration), des rasters de résolution kilométrique. Il se base sur différents paramètres de l'interpolation par les splines : type « tension » et poids de 5.

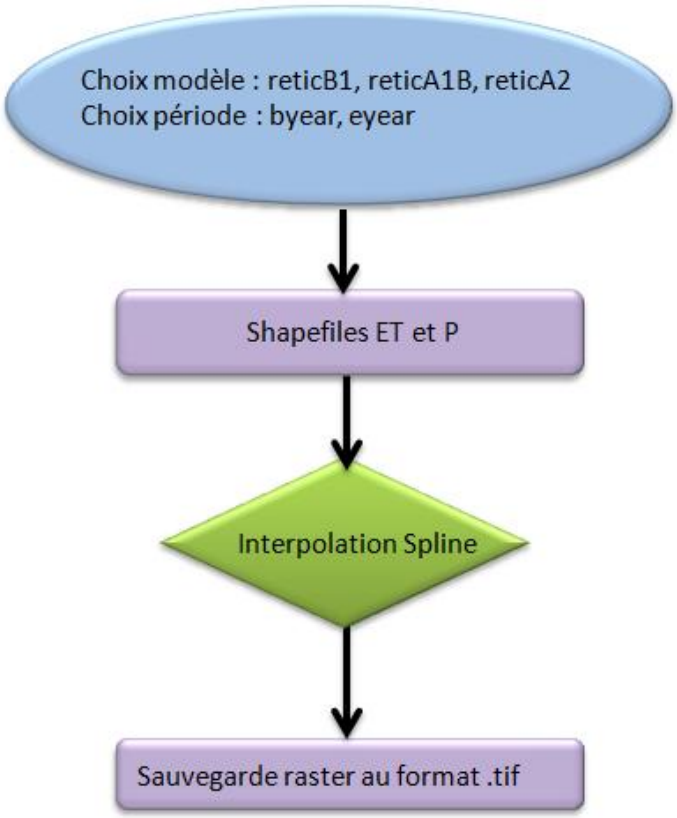


Figure 5.10 Schéma de l'algorithme du script transformant les fichiers .xls journaliers en raster à 1km au format .tif en utilisant l'interpolation spline proposée par ArcGIS

Dès lors le bilan journalier peut tourner à partir d'un quatrième script, sur la même base que le script du bilan mensuel, la seule différence étant la résolution temporelle. Etant donné que le modèle utilisé considère une réserve utile remplie à 100 % au démarrage de la période d'étude, le calcul du bilan journalier commence au 1er mars et se termine au 28 février.

5.2.4 L'apport de la carte pédologique détaillée

Contrairement au bilan hydrique stationnel qui considère la réserve utile comme fixe dans l'espace, le bilan spatialisé intègre la diversité des sols et de leurs réserves. Pour cela on utilise ici la carte de taille des réserves utiles des sols bretons fournie par le Laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest. Cette carte (figure 5.11) a été finalisée au cours du printemps 2011 à la suite d'une campagne de terrain menée sur les quatre départements bretons dans le cadre du programme *Sols de Bretagne*, déclinaison régionale du programme national d'Inventaire, de Gestion et de Conservation des Sols (IGCS). La carte et la base de données sont établies à l'échelle des pédopaysages. Ceux-ci sont des unités paysagères, définis par une combinaison de différents facteurs : nature et organisation de la couverture pédologique, nature et structure géologique, forme du relief dominant ou types de relief associés, végétation naturelle et/ou systèmes culturaux existants (Baize, 2004). La prospection pédologique permet de recueillir une grande quantité d'informations quant à la nature du sol, sa profondeur, la teneur en éléments grossiers et l'humidité. A partir de ces informations les pédologues peuvent établir la taille de la réserve utile du sol, fonction de sa profondeur et de sa capacité à retenir l'eau. La carte de la taille des réserves

utiles met ainsi en évidence la diversité spatiale en Bretagne, dont la valeur médiane est comprise entre 125 et 200 mm, confirmant le choix d'une taille moyenne de 125 mm pour le bilan stationnel. Des sols moins profonds, avec une taille de réserve utile inférieure à 125 mm, sont essentiellement présents dans le Finistère au niveau des Monts d'Arrée. Les sols plus profonds, où la taille de réserve utile est supérieure à 200 mm, se situent au nord du Finistère et des Côtes-d'Armor, ainsi qu'en Ille-et-Vilaine.

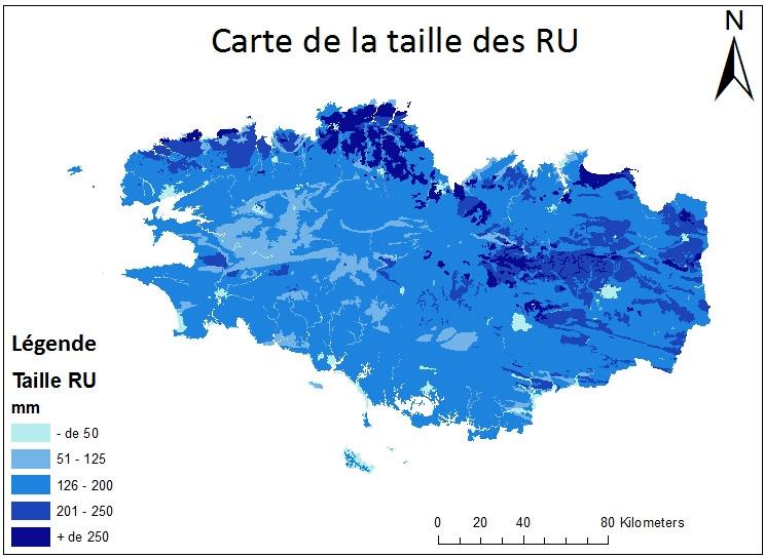


Figure 5.11 Carte de la taille des réserves utiles à l'échelle des pédopaysages, fournie par le laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest

La carte de la taille des réserves utiles initialement au format vecteur a été transformée en raster à la précision de 8 km (figure 5.12). La carte ainsi obtenue à été utilisée pour le bilan hydrique mensuel, tandis que pour le bilan hydrique journalier nous avons transformé la carte d'origine en raster de précision kilométrique. La carte des réserves utiles pour le bilan hydrique journalier a donc un visuel proche de la carte d'origine.

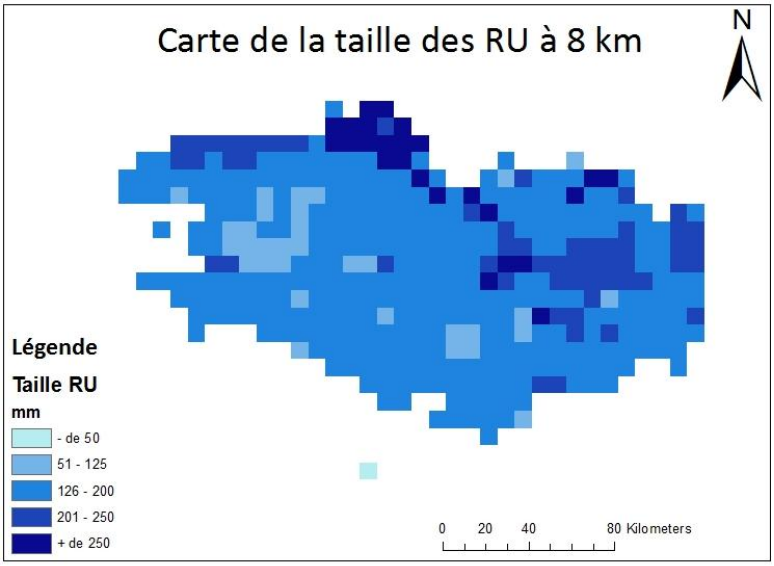


Figure 5.12 Carte de la taille des réserves utiles au format raster à 8km

Cette transformation permet de faire coïncider les données climatiques avec les données pédologiques. Le passage au format raster a pour principale conséquence de simplifier la variation spatiale de l'information présentée. Cependant les grandes structures restent visibles : les sols sont peu profonds dans le Finistère et plus profonds au nord de la région et en Ille-et-Vilaine.

Afin de vérifier l'intérêt d'une telle base de données dans le calcul du bilan hydrique une comparaison basée sur deux méthodologies de calcul différentes a été réalisée. Pour cela une même situation climatique estivale a servi de support à deux bilans hydriques différents. La différence entre les deux bilans ne concerne que la taille des réserves utiles des sols bretons. Dans le premier cas la réserve hydrique est égale à 125 mm sur tout le territoire, ce qui correspond à l'hypothèse de travail retenue pour le bilan hydrique stationnel. Dans le second cas la carte de réserve utile des sols bretons est utilisée. Les résultats de ces deux bilans sont présentés dans la figure 5.13 qui présente, sous la forme d'un tableau, une situation estivale d'une année quelconque de la première moitié du 21ème siècle selon le scénario A1B. La ligne du haut correspond au mois de juin, celle du milieu au mois de juillet et celle du bas au mois d'août. De gauche à droite les colonnes correspondent à l'évapotranspiration moyenne mensuelle, aux précipitations moyennes mensuelles, à la teneur en eau dans les réserves hydriques dans le cas d'une réserve utile de 125 mm et à la teneur en eau dans les réserves hydriques en situation réellement observée par les pédologues. Si l'on considère une taille de réserve utile de 125 mm la seule diversité spatiale observée dépend de la répartition des précipitations et de l'évapotranspiration. De plus, pour la période estivale la variabilité temporelle est très réduite puisque le niveau minimum est très rapidement atteint pour toute la région Bretagne. Inclure la taille réelle des réserves utiles apporte une vision plus nette du comportement de la réserve hydrique à l'échelle spatiale et temporelle. Les cartes de la colonne de droite de la figure 5.13 révèlent une répartition spatiale de la teneur en eau des sols liée aux conditions climatiques et pédologiques. On retrouve en effet les sols profonds possédant une grande réserve utile au nord de la région et les sols moins profonds s'asséchant plus rapidement, au sud. L'évolution temporelle de la réserve hydrique que l'on peut également percevoir ici est plus précise si l'on prend en compte la base de donnée du Laboratoire Science du Sol. En effet, si l'on compare la teneur en eau de la réserve hydrique au mois d'août selon les deux bilans hydriques, la différence de précision de l'information est notable. Contrairement au bilan réalisé avec une RU de 125 mm, le bilan réalisé à partir des observations des pédologues révèle une situation au mois d'août riche en contrastes spatiaux.

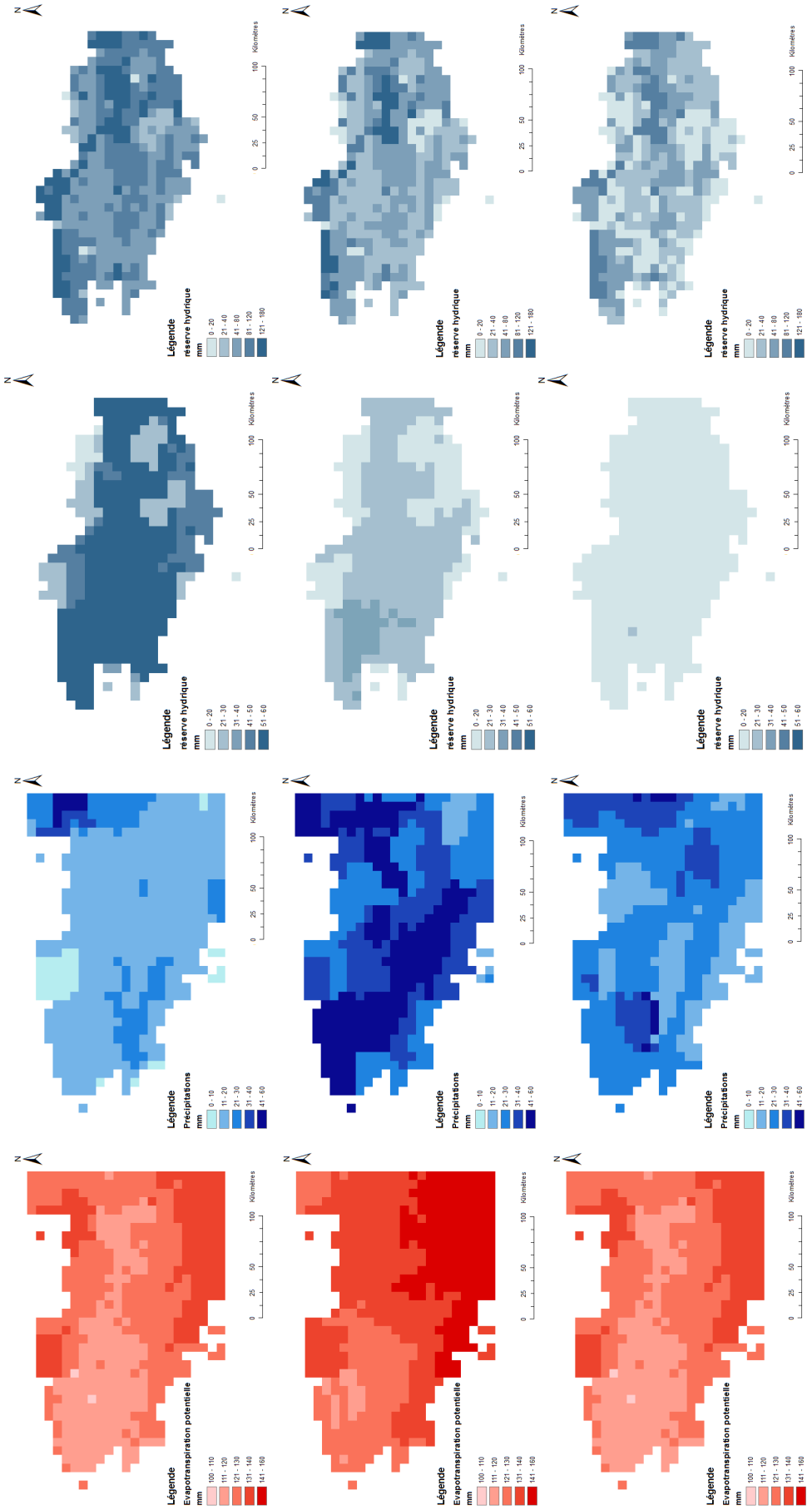


Figure 5.13 Bilan hydrique estival (ligne du haut : juin, milieu : juillet, bas : août) conditionné par l'évapotranspiration potentielle et les précipitations (1ère et 2ème colonnes) dans le cas d'une réserve utile de 125 mm (3ème colonne) ou réelle d'après la carte du Laboratoire Science du Sol (4ème colonne)

5.2.5 L'apport de l'occupation du sol dans un bilan hydrique

Tout comme les données pédologiques relatives à la taille de réserve utile des sols bretons, l'intégration de l'occupation du sol dans le bilan hydrique apporte de plus grands contrastes locaux (figure 5.14). Les sols en prairies ou les sols où la culture légumière prédomine tendent à être plus humides par rapport à l'estimation initiale. Les sols où les fourrages sont majoritaires sont plus humides au début de l'été par rapport à ce qui est estimé par un bilan hydrique ne prenant pas en compte l'occupation du sol. Par contre ils tendent à être plus secs à la fin de l'été du fait des besoins élevés en eau de ce type de végétation.

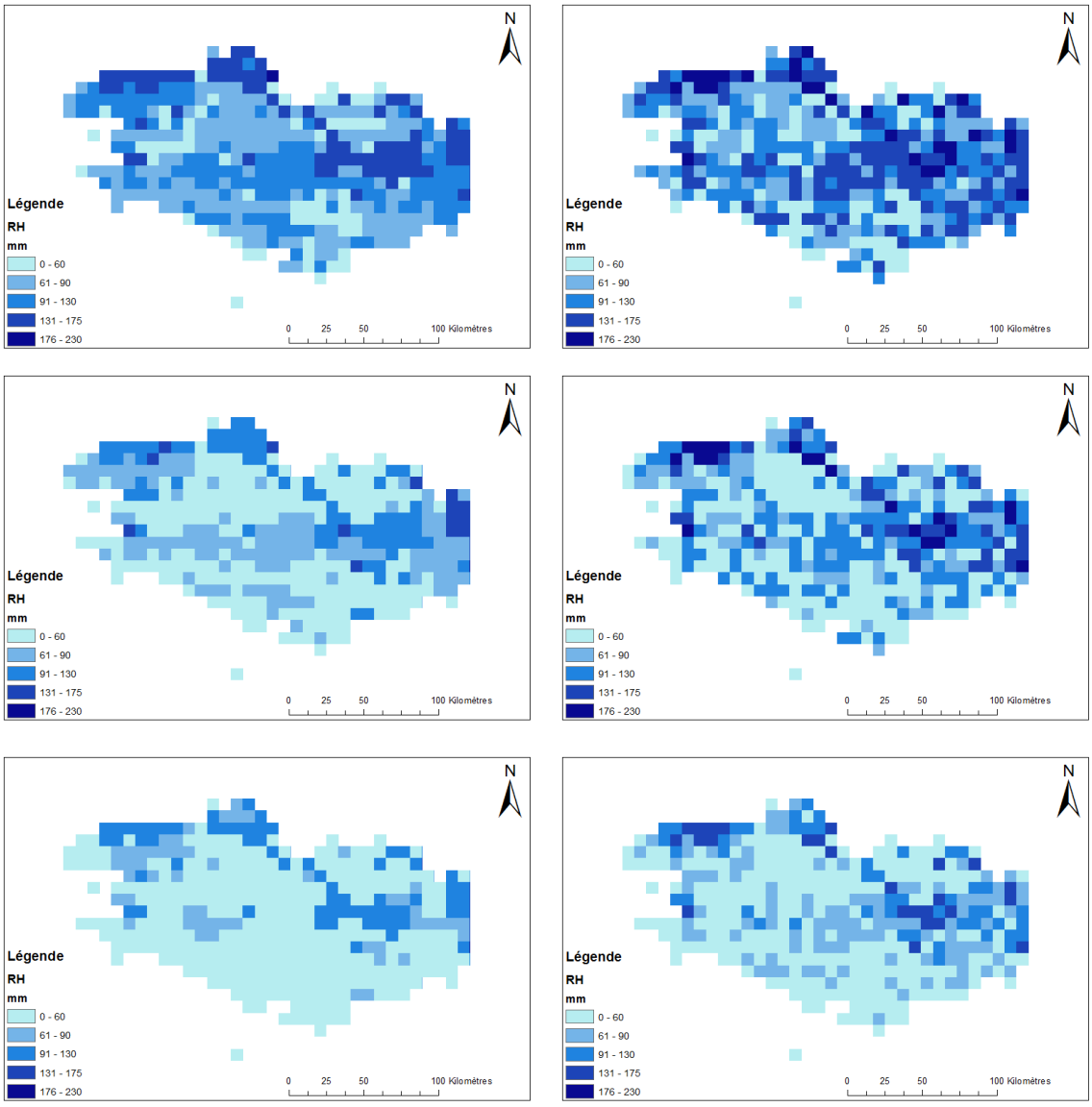


Figure 5.14 Evolution de la réserve hydrique au cours de la période 2020-2040 selon le scénario A1B en prenant en compte l'occupation du sol (colonne de droite) ou non (colonne de gauche) pour les mois de juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), RU variable

5.3 Le paramètre d'intérêt : DE, et un équivalent utilisé par d'autres scientifiques : SWI

Le bilan hydrique utilisé permet de suivre l'évolution de la réserve hydrique au cours du temps à l'échelle du territoire, ainsi que de calculer un paramètre utile pour quantifier l'intensité des épisodes secs : le déficit d'évaporation (DE) (Seck, 1962 ; Krishnaswamy et Muller, 1974 ; Mounier, 1977 ; Mahalakshmi *et al.*, 1987 ; Dubreuil, 1994, 1996 et 1997 ; Grelle *et al.*, 1999 ; Samba et Diop, 2000).

Un autre indice, généré par les services de Météo-France, est également utilisé pour suivre les sécheresses. Le SWI (*Soil Wetness Index*, Indice d'Humidité des Sols) est calculé au sein de la chaîne de traitement SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU), plus précisément par le modèle ISBA (Vidal, 2009 ; Soubeyroux *et al.*, 2011). ISBA considère l'humidité du sol à travers le contenu en eau des trois couches de sol schématisant la structure pédologique. Le contenu en eau est intégré sur la profondeur du sol puis adimensionnalisé par les caractéristiques pédologiques et de végétation de la maille étudiée, afin de calculer le SWI d'après la formule :

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}} \qquad (5)$$

W : contenu en eau intégré sur la profondeur du sol

W_{wilt} : contenu en eau au point de flétrissement

W_{fc} : contenu en eau à la capacité au champ

Il représente ainsi l'humidité des sols, que l'on peut rapprocher de la réserve hydrique obtenue à partir du bilan hydrique que nous utilisons. Une valeur de l'indice d'humidité des sols supérieure à 1 indique une absence de stress hydrique pour la végétation et une valeur de 0 représente un stress hydrique tel que la transpiration de la plante est stoppée (Habets *et al.*, 2008). Il ne montre donc pas la même chose que le déficit d'évaporation. Cependant il est utilisé à même escient pour des études nationales de sécheresses menées par Météo-France, comme c'est le cas avec le programme Climsec (Soubeyroux *et al.*, 2011).

Les résultats du SWI quant au suivi des sécheresses en Bretagne dans le contexte du changement climatique sont ainsi présentés dans le chapitre 8 de la partie 3.

5.4 Effet du CO_2 dans le processus de photosynthèse des végétaux, conséquences pour l'ETP

L'effet du CO_2 sur l'ETP est lié aux processus de photosynthèse qui sont détaillés dans un encart à la suite de ce paragraphe. Le CO_2 étant un élément fondamental de la photosynthèse, elle-même au cœur du métabolisme nutritif des plantes, une augmentation de la disponibilité du CO_2 aura des impacts notables pour la croissance des végétaux et de leur physiologie. Ces tendances

agronomiques liées à la photosynthèse ont un impact sur la consommation de l'eau par les végétaux et donc sur l'intensité de l'évapotranspiration potentielle. La concentration en dioxyde de carbone influence l'ouverture stomatique dont les pores contrôlent les échanges gazeux avec l'atmosphère. Une stomate ouverte permet l'infiltration du CO_2 dans les feuilles rendant ainsi possible la photosynthèse, mais elle crée aussi un chemin pour l'eau des plantes qui est évaporée vers l'atmosphère (Taub, 2010). L'ouverture des stomates n'est cependant pas fixe, elle est régulée par la plante afin de maintenir un taux de photosynthèse important tout en limitant, dans la mesure du possible, les pertes d'eau. L'augmentation du CO_2 atmosphérique permet aux plantes d'avoir un bon taux de photosynthèse tout en restreignant l'ouverture stomatique et donc les pertes d'eau. En effet, une augmentation de la concentration en CO_2 permet d'assurer l'assimilation carbonée par photosynthèse avec une ouverture stomatique, et donc une transpiration, plus faible (Ducharne *et al.*, 2004). Il est ainsi admis par les scientifiques que la conductance stomatique, contrôlée par l'ouverture des stomates, diminue quand la concentration en CO_2 atmosphérique augmente puisque cette ouverture des pores dépend de l'assimilation de carbone par photosynthèse. Pour une concentration en CO_2 importante, l'ouverture stomatique peut être réduite sans pour autant diminuer le flux de CO_2. Cependant cette diminution permet de réduire les pertes en eau par transpiration et a donc pour effet d'augmenter l'efficience d'utilisation de l'eau des plantes (Ducharne *et al.*, 2004). Les travaux d'Ainsworth et Rogers (2007) ont ainsi mis en évidence grâce à des expériences du projet FACE une réduction des pertes d'eau par évapotranspiration de près de 22 %.

A l'instar de cette étude, les effets du CO_2 sur les plantes sont pris en compte dans des études environnementales liées au changement climatique. En France on peut notamment citer les travaux de Nadine Brisson à travers le logiciel STICS, les projets Climator et GICC-Seine. L'effet de l'augmentation du CO_2 sur la photosynthèse a été quantifié à l'aide du modèle STICS (Brisson *et al.*, 2003) qui a permis d'établir des coefficients multiplicateurs à appliquer à l'ETP pour le blé selon divers scénarios SRES (tableau 5.3). Ces coefficients sont généralement inférieurs à 1 puisque l'ETP tend à diminuer avec l'augmentation du CO_2 et ils sont différents pour chacun des scénarios du GIEC puisqu'ils sont caractérisés par des teneurs en CO_2 différentes (Ducharne *et al.*, 2004).

Tableau 5.3 Coefficients multiplicateurs mensuels des perturbations mensuelles de l'ETP par le CO_2, utilisés par les modèles STICS et MODCOU (d'après Ducharne *et al.*, 2004)

CO_2 (ppm)	SRES	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Dec
610	B1	0.99	0.97	0.94	0.92	0.88	0.88	0.90	0.93	0.93	0.93	1.03	1.02
708	A1B	0.99	0.97	0.93	0.88	0.85	0.84	0.88	0.91	0.90	0.90	1.05	1.08
850	A2	0.99	0.96	0.92	0.85	0.82	0.81	0.85	0.88	0.89	0.88	1.02	1.02

L'effet du CO_2 sur la photosynthèse a également pour conséquence d'augmenter la production de matière sèche et donc la croissance de la plante (Riou, 1993 ; Ziska, 2008). Or une augmentation de la croissance entraîne une augmentation des besoins en eau et donc de l'ETP. L'effet positif de

l'augmentation du CO_2 sur la diminution de l'ETP initialement développé dans ce paragraphe est contrecarré par cet effet négatif moins facilement mesurable. Cependant, il est tout de même admis que le bilan hydrique des cultures sera majoritairement pénalisé du fait de précipitations en diminution associées à l'augmentation des températures et du rayonnement (Brisson, 2010).

Il est donc encore délicat à l'heure actuelle de définir clairement les conséquences de l'augmentation du CO_2 avec le changement climatique sur l'évapotranspiration potentielle, surtout pour une région comme la Bretagne où le blé n'est pas majoritaire. C'est pour cela que ce type d'information sera utilisé en tant qu'élément complémentaire permettant de modérer les sorties de modèle présentés dans le chapitre 7 sans faire l'objet de calculs et développements méthodologiques spécifiques.

Place du CO_2 dans la photosynthèse des plantes en C3 et C4

La photosynthèse est un procédé qui a lieu dans les feuilles des végétaux, par lequel les organismes chlorophylliens captent l'énergie lumineuse pour la convertir en énergie chimique. Ce procédé a ainsi pour effet la transformation de l'eau et du dioxyde de carbone en matière organique (1) (Hopkins, 2003). La photosynthèse apporte de l'énergie sous forme chimique à la plante, mais aussi des squelettes de carbone pour les molécules organiques qui composent la structure de la plante. Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène ainsi assimilés par la plante vont engendrer 96 % de la masse sèche totale du végétal (Marschner, 1995).

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O \xrightarrow{\text{Lumière}} C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O \quad (1)$$

La dénomination C3 ou C4 des végétaux fait référence au nombre d'atomes de carbone des molécules fixant le CO_2 dans le végétal. Les plantes en C3 sont les plus communes, elles représentent 90% de la végétation, tandis que les plantes en C4 sont plus spécifiques au domaine tropical (Riou, 1993). Parmi ces dernières on retrouve le maïs, le sucre de canne, le sorgho, etc.

Le CO_2 fixé par les plantes en C4 est absorbé plus efficacement vers les cellules de la gaine fasciculaire, par rapport aux plantes en C3 (figure 5.15). Cela permet de maintenir un rapport élevé entre CO_2 et O_2 à l'endroit où agit Rubisco ainsi que de réutiliser du CO_2, libéré par la photorespiration, dans un nouveau cycle de Calvin (Raven, 2003). Rubisco est le nom simplifié d'une enzyme tenant un rôle clé dans les processus de photosynthèse. Elle permet la fixation du CO_2 dans la biomasse végétale en lien avec l'énergie solaire captée par la chlorophylle. Les plantes en C4 utilisent donc plus efficacement le CO_2 que les plantes en C3. L'ingestion plus importante du CO_2 permet ainsi de diminuer l'activité oxygénase de la Rubisco et d'augmenter le rendement photosynthétique. L'activité oxygénase correspond à la fixation d'une molécule d'oxygène sur une molécule (D-ribulose-1,5-diphosphate) pour former deux nouvelles molécules (3-phospho-D-glycérate et du 2-phosphoglycolate). Les flux de CO_2 utilisés pour la photosynthèse sont deux fois plus importants pour les plantes en C4 que pour les plantes en C3. Cela s'explique par le fait que la photosynthèse des plantes en C4 commence plus tôt que pour les plantes en C3 alors que les stomates sont à peine ouverts et que les concentrations internes sont faibles (Riou, 1993).

Place du CO_2 dans la photosynthèse des plantes en C3 et C4 -suite-

Cependant, l'augmentation du CO_2 a plus d'effets sur la photosynthèse et la croissance des plantes en C3 que sur les plantes en C4 qui réagissent peu ou pas du tout à cette augmentation (Cotrufo *et al.*, 1998 ; Ainsworth et Long, 2005 ; Long *et al.*, 2006).

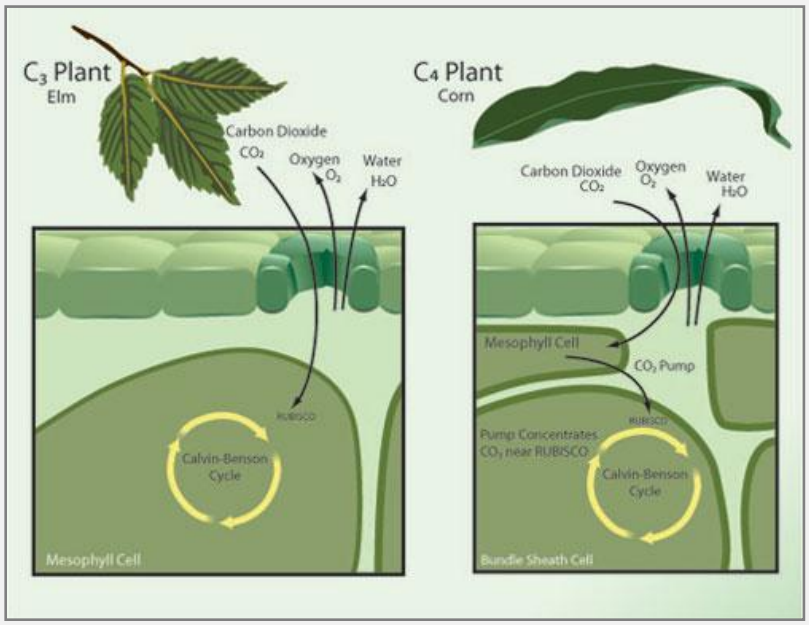


Figure 5.15 Schéma de la photosynthèse pour deux végétaux de type C3 et C4 (Taub, 2010)

Synthèse : Utilisation d'un bilan hydrique à l'échelle régionale

Un bilan hydrique requiert des données de base obligatoires et des données facultatives permettant de l'améliorer. Parmi les données nécessaires il faut considérer les variables climatiques : précipitations et évapotranspiration, qui vont impacter la teneur en eau du sol. Il est donc également nécessaire d'avoir des informations sur la réserve utile des sols. Cette information n'est cependant pas toujours facile à obtenir, quand elle existe, ce qui explique que pour certaines études des valeurs moyennes aient été utilisées (125 mm en Bretagne par exemple). Avoir des valeurs de taille de réserve utile issues d'une campagne de terrain permet d'enrichir le bilan hydrique en l'approchant de la réalité du territoire. L'occupation du sol permet également d'améliorer le bilan hydrique. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle considère l'occupation du sol comme étant un gazon homogène. Ainsi, utiliser des informations réelles d'occupation du sol permet d'avoir un bilan hydrique cernant mieux la végétation de la région étudiée. Cette information est assez facile à obtenir grâce à la base CORINE Land Cover, mais parfois la résolution spatiale peut être limitante et il faut considérer d'autres bases de données.

L'occupation du sol et la taille des réserves utiles impactent le bilan hydrique au niveau du calcul de l'évapotranspiration. L'évapotranspiration potentielle, fournie par Météo-France ou le CERFACS pour cette étude, est dans un premier temps transformée en évapotranspiration maximale par application d'un coefficient cultural, Kc. Puis les valeurs d'ETM sont croisées avec les valeurs de précipitations et de réserve hydrique pour déterminer l'évapotranspiration réelle.

Les bilans hydriques utilisés pour cette étude sont de deux types : stationnel ou spatialisé, mais fonctionnent avec les mêmes formules de calcul. Les différences se font au niveau des jeux de données considérés. Pour le bilan stationnel une réserve utile moyenne de 125 mm et une occupation du sol de type gazon ont été utilisées. Pour le bilan spatialisé on utilise les données réelles d'occupation du sol et de taille de réserve utile. Le bilan spatialisé a été programmé en langage Python, langage utilisé par la suite ArcGIS d'ESRI. Divers scripts ont été codés pour traiter les données et effectuer les calculs du bilan hydrique de manière automatisée pour un pas de temps mensuel et journalier. Le bilan hydrique, tel que modélisé par ces scripts, est évolutif. On peut, par exemple, changer les données climatiques si l'on souhaite considérer un autre scénario, ou même forcer les données climatiques pour tester l'impact de 5 ans de sécheresses intenses sur un territoire. Les données pédologiques et d'occupation du sol peuvent également être contraintes si l'on souhaite calculer un bilan hydrique pour un secteur particulier où l'on connait exactement l'occupation du sol réelle, telle une zone atelier par exemple.

Le bilan hydrique modélisé ici permet de calculer le déficit d'évaporation qui est un paramètre adapté au suivi des sécheresses. Un autre paramètre utilisé par Météo-France, le SWI, est également utile pour suivre l'humidité des sols et s'avère ainsi complémentaire au déficit d'évaporation.

Conclusion de la deuxième partie

L'analyse des sécheresses réalisée pour cette thèse repose sur l'utilisation de sorties de modèles climatiques et d'un bilan hydrique. Les données climatiques proviennent du CERFACS et le bilan hydrique est basé sur des formules utilisées dans des travaux précédents appliqués à la région Bretagne (Dubreuil, 1994).

Les simulations climatiques utilisées ont une résolution de 8 km. Cette finesse de résolution est permise grâce à une régionalisation des données. Les sorties des modèles climatiques globaux sont traitées au CERFACS par une approche statistique de descente d'échelle afin d'avoir des jeux de données plus précis à l'échelle d'un pays. Cette résolution est également adaptée à une analyse territoriale. Les techniques de conception de ces jeux de données ne permettent pas encore de travailler à une résolution plus fine, à l'échelle infrarégionale par exemple. Pour autant il est tout de même possible de traiter les données climatiques afin d'affiner leur résolution. Ce type de traitement a été réalisé sur la base d'une interpolation spline, paramétrée par l'usage du logiciel ArcGIS. Cette technique semble mieux adaptée au jeu de données considéré, dense et régulier, que la méthode du krigeage. En considérant l'environnement proche d'un pixel pour affiner la résolution d'une image, l'interpolation spline permet de mettre en évidence les relations entre le climat, le relief et la distance à la côte. Si cette étape permet d'affiner la résolution spatiale, il faut être conscient qu'elle rajoute un biais sur les données.

Parmi les biais sur les données climatiques on retrouve ceux liés à la conception du jeu de données. C'est notamment le cas lors de l'étape de descente d'échelle, même si la régionalisation des sorties de modèles climatiques est une technique en constante amélioration. En ce qui concerne le jeu de données utilisé ici, une comparaison entre les données observées et modélisées à permis de quantifier ces biais. La régionalisation des données simulées s'appuie sur la base SAFRAN qui regroupe des données dites « hybrides », entre réanalyses et observations. En comparant les tendances moyennes de fin du 20ème siècle de la base SAFRAN et celles réellement observées on a pu se rendre compte d'une différence plus ou moins forte entre les deux jeux de données selon les secteurs considérés en Bretagne. Le littoral semble ainsi moins bien modélisé par les données SAFRAN, par rapport à l'intérieur des terres. Ces biais au niveau de la base SAFRAN ont donc un impact sur la qualité du jeu de données désagrégées fourni par le CERFACS. On a ainsi pu observer des biais systématiques mais modérés au niveau des précipitations et de l'évapotranspiration, entrainant, par conséquent, un biais sur le déficit d'évaporation. Ces biais restent suffisamment faibles, pour que les données puissent être utilisées pour une analyse des sécheresses en Bretagne au cours du 21ème siècle. Les biais liés à l'interpolation spline restent, quant à eux, modérés grâce à l'ancrage des valeurs interpolées en de nombreux points de références.

Le calcul du bilan hydrique utilise ces données climatiques et les fait interagir avec des données relatives à la nature et à l'occupation du sol, afin d'établir le comportement de l'eau à l'interface entre le sol et l'atmosphère. Le bilan hydrique requiert ainsi deux types d'informations obligatoires : les données climatiques et la taille des réserves utiles des sols. Cette dernière n'étant pas toujours disponible, on peut utiliser une valeur moyenne connue du territoire. Ici la comparaison entre le calcul de la réserve hydrique à partir d'une valeur moyenne de R.U. de 125 mm et à partir d'un jeu de données complet fourni par le laboratoire Sciences du Sol a mis en évidence la richesse d'information qui ressort grâce à l'utilisation de valeurs plus proches de la réalité du terrain. Pour rendre le calcul du bilan hydrique encore plus proche de la réalité on peut y rajouter des informations optionnelles, telles que l'occupation du sol. Cette information est, de plus, facile à obtenir grâce à la base CORINE Land Cover, bien que d'autres jeux de données soient parfois mieux adaptés au terrain étudié.

Les bilans spatialisés sont automatisés par des scripts en langage Python pour une utilisation par le logiciel ArcGIS d'ESRI. Ce langage est également utilisé par d'autres logiciels SIG, tels que QGIS par exemple. Ces scripts se basent sur les mêmes formules que les bilans hydriques stationnels, seuls les types de données changent d'un type de bilan hydrique à l'autre. Pour le bilan stationnel on considère une taille de RU de 125 mm et une occupation du sol de type gazon. Le gazon est l'occupation du sol par défaut dans le calcul de l'ETP. En utilisant la base CORINE Land Cover pour le bilan spatialisé on peut calculer le coefficient cultural Kc. Ce coefficient est appliqué à l'ETP et permet d'obtenir l'évapotranspiration maximale (ETM). Puis en croisant l'ETM avec les précipitations et la réserve hydrique on peut calculer l'évapotranspiration réelle, permettant donc de calculer le déficit d'évaporation. Les bilans spatialisés sont codés en Python pour un pas de temps mensuel et journalier. La taille des jeux de données a nécessité une étape préliminaire de calcul de moyennes mensuelles et journalières pour 4 périodes du 21ème siècle. Les scripts ainsi codés permettent de calculer le bilan hydrique de manière évolutive. On peut ainsi considérer divers jeux de données climatiques selon les scénarios que l'on souhaite étudier par exemple. Si les informations climatiques, pédologiques et d'occupation du sol venaient à être modifiées dans les années à venir, du fait de nouvelles campagnes de terrain par exemple, le bilan hydrique pourrait être adapté en utilisant les jeux de données plus récents à la place de ceux obsolètes. Le bilan hydrique ainsi codé peut aussi être utilisé en tant qu'outil d'aide à la décision. Pour des petits secteurs où l'on connait la taille de réserve utile et l'occupation du sol, il est possible d'intégrer ces informations dans le bilan hydrique afin de tester, par exemple, les seules conséquences du climat.

Les résultats du bilan hydrique sont présentés dans les trois chapitres de la partie 3. Parmi les paramètres qui y sont présentés on retrouve la réserve hydrique, qui correspond à l'eau contenue dans les sols. Cette information peut donc être suivie au cours de l'été pour quantifier l'assèchement des sols, mais aussi au cours de l'automne et de l'hiver pour suivre l'efficacité de la recharge hydrique des sols. On s'intéresse également au déficit d'évaporation qui traduit le stress hydrique de la végétation et est donc adapté au suivi des sécheresses. On retrouve d'autres indices de sécheresse dans la littérature, notamment, en France, le SWI, qui est un indice d'humidité des sols utilisé par Météo-France. Ce paramètre présente un point de vue complémentaire du déficit d'évaporation.

PARTIE 3

Du climat passé au climat futur : évolution de la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne et ses conséquences pour l'agriculture

SOMMAIRE

Chapitre 6 - Fréquence et intensité des sécheresses au 20ème siècle **141**

Chapitre 7 - Evolution de la fréquence et de l'intensité des sécheresses au cours du 21ème siècle **159**

Chapitre 8 - Suivi des sécheresses selon deux indices, et de leurs conséquences sur l'agriculture **195**

Introduction de la troisième partie

Cette troisième partie présente les résultats du bilan hydrique selon diverses approches et pour différentes périodes. On suit ainsi les sécheresses depuis la fin du 19ème siècle (chapitre 6) jusqu'au 21ème siècle à partir de projections climatiques (chapitres 7 et 8). Les épisodes secs sont analysés au regard de différentes variables telles que le déficit d'évaporation et l'évolution de la réserve hydrique : assèchement des sols l'été et recharge durant l'automne et l'hiver.

Le chapitre 6 s'intéresse ainsi à la situation passée et actuelle en termes de sécheresses en Bretagne. Pour cela on commence par une présentation des différents climats de la région à partir de bilans hydriques sur trois périodes différentes : 1891-1930, 1951-1980, 1981-2010. Ensuite on étudie le comportement des sécheresses sur plus de 100 ans sur quelques stations bretonnes. Pour cela on s'intéresse au déficit d'évaporation ainsi qu'à la réserve hydrique. Ces deux informations, complémentaires, permettent de cerner au mieux les particularités des sécheresses.

Le chapitre 7 présente les évolutions attendues des sécheresses dans le contexte du changement climatique. Ce chapitre commence par une présentation des incertitudes et biais méthodologiques devant être pris en compte dans l'interprétation des résultats. Les résultats du bilan hydrique mensuel sont ensuite détaillés. Ils permettent une première approche sur l'intensité des épisodes secs et leur répartition régionale. La résolution des données de ce bilan est de 8 km. Afin d'avoir une résolution spatiale plus fine, les résultats d'un second bilan hydrique sont présentés dans une seconde partie. Ces résultats ont une résolution spatiale kilométrique et une résolution temporelle journalière. Ainsi ils permettent d'avoir une vision plus fine de l'aléa sécheresse à l'échelle du territoire.

Le chapitre 8 propose deux approches différentes du suivi des sécheresses et de leurs caractéristiques. Les informations présentées dans ce chapitre se trouvent être complémentaires de l'analyse effectuée dans le chapitre 7. On retrouve ainsi, dans une première partie, une comparaison entre le déficit d'évaporation et un autre indice utilisé pour caractériser les sécheresses. Cet indice, le SWI (*Soil Wetness Index* pour indice d'humidité des sols), est utilisé à Météo-France pour caractériser les sécheresses à l'échelle nationale et régionale. Réaliser cette comparaison a donc pour objectif de s'assurer de la complémentarité des indices, de voir s'ils proposent les mêmes évolutions au cours du 21ème siècle. Dans un second temps ce chapitre présente l'effet de plusieurs types de végétation sur le comportement de l'eau dans les sols. L'approche suivie dans cette partie consiste en la comparaison de l'impact d'une occupation du sol sur la réserve hydrique, pour un secteur pédologiquement et climatiquement homogène. L'objectif de cette étude est d'aborder une approche plus agronomique de la sécheresse. Les simulations sur le 21ème siècle se basent sur des projections climatiques sans évolution de l'occupation du sol. Ainsi, étudier plus précisément l'impact d'un changement d'occupation du sol permet d'enrichir les différentes analyses effectuées dans le cadre de cette thèse.

CHAPITRE 6

FREQUENCE ET INTENSITE DES SECHERESSES AU 20EME SIECLE

Sommaire

Introduction....142

6.1 Caractéristiques climatiques de 5 stations bretonnes au cours du 20ème siècle....142

6.1.1 Situation moyenne du début du 20ème siècle....142

6.1.2 Situation moyenne de la fin du 20ème siècle....144

6.2 130 ans de suivi des sécheresses....148

6.2.1 Rennes et Brest : deux tendances régionales....148

6.2.2 Evolution du déficit d'évaporation pour 7 stations bretonnes....150

6.3 Variabilité spatio-temporelle de la réserve hydrique....153

6.4 Fréquence et intensité des sécheresses pour 7 stations....155

Synthèse : Caractéristiques des sécheresses en Bretagne au 20ème siècle....158

Introduction

Dans ce chapitre il est question de suivre les sécheresses au 20ème siècle afin d'établir les caractéristiques passées et actuelles des épisodes secs. Cela permet une comparaison avec les évolutions prévues au cours du 21ème siècle. Pour cela, cinq approches complémentaires du suivi des sécheresses sont abordées ici.

- Les situations moyennes pour 5 stations bretonnes sont présentées dans un premier temps. Cela permet d'avoir une vision la plus exhaustive possible en ce qui concerne les caractéristiques climatiques du début et de la fin du 20ème siècle, sur des périodes de trente ans.
- Cet aspect est par la suite complété par un suivi en continu sur 130 ans pour deux séries homogénéisées représentatives de deux tendances régionales fortes : Rennes et Brest. Ce suivi repose sur le calcul d'un bilan hydrique représentant l'intensité des sécheresses à partir du paramètre de déficit d'évaporation.
- Ensuite on s'intéresse aux variations du déficit d'évaporation pour 7 stations bretonnes au cours du 20ème siècle, afin de percevoir d'éventuelles différences spatiales. Cela permet de mettre en évidence les années de grande sécheresse, ce qui confirme l'utilité d'un tel paramètre pour étudier ces épisodes secs.
- Par la suite, les variabilités spatio-temporelles de la réserve hydrique sont présentées. Ces informations permettent de mettre en évidence l'assèchement et la recharge des sols au cours d'une année moyenne.
- Les derniers résultats présentés dans ce chapitre concernent le suivi des sécheresses sur tout le 20ème siècle pour 7 stations bretonnes. Cela est réalisé à partir de 2 graphiques en damier qui présentent l'évolution de la fréquence et de l'intensité des épisodes secs pour ces stations.

6.1 Caractéristiques climatiques de 5 stations bretonnes au cours du 20ème siècle

Pour suivre les sécheresses au 20ème siècle on compare ici les moyennes entre deux périodes du début et de la fin du 20ème siècle. L'objectif est de percevoir comment les sécheresses ont évolué en termes de fréquence et d'intensité jusqu'au début du 21ème siècle où le changement climatique commence à prendre de l'ampleur.

6.1.1 Situation moyenne du début du 20ème siècle

Les diagrammes ombrothermiques des stations de Brest, Rennes, Dinard et Lorient au début du 20ème siècle (figure 6.1) illustrent bien le climat océanique de la Bretagne. Ils ont été obtenus à partir des données climatiques recensées par Sanson (1944) sur la période 1891-1930. Ces données ont été contrôlées à partir de séries homogénéisées.

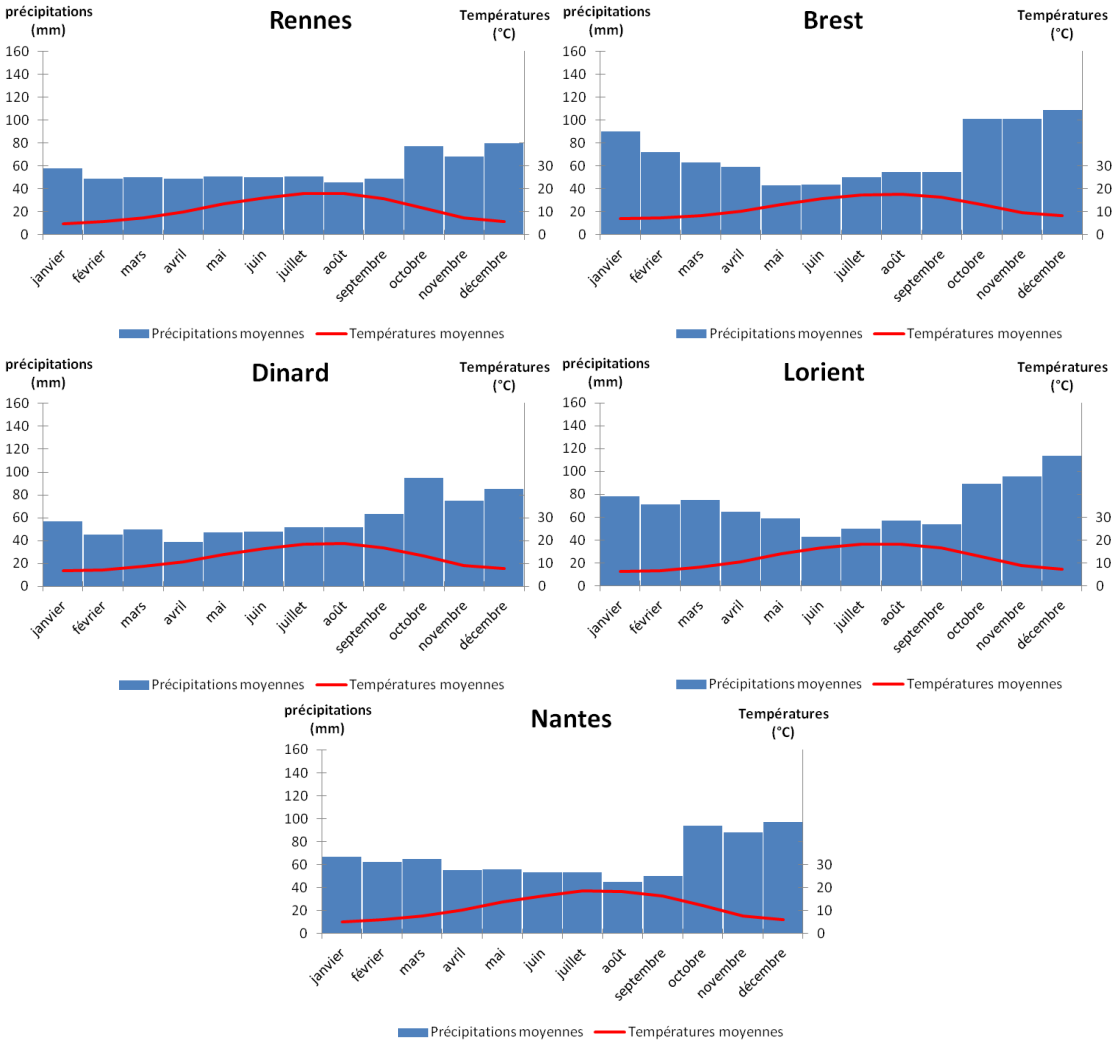


Figure 6.1 Diagrammes ombrothermiques de Rennes, Brest, Dinard (constitué des précipitations de Dinard et des températures de St Malo), Lorient et Nantes pour la période 1891-1930 (source : Sanson, 1944)

L'absence de températures relevées à Dinard sur la période 1891-1930 nous a conduit à utiliser celles observées à Saint-Malo, station très proche de celle de Dinard par le passé. Les températures varient de 6°C en hiver à 18°C en été et les précipitations mensuelles, toujours supérieures à 40 mm, sont plus importantes à la fin de l'automne et au début de l'hiver, autour de 100 mm. A la fin de l'hiver et au printemps les précipitations sont de 80 mm environ, mais toujours supérieures aux précipitations estivales où les moyennes sont de 50 mm. Les diagrammes ombrothermiques de Rennes, Nantes (Pays-de-la-Loire) et Dinard sont légèrement différents de ceux de Brest et de Lorient au niveau de la répartition du régime pluviométrique. En effet, on a des précipitations mensuelles voisines de 80 mm pour Rennes, 90 mm pour Nantes et Dinard, à la fin de l'automne et au début de l'hiver ; le reste de l'année elles oscillent autour de 50 mm. Les variations pluviométriques mensuelles de la fin de l'hiver et du printemps sont plus marquées à Dinard qu'à Nantes et Rennes. Du point de vue thermique les variations annuelles de températures sont similaires à celles observées à Brest et Lorient. Les mois les plus chauds, juillet et août, sont caractérisés par des températures comprises entre 17 et 18,5°C. Le mois le plus froid, janvier, présente des températures moyennes allant de 4,8°C à Rennes à 7,2°C à Brest, en passant par 6,4°C à Lorient.

En comparaison du climat de la deuxième moitié du 20ème siècle, le climat de la Bretagne au tournant du 19ème et du 20ème siècle présentait des automnes particulièrement pluvieux, par rapport à des hivers sensiblement moins arrosés. Ces variations climatiques observées en France semblent corrélées à l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) jusque dans les années 1970, conduisant à des précipitations plus élevées que sur les périodes précédentes (Massei *et al.*, 2007 ; Massei *et al.*, 2010 ; Fritier *et al.*, 2012).

6.1.2 Situation moyenne de la fin du 20ème siècle

Une seconde période d'intérêt, 1981-2010, est étudiée ici toujours à partir de diagrammes ombrothermiques (figure 6.2). Ils permettent d'illustrer les tendances plus récentes du climat où le changement climatique est franchement amorcé pour les villes de Brest, Lorient, Dinard, Rennes et Nantes. Les stations de Météo-France utilisées ici sont les mêmes que pour la période 1891-1930, cependant certaines stations ont pu être déplacées sur des distances plus ou moins grandes au cours du siècle. Un changement dans la répartition mensuelle des précipitations est notable, mais est plus ou moins important selon les stations. A Dinard et Nantes la répartition des pluies sur l'année ressemble d'avantage à la période 1891-1930 qu'à la seconde moitié du 20ème siècle (cf. chapitre 1). A Dinard les pluies moyennes mensuelles sont relativement stables de la fin de l'hiver à l'été, avec une valeur de 50 mm, la fin de l'automne et l'hiver étant plus humide avec une moyenne mensuelle de 70 mm environ. Le diagramme de Nantes révèle une évolution par paliers, avec 40 mm l'été, 60 mm au printemps et 80 mm à l'automne et l'hiver. A Lorient, la situation change peu par rapport au passé récent (cf. chapitre 1). Les pluies sont plus importantes l'hiver avec des moyennes mensuelles supérieures à 100 mm, elles diminuent progressivement au printemps pour atteindre 50 mm en moyenne en été. A Rennes les pluies moyennes mensuelles varient autour de 60 mm environ. Les plus fortes moyennes, de l'ordre de 60 mm, s'observent en automne, au début de l'hiver et en mai. Le mois d'août est le plus sec de l'année avec 30 mm en moyenne de précipitations. Le reste de l'année, la hauteur des pluies mensuelles varie autour de 50 mm. A Brest les pluies atteignent 120 à 140 mm à la fin de l'automne et au début de l'hiver ; au printemps elles diminuent pour avoisiner les 100 mm ; l'été elles sont de l'ordre de 60 mm par mois.

Cette différence de répartition des précipitations a pour principale conséquence l'apparition d'une légère période sèche à Rennes, définie par des précipitations inférieures à deux fois la température. C'est également le cas pour Nantes où les précipitations ne sont plus que faiblement supérieures au double de la température. Pour Brest, Lorient et Dinard, la situation ne change pas par rapport au passé récent, les précipitations moyennes mensuelles sont toujours franchement supérieures au double de la température. On peut également s'intéresser à l'évolution du nombre de mois subsecs entre ces deux périodes. Ceux-ci sont définis par des précipitations inférieures à trois fois la température d'après les normes des cartes climatiques détaillées. Pour les stations de Brest et Lorient le nombre de mois subsecs ne varie pas entre la période 1951-1980 et 1981-2010, avec respectivement 0 et 1 mois. Pour les stations de Rennes, Dinard et Nantes on observe un mois subsec supplémentaire au cours de la période 1981-2010, par rapport à la période 1951-1980 (cf. chapitre 1). A Rennes et Nantes on passe ainsi de 2 à 3 mois subsecs, et à Dinard de 1 à 2

mois subsecs. Ainsi Rennes et Nantes se distinguent également des stations de Bretagne occidentale par leur évolution climatique récente, qui révèle une sensibilité accrue aux sécheresses estivales, caractéristique déjà bien connue dans les régions du sud du bassin Parisien et du Centre-Ouest de la France (pays de la Loire, Poitou-Charentes : Moisselin *et al.*, 2002 ; Dubreuil *et al.*, 2012 ; Planchon et Bonnardot, 2012). La relative faiblesse des précipitations, l'effet d'abri aggravant la sensibilité aux sécheresses, est une contrainte climatique que le bassin de Rennes partage déjà avec le val de Loire (Anjou en particulier : Quénol *et al.*, 2008b).

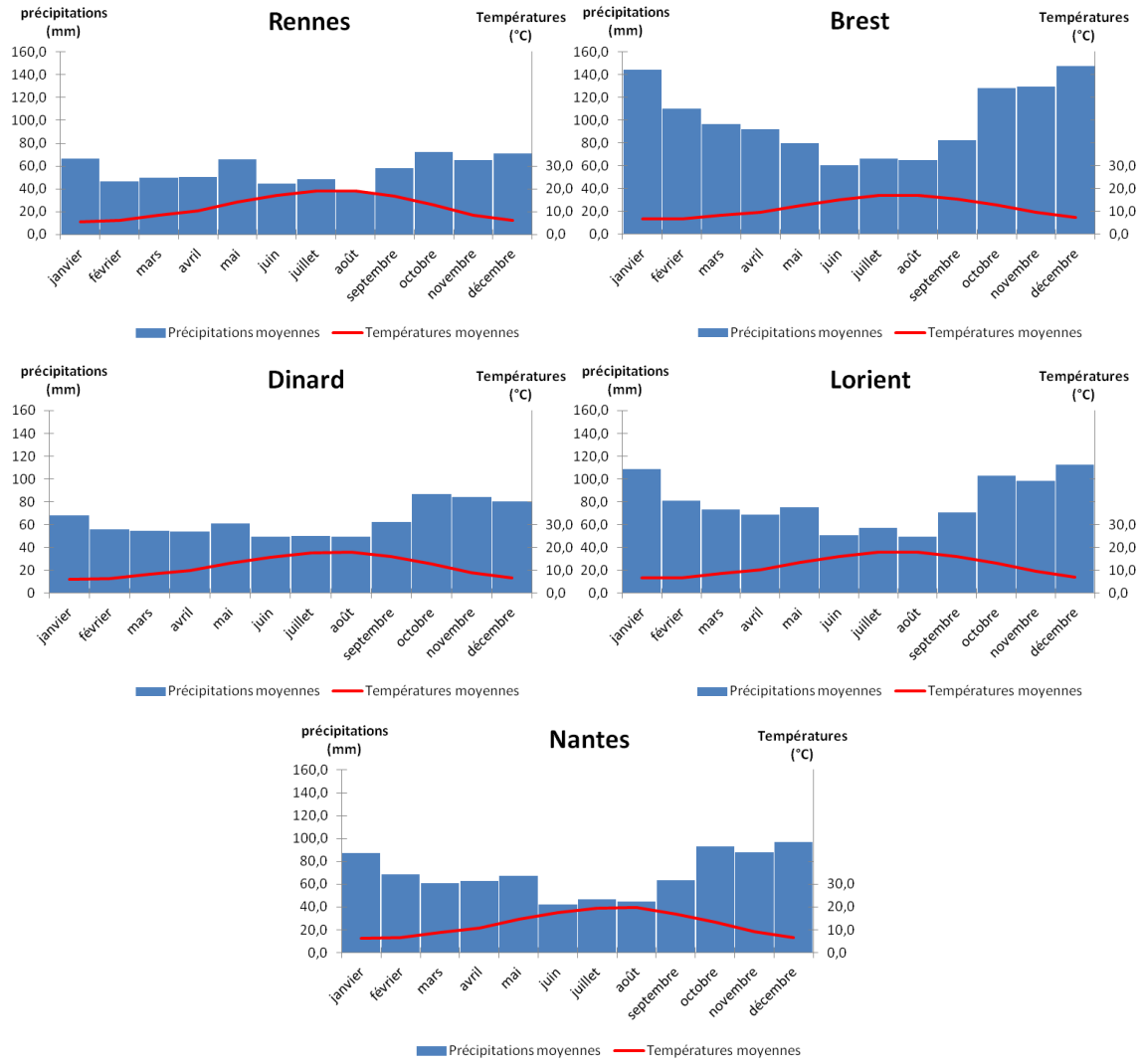


Figure 6.2 Diagrammes ombrothermiques de Rennes, Brest, Lorient, Dinard et Nantes, pour la période 1981-2010 (source : Météo-France)

Le tableau 6.1 permet, par un calcul des écarts des précipitations entre les périodes 1951-1980 et 1981-2010, de visualiser clairement les différences de répartitions des pluies en pourcentage au cours de l'année, avant et après le « tournant » des années 1980. Les cases grisées représentent les mois où il pleuvait plus durant la première période. Ainsi, à Rennes, la fin de l'automne et le début de l'hiver commencent à être moins pluvieux depuis les années 1980, avec une perte cumulée de -9 % de novembre à février. A Dinard la situation est relativement similaire à celle de Rennes mais les mois d'été restent un peu plus humides qu'à Rennes. A Brest, seuls trois mois

(août, septembre et novembre) présentent un déficit pluviométrique par rapport au climat observé sur la période 1951-1980. A Lorient, l'été, l'automne et l'hiver sont moins pluvieux que sur la période 1951-1980. Le printemps et les mois de juillet, octobre et janvier tendent, à l'inverse, à être plus humides depuis les années 1980. A Nantes l'été est plus sec depuis les années 1980, suivi par une saison automnale plus humide. La fin de l'hiver, marquée par une diminution des précipitations depuis les années 1980, précède un printemps plus humide. Ces tendances ont également été observées dans le cadre du programme CLIMASTER (Dubreuil *et al.*, 2012). Finalement, cela se traduit par une augmentation du total annuel des précipitations de 3 à 4,5 % environ depuis les années 1980 à Rennes, Nantes et Lorient, tandis qu'à Brest et Dinard on note une augmentation de 7 et 6 % respectivement. Si les tendances annuelles des stations présentées ne sont pas significatives, certaines tendances mensuelles le sont.

Tableau 6.1 Synthèse des écarts de précipitations mensuelles (en %) pour les cinq stations (période 1981-2010 - période 1951-1980)

	Rennes	Brest	Lorient	Dinard	Nantes
janvier	+9,7	+10,1	+10,2	+1,9	+3,7
février	-17,7	+2,4	-8,7	-7,2	-0,4
mars	+0,2	+0,6	-4,3	+3,7	-6,0
avril	+19,0	+32,2	+33,1	+16,4	+35,8
mai	+29,0	+14,1	+20,4	+6,3	+20,7
juin	-2,5	+5,9	-1,5	+0,7	-10,5
juillet	+28,3	+29,0	+31,3	+16,0	-3,1
août	-30,8	-9,8	-21,4	-3,8	-21,9
septembre	+8,6	-6,0	-14,5	+1,8	-12,8
octobre	+23,9	+24,9	+30,7	+30,3	+28,2
novembre	-10,8	-2,8	-2,7	-0,6	-2,2
décembre	+9,9	+1,6	-0,9	+9,4	+10,7
total	+4,5	+7,0	+4,0	+6,1	+3,3

Le bilan de l'eau est aussi étroitement connecté à la température. De fait, l'observation de l'évolution des températures entre la période 1981-2010 et 1951-1980 (tableau 6.2) nous apporte des informations utiles pour l'analyse de l'aléa sécheresse. A partir des 5 stations : Rennes, Brest, Lorient, Dinard et Nantes, on remarque dans un premier temps que les écarts de températures sont positifs pour chacune des stations et pour tous les mois. Ce qui signifie que les moyennes thermiques mensuelles ont augmenté sur les dernières décennies du 20ème siècle. Cette augmentation est particulièrement importante sur la période printanière et estivale avec un écart cumulé de mai à août de 4,6 et 4,5°C respectivement à Rennes et Nantes. A Lorient l'augmentation de la température estivale est de 4,3°C. A Brest et Dinard on note une augmentation plus modérée que pour les autres stations, mais qui atteint tout de même 4°C

environ. Une étude plus générale sur le grand ouest, réalisée dans le cadre du programme CLIMASTER, a mis en évidence des tendances similaires (Dubreuil *et al.*, 2012).

Tableau 6.2 Synthèse des écarts de températures mensuelles (en °C) pour les cinq stations (période 1981-2010 - période 1951-1980)

	Rennes	Brest	Lorient	Dinard	Nantes
janvier	+ 0,7	+ 0,7	+ 1,0	+ 0,9	+ 1,0
février	+ 0,5	+ 0,6	+ 0,6	+ 0,5	+ 0,5
mars	+ 0,9	+ 1,0	+ 0,9	+ 0,9	+ 0,9
avril	+ 0,7	+ 0,7	+ 0,6	+ 0,6	+ 0,6
mai	+ 1,1	+ 1,1	+ 1,2	+ 0,9	+ 1,1
juin	+ 1,1	+ 0,9	+ 1,0	+ 0,9	+ 1,0
juillet	+ 1,1	+ 1,1	+ 1,0	+ 1,1	+ 1,0
août	+ 1,3	+ 0,9	+ 1,1	+ 1,0	+ 1,4
septembre	+ 0,9	+ 0,6	+ 0,7	+ 0,6	+ 0,6
octobre	+ 0,9	+ 0,4	+ 0,6	+ 0,6	+ 0,8
novembre	+ 0,5	+ 0,7	+ 0,7	+ 0,7	+ 0,9
décembre	+ 0,3	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,2	+ 0,5
moyenne	+ 0,83	+ 0,74	+ 0,81	+ 0,74	+ 0,86

Ces tendances permettent de déceler les disparités régionales probablement associées aux premières manifestations du changement climatique à l'échelle du territoire breton. Les stations les plus méridionales comme Lorient et Nantes sont légèrement plus arrosées depuis les années 1980 du fait de mois d'avril, mai et octobre plus humide. Pour autant l'été est caractérisé par une nette diminution des pluies et une augmentation des températures importante. Les stations littorales de Brest et Dinard, situées sur les façades Ouest et Nord de la Bretagne, connaissent une augmentation assez importante des températures durant l'été ainsi qu'une diminution des précipitations pour seulement trois mois de l'année (contre quatre mois à Rennes, localisée plus à l'intérieur des terres). Les précipitations ont augmenté partout au printemps, notamment en avril et mai. Ces résultats sont en accord avec d'autres observations effectuées sur l'ensemble de l'Europe de l'Ouest (Planchon, 2005, Dubreuil *et al.*, 2012).

Quelques évolutions sensibles ont été mises en évidence grâce aux relevés effectués à la station météorologique de Rennes Saint Jacques. Ces observations ont permis d'identifier une augmentation du nombre de jours où la température est supérieure à 25°C, avec 40 jours actuellement contre une petite trentaine dans les années 1940. Les observations ont également mis en évidence une diminution du nombre de jours de gel de l'ordre de la dizaine depuis les années 1950, où on connaissait en moyenne une cinquantaine de jours de gel (Planchon *et al.*, 2009 ; Dubreuil *et al.*, 2012). On observe, à l'échelle régionale, un changement dans le régime des

précipitations qui semble être une manifestation du changement climatique. Les pluies diminuent en été et augmentent en hiver. A l'échelle de la Bretagne on retrouvera toujours les gradients climatiques liés à l'océan ou au relief, mais ceux-ci pourront varier en intensité.

Les observations climatiques ainsi présentées mettent en évidence une évolution du climat au cours du 20ème siècle, notamment par rapport à la répartition mensuelle des précipitations.

6.2 130 ans de suivi des sécheresses

Afin d'aller plus loin dans l'analyse de ces tendances, un bilan hydrique a été calculé pour suivre le déficit d'évaporation depuis les années 1880. Peu de stations météorologiques ouvertes dans les années 1880 sont encore en fonctionnement. Ici on présente dans un premier temps deux tendances climatiques régionales avec les stations de Brest (figure 6.3) et Rennes (figure 6.4), pour ensuite chercher à affiner ces résultats en s'intéressant à sept stations, essentiellement littorales, qui sont en fonctionnement depuis la fin du 19ème siècle. Les données nécessaires au calcul de l'ETP Penman n'étant pas disponibles sur toute cette période, on a calculé ici l'ETP à partir de la formule de Turc. Pour cela l'insolation a été estimée par régression linéaire basée sur les températures (Dubreuil et Planchon, 2009), avec R^2=0,85 pour la série de Rennes.

6.2.1 Rennes et Brest : deux tendances régionales

Au 20ème siècle les techniques de mesure ont évolué et certaines stations ont été déplacées. Il est donc nécessaire d'homogénéiser les différents paramètres afin de corriger le signal d'une série des effets non climatiques. Ainsi, nous avons choisi de suivre deux stations bretonnes majeures pour lesquelles des données homogénéisées étaient disponibles. Ces données ont été fournies par J.-M. Moisselin (Météo-France). L'intérêt de ce choix pour les stations de Rennes St Jacques et Brest réside également dans les tendances climatiques différentes de ces deux stations. La série de Brest étant plus représentative des stations du littoral nord et ouest de la Bretagne et la série de Rennes représentant plutôt les stations de l'intérieur des terres et de l'est de la région.

La chronique de Brest (figure 6.3) est révélatrice d'une tendance de plus en plus marquée de l'assèchement estival. On voit en effet une augmentation au cours du 20ème siècle du nombre de mois caractérisés par un déficit hydrique (couleur bleu clair à rouge). Au début du 20ème siècle la durée de la période sèche est de 5,4 mois en moyenne, contre 6,0 à la fin du siècle.

Ce graphique en damier met également en évidence une augmentation de l'intensité des épisodes secs. Ceci se voit notamment avec la présence de 3 mois qualifiés d'aride sur la seconde moitié du 20ème siècle, alors qu'aucun n'est décelé sur la première moitié. On peut également remarquer sur les décennies 1980 et 1990 un remplissage des réserves hydriques moins efficace sur la période automnale et hivernale. Ce remplissage incomplet des réserves hydriques tend à augmenter la durée et l'intensité des épisodes secs. On peut aussi voir les effets à Brest des grandes sécheresses passées. En 1921 par exemple on voit une saison sèche débutant dès le mois de février et se prolongeant jusqu'en octobre. En 1989 la sécheresse est rapidement intense du fait d'un remplissage incomplet des réserves hydriques durant l'hiver précédent. Par contre la sécheresse de 1976 n'apparaît pas comme exceptionnelle à Brest.

Brest

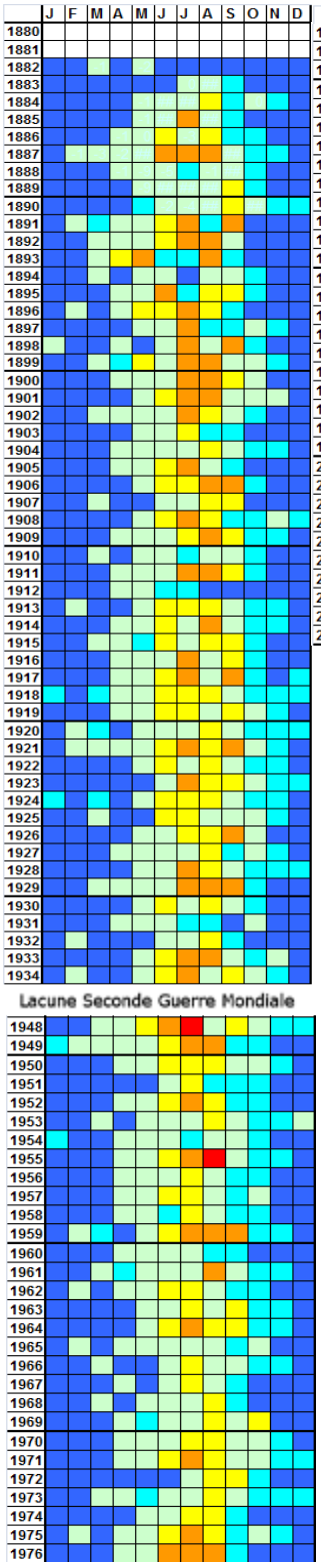


Figure 6.3 Suivi du DE mensuel de 1882 à 2009 pour la série homogénéisée de Brest dans le cas d'une RU de 125 mm (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, bleu clair : faible déficit P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm)

Rennes St Jacques

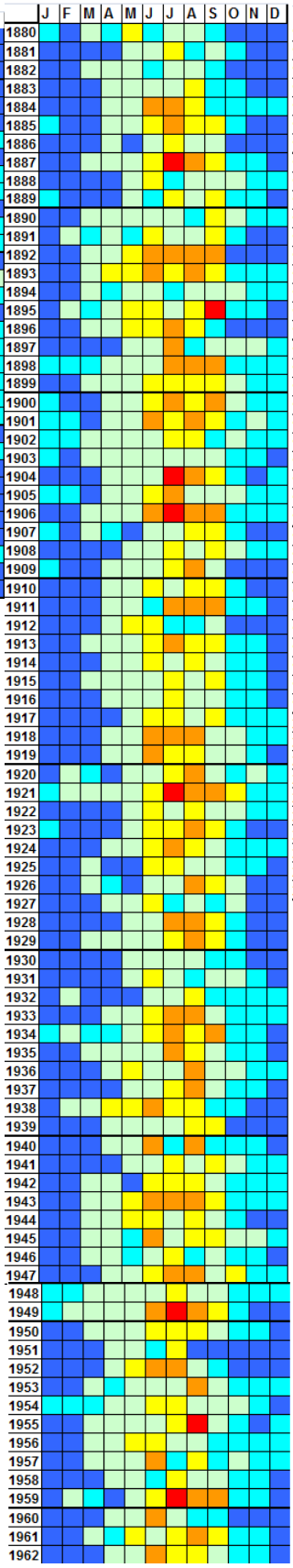


Figure 6.4 Suivi du DE mensuel de 1880 à 2009 pour la série homogénéisée de Rennes dans le cas d'une RU de 125 mm (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, bleu clair : faible déficit P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm)

La série homogénéisée de Rennes peut être étudiée grâce aux graphiques en damier de la figure 6.4. On perçoit dans un premier temps que le climat rennais est plus sec que celui de Brest, puisque l'on dénombre quatre fois plus de mois arides à Rennes. De même la recharge automnale est globalement moins efficace qu'à Brest.

En termes de durée de saison sèche aucune tendance nette ne se dégage. On passe en effet d'une moyenne de 5,8 mois au début du siècle, à 5,6 mois à la fin. On note également une légère diminution de l'intensité des épisodes secs puisque l'on passe d'un déficit d'évaporation moyen annuel de 174 mm au début du siècle contre 155 mm sur la seconde moitié du 20ème siècle.

Comme pour la série de Brest, ce graphique met en évidence les années de sécheresse matérialisées par des étés secs et une recharge hivernale peu efficace. C'est le cas des années 1921, 1949, 1959, 1976, 1989, 2003 et 2005.

Les graphiques en damier présentant l'évolution du DE mensuel à Brest et Rennes attestent donc de deux tendances climatiques majeures en Bretagne. La série de Brest, bien que connaissant un climat plus humide que Rennes, connait tout de même des épisodes secs réguliers. De plus, on observe une tendance à l'assèchement au cours du siècle pour les deux stations.

6.2.2 Evolution du déficit d'évaporation pour 7 stations bretonnes

Le choix des stations présentées ici s'est basé sur la période de fonctionnement qui devait démarrer dans les années 1900, au plus tard, et être encore en cours. Les longues séries requises pour cette analyse proviennent de deux sources : la publithèque de Météo-France et les bulletins mensuels de l'Office National Météorologique de France (Mestre, 2000). Bien que certains sémaphores et certaines stations aient été en fonctionnement assez tôt au XIXème siècle, les données climatiques observées ne sont pas systématiquement référencées dans la base de données numérique de Météo-France. De ce fait, les séries climatiques provenant de la publithèque ont la plupart du temps été comblées manuellement grâce aux bulletins mensuels. Ce comblement des lacunes n'a pas toujours pu être fait à partir des mêmes stations. C'est notamment le cas de la station de Groix, où les données d'une station voisine ont été utilisées. Dans les cas où une autre station a été récupérée, celle-ci a été choisie de manière à être la plus proche géographiquement et climatiquement de la première station.

Cependant, le fait d'utiliser des données issues de plusieurs stations, même très proches, entraîne des écarts aux valeurs réellement observées qui ne peuvent être déterminés rigoureusement du fait du manque de valeurs observées dans les bases de données. Afin de limiter au maximum ces écarts à la réalité une homogénéisation des données a été effectuée. Cette technique a également été utilisée pour faire face aux ruptures dans les séries de données liée à un changement de matériel par exemple. L'homogénéisation effectuée ici repose sur une régression linéaire (Mestre, 2000) réalisée sur une période de 30 ans où les données sont les plus rigoureuses. L'équation de la droite de régression ainsi obtenue est appliquée à toute la période étudiée, depuis les années 1880 jusqu'à 2009 comme proposé par Dubreuil et Planchon (2009). Les différentes séries climatiques étudiées ont également été comparées à la série de Rennes qui était déjà homogénéisée (Moisselin *et al.*, 2002) et a donc servi de référence.

A partir de ces données climatiques anciennes le déficit d'évaporation a été calculé afin de suivre l'intensité et la fréquence des épisodes secs en Bretagne. Tous les résultats présentés ici ont été obtenus sur la base d'une réserve utile identique pour toutes les stations de 125 mm, l'occupation du sol est considérée de type gazon et l'ETP est calculée à partir de la formule de Turc, nécessitant une estimation de l'insolation. Ainsi la figure 6.5 montre le DE annuel pour sept stations bretonnes et la figure 6.6 le DE au mois d'août. Chacun des graphiques présentés est composé de 2 courbes : en violet les observations annuelles et en bleu la moyenne mobile sur 5 ans et d'une droite, rouge, de tendance. A la fin du 19ème siècle l'essentiel du réseau météorologique était composé de sémaphores, ce qui explique l'abondance de stations côtières présentées ici par rapport aux stations intérieures.

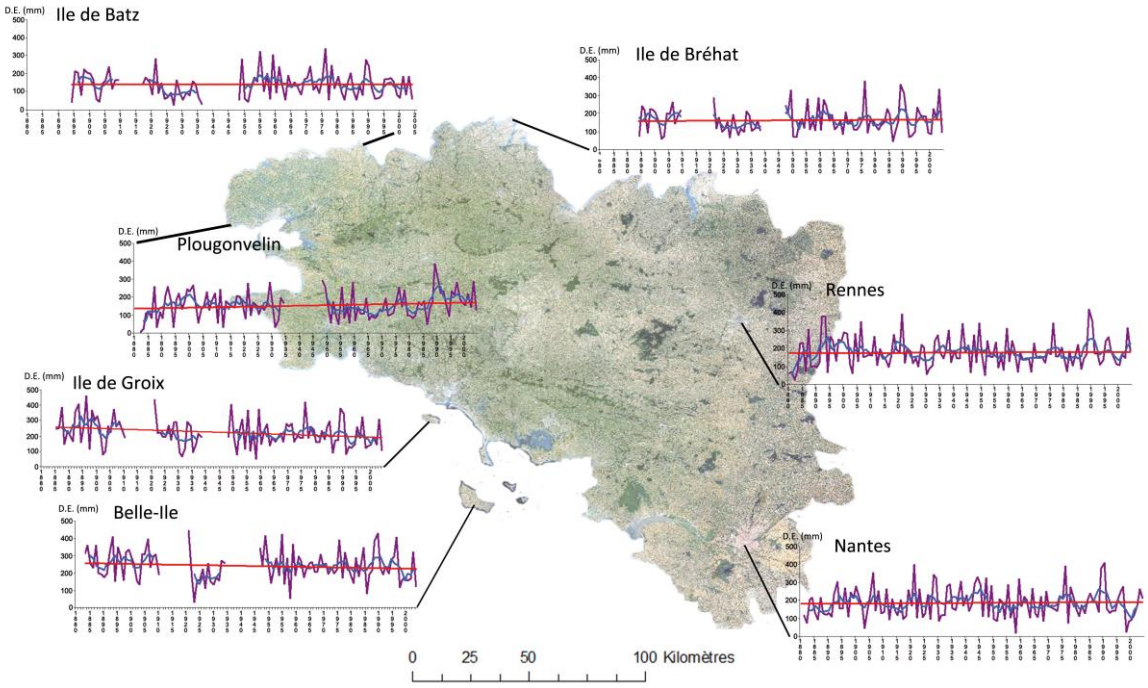


Figure 6.5 Evolution du déficit d'évaporation annuel pour 7 stations bretonnes (Ile-de-Batz, Bréhat, Belle-Ile, Groix, Nantes, Plougonvelin et Rennes) depuis 1880 jusqu'à 2009

A l'échelle du territoire on ne remarque pas de tendance d'évolution du déficit d'évaporation au cours du 20ème siècle. Cependant, la variabilité interannuelle de cet indice met en évidence des années de plus ou moins grande sécheresse, ce qui permet d'apprécier la fréquence et l'intensité de ces évènements sur plusieurs points du territoire. La figure 6.5 révèle des moyennes de déficit d'évaporation autour de 200 mm pour les stations de Rennes, Groix et Nantes. La station de Plougonvelin, où le DE augmente nettement au cours du siècle, présente une grande variabilité avec un DE moyen de 150 mm entre 1880 et 1935, puis de 200 mm environ à partir des années 1990, entrecoupé d'une période moins sèche dans les années 1970-80. Cette grande variabilité n'est pas observée sur tout le territoire puisque les stations de Groix et Nantes, par exemple, présentent une variabilité interannuelle qui augmente à partir des années 1980. Au nord du territoire, le déficit d'évaporation moyen est plus faible, variant principalement entre 150 et 200 mm pour les stations de Bréhat et de l'Ile-de-Batz. A l'extrême sud, le déficit moyen est d'environ 250 mm à Belle-Ile, confirmant ainsi que les sécheresses les plus intenses s'observent au sud et à l'est du territoire breton. Les pics de déficit d'évaporation visibles sur ces graphiques mettent en

évidence les années de grandes sécheresses vécues en Bretagne. La sécheresse de 1921 apparait à Groix et Belle-Ile (déficit d'évaporation supérieur à 430 mm), à Nantes et Rennes (DE = 400 mm) ainsi qu' à Plougonvelin (DE = 280 mm). En 1976 et 1989 le déficit d'évaporation, bien que plus faible, atteint le même ordre de grandeur qu'en 1921 pour Groix, Nantes, Rennes, Plougonvelin et Belle-Ile. La station de Bréhat, peu impactée par la sécheresse de 1921, présente des valeurs de déficit supérieures à 350 mm pour les sécheresses de 1976 et 1989. La sécheresse de 1949 est quant à elle visible, à travers l'indice de déficit d'évaporation, seulement sur le littoral.

La figure 6.6, qui montre le déficit d'évaporation au mois d'août pour les mêmes stations que la figure 6.5, permet de compléter cette interprétation.

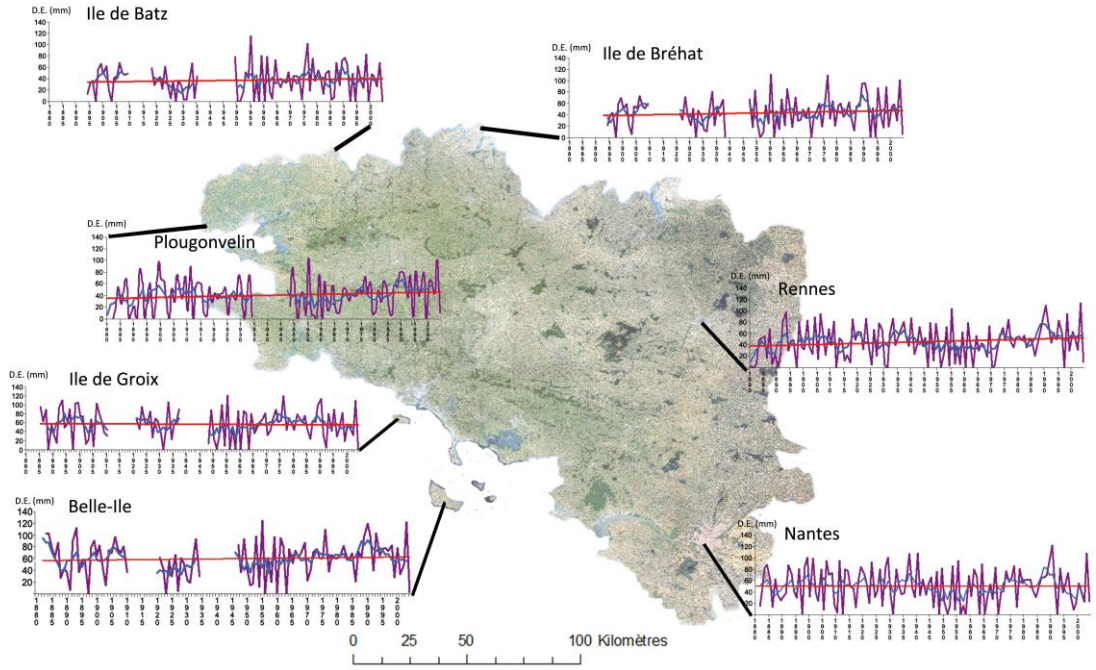


Figure 6.6 Evolution du déficit d'évaporation au mois d'août pour 7 stations bretonnes (Ile-de-Batz, Bréhat, Belle-Ile, Groix, Nantes, Plougonvelin et Rennes) depuis 1880 jusqu'à 2009

Pour la période estivale, contrairement au pas de temps annuel, la droite de tendance montre une augmentation notable du déficit d'évaporation au cours du 20ème siècle, sur tout le territoire, sauf pour la station de l'Ile de Groix. Quelques années de grandes sécheresses sont également visibles avec les variations annuelles. La sécheresse de 1955 est visible sur les graphiques de toutes les stations sauf Nantes, dans des intensités variables. La sécheresse de 1976 ressort plus nettement sur les stations littorales, bien que tout le territoire ait été touché. La sécheresse de 1989 est visible sur les chroniques de 4 stations sur les 7 : Belle-Ile, Nantes, Rennes et Bréhat. Celle de 2003 apparait sur les graphiques de toutes les stations sauf celui de l'Ile-de-Batz.

Le comportement du déficit d'évaporation est lié aux paramètres climatiques (précipitations et évapotranspiration) et pédologiques (réserve hydrique des sols). Il est donc intéressant de suivre également l'évolution temporelle des réserves en eau des sols afin d'apporter des informations complémentaires, utiles pour le suivi de l'évolution des sécheresses.

6.3 Variabilité spatio-temporelle de la réserve hydrique

La variabilité de la réserve hydrique permet d'avoir une vision complémentaire au suivi du déficit d'évaporation. Le déficit d'évaporation correspondant à un manque de disponibilité de l'eau dans le système sol - atmosphère, il est intéressant de suivre le comportement hydrique des sols pour cerner la période d'apparition du déficit d'évaporation et de son évolution.

La variabilité temporelle de la réserve hydrique peut être appréciée par la figure 6.7 qui présente l'évolution de la réserve hydrique à Rennes pour toutes les années de la période 1880-2009. Les tendances majeures, mises en évidence par la médiane et les quintiles de la série, montrent une diminution de la réserve hydrique progressive commençant entre février et avril, pour atteindre le minimum en août ou septembre. La période de recharge qui fait suite à la phase d'assèchement des sols, est rapide. En l'espace de trois mois environ les sols sont rechargés, ce qui correspond à la période d'octobre à décembre.

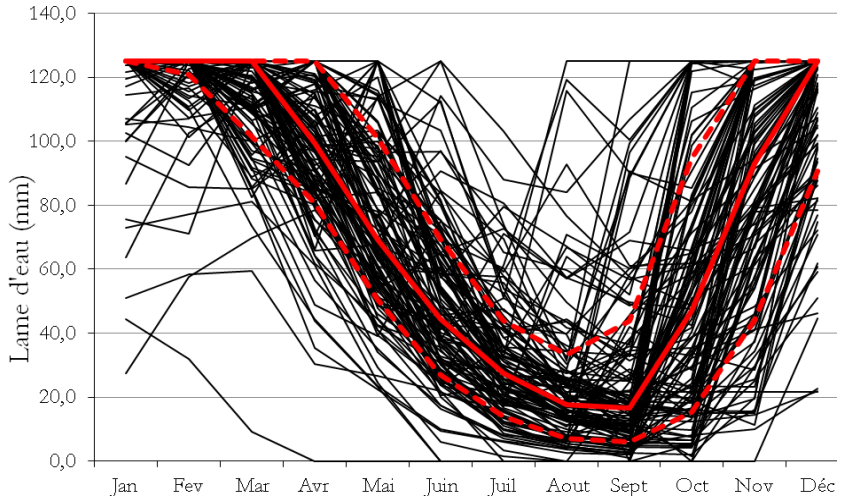


Figure 6.7 Evolution de la réserve hydrique (avec RU = 125 mm) à Rennes sur la période 1880-2009 (noir : courbes annuelles, rouge courbe continue : médiane, rouge courbe discontinue : quintiles supérieur et inférieur)

En complément du suivi de la variabilité temporelle, la figure 6.8 permet de visualiser la variabilité spatio-temporelle de la réserve hydrique. Sur cette figure sont présentées les médianes de sept stations : Rennes, Nantes, Belle-Ile, Bréhat, Plougonvelin, Ile-de-Batz et Groix obtenues pour la période 1880-2009 de la même façon que présenté précédemment pour la station de Rennes. On voit ainsi que le comportement médian de toutes les stations étudiées correspond à une amorce de l'utilisation de la réserve hydrique en mars, la réserve atteint son minimum en août ou septembre. Pour les stations de l'Ile-de-Batz et Plougonvelin (superposées la plupart du temps sur le graphique), ce n'est qu'en avril que se développe véritablement le déficit. De plus, la phase de recharge des réserves est plus précoce que pour les autres stations de Bretagne. Alors que la recharge est généralement complète en décembre en Bretagne, dans le cas d'une réserve utile fixe à 125 mm, les réserves hydriques des stations de Batz et Plougonvelin sont complètement remplies dès le mois de novembre. Le niveau le plus bas de la réserve en eau des sols est supérieur à 25 mm pour les stations de Batz et Plougonvelin, mais peut atteindre des valeurs inférieures à 20 mm pour les stations situées plus au sud (Belle-Ile et Nantes).

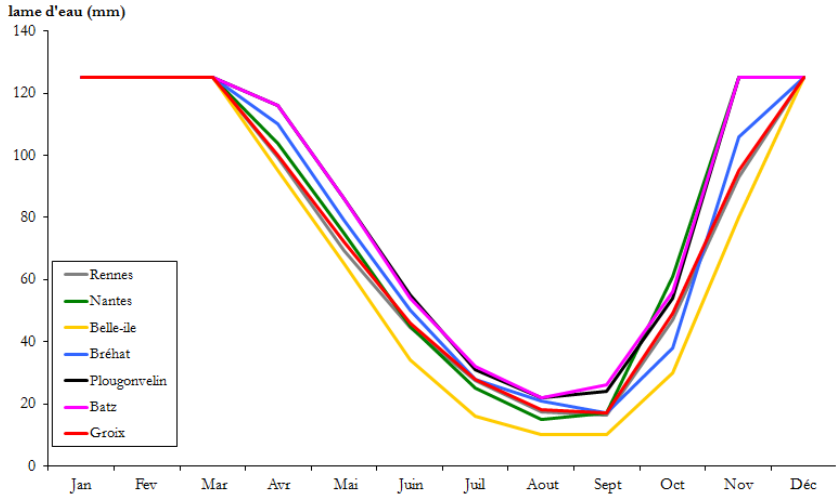


Figure 6.8 Evolution de la réserve hydrique (médiane) pour 7 stations bretonnes (Ile-de-Batz, Bréhat, Belle-Ile, Groix, Nantes, Plougonvelin et Rennes), sur la base d'une taille de réserve utile de 125 mm, pour la période 1880-2009

Ces résultats montrent ainsi qu'en moyenne en Bretagne la végétation est amenée à puiser l'eau des sols pour assurer sa croissance à partir des mois de mars et avril. Or, de juin à septembre les précipitations et la teneur hydrique des sols sont trop faibles pour fournir la quantité d'eau suffisante à la végétation, dont les besoins croissent avec l'augmentation de la température. Même si le point de flétrissement n'est pas atteint (RH > 0 mm), les plantes ont du mal à capter l'eau contenue dans les sols lorsque ce niveau est bas (Carrega, 1987). La figure 6.9 montre ainsi les différences de disponibilité de l'eau des sols que l'on peut distinguer au sein de la réserve utile. La frontière entre la réserve facilement utilisable (RFU) et celle difficilement utilisable (RDU) varie selon les plantes et la profondeur de leurs racines (Rieul et Ruelle, 2003). Généralement la RFU est considérée comme correspondant à la moitié de la réserve utile (Rieul et Ruelle, 2003). On peut donc raisonnablement considérer que lorsqu'il reste 15 % d'eau dans la réserve utile, la plante peine à bénéficier de l'humidité restant dans les sols. Ainsi on estimera par la suite qu'en-dessous de 18 mm de réserve hydrique (soit 15 % d'une RU de 125 mm), la végétation présente un déficit hydrique.

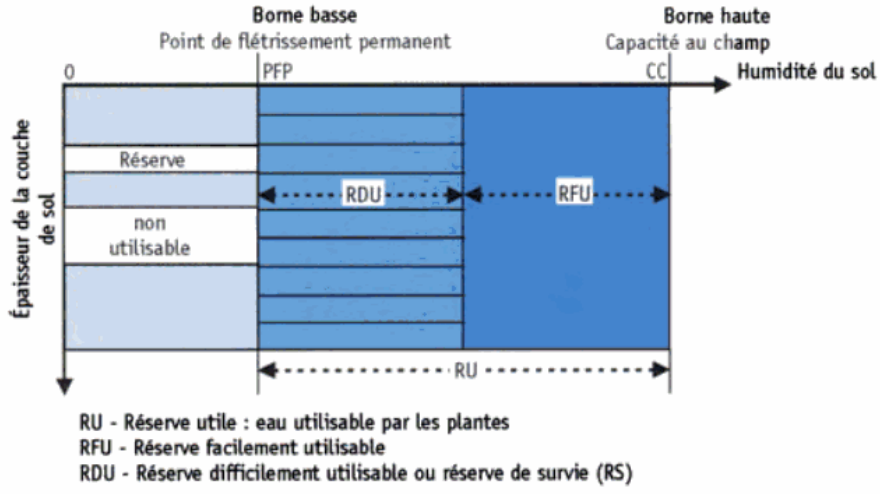


Figure 6.9 Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes (Rieul et Ruelle, 2003)

6.4 Fréquence et intensité des sécheresses pour 7 stations

Pour suivre la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne on utilise ici les sept mêmes stations que précédemment, pour lesquelles on calcule la réserve hydrique mensuelle depuis 1880 jusqu'à 2009, dans le cas d'une réserve utile de 125 mm. La figure 6.10 présente le niveau d'eau minimal par an et par station dans la réserve hydrique à travers un graphique en damiers. Les seuils retenus sont 5, 15, 30 et 50 mm. Il a été établi précédemment qu'en-dessous de 18 mm on se trouve dans la tranche difficilement utilisable de la réserve utile, ce qui entraîne l'apparition d'un épisode sec. Ainsi au-delà de 30 mm on considère ici qu'il y a assez d'eau pour subvenir aux besoins de la végétation. En-dessous de 30 mm on parle d'épisodes secs d'intensité variable. Les sécheresses de 1921, 1949, 1959, 1976, 1989, 1990 et 2003 ressortent ainsi nettement pour la majorité des stations. Les épisodes de sécheresses sont plus fréquents pour les stations de Belle-Ile, Groix, Rennes et Nantes.

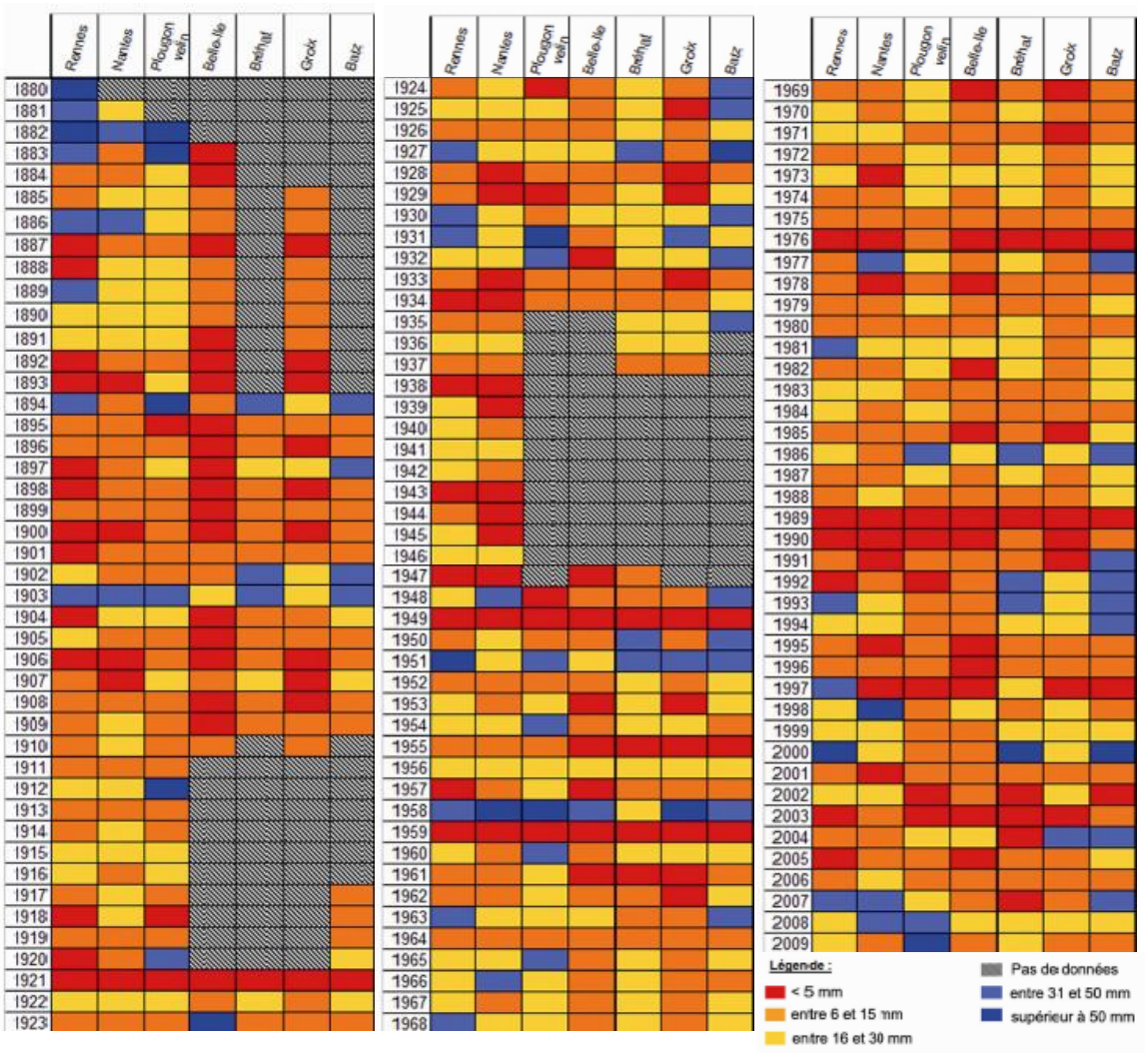


Figure 6.10 Niveau d'eau minimal de la réserve hydrique par an et par station de 1880 à 2009

La figure 6.11 présente le nombre de mois pour chaque année de la période 1880-2009 où le niveau d'eau minimal dans la réserve hydrique est inférieur à 18 mm (soit 15 % de la RU), pour les 7 stations bretonnes étudiées, dans l'hypothèse d'une réserve utile de 125 mm et d'une occupation du sol de type gazon. Sous ce seuil la végétation se trouve vulnérable à l'apparition d'un épisode sec. Ce graphique met ainsi en évidence les épisodes secs de longue durée par des couleurs chaudes (jaune : 3 mois sous le seuil de 18 mm d'eau dans la réserve hydrique ; orangé : 4 à 6 mois ; rouge : plus de 6 mois). Les sécheresses de 1 à 2 mois sont représentées par un camaïeu de bleu. Cette représentation met ainsi en évidence les sécheresses de longue durée qui ont eu lieu en 1900, 1906, 1921, 1989, 1996, 2003 et 2005. Les stations de Belle-Ile et de Groix connaissent des épisodes secs de longue durée plus fréquents que les stations de Plougonvelin et Batz.

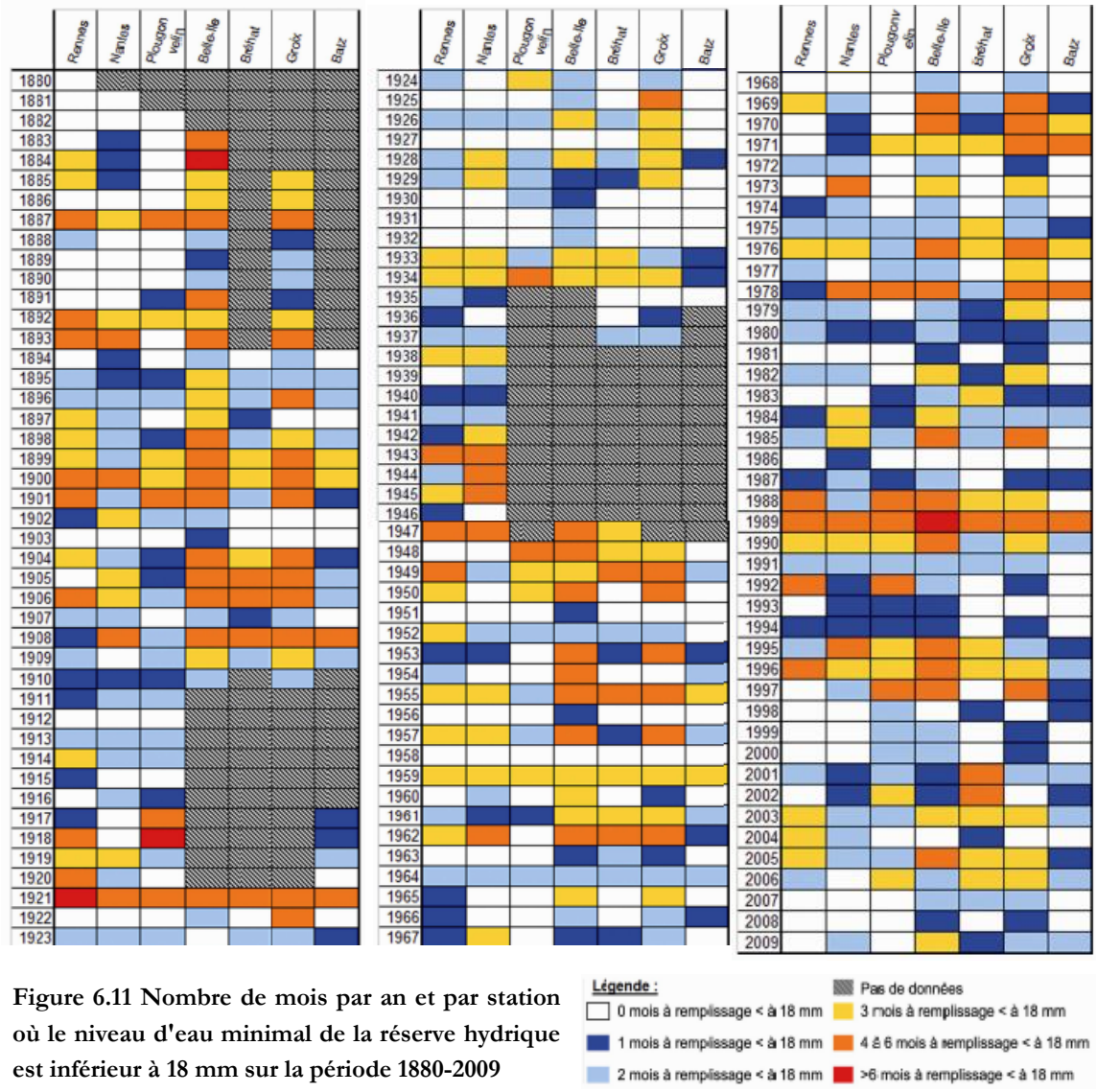


Figure 6.11 Nombre de mois par an et par station où le niveau d'eau minimal de la réserve hydrique est inférieur à 18 mm sur la période 1880-2009

Des épisodes secs de durée comprise entre 4 et 6 mois surviennent avec des fréquences variables selon les stations. On dénombre ainsi une fréquence de 5 % à Batz et 10 % à Plougonvelin et Bréhat, contre 26 et 30 % pour les stations de Groix et de Belle-Ile. Des périodes d'épisodes secs de 4 à 6 mois, au sein desquels on aurait donc une réserve hydrique inférieure à 18 mm, seraient également fréquemment observés dans des stations plus orientales. A Rennes et Nantes ce type d'épisode sec aurait une fréquence d'apparition de 19 et 17 % respectivement.

Si l'on croise les informations résultants de ces deux figures on peut ainsi mettre en évidence les sécheresses courtes et intenses : 1949, 1959, 1976 et 2003 ; les sécheresses longues mais peu intenses : 1906, 1996 et 2005 ; les sécheresses longues et intenses : 1921 et 1989. Le seuil de 18 mm choisi ici ne semble pas adapté à la sécheresse de 1976 qui fut longue car initiée dès l'hiver 1975. Par le passé la Bretagne a donc connu des sécheresses d'intensité variable qui ont plus impacté le sud et l'est de la région que le nord et l'ouest. Cependant, quelques sécheresses très intenses ont été ressenties sur toute la Bretagne, comme ce fut le cas en 1921, 1949, 1959, 1976 et 1989.

On ne remarque pas de nette tendance à l'augmentation de la fréquence des épisodes secs au cours du 20ème siècle. Cependant on remarque que les sécheresses qui avaient tendance à être cantonnées au sud de la Bretagne au début du siècle, se généralisent à une plus grande partie du territoire à partir des années 1950.

Les évolutions possibles au 21ème siècle d'après trois scénarios SRES du GIEC sont présentées dans le chapitre suivant.

Synthèse : Caractéristiques des sécheresses en Bretagne au 20ème siècle

Les diagrammes ombrothermiques mettent en évidence une évolution du régime pluviométrique depuis le début du 20ème siècle jusqu'à nos jours. L'augmentation des pluies automnales et la diminution sur la période estivale engendre une saisonnalité plus marquée. Alors qu'à Brest, Lorient et Dinard l'été reste assez humide, les stations de Nantes et Rennes sont plus sèches l'été jusqu'à voir apparaitre une légère période sèche pour cette dernière. Si les précipitations annuelles ont augmenté depuis les années 1980, on note une diminution des précipitations estivales, notamment en août et dans une moindre mesure en juin et septembre.

Le suivi du déficit d'évaporation depuis les années 1880 a permis dans un premier temps de bien mettre en évidence les différences de tendances climatiques entre les stations de Rennes et Brest, la première étant moins humide du fait d'un climat plus continental. Le déficit d'évaporation annuel n'a pas évolué depuis le début du 20ème siècle. Par contre, le déficit au mois d'août a augmenté, ce qui est en accord avec les observations précédentes, quant à la diminution des précipitations en août. L'apparition du déficit d'évaporation correspond à un épuisement de la réserve hydrique qui n'est plus à même de subvenir aux besoins de la végétation. A Rennes, les réservoirs pédologiques s'assèchent en général à partir du mois de mars jusqu'en septembre, les pluies automnales permettant une recharge efficace en trois mois. Ces tendances sont globalement similaires à l'échelle du territoire breton. On note tout de même des stations plus humides (Plougonvelin et Batz) dont les réserves hydriques sont pleinement rechargées en novembre ainsi que des stations plus sèches comme Belle-Ile où il ne reste plus que 15 mm d'eau en moyenne dans les sols en août et septembre.

Pour une réserve utile de 125 mm et une occupation du sol de type gazon, les sécheresses pédologiques estivales durent en général 1 à 2 mois, mais des évènements plus exceptionnels peuvent durer de 4 à 6 mois, voire au-delà. Des épisodes secs durant 4 à 6 mois sont peu fréquents à Batz, Plougonvelin et Bréhat (moins de 10 %), mais peuvent être plus réguliers à Groix et Belle-Ile où l'on note une fréquence d'apparition supérieure à 25 %, mais aussi à Rennes et Nantes avec une fréquence proche de 20 %. La Bretagne a connu des sécheresses de durée et intensité variable qui ont plus impacté le sud et l'est du territoire. Les sécheresses intenses de 1921, 1949, 1959, 1976 et 1989 ont cependant été ressenties dans toute la région. Si ces résultats n'attestent pas d'une augmentation des épisodes secs au cours du siècle, ils mettent tout de même en évidence une généralisation de ces évènements à une plus grande partie du territoire.

CHAPITRE 7

EVOLUTION DE LA FREQUENCE ET DE L'INTENSITE DES SECHERESSES AU COURS DU 21EME SIECLE

Sommaire

Introduction 160

7.1 Discussion sur les incertitudes et les biais des données utilisées 160

7.2 Conséquences de la prise en compte de l'occupation du sol dans le calcul du déficit d'évaporation.....162

7.2.1 Evolution du déficit d'évaporation à Rennes entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle (occupation du sol de type gazon).....162

7.2.2 Evolution du déficit d'évaporation entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle pour plusieurs stations bretonnes (occupation du sol réelle).....163

7.2.3 Evolution du déficit d'évaporation au 21ème siècle à Rennes et Brest selon une occupation du sol de type gazon 166

7.3 Tendances moyennes mensuelles de l'évolution des sécheresses au 21ème siècle selon trois scénarios du GIEC.....168

7.3.1 Suivi du déficit d'évaporation estival pour trois scénarios SRES du GIEC.....168

7.3.2 Suivi du déficit d'évaporation mensuel pour trois scénarios SRES du GIEC, pour quatre stations bretonnes.....172

7.3.3 Suivi de la recharge hivernale pour trois scénarios SRES du GIEC.....176

7.4 Tendances moyennes journalières de l'évolution des sécheresses à la résolution kilométrique 179

7.4.1 Suivi du déficit d'évaporation estival selon trois scénarios SRES 179

7.4.2 Variations journalières du DE pour quelques stations bretonnes.....186

7.4.3 Recharge hivernale 191

Synthèse : Des sécheresses plus intenses et plus fréquentes au cours du 21ème siècle en Bretagne.....193

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

Introduction

Ce chapitre présente le suivi des sécheresses réalisé grâce à l'utilisation d'un bilan hydrique d'après la méthodologie détaillée dans le chapitre 5. Deux paramètres sont principalement étudiés dans cet objectif : le déficit d'évaporation, en tant qu'indice de l'intensité des sécheresses et la teneur en eau des réserves hydriques, qui permet une vision complémentaire du déficit d'évaporation. Ce chapitre débute par une présentation des incertitudes et biais méthodologiques. Cela permet de mieux comprendre la valeur des résultats présentés ici.

Ensuite les conséquences de la prise en compte de l'occupation du sol dans le calcul du bilan hydrique sont présentées, de façon à faire le lien entre les résultats du chapitre 6 et ceux exposés ici. Puis, les résultats du bilan hydrique de résolution spatiale de 8km et au pas de temps mensuel sont présentés. Cette approche permet une première vision de l'évolution du risque sécheresse à l'échelle du territoire breton. A partir des moyennes mensuelles établies pour des périodes de vingt ans on cherche ainsi à déterminer si la fréquence et l'intensité des sécheresses augmenteraient au cours du 21ème siècle. Cette analyse est l'occasion de confronter les trois scénarios SRES du GIEC. S'ils prévoient différents degrés d'augmentation des émissions des gaz à effet de serre, il n'est pas certain qu'ils diffèrent en termes de prévisions de sécheresses. Le bilan hydrique est donc présenté ici en tant qu'outil permettant de modéliser le risque sécheresse selon divers scénarios possibles.

Pour compléter les résultats de ce premier bilan hydrique, une deuxième partie présente les conclusions d'un second bilan hydrique de résolution plus fine. Basé sur une résolution spatiale kilométrique et au pas de temps journalier, ce bilan permet une vision plus précise de l'aléa sécheresse à l'échelle régionale qui convient bien à l'analyse du risque pour les différents types d'occupation du sol. Les résultats de ce bilan servent ainsi à affiner les tendances révélées par le premier bilan hydrique utilisé. Cependant, cette seconde partie est également l'occasion de suivre l'évolution du déficit d'évaporation et du remplissage des réserves hydriques pour des cas particuliers du territoire où la gestion de la ressource en eau s'avère particulièrement importante pour les activités socio-économiques. C'est le cas des secteurs forestiers et des champs où l'on cultive les céréales utiles à l'alimentation humaine et animale par exemple.

7.1 Discussion sur les incertitudes et les biais des données utilisées

Les résultats présentés dans ce chapitre doivent être analysés à la lumière des incertitudes et des biais générés par les hypothèses considérées, les calculs réalisés, etc. Les incertitudes que l'on retrouve ici concernent principalement les scénarios SRES utilisés. Si l'utilisation des trois scénarios B1, A1B et A2 couvrent trois évolutions socio-économiques possibles, il est possible que la situation réelle soit différente de ces trois tendances. Cependant, les trois scénarios retenus représentent une situation optimiste, pessimiste et intermédiaire en ce qui concerne l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. On peut donc penser que les intensités de sécheresse réellement vécues au 21ème siècle seront comprises dans la fourchette des valeurs prévues par les scénarios A2 et B1. Cependant, on a pu voir que, localement et pour une période précise, le scénario B1 prévoit des sécheresses plus intenses que le scénario A2. Il est donc

difficile de s'affranchir ou, plus simplement, de quantifier l'incertitude liée aux choix des scénarios SRES.

En ce qui concerne les biais, on peut distinguer ceux qui ont trait aux données climatiques et ceux liés aux données pédologiques. Pour chacun de ces types de données il faut également distinguer les biais existants avant leur utilisation dans le cadre de cette thèse, liés à la création des données « brutes », de ceux que l'on vient rajouter par des calculs supplémentaires. Ainsi, pour les données climatiques, les données brutes fournies par le CERFACS présentent un biais lié aux techniques de descente d'échelle. Ce biais a été étudié et quantifié grâce à la comparaison entre les données observées et simulées proposée dans le chapitre 4. Dans le cas du bilan mensuel, de résolution spatiale de 8 km, les données climatiques ne sont pas modifiées, limitant les écarts entre l'observé et les simulations au biais généré par la descente d'échelle. En revanche, pour les données climatiques du bilan journalier, des calculs supplémentaires effectués par l'interpolation spline viennent rajouter un biais sur les données.

Les autres biais que l'on considère dans ce travail sont liés aux données pédologiques et aux calculs de bilan hydrique. Tout d'abord on peut noter une incertitude liée à la méthodologie d'élaboration de la base de données pédologique, puisque les pédologues ont étudié au maximum une profondeur de sol de 120 cm. Ainsi les tailles de réserve utile des sols profonds peuvent avoir été sous-estimées. Ce biais ne concerne donc pas toute la région Bretagne. Les pédologues du laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest réfléchissent actuellement à l'amélioration de la formule permettant le calcul de la réserve utile. Ils estiment ainsi que les données utilisées dans cette thèse pourraient être plus proches de la réalité du terrain grâce à l'établissement d'une formule plus complète, prenant mieux en compte les facteurs impactant la capacité au champ des sols. On a ainsi un second biais intrinsèque au jeu de données pédologiques au format vecteur. Il faut aussi ajouter un troisième biais lié à la transformation des données au format raster. Cette transformation est effectuée en prétraitement avant le calcul du bilan hydrique, afin que le format des données pédologiques soit similaire à celui des données climatiques. Ce biais est donc rajouté aux deux autres du fait de traitements supplémentaires spécifiques à cette thèse.

On peut également considérer les simplifications faites sur le bilan hydrique. Le bilan utilisé ici est basé sur un système à un réservoir à décroissance logarithmique qui reproduit donc bien la difficulté pour les racines des végétaux à capturer les derniers millimètres d'eau contenus dans les réservoirs hydriques. Cependant, un bilan fonctionnant sur une base de deux réservoirs (un superficiel et un plus profond) serait *a priori* plus proche de la réalité. Ce type de bilan hydrique met en évidence la recharge en eau de l'horizon superficiel du sol, grâce à des épisodes de pluie peu intenses, et qui permet de soutenir l'alimentation en eau des végétaux. De plus, on peut également identifier l'absence de considération du drainage dans les calculs du bilan hydrique comme une approximation supplémentaire.

Le fait que le bilan hydrique utilisé soit évolutif est donc un atout. Si de nouveaux jeux de données climatiques et pédologiques sont générés à l'avenir avec une plus grande justesse, il sera tout à fait possible d'intégrer ces informations dans les calculs du bilan hydrique. En dépit de ces incertitudes, les résultats du bilan hydrique concernant les sécheresses présentent un intérêt scientifique notable.

La démarche de ce travail est exploratoire. L'objectif n'est pas de prédire exactement le futur, ce qui est impossible, mais plutôt de voir quels sont les futurs possibles sur le plan climatique et leurs impacts sur le territoire. Cette démarche prospective utilise les meilleurs jeux de données disponibles actuellement (climatiques, pédologiques et paysagères), mais elle peut bien sûr être revisitée dès que de nouvelles données plus à jour seront exploitables.

7.2 Conséquences de la prise en compte de l'occupation du sol dans le calcul du déficit d'évaporation

Les résultats du bilan hydrique étudiés dans le chapitre précédent représentent une situation de référence, correspondant à une réserve utile de 125 mm et à occupation du sol de type gazon. On est donc ici dans une approche purement climatique de la caractérisation des sécheresses. Cette approche peut être complétée par la prise en compte de l'occupation du sol réelle. C'est notamment le cas des résultats présentés dans ce chapitre et le suivant. L'intégration de l'occupation du sol dans le calcul du bilan hydrique se fait à plusieurs niveaux : i. l'évapotranspiration réelle est estimée à partir de l'évapotranspiration maximale et non plus de l'évapotranspiration réelle ; ii. le calcul du déficit d'évaporation est lui aussi établi sur la base de l'ETM et non plus de l'ETR. Il est donc important ici de présenter les conséquences de cette modification de calcul sur les résultats et l'interprétation faite en termes de sécheresse.

7.2.1 Evolution du déficit d'évaporation à Rennes entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle (occupation du sol de type gazon)

La figure 7.1 montre l'évolution attendue du déficit d'évaporation à Rennes entre la fin du 20ème siècle, 1980-99, et la fin du 21ème siècle, 2080-2099, dans le contexte du scénario A1B. Le déficit d'évaporation est ici calculé dans un contexte d'occupation du sol de type gazon, comme tous les résultats présentés précédemment dans ce chapitre. Le déficit d'évaporation serait plus élevé à la fin du 21ème siècle par rapport à la situation actuelle. La durée de la saison déficitaire augmenterait d'un mois au cours du siècle, du fait d'un début plus précoce. Le pic de déficit serait ainsi atteint au mois de juillet, soit un mois plus tôt qu'actuellement. On passerait ainsi d'un déficit d'évaporation annuel de près de 200 mm à la fin du 20ème siècle, à un déficit de 450 mm environ à la fin du 21ème siècle dans le cas du scénario A1B.

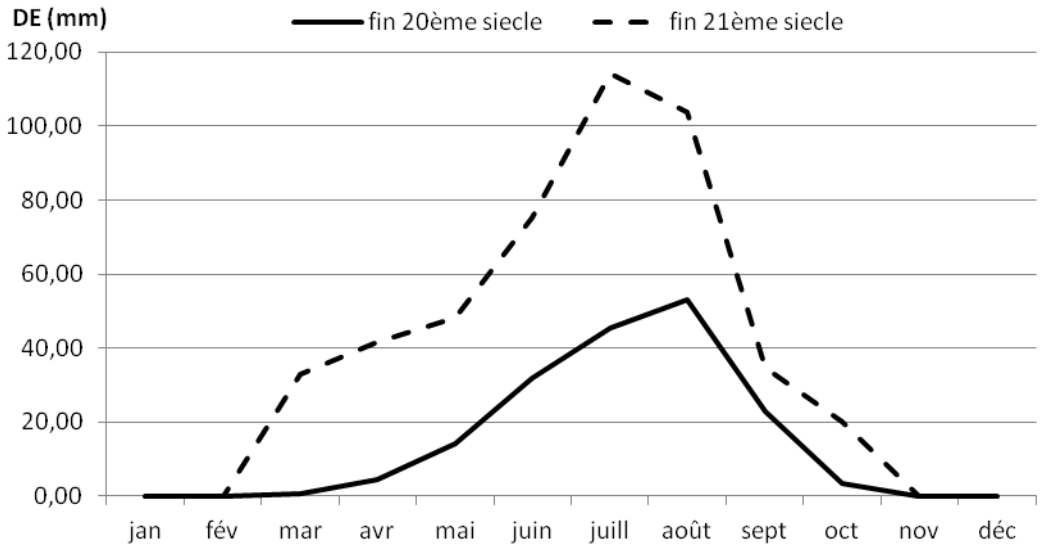


Figure 7.1 Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type gazon, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème (1980-99) et 21ème siècle (2080-99) (scénario A1B), à Rennes

Cette analyse est à confronter avec les tendances d'évolutions du déficit d'évaporation en condition réelle d'occupation du sol.

7.2.2 Evolution du déficit d'évaporation entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle pour plusieurs stations bretonnes (occupation du sol réelle)

Les résultats présentés ici concernent le déficit d'évaporation calculé en prenant en compte l'occupation du sol réelle. Les trois stations étudiées sont caractérisées par trois occupations du sol différentes, afin de cerner au mieux les conséquences de l'intégration de la végétation dans le bilan hydrique. La station de Rennes (Ille-et-Vilaine) est caractérisée par une culture de céréales, pour la station de Naizin (Morbihan) on retrouve une culture légumière et à Plougonvelin (Finistère) on est en présence d'une culture fourragère.

La figure 7.2 montre ainsi les variations du déficit d'évaporation pour deux situations moyennes du 20ème, 1980-99, et du 21ème siècle, 2080-99, à Rennes, pour une culture de céréales. On remarque rapidement que le maximum de déficit d'évaporation aurait lieu en juin. Ce qui est plus précoce d'un mois par rapport à la situation modélisée pour une occupation du sol de type gazon. Cela est dû à la période de culture du blé. La croissance de cette céréale requiert une quantité importante d'eau au mois de mai et juin. Au mois de mai le déficit d'évaporation apparait plus important actuellement qu'à l'horizon 2100 dans le cas du scénario A1B. Cela s'explique par des précipitations importantes sur cette période, de l'ordre de 55 mm. La période déficitaire est plus courte lorsque l'on considère l'occupation du sol réelle, par rapport à une végétation de référence. Cela vient du fait qu'en prennant en compte l'occupation du sol réelle on intègre les besoins en eau spécifiques de chaque stade phénologique. Ainsi pour une culture de blé les besoins hydriques sont importants au printemps, contrairement à une prairie où les besoins en eau sont

réguliers tout au long de l'année. Le déficit d'évaporation augmenterait nettement au cours du 21ème siècle. Actuellement le déficit moyen annuel dans un contexte de culture céréalière est de 215 mm et l'on passerait à 310 mm à la fin du 21ème siècle d'après le scénario A1B.

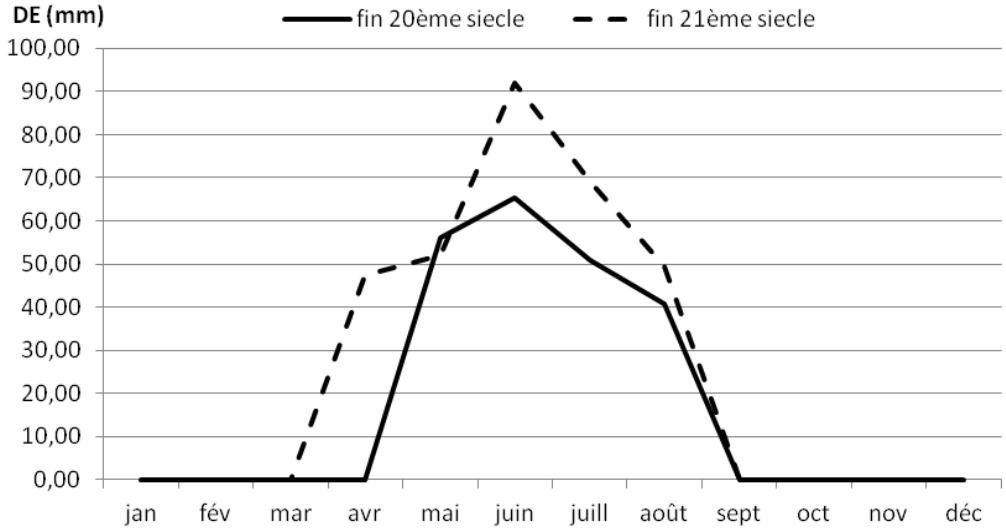


Figure 7.2 Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type céréalière, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), près de Rennes (Ille-et-Vilaine)

La culture de légumes se fait tout au long de l'année en fonction des espèces plantées et de leurs caractéristiques en termes de précocité. Ainsi lorsque l'on suit le déficit d'évaporation calculé pour un secteur concerné par ce type d'occupation du sol, on peut observer deux périodes déficitaires : au printemps et en été. La figure 7.3 montre ainsi une saison déficitaire majeure en été, et une plus faible au printemps, observée seulement à la fin du 21ème siècle dans le cas du scénario A1B. On remarque donc ici nettement l'effet de la prise en compte de l'occupation du sol réelle sur le calcul du déficit d'évaporation. Celui-ci gagne en précision en ce qui concerne la quantification du stress hydrique pour la végétation en place.

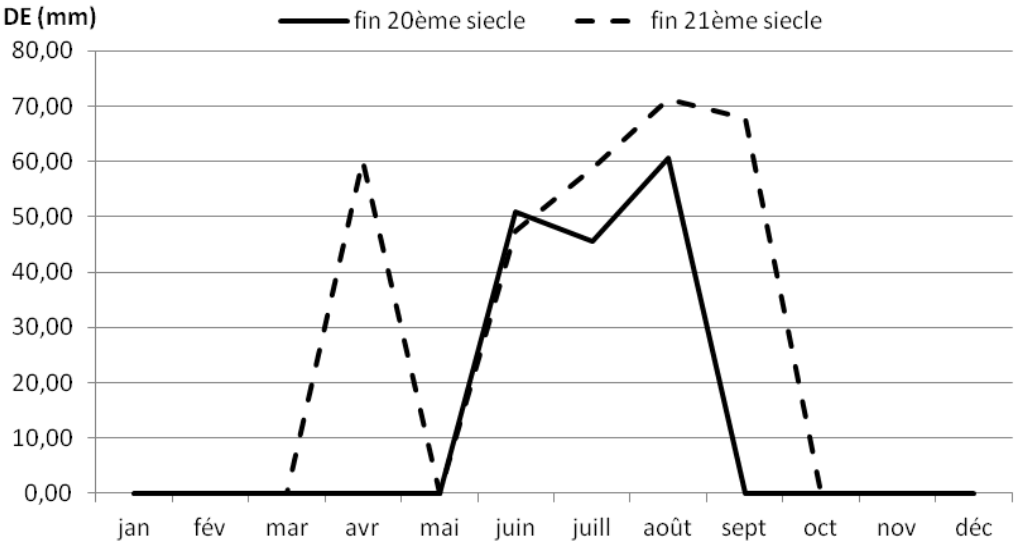


Figure 7.3 Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type légumière, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), près de Naizin (centre Bretagne)

Pour cette station aussi le mois de mai serait particulièrement humide (plus de 65 mm) à la fin du 21ème siècle d'après le scénario A1B, ce qui conduirait à un déficit d'évaporation moins fort qu'actuellement pour le mois de mai. Cela est lié à la variabilité décennale. En termes de cumul annuel, le déficit d'évaporation augmenterait en 100 ans, passant de 160 mm actuellement à 305 mm à l'horizon 2100 pour le scénario A1B.

Un troisième type cultural est étudié ici pour la station de Plougonvelin dans le Finistère : les fourrages. On observe avec la figure 7.4 que le pic de déficit d'évaporation a lieu en août soit deux mois plus tard que pour les cultures céréalières. Cela est lié au fait que ces deux cultures ne sont pas semées et récoltées durant les mêmes périodes de l'année. Les cultures fourragères sont plus tardives que le blé et nécessitent de grandes quantités d'eau durant les mois de juillet, août et septembre pour assurer leur croissance et maturation. Cette particularité est donc bien retranscrite par le bilan hydrique révélant ainsi une saison déficitaire plus tardive que pour une occupation du sol de type céréalier. En un siècle le déficit d'évaporation augmenterait assez nettement, passant de 240 mm de déficit d'évaporation moyen annuel actuellement à 350 mm à la fin du siècle d'après le scénario A1B.

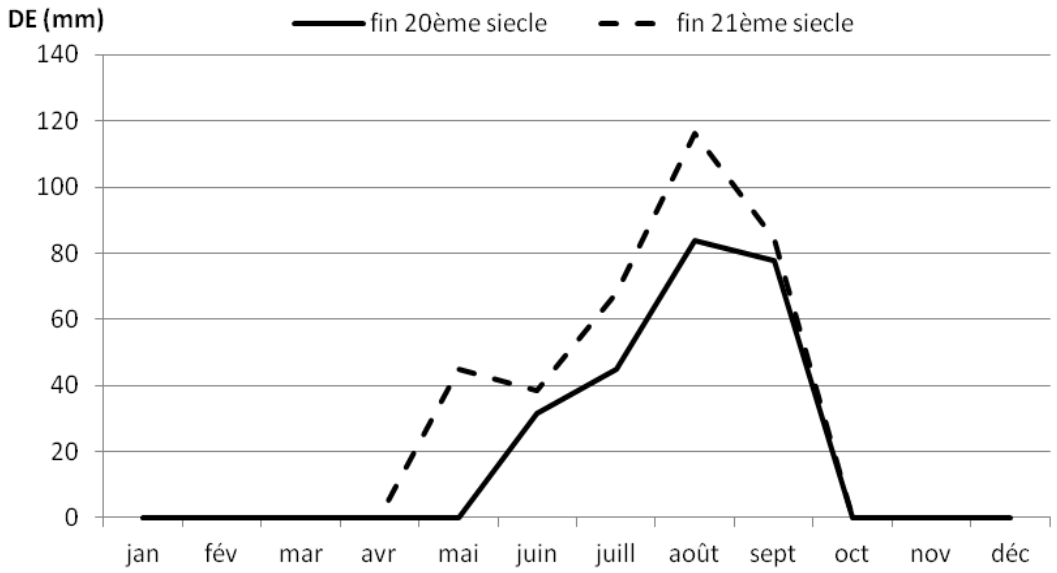


Figure 7.4 Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type fourragère, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), près de Plougonvelin (Finistère)

Avec cette analyse on perçoit donc l'intérêt de calculer le déficit d'évaporation à partir de l'évapotranspiration maximale, plutôt que de l'évapotranspiration potentielle, quand les données d'occupations du sol sont disponibles. Cela rend le calcul du déficit d'évaporation plus proche de la réalité en intégrant les besoins en eau spécifiques à chaque stade phénologique de la végétation considérée.

L'évolution du calcul du déficit d'évaporation caractérisée par l'intégration de l'occupation du sol, permet donc de représenter au mieux les variations des besoins en eaux des plantes selon les stades phénologiques.

7.2.3 Evolution du déficit d'évaporation au 21ème siècle à Rennes et Brest selon une occupation du sol de type gazon

Les figures 7.5 et 7.6 permettent de rappeler les tendances majeures de l'évolution du déficit d'évaporation à Rennes et Brest entre la situation actuelle et à l'horizon 2100 selon différents scénarios, en considérant une occupation du sol de type « gazon ». La figure 7.5 présente la situation à Rennes sur la période 1981-2000 observée (a) et modélisée (b), ainsi que sur la période 2080-2099 d'après le scénario B1 (c), A1B (d) et A2 (e).

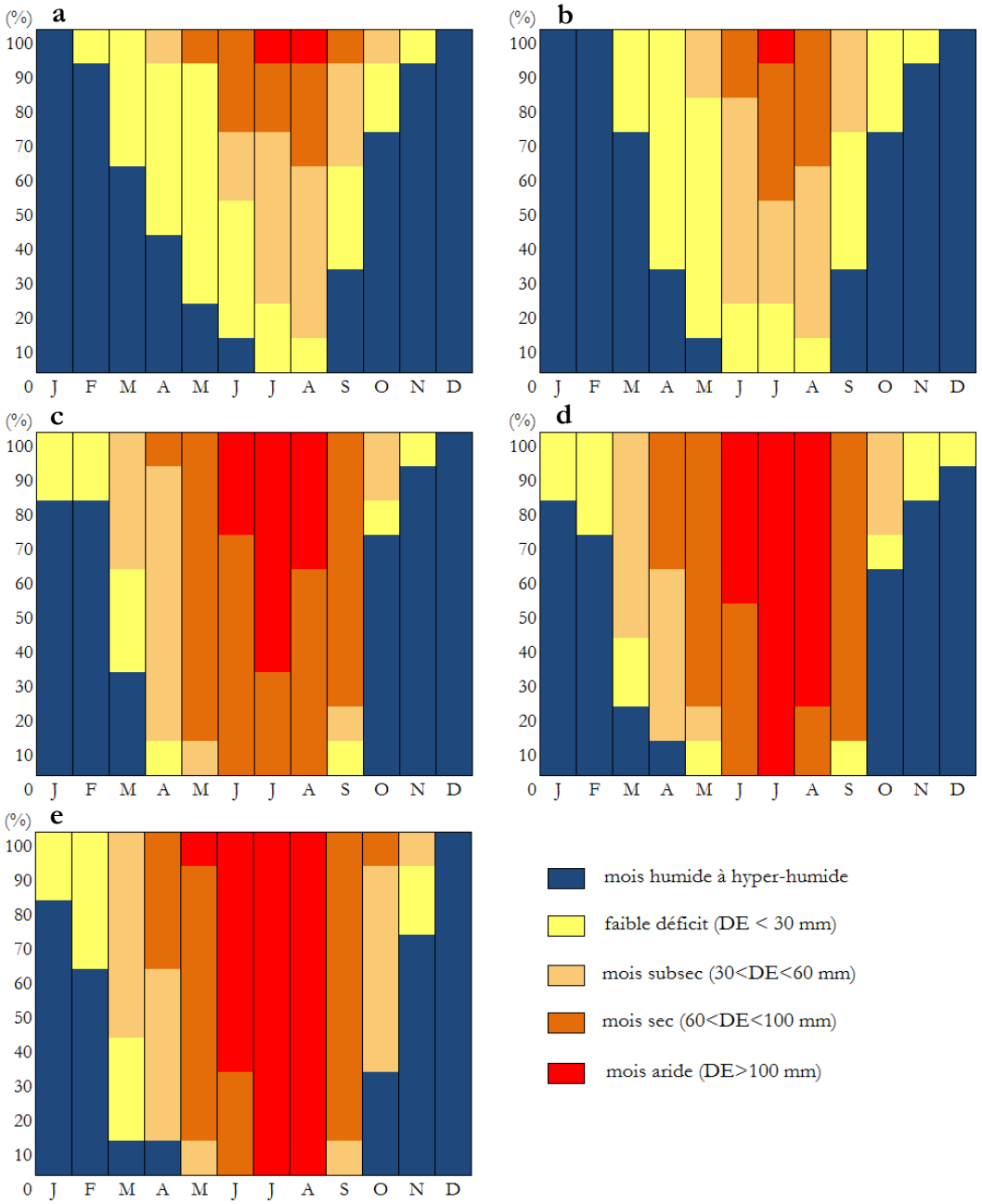


Figure 7.5 Variations moyennes du DE et fréquences d'occurrence des différentes valeurs sur la période 1981-2000 observées (a) et modélisées (b) et sur la période 2080-2099 d'après les scénarios B1 (c), A1B (d) et A2 (e) pour la station de Rennes

On voit ainsi que les données modélisées sont proches de l'observé, mais avec un déficit d'évaporation légèrement surestimé en juillet et sous-estimé en juin. A Rennes, la probabilité

d'avoir un mois de juillet ou d'août aride, caractérisé par un déficit d'évaporation mensuel supérieur à 100 mm, n'est que de 10 % actuellement. A la fin du 21ème siècle, elle passerait à 70 % en juillet et 40 % en août d'après le scénario B1, 100 % en juillet et 80 % en août selon le scénario A1B, et 100 % pour les mois de juillet et août d'après le scénario A2.

A Brest (figure 7.6) le déficit modélisé sur la période 1981-2000 (b) est légèrement inférieur au déficit observé sur cette même période (a). Comme à Rennes, le déficit augmenterait nettement au cours du 21ème siècle.

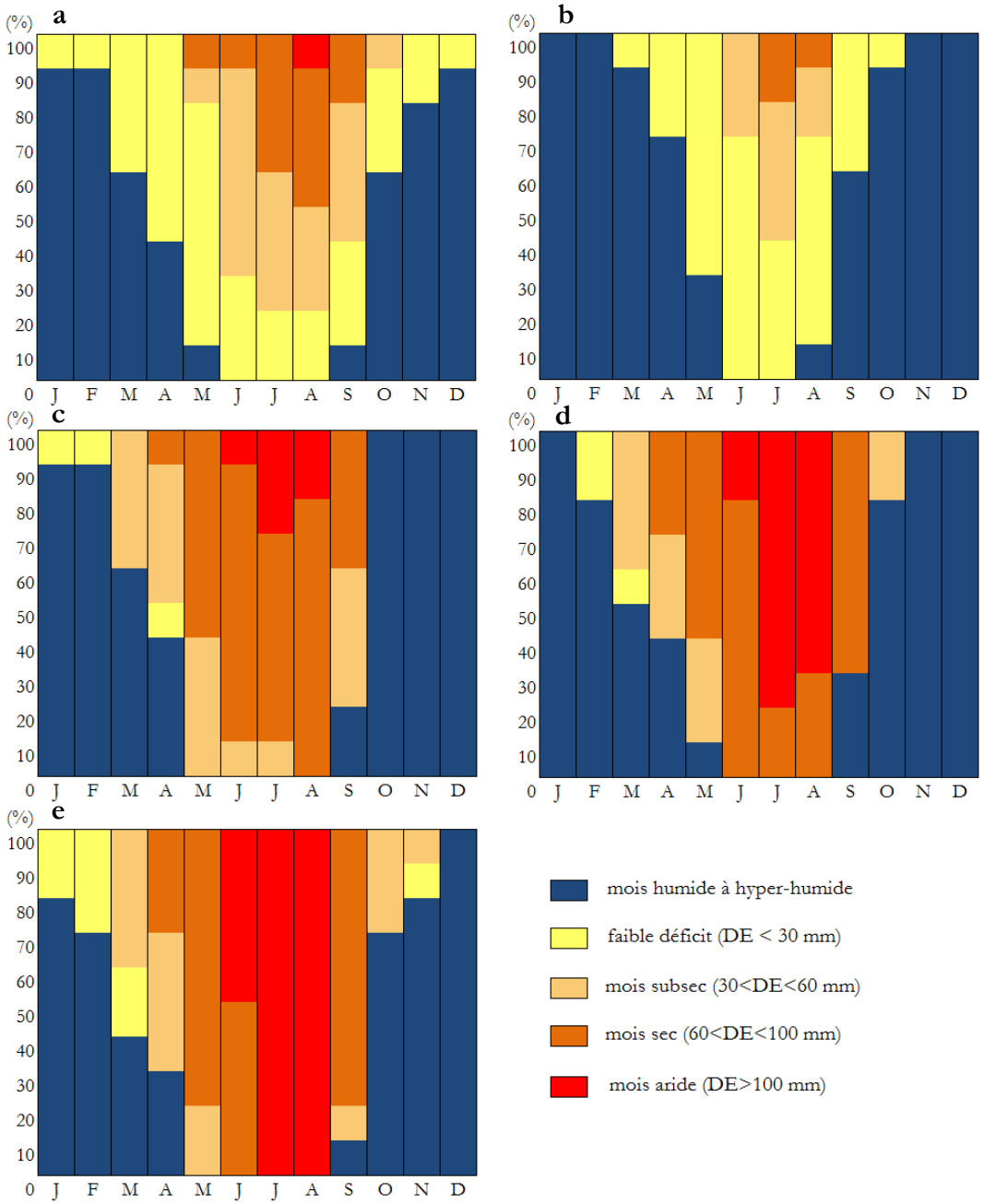


Figure 7.6 Variations moyennes du DE et fréquences d'occurrence des différentes valeurs sur la période 1981-2000 observées (a) et modélisées (b) et sur la période 2080-2099 d'après les scénarios B1 (c), A1B (d) et A2 (e) pour la station de Brest

Actuellement il n'y a que 10 % de probabilité d'avoir un mois aride en été à Brest. A la fin du 21ème siècle on passerait à 30 % et 20 % en juillet et août d'après le scénario B1, 80 et 70 % avec le scénario A1B et 100 % pour les 2 mois selon le scénario A2.

Les premières tendances ainsi observées sont affinées dans les parties suivantes qui présentent les résultats de bilans hydriques spatialisés prenant en compte l'occupation du sol réelle.

7.3 Tendances moyennes mensuelles de l'évolution des sécheresses au 21ème siècle selon trois scénarios du GIEC

Le bilan hydrique utilisé pour observer les tendances moyennes d'évolution des sécheresses au cours du 21ème siècle a été calculé pour quatre périodes de 20 ans. La durée minimum d'une période pour une analyse climatologique est de 20 ans. Choisir cette durée permet d'étudier le comportement des sécheresses sur un plus grand nombre de périodes de référence. En l'occurrence quatre périodes de 20 ans plutôt que trois de 30 ans. Ainsi les résultats des bilans hydriques présentés dans cette partie correspondent à des moyennes mensuelles pour les périodes : 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-99.

7.3.1 Suivi du déficit d'évaporation estival pour trois scénarios SRES du GIEC

La figure 7.7 regroupe les cartes de déficit d'évaporation estival résultant du bilan hydrique mensuel moyen calculé pour quatre périodes de vingt ans d'après trois scénarios SRES du GIEC différents. Chaque colonne de cette figure correspond à une période du 21ème siècle, depuis 2020-2039 (à gauche) jusqu'à 2080-2099 (à droite), tandis que chaque ligne correspond à un scénario du plus optimiste au plus pessimiste : B1 pour la ligne supérieure, A1B pour la ligne intermédiaire et A2 pour la ligne inférieure. Le déficit estival est obtenu à partir du cumul des valeurs mensuelles de juin, juillet et août.

Le scénario B1 qui est le plus optimiste des trois scénarios analysés, prédit pour la période 2020-2039 une moitié ouest de la Bretagne moins sèche qu'à l'est avec un déficit estival moyen occidental compris entre 50 et 150 mm contre 100 à 200 mm à l'est. La région de Vannes et Redon connaitrait un déficit d'évaporation estival plus important que le reste de la Bretagne, avec des valeurs moyennes comprises entre 200 et 250 mm à l'année. La période 2040-2059 apparait moins sèche que les décennies précédentes, excepté pour le littoral finistérien. Cela est dû à la variabilité décennale avec des précipitations estivales plus importantes durant la période 2040-2059 qu'au cours de la période 2020-2039, sur toute la région sauf dans le Finistère. Pour autant, la distinction ouest/est persiste toujours. On aurait ainsi des valeurs moyennes de déficit d'évaporation comprises entre 50 et 150 mm à l'ouest et 100 à 200 mm à l'est. Le déficit estival moyen pour la période 2060-2079 augmenterait par rapport à la période précédente et deviendrait supérieur à la situation modélisée pour la période 2020-2039. Cette augmentation concernerait l'ensemble du territoire. A l'ouest le déficit estival moyen serait de l'ordre de 100 à 200 mm et à l'est il serait compris entre 150 et 250 mm. Pour la fin du 21ème siècle, le modèle prévoit une augmentation modérée de l'intensité des sécheresses par rapport à la période précédente. Au sud-

est, l'augmentation serait un peu plus marquée et l'on pourrait atteindre un déficit estival de l'ordre de 300 mm.

Même en étant optimiste sur les teneurs en gaz à effet de serre, le scénario B1 prévoit une nette augmentation de l'intensité des sécheresses en Bretagne. La variabilité décennale du climat fait que l'augmentation ne serait pas régulière. Ainsi, au milieu du 21ème siècle les sécheresses apparaissent moins intenses qu'au début du siècle. A la fin du 21ème siècle, des sécheresses de même intensité que celle de 1976 (DE de 300 mm) seraient souvent atteintes dans la région de Redon et Vannes.

Dans le cas du scénario A1B la situation serait quelques peu différente du scénario B1, dès la période 2020-2039. On peut en effet voir que sur cette période le déficit d'évaporation estival serait relativement similaire entre les deux scénarios pour la partie ouest de la région, tandis qu'il serait plus élevé à l'est dans l'hypothèse du scénario A1B. Cependant, la différence d'intensité des sécheresses entre l'ouest et l'est resterait globalement similaire à la situation modélisée dans le cas du scénario B1, avec un déficit d'évaporation estival moyen de 50-150 mm à l'ouest et de 100-200 mm à l'est. Le sud du Morbihan aurait le déficit d'évaporation estival le plus important de la région avec des valeurs moyennes de l'ordre de 250 à 300 mm. Durant les deux décennies suivantes (2040-2059) le déficit tendrait à diminuer à l'est et augmenter légèrement à l'ouest, réduisant ainsi l'écart entre les deux moitiés est et ouest du territoire. A l'ouest le déficit d'évaporation serait d'environ 100 à 200 mm et à l'est il diminuerait pour atteindre 150 à 250 mm en moyenne. A la suite de cette période de diminution de l'intensité des épisodes secs, la période 2060-2079 connaitrait des sécheresses plus intenses, dépassant ainsi les valeurs de la période 2020-2039. L'est de la Bretagne connaitrait ainsi une intensité moyenne de déficit estival de 200 à 300 mm. Pour la moitié ouest, l'intérieur des terres connaitrait des sécheresses plus intenses (moyenne de 150 à 250 mm) que sur le littoral (déficit moyen de 100 à 200 mm). La fin du 21ème siècle connaitrait des sécheresses encore plus intenses au niveau du littoral des Côtes d'Armor et de l'Ille-et-Vilaine, ainsi que le long d'un l'axe Saint Brieuc - Vannes (DE compris entre 250 et 350 mm) et dans une moindre mesure sur la moitié ouest de l'Ille-et-Vilaine (150-200 mm) et le nord du Finistère (100-200 mm). Pour le littoral sud, d'Audierne à Auray, le pays du Léon et le sud-est des Côtes d'Armor, les sécheresses seraient moins intenses que sur la période 2060-2079 avec un déficit d'évaporation moyen de 100 à 150 mm.

Le scénario A1B prévoit donc des sécheresses plus intenses que le scénario B1, sauf pour la période 2040-2059 où les situations moyennes seraient très proches. De manière générale l'intensité attendue des sécheresses au cours du 21ème siècle serait sensiblement identique pour les deux scénarios pour la moitié ouest de la Bretagne. La différence entre les deux scénarios concerne la moitié est de la région qui connaitrait des sécheresses plus intenses dans le contexte du scénario A1B avec une différence de déficit de 100 mm environ.

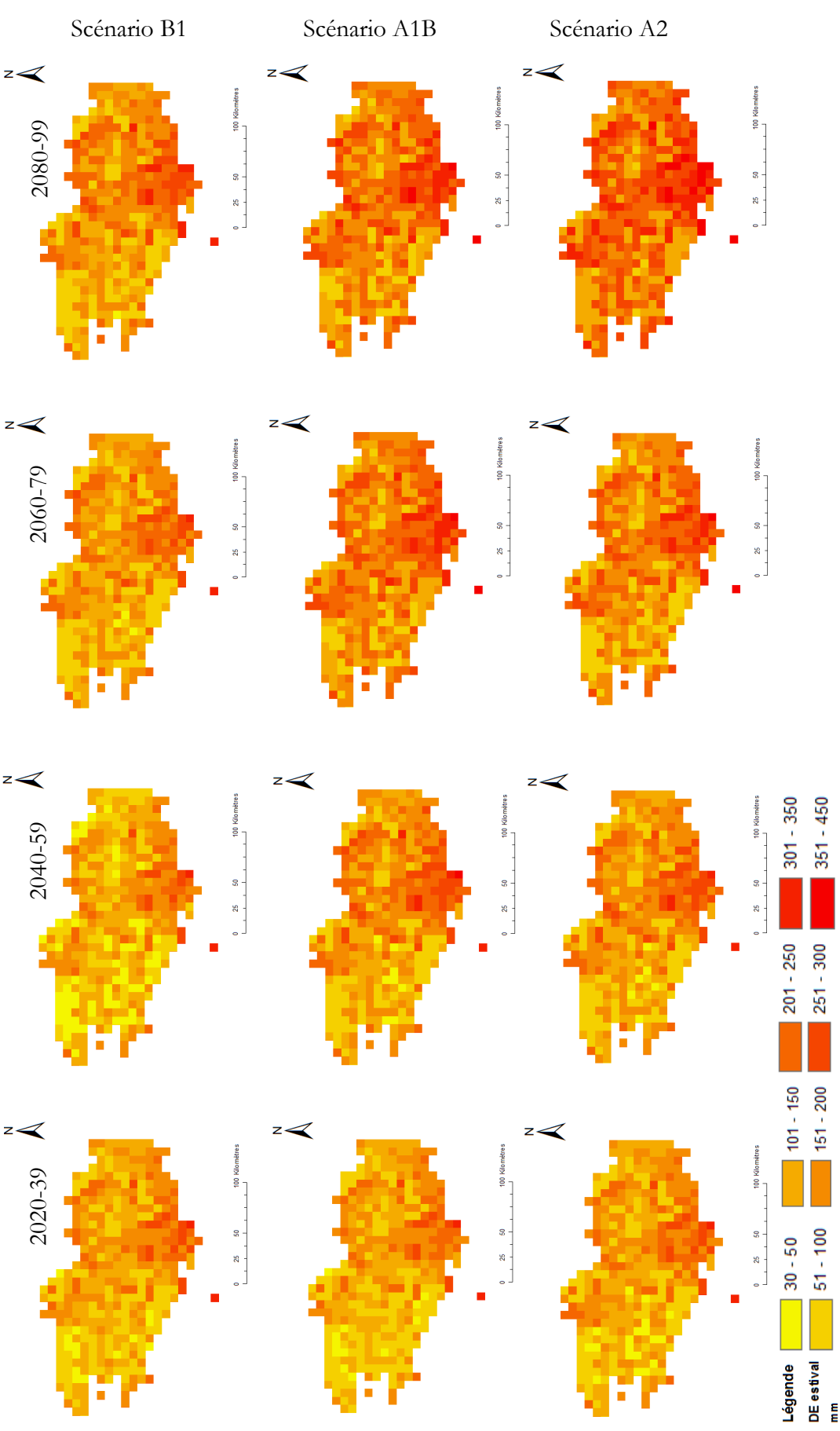


Figure 7.7 Evolution du déficit d'évaporation estival moyen (juin à août) selon 3 scénarios du GIEC sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle - Résolution 8 km, RU variable, OS : CORINE Land Cover

D'après le scénario A2 les sécheresses seraient légèrement plus intenses sur la période 2020-2039 en comparaison aux scénarios A1B et B1. Le déficit moyen de l'est et l'ouest de la région resterait du même ordre de grandeur que pour les deux autres scénarios. Il serait de 50-150 mm en moyenne à l'ouest et 100-200 mm en moyenne à l'est. Au sud, le déficit serait un peu plus important, 200 à 250 mm en moyenne, sur un espace limité à la région vannetaise et au golfe du Morbihan, donc plus réduit que dans le cas du scénario B1. Le scénario A2 ne prévoit donc pas franchement une situation plus pessimiste que les deux autres scénarios pour la période 2020-2039. Pour la période 2040-2059 le déficit augmenterait, contrairement aux deux autres scénarios, pour atteindre 100 à 200 mm en moyenne à l'ouest et 150 à 250 mm à l'est. Cependant, le déficit d'évaporation sur la période 2040-2059 ne dépasserait celui modélisé d'après le scénario A1B que sur le sud-ouest du territoire. C'est donc principalement l'ouest qui aurait des sécheresses plus intenses avec le scénario A2 qu'avec le scénario A1B. L'Ille-et-Vilaine, la région des Monts d'Arrée et le pays du Trégor connaitraient des sécheresses moins intenses et moins fréquentes sur la période 2040-2059 dans le cas du scénario A2 par rapport au contexte du scénario A1B. Par la suite, au cours de la période 2060-2079, le déficit d'évaporation augmenterait principalement le long de l'axe St Brieuc - Vannes tout en rayonnant sur l'Ille-et-Vilaine ainsi qu'à l'ouest des Côtes d'Armor et au sud du Finistère, où le déficit d'évaporation serait en moyenne de 200 à 300 mm. Dans le Finistère les sécheresses gagneraient en intensité entre la période 2040-2059 et 2060-2079 principalement au niveau des Monts d'Arrée et de la moitié sud du département. Le déficit moyen y serait compris entre 150 et 200 mm. Le littoral nord du Finistère ne connaitrait pas de réelles variations de l'intensité des sécheresses, avec un déficit d'évaporation de 100 mm environ. L'augmentation de l'intensité du déficit d'évaporation entre les périodes 2040-2059 et 2060-2079 serait plus modérée dans le cas du scénario A2 par rapport au scénario A1B. Ainsi, sur la période 2060-2079, les sécheresses seraient plus intenses dans le cas du scénario A1B. Il faut attendre la période 2080-2099 pour avoir des sécheresses plus intenses dans le cas du scénario A2 par rapport au scénario A1B sur toute la région Bretagne. On aurait ainsi, à la fin du 21ème siècle d'après le scénario A2, un déficit d'évaporation moyen compris entre 200 et 250 mm à l'ouest et entre 250 et 300 mm à l'est.

Le scénario A2 qui prévoit les plus fortes concentrations en gaz à effet de serre des trois scénarios SRES étudiés ici n'aurait donc pas pour autant des conséquences dramatiques en termes de sécheresses à moyen terme. Jusqu'aux environs des décennies 2060 et 2070 les sécheresses seraient plus intenses dans le contexte du scénario A1B que dans celui du scénario A2. La différence majeure du scénario A2 concerne l'assèchement des sols de l'ouest de la région qui serait plus intense que celle estimée par les projections des scénarios B1 et A1B à la fin du 21ème siècle. C'est sur les deux dernières décennies du 21ème siècle que les sécheresses modélisées à partir du scénario A2 deviendraient particulièrement intenses. On se rend ainsi compte que jusqu'aux alentours de 2070 les trois scénarios prévoient des tendances, en termes de sécheresses, peu différentes les uns des autres. Les quelques différences observées semblent même parfois contre-intuitives lorsque le scénario B1 prévoit des sécheresses plus intenses que le scénario A1B ou A2. C'est seulement sur les vingt dernières années que les scénarios se distinguent. Sur cette période on retrouve les caractéristiques majeures des scénarios : les sécheresses se trouveraient être plus intenses dans le cas du scénario A2 et moins intenses pour le scénario B1.

Ces résultats révèlent ainsi qu'une augmentation en gaz à effet de serre même modéré (scénario A1B) aurait des conséquences notables sur le climat breton. Les sécheresses gagneraient en intensité au cours du 21ème siècle, pour atteindre régulièrement des seuils encore exceptionnels à l'heure actuelle. Le seuil de déficit d'évaporation de 300 mm qui correspond à l'intensité de la sécheresse de 1976 observée à Rennes, serait ainsi atteint très régulièrement à la fin du 21ème siècle dans le cas des scénarios A1B et A2 pour la partie orientale de la Bretagne.

7.3.2 Suivi du déficit d'évaporation mensuel pour trois scénarios SRES du GIEC, pour quatre stations bretonnes

Quatre points de grille sont étudiés ici afin de suivre plus précisément les tendances régionales qui ressortent de l'analyse des cartes précédentes du déficit d'évaporation estival. Ces points de grille de 8km de côté sont choisis de façon à avoir un point par département, dans l'objectif de confirmer ponctuellement les tendances observées par les cartes de déficit d'évaporation estival, présentées précédemment. Ces points de grille sont également choisis de façon à avoir une occupation du sol agricole diversifiée. Le premier point est situé en Ille-et-Vilaine entre Rennes et la forêt de Paimpont où l'occupation du sol est majoritairement orientée vers la culture de céréales (48.062° N 1.985° W). Le second est situé au centre de la Bretagne, près de Mûr-de-Bretagne dans les Côtes d'Armor, dans une région agricole à dominante céréalière et fourragère (48.202°N 2.970°W). Le troisième point est situé entre deux bois à proximité de Landivisiau dans le Finistère dans un secteur agricole (48.495°N 4.093°W). Le quatrième point est situé au nord-est d'Auray dans le Morbihan, toujours en secteur à dominante agricole (47.689°N 2.952°W).

La figure 7.8 montre l'évolution du déficit d'évaporation mensuel attendu pour le point de grille d'Ille-et-Vilaine d'après les trois scénarios SRES B1, A1B et A2. Les valeurs présentées sont établies de la même manière que pour les cartes présentées en figure 7.7. On est donc face à des valeurs moyennes mensuelles calculées pour quatre périodes de référence : 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099. On remarque, dans un premier temps, que la durée de la saison déficitaire n'évolue pas dans le temps ni en fonction des scénarios. Elle commence en avril avec un léger déficit d'évaporation (inférieur à 5 mm) et se termine en septembre. Au cours du 21ème siècle le déficit d'évaporation mensuel augmenterait progressivement. Pour le mois de juillet, par exemple, on passerait de 60-65 mm en moyenne sur la période 2020-2039 (tous scénarios confondus) à 80-100 mm à la fin du siècle. A la fin de l'été, en septembre, le déficit augmenterait également de 20 mm environ entre les périodes 2020-2039 et 2080-2099. Sur la période 2020-2039 le déficit d'évaporation varie peu d'un scénario à l'autre (maximum 15 mm), tandis que sur la seconde moitié du siècle on peut avoir plus de 20 mm de différence entre deux scénarios. Cela est dû au fait que les scénarios A1B, A2 et B1 prévoient des évolutions de températures assez proches les unes des autres jusque dans les années 2070 environ. Il faut attendre la fin du 21ème siècle pour avoir des différences plus importantes d'un scénario à l'autre.

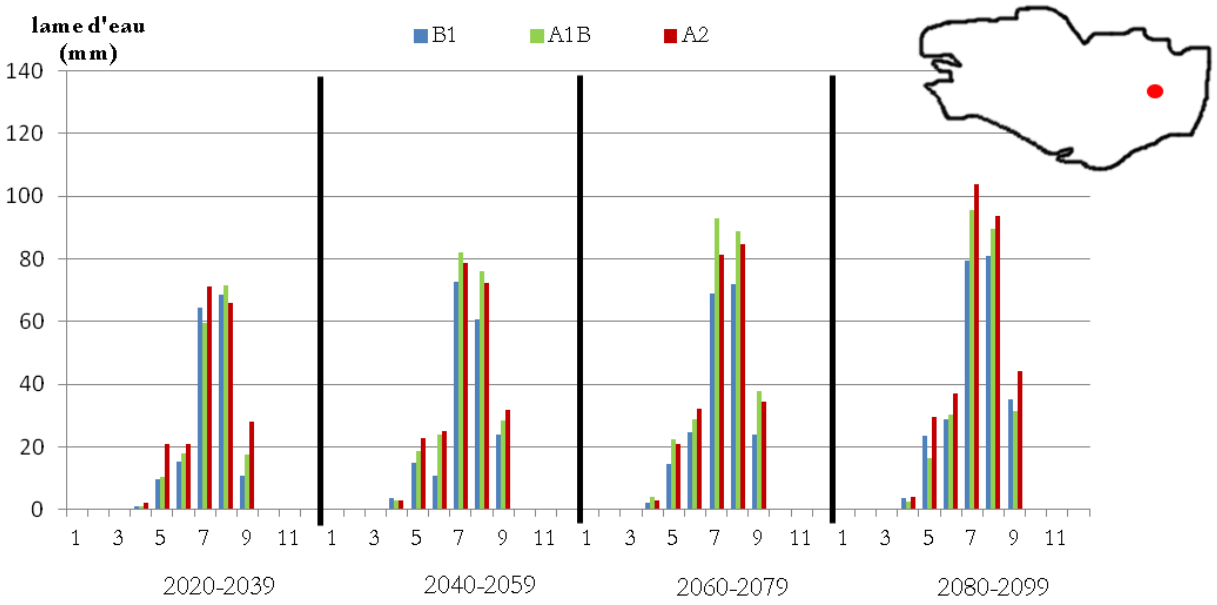


Figure 7.8 Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille d'Ille-et-Vilaine

- occupation du sol : céréales ; taille de RU : 190 mm -

La figure 7.9 montre l'évolution du déficit d'évaporation mensuel attendu pour le point de grille de Centre Bretagne d'après les trois scénarios SRES B1, A1B et A2. En comparant avec le point de grille d'Ille-et-Vilaine on voit que le mois de juin est nettement plus sec en centre Bretagne avec un déficit moyen de 50 mm environ tous scénarios confondus sur la période 2020-2039, contre 20 mm en Ille-et-Vilaine pour cette même période. A la fin du 21ème siècle on pourrait ainsi atteindre un déficit d'évaporation compris entre 60 et 90 mm pour le mois de juin en Centre Bretagne. Pour le mois de septembre les sécheresses pédologiques seraient légèrement plus intenses que celles vécues en Ille-et-Vilaine, puisque le déficit d'évaporation serait de 5 à 10 mm environ supérieur à celui modélisé pour la station d'Ille-et-Vilaine, pour toutes les périodes étudiées. L'augmentation du déficit mensuel au cours du 21ème siècle est notable. Les moyennes mensuelles estivales (de juin à août) seraient comprises entre 50 et 80 mm pour la période 2020-2039, entre 45 et 85 mm pour la période 2040-2059, entre 60 et 100 pour la période 2060-2079 et entre 65 et 120 mm pour la fin du siècle. La comparaison des résultats modélisés pour un point de grille du Centre Bretagne par rapport à un point de grille d'Ille-et-Vilaine montre une saison déficitaire plus précoce en Centre Bretagne qui démarre plus intensément en juin. Globalement le déficit d'évaporation serait plus fort dans le contexte du scénario A2, mais ponctuellement le scénario A1B prévoit des sécheresses plus intenses que le scénario A2.

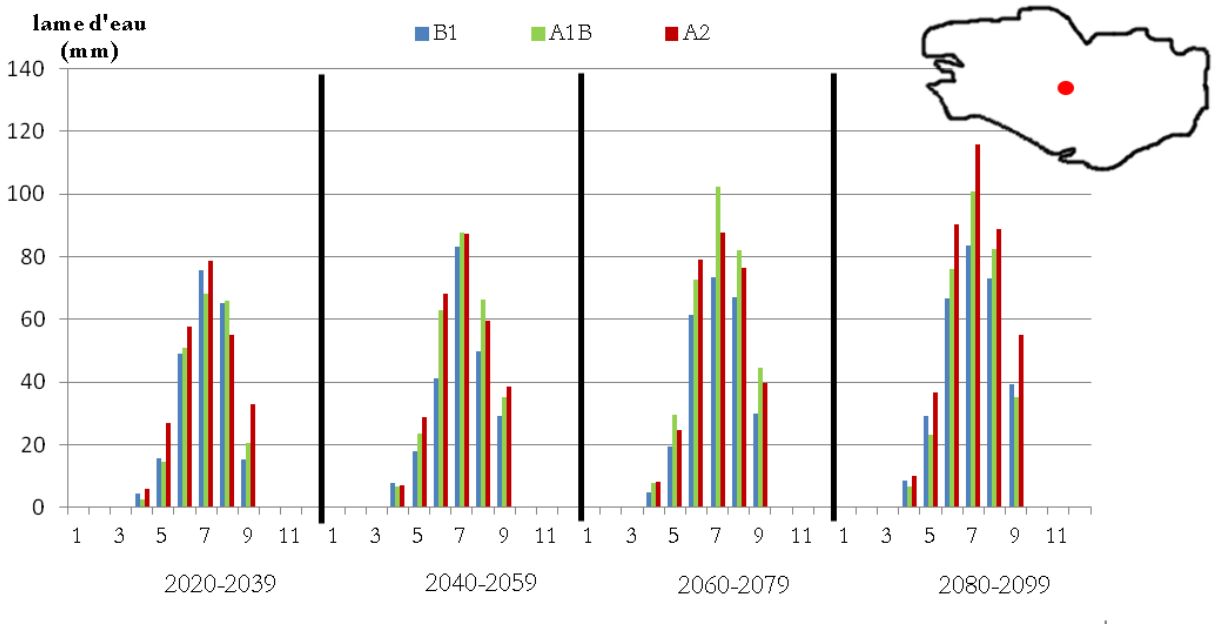


Figure 7.9 Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille de Centre Bretagne
- occupation du sol : céréales et fourrages ; taille de RU : 170 mm -

La figure 7.10 montre l'évolution du déficit d'évaporation mensuel attendu pour le point de grille du Finistère d'après les trois scénarios SRES B1, A1B et A2. Ici le déficit d'évaporation est plus faible que pour les deux autres points de grille, avec un pic en juillet de 60-70 mm sur la période 2020-2039, qui augmenterait progressivement au cours du 21ème siècle pour atteindre sur la période 2080-2099 entre 65 mm selon le scénario B1 et près de 110 mm d'après le scénario A2. Les moyennes mensuelles modélisées pour les mois de juin et août seraient également plus faibles que sur le reste du territoire. Sur la période 2020-2039 par exemple le déficit en juin et août serait de 40 mm environ, puis pour la période 2040-2059 il serait compris entre 40 et 55 mm, sur la période 2060-2079 on aurait 60 mm environ pour les mois de juin et août. Pour la période 2080-2099 on aurait un déficit d'évaporation en juin compris entre 60 et 80 mm, le scénario A2 prévoyant ainsi une sécheresse pédologique nettement plus forte que les deux autres scénarios. Sur cette même période pour le mois d'août les valeurs attendues seraient de 60 mm environ d'après le scénario B1, de 70 mm selon le scénario A1B et 80 mm avec le scénario A2. Au cours de la période 2060-2079 le scénario A1B prévoit des sécheresses plus intenses que le scénario A2. Cependant à la fin du siècle, pour la période 2080-2099, c'est bien dans le contexte du scénario A2 que seraient observées les sécheresses les plus intenses.

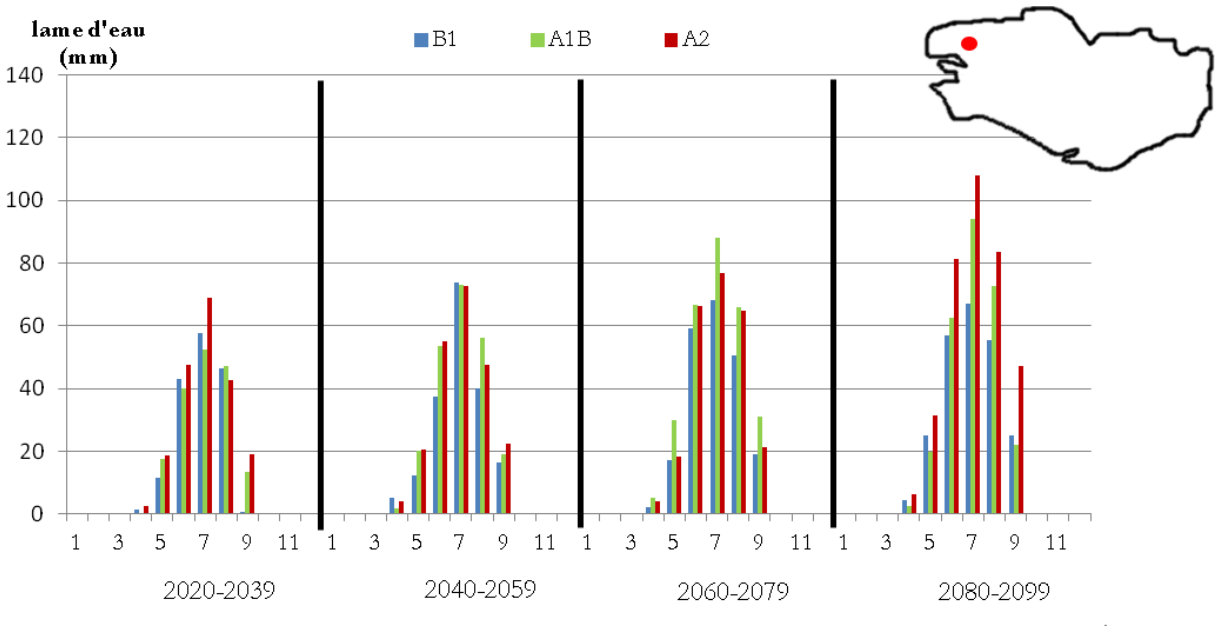


Figure 7.10 Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille du Finistère
- occupation du sol : céréales et fourrages ; taille de RU : 160 mm -

La figure 7.11 montre l'évolution du déficit d'évaporation mensuel attendu pour le point de grille du littoral morbihannais d'après les trois scénarios SRES B1, A1B et A2. On perçoit une nette augmentation des moyennes mensuelles de déficit d'évaporation au cours du siècle. Cette observation concerne principalement les mois de juin, juillet, août et septembre où le déficit mensuel augmente de 20 à 40 mm en 60 ans. Pour le mois de mai l'augmentation est moins marquante. Le déficit d'évaporation prévu par les scénarios A1B et A2 sont assez proches pour les périodes 2040-2059 et 2060-2079. Cependant, au cours de la période 2060-2079 et pour le mois de juillet les sécheresses seraient plus importantes dans le contexte du scénario A1B. Pour autant, pour la période 2080-2099 c'est le scénario A2 qui prédit les sécheresses les plus intenses. Le littoral morbihannais connaitrait les plus forts déficits d'évaporation pour les mois de juillet et août sur la période 2020-2039 par rapport aux autres secteurs de la région Bretagne étudiés ici. A la fin du 21ème siècle ce serait toujours le cas avec un maximum en juillet de 120 mm de déficit, et 100 mm en août, contre 100-110 mm pour les autres régions étudiées en juillet et 80-90 mm en août.

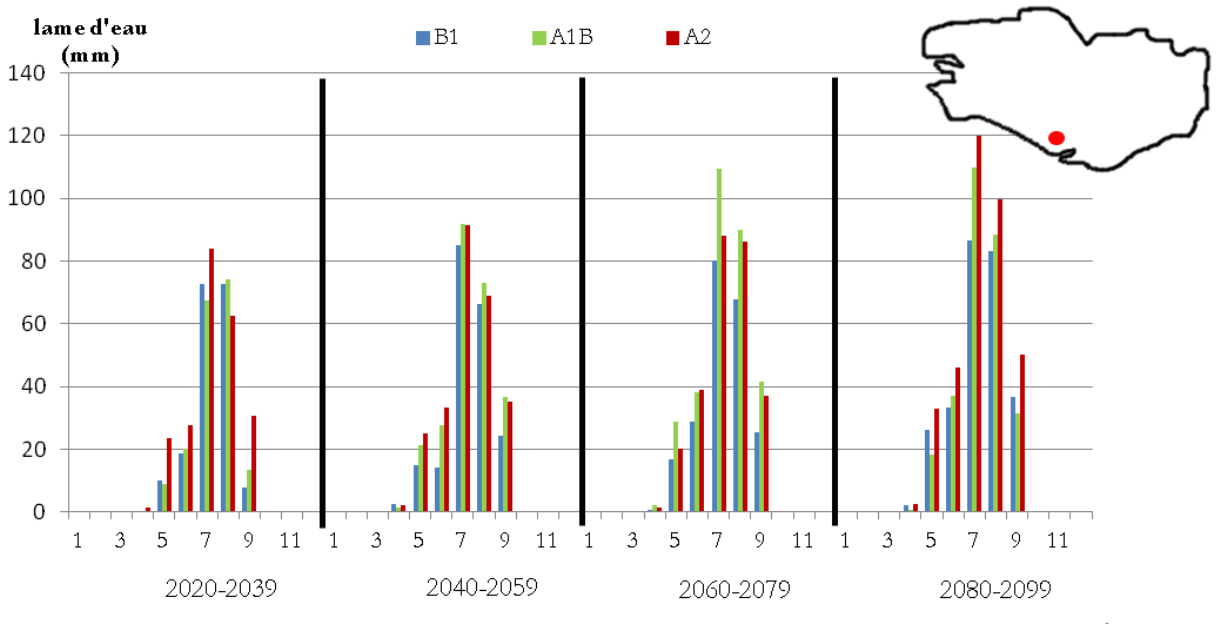


Figure 7.11 Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille du littoral morbihannais
- occupation du sol : céréales et fourrages ; taille de RU : 150 mm -

Ces cartes et graphiques présentant la teneur en eau des sols durant la période estivale mettent bien en évidence l'augmentation des épisodes secs avec le changement climatique en termes de fréquence et d'intensité. Ces résultats peuvent être complétés par le suivi de la recharge hivernale des réservoirs des sols. Les sécheresses passées ont mis en évidence l'importance de la recharge hivernale des réserves hydriques pour lutter contre les sécheresses précoces de printemps. Ce fut notamment le cas en 1976 où le manque de précipitations durant l'hiver 1975-1976 entraina des sécheresses intenses dès le mois de mai.

7.3.3 Suivi de la recharge hivernale pour trois scénarios SRES du GIEC

Le suivi de la recharge hivernale des réserves hydriques a pour objectif de mettre en évidence d'éventuels retards dans la recharge décalant ainsi la date pour laquelle les réservoirs des sols sont remplis à 100 %. Un remplissage moins efficace a des conséquences sur le cycle de l'eau qui se trouve altéré par une réduction de l'écoulement sur une période plus ou moins longue par exemple. Mais il peut également avoir des conséquences à plus long terme. Si l'on cumule une recharge moins efficace des réserves hydriques avec un épuisement printanier ou estival plus intense, cela peut progressivement entraîner une précocité des épisodes secs.

Jusque dans les années 2030 le remplissage des réserves hydriques est complet en décembre, quel que soit le scénario SRES, à la suite d'un automne moyen humide et où la végétation est peu demandeuse en eau. La figure 7.12 regroupe les cartes de taux de remplissage moyens des réserves hydriques (en pourcentage) au mois de décembre, pour les trois périodes suivantes : 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099. Du fait de la diversité des tailles de réserve utile des sols bretons, on présente ici le taux de remplissage et non le remplissage réel en mm. Cela permet de mieux se rendre compte de la teneur en eau des sols. Cependant, la taille réelle du réservoir est

tout de même prise en compte pour l'interprétation des résultats. On peut ainsi voir que dès la période 2040-2059, dans le cas du scénario A2, certains sols profonds du nord et de l'est de la Bretagne ne sont, en moyenne, pas remplis à 100 % en décembre. Pour le scénario A1B il faut réellement attendre la période 2060-2079 pour noter un remplissage moyen incomplet des sols profonds de l'est de la région. La situation est stable pour le scénario A2 entre la période 2040-2059 et la période 2060-2079, avec 5 % du territoire où les réservoirs ne sont pas entièrement remplis. Tandis que dans le contexte du scénario A1B une faiblesse réelle de la recharge automnale est perçue sur la période 2060-2079 pour près de 15 % des sols du territoire. Ainsi, les ressources en eau des sols bretons seraient plus faibles sur la période 2060-2079 dans le contexte du scénario A1B par rapport au scénario A2. Sur cette même période on a pu voir précédemment, avec les cartes de déficit d'évaporation par exemple, que l'assèchement estival était également plus important dans le cas du scénario A1B que dans celui du scénario A2. On peut ainsi comprendre que l'augmentation de l'intensité des épisodes secs a des conséquences notables sur l'efficacité de la recharge automnale des réserves hydriques des sols. La situation évolue plus franchement entre la période 2060-2079 et 2080-2099 dans le cas des scénarios A1B et A2. A la fin du 21ème siècle, dans le contexte du scénario A1B, plus d'un quart des sols de la Bretagne auraient en moyenne des réserves hydriques remplies incomplètement en décembre, soit 10 % de plus que sur la période 2060-2079. Il faudrait attendre le mois de février pour que tous les sols aient leurs réserves hydriques entièrement rechargées en eau en moyenne. Dans le cas du scénario A2 plus d'un tiers du territoire breton aurait en moyenne des sols partiellement remplis en décembre sur la période 2080-2099. Il faudrait attendre le mois de février pour avoir une recharge complète des sols sur près de 95 % du territoire breton. Cela sous-entend donc que pour 5 % du territoire, en moyenne, les réserves hydriques ne seraient pas entièrement rechargées à l'approche du printemps, au moment de la reprise de la végétation.

On aurait donc un risque d'avoir, au printemps, un début de consommation de l'eau contenue dans les sols par la végétation, alors que ceux-ci n'ont pas pu être rechargés complètement durant l'hiver. Même si les sols concernés sont profonds et ont donc de grandes réserves utiles, de l'ordre de 200 mm environ, des conséquences sur l'intensité des sécheresses estivales peuvent être ressenties. Cette recharge incomplète peut également entrainer des retards des écoulements hydrologiques. Ce risque, qui serait épisodique jusque dans les années 2070, deviendrait ainsi structurel à partir des années 2080.

Pour le scénario B1, plus optimiste que les deux autres scénarios, il n'y a pas de problèmes de remplissage de réserves hydriques des sols au cours du 21ème siècle. Seul 1 % du territoire aurait des réservoirs où le remplissage serait incomplet à l'horizon 2100.

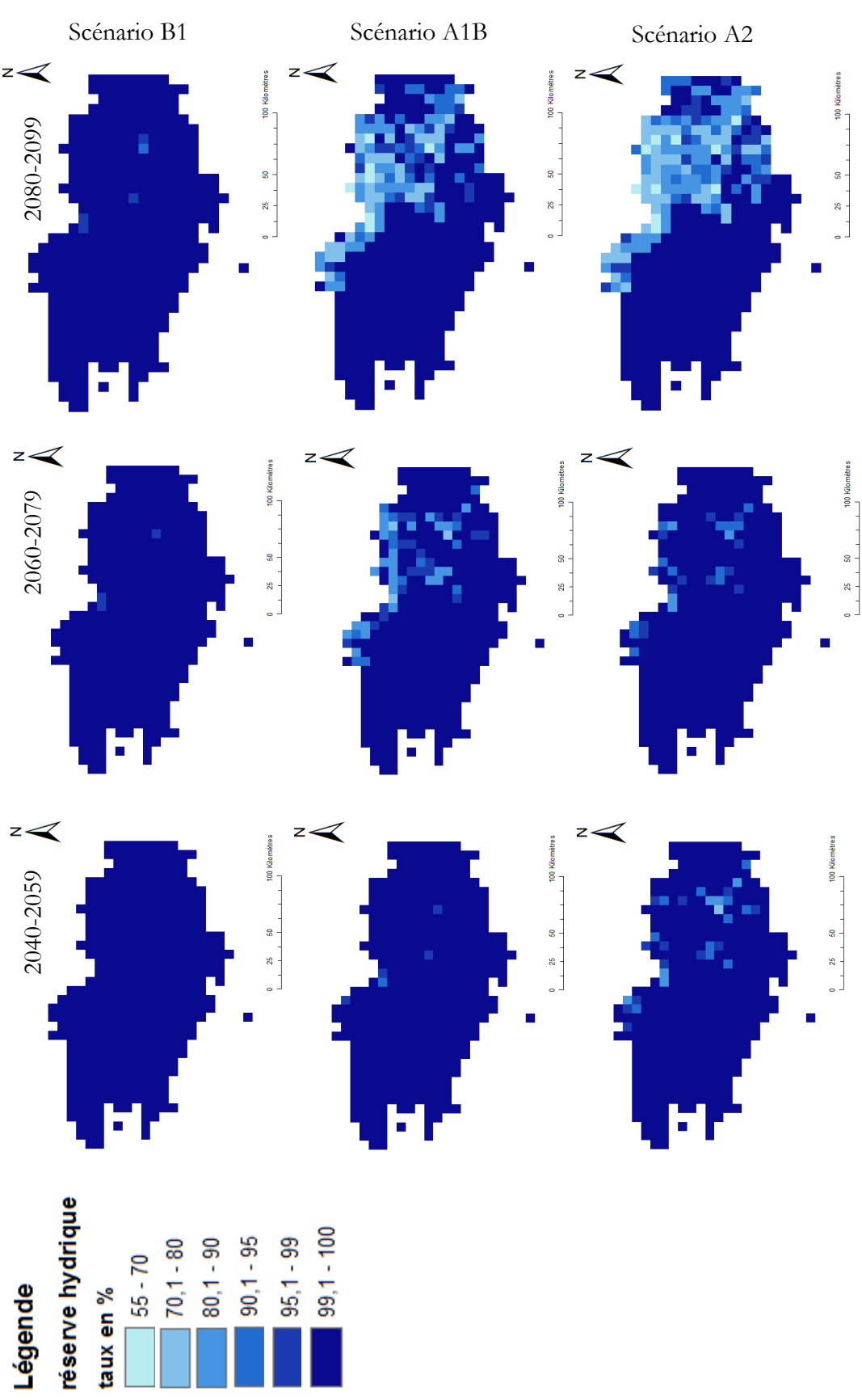


Figure 7.12 Suivi du remplissage des réservoirs hydriques bretons en décembre selon 3 scénarios du GIEC sur trois périodes moyennes du 21ème siècle - Résolution 8 km, RU variable, OS : CORINE Land Cover

7.4 Tendances moyennes journalières de l'évolution des sécheresses à la résolution kilométrique

7.4.1 Suivi du déficit d'évaporation estival selon trois scénarios SRES

Cette partie présente les résultats du bilan hydrique journalier de résolution kilométrique. La figure 7.13 montre ainsi les résultats du bilan hydrique pour le total de déficit d'évaporation sur la période du 1er juin au 31 août. Si le déficit moyen à l'échelle du territoire est compris entre 200 et 300 mm, on perçoit globalement des différences intra-régionales, l'ouest étant légèrement moins sec que l'est de la région. Les valeurs moyennes attendues selon les scénarios B1, A1B et A2 peuvent être comparées aux valeurs observées actuellement en Bretagne. A Rennes, durant le 20ème siècle, le déficit d'évaporation a ainsi principalement varié entre 150 et 200 mm. Cependant lors de sécheresses très intenses un déficit plus important a pu être observé. A Rennes on a ainsi mesuré 300 mm de déficit en 1976 (Lamy et Dubreuil, 2010). Ce seuil de 300 mm de déficit d'évaporation peut servir de référence à l'analyse du déficit d'évaporation estival moyen attendu au 21ème siècle d'après les trois scénarios SRES (figure 7.13).

En ce qui concerne le scénario B1 le déficit d'évaporation serait compris entre 105 et 150 mm sur une majorité du territoire au cours de la période 2020-2039. La région Vannes-Redon, le nord des Côtes-d'Armor et l'ouest de l'Ille-et-Vilaine auraient un déficit légèrement plus élevé, compris entre 150 et 200 mm. Pour la période 2040-2059 l'ouest de la région serait légèrement moins sec que durant la période précédente. A l'est on note peu d'évolution du déficit par rapport aux décennies 2020-2039. Au cours de la période suivante, 2060-2079, les régions où le déficit serait inférieur à 100 mm seraient plus réduites, la moyenne régionale serait comprise entre 150 et 200 mm. On y observe également des sols où le déficit serait supérieur à 250 mm, notamment dans le Morbihan. Pour la fin du 21ème siècle les modèles prévoient deux tendances en termes de sécheresse à l'échelle de la Bretagne. A l'ouest, le déficit d'évaporation serait modéré, de l'ordre de 100 à 150 mm. A l'est, le déficit serait plus élevé, compris entre 200 et 250 mm. Sur le littoral sud on pourrait même atteindre un déficit compris entre 250 et 300 mm. Dans le contexte du scénario B1 les sécheresses augmenteraient donc progressivement au cours du 21ème siècle en Bretagne. La moyenne régionale passerait ainsi de 112 mm de déficit d'évaporation au début du 21ème siècle à 134 mm à la fin.

Le scénario A1B serait, sur la période 2020-2039, légèrement plus optimiste que le scénario B1 à l'ouest de la Bretagne et plus pessimiste à l'est. Le déficit moyen régional serait du même ordre que dans le cas du scénario B1. Le déficit d'évaporation serait inférieur à 100 mm sur 40 % du territoire, principalement dans le Finistère et en Ille-et-Vilaine. Au cours de la période 2040-2059, le scénario A1B prévoit des sécheresses plus intenses que le scénario B1 sur près de 95 % du territoire. La moyenne régionale augmenterait par rapport à la période 2020-2039 pour atteindre 142 mm. Ainsi un plus grand nombre de sols auraient un déficit d'évaporation supérieur à 200 mm, notamment dans la région vannetaise et sur le littoral des Côtes d'Armor et d'Ille-et-Vilaine. Sur la période 2060-2079 le déficit d'évaporation continue d'augmenter progressivement. La

majeure partie du territoire connaitrait un déficit compris entre 110 et 210 m. La moyenne de la région serait de 163 mm environ. Le seuil de 300 mm serait atteint et dépassé à Belle-Ile. Durant la période 2080-2099 les moyennes régionales seraient similaires à celles de la période 2060-2079. Pour autant le déficit d'évaporation n'évolue pas partout de la même façon à la fin du 21ème siècle. La moitié nord de la Bretagne connaitrait un déficit d'évaporation encore plus important qu'au cours de la période 2060-2079. Tandis que la moitié sud verrait le déficit d'évaporation diminuer légèrement entre les décennies 2060-2079 et 2080-2099. On observe également une distinction entre l'est et l'ouest de la région. Les valeurs de déficit d'évaporation étant plus élevées dans la moitié est du territoire, 190-250 mm, qu'à l'ouest où le déficit varierait entre 120 et 190 mm. Cette tendance rappelle celle observée avec le bilan mensuel en figure 7.5. Dans le contexte du scénario A1B on aurait donc une évolution de l'intensité des sécheresses progressive au cours du 21ème siècle.

Le scénario A2, bien que le plus pessimiste des trois scénarios étudiés, prédit une situation peu différente des scénarios B1 et A1B au cours de la période 2020-2039. Seul le nord du Finistère et l'est de l'Ille-et-Vilaine seraient plus secs dans le cas du scénario A2. Le reste de la région serait légèrement plus humide que la situation modélisée dans le contexte du scénario B1. La comparaison entre les scénarios A1B et A2 sur cette même période montre que l'ouest de la Bretagne connaitrait des sécheresses plus intenses dans le contexte du scénario A2 tandis que pour l'est de la région c'est le scénario A1B qui prévoit les sécheresses plus intenses. Au cours de la période suivante, 2040-2059, les différences spatiales sont plus distinctes et la tendance moyenne à l'échelle du territoire est nettement plus sèche que durant la période 2020-2039. Le déficit d'évaporation moyen est compris entre 120 et 220 mm. Les sols où le déficit d'évaporation est inférieur à 100 mm sont moins nombreux que sur la période 2020-2039. Le sud-est de la région est plus sec qu'au cours de la période précédente, avec un déficit d'évaporation localement supérieur à 220 mm. La période 2060-2079 serait globalement moins sèche que la précédente, avec un déficit moyen régional de 145 mm contre 163 mm en moyenne durant les décennies 2040-2059. L'assèchement serait nettement plus important à la fin du 21ème siècle avec une moyenne régionale de 193 mm. Le déficit dépasserait les 300 mm à Belle-Ile et localement dans la région de Vannes-Redon. Le reste du territoire connaitrait un déficit d'évaporation estival moyen compris entre 150 et 200 mm dans le Finistère. Le reste de la région aurait un déficit principalement compris entre 200 et 300 mm. Le scénario A2 prévoit donc les sécheresses les plus intenses en Bretagne parmi les trois scénarios étudiés ici mais surtout en fin de 21ème siècle. Cette plus grande intensité des sécheresses prévue par le scénario A2 pour la période 2080-2099 est due à des précipitations globalement plus faibles que dans le cas des scénarios A1B et B1 (pour la même période).

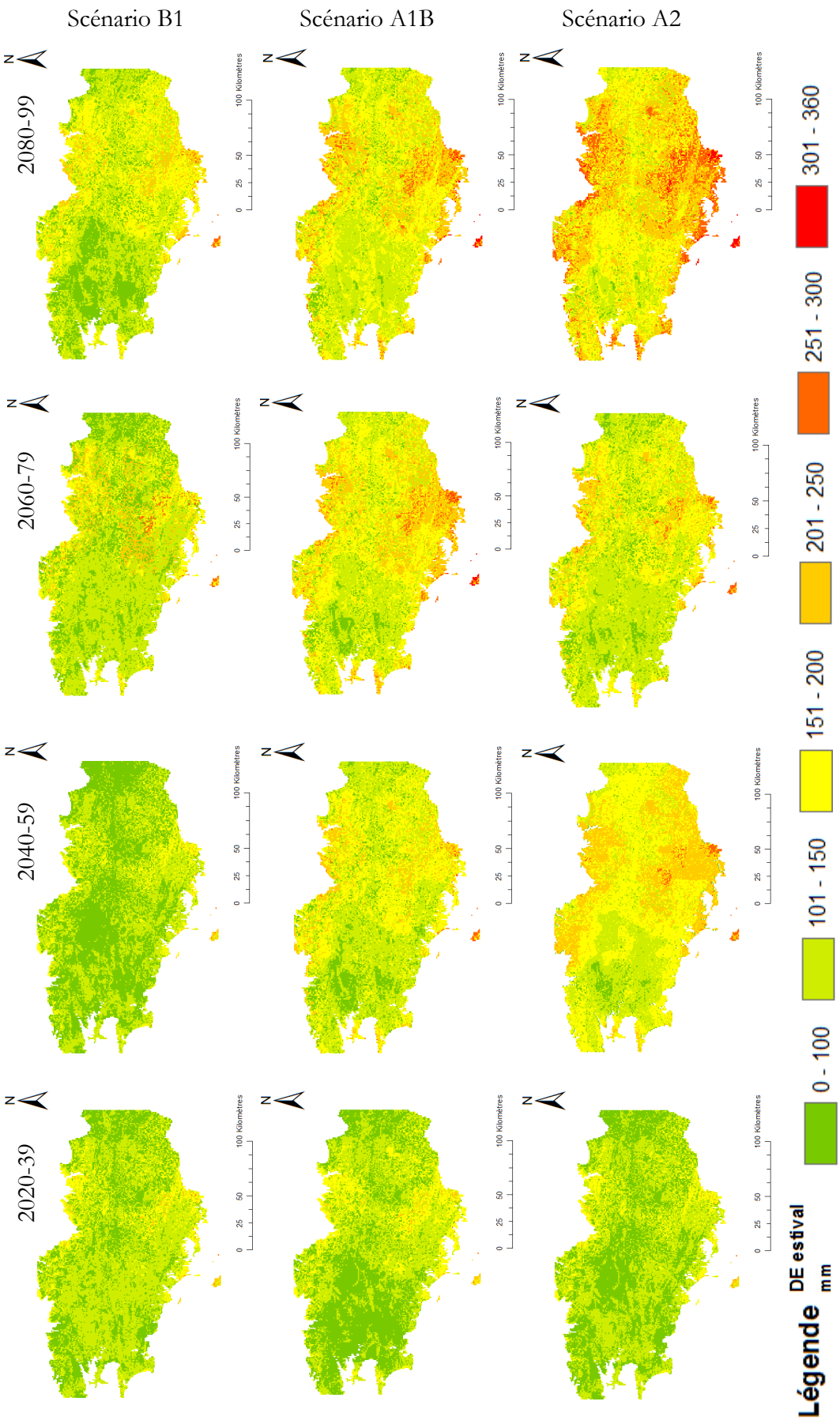


Figure 7.13 Evolution du déficit d'évaporation estival (juin à août) selon 3 scénarios du GIEC sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle - Résolution 1 km, RU variable, OS : Lecerf (2008) -

Ces tendances sont à considérer au vu de l'analyse effectuée dans le chapitre 4 où l'on compare les sorties de modèles avec l'observé. Cette analyse a permis de mettre en évidence des écarts plus ou moins grands entre les données modélisées et observées, selon les secteurs considérés en Bretagne. Si les différences de déficit d'évaporation sont inférieures à 10 mm à Rostrenen, Belle-Ile, Brest et Lorient, le modèle surestime le déficit de près de 30 mm à Dinard et Bréhat et le sous-estime de 20 mm environ à Rennes. Les conclusions de cette comparaison doivent nous amener, ici, à considérer que le déficit d'évaporation est probablement surestimé sur le littoral nord et sous-estimé dans les terres, plus particulièrement en Ille-et-Vilaine. A l'ouest de la région le modèle semble présenter moins de biais.

On peut également confronter les tendances estivales aux valeurs annuelles moyennes de la période 2080-2099 (figure 7.14) pour resituer l'aléa sécheresse par rapport aux sécheresses de référence que sont celles de 1976 et 1989. On peut ainsi voir que le seuil de 300 mm, correspondant à la sécheresse de 1976 telle qu'elle fût ressentie à Rennes toutes choses égales par ailleurs, serait commun sur une grande partie du territoire dans le cas du scénario A2. Pour les scénarios B1 et A1B, des sécheresses aussi intenses impacteraient régulièrement le centre et l'est de la Bretagne, tandis que dans l'ouest cette intensité serait plus rarement atteinte. Le seuil de 400 mm, correspondant à la sécheresse de 1989 telle qu'elle fût ressentie à Rennes, toutes choses égales par ailleurs, ne serait jamais atteint dans le cas du scénario B1. Dans le cas du scénario A1B ce seuil serait atteint seulement sur le littoral nord et sud et en quelques endroits du Morbihan. D'après le scénario A2 ce seuil serait atteint au niveau des sols profonds du littoral nord, dans la région Vannes-Redon et sur le littoral sud.

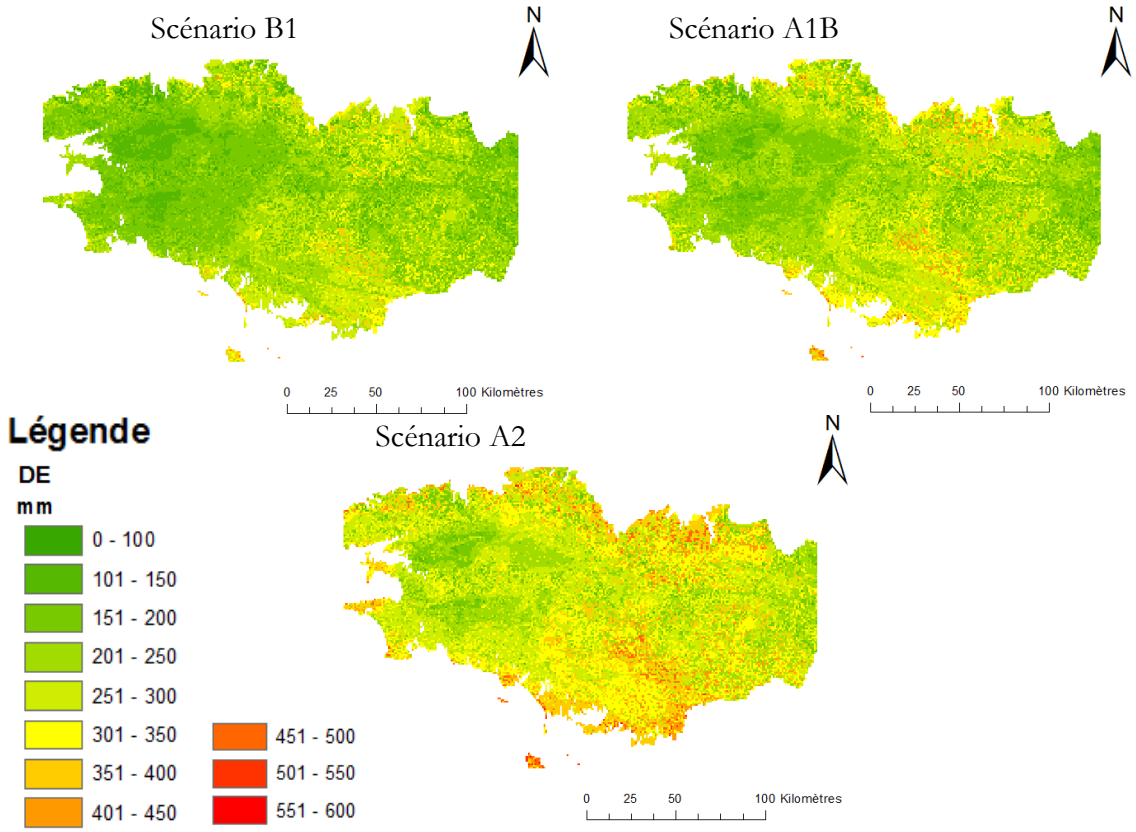


Figure 7.14 Déficit d'évaporation annuel selon 3 scénarios du GIEC pour la période 2080-2099 - Résolution 1 km, RU variable, OS : Lecerf (2008) -

Les cartes de déficit d'évaporation estival de résolution kilométrique sont comparables avec celles de la figure 7.7, qui présentent le déficit obtenu à partir d'un bilan hydrique de résolution spatiale de 8 km. Cela permet ainsi de mettre en évidence les différences entre les modèles liés aux différences de précision tant spatiale que temporelle. Les sorties des modèles mensuels et journaliers diffèrent ainsi principalement sur l'intensité estimée du déficit d'évaporation. En termes de répartition spatiale, les deux types de bilans hydriques prédisent sensiblement le même comportement. Ils distinguent, en effet, tous les deux une moitié du territoire plus humide à l'ouest d'un axe Saint Brieuc - Vannes et une moitié plus soumise aux sécheresses à l'est de cet axe. Les résultats des deux types de bilans hydriques prévoient également que le littoral sud serait globalement plus sensible aux sécheresses que le reste du territoire.

En ce qui concerne l'intensité des sécheresses estimée par les différents types de bilan hydrique, le bilan journalier prévoit au maximum un déficit de 360 mm sur les mois de juin, juillet et août, alors que le bilan mensuel prédit que le déficit atteindrait au maximum 460 mm. Ces différences sont liées à la méthode de calcul du bilan hydrique mensuel. Pour ce type de bilan le déficit d'évaporation est obtenu à partir de valeurs moyennes mensuelles de précipitations et évapotranspiration potentielle. Pour le bilan journalier, le déficit d'évaporation est calculé d'après les valeurs journalières de précipitations et évapotranspiration potentielle. Ainsi, le déficit d'évaporation mensuel ne correspond pas à la moyenne mensuelle du déficit d'évaporation journalier. De plus, en faisant la moyenne mensuelle on s'affranchit de la variabilité journalière qui peut induire une surestimation du déficit d'évaporation. Cette variabilité journalière peut être appréciée avec les figures 7.15 et 7.16 qui présentent les cartes journalières de précipitations en mm (colonne A), de déficit d'évaporation en mm (colonne B) et de réserve hydrique en pourcentage (colonne C) pour 11 jours du mois de juillet sur une année moyenne de la période 2020-2039 d'après le scénario A1B. La figure 7.15 regroupe les cartes du 17 au 22 juillet et la figure 7.16 celles du 23 au 27 juillet. Sur cette période on observe des variations journalières de précipitations impactant directement le déficit d'évaporation. Les 18, 24 et 27 juillet les précipitations sont élevées ce qui entraine un faible déficit d'évaporation. Tandis que les faibles précipitations du 22 et du 25 juillet ont pour conséquence un déficit d'évaporation plus important. Les conséquences sur la réserve hydrique sont moins nettes. On observe tout de même une tendance à l'assèchement sur les 2/3 est du territoire. Le Finistère est globalement plus humide que le reste de la Bretagne.

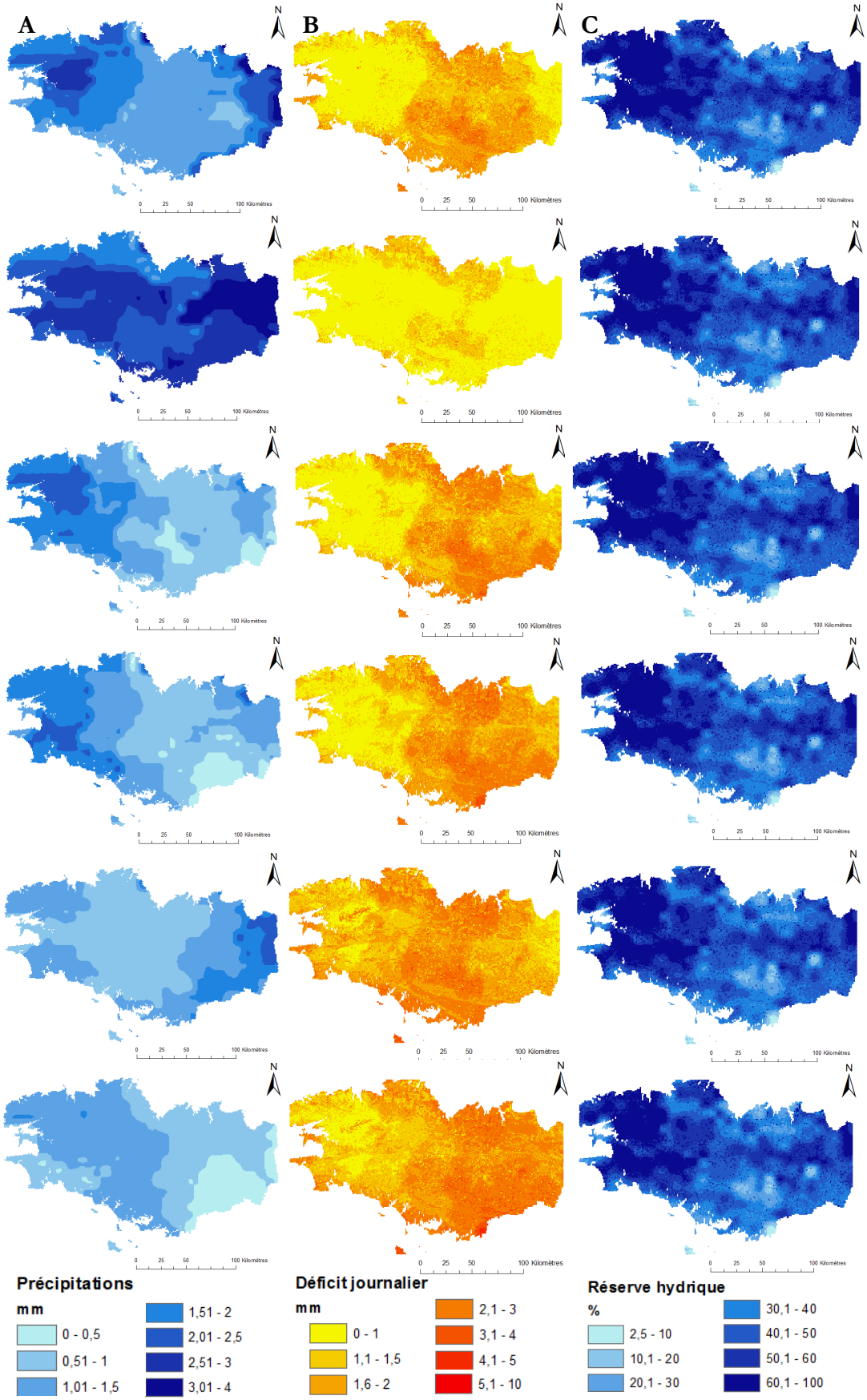


Figure 7.15 Evolution journalière des précipitations (colonne A), du déficit d'évaporation (colonne B) et de la réserve hydrique (colonne C) au cours du mois de juillet, du 17 au 22 juillet, selon le scénario A1B du GIEC sur la période 2020-2039 - Résolution 1 km, RU variable, OS : Lecerf (2008) -

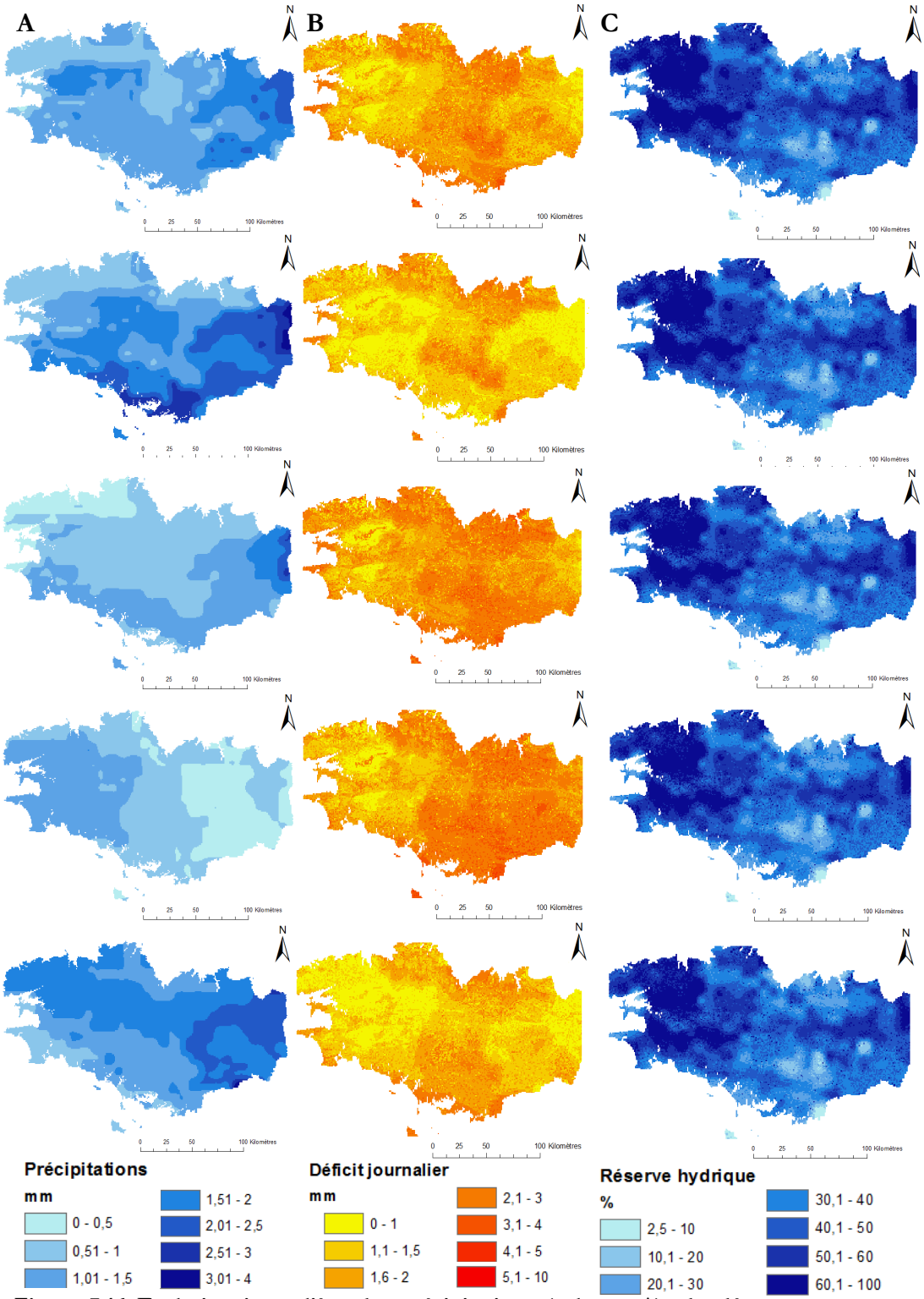


Figure 7.16 Evolution journalière des précipitations (colonne A), du déficit d'évaporation (colonne B) et de la réserve hydrique (colonne C) au cours du mois de juillet, du 23 au 27 juillet, selon le scénario A1B du GIEC sur la période 2020-2039 - Résolution 1 km, RU variable, OS : Lecerf (2008) -

7.4.2 Variations journalières du DE pour quelques stations bretonnes

Quatre stations sont étudiées afin de suivre les tendances régionales qui ressortent de l'analyse des cartes précédentes du déficit d'évaporation estival. Chacune des stations correspond à un point de grille désagrégé à 1km, selon la même approche que celle développée dans la partie 7.3.2 de ce chapitre, toutes caractérisées par une utilisation du sol à vocation agricole. Le premier point de grille est situé en Ille-et-Vilaine, entre Rennes et la forêt de Paimpont (48.062° N 1.985° W). Le second est situé au centre de la Bretagne, dans les Côtes d'Armor (48.202°N 2.970°W). Le troisième point de grille se trouve à proximité de Landivisiau dans le Finistère (48.495°N 4.093°W). Le quatrième point de grille se situe au nord-est d'Auray dans le Morbihan (47.689°N 2.952°W). Pour chacun de ces points le déficit d'évaporation moyen journalier est présenté d'après les trois scénarios SRES (B1, A1B et A2) et pour les quatre périodes du 21ème siècle.

La figure 7.17 présente l'évolution du déficit d'évaporation attendue pour un point de grille d'Ille-et-Vilaine et des Côtes d'Armor. En ce qui concerne le point de grille d'Ille-et-Vilaine (figure 7.17 haut) on perçoit, dans un premier temps, une augmentation du déficit d'évaporation au cours du 21ème siècle pour les scénarios A1B et B1. Le scénario A2 prédisant un déficit maximal plus faible sur la période 2060-2079 par rapport aux périodes 2040-2059 et 2080-2099. Au cours de la première période, 2020-2039, le déficit maximal serait de l'ordre de 150 mm pour les 3 scénarios SRES. Puis, pour les autres périodes, le déficit pourrait atteindre des valeurs comprises entre 150 et 250 mm, selon les scénarios SRES. Au début du 21ème siècle le scénario A2 prédit un déficit plus élevé que le scénario B1, prédisant lui-même un déficit supérieur à celui du scénario A1B. Pour la période suivante, 2040-2059, chacun des trois scénarios étudiés prédit une évolution du déficit d'évaporation différente. Jusqu'au mois de mai, sur l'amorce de la saison déficitaire, c'est le scénario B1 qui prévoit l'intensité de déficit la plus importante. A partir de début mai le déficit d'évaporation augmente très nettement dans le contexte du scénario A2. Pour les scénarios A1B et B1 le déficit est plus élevé d'après le scénario B1 jusqu'en juillet, puis la situation s'inverse et le déficit est supérieur dans le cas du scénario A1B. Pour cette période les écarts entre scénarios sont assez importants. Cette situation ne dure pas puisque lors de la période 2060-2079 les écarts entre scénarios sont à nouveau plus réduits. L'évolution du déficit d'après le scénario B1 conduirait tout de même à un déficit maximal inférieur aux deux autres scénarios, de l'ordre de 50 mm. A la fin du siècle, pour la période 2080-2099, le déficit d'évaporation attendu évoluerait de la même manière selon les trois scénarios jusqu'en juin. Puis, le déficit augmenterait fortement dans le cas du scénario A2 pour atteindre 250 mm fin septembre ; dans le cas du scénario A1B l'augmentation plus modérée conduirait à un déficit maximal de 220 mm. Le scénario B1 prédit une augmentation encore plus modérée avec un déficit maximal de 190 mm à la fin du mois de septembre.

Le second point de grille présenté ici, situé dans les Côtes d'Armor, aurait également un déficit d'évaporation maximal compris entre 150 mm et 250 mm (figure 7.17 bas). Cependant on n'observe pas les mêmes variations que pour le point de grille d'Ille-et-Vilaine, où il y avait une augmentation entre la première période et les suivantes pour les scénarios A1B et B1. Pour le point de grille des Côtes d'Armor les trois scénarios prévoient des tendances d'évolution

différentes. Le scénario A2 prévoit, comme en Ille-et-Vilaine, un déficit maximal plus faible pour la période 2060-2079 que pour les périodes 2040-2059 et 2080-2079. Dans le cas du scénario A1B on aurait une augmentation progressive jusque dans les années 2070, suivie d'une légère diminution pour la période 2080-2099. Le scénario B1 prévoit quant à lui une augmentation progressive du déficit au cours du 21ème siècle. Pour la période 2020-2039 le déficit d'évaporation est relativement identique entre les scénarios. Cependant, le scénario A1B prévoit un déficit légèrement plus faible que les autres scénarios entre les mois de mai et juillet. Le déficit augmenterait progressivement et de manière modérée. On aurait ainsi un déficit d'évaporation de 50 mm au début du mois de juin, 100 mm à la fin du mois de juillet et presque 150 mm à la fin du mois de septembre. Pour la période suivante, 2040-2059, les trois courbes se distinguent assez rapidement : le déficit d'évaporation serait plus important dans le cas du scénario A2 avec 245 mm au maximum, il serait légèrement inférieur dans le contexte du scénario A1B avec 200 mm au plus fort de l'été et encore plus faible d'après le scénario B1 où le maximum serait de 145 mm. Le comportement du déficit d'évaporation serait assez similaire d'un scénario à l'autre au cours de la période 2060-2079. Les courbes des scénarios A2 et B1 s'entremêlent jusqu'en juin, puis ce sont les courbes des scénarios A2 et A1B qui se chevauchent durant les mois d'août et septembre. Au maximum on aurait, pour les deux scénarios A2 et A1B, 220 mm de déficit pour cette station des Côtes d'Armor. Le scénario B1 prévoit une augmentation plus régulière du déficit d'évaporation amenant un déficit maximal de 170 mm à la fin de la saison déficitaire. Sur la dernière période du 21ème siècle, 2080-2099, les scénarios A1B et B1 prévoient un comportement du déficit d'évaporation similaire. On aurait ainsi un déficit augmentant légèrement au début de la saison déficitaire, conduisant à un déficit de 50 mm à la fin du mois de mai. Puis, à partir du mois de juin, l'augmentation est plus rapide et on atteindrait 200 mm de déficit à la fin du mois de septembre. Le scénario A2 prévoit un déficit sensiblement identique aux deux autres scénarios jusqu'au mois de juin. A partir du mois de juillet le déficit augmenterait très nettement. On atteindrait ainsi les 200 mm de déficit d'évaporation dès le début du mois d'août. A la fin du mois de septembre, du fait d'une augmentation toujours marquée, le déficit maximal serait de l'ordre de 280 mm.

Pour la troisième station étudiée ici, située dans le Finistère, l'évolution du déficit d'évaporation prévue par les trois scénarios SRES est présentée par la figure 7.18 (haut). Au cours de la première période, 2020-2039, les scénarios A2 et B1 prévoient un déficit plus important que le scénario A1B. De plus, ces scénarios (A2 et B1) prévoient une augmentation homogène du déficit d'évaporation que l'on peut remarquer par les courbes qui se trouvent confondues. Les courbes s'entrecroisent du fait d'une augmentation plus rapide du déficit sur quelques courtes périodes. A la fin de l'été, le déficit d'évaporation atteindrait 145 mm d'après les scénarios B1 et A2 et 110 mm selon le scénario A1B. Ces valeurs maximales de déficit d'évaporation seraient les plus faibles du 21ème siècle. Au cours des périodes suivantes les trois scénarios prévoient des déficits d'évaporation compris entre 175 et 255 mm. Pour autant on note tout de même un déficit maximal identique entre les périodes 2020-2039 et 2040-2059 pour le scénario B1. Durant la période 2040-2059, le scénario A2 prévoit un démarrage de la saison déficitaire légèrement plus précoce que les autres scénarios. Pour autant, le scénario A1B prévoit un comportement presque

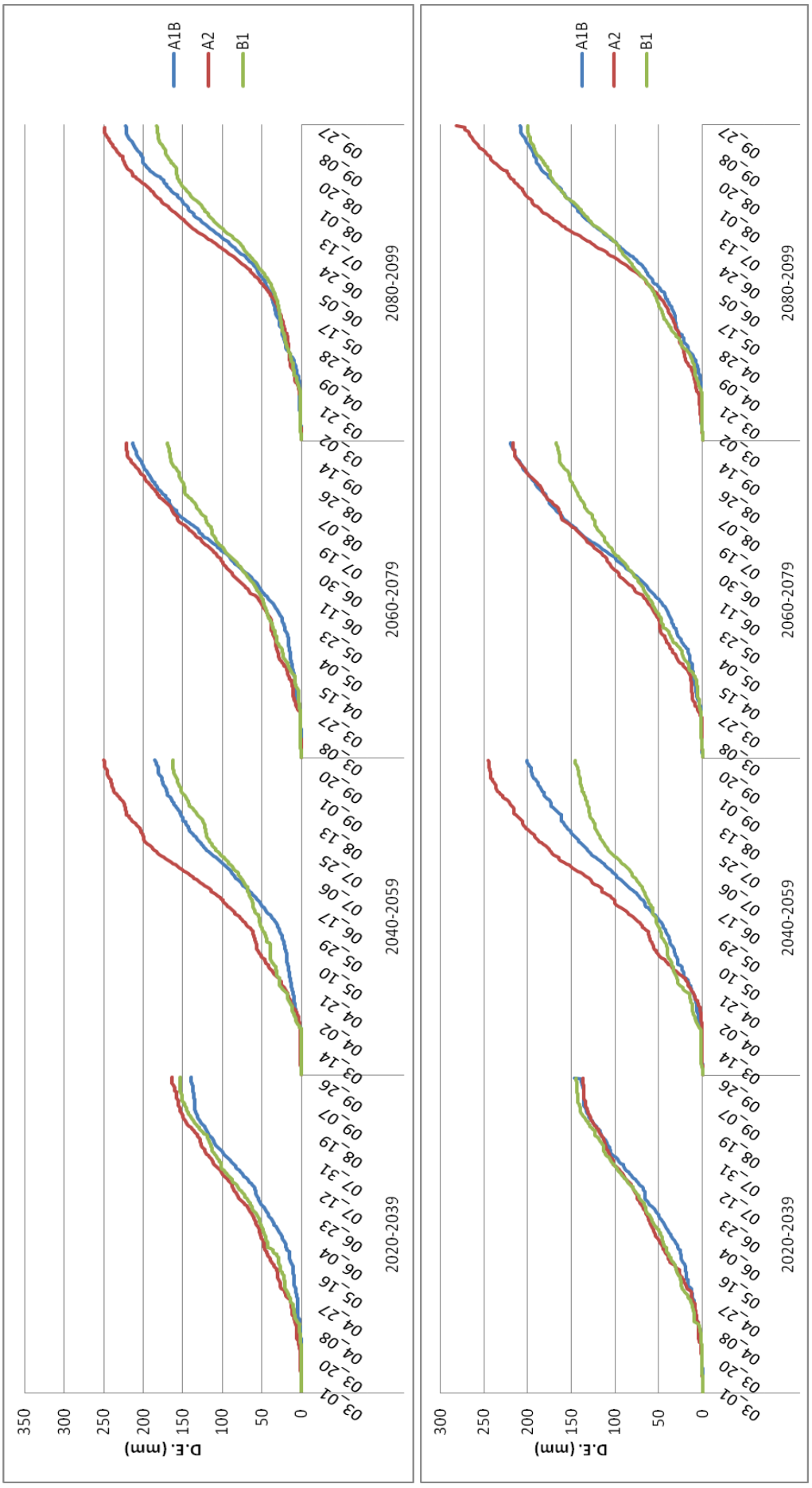


Figure 7.17 Evolution du déficit d'évaporation journalier pour une station d'Ille-et-Vilaine (haut) et de Côtes d'Armor (bas) sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle, d'après trois scénarios du GIEC

identique du déficit d'évaporation jusqu'au début du mois de juin. Le déficit d'évaporation serait plus faible d'après le scénario B1. A partir de la mi-juin le scénario A2 prévoit une augmentation du déficit suffisamment importante pour dépasser les valeurs prévues par le scénario A1B, elles-mêmes supérieures à celles du scénario B1. On obtiendrait ainsi un déficit maximal de 200 mm d'après le scénario A2, 175 mm pour le scénario A1B et 135 mm dans le contexte du scénario B1. Durant la période 2060-2079 les trois scénarios prévoient sensiblement le même comportement moyen en termes de déficit d'évaporation. Le déficit d'évaporation simulé dans le contexte du scénario B1 évoluerait de manière quasiment identique au scénario A2. Cependant, au début du mois d'août le déficit augmenterait plus faiblement d'après le scénario B1 conduisant à un déficit maximal de 175 mm contre 190 mm d'après le scénario A2. Dans le contexte du scénario A1B le déficit d'évaporation serait plus faible que pour les deux autres scénarios durant les mois de juin et juillet. Cependant, on note une augmentation plus marquée à partir du mois d'août, permettant de rattraper les tendances du scénario A2 avec un déficit maximal de 190 mm. A la fin du siècle, durant la période 2080-2099, les trois scénarios prédisent des valeurs de déficit d'évaporation sensiblement identiques jusqu'à la fin du mois de juin. Par la suite, le scénario A2 prévoit une augmentation du déficit plus importante, amenant un déficit maximal de 255 mm. D'après le scénario A1B, le déficit maximal serait de 195 mm et d'après le scénario B1 il serait de 175 mm.

Le comportement du déficit d'évaporation de la quatrième et dernière station étudiée, située dans le Morbihan, est présenté par la figure 7.18 (bas). Des quatre stations suivies ici c'est celle qui présente la plus nette augmentation du déficit d'évaporation estival au cours du 21ème siècle avec des valeurs comprises entre 170 mm environ au début du siècle et 260 mm à la fin. Durant la période 2020-2039 le déficit d'évaporation serait sensiblement identique dans le cas des scénarios A2 et B1, avec un déficit maximal de 170 mm. Le scénario A1B prévoit des valeurs plus modérées, de l'ordre de 160 mm à la fin de l'été. Au cours de la période 2040-2059 les scénarios A1B et B1 prédisent sensiblement la même évolution du déficit d'évaporation et l'on atteindrait à la fin de l'été 180 mm (scénario B1) et 200 mm (scénario A1B) de déficit. Le scénario prédit une augmentation du déficit nettement plus importante à partir du mois de juin, conduisant à un déficit maximal de 310 mm. Durant la période 2060-2079, le scénario B1 prédit un déficit d'évaporation plus important jusqu'au mois de juin où la situation s'inverse et c'est le scénario A1B qui prévoit le plus fort déficit d'évaporation sur cette période. On obtiendrait ainsi un déficit de 270 mm dans le cas du scénario A1B, 225 mm pour le scénario A2 et 195 mm d'après le scénario B1. Pour la période 2080-2099, à la fin du 21ème siècle, les courbes des trois scénarios sont confondues jusqu'au mois de juin. Par la suite l'augmentation du déficit d'évaporation serait plus rapide d'après le scénario A2 et plus lente pour le scénario B1, le scénario A1B prévoyant une tendance intermédiaire. On aurait ainsi un déficit d'évaporation maximal de 300 mm selon le scénario A2, de 260 mm d'après le scénario A1B et de 220 mm environ pour le scénario B1.

Ces graphiques mettent en évidence la forte hétérogénéité spatio-temporelle relative à l'évolution du déficit d'évaporation. On peut ainsi observer des tendances contrastées entre les trois scénarios. Ces tendances ne vont pas toujours dans le sens auquel on pourrait s'attendre, avec des sécheresses plus intenses d'après le scénario B1 et plus faibles avec le scénario A2 par exemple.

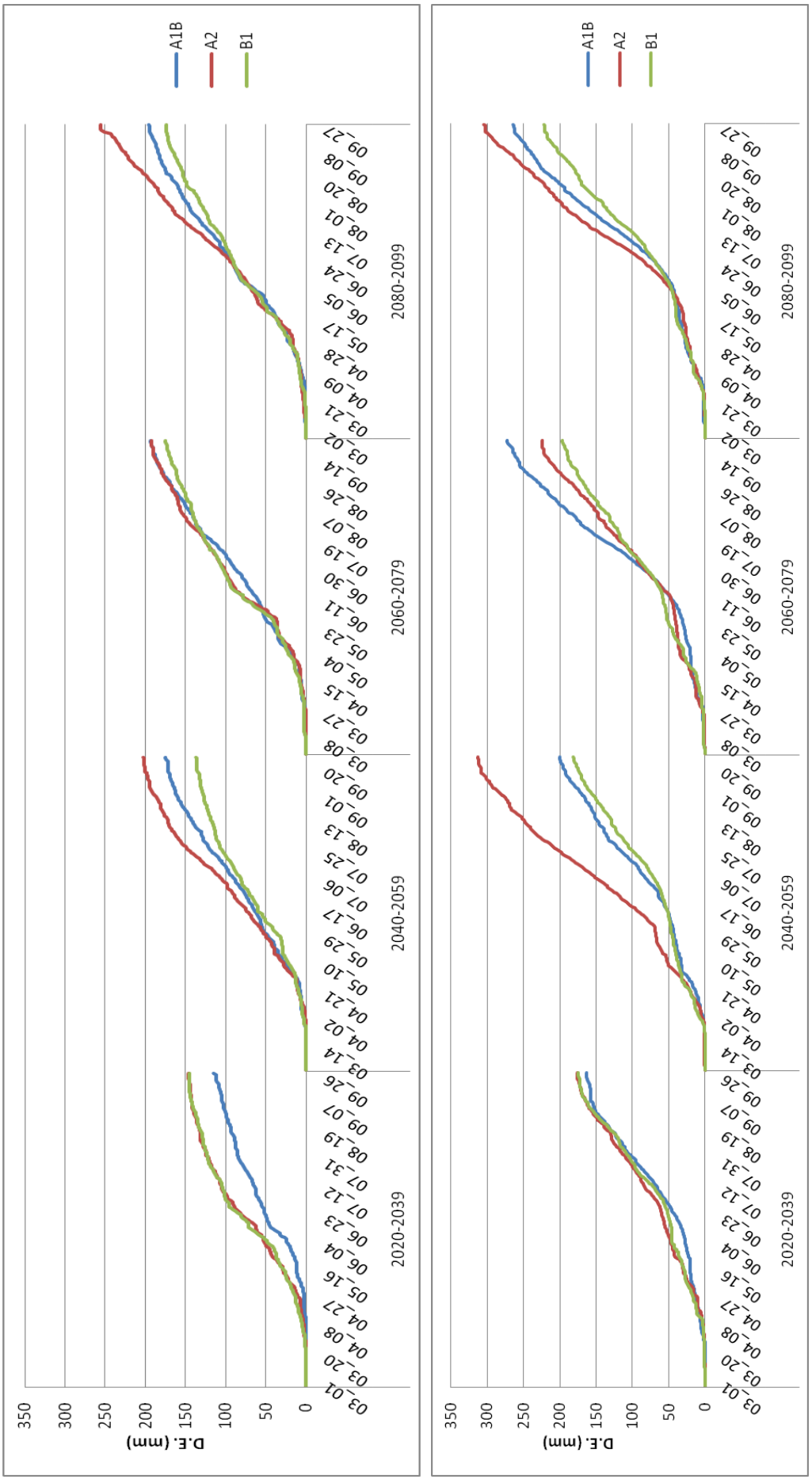


Figure 7.18 Evolution du déficit d'évaporation journalier pour une station du Finistère (haut) et du Morbihan (bas) sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle, d'après trois scénarios du GIEC

7.4.3 Recharge hivernale

Le suivi de la recharge hivernale des réserves hydriques présenté ici est utile pour cerner les modifications éventuelles du bilan de l'eau. En effet, une recharge incomplète des réserves hydriques peut entrainer une diminution du ruissellement et peut provoquer des sécheresses plus précoces au printemps par exemple. Les cartes présentées par la figure 7.19 montrent le taux de remplissage attendu au 31 décembre, en pourcentage, d'après les trois scénarios SRES étudiés et pour les périodes 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099. Les résultats pour la période 2020-2039 ne sont pas présentés du fait que peu de sols soient concernés par un remplissage incomplet de leur réserve hydrique et que les trois scénarios prévoient une situation similaire.

Sur la période 2040-2059 le scénario B1 prévoit un remplissage complet des réserves hydriques sur une grande partie du territoire. Seuls les sols avec une réserve utile supérieure à 200 mm auraient un remplissage incomplet. Les scénarios A1B et A2 prédisent un remplissage incomplet sur une plus grande partie de la Bretagne, notamment le long du littoral nord, en Ille-et-Vilaine et dans le nord-est du Morbihan où les sols sont plus profonds. Dans le cas du scénario A1B les sols du sud du département d'Ille-et-Vilaine auraient leur réserve hydrique entièrement remplie à la fin du mois de décembre. Dans le contexte du scénario A2 le sud serait également touché par ce non-remplissage des réserves hydriques des sols. La période suivante, 2060-2079, est marquée par deux tendances selon les scénarios que l'on considère. Le scénario A2 prévoit moins de sols dont les réserves ne seraient pas entièrement rechargées. Tandis que les scénarios A1B et B1 prévoient plus de sols pour lesquels la recharge serait incomplète à la fin du mois de décembre. Le scénario B1 prédit tout de même un faible pourcentage de sols où la recharge serait incomplète fin décembre. D'après le scénario A1B, presque tout le département de l'Ille-et-Vilaine et le littoral nord auraient des sols caractérisés par une recharge hydrique incomplète à l'issue du mois de décembre. A la fin du 21ème siècle, pour la période 2080-2099, il y aurait encore plus de sols qui auraient leur réserve hydrique incomplète à la fin du mois de décembre. Le scénario B1 prédit une situation plus modérée que les deux autres où seuls les sols profonds, avec une grande réserve utile, ne seraient pas complètement rechargés. Dans le cas du scénario A1B la majorité des sols profonds du littoral nord, de l'Ille-et-Vilaine ainsi que le sud-est des Côtes d'Armor et le nord-est du Morbihan auraient un remplissage incomplet de leur réserve hydrique. Pour autant, les extrêmes sud-ouest et nord-est de l'Ille-et-Vilaine ne connaitraient pas de problème de remplissage incomplet puisque les sols y sont moins profonds et donc les réserves utiles sont de taille inférieure à la moyenne départementale. D'après le scénario A2 les mêmes secteurs que pour le scénario A1B connaitraient une recharge moins efficace des réserves hydriques à l'automne et au début de l'hiver. Mais, contrairement au scénario A1B, tout le département d'Ille-et-Vilaine serait touché et les teneurs en eau dans les sols seraient plus faibles.

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont confrontés, dans le chapitre suivant, à l'indice SWI, indice d'humidité des sols, qui est utilisé par Météo-France pour modéliser les sécheresses. Cette comparaison permet de tester la cohérence de ces deux indices. Dans le chapitre 8 les résultats obtenus ici sont également utilisés à travers une approche plus agronomique.

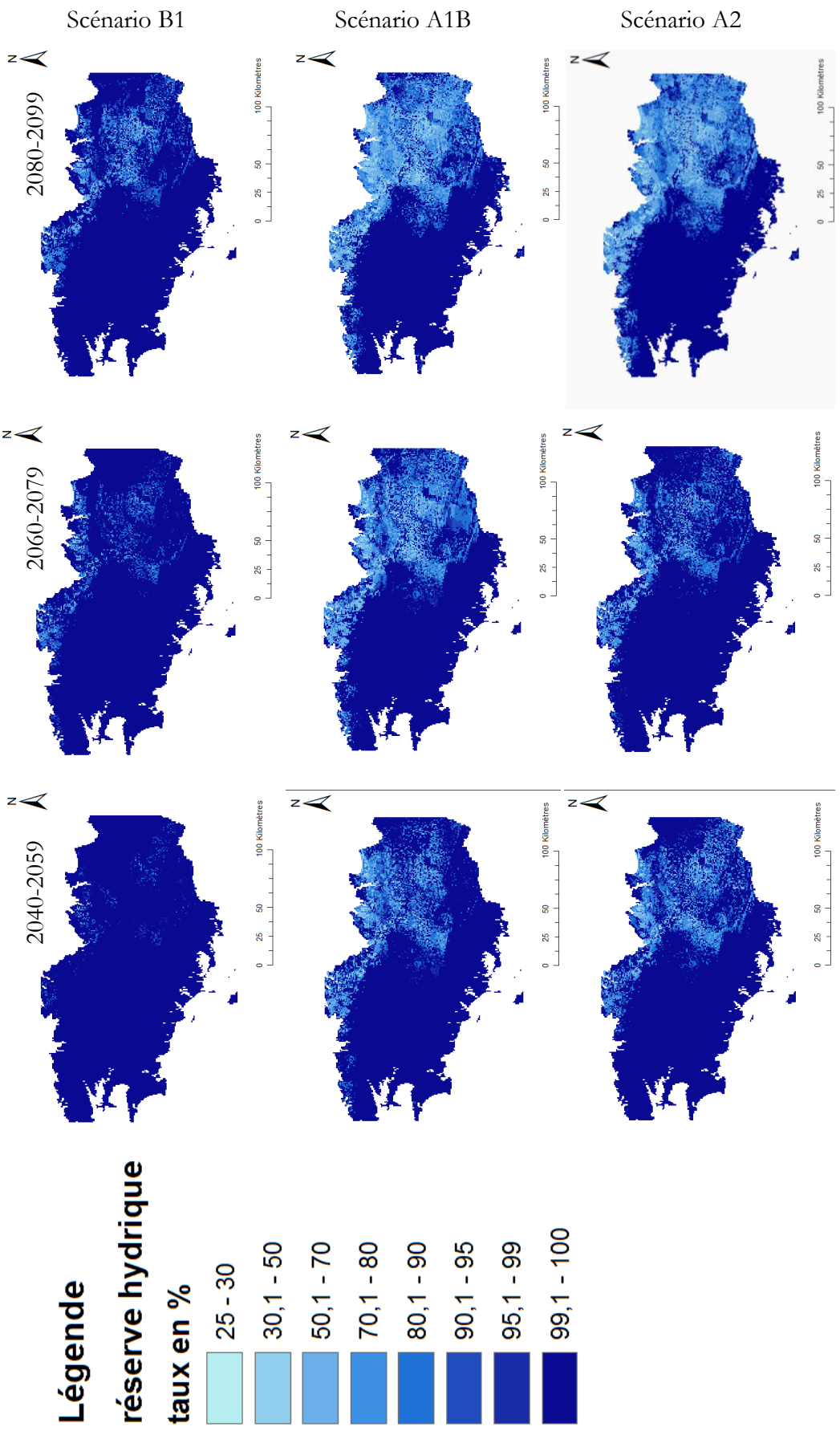


Figure 7.19 Evolution du taux de remplissage des réserves hydriques (fin décembre) selon 3 scénarios du GIEC sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle - Résolution 1 km, RU variable, OS : Lecerf (2008) -

Synthèse : Des sécheresses plus intenses et plus fréquentes au cours du 21ème siècle en Bretagne

Les valeurs d'intensité des sécheresses proposées dans ce chapitre doivent être interprétées au regard des incertitudes sur les scénarios SRES, ainsi que sur les biais liés aux données climatiques et pédologiques, qu'ils soient liés à la méthodologie d'obtention des données ou bien rajoutés par des calculs du bilan hydrique.

Le déficit d'évaporation présenté dans le chapitre 6 est obtenu en considérant une occupation du sol de type gazon sur tout le territoire breton. Une comparaison entre le déficit calculé dans ces conditions et celui obtenu en considérant l'occupation du sol réelle a permis de révéler des différences dans la répartition des périodes déficitaires selon la végétation en place. Ces différences sont dues à la prise en compte des besoins en eau variant selon les stades phénologiques des cultures. En calculant le déficit d'évaporation comme étant la différence entre l'ETM et l'ETR on obtient une description du stress hydrique perçu par la culture en place plus précise que si l'on calcule le déficit d'évaporation à partir de l'ETP et de l'ETR.

Ce chapitre présente différents résultats du bilan hydrique selon que l'on considère l'eau restant dans les sols (réserve hydrique) ou le manque d'eau pouvant entrainer un stress hydrique pour la végétation (déficit d'évaporation). Les trois scénarios SRES du GIEC (B1, A1B et A2) ont été traités ici. Deux bilans hydriques de résolution temporelle et spatiale différentes ont été calculés. Le premier a fonctionné au pas de temps mensuel et à une résolution de 8 km, le second de résolution spatiale kilométrique a été calculé au pas de temps journalier.

Le premier paramètre suivi est le déficit d'évaporation. Ce paramètre correspond à la différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle et permet ainsi de quantifier l'intensité des sécheresses. Le déficit d'évaporation estival (période de juin à août) serait globalement plus élevé dans le cas du scénario A2 et plus faible d'après le scénario B1. Pour autant au début du siècle, le scénario B1 prévoit, pour certains secteurs bretons, des sécheresses plus intenses que ce qu'il serait attendu dans le contexte du scénario A2. A l'échelle de la région on observe une augmentation progressive du déficit d'évaporation estival au cours du siècle, conduisant à des valeurs de l'ordre de 200 à 250 mm sur la moitié ouest et 250 à 350 mm sur la moitié est. Le bilan journalier prévoit des valeurs globalement du même ordre de grandeur. Pour autant la plus grande précision des données pédologiques, par rapport au bilan mensuel, conduit à des valeurs de déficit légèrement plus importantes à l'échelle de la région. D'après le bilan journalier le seuil de 300 mm de déficit d'évaporation atteint à Rennes en 1976 serait observé au 21ème siècle dès la période 2040-2059 selon les scénario A1B et A2. Ce dernier prévoit une augmentation rapide du déficit d'évaporation au cours du 21ème siècle. Ainsi, à l'horizon 2100 une grande partie de l'est du territoire connaitrait un déficit estival moyen supérieur à 400 mm. De fait, des sécheresses d'intensité similaire à celle de 1989 telle qu'observée à Rennes, deviendraient communes à la fin du 21ème siècle, pour une grande partie de la région Bretagne. Le suivi du déficit d'évaporation mensuel au cours du 21ème siècle pour quatre stations bretonnes a permis de mettre en évidence une augmentation de l'intensité des sécheresses au cours du siècle. Cette augmentation ne semble pas impacter la durée de la saison déficitaire, qui reste de l'ordre de 6 mois environ. Si l'on suit le

déficit d'évaporation journalier on se rend mieux compte de l'augmentation, modérée, de la période de sécheresse. Les quatre stations étudiées connaitraient une augmentation de la durée d'épisodes secs d'une dizaine de jours environ, tous scénarios confondus. Le déficit d'évaporation calculé par le bilan hydrique journalier confirme les tendances d'augmentation de l'intensité des sécheresses au cours du 21ème siècle.

Le second paramètre suivi est la teneur en eau dans les sols, qui permet d'apprécier l'efficacité de la recharge hivernale. Alors qu'actuellement la recharge des réserves hydriques des sols bretons est complète au mois de décembre, on observe ici que d'après les scénarios A1B et A2 les sols profonds d'Ille-et-Vilaine et du littoral nord ne seraient pas complètement rechargés à la fin du mois de décembre, pour les périodes 2060-2079 et 2080-2099. Cela altérerait ainsi le cycle de l'eau ce qui pourrait augmenter le risque d'avoir des sécheresses plus précoces.

CHAPITRE 8

SUIVI DES SECHERESSES SELON DEUX INDICES, ET DE LEURS CONSEQUENCES SUR L'AGRICULTURE

Sommaire

Introduction……..……..……..……..……..……....…....……..196

8.1 Evolution des sécheresses au 21ème siècle d'après l'indice SWI de Météo-France 196

8.1.1 Comparaison avec le déficit d'évaporation 196

8.1.2 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario B1 197

8.1.3 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario A1B 203

8.1.4 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario A2 208

8.2 Durabilité des systèmes agricoles actuels dans le contexte du changement climatique 213

8.2.1Comportement hydrique de la végétation en situation de réserve utile importante 215

8.2.2 Comportement hydrique de la végétation en situation de réserve utile moyenne 219

8.2.3 Comportement hydrique de la végétation en situation de faible réserve utile.... 223

Synthèse : Perception des sécheresses par un autre indice et réflexion sur la durabilité des cultures bretonnes dans le contexte du changement climatique.……..……..…….....229

Introduction

Ce chapitre permet d'ouvrir l'analyse de l'évolution des sécheresses face au changement climatique à d'autres indices ou paramètres. Le déficit d'évaporation n'est, en effet, qu'un indice parmi tant d'autres pour ce qui relève du suivi des sécheresses pédologiques. On retrouve notamment dans les travaux de Météo-France l'utilisation de l'indice SWI (Soil Wetness Index) pour quantifier les sécheresses pédologiques (cf. chapitre 5). D'autres indices sont également utilisés pour quantifier différents types de sécheresse (hydrologique et climatique). Or, l'objectif de cette étude est de cerner les impacts probables sur la végétation et sur l'agriculture plus particulièrement, en focalisant sur les indices spécifiques aux sécheresses pédologiques. Il est donc question ici de proposer une comparaison de l'indice SWI avec le déficit d'évaporation, pour ensuite analyser plus longuement les valeurs du SWI pour 3 scénarios du GIEC au cours du 21ème siècle.

Pour la seconde partie de ce chapitre on s'intéresse aux résultats du bilan hydrique utilisé tout au long de ces travaux, en considérant autant l'évolution de la réserve hydrique que le déficit d'évaporation en fonction de trois types d'occupations du sol. L'objectif de ce chapitre est de suivre le comportement hydrique des sols, pour une taille de réserve utile similaire, en fonction de diverses activités agricoles : céréales, légumes et fourrages. Ainsi, à l'échelle de trois régions pédologiquement et climatologiquement homogènes, une comparaison de l'impact de la végétation sur la réserve hydrique est proposée. Les résultats de cette comparaison permettent de mettre en évidence la durabilité d'un système cultural à l'échelle locale en fonction des changements climatiques attendus au cours du 21ème siècle d'après trois scénarios SRES.

8.1 Evolution des sécheresses au 21ème siècle d'après l'indice SWI de Météo-France

Le SWI (Soil Wetness Index pour Indice d'Humidité des Sols) calculé par Météo-France permet de caractériser les sécheresses pédologiques. Etant donné qu'il représente l'humidité des sols, on peut le rapprocher de la notion de réserve hydrique développée ici. Cependant, comme il est utilisé en tant qu'indice de sécheresse par Météo-France, on va le comparer à l'indice de sécheresse étudié ici : le déficit d'évaporation. Ces deux indices révèlent donc deux approches différentes de l'analyse des sécheresses. Il est donc utile pour cette étude de confronter les résultats du déficit d'évaporation avec celui du SWI pour voir si les tendances qu'ils révèlent concordent ou non.

8.1.1 Comparaison avec le déficit d'évaporation

Dans un premier temps il est important de comparer l'évolution mensuelle des deux indices afin de comprendre leurs différences en termes de gamme de valeur et de variation saisonnière. Le déficit d'évaporation est nul en période humide, quand les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle. Pour le scénario A1B et la période 2020-39 le déficit est donc nul d'octobre à mars. Puis d'avril à septembre l'augmentation des valeurs du DE révèle l'assèchement

progressif des sols. En avril cet assèchement ne touche que la partie est de la région mais dès le mois suivant la partie ouest est également impactée.

Les variations de l'indice SWI (figure 8.1) sont globalement similaires à celles observées dans le chapitre 7. On perçoit tout de même quelques différences en termes de variations temporelles notamment. La saison sèche (où le SWI est faible) apparait comme plus longue pour le SWI que pour le DE. Elle commence en mars-avril sur la moitié est de la Bretagne, pour s'étendre à toute la région à partir du mois de mai. Les sols sont les plus secs en août, les Monts d'Arrée restant un peu plus humides que le reste du territoire. Plus le SWI se rapproche, voire dépasse, la valeur de 1, plus les sols sont humides et le stress hydrique pour la végétation devient nul. En figure 8.1 on observe la recharge hydrique des sols (en vert) qui démarre en novembre mais n'est réellement complète qu'en janvier de l'année suivante.

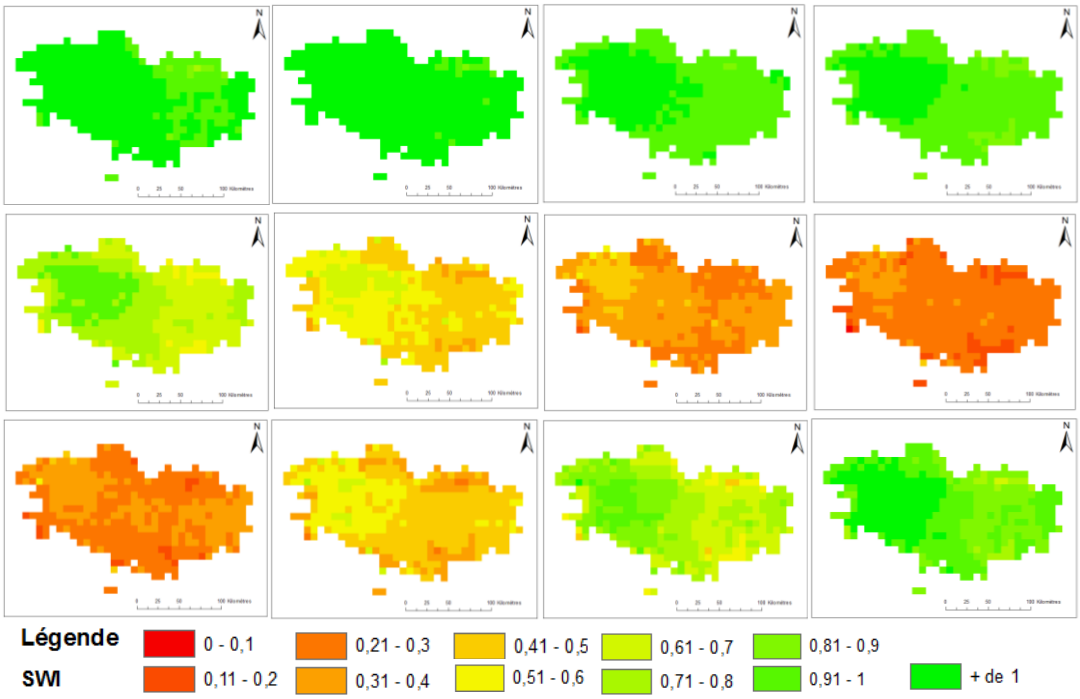


Figure 8.1 Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles d'après le scénario A1B pour la période 2020-39 (depuis janvier : haut gauche, à décembre : bas droite).

Cette comparaison révèle ainsi la similitude entre les deux indices, ce qui est important puisque le SWI et le DE représentent tous les deux les sécheresses pédologiques. Cependant on peut noter que le SWI tend à présenter des épisodes secs plus longs que le déficit d'évaporation. A la lumière de cette comparaison les résultats du SWI d'après les trois scénarios du GIEC : B1, A1B et A2 vont permettre d'amener plus de relief aux résultats du déficit d'évaporation présentés dans le chapitre précédent.

8.1.2 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario B1

Le scénario B1 est le plus optimiste des trois scénarios majeurs du GIEC étudiés ici. L'analyse du déficit d'évaporation dans le chapitre 7 a ainsi mis en évidence des sécheresses de moindre ampleur que dans le cas des autres scénarios. Le déficit d'évaporation estival moyen attendu à la fin du 21ème siècle varie de 50 mm à l'ouest de la Bretagne à 300 mm à l'est. Avec le SWI on ne

peut quantifier les sécheresses de la même façon qu'avec le déficit d'évaporation. Les cartes présentées en figure 8.2 montrent l'évolution du SWI pour les mois de juin, juillet et août au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle. Ces cartes mettent en évidence deux tendances spécifiques aux moitiés ouest et est de la région pour les mois de juin et juillet. Pour la partie est, nous remarquons une augmentation de l'assèchement des sols au cours du siècle. Pour la partie ouest c'est au milieu du 21ème siècle (2040-59 et 2060-79) que l'assèchement des sols apparait le plus fort. La fin du siècle (2080-99) présente une situation plutôt similaire au début du siècle. Au mois d'août, au plus fort des sécheresses pédologiques, la situation évolue peu au cours du 21ème siècle, si ce n'est un assèchement plus fort au niveau des Monts d'Arrée à la fin du siècle. Les résultats du SWI pour le scénario B1 montrent ainsi deux tendances majeures à l'échelle de la région Bretagne, avec une partie est nettement plus soumise aux épisodes secs que la partie ouest.

Afin de voir plus en détail ces particularités territoriales on s'intéresse aux stations de Landivisiau et Saint Jacques de la Lande, respectivement à l'ouest et à l'est de la région. Pour chacune de ces stations le SWI sera étudié de façon à percevoir la variabilité interannuelle et le comportement moyen de cet indice sur des périodes de 20 ans. A Saint Jacques de la Lande d'après la figure 8.3 le SWI varierait entre 0,2 au plus fort de l'été et 1,1 l'hiver pour la période 2020-2039. Le SWI serait compris entre 0,2 et 0,3 dans 80 % des cas en août, contre une fréquence de 50 % en juillet et septembre. Pour la station de Landivisiau on note une variation du SWI d'amplitude légèrement plus grande que pour Saint Jacques de la Lande. En effet, l'hiver le SWI atteindrait quasiment systématiquement la valeur de 1,1 et pourrait même dépasser la valeur de 1,2 ponctuellement, ce qui est supérieur aux valeurs observées à Saint Jacques de la Lande. Cependant, durant l'été le SWI atteint difficilement le seuil de 0,2. La valeur de 0,3 étant nettement plus probable sur cette période.

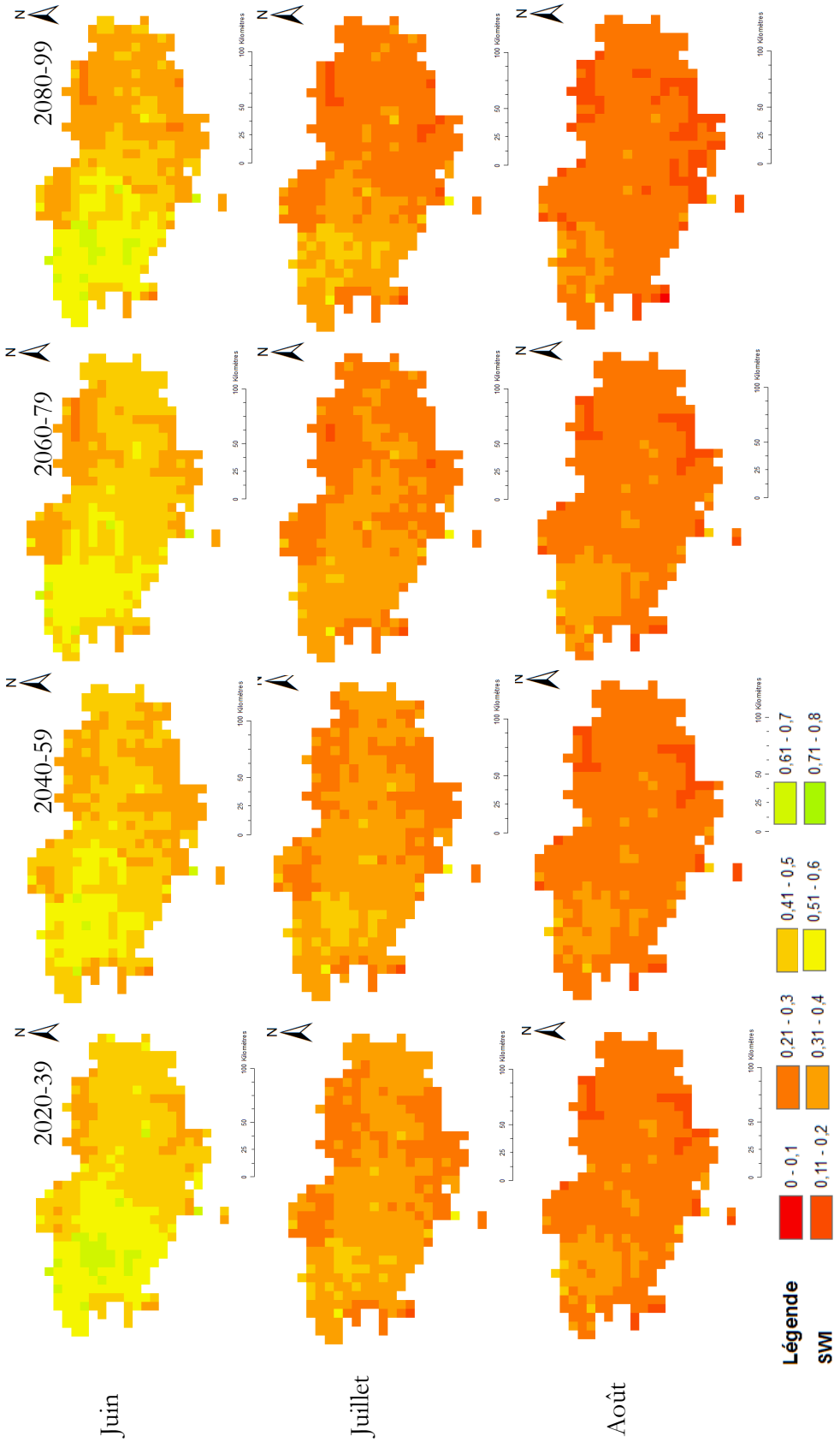


Figure 8.2 Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles en juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), d'après le scénario B1 pour 4 périodes du 21ème siècle

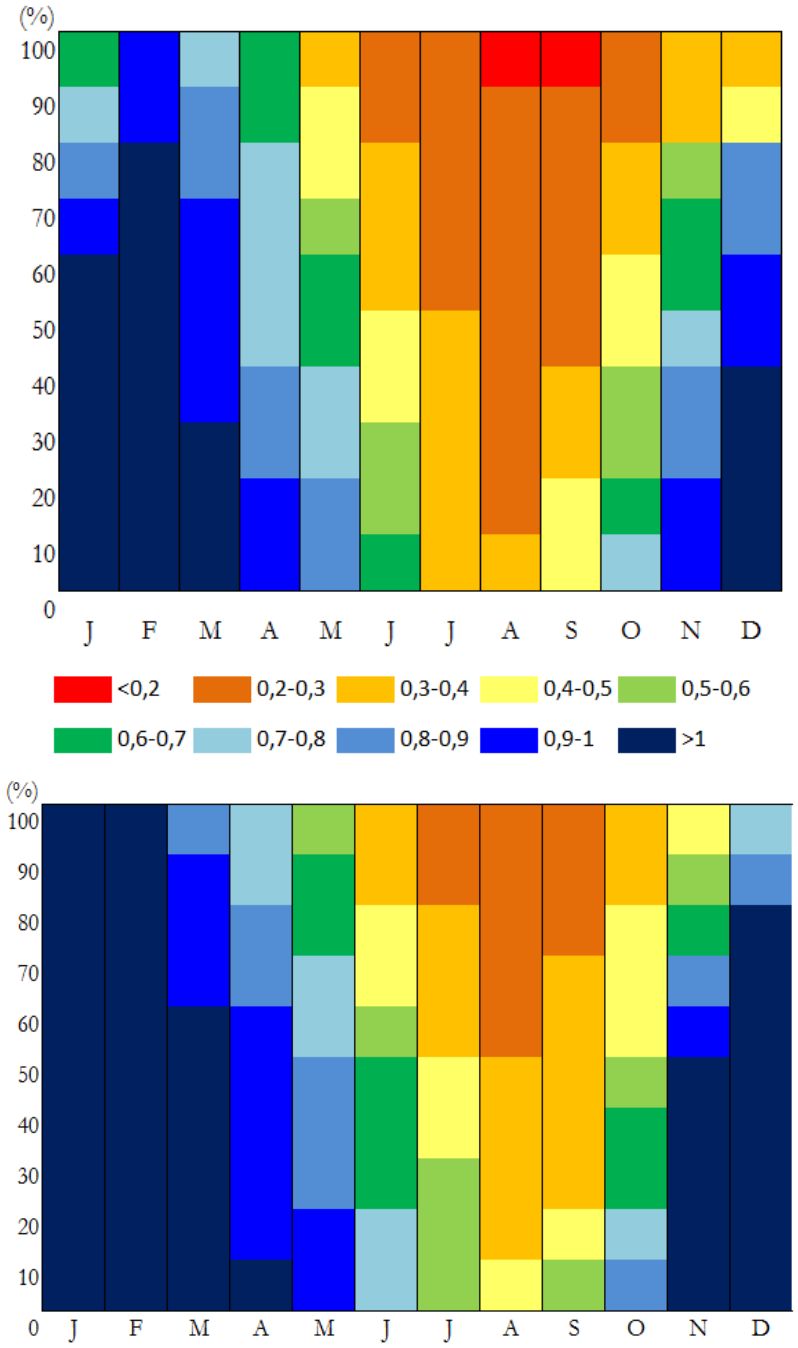


Figure 8.3 Variations moyennes du SWI et fréquences d'occurrence des différentes valeurs observées sur la période 2020-39 d'après le scénario B1 pour la ville de Saint Jacques de la Lande (haut), située à l'est de la région Bretagne et Landivisiau (bas), située à l'ouest

Pour confirmer ces tendances on peut observer le comportement moyen sur cette même période présenté en figure 8.4. On voit ainsi que le SWI varie principalement entre 0,2 et 0,4 durant l'été à Saint Jacques de la Lande et entre 0,5 et 0,3 à Landivisiau. Le seuil de 1, marquant un remplissage complet des réserves hydriques des sols, est atteint en janvier à Saint Jacques de la Lande et dès le mois de novembre pour Landivisiau. On perçoit donc bien la disparité territoriale du SWI marquée par deux tendances spécifiques des moitiés ouest et est.

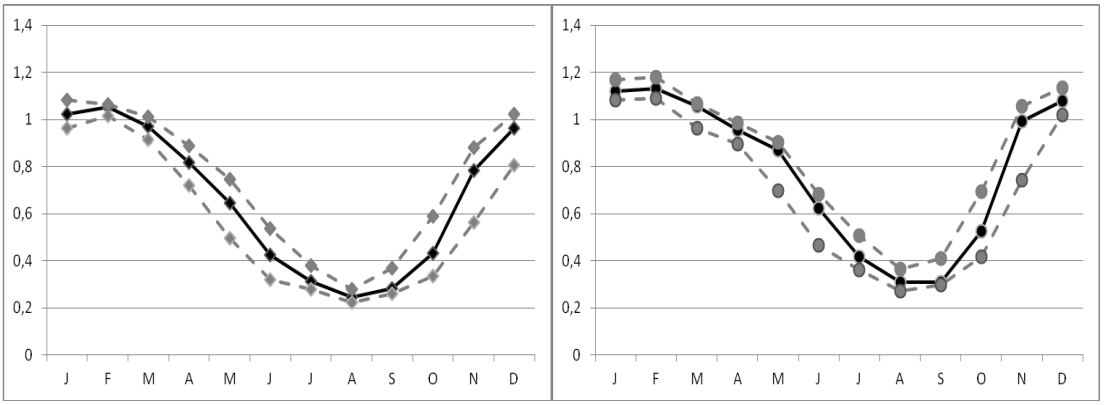


Figure 8.4 Evolution moyenne du SWI (noir trait continu : médiane, gris trait discontinu : quartile supérieur et inférieur) sur la période 2020-39 pour le scénario B1, pour Saint Jacques de la Lande (gauche, marqueur losange) et pour Landivisiau (droite, marqueur rond)

Les tendances pour la période 2020-2039 (tableau 8.1) révèlent la faible probabilité d'avoir un SWI inférieur à 0,2 : 0,8 % à Saint Jacques de la Lande et 0 % à Landivisiau. Le SWI estival est compris entre 0,2 et 0,3 sur plus de 50 % du temps pour la station de Saint Jacques de la Lande, ce seuil n'étant atteint que 20 % du temps à Landivisiau. Pour cette station il est plus commun (36 %) d'avoir des valeurs comprises entre 0,3 et 0,4.

Quand on suit l'évolution des fréquences d'occurrence pour ces mêmes classes au cours du 21ème siècle (tableau 8.2) on remarque, encore une fois, deux tendances différentes pour l'est et l'ouest de la Bretagne. La situation à l'est, toujours illustrée par la station de Saint Jacques de la Lande, révèle une augmentation notable de la probabilité d'avoir un épisode sec caractérisé par un SWI inférieur à 0,2. Cette fréquence, qui serait de 2,5 % sur la période 2020-39, augmenterait nettement de façon à atteindre une fréquence de 12,5 % à la fin du 21ème siècle. La probabilité d'avoir un SWI compris entre 0,2 et 0,3 est également en augmentation puisque l'on passerait d'une fréquence de 50 % environ sur la première moitié du 21ème siècle à 63 % à la fin du siècle. La situation à l'ouest de la région, présentée par la station de Landivisiau, évoluerait différemment. On perçoit ainsi une tendance à l'augmentation des fréquences d'occurrence des épisodes secs caractérisés par un SWI compris entre 0,2 et 0,3. Les épisodes de sécheresses plus modérés, avec un SWI compris entre 0,3 et 0,5 auraient tendance à diminuer au cours du siècle. Des SWI plus élevés, compris entre 0,7 et 1, caractérisant des déficits hydriques très faibles, seraient plus fréquents à la fin du 21ème siècle (environ 9 %) qu'au début du 21ème siècle (5 %). On observe ainsi un régime plus contrasté qui peut être lié à l'évolution des précipitations.

Tableau 8.1 Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'année et de l'été (juin à septembre) pour la période 2020-39 d'après le scénario B1

	Saint Jacques de la Lande		Landivisiau	
Classes	**année**	**été**	**année**	**été**
[0;0,2[	0,83	2,50	0	0
[0,2;0,3[	18,75	51,25	6,67	21,25
[0,3;0,4[	12,08	26,25	13,75	36,25
[0,4;0,5[	8,75	11,25	7,08	15,00
[0,5;0,6[	7,92	6,25	6,25	12,50
[0,6;0,7[	4,17	2,50	8,33	10,00
[0,7;0,8[	5,83	0	5,00	2,50
[0,8;0,9[	10,83	0	5,42	1,25
[0,9;1[	10,42	0	10,83	1,25
1 et plus	20,42	0	36,67	0

Tableau 8.2 Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'été (juin à septembre) pour les périodes 2020-39, 2040-59, 2060-79 et 2080-99 d'après le scénario B1

	Saint Jacques de la Lande				Landivisiau			
Classes	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**
[0;0,2[	2,50	1,25	5,00	12,5	0	0	0	0
[0,2;0,3[	51,25	51,25	58,75	62,5	21,25	25,00	30,00	32,50
[0,3;0,4[	26,25	31,25	22,50	18,75	36,25	32,50	27,50	28,75
[0,4;0,5[	11,25	10,00	8,75	1,25	15,00	22,50	17,50	15,00
[0,5;0,6[	6,25	3,75	1,25	3,75	12,50	11,25	13,75	13,75
[0,6;0,7[	2,50	1,25	2,50	1,25	10,00	7,50	6,25	1,25
[0,7;0,8[	0	1,25	1,25	0	2,50	0	2,50	3,75
[0,8;0,9[	0	0	0	0	1,25	1,25	1,25	2,50
[0,9;1[	0	0	0	0	1,25	0	0	2,50
1 et plus	0	0	0	0	0	0	1,25	0

L'analyse du SWI indique donc que, dans le contexte du scénario B1, les épisodes secs auraient tendance à s'intensifier sur la moitié est du territoire et à peu évoluer sur la moitié ouest. Ce scénario « optimiste » sur le réchauffement climatique n'est véritablement optimiste que pour la partie occidentale de la région Bretagne. La partie orientale, du fait d'un climat océanique moins soumis à l'influence maritime, est particulièrement sensible à l'augmentation des épisodes secs en termes de fréquence et d'intensité.

8.1.3 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario A1B

Le scénario A1B du GIEC étudié ici est qualifié de modéré. Cet aspect modéré a été confirmé par les résultats présentés dans le chapitre 7, qui présentent une situation intermédiaire aux scénarios B1 et A2. Le déficit d'évaporation estival moyen ainsi attendu à la fin du 21ème siècle varierait entre 75 à 300 mm à l'ouest de la Bretagne et 100 à 380 mm à l'est.

En ce qui concerne l'évolution du SWI d'après le scénario A1B, la figure 8.5 présente des cartes mensuelles de la situation estivale pour 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle. Deux comportements type s'y dégagent selon le mois considéré. En juin, le SWI diminue progressivement jusqu'en 2060-79 pour augmenter légèrement à la fin du siècle. Les sols du Finistère sont nettement plus humides que ceux d'Ille-et-Vilaine pour le mois de juin des quatre périodes suivies. En juillet et août l'assèchement des sols est plus généralisé. Jusque dans les années 2060, les sols de la moitié ouest sont globalement les plus humides de la région, mais, sur la seconde moitié du 21ème siècle, le SWI varie peu à l'échelle du territoire. Le mois d'août est le mois le plus sec de l'année avec un SWI d'environ 0,2 tandis qu'en juillet le SWI est plus proche de 0,3.

Pour confirmer ces tendances, une analyse statistique a été effectuée. Etant donné qu'une distinction est/ouest s'observe au mois de juin et pour les mois de juillet et août jusque dans les années 2060, la méthodologie utilisée sera identique à celle du scénario B1. Les données des stations de Saint Jacques de la Lande et de Landivisiau servent ainsi de référence pour l'analyse des moitiés orientale et occidentale respectivement, de la Bretagne.

Sur la période 2020-2039 les valeurs du SWI varient peu entre le scénario B1 et A1B pour les deux stations de référence. Que ce soit pour la variabilité interannuelle (figure 8.6) ou les fréquences d'occurrence (tableau 8.3), les tendances observées dans le contexte du scénario A1B sont très similaires à celles observées pour le scénario B1. Cela est dû au fait que jusque dans les années 2040 tous les scénarios du GIEC évoluent dans les mêmes gammes de valeurs. Les différences entre les scénarios se perçoivent à partir des années 2050.

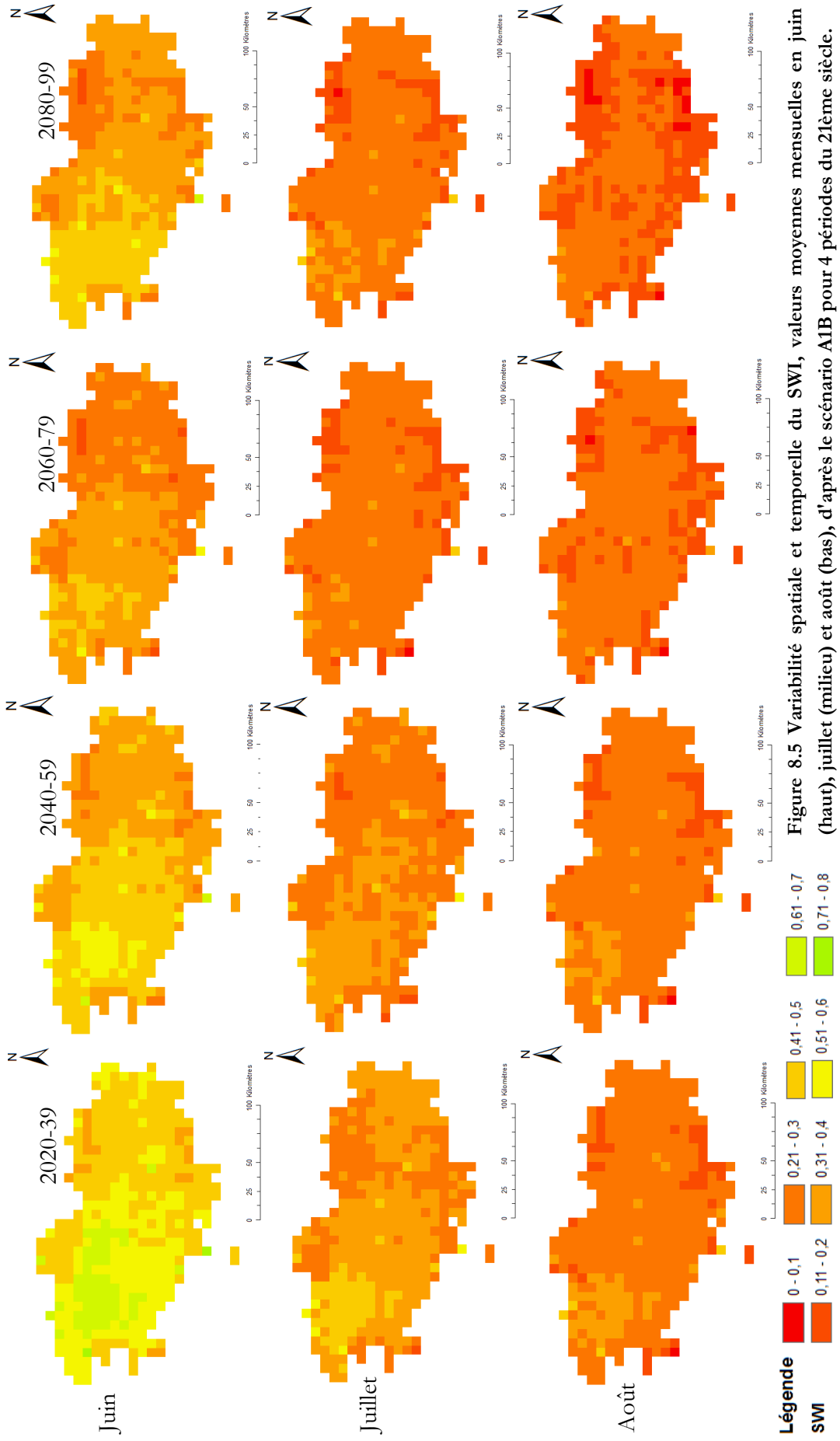


Figure 8.5 Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles en juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), d'après le scénario A1B pour 4 périodes du 21ème siècle.

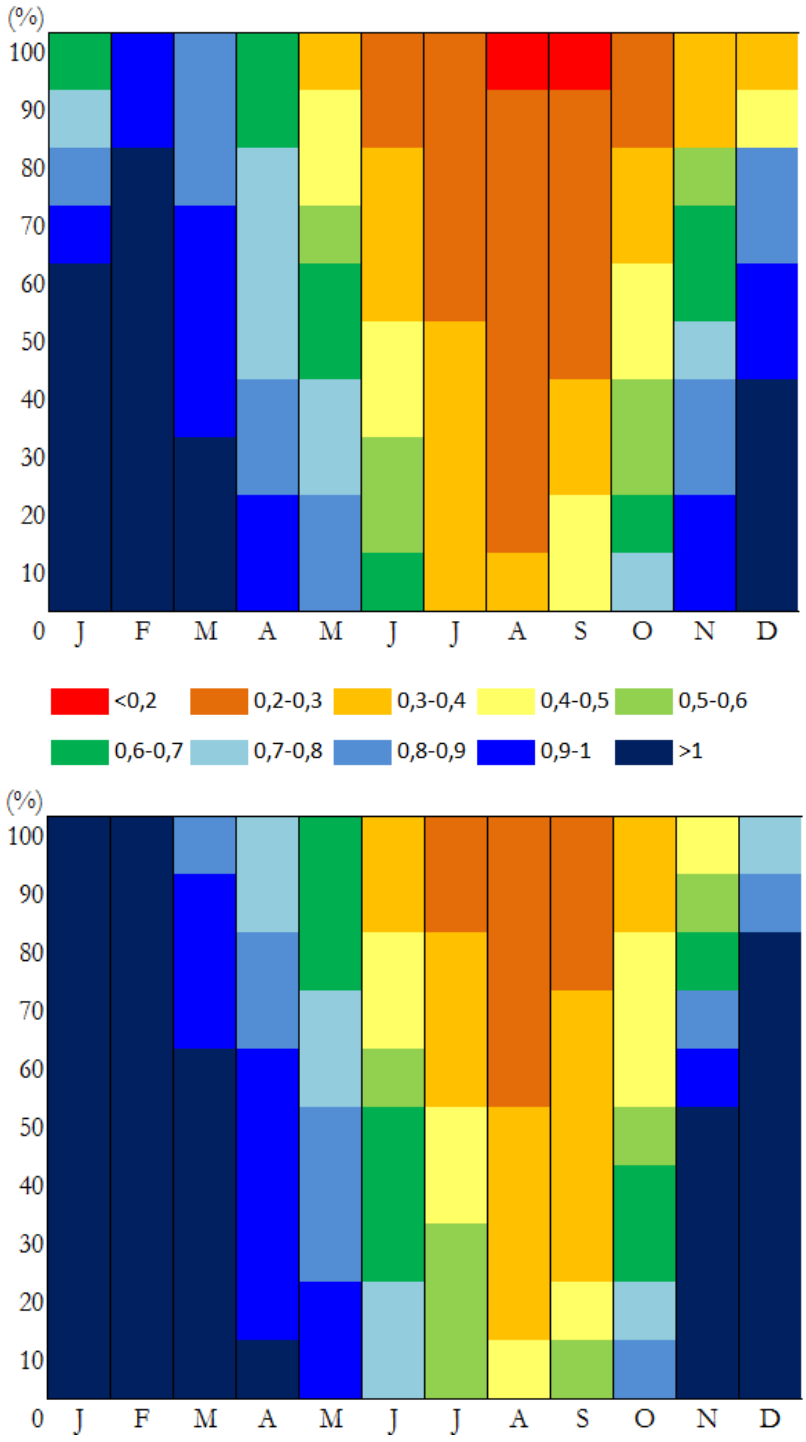


Figure 8.6 Variations moyennes du SWI et fréquences d'occurrence des différentes valeurs observées sur la période 2020-39 d'après le scénario A1B pour la ville de Saint Jacques de la Lande (haut), située à l'est de la région Bretagne et Landivisiau (bas), située à l'ouest.

Tableau 8.3 Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'année et de l'été (juin à septembre) pour la période 2020-39 d'après le scénario A1B

	Saint Jacques de la Lande		Landivisiau	
Classes	**année**	**été**	**année**	**été**
[0;0,2[	0,83	2,50	0	0
[0,2;0,3[	16,67	48,75	6,25	21,25
[0,3;0,4[	11,67	25,00	13,33	33,75
[0,4;0,5[	9,17	12,50	7,08	13,75
[0,5;0,6[	5,00	7,50	6,25	15,00
[0,6;0,7[	6,67	3,75	7,92	10,00
[0,7;0,8[	6,67	0	5,42	3,75
[0,8;0,9[	11,25	0	6,67	1,25
[0,9;1[	10,83	0	23,75	1,25
1 et plus	21,25	0	23,33	0

La similitude du SWI d'un scénario à l'autre pour la période 2020-39 transparait également avec le calcul de la médiane et des quartiles pour chacune des stations. Les résultats obtenus sont identiques pour les deux scénarios B1 et A1B. Cependant, au fur et à mesure que l'on avance dans le temps, le SWI du scénario A1B tend à diminuer par rapport aux valeurs du scénario B1. Ainsi la fréquence d'occurence des épisodes secs caractérisés par un SWI strictement inférieur à 0,2 augmente fortement après les années 2050 pour atteindre plus de 25 % d'occurrence à la fin du 21ème siècle à Saint Jacques de la Lande (tableau 8.4). Des sécheresses aussi intenses ne seraient jamais observées à Landivisiau. Pour cette station le SWI atteint au minimum 0,2 et la probabilité pour le SWI d'être compris entre 0,2 et 0,3 évolue entre 20 et 33 % au cours du siècle, avec un maximum d'occurence durant la période 2080-99. A l'inverse, à Saint Jacques de la Lande la probabilité d'avoir un SWI compris entre 0,2 et 0,3 est de 70 % sur la période 2060-79 et de près de 60 % sur la période 2080-99.

Tableau 8.4 Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 7 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'été (juin à septembre) pour les périodes 2020-39, 2040-59, 2060-79 et 2080-99 d'après le scénario A1B

	Saint Jacques de la Lande				Landivisiau			
Classes	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**
[0;0,2[	2,50	3,75	16,25	26,25	0	0	0	0
[0,2;0,3[	48,75	47,50	71,25	58,75	21,25	25,00	31,25	32,50
[0,3;0,4[	25,00	37,50	8,75	8,75	33,75	31,25	27,50	28,75
[0,4;0,5[	12,50	5,00	2,50	5,00	13,75	21,25	16,25	15,00
[0,5;0,6[	7,50	3,75	0	0	15,00	12,50	13,75	13,75
[0,6;0,7[	3,75	1,25	0	0	10,00	8,75	7,50	1,25
[0,7;0,8[	0	1,25	1,25	1,25	3,75	0	3,75	3,75

Les différences entre le scénario A1B et le scénario B1 sont présentées dans le tableau 8.5. Dans ce tableau, seules les quatre premières classes sont indiquées, afin de privilégier l'analyse des valeurs de SWI correspondant aux sécheresses. Les cases en fond grisé correspondent à une différence positive, c'est à dire que la fréquence d'occurrence pour la classe considérée est plus grande dans le cas du scénario A1B que pour le scénario B1. On remarque que, pour la période 2020-39, il y a soit aucune différence d'un scénario à l'autre (Saint Jacques de la Lande) soit une légère différence inférieure à 2 % en faveur du scénario A1B. Pour les périodes suivantes, on observe principalement que les épisodes secs seraient plus fréquents dans le cadre du scénario A1B pour la station de Saint Jacques de la Lande. Tandis qu'à Landivisiau aucune tendance significative n'est observée.

Tableau 8.5 Différences entre les scénarios A1B et B1 pour les 4 périodes et les 2 stations, à partir des 4 classes de SWI correspondant à des épisodes de sécheresse

	Saint Jacques de la Lande				Landivisiau			
Classes	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**
[0;0,2[	0,00	2,50	11,25	13,75	0,00	0,00	0,00	0,00
[0,2;0,3[	0,00	-3,75	12,50	-3,75	0,00	0,00	1,49	0,00
[0,3;0,4[	0,00	6,25	-13,75	-10,00	1,19	-0,89	1,31	0,00
[0,4;0,5[	0,00	-5,00	-6,25	3,75	0,00	-0,18	-1,61	0,00

Le scénario A1B présente donc un assèchement des sols généralisé à toute la Bretagne à la fin de l'été pour les périodes 2060-79 et 2080-99, en comparaison avec le scénario B1. Cependant, pour la moitié ouest de la région, les épisodes secs seraient moins fréquents dans le contexte du scénario A1B.

8.1.4 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario A2

Le scénario A2 est considéré comme le plus pessimiste des trois scénarios majeurs du GIEC étudiés ici. Les valeurs du déficit d'évapotranspiration estival pour la fin du 21ème siècle d'après ce scénario, présentées dans le chapitre 7, ont confirmé cette caractéristique. Le déficit estival moyen à l'ouest de la région serait ainsi compris entre 200 et 300 mm, tandis qu'à l'est le DE varie entre 200 et 450 mm. C'est donc toujours à l'est de la Bretagne que seraient ressentis les épisodes secs les plus intenses et les plus fréquents.

Les cartes d'évolution du SWI au cours du 21ème pour la période estivale d'après le scénario A2 (figure 8.7) mettent également en évidence une séparation plus ou moins nette entre les parties est et ouest de la région. La situation moyenne au mois de juin par exemple montre des sols finistériens toujours plus humides que le reste de la région. Au mois de juillet le pourcentage de sols de l'ouest peu impactés par les sécheresses diminuerait progressivement au cours du 21ème siècle pour atteindre une situation relativement homogène à l'échelle de la Bretagne à la fin du siècle. Au mois d'août, le SWI est relativement homogène sur le territoire pour les périodes 2040-59 et 2060-79. Par la suite, à la fin du siècle, il y aurait de nouveau une distinction est/ouest, avec un SWI moyen compris entre 0,1 et 0,2 à l'est et entre 0,2 et 0,3 à l'ouest.

La différence entre l'est et l'ouest de la Bretagne s'observe également à travers la variabilité interannuelle du SWI sur la période 2020-39 (figure 8.8). Pour la station de Saint Jacques de la Lande on peut remarquer qu'au plus fort de l'été le SWI prend principalement des valeurs comprises entre 0,2 et 0,3 (60 % de fréquence en juillet, 80 % en août et 70 % en septembre). L'hiver le SWI est généralement compris entre 0,7 et plus de 1, mais exceptionnellement le SWI hivernal pourrait descendre jusqu'à 0,4. Cette faible recharge hydrique des sols peut avoir comme conséquence une sécheresse estivale plus importante l'année suivante (SWI inférieur à 0,2) et plus précoce. A l'ouest de la région, pour la station de Landivisiau, le SWI évolue dans une gamme de valeurs plus homogène avec un minimum estival compris entre 0,2 et 0,4 (50 % de fréquence en juillet, 90 % en août et 80 % en septembre) et un maximum hivernal supérieur à 0,9 (90 % de fréquence en décembre et janvier et 100 % de fréquence en février et mars).

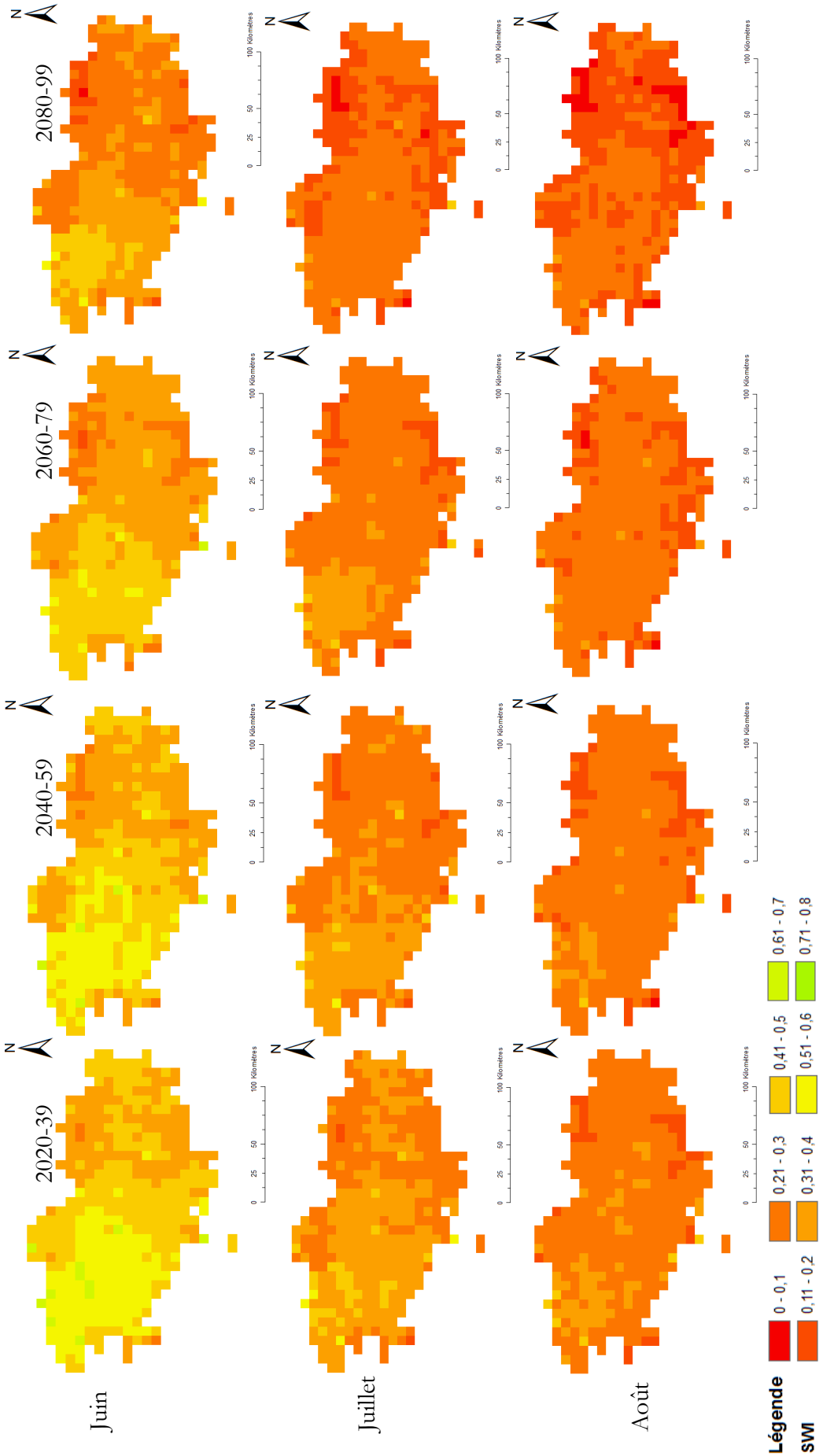


Figure 8.7 Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles en juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), d'après le scénario A2 pour 4 périodes du 21ème siècle

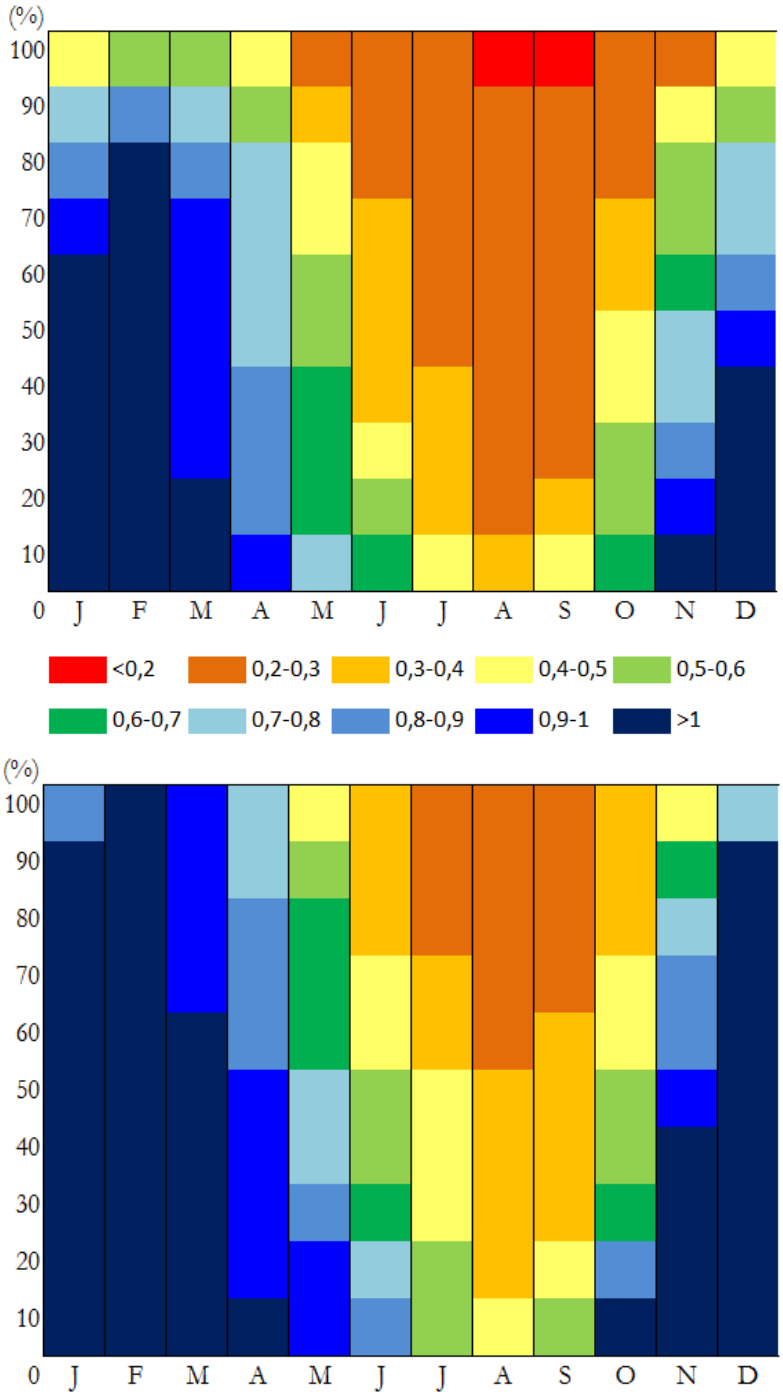


Figure 8.8 Variations moyennes du SWI et fréquences d'occurrence des différentes valeurs observées sur la période 2020-39 d'après le scénario A2 pour la ville de Saint Jacques de la Lande (haut), située à l'est de la région Bretagne et Landivisiau (bas), située à l'ouest

Les graphiques de la figure 8.9 apportent une vison complémentaire à travers les médianes et quartiles du SWI pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau. On voit ainsi que, pour l'est de la Bretagne, la différence avec les autres scénarios porte sur la recharge hivernale en perte de vitesse en décembre avec 50 % de probabilité d'avoir un SWI légèrement supérieur à 0,8. Pour autant, dès le mois de janvier suivant le SWI atteindrait le seuil de 1, marquant le remplissage complet des sols. A l'ouest on remarque également un profil différent des autres scénarios, puisque le printemps s'assècherait plus rapidement dans le cas du scénario A2. En

effet, au mois de mai le SWI n'aurait que 25 % de probabilité d'être supérieur à 0,8, contre 50 % pour les scénarios B1 et A1B.

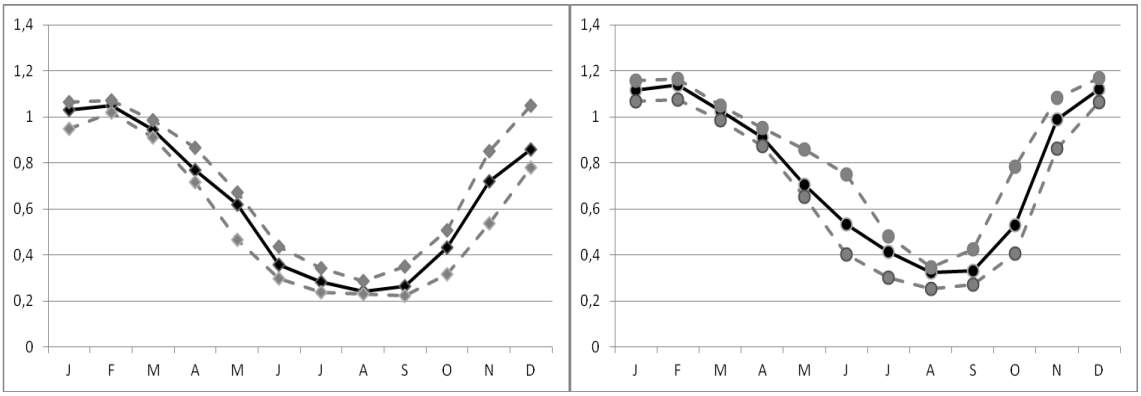


Figure 8.9 Evolution moyenne du SWI (noir trait continu : médiane, gris trait discontinu : quartile supérieur et inférieur) sur la période 2020-39 pour le scénario A2, pour Saint Jacques de la Lande (gauche, marqueur losange) et pour Landivisiau (droite, marqueur rond)

Le tableau 8.6 récapitule les pourcentages de fréquence du SWI selon 10 classes de valeurs allant de 0 à plus de 1, pour la période 2020-2039. Le SWI ne prend des valeurs inférieures à 0,2 qu'à l'est de la région avec 3,8 % de fréquence durant l'été. Il y aurait cependant plus de 50 % de probabilité que le SWI soit compris entre 0,2 et 0,3, l'été, à Saint Jacques de la Lande, contre plus de 27 % à Landivisiau.

Ces valeurs sont à comparer aux autres périodes du 21ème siècle afin de cerner d'éventuelles évolutions du SWI. Ces résultats, présentés dans le tableau 8.7, révèlent une évolution croissante du SWI à Saint Jacques de la Lande, qui serait inférieur à 0,2 sur plus de 40 % du temps à la fin du 21ème siècle. A la fin du siècle, Landivisiau pourrait également expérimenter un SWI inférieur à 0,2 à raison d'une fréquence de 1,3 %. Contrairement aux scénarios A1B et B1, pour lesquels le SWI évoluerait quelque peu en dent-de-scie durant le 21ème siècle, dans le cas du scénario A2, l'augmentation du SWI serait franche, à l'est comme à l'ouest du territoire. A la fin du siècle il y aurait ainsi 91 % de probabilité d'avoir une sécheresse caractérisée par un SWI inférieur à 0,3 à Saint Jacques de la Lande et de près de 60 % à Landivisiau.

Tableau 8.6 Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'année et de l'été (juin à septembre) pour la période 2020-39 d'après le scénario A2

	Saint Jacques de la Lande		Landivisiau	
Classes	**année**	**été**	**année**	**été**
[0;0,2[	1,25	3,75	0	0
[0,2;0,3[	21,25	51,25	9,17	27,50
[0,3;0,4[	10,00	22,50	11,25	28,75
[0,4;0,5[	10,42	16,25	9,58	20,00
[0,5;0,6[	7,92	3,75	6,25	11,25
[0,6;0,7[	6,25	1,25	5,83	5,00
[0,7;0,8[	7,92	1,25	6,25	3,75
[0,8;0,9[	7,50	0	5,42	2,50
[0,9;1[	8,33	0	9,17	1,25
1 et plus	19,17	0	37,08	0

Tableau 8.7 Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 7 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'été (juin à septembre) pour les périodes 2020-39, 2040-59, 2060-79 et 2080-99 d'après le scénario A2

	Saint Jacques de la Lande				Landivisiau			
Classes	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**
[0;0,2[	3,75	2,50	13,75	41,25	0	0	0	1,25
[0,2;0,3[	51,25	61,25	60,00	50,00	27,50	30,00	52,50	56,25
[0,3;0,4[	22,50	25,00	22,50	5,00	28,75	33,75	26,25	23,75
[0,4;0,5[	16,25	10,00	3,75	2,50	20,00	15,00	10,00	11,25
[0,5;0,6[	3,75	1,25	0,00	1,25	11,25	1,25	10,00	3,75
[0,6;0,7[	1,25	0,00	0,00	0,00	5,00	10,00	1,25	2,50
[0,7;0,8[	1,25	0,00	0,00	0,00	3,75	6,25	0	1,25

Le scénario A2, qui prévoit l'augmentation des températures les plus fortes des trois scénarios étudiés ici, du fait d'une forte croissance de la concentration en CO2 atmosphérique, aurait ainsi pour conséquence une diminution notable du SWI et donc une augmentation des sécheresses.

Pour confirmer cette interprétation le tableau 8.8 présente un récapitulatif des différences entre les fréquences d'occurrence du SWI d'après le scénario A2 et le scénario A1B. Les cases grisées indiquent les valeurs positives où la fréquence est plus importante pour le scénario A2. Il met ainsi en évidence une fréquence plus importante des épisodes secs à la fin du siècle, à l'est comme à l'ouest. Sur la période 2060-79 les sécheresses seraient plus fréquentes dans le cas du scénario A1B qu'avec le scénario A2 à Saint Jacques de la Lande. A Landivisiau, où les sécheresses apparaissaient comme moins fréquentes avec le scénario A1B qu'avec le scénario B1, on observe une nette augmentation de l'occurrence des épisodes secs avec le scénario A2.

Tableau 8.8 Différences entre les scénarios A2 et A1B pour les 4 périodes et les 2 stations, à partir des 4 classes de SWI correspondant à des épisodes de sécheresse

	Saint Jacques de la Lande				Landivisiau			
Classes	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**	**2020-39**	**2040-59**	**2060-79**	**2080-99**
[0;0,2[	1,37	-1,25	-2,50	15,00	0,00	0,00	0,00	1,25
[0,2;0,3[	2,44	13,75	-11,25	-8,75	7,26	5,00	21,25	23,75
[0,3;0,4[	-2,50	-12,50	13,75	-3,75	-5,77	2,50	-1,25	-5,00
[0,4;0,5[	4,35	5,00	1,25	-2,50	5,71	-6,25	-6,25	-3,75

L'analyse du SWI en tant qu'indicateur de sécheresse pédologique apporte une vision complémentaire au déficit d'évaporation. Leurs résultats en accord confirment l'intérêt des deux méthodes pour le suivi des sécheresses.

Une autre analyse complémentaire au suivi du déficit d'évaporation est proposée dans la seconde partie de ce chapitre. Cette partie traite plus particulièrement de la réserve hydrique des sols et de l'impact que la végétation en place peut avoir sur l'assèchement estival et la recharge automnale de ces réservoirs.

8.2 Durabilité des systèmes agricoles actuels dans le contexte du changement climatique

Dans cette seconde partie on cherche à estimer la durabilité de l'agriculture bretonne actuelle selon les trois scénarios SRES majeurs du GIEC (A1B, A2 et B1). L'objectif est de comparer le comportement hydrique de trois types d'occupation agricole majeure : légumes, blé et culture fourragère, dans trois secteurs bretons caractérisés par une taille de réserve utile similaire et un climat homogène. La figure 8.10 présente les trois secteurs retenus. Chaque secteur correspond à un climat différent et à une taille de réserve utile différente : supérieure à 200 mm pour les sols à grande réserve utile (en rouge sur la carte), comprise entre 150 et 200 mm pour les sols à réserve utile moyenne (en vert sur la carte) et inférieure à 150 mm pour les sols à faible réserve utile (en orangé). Ces seuils ont été fixés par rapport à la taille moyenne des réserves utiles des sols

occupés par l'agriculture. En Bretagne, il existe des sols peu profonds où la réserve utile est inférieure à 100 mm, mais ils ne sont que très rarement cultivés. Le choix de ces trois secteurs repose sur la proximité de pixels représentant au moins deux des classes d'occupation du sol retenues pour cette étude. Les secteurs rouge et orangé regroupent les trois classes sur des pixels voisins, tandis que le secteur vert ne présente que deux classes sur les trois : légumes et culture fourragère. Il est ainsi possible de suivre le comportement hydrique de trois types d'occupation du sol dans un contexte climatique littoral « frais » et une grande réserve utile (rouge), ou littoral « chaud » avec une faible réserve utile (orange), ainsi que pour un climat océanique un peu plus continental avec une réserve utile moyenne (vert).

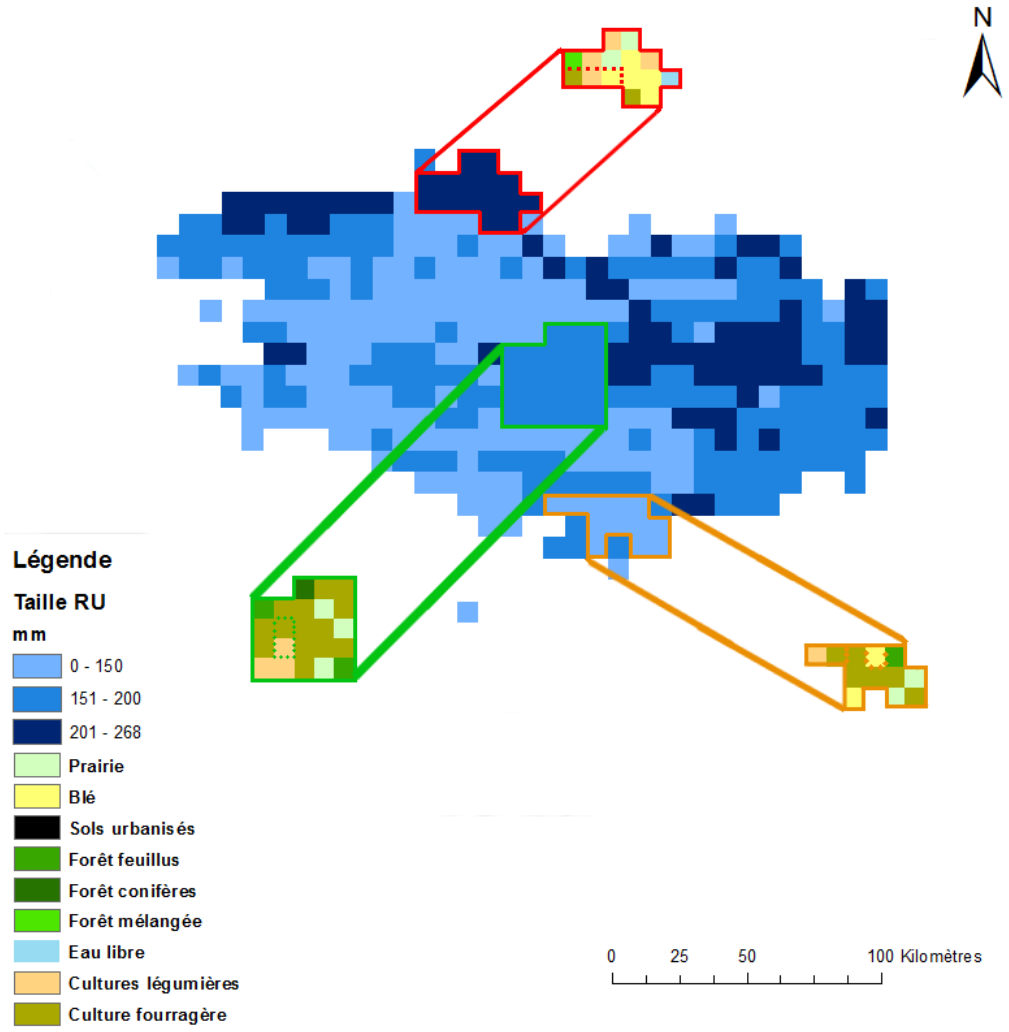


Figure 8.10 Identification des secteurs étudiés à partir de la carte des réserves utiles des sols bretons et de la carte d'occupation du sol d'après CORINE Land Cover. En rouge : secteur à grande réserve utile, en vert : secteur à réserve utile moyenne, en orangé : secteur à faible réserve utile

Pour chacun de ces pixels, on a retenu les valeurs de déficit d'évaporation et de réserve hydrique obtenues à partir du bilan hydrique moyen mensuel pour 4 périodes du 21ème siècle.

8.2.1 Comportement hydrique de la végétation en situation de réserve utile importante

Pour suivre l'évolution de la réserve hydrique à travers le 21ème siècle en fonction de trois types de végétation, on peut, dans un premier temps, comparer le comportement moyen du blé, des légumes et des cultures fourragères pour un même scénario (figure 8.11). Le graphique présente pour chaque période l'évolution de la réserve hydrique, du mois de mars au mois de février, de façon à commencer au moment où les réservoirs sont pleins et de terminer par le dernier mois de recharge hivernale. On voit ainsi que pour la première période, 2020-2039, la réserve hydrique est moins épuisée si la végétation au sol est du blé, elle l'est plus si on cultive des légumes et c'est dans le cas de cultures fourragères que la réserve est la plus asséchée. L'impact d'une culture de légumes sur la réserve hydrique varie peu au cours du 21ème siècle. Le minimum atteint en septembre étant de l'ordre de 120 mm sur les quatre périodes analysées. Cependant un léger retard s'observe en ce qui concerne la période de recharge : la réserve hydrique est remplie en décembre jusque dans les années 2070, puis, sur les dernières décennies, il faudrait attendre le mois de janvier pour avoir une recharge complète des réservoirs. La situation est relativement similaire pour les cultures fourragères, dont l'impact sur les réserves hydriques varie peu également au cours du temps.

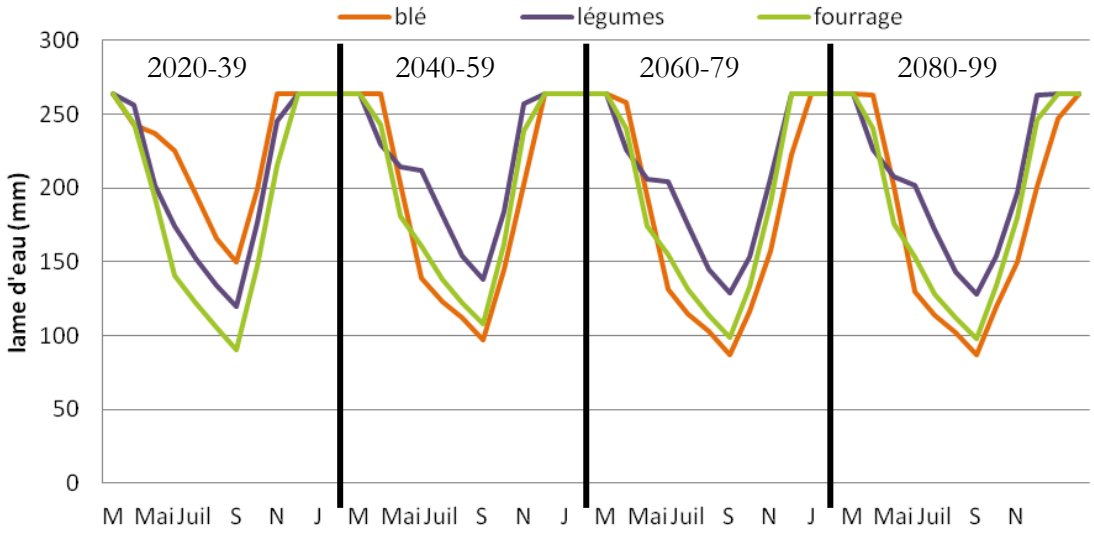


Figure 8.11 Evolution de la réserve hydrique selon trois types de végétation (blé, légumes et fourrages) à partir de moyennes mensuelles pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après le scénario A1B

Pour le blé, on peut voir une augmentation de l'impact de la culture sur la réserve hydrique. Au début du 21ème siècle la réserve hydrique contient 150 mm d'eau au moment le plus sec. Sur la seconde période, on passe à 100 mm à la fin de l'été. Cette teneur en eau se stabilise autour de 95 mm sur la seconde moitié du 21ème siècle.

Pour une telle association « sol - climat », la culture de légumes semble la plus adaptée puisqu'elle épuise moins la réserve hydrique durant l'été et que les évolutions au cours du 21ème siècle sont faibles et peu contraignantes. Les cultures fourragères, plus demandeuses en eau, peuvent éventuellement être considérées comme durables dans ce contexte puisque l'impact sur la réserve

hydrique semble constant au cours du 21ème siècle. La culture du blé soulève quelques interrogations. L'augmentation notable de l'assèchement estival entre la période 2020-2039 et 2040-2059 pourrait conduire, toutes choses égales par ailleurs, à une remise en cause de la culture du blé dans ce secteur.

Ces tendances établies à partir des modélisations climatiques d'après le scénario A1B doivent également être comparées avec les scénarios A2 et B1. Cette comparaison a été faite par type de culture. Pour les légumes, par exemple, qui auraient un impact relativement régulier sur la réserve hydrique des sols au cours du 21ème dans le contexte du scénario A1B, on peut voir avec la figure 8.12 que les autres scénarios ne prévoient pas la même évolution. Le scénario B1 prévoit une différence d'assèchement maximal en septembre d'environ 30 mm entre les périodes 2020-2039 et 2040-2059. Au cours de la période 2060-2079 on retrouverait un assèchement modéré comme en 2020-2039, pour arriver sur une situation intermédiaire (teneur en eau minimale de 140 mm) à la fin du siècle. Le scénario A2 prédit un assèchement estival des réserves hydriques qui augmenterait progressivement au cours du 21ème siècle. On passerait ainsi d'une réserve hydrique minimale de 150 mm au cours de la période 2020-2039 à une teneur en eau minimale de 120 mm environ à la fin du siècle.

Pour une culture fourragère, l'impact de la végétation sur la réserve hydrique conduit à un niveau minimal, en septembre, de 100 mm au cours du 21ème siècle d'après le scénario A1B. La figure 8.13 présente cet impact selon les trois scénarios A1B, B1 et A2. Dans le cas du scénario B1 on perçoit également une stabilité du niveau d'eau minimal dans les sols à la fin de l'été, de l'ordre de 120 mm environ. Le scénario A2 prévoit une plus grande variabilité de l'assèchement estival au cours du siècle. En effet sur la première période, 2020-2039, le niveau d'eau minimal serait similaire à celui attendu pour le scénario B1 avec 125 mm environ. Pour les deux périodes suivantes, 2040-2059 et 2060-2079, le scénario A2 prédit un assèchement compris entre les valeurs estimées par les deux autres scénarios, soient 110 et 105 mm respectivement. A la fin du siècle l'assèchement estival dans le contexte du scénario A2 serait le plus important avec moins de 100 mm d'eau contenue dans les sols. Ce qui serait proche de la situation sur la période 2020-2039 d'après le scénario A1B.

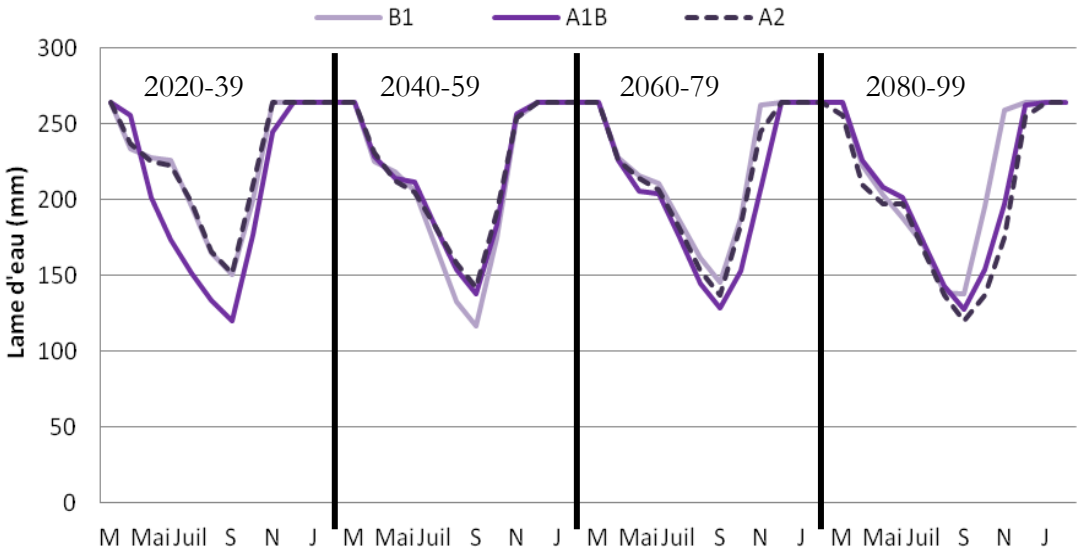


Figure 8.12 Impact d'une culture légumière sur la réserve hydrique pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

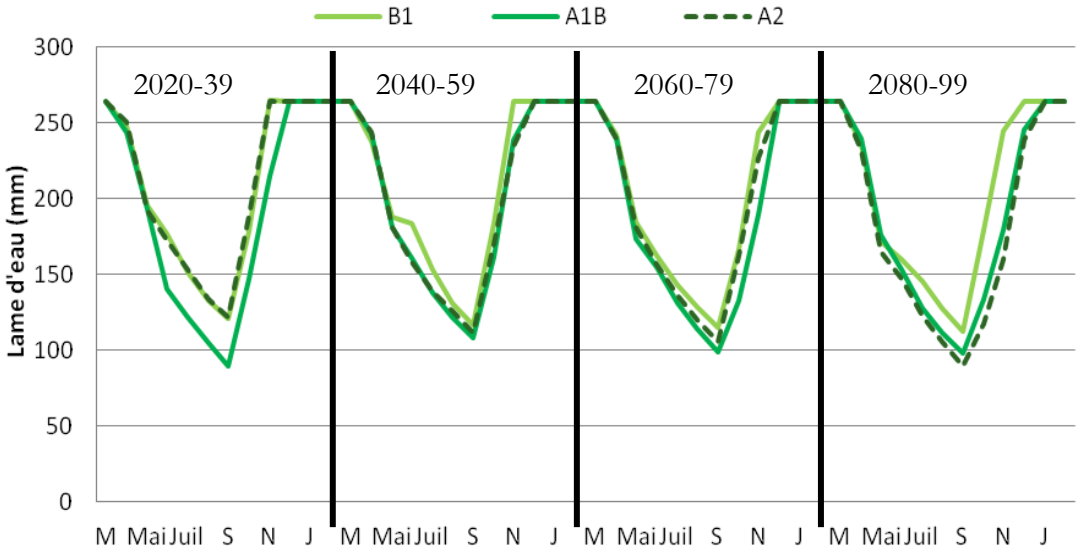


Figure 8.13 Impact d'une culture fourragère sur la réserve hydrique pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

En ce qui concerne l'impact du blé sur la réserve hydrique, le scénario A1B prévoit une évolution de l'assèchement estival au cours du siècle, qui tendrait à augmenter (figure 8.14).

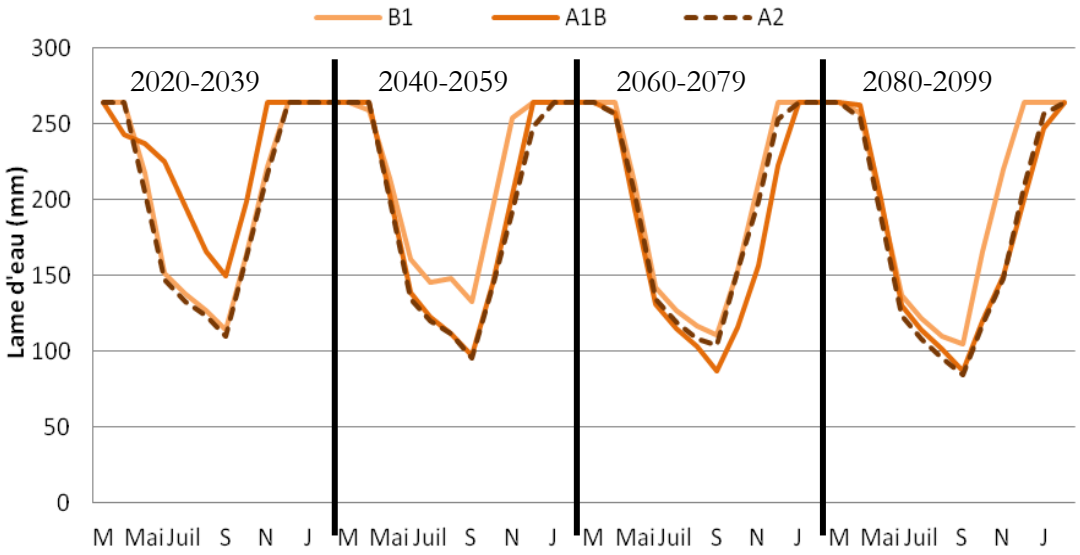


Figure 8.14 Impact d'une culture de blé sur la réserve hydrique pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

Pour les scénarios A2 et B1, tous les deux similaires sur la période 2020-2039 avec un assèchement plus marqué que pour le scénario A1B, l'évolution attendue au cours du siècle serait différente. Le scénario B1 prévoit un assèchement moindre de 20 mm environ sur la période 2040-2059 en comparaison à la période 2020-2039. Puis l'assèchement serait plus important sur la deuxième moitié du siècle, pour atteindre 100-105 mm d'eau dans la réserve hydrique à la fin de l'été, ce qui est supérieur aux estimations des autres scénarios. Dans le cas du scénario A2 les sécheresses évoluent moins que d'après le scénario B1. Il révèle une tendance à l'augmentation de l'assèchement des réserves hydriques, de façon à atteindre, sur la période 2080-2099, les teneurs hydriques les plus faibles avec 90 mm d'eau environ. Cet assèchement plus important entrainerait un retard de la recharge automnale. Les réserves hydriques seraient complètement remplies en février d'après les scénarios A1B et A2 à la fin du siècle, tandis que sur les périodes 2040-2059 et 2060-2079 la recharge serait complète en décembre voire en janvier.

En complément de ce suivi de la réserve hydrique selon trois types de cultures, une analyse du déficit d'évaporation (figure 8.15) a également été réalisée. La recharge des réserves qui se produit durant l'automne et l'hiver connaîtrait un retard progressif quels que soient le type cultural et le scénario concerné. Ces résultats sont en accord avec ceux correspondant au suivi de la réserve hydrique. En ce qui concerne l'assèchement estival, on peut remarquer grâce au code couleur rouge que les cultures fourragères souffriraient d'un stress hydrique plus important que les autres cultures. Cependant, les cultures de blé et de légumes connaitraient également un stress hydrique, principalement dans le contexte des scénarios A1B et A2. Le scénario B1, correspondant à des concentrations modérées en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, prévoit des sécheresses moins intenses sur ce secteur par rapport aux autres scénarios.

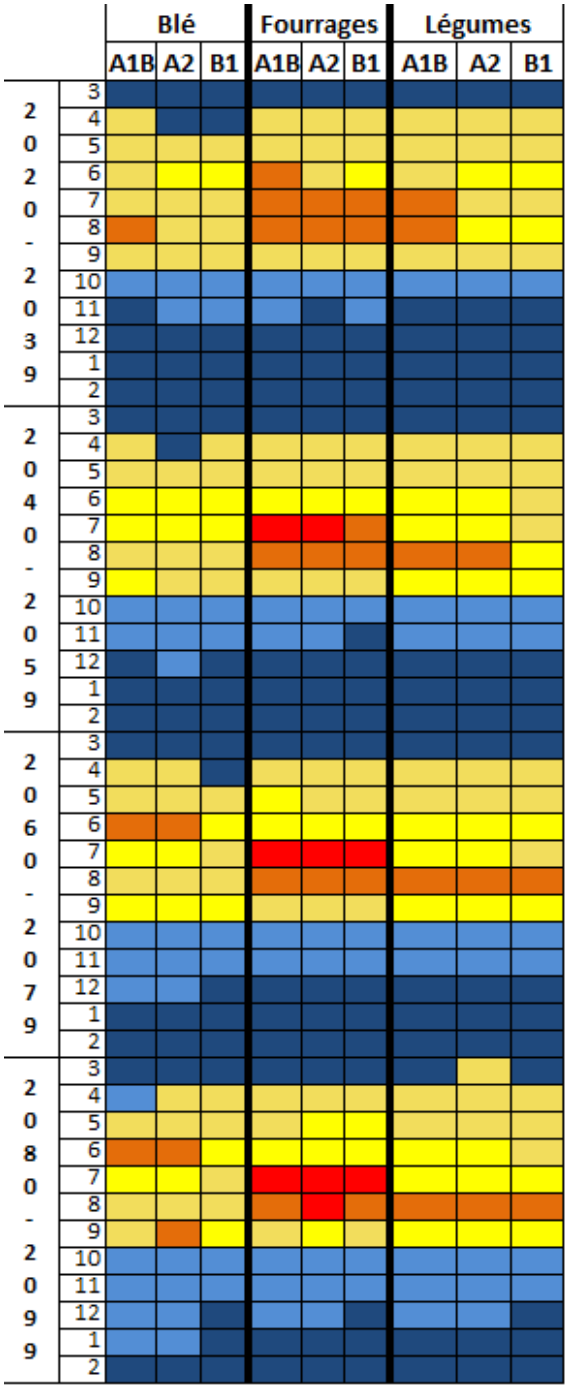


Figure 8.15 Evolution du DE mensuel sur 4 périodes du 21ème siècle, d'après 3 scénarios et pour 3 types culturaux (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, jaune clair : faible déficit P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm)

Ces résultats mettent ainsi en évidence que pour un secteur où les réserves utiles sont grandes et où la teneur en eau reste supérieure à 80 mm l'été, la végétation peut tout de même connaître une période de stress hydrique plus ou moins fort. Pour le blé et les légumes, qui nécessitent le plus d'eau au printemps et à la fin de l'été, leurs besoins peuvent être plus facilement comblés par les précipitations et la réserve hydrique que pour une culture fourragère comme le maïs. Ce type de culture atteint son maximum de besoin d'eau en août et septembre, période plus critique où les précipitations sont plus faibles qu'au printemps.

8.2.2 Comportement hydrique de la végétation en situation de réserve utile moyenne

Le secteur étudié ici est caractérisé par une profondeur de sol moyenne à l'échelle du territoire, ce qui fait que la taille de réserve utile est également moyenne. D'un point de vue climatique la situation est différente du secteur étudié précédemment puisque l'on se situe ici plus dans les terres. Le climat est ainsi caractérisé par une légère perte de l'influence de l'océan, par rapport au littoral, conduisant à une amplitude thermique légèrement plus importante ainsi qu'à des différences dans la répartition saisonnière des précipitations.

La figure 8.16 montre l'impact de deux types de végétation (légumes et fourrages) sur la réserve hydrique dans le contexte du scénario A1B. L'assèchement des réservoirs est plus rapide et plus important dans le cas d'une culture fourragère. Avec une culture de légumes, l'assèchement est plus modéré sur les mois d'avril et mai, ce qui explique que la réserve hydrique soit plus remplie. La différence d'impact entre les deux types d'occupations du sol sur la réserve hydrique est modéré sur la première moitié du siècle (10 mm environ en septembre) et plus importante sur la seconde moitié du 21ème siècle (30 mm environ en septembre). Cependant, les deux courbes se confondent sur la période automnale, indiquant une recharge de la réserve hydrique plus efficace dans un système fourrager que pour une culture de légumes.

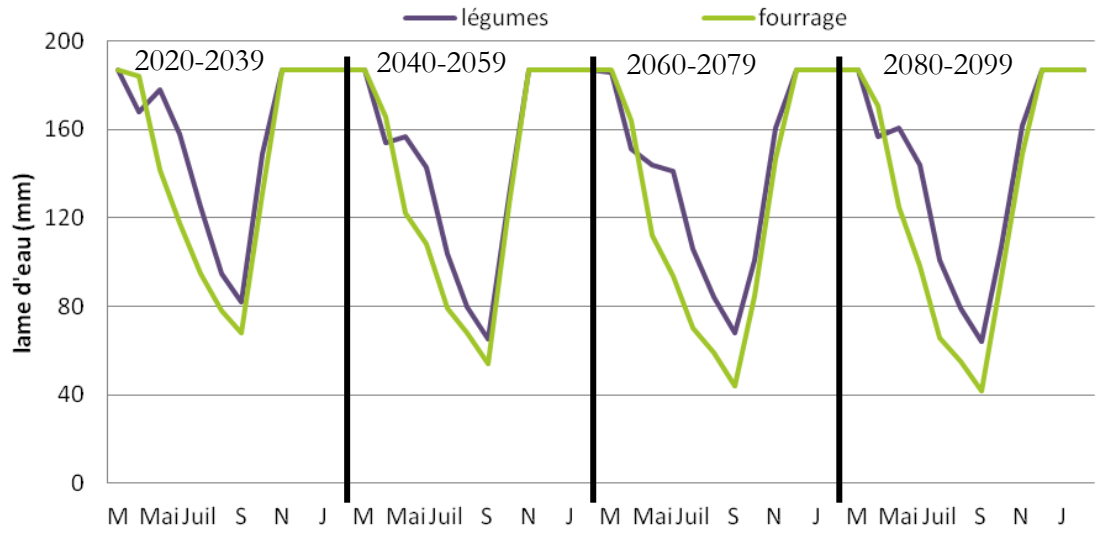


Figure 8.16 Evolution de la réserve hydrique selon deux types de végétation (légumes et fourrages) à partir de moyennes mensuelles pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile moyenne dans le centre de la Bretagne, d'après le scénario A1B

Pour une telle association « sol - climat » il semblerait qu'une culture de légumes soit plus durable au cours du 21ème siècle, du fait de son assèchement printanier plus modéré. Les cultures fourragères épuisent plus fortement la réserve hydrique, ce qui doit être compensé par des apports par irrigation. Pour autant, l'efficacité de la recharge automnale permet de limiter l'impact de la culture en place sur la ressource en eau des sols.

Ces informations peuvent être complétées par une analyse par type de culture pour lesquels les résultats selon trois scénarios SRES sont comparés. La figure 8.17 présente ainsi l'impact d'une culture de légumes sur la réserve hydrique selon les scénarios A1B, A2 et B1. Sur la première moitié du 21ème siècle, les scénarios A1B et B1 prévoient une teneur en eau dans les sols plus importante en mai qu'en avril, tandis que le scénario A2 prévoit un effet palier avec des valeurs relativement stables d'avril à juin. Puis, sur la période 2020-2039, les trois courbes sont confondues de juin à février. La réserve hydrique minimale, en septembre, est de 80 mm environ. Pour la période 2040-2059, les scénarios B1 et A1B prévoient le même comportement hydrique avec un minimum en septembre de 65 mm. Le scénario A2 prédit un assèchement plus modéré, la réserve hydrique contiendrait un peu plus de 80 mm d'eau en septembre. Sur la seconde moitié du 21ème siècle, les différences entre scénarios sont plus remarquables. Pour la période 2060-2079, de mars à septembre, les scénarios A2 et B1 sont similaires et prévoient des teneurs en eau

légèrement supérieures à celles modélisées dans le contexte du scénario A1B. La recharge automnale est également plus efficace, selon les scénarios A2 et B1, que d'après le scénario A1B. A la fin du siècle, le scénario A1B prévoit une légère augmentation de la réserve hydrique en mai, contrairement aux deux autres scénarios, mais, dès le mois de juillet, l'évolution est similaire pour les trois scénarios et on observe ainsi en septembre un minimum de 60 mm environ, quel que soit le scénario. La recharge automnale varie en efficacité selon les scénarios. Avec le scénario B1, la recharge est la plus efficace et la réserve est entièrement remplie dès le mois de novembre. Il faut attendre le mois de décembre, pour les deux autres scénarios, pour que la réserve soit rechargée à 100 %.

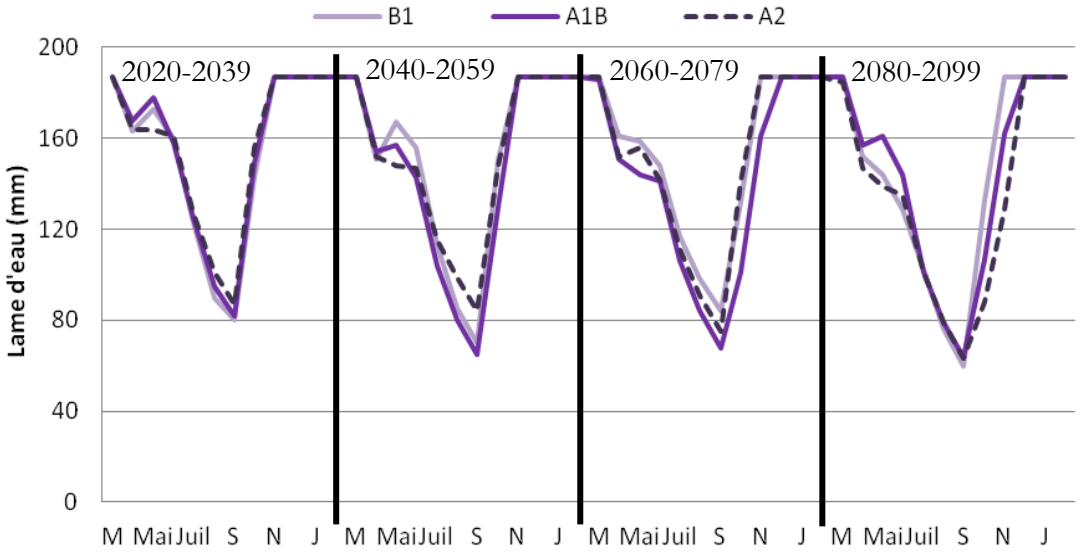


Figure 8.17 Impact d'une culture de légumes sur une réserve hydrique moyenne (180mm) pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile moyenne dans le centre de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

Dans le cas d'une culture fourragère (figure 8.18), et pour la période 2020-2039, les trois scénarios SRES modélisent le même comportement hydrique. Les légères différences perceptibles concernent la période de vidange de la réserve qui présenterait des niveaux plus faibles selon les scénarios A2 et B1 (60 mm environ en septembre) et légèrement plus élevés avec le scénario A1B (70 mm environ en septembre). Sur la seconde période, 2040-2059, les trois scénarios renvoient également un comportement similaire, excepté entre mai et juin où le scénario B1 prévoit une stabilisation de la réserve hydrique. Le minimum, atteint en septembre, serait de l'ordre de 60 mm environ. Sur la période 2060-2079 le scénario A1B est le plus pessimiste et prévoit un minimum de réserve hydrique de près de 40 mm en septembre. Ce pessimisme se retrouve également au niveau de la recharge automnale puisqu'il faudrait un mois de plus que pour les deux autres scénarios pour que la réserve hydrique soit entièrement remplie. Les scénarios B1 et A2 prévoient un minimum en septembre de 50 à 55 mm. Sur la période 2080-2099, l'assèchement est plus important d'après les scénarios A1B et A2, on atteint 40 mm au minimum en septembre. Le scénario B1, légèrement plus optimiste, prévoit un assèchement plus modéré, le minimum de la réserve hydrique atteint en septembre est de 55 mm. A l'automne, la recharge de la réserve est complète dès le mois de novembre selon le scénario B1, il faut attendre décembre avec les deux autres scénarios.

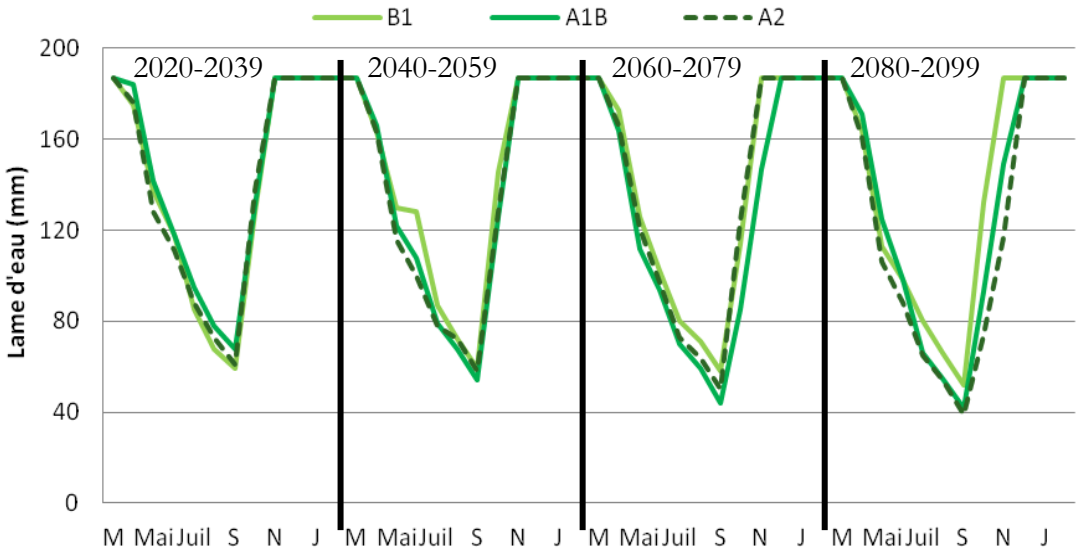


Figure 8.18 Impact d'une culture fourragère sur une réserve hydrique moyenne pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile moyenne dans le centre de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

Quel que soit le scénario étudié sur ce secteur, on remarque une augmentation progressive de l'assèchement des sols au cours du 21ème siècle. Les cultures fourragères ont un impact plus fort sur la réserve hydrique que les cultures de légumes. Pour compléter cette perception de l'impact de la végétation sur la teneur en eau des sols, le déficit d'évaporation est également présenté ici (figure 8.19).

Pour ce secteur breton, où le climat est de type océanique légèrement dégradé et où la taille de réserve utile est moyenne, le déficit d'évaporation varie différemment selon le type cultural. Celui-ci est nettement plus faible dans le cas d'une culture de légumes par rapport à une culture fourragère. Pour ces dernières on remarque une augmentation de la durée où le déficit d'évaporation est supérieur à 30 mm (couleur jaune à rouge) au cours du 21ème siècle. L'intensité des épisodes secs augmente également au cours du siècle puisque l'on dépasse le seuil de 100 mm de déficit d'évaporation au mois de juillet au cours de la période 2080-2099 pour le scénario A2 et dès la période 2060-2079 pour le scénario A1B. A la suite de cette période d'assèchement estival, la recharge automnale est rapidement efficace. Les réserves hydriques seraient remplies complètement dès le mois de novembre jusque dans les années 2060 pour le scénario A1B et 2080 pour le scénario A2, comme cela a été vu avec le suivi de la réserve hydrique précédemment. Au niveau des cultures légumières, le déficit d'évaporation est modéré jusque dans les années 2050. A partir de la période 2060-2079, la végétation connaitrait un stress hydrique légèrement plus important au mois d'août, le déficit d'évaporation dépassant le seuil de 60 mm. Le scénario A1B prévoit un déficit d'évaporation plus important que les autres scénarios durant la période 2060-2079, tandis que, sur la période 2080-2099, c'est le scénario A2 qui est le plus pessimiste.

Dans ce secteur les légumes ont donc un impact modéré sur la réserve hydrique des sols. Le stress hydrique serait plus faible pour une culture légumière par rapport à une culture fourragère. Les apports d'eau supplémentaires par irrigation seraient donc plus importants pour un sol occupé par des fourrages. Les légumes semblent donc être une culture plus durable que les fourrages pour ce secteur.

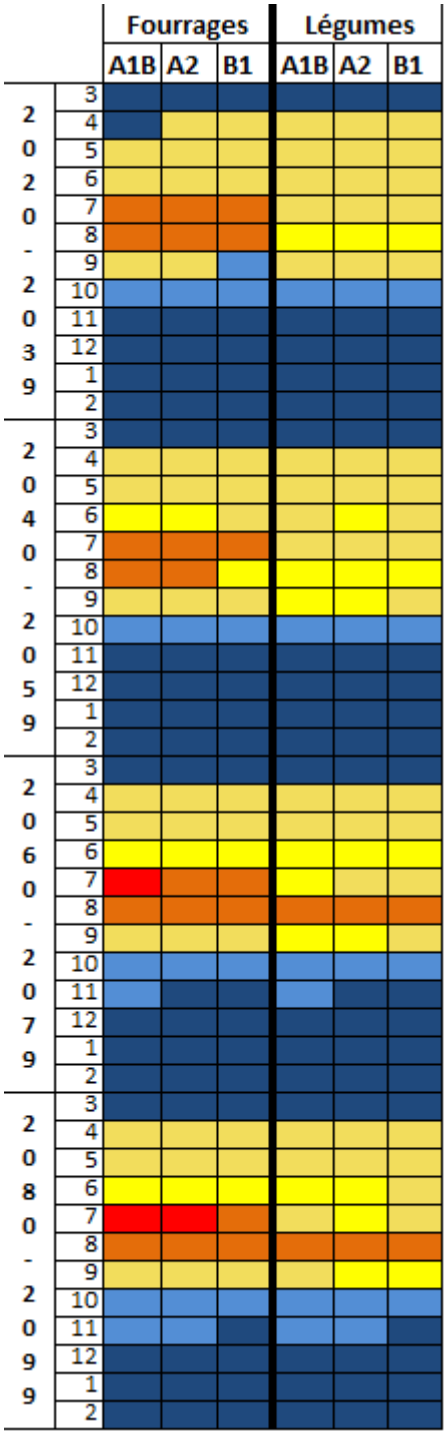


Figure 8.19 Evolution du DE mensuel sur 4 périodes du 21ème siècle, d'après 3 scénarios et pour 2 types culturaux (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, jaune clair : faible déficit P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm)

8.2.3 Comportement hydrique de la végétation en situation de faible réserve utile

Le secteur étudié ici est caractérisé par une profondeur de sol et une taille de réserve utile plutôt faible à l'échelle du territoire. La réserve utile des sols étudiés ici est de 139 mm. D'un point de vue climatique, on retrouve un climat de type maritime, comme pour le premier secteur étudié, mais qui connait une moyenne thermique plus élevée du fait de sa localisation au sud de la région.

La figure 8.20 montre l'impact de trois types de végétation (blé, légumes et fourrages) sur la réserve hydrique dans le contexte du scénario A1B. Dans le cas d'une occupation du sol par du blé, la réserve hydrique est complètement vide durant les mois d'août et septembre, quelle que soit la période au cours du 21ème siècle. L'assèchement printanier est très rapide et au mois de juin on serait déjà sous la barre des 10 mm d'eau restant dans la réserve hydrique. Au cours du siècle, la période d'assèchement aurait tendance à être plus intense et plus longue. Dans le cas d'une culture de légumes, l'assèchement est un peu moins important que pour le blé au cours du printemps. Il est par contre plus rapide durant l'été ce qui fait qu'au mois de septembre la réserve hydrique est complètement vidée. Au cours du siècle, l'assèchement estival tend à gagner en intensité et en rapidité, ainsi, sur la période 2080-2099, la réserve hydrique est vide pendant deux mois : août et septembre. En ce qui concerne les cultures fourragères, l'assèchement est plus modéré au début du siècle, puisque l'épuisement de la réserve hydrique n'est pas complet. Cependant au cours du siècle, l'impact de la culture sur la réserve hydrique évoluerait plus rapidement que pour les deux autres types de culture, conduisant à un assèchement complet en septembre, durant la période 2060-2079 et pour les mois d'août et septembre durant la période 2080-2099. On peut également remarquer que la pente des différentes courbes tend vers la verticale entre les mois de mars et juillet, traduisant une intensité plus marquée de l'assèchement au cours du printemps. Une des conséquences de cet assèchement de plus en plus intense porte sur l'efficacité de la recharge automnale. Etant donné que la réserve utile est plus petite que pour les deux autres secteurs étudiés ici, le remplissage est globalement plus rapide. Ainsi, jusque dans les années 2050, les réserves sont complètement rechargées dès le mois de novembre. Puis, à partir des années 2060, la recharge est moins efficace et prend un mois de retard avant d'atteindre un remplissage complet en décembre.

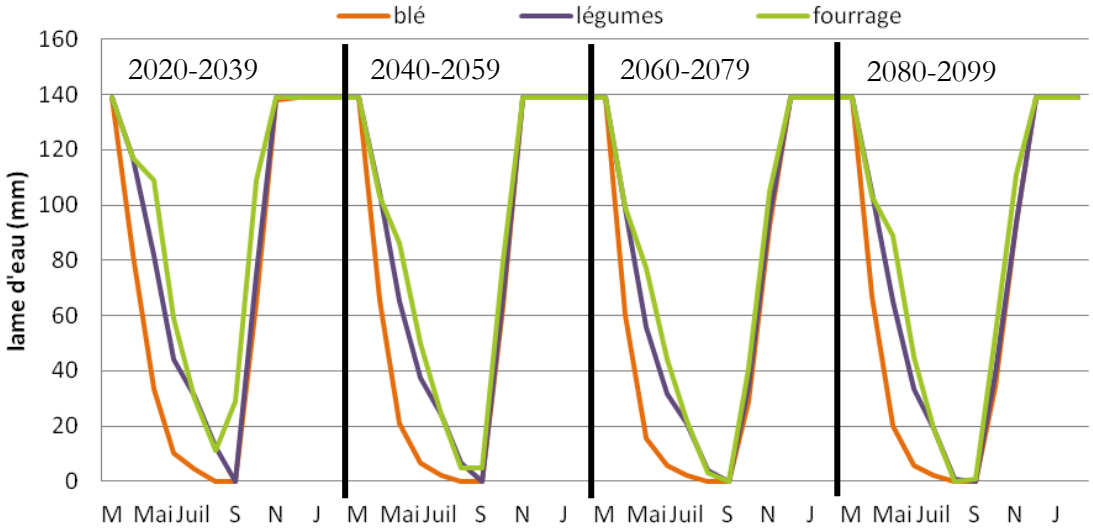


Figure 8.20 Evolution de la réserve hydrique selon trois types de végétation (blé, légumes et fourrages) à partir de moyennes mensuelles pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après le scénario A1B

Pour cette association « sol - climat », il est plus difficile de classer les cultures selon leur potentielle durabilité au cours du 21ème siècle, puisque chacune des cultures a un impact fort sur la réserve hydrique. Le blé semble, par exemple, peu concevable pour une utilisation sur tout le siècle du fait d'une période d'assèchement assez importante au cours des mois de mai et juin. Les

fourrages et les légumes, qui ont un impact plus modéré sur la réserve hydrique, ne peuvent pas pour autant être qualifiés de durable dans ce contexte. Une piste à suivre pour ce secteur serait donc d'utiliser des variétés de blés, fourrages ou légumes moins demandeuses en eau ou dont les phases phénologiques nécessitant le plus d'eau soient réparties différemment dans l'année.

Ces informations peuvent être complétées par une analyse par type de culture pour lesquels les résultats selon trois scénarios SRES sont comparés. La figure 8.21 présente ainsi l'impact d'une culture de blé sur la réserve hydrique selon les scénarios A1B, A2 et B1. De manière générale, l'assèchement printanier des réserves hydriques évolue de la même façon pour les trois scénarios. Durant les périodes 2040-2059 et 2060-2079, l'assèchement serait légèrement plus modéré au niveau des mois de mai et juin selon le scénario B1. A la fin du siècle, le scénario A2 prévoirait un assèchement un peu plus intense en mai et juin en comparaison des autres scénarios. Au niveau de la recharge hivernale, on perçoit des différences entre scénarios dès la deuxième période, 2040-2059, où le scénario A2 prédit une recharge complète en décembre, soit un mois de retard par rapport aux autres scénarios. Au cours de la période 2060-2079, la recharge prévue par les scénarios A2 et B1 a quasiment le même comportement, mais il faut attendre un mois de plus avec le scénario A2 pour que la recharge soit complète. Le scénario A1B prévoit une recharge nettement moins efficace entre septembre et octobre, ce qui fait qu'il faut attendre le mois de décembre pour que la réserve soit complètement remplie, comme pour le scénario A2.

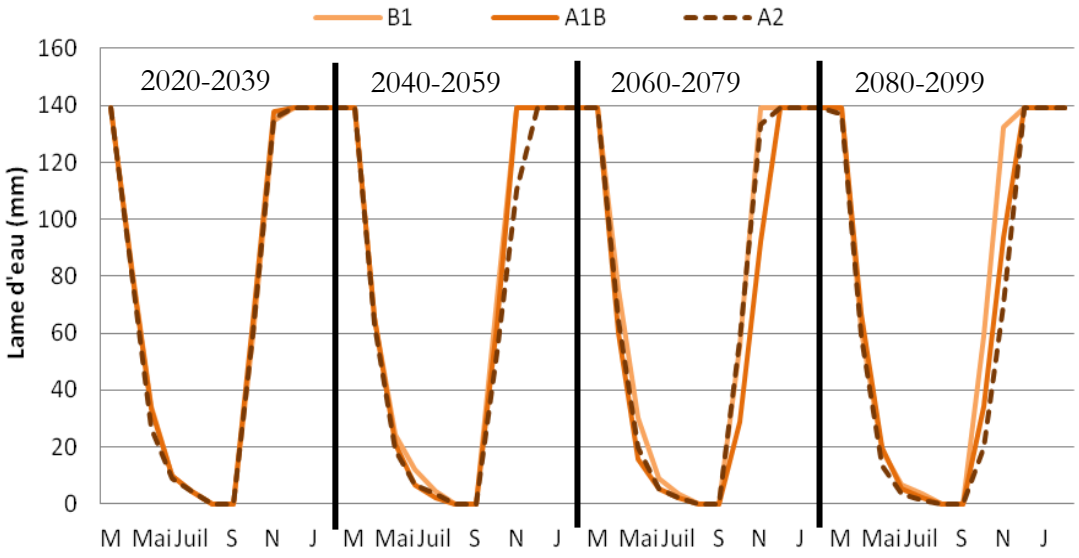


Figure 8.21 Impact d'une culture de blé sur une réserve hydrique faible en sud-Bretagne pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

A la fin du siècle, les trois scénarios prédisent une recharge complète en décembre mais avec une efficacité variable. Le scénario B1 prévoit un manque de 5 mm environ en novembre pour avoir une recharge complètement remplie, le scénario A1B prévoit une lacune de 40 mm environ en novembre et d'après le scénario A2 il manquerait un peu plus de 60 mm en novembre.

En ce qui concerne les cultures de légumes, la figure 8.22 montre les différences d'impact de la végétation sur la réserve hydrique d'après les trois scénarios SRES. Sur la période 2020-2039, les scénarios prévoient le même comportement de la réserve hydrique. Au cours de la période 2040-2059, le scénario B1 prévoit un assèchement printanier plus modéré et d'après le scénario A2 la

recharge automnale, moins efficace, prendrait un mois de retard et ne serait complète qu'en décembre. Pour la période 2060-2079, les différences entre scénarios concernent principalement la période automnale. La recharge est plus efficace avec le scénario B1, un peu moins d'après le scénario A2 et encore moins selon le scénario A1B. A la fin du siècle, les différences d'intensité de l'assèchement printanier font que la réserve hydrique serait complètement vide d'après les scénarios A1B et A2, le scénario B1, du fait d'un assèchement plus modéré en juin et juillet, ne prévoit une réserve vide que pendant le mois de septembre. Sur cette période, la réserve hydrique serait complètement remplie dès le mois de novembre pour la période 2080-2099 d'après le scénario B1. Pour les autres scénarios, il faut attendre le mois de décembre, mais la recharge serait tout de même plus efficace selon le scénario A1B par rapport au scénario A2.

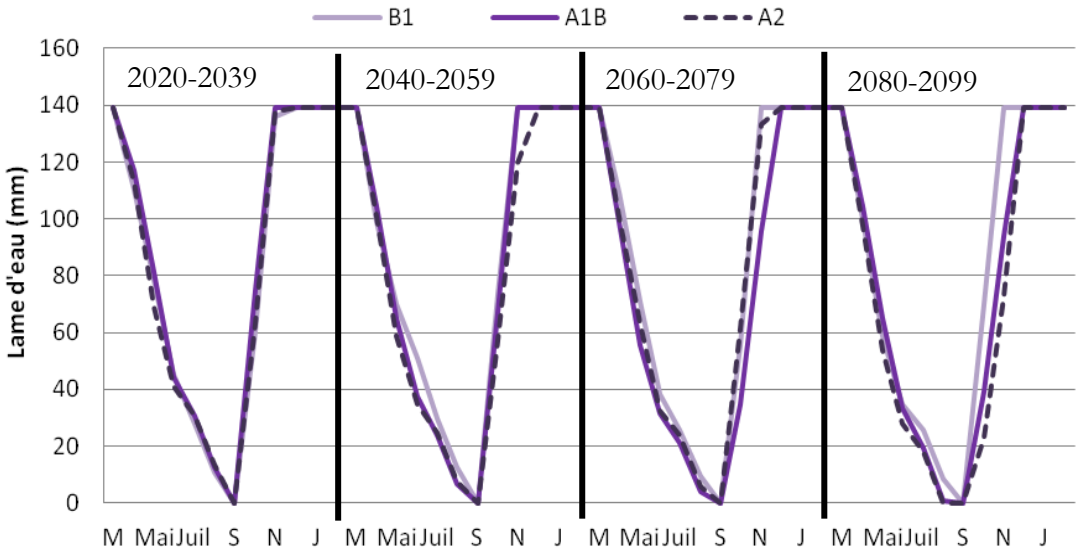


Figure 8.22 Impact d'une culture de légumes sur une réserve hydrique faible en sud-Bretagne pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

L'impact des cultures fourragères sur la réserve hydrique varie plus d'un scénario SRES à l'autre (figure 8.23) par rapport aux autres types culturaux. Sur la période 2020-2039, les scénarios A1B et B1 prévoient un assèchement modéré au mois de mai, contrairement au scénario A2, qui n'a, pour autant, pas d'impact sur la teneur en eau à la fin de l'été. Pour la période 2040-2059, le scénario B1 prédit un impact de la végétation sur la réserve hydrique modéré par rapport aux autres scénarios. Le minimum d'eau contenu dans les sols, de l'ordre de 10 mm, serait atteint en août. Les deux autres scénarios prévoient un assèchement maximal en septembre, sur la période août-septembre, le niveau d'eau serait inférieur à 5 mm. Les réserves hydriques seraient tout de même complètement remplies en novembre d'après les scénarios A1B et B1. Pour le scénario A2, la recharge automnale est quasiment aussi efficace, une légère faiblesse en novembre fait qu'il faut attendre le mois de décembre pour que la réserve hydrique soit entièrement rechargée. Durant la période 2060-2079, les réserves seraient plus asséchées dans le cas du scénario A1B, avec 0 mm d'eau dans les réserves en septembre et un remplissage complet des réservoirs hydriques en décembre. Les autres scénarios prévoient un assèchement légèrement plus modéré, le minimum étant atteint en août avec 5 mm environ. La période de recharge commence dès le mois de septembre ce qui permet d'avoir un remplissage complet des réservoirs dès le mois de novembre.

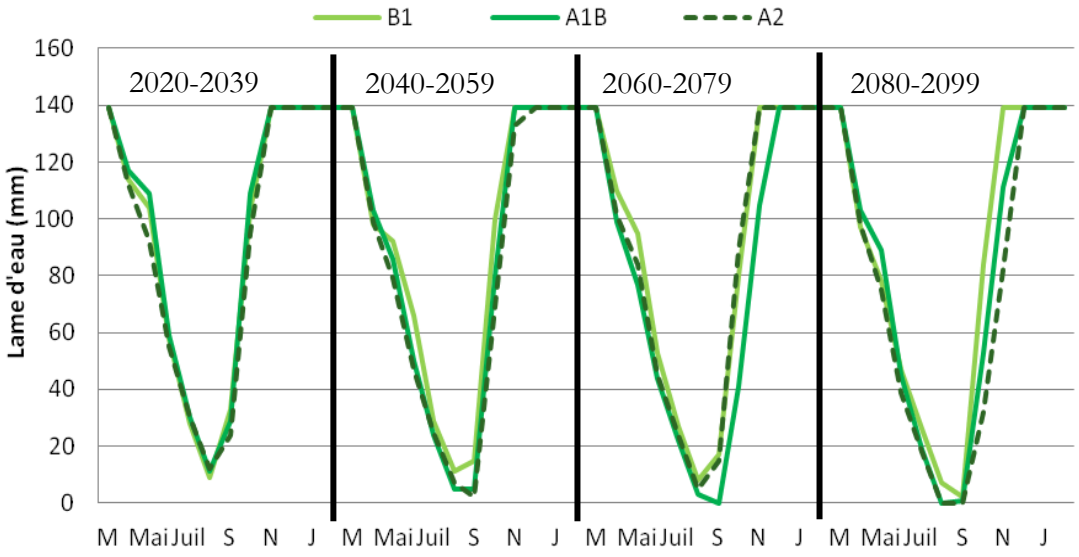
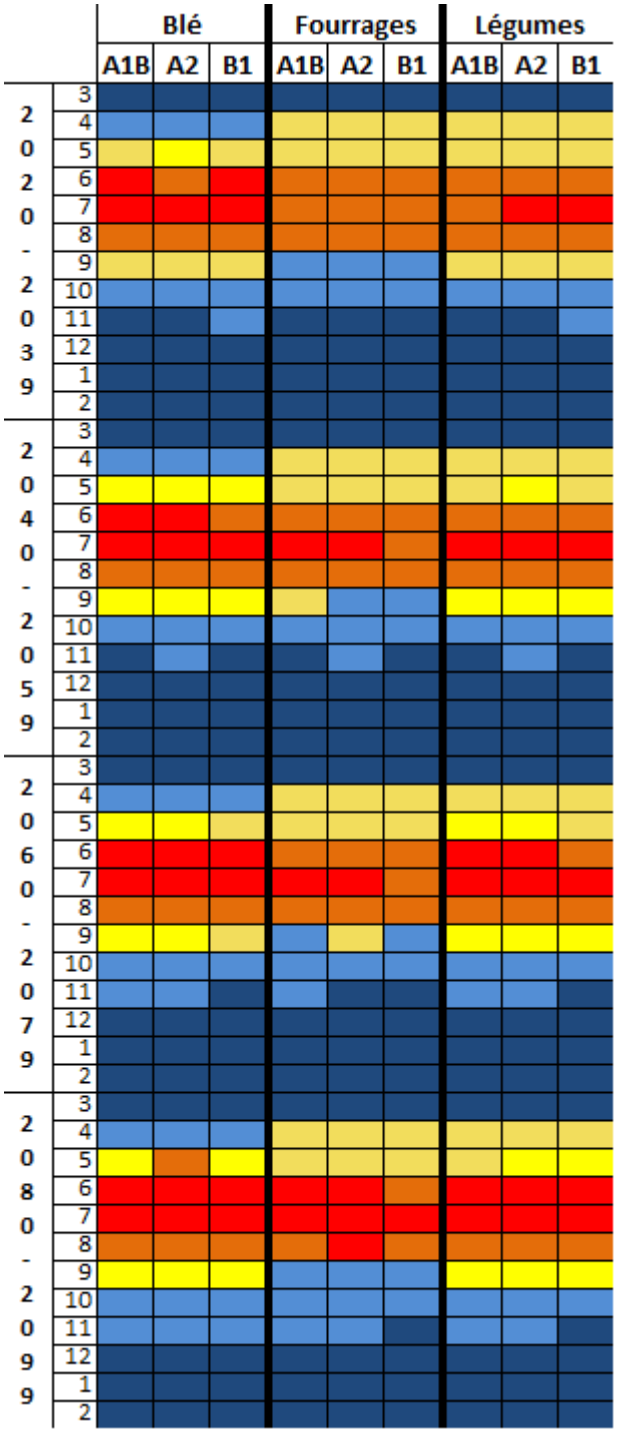


Figure 8.23 Impact d'une culture fourragère sur une réserve hydrique faible pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES

Sur la dernière période du 21ème siècle, 2080-2099, les scénarios A2 et A1B prévoient un assèchement légèrement plus important que le scénario B1 durant les mois de juin, juillet et août. Ainsi les réserves sont complètement sèches sur la période août-septembre d'après les scénarios A2 et A1B, tandis que, selon le scénario B1, il y aurait toujours un peu d'eau dans les sols. Dès lors la recharge automnale est plus efficace dans le contexte du scénario B1 et se terminerait en novembre. Pour les deux autres scénarios, on observe un délai d'un mois supplémentaire.

Quel que soit le scénario étudié, on perçoit sur ce secteur une augmentation progressive de l'assèchement des sols au cours du 21ème siècle. Pour compléter cette perception de l'impact de la végétation sur la teneur en eau des sols, le déficit d'évaporation est également présenté ici (figure 8.24). Pour ce secteur, on observe un déficit d'évaporation sur une période plus courte de l'année en comparaison avec les autres secteurs étudiés précédemment. Cependant la période où le déficit d'évaporation est inférieur à 30 mm est moins importante que pour les autres secteurs. Le climat de cet espace, associé à une faible réserve utile, fait que le déficit d'évaporation augmente rapidement et peut être très intense.

Pour un sol où l'on cultive du blé le déficit d'évaporation dépasse les 100 mm en juin et juillet dès la période 2020-2039 pour le scénario A1B, à partir de la période 2040-2059 d'après le scénario A2 et à partir de la période 2060-2079 si l'on considère le scénario B1. Le blé connaitrait un stress hydrique en constante augmentation au cours du siècle, tous scénarios confondus. Si l'on considère une culture fourragère, la période où le déficit d'évaporation est positif est globalement plus précoce que pour une culture de blé, elle commence en avril et se termine en août. Dès le mois de septembre, la recharge de la réserve utile est lancée, sauf sur la période 2040-2059 d'après le scénario A1B et sur la période 2060-2079 d'après le scénario A2, où il faut attendre le mois d'octobre. Si l'évolution du déficit d'évaporation au début du printemps est plus progressive ici qu'avec une culture de blé, par la suite elle augmente plus rapidement. On passe ainsi directement d'un déficit inférieur à 30 mm à un déficit supérieur à 60 mm voire à 100 mm à la fin du siècle.



Le scénario B1 serait, tout au long du siècle, un peu plus optimiste que les deux autres scénarios quant au stress hydrique subi par la végétation. Pour les cultures légumières, le déficit d'évaporation dépasse les 100 mm au mois de juillet sur la période 2020-2039 d'après le scénario A2 et B1. Le déficit augmente rapidement au cours du printemps puisque l'on passerait d'un déficit inférieur à 30 mm directement à un déficit supérieur à 60 mm. Au cours de la période suivante, 2040-2059, les trois scénarios prévoient un comportement relativement similaire du déficit d'évaporation qui serait compris entre 60 et 100 mm en juin et août, et supérieur à 100 mm en juillet. Le déficit d'évaporation augmenterait ainsi progressivement au cours du siècle. Durant la période 2060-2079, il serait supérieur à 100 mm durant les mois de juin et juillet selon les scénarios A1B et A2. Au cours de la période suivante les trois scénarios prévoient un déficit supérieur à 100 mm durant ces deux mois.

Figure 8.24 Evolution du DE mensuel sur 4 périodes du 21ème siècle, d'après 3 scénarios et pour 3 types culturaux (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, jaune clair : faible déficit P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm)

Avec cette analyse pour un site où la réserve utile est faible, on perçoit une différence d'inertie par rapport à des réserves utiles plus grandes. Ici, la réserve hydrique diminue plus rapidement au printemps, mais elle se recharge également plus vite que dans des sols profonds.

Synthèse : Perception des sécheresses par un autre indice et réflexion sur la durabilité des cultures bretonnes dans le contexte du changement climatique

Le suivi des sécheresses avec l'indice SWI de Météo-France a permis d'avoir une approche complémentaire de l'analyse préalablement effectuée à partir du déficit d'évaporation. En suivant l'évolution de l'humidité des sols on perçoit, pour tous les scénarios SRES considérés, une augmentation plus importante de l'intensité des sécheresses pour la partie orientale de la Bretagne. La moitié occidentale, du fait d'un climat océanique plus humide et plus frais l'été, connaitrait des épisodes secs plus modérés mais dont l'intensité tendrait tout de même à augmenter au cours du siècle. La principale différence entre les résultats du SWI et du déficit d'évaporation concerne la durée des épisodes secs, qui tend à être un peu plus longue avec le SWI. Les résultats de l'analyse du SWI et du déficit d'évaporation, en accord, confirment l'intérêt des deux indices pour le suivi des sécheresses.

L'analyse de la durabilité de l'agriculture bretonne a été réalisée à partir de trois secteurs bretons caractérisés par des identités climatiques et pédologiques différentes. Pour chacun de ces sites, nous avons pu comparer l'impact de deux ou trois types de culture sur la réserve hydrique afin d'identifier les cultures les plus adaptées au contexte climatique et pédologique local.

Pour une grande réserve utile et un climat océanique de littoral nord, la culture de légume semble plus durable qu'une culture de blé ou de fourrage. En effet, les légumes épuisent moins la réserve hydrique au cours de l'été et on n'observe pas de réelles tendances à l'augmentation des besoins en eau au cours du 21ème siècle. De plus, les légumes connaitraient un stress hydrique moins important que les autres systèmes culturaux sur ce site. Si l'on considère un secteur situé dans les terres, où la réserve utile est dans la moyenne bretonne, les légumes semblent également plus adaptés que les fourrages. Ces derniers épuisent tellement la réserve hydrique qu'il serait indispensable d'apporter de l'eau par irrigation. Il est donc difficile de considérer ce type de culture comme durable dans le temps. Le suivi du déficit d'évaporation pour ces deux cultures révèle un stress hydrique plus important pour les fourrages que pour les légumes. Dans le cas d'une faible réserve utile et un climat océanique de littoral sud, l'impact des cultures sur la réserve hydrique est fort. Cependant la faible inertie des petites réserves hydriques fait qu'elles s'épuisent et se rechargent rapidement. De plus, les trois types de cultures sont soumis à un stress hydrique important dans ce contexte. Il est donc délicat de cerner, ici, le type de culture le plus adapté à ce secteur. Une solution serait peut être d'utiliser des variétés moins demandeuses en eau ou dont les besoins maximums seraient répartis différemment au cours de l'année.

Conclusion de la troisième partie

Les résultats relatifs à l'analyse des sécheresses présentés dans cette partie concernent le suivi des sécheresses passées ainsi que la modélisation des sécheresses futures selon des projections climatiques sur le 21ème siècle.

Au sein de la région, on distingue différentes caractéristiques en termes de vulnérabilité à la sécheresse. Le sud et l'ouest du territoire breton connaissent des épisodes secs plus fréquents et plus intenses que l'ouest et le nord de la région, au climat plus frais et plus humide. Au 20ème siècle, le déficit d'évaporation annuel moyen ressenti en Bretagne a été principalement compris entre 100 et 200 mm. Cette intensité de déficit traduit un manque d'eau certain pour la végétation qui reste pour autant suffisamment modéré pour être compensé par des apports d'eau par irrigation par exemple. Cependant, des sécheresses exceptionnelles de par leur intensité ont également été observées au 20ème siècle. C'est le cas des sécheresses de 1976 et de 1989, où le déficit a atteint 300 et 400 mm à Rennes, qui ont eu des conséquences dramatiques sur l'agriculture. Ces seuils caractérisant des sécheresses majeures sont utilisés pour servir de repère pour l'analyse des sécheresses dans le contexte du changement climatique.

L'évolution du déficit d'évaporation au cours du 21ème siècle est étudiée à partir de 3 scénarios SRES du GIEC : B1, A1B et A2. En comparant les évolutions pour chaque scénario on peut se rendre compte qu'au début du 21ème siècle les trois scénarios prévoient des sécheresses de même intensité. Pour autant à l'horizon 2100 c'est bien dans le cas du scénario A2 que les sécheresses les plus intenses seraient observées. On atteindrait à la fin du 21ème siècle, dans le cas du scénario A2, un déficit compris entre 100 et 200 mm à l'ouest et 250 à 350 mm à l'est. On aurait donc un risque plus régulier d'avoir des sécheresses similaires à celle de 1976, telle que ressentie à Rennes, toutes choses égales par ailleurs. De même, la Bretagne connaitrait une recharge automnale des réserves hydriques des sols moins efficace pour les sols profonds à la fin du 21ème siècle. La dynamique hydrique pourrait s'en trouver altérée, ce qui pourrait occasionner des sécheresses plus précoces. Les valeurs d'intensité des sécheresses proposées dans ce chapitre doivent être interprétées au regard des incertitudes sur les scénarios SRES, ainsi que sur les biais liés aux données climatiques et pédologiques, qu'ils soient liés à la méthodologie d'obtention des données ou bien rajoutés par des calculs du bilan hydrique.

Les caractéristiques des sécheresses simulées sur le 21ème siècle sont également étudiées à partir de l'indice SWI de Météo-France, afin d'avoir une approche complémentaire au déficit d'évaporation. Les résultats obtenus confirment les tendances observées à partir du déficit d'évaporation, mais diffèrent sur la longueur des épisodes secs. Ceux-ci sont plus longs d'après le SWI, par rapport à l'analyse basée sur le déficit d'évaporation.

Les effets de l'occupation du sol sur l'assèchement des réserves hydriques ont également été étudiés ici afin d'avoir une approche agronomique de l'aléa sécheresse en Bretagne. Pour cela

nous avons comparé l'évolution de la teneur en eau dans les sols selon deux à trois types d'occupation du sol agricole, dans un contexte pédologique et climatique homogène. D'après les tendances observées, les légumes impacteraient moins la réserve hydrique que le blé ou les fourrages dans un contexte de grande réserve utile sous un climat océanique de littoral nord. Les cultures fourragères, dont le maïs, impactent considérablement les réserves hydriques selon les trois climats étudiés et pour les trois types de sols. Cependant, il reste délicat d'établir quelle culture impacterait le moins la ressource en eau. L'utilisation de variétés moins demandeuses en eau ou, dont les besoins maximums seraient répartis différemment au cours de l'année, pourrait donc être une solution pour limiter l'impact de la végétation sur la ressource en eau.

Conclusion générale

Les objectifs de cette thèse étaient de présenter le risque actuel lié aux sécheresses en Bretagne et d'évaluer les évolutions possibles, au 21ème siècle, dans un contexte de changement climatique, en termes de fréquence et d'intensité. En effet, le risque sécheresse observé au 20ème siècle en Bretagne pourrait augmenter, du fait de températures en augmentation et de précipitations qui tendent à diminuer. Le changement climatique est traité d'après trois scénarios SRES du GIEC : B1, A1B et A2, traduisant des évolutions socio-économiques différentes. En s'intéressant à ces scénarios, on considère donc trois évolutions climatiques différentes pouvant s'observer au 21ème siècle.

Une méthodologie originale centrée sur une approche globale du bilan de l'eau

La démarche proposée est originale de par l'approche régionale qui est faite du changement climatique. En effet, les progrès en matière de modélisation du climat ont permis récemment de descendre jusqu'à l'échelle régionale tout en conservant une bonne qualité de données. La comparaison des données observées et des données modélisées sur la seconde moitié du 20ème siècle a permis de prouver la cohérence des modèles du fait d'un faible taux d'erreur. Les différences les plus importantes concernent les précipitations qui présentent une variabilité plus importante que les températures et sont donc plus difficilement modélisables. Pour autant ces différences impactent peu le déficit d'évaporation, paramètre quantifiant l'intensité des sécheresses. L'utilisation de ces données pour calculer un bilan hydrique régional dans le contexte de changement climatique est donc concevable du fait de biais plutôt faibles. Nous avons également confirmé la pertinence de l'utilisation du paramètre de déficit d'évaporation pour l'analyse des sécheresses, déjà conforté par des études antérieures sur les sécheresses « historiques » de 1921, 1976 et 1989.

Dans le cadre de cette thèse, le calcul du bilan hydrique sous ArcGis a été automatisé avec l'écriture et l'utilisation de scripts Python. Ce travail a permis de traiter une masse de données conséquente, et de calculer les bilans hydriques à différentes échelles spatiales et temporelles. Ces bilans hydriques utilisent des informations complémentaires aux données climatiques : nous avons ainsi complété les calculs avec des données pédologiques pour la taille des réserves utiles des sols bretons, fournies par le laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest, ainsi que des données d'occupation du sol de la base CORINE Land Cover. Ces informations ont permis d'enrichir les calculs du bilan hydrique qui s'en trouvent plus réalistes. L'utilisation de ces données est innovante en ce qui concerne les études des sécheresses en Bretagne, puisque jusqu'à présent la plupart des études considéraient une taille de réserve utile moyenne unique pour tout le territoire. Les scripts écrits pour cette thèse peuvent s'adapter à différents scénarios climatiques et différentes périodes d'intérêt. Il est aussi possible de modifier les données pédologiques et d'occupation du sol si ces bases venaient à évoluer. On peut également le contraindre en lui imposant un type d'occupation du sol et une taille de réserve utile si l'on veut étudier le risque sécheresse d'un secteur précis dont on connaîtrait ces informations.

Les bilans hydriques calculés ont permis de suivre deux paramètres quantifiant l'intensité des sécheresses : le déficit d'évaporation et la réserve hydrique. Le déficit d'évaporation traduit le manque d'eau éventuel pour la plante du fait des conditions climatiques. Il correspond au stress hydrique de la végétation. La réserve hydrique représente la teneur en eau dans les réserves utiles des sols à un moment donné. L'analyse et le suivi de ces deux paramètres permet donc de cerner au mieux la dynamique de la ressource en eau dans les sols et d'en saisir l'impact sur la végétation en place. Le suivi de la réserve hydrique rend également compte de la recharge des réservoirs des sols, qui intervient à l'automne. Cette information ne peut pas être illustrée par le déficit d'évaporation qui est un paramètre variant principalement au cours du printemps et de l'été. La recharge automnale impacte indirectement les sécheresses : en effet, si les réserves hydriques des sols ne sont pas entièrement rechargées à la fin de l'hiver, on risque d'avoir des sécheresses plus précoces, dès le printemps, ou très intenses durant l'été, du fait d'un stock d'eau dans les sols trop faible pour assurer les besoins de la végétation. Cette caractéristique, qui est à l'origine de l'intensité et la précocité de la sécheresse de 1976, par exemple, a donc également été étudiée dans cette thèse.

Le travail réalisé présente cependant quelques limites liées principalement à la modélisation du climat. Les scénarios étudiés ne sont que des futurs probables marqués par de fortes incertitudes. Les modèles climatiques développés autour de ces scénarios comportent leur propre marge d'incertitudes même si des progrès considérables ont été fait dans la modélisation du système climatique. La descente d'échelle effectuée sur les sorties de modèle vient ajouter des imprécisions sur les sorties. L'interpolation spline réalisée pour affiner encore plus la résolution spatiale des sorties de modèle rajoute des incertitudes. En ce qui concerne les données d'entrée il faut rappeler que l'occupation du sol intégrée dans le bilan hydrique concerne une situation fixe qui ne reproduit donc pas les évolutions probables des systèmes agricoles. Il faut également être conscient que la méthodologie de calcul du bilan hydrique comprend des limites liées principalement à l'écoulement superficiel qui n'est pas intégré, ainsi qu'à l'écoulement gravitaire qui n'intègre qu'une couche de sol.

Une nette tendance à l'augmentation des sécheresses mais contrastée selon les régions, les scénarios et la nature des sols et de l'occupation des sols

Ces précautions étant rappelées, cette thèse apporte des connaissances nouvelles sur l'évolution probable des sécheresses den Bretagne. Les résultats des bilans hydriques révèlent des tendances d'évolution des sécheresses différentes selon les différents scénarios SRES du GIEC. Ces évolutions ont été confirmées par l'analyse complémentaire de l'indice de sécheresse SWI. On a ainsi pu observer des variations d'intensité selon les secteurs, les scénarios et les périodes considérés. Au début du 21ème siècle le scénario B1 prévoit ainsi des sécheresses plus intenses que le scénario A2, en certains endroits de la Bretagne. Ces particularités observées durant la première moitié du 21ème siècle sont liées à la grande proximité entre les scénarios en termes de tendances climatiques jusqu'en 2050 environ. On observe également sur la première moitié du 21ème siècle des différences entre l'est et l'ouest de la Bretagne. Les sécheresses pourraient être plus intenses et plus fréquentes dans la moitié orientale du fait de températures plus élevées et de précipitations estivales plus faibles. A l'ouest, l'influence de l'océan limiterait l'occurrence des

sécheresses pédologiques et hydrologiques. Sur la première moitié du 21ème siècle la recharge automnale des réserves hydriques serait efficace et rapide. Tous les sols de la région auraient leur réserve hydrique remplie à 100 % à la fin du mois de décembre. Cela permettrait d'assurer une certaine quantité d'eau disponible pour les plantes, limitant ainsi la précocité des sécheresses.

C'est principalement dans la seconde moitié du 21ème siècle que les scénarios se différencient. Nous avons ainsi observé pour les périodes 2060-2079 et 2080-2099 des écarts plus marqués entre les sécheresses modélisées dans le contexte du scénario B1 et A2. Dans le cas du scénario B1 le risque sécheresse évoluerait peu par rapport à la situation actuelle. Le déficit d'évaporation moyen serait essentiellement compris entre 100 et 200 mm. Il n'atteindrait que rarement le seuil de 300 mm correspondant à la sécheresse de 1976 ressentie à Rennes, toutes choses égales par ailleurs, même à l'horizon 2100. Ce seuil serait cependant ponctuellement atteint, à la fin du 21ème siècle, dans le sud et l'est de la Bretagne dans le cas du scénario A1B, et régulièrement atteint et dépassé dans le cas du scénario A2. L'ouest et le nord de la Bretagne resteraient plus épargnés par les sécheresses hydriques intenses. Pour autant, l'influence de l'océan limiterait moins efficacement l'occurrence des sécheresses que durant la première moitié du 21ème siècle. Les 3 scénarios prévoient ainsi une augmentation modérée de l'intensité et de la fréquence des épisodes secs dans l'ouest de la région. Cette augmentation du risque sécheresse dans le nord-est de la région pourrait s'expliquer par une moins bonne recharge automnale des sols. En effet, on trouve dans ce secteur des sols profonds, caractérisés par de grandes réserves utiles. Les réserves hydriques de ces sols risqueraient de n'être pas entièrement rechargées à la fin de l'hiver, différant d'autant l'écoulement hydrologique de surface. La végétation pourrait ainsi commencer à puiser dans des réserves hydriques incomplètes. Ceci entraînerait un épuisement plus rapide du stock d'eau dans les sols et conduirait ainsi à des sécheresses plus longues et plus intenses. Des sécheresses actuellement considérées comme exceptionnelles (comme 1989 ou 1976) risquent d'être plus fréquentes, voire communes, à l'horizon 2100. De ce fait, il apparaît important d'intégrer l'agriculture dans la politique d'adaptation au changement climatique à mettre en place.

En effet, les expériences passées ont mis en évidence la vulnérabilité de l'agriculture face aux sécheresses. Mais il faut aussi considérer l'impact de la végétation, et de ses besoins en eau, sur la ressource disponible dans les sols. Une analyse des sécheresses par une approche plus agronomique a ainsi été réalisée dans cette thèse en considérant 3 types culturaux majeurs en Bretagne : les cultures légumières, le blé et les fourrages. Nous avons ensuite comparé l'impact de leur consommation d'eau dans une situation climatiquement et pédologiquement homogène. Cette comparaison a permis de montrer que les légumes ont un moindre impact sur la réserve hydrique que le blé et les cultures fourragères. Dans le cas d'une taille de réserve utile moyenne à grande et d'un climat océanique frais, les céréales et les fourrages pompent plus l'eau des sols que les légumes, entraînant un déficit d'évaporation plus important. Dans le cas des secteurs agricoles où la réserve utile est faible, comme c'est le cas dans le sud de la Bretagne par exemple, les trois types culturaux impactent la réserve hydrique de manière notable. Ces résultats montrent que des cultures comme le blé et les fourrages, tels que le maïs, ont, par exemple, un impact marqué sur la ressource en eau, qui n'est *a priori* pas en accord avec certains principes de l'agriculture durable. On peut donc se demander si ces types de cultures seront amenés à occuper une moins grande part de l'agriculture bretonne à l'avenir. La mise en place d'espèces moins demandeuses en eau,

ou dont les pics de besoin en eau seraient mieux répartis dans l'année, est également une solution à l'adaptation de l'agriculture au changement climatique et au risque sécheresse.

Des perspectives intéressantes en termes de recherches et d'aide à la décision

Les résultats majeurs de cette étude pourraient être améliorés, rendus plus précis, en travaillant sur les limites des jeux de données. Même si la plupart des éléments limitants correspondent à des jeux de données externes à la thèse, certaines améliorations pourraient tout de même être réalisées pour réduire les incertitudes sur différents points. En ce sens, ce travail a un caractère exploratoire et le bilan hydrique a été codé de façon à pouvoir évoluer avec les futurs jeux de données disponibles. Au niveau des données pédologiques, le laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest souhaite ainsi améliorer la méthode de calcul des réserves utiles. La nouvelle base qui sera alors produite pourrait tout à fait être intégrée au calcul du bilan hydrique, le rendant ainsi plus proche de la réalité. De même, il sera possible de prendre en compte des évolutions au niveau des jeux de données climatiques. L'amélioration régulière des techniques de descente d'échelle fait que l'on pourrait avoir accès à des données qui pourraient être plus précises, par exemple.

Une amélioration du calcul du bilan hydrique serait également à prévoir. Il pourrait être pertinent de mieux cerner la dynamique de l'eau dans les sols en intégrant le ruissellement par exemple. Utiliser un modèle de sols selon 2 ou 3 couches pourrait également enrichir le calcul du bilan hydrique. Un autre point qui pourrait être amélioré concerne la prise en compte de la végétation. Une approche agronomique plus poussée, considérant de manière plus précise les stades phénologiques des végétaux, permettrait d'améliorer le réalisme du bilan hydrique. En ce qui concerne les données climatiques, il pourrait être intéressant de mieux restituer graphiquement et en termes fréquentiels toutes les années du 21ème siècle au pas de temps mensuel et journalier, en plus des situations moyennes sur 4 périodes. Pour cela il faudrait encore améliorer les scripts afin d'optimiser les temps de traitements et de calculs.

Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse pourrait aussi s'inscrire dans une approche hydrologique plus complète, prenant en compte les sécheresses hydrologiques. Ce type de sécheresse influence les cours d'eau qui vont voir leur débit diminuer jusqu'à atteindre l'étiage qui peut être plus ou moins sévère. Ces sécheresses sont importantes à suivre car au moment de l'étiage les conditions de vie de la faune aquatique deviennent particulièrement difficiles. L'eau y est en effet moins riche en oxygène et plus chaude. Une autre conséquence est liée à une plus grande concentration de polluants dans les cours d'eau. Ces deux aspects rendent le suivi des sécheresses hydrologiques important à l'échelle de la Bretagne du fait de la densité du réseau hydrographique.

Enfin, l'ouverture proposée sur le développement durable et plus particulièrement sur l'agriculture amène des réflexions à prendre en compte idéalement dans la politique territoriale bretonne d'adaptation au changement climatique. Cela apporte une dimension supplémentaire, plus appliquée, au travail réalisé dans cette thèse. En effet, l'étude des impacts du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne est mise en relation avec l'agriculture, activité socio-économique vulnérable à ce risque climatique. Ainsi on intègre ici une approche sociale du risque sécheresse pour l'ensemble du territoire breton. Les bilans hydriques

calculés et l'interprétation qui est faite de leurs résultats pourraient servir d'aide à la décision. Ces bilans permettent en effet de tester différents scénarios socio-économiques, ce qui peut soutenir les réflexions sur les politiques d'adaptation. Ils peuvent également être paramétrés pour tester l'impact d'un type de végétation sur la réserve hydrique dans un contexte climatique donné. Cela pourrait guider les démarches territoriales relatives à la durabilité de l'agriculture par exemple.

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

Références bibliographiques

Aarnink, A. J. A., Schrama, J. W., Heetkamp, M. J. W., Stefanowska, J. & Huynh, T. T. T., 2006. Temperature and body weight affect fouling of pig pens. *J. Anim. Sci.* **84**, 2224-2231.

Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2009. La qualité des rivières sur la période 2005-2007.

AGRESTE Bretagne, 2008. Superficies cultivées.

AGRESTE Bretagne, 2010. Présentation générale, Bretagne.

Ainsworth, E.A. & Long, S.P., 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO2. *New Phytologist* **165**, 351-372.

Ainsworth, E.A. & Rogers, A., 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO2]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environment* **30**, 258-270.

Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A. & Pereira, L.S., 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* **43 (2)**, 1-92.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper* **No. 56**, FAO, Rome, Italy, 300pp.

Amat, J.-P., Coeur, C. L. & Dorize, L., 2008. 8 - Les végétaux dans leurs cadres de vie. *Eléments de géographie physique* 331-370.

Arnell, N. W., 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* **14**, 31-52.

Arrhenius, E. & Waltz, T. W., 1990. The Greenhouse Effect - Implications for Economic Development. *World Bank Discussion Papers,* 28.

Arrhenius, S., 1896. XXXI. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine,* Series 5 **41**, 237-276.

Assemblée Nationale, 1959. Conséquences de la sécheresse en agriculture. Débats Parlementaires, Journal Officiel de la République Française, n°101.

Astrade L., Jacob-Rousseau N. & Allignol F., 2011. Les successions d'interactions entre climat, sociétés et paysages dans un contexte de changements : les moyennes montagnes du sud-est de la France à la sortie du Petit Age Glaciaire. In : Lambiel C., Reynard E. et Scapozza C. (Eds) (2011). La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. *Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie*, 3-5 septembre 2009, Olivone (Géovisions n° 36). Institut de géographie, Université de Lausanne.

Aussenac, G., 1978. La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, **30-2**, pp. 103-114.

Austin Bourke, P.M., 1968. Introduction: the aims of agrometeorology. Agroclimatological Methods: *Proceedings of the Reading Symposium*. UNESCO, Paris.

Bach, W., 1976. Global air pollution and climatic change. *Reviews of Geophysics* **14**, 429-474.

Baculat, B., Pinguet, A. & Samie, C., 1976. Note préliminaire sur la sécheresse et ses conséquences agronomiques au cours de la campagne agricole 1975- 1976. *CR de l'Académie d'agriculture* 879-884 .

Baize, D., 2004. Petit lexique de pédologie. 270 p.

Bardossy, A. & Plate E.J., 1992. Space-time model for daily rainfall using atmospheric circulation patterns, *Water Resources*, **28**, 1247-1259.

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. & Palutikof, J. P. *Climate Change and Water*. 210 (IPCC: Geneva, 2008).

Benichou, P. & Le Breton, O., 1986. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *Météorologie*. Prix Norbert Gerbier.

Beniston, M., 2009. Changements climatiques et impacts: De l'échelle globale à l'échelle locale. (PPUR presses polytechniques).

Benitez-Gilabert, M., Alvarez-Cobelas, M. & Angeler, D. G., 2010. Effects of climatic change on stream water quality in Spain. *Climatic Change,* **103**, 339-352.

Berger, A., Gallée, H., Fichefet, T., Marsiat, I. & Tricot, C., 1990a. Testing the astronomical theory with a coupled climate—ice-sheet model, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **89 (1–2)**, 125-141. ISSN 0031-0182.

Berger, A., Gallée, H., Fichefet, T., Marsiat, I., Tricot, C., 1990b. Testing the astronomical theory with a coupled climate—ice-sheet model, *Global and Planetary Change*, **3 (1–2)**, 125-141. ISSN 0921-8181.

Berger, A. & Loutre, M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years, *Quaternary Science Reviews*, **10 (4)**, 297-317, ISSN 0277-3791.

Berger, A., 1995. Chapter 2 Modelling the response of the climate system to astronomical forcing, In: A. Henderson-sellers, Editor(s), World Survey of Climatology, Elsevier, **16**, 21-69. ISSN 0168-6321.

Blanchard R., 1922. La sécheresse en Dauphiné (1920-1921). In: *Revue de géographie alpine*, **Tome 10-1**, 181-199.

Blanchard R., 1942. Observations sur la sécheresse de 1941-1942 dans les montagnes de Savoie. In: *Revue de géographie alpine,* **Tome 30-4**, 791-794.

Blanchard M., Franchisteguy L., Habets F., Martin E. & Noilhan J., 2007. Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la ressource en eau utilisés à Météo-France. *Revue française de géotechnique*, **120-121**, 11-20.

Blanchet G., 1977. La sécheresse de 1976 dans la région Rhône-Alpes. In: *Revue de géographie de Lyon,* **Vol. 52 n°2**, 99-115.

Blanchet G., 1992. Le temps dans la région Rhône-Alpes en 1989 : analyse de la sécheresse / Weather in the Rhône-Alpes region during 1989 : an analysis of drought. In: *Revue de géographie de Lyon*, **Vol. 67 n°3**, L'industrialisation en milieu rural dans la région Rhône-Alpes. 241-253.

Bluhm & Plante, 2010. Étude de la prévisibilité à l'échelle décennale sur l'Europe. (Université Paul Sabatier – Toulouse III, CERFACS).

Blum, A., 2005. Les prélèvements d'eau en France et en Europe. 104 (IFEN).

Boiffin, J. & Monnier, G., 1989. Evolution de certaines composantes de la fertilité sous l'influence des systèmes de culture. *Fertilité et systèmes de production* 207–225.

Bonnefoy, C., Quénol, H., Barbeau, G. & Madelin, M., 2010. ANALYSE CLIMATIQUE A L'ECHELLE DES COTEAUX DU LAYON. In *VIII International Terroir Congress*, 109-114.

Bootsma, A., Boisvert, J. B., De Jong, R. & Baier, W., 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne : une revue des moyens d'action. *Sécheresse* **7**, 277–285.

Bothe, O., Fraedrich, K., Zhu, X., 2011. Large-scale circulations and Tibetan Plateau summer drought and wetness in a high-resolution climate model. *International Journal of Climatology*, **31**, 832-846.

Bouarfa, S., Brunel, L., Granier, J., Mailhol, J.-C., Morardet, S. & Ruelle, P., 2011. Evaluation en partenariat des stratégies d'irrigation en cas de restriction des prélèvements dans la nappe de Beauce (France). *Cah Agric,* **20**, 124-129.

Bouchet, R.J., 1963. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. *International Association of Hydrological Sciences*, Proceedings of General Assembly, Berkeley, California Symposium. Publication **62**, 134-142

Bradley, R. S. *et al.,* 1987. Precipitation Fluctuations over Northern Hemisphere Land Areas Since the Mid-19th Century. *Science* **237**, 171-175.

Braque, R., 1988. Biogéographie des continents. Paris. Masson. 470 p.

Bréda, N., Granier, A. & Aussenac, G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : Analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française*, **56**, 109–131.

Bréda N. & Badeau V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance?, *Comptes Rendus Geoscience*, **340** - **9–10**, 651-662.

Breshears, D. D. *et al.,* 2005. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *PNAS* **102**, 15144–15148.

Briske, D.D., Fuhlendor, S.D., & Smeins, E.E., 2005. State-and-transition models, thresholds, and rangeland health: a synthesis of ecological concepts and perspectives. *Rangeland Ecol. Manag.*, **58**, 1-10.

Brisse, H., Grandjouan, R. & De Ruffray, P., 1982. Les types de climats annuels, un mode d'expression des gradients climatiques intégrant les variations interannuelles. *La Météorologie* **VIème série**, 39-81.

Brisson, N., *et al.* 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* **18**, 309–332.

Brisson, N., 2010. A3 - Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en œuvre. In : Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Nadine Brisson, Frederic Levrault, éditeurs. 2010. ADEME. 336 p.

Brochet, P., 1977. LA SECHERESSE 1976 EN FRANCE: ASPECTS CLIMATOLOGIQUES ET CONSEQUENCES / The 1976 drought in France: climatological aspects and consequences. *Hydrological Sciences Bulletin* **22**, pp. 393–411.

Broecker, W. S., 1975. Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming? *Science,* **189**, 460–463.

Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R. & Jamagne, M., 1996. Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : Importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols* **1**, 27-40.

Bruins, H. J., Evenari, M. & Nessler, U., 1986. Rainwater-harvesting agriculture for food production in arid zones: the challenge of the African famine. *Applied Geography,* **6**, 13–32.

Brundtland, G. H., 1987. Rapport Brundtland - Notre avenir à tous. 349 (Oslo).

Brunini, O. & Stigter, K., 2010. Agrometeorology of Some Selected Crops. Guide to Agricultural Meteorological Practices (GAMP) 10-1 - 10-100.

Bryson, R. A., 1970. Climatic Effects of Atmospheric Pollution. *Global Effects of Environmental Pollution*, 130–138.

Bucha, V., 1986. Causes of climate changes. *Advances in Space Research*, **6**, 77–82.

Buchanan-Smith, M. & Downing, T. E., 1992. Drought and famine in Africa: Time for effective action. *Food Policy,* **17**, 465-467.

Budyko, M. I., 1972. The future climate. *Eos Trans. AGU*, **53**, 868-874.

Burns, R. E. 1993. Irrigated rice culture in monsoon Asia: The search for an effective water control technology. *World Development* **21**, 771-789.

Butzer, K. W., 1983. Human response to environmental change in the perspective of future, global climate. *Quaternary Research* **19**, 279-292.

Byé, P. & Pernet, F., 1976. La sécheresse de 1976. Réflexions sur la position de l'agriculture dans l'économie. 129 (INRA-IREP: Grenoble).

Caballero, Y. & J. Noilhan, 2007. Etude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne, Météo-France / Agence de l'eau-Ardour Garonne.

Câmara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M. & Garrido, J., 1996. Spring: Integrating remote sensing and gis by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics* **20**, 395–403.

Canévet, C., 1992. Le modèle agricole breton : histoire et géographie d'une révolution agro-alimentaire. Presses Universitaires de Rennes.

Carrega, P., 1987. Climatologie des incendies de forêt dans les Alpes-Maritimes. In : Mélanges offerts au professeur P. PAGNEY, Président de la Commission française de climatologie, Dijon.

Carrega, P., 1994. Topoclimatologie et habitat, *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, 35-36.

Carrega P., Dubreuil V. & Richard Y., 2004. Climatologie et développement durable. In *Revue Hist.& Géographes*, **387**, pp.205-209.

CCNUCC, 1997. Protocole de Kyoto.

Chapman, S. C., Ludlow, M. M., Blamey, F. P. C. & Fischer, K. S. 1993. Effect of drought during early reproductive development on growth of cultivars of groundnut (Arachis hypogaea L.). I. Utilization of radiation and water during drought. *Field Crops Research* **32**, 193–210.

Charfi, M., 1980. Contribution à l'analyse de l'influence des brise-vent sur les facteurs climatiques et la production agricole en Tunisie.

Chaussod, R., 1996. La qualité biologique des sols : Evaluation et implications. Forum 'Le sol, un patrimoine menacé ?' 261–278.

Cheaib, A. *et al.*, 2012. Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters*, **15**, 533-544.

Choisnel, E., 1977. Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol. *La Météorologie* **6**, 103-133.

Choisnel, E., 1988. Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques. *La Météorologie*, **VIIème Série 23**, 19-26.

Christensen, J. *et al.* 1997. Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions. *Climate Dynamics*, 489-506.

Christensen, O., Christensen, J., Machenhauer, B. & Botzet, M., 1998. Very high-resolution regional climate simulations over Scandinavia - present climate. *J Clim* 3204-3229.

COCEB, 2010. L'économie bretonne en chiffres.

Cojean, R., 2009. L'aléa et le risque de sécheresse géotechnique. Les impacts de la sécheresse sur le bâti. *Risques climatiques, quels enjeux pour l'Europe?* Séminaire Fondation MAIF.

Commeaux, F., Drogue, G. & Francois, D., 2010. Analyse prospective des débits mensuels d'étiage de la Meuse française à l'aide d'un modèle hydrologique: sensibilité aux méthodes de descente d'échelle spatiale et aux scénarios d'émission. *Bulletin de l'Association de géographes français*, **87(2)**, 178-193.

Commissariat Général du Développement Durable, 2012. Les prélèvements d'eau en France en 2009 et leurs évolutions depuis dix ans. *Chiffres et Statistiques*, **290.**

Comte, J. P., 1987. The drought of 1976 in France. *Eau et Développement*, **3** 72-76.

Conrad, V. & Politick, L.W., 1950. Methods in Climatology. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 459.

Conseil Régional, 2011. Pour une nouvelle alliance agricole. 65 (Région Bretagne).

Corte-Real, J., Zhang, X. & Wang, X., 1995. Downscaling MCG information to regional scales: a non-parametric multivariate regression approach. *Climate Dynamics* **11**, 413–424.

Cosandey, C., 1983. Recherches sur le bilan de l'eau dans l'Ouest du Massif Armoricain. Thèse de doctorat. Etat. Paris, *Inst. Géogr.*, 515.

Cotrufo, M. F., Ineson, P. *et al.*, 1998. Elevated CO2 reduces the nitrogen concentration of plant tissues. *Global Change Biology* **4**, 43-54.

Courault, D., Clastre, P., Guinot, J.-P. & Seguin, B., 1994. Analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d'un modèle agrométéorologique. *Agronomie* **14**, 41-56

Crane, R.G. & Hewitson, B.C., 1997. Doubled CO2 precipitation changes for the Susquehanna Basin: Downscaling from the GENESIS generalcirculation model, *Int. J. Climatol.*, **17**, 1-12.

Crétat, J., Macron, C., Pohl, B. & Richard, Y. 2011. Quantifying internal variability in a regional climate model: a case study for Southern Africa. *Clim. Dyn.,* **37**, 1335–1356.

CRPF Bretagne, 2006. Les principales essences de la forêt bretonne.

CRPF Bretagne, 2011. Réalités et enjeux de la forêt bretonne.

Dalla-Salda, G., Martinez-Meier, A., Cochard, H. & Rozenberg, P., 2009. Variation of wood density and hydraulic properties of Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) clones related to a heat and drought wave in France. *Forest Ecology and Management* **257**, 182–189.

Dauphiné, A. & Ottavi, J. Y., 1995. Images nouvelles des climats. *Atlas de France, milieux et ressources* **6**, 81–96.

Dawson, T. E., 1996. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift. *Tree Physiol*, 263-272.

Debaeke, P. & Amigues, J.-P., 2007. Face à la sécheresse et à la pénurie d'eau, quelles mesures pour ajuster la demande agricole à l'offre de ressource en eau?

Debaeke, P. & Bertrand, M., 2008. Evaluation of drought impacts on crop yields in France. *Cahiers Agricultures*, **17**, 437-43.

Decker, W. L., 1994. Developments in agricultural meteorology as a guide to its potential for the twenty-first century. *Agricultural and Forest Meteorology*, **69**, 9-25.

Demuth, S. & Stahl, K., 2001. *ARIDE - Final Report.*

Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A. & Cariolle, D., 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics* **10:** 249–266. DOI: 10.1007/BF00208992

Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* **57:** 16–26. 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Dessus, B., 2005. Energies renouvelables : où, combien et pour quoi faire ? *Global Chance.*

Diaz, H. F., Bradley, R. S. & Eischeid, J. K., 1989: Precipitation fluctuations over global land areas since the late 1800's. *J. Geophys. Res.,* **94**, 1195-1210.

Douguedroit, A., 1980. La sécheresse estivale dans la région Provence - Alpes - Côte d'Azur. In : M*éditerranée,* **39**, 13–21.

DRAAF de Bretagne, 2008. Les linéaires paysagers de Bretagne. Résultats de l'enquête complémentaire Teruti-Lucas 2008. (DRAAF).

Dubreuil, V., 1994. La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR. Thèse de doctorat. Université Rennes 2, 381 p.

Dubreuil, V., 1996. Synthèse géographique de la sécheresse dans les régions océaniques. *Société météorologique de France*, **15**, 22-34. DOI : 10.4267/2042/46994

Dubreuil, V., 1997. La sécheresse dans la France de l'Ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée. *Science et changements planétaires / Sécheresse* **8**, 47-55.

Dubreuil V. (sous la direction), 2002. *Environnement et télédétection au Brésil* ; Presses Universitaires de Rennes ; 200 pages.

Dubreuil, V. & Planchon, O., 2009. Bilan d'un siècle d'observation des sécheresses et des types de circulations atmosphériques associées à Rennes. *Actes du XXIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* 139–144.

Dubreuil, V., Delahaye, C. & Strat, A., 2011. Changements d'occupation du sol et leurs impacts climatiques au Mato Grosso, Brésil. *Confins*.doi:10.4000/confins.6845

Dubreuil, V., Planchon, O., Lamy, C., Bonnardot, V. & Quénol, H., 2012. Le changement climatique dans la France de l'Ouest : observations et tendances. In : Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions. Dir : Merot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 19-30.

Ducharne, A., 2002. Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP. 10 p.

Ducharne, A., Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E. & Déqué, M., 2003. Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, **4(3)**.

Ducharne A., Théry S., Billen G., Benoît M., Brisson N., Garnier J., Kieken B., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Mermet M., Poux X., Sauboua E., Schott C., Viennot P., Abu Alkhair A., Baubion C., Curie F., Ducos G., Gomez E., Lebonvallet S., Olive G. & Sicart J-E., 2004. Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Rapport intermédiaire du contrat PIREN-Seine. 55 p.

Ducreux G. H., 1991. Effets de la sécheresse 1989-1990 sur les bâtiments dans les Alpes de Haute-Provence. *Sécheresse*, **2**, 265-270.

Dunglas J., 1993. Effet de serre et activités humaine (gaz à effet de serre d'origine anthropique). *Sécheresse*, **4**, 211-220.

Durost, S. *et al*, 2008. Climat, Guerre des Gaules et dendrochronologie du chêne (Quercus sp.) du Ier siècle av. J.-C. *ArchéoSciences* **n° 32**, 31–50.

Edwards, P. N. 2010a. Chapter 6 : Numerical Weather Prediction. In A vast machine : computer models, climate data, and the politics of global warming (MIT Press).

Edwards, P. N. 2010b. Chapter 7 : The infinite forecast. In A vast machine : computer models, climate data, and the politics of global warming (MIT Press).

Ellsaesser, H. W., MacCracken, M. C., Walton, J. J. & Grotch, S. L., 1986. Global climatic trends as revealed by the recorded data. *Reviews of Geophysics,* **24**, 745-792.

El-Sherbini, A. A., 1977. Problems of arid agriculture in West Asia. *World Development* **5**, 441-446.

Enke, W. & Spekat, A. 1997. Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. *Climate Research* **8**, 195-207.

FAO, 2007. Crop prospects and Food Situation. (FAO).

Fischer, R.A., 1925. Statistical Methods for Research Workers. Oliver & Boyd, London.

Flohn, H., 1963.Theories of the climate change from the viewpoint of the global energy budget. *Actes du colloque de Rome, 1961, organisé par l'UNESCO et l'OMM*, 339-344.

Flohn, H., 1977. Climate and energy: A scenario to a 21st century problem. *Climatic Change* **1**, 5-20.

Flohn, H., 1980. Possible climatic consequences of a man-made global warming, 81 (IIASA).

Flohn, H. & Fantechi, R., 1984a. Carbon cycle, greenhouse effect and other anthropogenic impacts on climate. *The Climate of Europe: Past, Present and Future: Natural and Man-Induced Climatic Changes: A European Perspective* 118-197.

Flohn, H. & Fantechi, R., 1984b. Impact of climatic fluctuations on european agriculture. The Climate of Europe: Past, Present and Future: Natural and Man-Induced Climatic Changes: A European Perspective, 269-314.

Foran, B. D., & Stafford Smith, D. M., 1991. Risk, biology and drought management strategies for cattle stations in central Australia. *Journal of Environmental Management* **33**, 17-33.

Fouchardière, C., 1949. La sécheresse de 1949 en Haute-Bretagne. *Revue forestière française*, **II.II.4**, 271-273.

Fourier J., 1824. Règle usuelle pour la recherche des résultats moyens etc. *Bull.sci. math., astron., phys. et chim. Bull. Universel des sci.*, **premier sect., t. 2**, 88-89.

Franquin, P., & Forest, F., 1977. Des programmes d'évaluation et analyses fréquentielles des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop* **32 (1)**, 1-2.

Fritier, N. *et al.* 2012. Links between NAO fluctuations and inter-annual variability of winter-months precipitation in the Seine River watershed (north-western France). *Comptes Rendus Geoscience* **344,** 396-405.

Fuhrer, J., Beniston, M., Fischlin, A., Frei, C., Goyette, S., Jasper, K. & Pfister, C., 2006. Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland. *Climatic Change*, **79**, 79-102.

Fury, R. & Joly, D. 2002. Applications de la climatologie aux échelles fines: *15e Colloque de l'Association internationale de climatologie*, Besançon, 11-13 sept. 2002. (Presses Univ. Franche-Comté).

Gadgil, S., 1988. Recent advances in monsoon research with particular reference to Indian monsoon. *Aust Meteorol Mag,* **36**, 193-204

Gallopin G., Hammond, A., Raskm, P. & Swart, R., 1997. Branch Points. PoleStat Series Report 7, Stockholm Environment Institute, Boston, MA.

Galloy, E., Martin, S. & Lebreton, A., 1982. Analyse des séquences de jours secs consécutifs. Application à 31 postes du réseau météorologique français. *La Météorologie* **28**, 5-24.

Garnett, E. R., & Khandekar, M. L., 1992. The impact of large-scale atmospheric circulations and anomalies on Indian monsoon droughts and floods and on world grain yields-a statistical analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* **61**, 113-128.

Gebhart, R., 1967. On the significance of the shortwave CO2-absorption in investigations concerning the CO2-theory of climatic change. *Theoretical and Applied Climatology* **15**, 52-61.

Gex, F., 1925. La sécheresse de l'hiver 1924-1925 en Savoie. *rga* **13**, 185-207.

Giard, D. & Bazile, E., 2000. Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Monthly Weather Review,* **128**, 997-1015.

GICC, 2011. Les nouveaux scénarios utilisés par le GIEC : quelques clés pour comprendre. 1-10.

Giorgi, F. & Mearns, L. O., 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Reviews of Geophysics* **29**, 191–216.

Giorgi, F. & Mearns, L. O, 1999. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research,* 6335–6352.

Glenn, J. C. & Gordon, T. J., 1997. *State of the Future Implications for Actions Today.* The Millennium project, American Council for the United Nations University, Washington, DC.

Glenn, J. C. & Gordon, T. J., 1999. The Millennium project issues and opportunities for the future. *Technological Forecasting and Social Change,* **61(2),** 97-208.

Godard, O. & Hubert, B., 2002. Le développement durable et la recherche scientifique à l'INRA. 58.

Granier, A., Badeau, V. & Bréda, N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue forestière française* **XLVII**, 59-68.

Graux, A.-I., 2011. Modélisation des impacts du changement climatique sur les écosytèmes prairiaux. Voies d'adaptation des systèmes fourragers. Thèse de l'Université de Clermont-Ferrand II.

Greene, M., 1974. Impact of the Sahelian drought in Mauritania, West Africa. *The Lancet* **303**, 1093-1097.

Gregory, S., 1989. Macro-regional definition and characteristics of Indian summer monsoon rainfall, 1871-1985. *Int J Clim ,***9**, 465-483.

Grelle, A., Lindroth, A. & Mölder, M., 1999. Seasonal variation of boreal forest surface conductance and evaporation. *Agricultural and Forest Meteorology,* **98–99**, 563-578.

Guyet, T., Nicolas, H. & Diouck, A., 2012. Segmentation multi-échelle de séries temporelles d'images satellite : Application à l'étude d'une période de sécheresse au Sénégal. *Actes de la conférence RFIA 2012*.

Guyot C., Bouchet R.J., Chiapale J.P., Malet P., Seguin B. & Verbrugghe M., 1976 : Climat et aménagement en pays de bocage. INRA Station de Bioclimatologie. Rapport de fin de contrat d'étude. Ministére de l'Agriculture et du Développement Rural. Direction de l'Aménagement rural et des structures. 767 pp.

Guyot, G., 1983. Les effets aérodynamiques et microclimatiques des brise-vent et des aménagements régionaux. *International Seminar on Shelterbelts*. 9-54.

Habets, F., *et al*., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research,* **113**.

Habets, F., Boé J., Déqué M., Ducharne A., Gascoin S., Hachour A., Martin E., Pagé C., Sauquet E., Terray L., Thiéry D., Oudin L., Viennot P. & Therry S. 2011. Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine. Résultats du projet GICC - RExHySS. Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine - Eau Seine Normandie.

Hallaire, M., 1968. Quelques problèmes posés par la réserve en eau du sol. In : Mélanges offerts à M. Pardé. Ed. Ophrys. 282-293.

Hallaire, M., 1977. La sécheresse de 1976 et la production végétale. *Bulletin technique d'Information* 651-657.

Hammond, A., 1998. Which World Scenarios for the 21 Century Global Destinies, Regional Choices. Earthscan Publications Ltd , London

Hansen, J. *et al*., 1981. Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science,* **213**, 957-966.

Hanson, P. J. & Weltzin, J. F., 2000. Drought disturbance from climate change: response of United States forests. *Science of The Total Environment*, **262**, 205-220.

Harger, J. R. E., 1995a. ENSO variations and drought occurrence in Indonesia and the Philippines. *Atmospheric Environment* **29**, 1943-1955.

Harger, J. R. E., 1995b. Air-temperature variations and ENSO effects in Indonesia, the Philippines and El Salvador. ENSO patterns and changes from 1866–1993. *Atmospheric Environment* **29**, 1919-1942.

Harranger, J., 1978. Les conséquences de la sécheresse de 1976 sur la végétation de nombreux arbres en 1977. *Phytoma*, **avril**, 25-26.

Hasselmann, K., 1988. PIPs and POPs - A general formalism for the reduction of dynamical systems in terms of Principal Interaction and Patterns and Principal Oscillation Patterns *J Geopliss Res ,**93,* **11**,015- 11,022.

Helland-Hansen, B. & Nansen, F., 1920. Temperature variations in the North Atlantic ocean and in the atmosphere, *Smithsonian Misc. Collections,* **70:4**, 406.

Henrion, C. & Pecquet, B., 1977. Sécheresse du printemps et de l'été 1976 (Film des évènements). Bulletin technique d'Information 595-597.

Hewitson, B. C., 1992. Regional-scale climate prediction from the GISS MCG. *Global and Planetary Change* **97**, 249-267.

Hewitson, B.C. & Crane, R.G. 1994. Neural nets applications in geography. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Hewitson, B. C. & Crane, R. G., 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research* **7**, 85-95.

Hillmann, E., Mayer, C. & Schrader, L., 2001. Die anpassungsfaehigkeit von mastschweinen an niedrige umgebungstemperaturen: ethologische und physiologische aspekte. KTBL-Schrift 167-173.

Holman, I. P. *et al.*, 2002. REGIS - Regional Climate Change Impact Response Studies in East Anglia and North West England. Department for Environment, Food & Rural Affairs: London.

Hopkins, W.G., 2003. Physiologie végétale. De Boeck Supérieur. 532p.

Houghton, J. T., Jenkins, G. J. & Ephraums, J. J., 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment (1990)*. 410 (IPCC: Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia).

Houghton, J. T. *et al.,* 2001. *Climate Change : The Scientific Basis*. 881 (Cambridge, Cambridge University Press, 2001).

Hufty, A., 2001. Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine. (Presses Université Laval).

Huynh, T. T. T. *et al.*, 2005. Thermal behaviour of growing pigs in response to high temperature and humidity. *Applied Animal Behaviour Science,* **91**, 1-16.

Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F. & Moneo, M., 2007. Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resources Management* **21**, 775-788.

INRA, 1977. La sécheresse de 1976. 15 (INRA).

IPCC, 1990. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I. J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (eds.).
Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia, 410 pp.

IPCC, 2000. Emissions Scenarios. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570.

IPCC, 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.) Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, pp. 582.

Itier, B., Flura, D., Bellabes, K. & Ferreira, I., 1989. Critères d'état hydrique des plantes et réduction de l'évapotranspiration. Possibilités d'utilisation pour le déclenchement de l'irrigation. *L'apport de l'irrigation au développement,* 11.

Itier B., 2008. Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux, *Innovations Agronomiques* **2**, 1-8.

Jacobs, J. W., 1996. Adjusting to climate change in the Lower Mekong. *Global Environmental Change* **6**, 7-22.

Jacqueminet, C., 1990. Des indicateurs morphologiques pour mesurer le changement des milieux sahéliens à partir des images satellitaires à haute résolution . Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse. Lafrance, P. (ed.), Dubois, J.M. (ed.).

James, M., 1996. Le dépérissement des boisements riverains de la Garonne: Evaluation à partir de données de structure forestière et de télédétection à haute résolution spatiale. Thèse de l'Université de Toulouse 3. 196p.

Johns, T.C., Carnell, R.E., Crossley, J.F., Gregory, J.M., Mitchell, J.F.B., Senior, C.A., Tett, S.F.B. & Wood, R.A., 1997. The second Hadley Centre coupled ocean atmosphere GCM. Model description, sinup and validation. *Climate Dynamics*. **13**, 103-134.

Johnson, H. D., Ragsdale, A. C., Berry, I. L. & Shanklin, M. D., 1963. *Res. Bull. Mo. agric. Exp. Sta.,* **No. 846**, 43.

Jones, P.D., 1988. Hemispheric surface air temperature variations: Recent trends and an update to 1987. *Journal of Climate* **1**:654-60.

Jones, R., Murphy, J. & Noguer, M, 1995. Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Q J R Meteorol Soc* 1413-1449.

Kadzere, C., Murphy, M., Silanikove, N. & Maltz, E., 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livestock Production Science*, **77**, 59-91.

Kaplan, L. D., 1960. The Influence of Carbon Dioxide Variations on the Atmospheric Heat Balance. *Tellus* **12**, 204-208.

Karl, T. R., Wang W. C., Schlesinger M. E., Knight R. W., Portman D., 1990. A method of relating general circulation model simulated climate to the observed local climate, I, Seasonal statistics, *J. Clim.*, **3**, 1053-1079.

Kates, R. W., 1979. Climate and Society: Lessons from Recent Events. **387**, 682-691.

Kates, R. W., 1985. The interaction of climate and society. Climate Impact Assessment: Studies of the interaction of climate and Society 3-36.

Katz, R. W., 1977. Assessing the impact of climatic change on food production. *Climatic Change* **1**, 85-96.

Kaveh, H., 2010. Apport de l'interférométrie radar (DinSAR et PSI) pour l'étude des effets de la sécheresse géotechniques : applications à l'Est de la région Île-de-France. Thèse de l'Université Paris-Est.

Keeling, C. D., 1958. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **13**, 332–334

Keeling, C. D., 1970. Is Carbon Dioxide from Fossil Fuel Changing Man's Environment? *Proceedings of the American Philosophical Society* **114 - n°1**, 10-17.

Kellogg, W. W. & Schware, R., 1981. Climate change and society: consequences of increasing atmospheric carbon dioxide.

Kidson, John W. & Craig S. Thompson, 1998. A Comparison of Statistical and Model-Based Downscaling Techniques for Estimating Local Climate Variations. *J. Climate*, **11**, 735–753. doi: http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<0735:ACOSAM>2.0.CO;2

Kiehl, J. T. & Trenberth, K. E., 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society,* **78**, 197–208.

Kim, J. W., Chang J. T., Baker N. L., Wilks D. S. & Gates W. L., 1984. The statistical problem of climate inversion: Determination of the relationship between local and large-scale climate, *Mon. Weather Rev.*, **112**, 2069-2077.

Klein W. & Bloom H., 1989. An operational system for specifying monthly precipitation amounts over the United States from the field of concurrent mean 700-mb heights. *Weather and forecasting.*

Knapp, A.K., Beier, C., Briske, D.D., Classen, A., Luo, Y., Reichstein, M., Smith, M.D., Smith, S.D., Bell, J.E., Fay, P.A., Heisler, J.L., Leavitt, S.W., Sherry, R., Smith, B. and Weng, E., 2008. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *Bioscience*, **58**, 811-821.

Krishnaswamy, S. V. & Muller, E. W., 1974. Premature field evaporation in the atom probe. *Review of Scientific Instruments,* **45**, 1049 -1052.

Laaidi K., 1997. Relations climat-végétation en milieu méditerranéen français : le cas de l'oléolentisque. *Sécheresse*, **8 (3)**, 207-215.

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, 2003

Lal, M. *et al.*, 1999. Growth and yield responses of soybean in Madhya Pradesh, India to climate variability and change. *Agricultural and Forest Meteorology* **93**, 53-70.

Lambert, R., Lami, J.M., Senges, F., 1990. La sécheresse de 1989 dans le bassin de la Garonne (à l'amont du Mas d'Agenais).[éd.] Université de Toulouse-Mirail Institut de géographie, Ministère de l'environnement délégation de bassin Adour-Garonne / Toulouse : Institut de géographie.

Lambert, R., Lami, J.M., Senges, F., 1991. Analyse hydraulique de la sécheresse 1990 (à l'amont du Mas d'Agenais). Toulouse : Institut de géographie.

Lambert, R., 1996. Géographie du cycle de l'eau, 37-82.

Lamy C. & Dubreuil V., 2010. Impact des sécheresses sur le bilan hydrique : Modélisation à partir du climat d'années passées. *Actes du 23ème colloque de l'AIC*, Rennes. 325-330

Lamy, C. & Dubreuil, V., 2011. Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. *Actes du 24e colloque de l'AIC.* 357-362.

Landais, E., 1998. Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social ? *Le courrier de l'environnement*.

Landsberg, H. E., 1970. Man-Made Climatic Changes Man's activities have altered the climate of urbanized areas and may affect global climate in the future. *Science* **170**, 1265-1274.

Laprise, R. *et al*, 1998. Climate and climate change in western Canada as simulated by the Canadian regional climate model. *Atmosphere-Ocean* 119-167.

Le Lannou, M., 1950. *Géographie de la Bretagne*. **Tome 1**, (Plihon).

Le Roy Ladurie, E. 1983. *Histoire du climat depuis l'an mil.* (Flammarion: Paris).

Le Roy Ladurie, E., 2004. Histoire humaine et comparée du climat. (Fayard: [Paris]).

Le Roy Ladurie, E., 2005. Peut-on écrire l'histoire du climat ?

Lecarpentier, C., 1977. Essai provisoire de caractérisation de la sécheresse de 1976 par l'établissement de bilans hydriques et leur confrontation avec les résultats d'études fréquentielles antérieures. *Bulletin technique d'Information,* 615-626.

Lecerf, R., 2008. Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne). Thèse de doctorat. Université Rennes 2. 326 p.

Lefebvre, M., 2011. Mécanisme d'allocation de l'eau d'irrigation et gestion du risque sécheresse en agriculture. Thèse de l'Université de Montpellier I.

Lepoutre, D. & Vidal, A., 1989. Télédétection et sécheresse. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* **75**, 95-102.

Leroux, M., Aubert, S., Comby, J., Mollica, V., Passerat de la Chapelle, P. & Reynaud, J., 1992. Déficit pluviométrique sur la France : autopsie des agglutinations anticycloniques des hivers de 1988 à 1992. *Sécheresse* **3**, 103-113.

Lhomme, J. P., Mougou, R. & Mansour, M., 2009. Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Climatic Change,* **96**, 549-564.

Linder, S., Benson, M. L., Myers, B. J. & Raison, R. J., 1987. Canopy dynamics and growth of Pinus radiata. I: Effects of irrigation and fertilization during a drought. *Canadian journal of forest research* **17**, 1157–1165.

Long, S. P., Ainsworth, E. A., *et al.*, 2006. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO2 concentrations. *Science,* **312**, 1918-1921.

Luquet, F. M., Mahieu, H. & Mouillet, L., 1977. A propos des variations de la composition minérale des laits durant l'été 1976. Influence de la sécheresse. *Le Lait,* **57**, 509-520.

Macé, G. & Meynier, A. I., 1978. Chronique de la Bretagne et du Bas-Maine. *Noroi* **97**, 229-239.

Madden, R. A. & Ramanathan, V., 1980. Detecting Climate Change due to Increasing Carbon Dioxide. *Science* **209**, 763-768.

Madelin M., Beltrando G., Langellier F., 2002. Modélisation spatiale à une échelle fine des températures minimales printanières dans le vignoble marnais. *15e Colloque de l'Association internationale de climatologie, Besançon, 11-13 sept. 2002*. (Presses Univ. Franche-Comté).

Madelin, M., Chabin, J. P. & Bonnefoy, C., 2010. Global warming and its consequences on the Beaune vineyards. Macerata University, Faculty of Communications.

Mahadevan, P., 1966. The relations between climatic factors and animal production. 18.

Mahalakshmi, V., Bidinger, F.R., & Raju, D.S., 1987. Effect of timing of water deficit on pearl millet (Pennisetum americanum). *Field Crops Research,* **15**, 327-339.

Mahboubi, A. A., 1980. Etude in-situ du bilan hydrique pour quelques graminées : extraction de l'eau par le système racinaire et résistance a la sécheresse.

Manabe, S., 1969. Climate and the ocean circulation : I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 739-774.

Manabe, S., 1970. The dependence of Atmospheric Temperature on the Concentration of Carbon Dioxide. *Global Effects of Environmental Pollution* 25-29.

Manabe, S. & Möller, F., 1961. On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere. *Monthly Weather Review,* **89**, 503-32.

Manabe, S. & Strickler, S. F., 1964. Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *Journal of Atmospheric Sciences,* **21**, 361-85.

Manabe, S. & Wetherald, R. T. 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of Atmospheric Sciences,* **24**, 241-59.

Manabe, S. & Bryan, K., 1969. Climate calculations with a Combined Ocean-Atmosphere Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **26**, 786-789.

Manabe, S. & Wetherald, R. T., 1980. On the distribution of climate change resulting from an increase in CO2 Content of the atmosphere. *Journal of Atmospheric Sciences* **37**, 99-118.

Marchand, J. P., Bauquin, F. & Letondoux, P., 1986. Les calamités agricoles d'origine atmosphérique : le cas de l'Ille-et- Vilaine. *Revue de géographie de Lyon,* **61**, 319-328.

Marchand, J.-P., Bonnardot, V., Planchon, O. & Dubreuil, V., 2011. La vigne, le vin et le climat vus par un notable lavallois au début du XVIème. *Actes du XXIVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* 381-386.

Margat J. & Vallée D., 1999. Vision méditerranéenne sur l'eau, la population et l'environnement au XXIème siècle. MEDTAC / Plan bleu.

Marschner, H., 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants, 2nd edn., Academic Press, London.

Marti, O. *et al*, 2005. The new IPSL climate system model: IPSL-CM4. Note du Pôle de Modélisation, IPSL **26**, 1-86.

Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Dalla-Salda, G., Gallo, L., Pastorino, M. & Rozenberg, P., 2009. Ring density record of phenotypic plasticity and adaptation to drought in Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* **258**, 860-867.

Massei, N., Durand, A. & Deloffre, J., 2007. Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, **112**.

Massei, N., Laignel, B. & Deloffre, J., 2010. Long-term hydrological changes of the Seine River flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *International journal of Climatology*, **30(14)**, 2146-2154.

Masson-Delmotte, V. *et al,*. 2005. Changes in European precipitation seasonality and in drought frequencies revealed by a four-century-long tree-ring isotopic record from Brittany, western France. *Clim Dyn* **24**, 57-69.

Mavromatis, T., 2010. Use of drought indices in climate change impact assessment studies: an application to Greece.

Mawley, E., 1898. Weather influences on farm and garden crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **24**, 57-82 .

McGregor, J. & Walsh, K, 1994. Climate change simulations of Tasmanian precipitation using multiple nesting. *Journal of Geophysical Research,* **20**, 889-20 905.

McMaster, G.S., D.B. Palic & G.H. Dunn, 2002: Soil management alters seedling emergence and subsequent autumn growth and yield in dryland winter wheat-fallow systems in the Central Great Plains on a clay loam soil. *Soil Till. Res.*, **65**, 193-206.

McVicar, T. R. & Jupp, D. L. B., 1998. The current and potential operational uses of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review. *Agricultural Systems* **57**, 399-468.

Mearns, L.O., Katz R.W. & Schneider S.H., 1984. Extreme high temperature events: Changes in their probabilities with changes in mean temperature. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 1601-1613.

Mérot, P. & Desbrosse, A., 1996. Agriculture et bocage. *Patrimoine naturel de Bourgogne* **4**, 22-25.

Mestre, O., 2000. Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. *Thèse de doctorat.*

Métais C., 2000. Interpolation, la méthode des splines. Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Caen.

Miehe, G., 1996. On the connexion of vegetation dynamics with climatic changes in High Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,* **120**, 5-24.

Miles, E. L., Snover, A. K., Hamlet, A. F., Callahan, B. & Fluharty, D., 2000. Pacific northwest regional assessment: the impacts of climate variability and climate change on the water resources of tee columbia river basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association,* **36**, 399-420.

Milly, P. C. D., 1994. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water resources Research,* **30**, 2143-2156.

Mogensen V.O., 1980. Drought Sensitivity at Various Growth Stages of Barley in Relation to Relative Evapotranspiration and Water Stress. *Agronomy Journal*, **72-6**, 1033-1038.

Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., Mestre, O., 2002. Les changements climatiques en France au 20ème siècle. *La Météorologie*, **38**, 45-56.

Moisselin, J.-M. & Dubuisson, B., 2006. Evolution des extrêmes de températures et de précipitation en France au XXe siècle. *La Météorologie* **54**, 33-42.

Monteith, J., 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* **19**, 205-224

Monteith, J., 2000. Agricultural Meteorology: evolution and application. *Agricultural and Forest Meteorology* **103**, 5-9.

Morardet, S., Mailhol, J. C., Vidal, A., Garin, P. & Gleyses, G., 1998. Sécheresse et demande en eau d'irrigation : éléments de réflexion. *Ingénieries - E A T.*

Moss, R. H. *et al.*, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**, 747-756.

Moule, C., 1971. Céréales.– Librairie Agricole, Horticole, Forestière et Ménegère. La Maison Rustique. Paris, France.

Mounier, J., 1964. La saison pluviométrique indigente dans les régions océaniques du Sud-Ouest de l'Europe, Bretagne et Galice . In: *Norois*, **43**, 261-282.

Mounier, J., 1965. Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application à la Bretagne. N*orois* **48**, 437-448.

Mounier, J., 1977. Aspects et fréquences de la sécheresse en Bretagne : essai de définition de la sécheresse en Europe océanique. *Revue de géographie de Lyon,* **52**, 167-176.

Mounier J., 1979. Les climats océaniques des régions atlantiques de l'Espagne et du Portugal. Contribution synoptique à la géographie des climats humides des latitudes moyennes, Paris-Toulouse, Honoré-Champion, 1221 p. (3 vol.)

Mounier, J., 1983. Le bilan hydrique : les contraintes de l'aménagement régional dues à l'eau. Cours de l'Université de Haute Bretagne, Rennes 2., 36 p.

Najac, J., Kitova, N., Vidal, J.-P., Soubeyroux, J.-M. & Martin, E., 2010. Caractérisation des sécheresses en France au cours du XXIème siècle. *Risques et Changement Climatique,* 23ème colloque de l'AIC, 433-438.

Nakicenovic, N., Victor N., & Morita T., 1998. Emissions Scenarios Database and Review of Scenarios. *Mitigation and AdaptationStrategies for Global Change ,* **3(2-4),** 95-120.

Namias, J., 1978. Recent drought in California and Western Europe. *Reviews of geophysics and space physics*, **16**, 435-458.

Neethling, E., Sicard, S., Barbeau, G., Bonnefoy, C. & Quénol, H., 2008. Spatial variability of temperature and grapevine growth at terroir scales in the context of climate change. *Climate Research*, **36**, 99-111.

Nettier B., Dobremez L., Coussy J.-L. & Romagny T., 2010. Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises. *Revue de géographie alpine*, **98**, 367-400.

Noilhan, J. & Planton, S. 1989. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Monthly Weather Review,* **117**, 536-549.

Odhiambo, T. R., 1991. Managing drought and locust invasions in Africa. *Land Use Policy* **8**, 348-353.

Oelschlägel, B., 1995. A method for downscaling global climate model calculations by a statistical weather generator. *Ecological Modelling* **82**, 199–204.

OMM, 2006. Commision for Agricultural Meteorology. 44 (OMM).

OMM, 2009. Guidelines for the education and training of personnel in meteorology and operational hydrology. 53 (OMM).

Pagé, C., Terray, L. & Boé, J. 2008. Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. Climate Modeling and Global Change, CERFACS.

Pagé, C., Terray, L. & Boé, J. 2010. dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/09/21. CERFACS.

Pagney, P., 1988. Climats et cours d'eau de France. (Paris).

Pailleux, J., Geleyn, J.-F. & Legrand, E. 2000. Numerical weather prediction with the models Arpège and Aladin; assessment and prospects. *La Météorologie*, **30**, 32-60.

Palmer, W. C., 1965. Moisture Variability and Drought Severity. *Proceedings: thirteenth annual Meeting of the Agricultural Research Institute*, October 12-13, 1964, Washington 145-158.

Pardé, M. & Sanson, J., 1950. La sécheresse des années 1942-49 en France. *rga* **38**, 369-404.

Parey, S., Malek, F., Laurent, C. & Dacunha-Castelle, D., 2007. Trends and climate evolution: Statistical approach for very high temperatures in France. *Climatic Change*, **81**, 331-352.

Parry, M. L., 1978. *Climatic change, agriculture and settlement.* (Dawson ; Archon Books: Folkestone; Hamdem).

Payen, D. & Jacquart-Romon, C., 1985. Agrometeorological follow-up soil moisture budget on a regional scale. *Météorologie.* **7**, 21-27.

Peake, D. C. I., Henzell, E. F., Stirk, G. B. & Peake, A., 1979. Simulation of changes in herbage biomass and drought response of a buffel grass (Cenchrus ciliaris cv. biloela) in Southern Queensland. *Agro-Ecosystems* **5**, 23-40.

Pédelaborde, P., 1968. Les bilans hydriques. *Cahiers de géographie du Québec* **12**, 5.

Péguy, C. P., 1961. *Précis de climatologie.* (Paris).

Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, **A193** :120-146.

Perrier, A., 1977. Etude des variations de l'évapotranspiration à partir d'un modèle analytique prenant en compte les variations verticales des densités de surface foliaire et des résistances stomatiques. *La Météorologie*, **VIème Série(11)**, 41-46.

Peterson, J. L., 1994. The Road to 2015 Profiles of the Future. Waite Group Press. Publishers Group West, Mill Valley, CA.

Piazza, M., Page, C., Sanchez, E. & Terray, L., 2011. Comparaison des méthodes de désagrégation statistique et dynamique pour l'évaluation du changement climatique sur les zones de montagnes en France.

Pihan, J., 1976. Bocage et érosion hydrique des sols en Bretagne. In : Les bocages : Histoire, Ecologie, Economie. Rennes, pp. 185-192.

Planchon, O., 1994. A propos de la notion de climat maritime. *Etudes Méditerranéennes* 119-130.

Planchon, O., 1997. *Les climats maritimes dans le Monde.* (Villeneuve d'Asq).

Planchon, O., 1998. La notion d'échelle en climatologie : l'exemple des climats maritimes et côtiers en Europe . In: *Annales de Géographie*. **t. 107, 602**, 363-380.

Planchon, O., 2005. Les printemps pluvieux des années 1980: retour sur une particularité météorologique et climatique de la fin du vingtième siècle en Europe occidentale. *Actes du 18e colloque de l'AIC*, **18**.

Planchon, O., Dubreuil, V., Bernard, V. & Blain, S., 2007. Apport de la dendrochronologie pour l'étude des sécheresses dans le Nord-Ouest de la France (XIX-XXe s.). *Actes du 20ème colloque de l'AIC*, 478-483.

Planchon, O., Quénol, H., Wahl, L., Cantat, O. & Bonnefoy, C., 2009. Types de circulations atmosphériques et types de temps en situations gélives dans les régions viticoles de la moitié nord de la France. *Geographia Technica*, numéro spécial, 371-376.

Planchon, O., Barbeau, G., Quenol, H. & Bonnefoy, C., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *Echogeo*, **14**.

Planchon, O. & Bonnardot, V., 2012. L'évolution des types de circulation atmosphérique sur la France de l'Ouest et leur impact climatique. In : Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions. Dir : Merot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 31-41.

Plaut, G. & Simonnet, E. 2001. Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Research*, **17**, 303-324. DOI: 10.3354/cr017303

PNUE, 1972. Déclaration finale de la conférence des Nations Unies sur l'environnement, Stockholm.

PNUE, 1992. Conférence des nations unies sur l'environnement et le développement.

Powell, S., Sturman, A. & Quénol, H., 2011. Changement climatique et variabilité spatiale du climat dans les vignobles de Marlborough (Nouvelle Zélande).

Quénol, H., Planchon, O., Wahl, L., 2008a. Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **51**, 127-137.

Quénol, H., Barbeau, G., Roger, S. & Briche, E., 2008b. Observation of the temperature on fine scales in vineyards of Loire Valley (France). *European Meteorological Society*.

Quenol, H., Bonnefoy, C., Planchon, O. & Barbeau, G., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, **14.**

Quintana-Segui P., Martin E., Habets F. 2007. Impact de l'impact d'un profil exponentiel de conductivité hydraulique dans le sol pour la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU. Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 16-18janvier 2007, Toulouse.

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., et al., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47(1)**, 92–107. doi:10.1175/2007JAMC1636.1

Quintana Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F. & Boé, J., 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology,* **383**, 111-124.

Ramage, J., 1997. Energy: a guidebook; 2nd. ed.

Ramanathan, V., 1981. The Role of Ocean-Atmosphere Interactions in the CO2 Climate Problem. *Journal of Atmospheric Sciences* **38**, 918-930.

Ramanathan, V., Cicerone, R. J., Singh, H. B. & Kiehl, J. T., 1985. Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climate Change. *J. Geophys. Res.* **90**, 5547-5566.

Raven, P.H., 2003. Biologie végétale. De Boeck Supérieur. 968 p.

Reicosky, D.C. & Deaton, D.E., 1979. Soybean water extraction, leaf water potential, and evapotranspiration during drought. *Agronomy Journal*, **71-1**, 45-50.

RHyTMME, 2011. Présentation du premier radar du réseau RHyTMME. Dossier de Presse. Météo-France et Cémagref. lu en ligne sur : http://entreprise.meteofrance.com/content/2011/4/25434-48.pdf

Riebsame, W. E., Diaz, H. F., Moses, T. & Price, M., 1986. The social burden of weather and climate hazards. *Bulletin American Meteorological Society* **67**, 1378-1388.

Rieul, L. & Ruelle, P., 2003. Irrigation. 344 p.

Rigolot, E., 2008. Impact du changement climatique sur les feux de forêts. *Forêt méditerranéenne*, **t. XXIX, n°2**, 167-176.

Riou, C. & Seguin, B., 1990. Le repérage de la sécheresse. *Sécheresse,* 179-186.

Riou, C., 1993. L'eau et la production végétale. *Science et changements planétaires / Sécheresse* **4**, 75-83.

Ritchie, J. C., 1986. Climate change and vegetation response. *Plant Ecology* **67**, 65-74.

Ritchie, J. T., 1998. Soil water balance and plant water stress. *Understanding Options for Agricultural Production* 41-54.

Robinson, E. & Robbins, R. C., 1970. Gaseous Atmospheric Pollutants from Urban and Natural Sources. *Global Effects of Environmental Pollution,* 50-66.

Robock, A., 1978. Internally and Externally Caused Climate Change. *Journal of the Atmospheric Sciences* **35**, 1111-1122.

Roeckner, E. *et al.*, 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description.at <http://edoc.mpg.de/175329>

Roenfeldt, S., 1998. You can't afford to ignore heat stress. *Dairy manage*, **35**, 6-12

Rosegrant, M. W., & Svendsen, M., 1993. Asian food production in the 1990s: Irrigation investment and management policy. *Food Policy,* **18**, 13-32.

Ruelle, P., Kosuth, P. & Itier, B., 1991. Etat des recherches sur la conduite optimale de l'irrigation. 126.

Ruggles, D. C., 1999. Sun, Moon and Stones: Some 'Classic' Astronomical Sites. *Astronomy in Prehistoric Britain and Ireland*, 12-48.

Rummukainen, M., Räisänen J., Bringfelt B., Ullerstig A., Omstedt A., Willén U., Hansson U. & Jones C., 2001. A regional climate model for northern Europe: model description and results from the downscaling of two MCG control simulations. *Climate Dynamics,* **17**, 339-359.

Salas-Mélia, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Guérémy, J.F., Marquet, P., Planton, S., Royer, J.F. & Tyteca, S., 2005. Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. *Climate Dynamics*.

Samba, G., & Diop, M., 2000. Bilan hydrique dans la région du Pool (République du Congo). *Cahiers Agricultures,* **9**, 47-53.

Sanchez, E., Dominguez, M., Romera, R., de la Franca, N. L., Gaertner, M. A., Gallardo, C. & Castro, M., 2011. Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions. *Climatic Change,* **107**, 625-634.

Sanson J., 1944. *Climatologie de la France*. Office National Météorologique, Paris, 272 p.

Sanson, J., 1950. La sécheresse remarquable de l'année agricole 1948-49 en France. *Annales de Géographie,* **59**, 234-235.

Sanson J. & Pardé M., 1950. La sécheresse des années 1942-49 en France. In: *Revue de géographie alpine*, **Tome 38 N°2**, 369-404.

Santer B. D. & Wigley T. M. L., 1990. Regional validation of means, variances and spatial patterns in MCG control runs. *J Geophys Res* **95**, 829-850

Sasaki, H., Kida, H., Koide, T. & Chiba, M, 1995. The performance of long-term integrations of a limited area model with the spectral boundary coupling method. *J Meteorol Soc Japan* 165-181.

SCEES, 2002. Mémento de la statistique agricole. Ministère de l'Agriculture.

Schneider, S. H., 1977. Climate change and the world predicament: A case study for interdisciplinary research. *Climatic Change* **1**, 21-43.

Schneider, S. H, 1992. Introduction to climate modeling. In: *Climate System Modeling*.

Schonwiese, C. D., & Birrong, W., 1990. European precipitation trend statistics 1851-1980 including multivariate assessments of the anthropogenic CO_2 signal. *Zeitschrift fur Meteorologie* **40**, **no. 2**, 92-98.

Schwartz, P., 1991. The Art of the Longview. Three global scenarios to 2005. Doubleday Publications.

Seck, A., 1962. Le «Heug» ou pluie de saison sèche au Sénégal. *geo* **71**, 225-246.

Seguin, B., Lagouarde, J.-P. & Savane, M., 1991. The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment* **35**, 141-148.

Shinn, R. L., 1985. Forced Options Social Decisions for the 21st century. 2nd edition The Pilgrim Press, New York, NY

Smagorinsky, J., Manabe, S. & Holloway, J. L., 1965. NUMERICAL RESULTS FROM A NINE-LEVEL GENERAL CIRCULATION MODEL OF THE ATMOSPHERE 1. *Monthly Weather Review,* **93**, 727-768.

Smit, B., & Cai, Y., 1996. Climate change and agriculture in China. *Global Environmental Change,* **6**, 205-214.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.), 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Soltani, A. & Sinclair, T. R., 2012. Soil water balance. *Modeling physiology of crop development, growth and yield,* 170-191.

Somot, S., 2005. Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III. 240 p.

Soubeyroux, J.-M. *et al.*, 2008. A hydrometeorological tool for operational monitoring and research: the Safran-Isba-Modcou application (SIM).

Soubeyroux J.-M., Vidal, J.-P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Pagé, C. & Habets, F., 2011. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. *Rapport final du projet ClimSec,* Météo-France, 72.

Stone, P. J., Wilson, D. R., Jamieson, P. D. & Gillespie, R. N., 2001. Water deficit effects on sweet corn. II. Canopy development. *Australian journal of agricultural research* **52**, 115-126.

Streck, N. A., Weiss, A., Xue, Q. & Stephen Baenziger, P., 2003. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. *Agricultural and Forest Meteorology*, **115**, 139-150.

Sutcliffe, R. C., 1963. Theories of recent changes of climate. *Actes du colloque de Rome, 1961, organisé par l'UNESCO et l'OMM*, 277-284.

Taub, D., 2010. Effects of Rising Atmospheric Concentrations of Carbon Dioxide on Plants. *Nature Education*.

The Cork Declaration, 1997. *Leader magazine* 1-2.

Thompson, K., 1980. Forests and climate change in America: Some early views. *Climatic Change,* **3**, 47-64.

Thompson, L. M., 1975. Weather Variability, Climatic Change, and Grain Production. *Science,* **188**, 535-541.

Thompson P. B., 1997. The Varieties of Sustainability in Livestock Farming, IN: Sorensen J.T. (ed.), Livestock Farming Systems : More than Food Production, 4th International Livestock Farming Systems Symposium, Foulum (Denmark), 22-23 Aug. 1996, Wageningen Pers, EAAP Publ. n°89.

Thornthwaite, C.W., 1948. "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review,* **38 (1)**, 55-94. doi:10.2307/210739

Timbal, B., Fernandez, E. & Li, Z., 2009. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. *Environmental Modeling & Software* **24**, 341-358.

Tixeront J., 1963. Relations des fluctuations climatiques avec l'hydrologie, l'agriculture et l'activité humaine en Afrique du Nord. *Actes du colloque de Rome, 1961, organisé par l'UNESCO et l'OMM*, 429-438.

Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Maheras, P. & Vafiadis, M., 2008. Simulation of future changes in extreme rainfall and temperature conditions over the Greek area: A comparison of two statistical downscaling approaches. *Global and Planetary Change* **63**, 132-151.

Trouche G. & Morlon P., 1999. Comparaison de différentes méthodes d'estimation de la réserve en eau utile des sols (R.U.) dans le périmètre de l'O.G.A.F. - Environnement de la zone de Migennes (Yonne). *Etude et Gestion des Sols*, **1**, 41-54.

Trzpit, J. P., 1978. La sécheresse en Basse-Normandie; calamité accidentelle ou mal récurrent. *Etudes Normandes*, **(1-2)**, 55-74.

Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G., Daliakopoulos, I. N. & Jacob, D., 2011. Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete. *Climatic Change*, **106**, 667-677.

Tucker, C. J., 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment* **10**, 23-32.

Tucker, C. J. & Choudhury, B. J., 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment* **23**, 243-251.

Turc, L., 1954. Calcul du bilan de l'eau : évaluation en fonction des précipitations et des températures. *IAHS Publ.* **37**, 88-200.

Turc, L., & Trzpit, J. P., 1985. Les bilans d'eau: un thème de recherche fondamental pour la climatologie écologique.

UNESCO, 1963. Les changements du climat. Actes du colloque de Rome, 1961, organisé par l'UNESCO et l'OMM.

Unwin, G. L., & Kriedemann, P. E., 1990. Drought tolerance and rainforest tree growth on a North Queensland rainfall gradient. *Forest Ecology and Management* **30**, 113-123.

Vaadia, Y., Raney, F. C. & Hagan, R. M., 1961. Plant Water Deficits and Physiological Processes. *Annual Review of Plant Physiology* **12**, 265-292.

van Eimern, J., Karschon, R., Razumova, L.A. & Robertson, G.W., 1964. Windbreaks and shelterbelts. *World Meteorol. Organ. Tech. Notes*, **59**, 188 pp.

van Lanen, H.A.J. & Peters, E., 2000. Definition, effects and assessment of groundwater droughts. In: Vogt, J.V., Somma, F. (Eds.), Drought and Drought Mitigation in Europe. Kluwer, Dordrecht, 49-61.

Vautard, R. Multiple weather regimes over the North Atlantic analysis of precursors and successors. *Monthly weather review* **118**, 2056-2081

Verheye, W. H., 1991. Le régime hydrique des sols d'Europe, basé sur des données pédologiques et climatologiques courantes. 2 : Application à la France. *Science du sol* **29**, 37-53.

Vidal, J.-P., 2009. Variabilité spatio-temporelle de l'humidité du sol et des sécheresses en France. (Météo-France) 20p.

Vidal, J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyroux J.-M., Blanchard M. & Baillon M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric renalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, **30(11)**, 1627-1644. doi: 10.1002/joc.2003

Vinnikov, K. Y., & Yeserkepova, I. B. (1991), Soil moisture: empirical data and model results. *J. Clim.* **4**, 66-79.

von Storch, H. & Zwiers, F., 1988. Recurrence analysis of climate sensitivity experiments *Journal of Climate,* **1**, 157-171

von Storch, H., Zorita, E. & Cubasch, U., 1992. Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional scales: An application to Iberian Rainfall in Wintertime. Report No. 64, *MPI für Meteorologie* 36 pp.

Vovič, M.I.L., 1968. Le bilan hydrique du globe terrestre. *geo* **77**, 553-566.

Vowinckel, E. & Orvig, S., 1967. Climate change over the Polar Ocean. I. *Theoretical and Applied Climatology* **15**, 1-23.

Waggoner, P. E. & Simmonds, N. W., 1966. Stomata and Transpiration of Droopy Potatoes. *Plant Physiol*, **41**, 1268-1271.

Wang, E. & Engel, T., 1998. Simulation of phenological development of wheat crops. *Agric. Systems*, **58**, 1-24.

Wang, W. C., Yung, Y. L., Lacis, A. A., Mo, T. & Hansen, J. E., 1976. Greenhouse Effects due to Man-Made Perturbations of Trace Gases. *Science,* **194**, 685-690.

Warrick, R. A. & Riebsame, W. E., 1981. Societal response to CO2-induced climate change: Opportunities for research. *Climatic Change,* **3**, 387-428.

Watts, R. G., 1980. Climate models and CO2-induced climatic changes. *Climatic Change,* **2**, 387-408.

Wedgbrow, C. S., Wilby, R. L., Fox, H. R. & O'Hare, G., 2002. Prospects for seasonal forecasting of summer drought and low river flow anomalies in England and Wales. *International Journal of Climatology*, **22**, 219-236.

Weltzin, J. F. & McPherson, G. R., 1997. Spatial and temporal soil moisture resource partitioning by trees and grasses in a temperate savanna, Arizona, USA. *Oecologia*, **112**, 156-164.

Whyte, R. O., 1963. The significance of climate change for natural vegetation and agriculture. *Actes du colloque de Rome, 1961, organisé par l'UNESCO et l'OMM*, 381-394.

Wilby, R. L., Hay, L. E. & Leavesley, G. H., 1999. A comparison of downscaled and raw MCG output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado. *Journal of Hydrology,* **225**, 67-91.

Wilkerson, L., 1995. How to build scenarios. *W I R E D* (Special Edition The Future of the Future, October 13 1995), *Conde Nasi Publications*. San Francisco, CA.

Wilks, D. S., 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies, *Clim. Change*, **22**, 67-84.

Wilson, L. L., Lettenmaier, D. P. & Skyllingstad, E., 1992. A hierarchical stochastic model of large-scale atmospheric circulation patterns and multiple station daily precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* **97**, 2791-2809.

Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V. & Lettenmaier, D. P., 2004. Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches to Downscaling Climate Model Outputs. *Climatic Change,* **62**, 189-216.

Yao, A. Y. M., 1974. Agricultural potential estimated from the ratio of actual to potential evapotranspiration. *Agricultural Meteorology,* **13**, 405-417.

Zahid, M. & Rasul, G., 2012. Changing trends of thermal extremes in Pakistan. *Climatic Change*, **113**, 883-896.

Ziska, L.H., 2001. Growth temperature can alter the temperature dependent stimulation of photosynthesis by elevated carbon dioxide in Albutilon theophrasti. *Physiologia Plantarum,* **111**, 322-328.

Zorita, E., Hughes, J.P., Lettemaier, D.P. & von Storch, H., 1995. Stochastic Characterization of Regional Circulation Patternes for Climate Model Diagnosis and Estimation of Local Precipitation. *Journal of Climate,* **8**, 1023-1042

Zou, X., Zhai, P. & Zhang, Q., 2005. Variations in droughts over China: 1951–2003. *Geophys. Res. Lett.* **32**, L04707.

Zwiers, F. W., 1988. Aspects of the statistical analysis of climate experiments with multiple integrations MPI Report No 18, MPI fur Meteorologie, Hamburg

Liste des figures

Introduction générale

1 - Schéma récapitulatif des méthodes de travail développées dans la thèse (RU : réserve utile ; SWI : Soil Wetness Index (indice d'humidité des sols de Météo France) ; DP : déficit pluviométrique ; EP : excédent pluviométrique ; ETP : évapotranspiration potentielle ; ETM : évapotranspiration maximale ; ETR : évapotranspiration réelle ; DE : déficit d'évaporation ; RH : réserve hydrique) 5

Chapitre 1 - Les sécheresses en Bretagne au 20ème siècle, variabilité spatiale et temporelle

1.1 - Moyennes mensuelles du SWI sur la période 1958-2008 (Vidal, 2009) 14

1.2 - Conséquence de l'augmentation de la température globale (rouge) par rapport à la période 1980-99 sur la disponibilité de l'eau (bleu) et sur le potentiel de rendement de blé (marron), pour l'Europe du Nord (NE) et du Sud (SE) d'après le 4ème rapport du GIEC 17

1.3 - Représentation schématique des liens entre les différents types de sécheresse (d'après van Lanen et Peters, 2000) 19

1.4 - Modèle de bilan hydrique 21

1.5 - Schéma simplifié des limites des climats bretons (d'après les cartes climatiques détaillées de St Brieuc-Lorient, Brest, Rennes et Nantes, source : CNRS - équipe de recherche n°30, 1980) 23

1.6 - Diagrammes ombrothermiques de 3 stations littorales bretonnes : Brest, Dinard et Lorient pour la période 1951-80 (source des données : Météo-France) 24

1.7 - Diagrammes ombrothermiques de 2 stations des terres bretonnes : Rennes et Nantes pour la période 1951-80 (source des données : Météo-France) 25

1.8 - Panorama depuis le Ménez Hom, alt. 330 m (29) (Crédit photo : Chloé Lamy) 26

1.9 - Comportement du vent au passage d'une haie, en fonction de sa perméabilité (Guyot, 1983) 26

1.10 - Bilans hydriques de 3 stations bretonnes : Brest, Lorient, Rennes, pour la période 1961-1990 calculé sur la base d'une réserve utile identique, égale à 125 mm (Dubreuil, 1997) 27

1.11 - Valeurs moyennes du déficit d'évaporation sur la période 1950-64, isorithmes pour les valeurs inférieures à 20 mm, 1 de 20 à 29 mm, 2 de 30 à 39 mm, 3 de 40 à 49 mm, 4 de 50 à 69 mm, 5 de 70 à 89 mm, 6 de 90 à 110 mm (Mounier, 1965) 28

Chapitre 2 - Impact des sécheresses : sensibilité d'un territoire et vulnérabilité d'une activité économique majeure en Bretagne

2.1 - Succession des années climatiques de 1481 à 1537, gris : année sèche, noir : année humide, positif : année chaude, négatif : année fraiche, pour le printemps et l'été (Marchand et al., 2011) 34

2.2 - Médiatisation de la sécheresse de 1976 et de ses conséquences : photo de la Loire à sec à Tours (La Nouvelle République, 28 juin 1976) et couverture du journal l'Express du 28/06/1976 (n°1303) 35

2.3 - Coupures de presse sur les impacts de diverses sécheresses en France (source : Reynald Artaud, www.meteopassion.fr) 36

2.4 - Graphiques de rendement de plusieurs cultures en France de 1969 à 2006 (en carré vides les grandes sécheresses de 1976, 2003, 2005 et 2006) (Debaeke et Bertrand, 2008) 37

2.5 - Répartition des établissements par secteurs d'activité, comparaison de la Bretagne avec la France (COCEB, 2010) 39

2.6 - Orientations agricoles des communes de Bretagne (Source : Agreste - DRAAF Bretagne - Recensement agricole 2010 - Typologie SRISE) 40

2.7 - Schéma modifié basé sur le modèle de Wang et Engel (Wang et Engel, 1998). Les étapes de développement sont : EM = émergence ; TS = formation terminale de l'épillet ; AN = anthèse ; PM = maturité physiologique (Streck et al., 2003) 43

2.8 - Surfaces agricoles attribuées à la culture du maïs en France en 2002, cas de deux types : maïs fourrage et maïs grain (SCEES - Ministère de l'Agriculture, 2002) 44

2.9 - Evolution de l'aire de répartition du Pin sylvestre en 2055 par rapport à la situation actuelle (Cheaib et al., 2012) 45

2.10 - Evolution de l'aire de répartition du hêtre en France entre la situation actuelle (modèle Aurelhy) et en 2100 (d'après le modèle ARPEGE et le scénario B2) (Badeau et al., 2004) 46

2.11 - A : Répartition des consommations d'eau en Bretagne par secteurs d'activité en 2006 (source : agence de l'eau Loire-Bretagne) ; B : Evolution des surfaces irriguées en Bretagne entre 1988 et 2000 47

Chapitre 3 - Le changement climatique : observations et perceptions au 20ème siècle, simulations des évolutions possibles au 21ème siècle

3.1 - Présentation du système climatique avec les caractéristiques d'échelles temporelles des sous-systèmes et les liens les unissant. R : radiation ; H : chaleur ; E : évaporation ; M : dynamisme ; P : particules ou gaz ; Tw : température de l'eau ; TA : température de l'air (Flohn, 1980) 55

3.2 - Hiérarchisation des quatre canevas et scénarios SRES (IPCC, 2000) 58

3.3 - Augmentation de la température du globe selon les trois scénarios d'intérêt (IPPC, 2007) 60

3.4 - Consommation mondiale des différents types d'énergie en pourcentage (Ramage, 1997) 63

3.5 - Production d'énergies renouvelables en tonnes équivalent pétrole à travers le monde (Dessus, 2005) 64

3.6 - Evolution de la température globale selon les nouveaux scénarios du GIEC, en comparaison avec les scénarios SRES (GICC, 2011) 66

3.7 - Répartition des scénarios selon la capacité d'adaptation et d'atténuation (d'après le GICC, 2011) 66

3.8 - Moyenne mondiale du bilan énergétique de la Terre (/an). La moitié du rayonnement solaire entrant, absorbé par la surface de la Terre, est retransmise vers l'atmosphère par les rayonnements à grande longueur d'onde qui sont absorbés par les nuages et les gaz à effet de serre. L'atmosphère renvoie l'énergie à grande longueur d'onde vers la Terre et vers l'espace (Kiehl et Trenberth, 1997) 67

3.9 - Exemple des conséquences du réchauffement global sur la ressource en eau et ses dérivées sur l'alimentation et la santé (IPCC, 2007) 71

Chapitre 4 - La modélisation du climat : des modèles climatiques globaux aux projections climatiques régionalisées

4.1 - Evolution de la complexité des modèles climatiques sur les 30 dernières années (source : Working Group 1, GIEC, 2007) 82

4.2 - Grilles du modèle ARPEGE en service au début de l'année 2000. Le pôle d'ARPEGE est situé sur la France (pôle d'intérêt) et la grille est étirée. Seul un point sur seize est représenté (source : Pailleux et al., 2000) 85

4.3 - Schéma explicatif de la correction quantile-quantile, d'après C. Pagé 86

4.4 - Représentation des types de temps 0 à 8 à travers l'anomalie de la pression moyenne au niveau de la mer (hPa) et des précipitations (%) pour la période hivernale (Pagé et al., 2010) 87

4.5 - Localisation des stations météorologiques sélectionnées à partir de la base de Météo-France et des données modélisées en Bretagne de maille 8 km 92

4.6 - Différence en mm entre l'évapotranspiration modélisée et observée sur la période 1971-2010, pour les 10 stations du nord-ouest de la France 95

4.7 - Evolution de l'ETP selon trois bases de données : observées, CERFACS et SAFRAN. Situation à Angers (a) représentative des stations situées dans les terres et situation à Dinard (b) représentative du littoral 96

4.8 - Localisation des mailles de 8 km prenant en compte l'Ile-de-Bréhat 96

4.9 - Différence en mm entre les précipitations modélisées et observées sur la période 1971-2010, pour les 10 stations du nord-ouest de la France 98

4.10 - Différences en mm entre le déficit d'évaporation modélisé et observé pour les 10 stations 99

4.11 - Régression linéaire des précipitations en fonction de l'altitude et de la longitude en janvier (d'après des données de la période 1961-2009) 102

4.12 - Régression linéaire des précipitations en fonction de l'altitude et de la longitude en août (d'après des données de la période 1961-2009) 102

4.13 - Résultats de deux krigeages différents (C : krigeage ordinaire ; D : co-krigeage avec MNT) d'après les précipitations moyennes du mois de juin à 8 km (A) et un MNT à 1 km (B) sur la période 2020-2040 d'après le scénario A1B 103

4.14 - Représentation du semivariogramme utilisé pour le krigeage des précipitations (haut) et du covariogramme utilisé pour le co-krigeage avec MNT (bas) 104

4.15 - Résultats d'interpolation par spline « tension » avec un poids de 0.1 (gauche) et 5 (droite), la distance entre les points étant de 8 km 105

4.16 - Interpolation par spline (A) comparée au résultat du co-krigeage avec MNT (B) 105

Chapitre 5 - La modélisation du bilan hydrique en Bretagne : un outil d'identification des sécheresses du 20ème siècle au 21ème siècle

5.1 - Représentation de l'évapotranspiration potentielle (ET0) et maximale (ETM) selon la méthode de la FAO-56 (Allen et al., 1998) 111

5.2 - Evolution du coefficient cultural Kc selon les stades phénologiques d'une culture (Allen et al., 1994) 112

5.3 - Occupation du sol d'après la base Corine Land Cover complétée par l'analyse de Canévet (1992) 114

5.4 - Carte de l'occupation du sol moyenne hivernale pour le début du 21ème siècle (d'après les données issues de la thèse de Rémi Lecerf) 116

5.5 - Carte de l'occupation du sol moyenne estivale pour le début du 21ème siècle (d'après les données issues de la thèse de Rémi Lecerf) 117

5.6 - Vision théorique de l'effet de la nature du sol sur les différents paramètres du bilan hydrique (P : précipitations, R : écoulement total, S : écoulement superficiel, U : écoulement souterrain, E : évaporation, 1 : Eléments du bilan, 2 : capacité d'infiltration du sol, 3 : pouvoir de rétention du sol) (Vovič, 1968) 118

5.7 - Schéma de l'algorithme du script calculant les moyennes mensuelles sur des périodes de 20 ans d'après les projections climatiques du CERFACS 121

5.8 - Schéma de l'algorithme du script calculant le bilan hydrique à partir des moyennes mensuelles sur des périodes de 20 ans d'après les projections climatiques du CERFACS 122

5.9 - Schéma de l'algorithme du script permettant le calcul des moyennes journalières au format .xls à partir du fichier .csv regroupant toutes les données 123

5.10 - Schéma de l'algorithme du script transformant les fichiers .xls journaliers en raster à 1km au format .tif en utilisant l'interpolation spline proposée par ArcGIS 124

5.11 - Carte de la taille des réserves utiles à l'échelle des pédopaysages, fournie par le laboratoire Science du Sol de l'Agrocampus Ouest 125

5.12 - Carte de la taille des réserves utiles au format raster à 8km 125

5.13 - Bilan hydrique estival (ligne du haut : juin, milieu : juillet, bas : août) conditionné par l'évapotranspiration potentielle et les précipitations (1ère et 2ème colonnes) dans le cas d'une réserve utile de 125 mm (3ème colonne) ou réelle d'après la carte du Laboratoire Science du Sol (4ème colonne) 127

5.14 - Evolution de la réserve hydrique au cours de la période 2020-2040 selon le scénario A1B en prenant en compte l'occupation du sol (colonne de droite) ou non (colonne de gauche) pour les mois de juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), RU variable 128

5.15 - Schéma de la photosynthèse pour deux végétaux de type C3 et C4 (Taub, 2010) 132

Chapitre 6 - Fréquence et intensité des sécheresses au 20ème siècle

6.1 - Diagrammes ombro-thermiques de Rennes, Brest, Dinard (constitué des précipitations de Dinard et des températures de St Malo), Lorient et Nantes pour la période 1891-1930 (source : Sanson, 1944) 143

6.2 - Diagrammes ombro-thermiques de Rennes, Brest, Lorient, Dinard et Nantes, pour la période 1981-2010 (source : Météo-France) 145

6.3 - Suivi du DE mensuel de 1882 à 2009 pour la station de Brest-ville dans le cas d'une RU de 125 mm (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, bleu clair : faible déficience P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm) 149

6.4 - Suivi du DE mensuel de 1880 à 2009 pour la station de Rennes St Jacques dans le cas d'une RU de 125 mm (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, bleu clair : faible déficience P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm) 149

6.5 - Evolution du déficit d'évaporation annuel pour 7 stations bretonnes (Ile-de-Batz, Bréhat, Belle-Ile, Groix, Nantes, Plougonvelin et Rennes) depuis 1880 jusqu'à 2009 151

6.6 - Evolution du déficit d'évaporation au mois d'août pour 7 stations bretonnes (Ile-de-Batz, Bréhat, Belle-Ile, Groix, Nantes, Plougonvelin et Rennes) depuis 1880 jusqu'à 2009 152

6.7 - Evolution de la réserve hydrique (avec RU = 125 mm) à Rennes sur la période 1880-2009 (noir : courbes annuelles, rouge courbe continue : médiane, rouge courbe discontinue : quintiles supérieur et inférieur) 153

6.8 - Evolution de la réserve hydrique (médiane) pour 7 stations bretonnes (Ile-de-Batz, Bréhat, Belle-Ile, Groix, Nantes, Plougonvelin et Rennes), sur la base d'une taille de réserve utile de 125 mm, pour la période 1880-2009 154

6.9 - Disponibilité de l'eau d'une couche de sol pour les plantes (Rieul et Ruelle, 2003) 154

6.10 - Niveau d'eau minimal de la réserve hydrique par an et par station de 1880 à 2009 155

6.11 - Nombre de mois par an et par station où le niveau d'eau minimal de la réserve hydrique est inférieur à 18 mm sur la période 1880-2009 156

Chapitre 7 - Evolution de la fréquence et de l'intensité des sécheresses au cours du 21ème siècle

7.1 - Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type gazon, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), à Rennes 163

7.2 - Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type céréalière, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), près de Rennes (Ille-et-Vilaine) 164

7.3 - Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type légumière, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), près de Naizin (centre Bretagne) 164

7.4 - Variation annuelle du déficit d'évaporation dans le cas d'une occupation du sol de type fourragère, pour deux périodes moyennes de la fin du 20ème et 21ème siècle (scénario A1B), près de Plougonvelin (Finistère) 165

7.5 - Variations moyennes du DE et fréquences d'occurrence des différentes valeurs sur la période 1981-2000 observées (a) et modélisées (b) et sur la période 2080-2099 d'après les scénarios B1 (c), A1B (d) et A2 (d) pour la station de Rennes 166

7.6 - Variations moyennes du DE et fréquences d'occurrence des différentes valeurs sur la période 1981-2000 observées (a) et modélisées (b) et sur la période 2080-2099 d'après les scénarios B1 (c), A1B (d) et A2 (d) pour la station de Brest 167

7.7 - Evolution du déficit d'évaporation estival (juin à août) selon 3 scénarios du GIEC sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle 170

7.8 - Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille d'Ille-et-Vilaine 173

7.9 - Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille de Centre Bretagne 174

7.10 - Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille du Finistère 175

7.11 - Evolution du déficit d'évaporation moyen mensuel au cours de 4 périodes de 20 ans au 21ème siècle, d'après 3 scénarios SRES pour un point de grille du littoral morbihannais 176

7.12 - Suivi du remplissage des réservoirs hydriques bretons en décembre selon 3 scénarios du GIEC sur trois périodes moyennes du 21ème siècle 178

7.13 - Evolution du déficit d'évaporation estival (juin à août) selon 3 scénarios du GIEC sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle 181

7.14 - Déficit d'évaporation annuel selon 3 scénarios du GIEC pour la période 2080-2099 182

7.15 - Evolution journalière des précipitations (colonne A), du déficit d'évaporation (colonne B) et de la réserve hydrique (colonne C) au cours du mois de juillet, du 17 au 22 juillet, selon le scénario A1B du GIEC sur la période 2020-2039 184

7.16 - Evolution journalière des précipitations (colonne A), du déficit d'évaporation (colonne B) et de la réserve hydrique (colonne C) au cours du mois de juillet, du 23 au 27 juillet, selon le scénario A1B du GIEC sur la période 2020-2039 185

7.17 - Evolution du déficit d'évaporation journalier pour une station d'Ille-et-Vilaine (haut) et de Côtes d'Armor (bas) sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle, d'après trois scénarios du GIEC 188

7.18 - Evolution du déficit d'évaporation journalier pour une station du Finistère (haut) et du Morbihan (bas) sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle, d'après trois scénarios du GIEC 190

7.19 - Evolution du taux de remplissage des réserves hydriques (fin décembre) selon 3 scénarios du GIEC sur quatre périodes moyennes du 21ème siècle 192

Chapitre 8 - Suivi des sécheresses selon deux indices, et de leurs conséquences sur l'agriculture

8.1 - Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles d'après le scénario A1B pour la période 2020-39 (depuis janvier : haut gauche, à décembre : bas droite). 197

8.2 - Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles en juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), d'après le scénario B1 pour 4 périodes du 21ème siècle 199

8.3 - Variations moyennes du SWI et fréquences d'occurrence des différentes valeurs observées sur la période 2020-39 d'après le scénario B1 pour la ville de Saint Jacques de la Lande (haut), située à l'est de la région Bretagne et Landivisiau (bas), située à l'ouest 200

8.4 - Evolution moyenne du SWI (noir trait continu : médiane, gris trait discontinu : quartile supérieur et inférieur) sur la période 2020-39 pour le scénario B1, pour Saint Jacques de la Lande (gauche, marqueur losange) et pour Landivisiau (droite, marqueur rond). 201

8.5 - Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles en juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), d'après le scénario A1B pour 4 périodes du 21ème siècle 204

8.6 - Variations moyennes du SWI et fréquences d'occurrence des différentes valeurs observées sur la période 2020-39 d'après le scénario A1B pour la ville de Saint Jacques de la Lande (haut), située à l'est de la région Bretagne et Landivisiau (bas), située à l'ouest 205

8.7 - Variabilité spatiale et temporelle du SWI, valeurs moyennes mensuelles en juin (haut), juillet (milieu) et août (bas), d'après le scénario A2 pour 4 périodes du 21ème siècle 209

8.8 - Variations moyennes du SWI et fréquences d'occurrence des différentes valeurs observées sur la période 2020-39 d'après le scénario A2 pour la ville de Saint Jacques de la Lande (haut), située à l'est de la région Bretagne et Landivisiau (bas), située à l'ouest 210

8.9 - Evolution moyenne du SWI (noir trait continu : médiane, gris trait discontinu : quartile supérieur et inférieur) sur la période 2020-39 pour le scénario A2, pour Saint Jacques de la Lande (gauche, marqueur losange) et pour Landivisiau (droite, marqueur rond) 211

8.10 - Identification des secteurs étudiés à partir de la carte des réserves utiles des sols bretons et de la carte d'occupation du sol d'après Corine Land Cover. En rouge : secteur à grande réserve utile, en vert : secteur à réserve utile moyenne, en orangé : secteur à faible réserve utile 214

8.11 - Evolution de la réserve hydrique selon trois types de végétation (blé, légumes et fourrages) à partir de moyennes mensuelles pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après le scénario A1B 215

8.12 - Impact d'une culture légumière sur la réserve hydrique pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 217

8.13 - Impact d'une culture fourragère sur la réserve hydrique pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 217

8.14 - Impact d'une culture de blé sur la réserve hydrique pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à grande réserve utile dans le nord-ouest de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 218

8.15 - Evolution du D.E. mensuel sur 4 périodes du 21ème siècle, d'après 3 scénarios et pour 3 types culturaux (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, jaune clair : faible déficience P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm) 219

8.16 - Evolution de la réserve hydrique selon deux types de végétation (légumes et fourrages) à partir de moyennes mensuelles pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile moyenne dans le centre de la Bretagne, d'après le scénario A1B 220

8.17 - Impact d'une culture de légumes sur une réserve hydrique moyenne (180mm) pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile moyenne dans le centre de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 221

8.18 - Impact d'une culture fourragère sur une réserve hydrique moyenne pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile moyenne dans le centre de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 222

8.19 - Evolution du D.E. mensuel sur 4 périodes du 21ème siècle, d'après 3 scénarios et pour 2 types culturaux (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, jaune clair : faible déficience P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm) 223

8.20 - Evolution de la réserve hydrique selon trois types de végétation (blé, légumes et fourrages) à partir de moyennes mensuelles pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après le scénario A1B 224

8.21 - Impact d'une culture de blé sur une réserve hydrique faible en sud-Bretagne pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 225

8.22 - Impact d'une culture de légumes sur une réserve hydrique faible en sud-Bretagne pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 226

8.23 - Impact d'une culture fourragère sur une réserve hydrique faible pour 4 périodes du 21ème siècle, pour un secteur à réserve utile faible dans le sud-est de la Bretagne, d'après 3 scénarios SRES 227

8.24 - Evolution du D.E. mensuel sur 4 périodes du 21ème siècle, d'après 3 scénarios et pour 3 types culturaux (bleu foncé : mois hyper-humide P>ETP - RU reconstituée, bleu ciel : mois humide P>ETP - RU non reconstituée, jaune clair : faible déficience P<ETP - DE<30 mm, jaune : mois subsec - 30 < DE < 60 mm, orangé : mois sec - 60 < DE < 100 mm, rouge : mois aride - DE > 100 mm) 228

Liste des tableaux

Chapitre 2 - Impact des sécheresses : Sensibilité d'un territoire et vulnérabilité d'une activité économique majeure en Bretagne : l'Agriculture

2.1 - Liste des sécheresses majeures observées par dendrochronologie ou recueillies dans des ouvrages historiques ayant eu des impacts en France et en Bretagne 38

2.2 - Part des différents secteurs d'activités dans l'économie bretonne et nationale (COCEB, 2010) 39

2.3 - Appréciation des mesures agronomiques vis-a-vis de l'économie en eau d'irrigation (Debaeke, 2007) 48

Chapitre 4 - La modélisation du climat : des modèles climatiques globaux aux projections climatiques régionalisées

4.1 - Valeurs annuelles en mm pour les 10 stations, P : précipitations, ETP : évapotranspiration potentielle, ETR : évapotranspiration réelle, DE : déficit d'évaporation, diff : différence modélisé - observé 93

4.2 - Valeur de l'indice de détermination R^2 pour les 10 stations, obtenu à partir des précipitations observées et modélisées (P) ou du déficit d'évaporation observé et modélisé (DE) 94

4.3 - Différence en % entre le déficit d'évaporation modélisé et observé pour les 10 stations sur la période estivale 100

Chapitre 5 - La modélisation du bilan hydrique en Bretagne : un outil d'identification des sécheresses du 20ème siècle au 21ème siècle

5.1 - Valeurs mensuelles du coefficient cultural pour 9 types d'occupation du sol représentatifs de la Bretagne (d'après Allen et al., 1994) 112

5.2 - Classes du bilan hydrique adaptées du Corine Land Cover pour le territoire breton 114

5.3 - Coefficients multiplicateurs mensuels des perturbations mensuelles de l'ETP par le CO2, utilisés par les modèles STICS et MODCOU (d'après Ducharne et al., 2004) 130

Chapitre 6 - Fréquence et intensité des sécheresses au 20ème siècle

6.1 - Synthèse des écarts de précipitations mensuelles (en %) pour les cinq stations (période 1981-2010 - période 1951-1980) 146

6.2 - Synthèse des écarts de températures mensuelles (en °C) pour les cinq stations (période 1981-2010 - période 1951-1980) 147

Chapitre 8 - Suivi des sécheresses selon deux indices, et de leurs conséquences sur l'agriculture

8.1 - Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'année et de l'été (juin à septembre) pour la période 2020-39 d'après le scénario B1 202

8.2 - Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'été (juin à septembre) pour les périodes 2020-39, 2040-59, 2060-79 et 2080-99 d'après le scénario B 202

8.3 - Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'année et de l'été (juin à septembre) pour la période 2020-39 d'après le scénario A1 206

8.4 - Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 7 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'été (juin à septembre) pour les périodes 2020-39, 2040-59, 2060-79 et 2080-99 d'après le scénario A1B 207

8.5 - Différences entre les scénarios A1B et B1 pour les 4 périodes et les 2 stations, à partir des 4 classes de SWI correspondant à des épisodes de sécheresse 207

8.6 - Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 10 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'année et de l'été (juin à septembre) pour la période 2020-39 d'après le scénario A2 212

8.7 - Fréquence (%) d'occurrence du SWI selon 7 classes, pour les stations de Saint Jacques de la Lande et Landivisiau, à l'échelle de l'été (juin à septembre) pour les périodes 2020-40, 2040-60, 2060-80 et 2080-99 d'après le scénario A2 212

8.8 - Différences entre les scénarios A2 et A1B pour les 4 périodes et les 2 stations, à partir des 4 classes de SWI correspondant à des épisodes de sécheresse 213

Table des matières

REMERCIEMENTS iii

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES vii

SOMMAIRE ix

INTRODUCTION GENERALE 1

PARTIE 1 - VULNERABILITE DU TERRITOIRE BRETON FACE AUX SECHERESSES, ETUDIER LE PASSE POUR CERNER LE FUTUR 7

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE 9

CHAPITRE 1 - LES SECHERESSES EN BRETAGNE AU 20EME SIECLE, VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE 11

Introduction 12

1.1 Le risque sécheresse et ses conséquences régionales dans le contexte du changement climatique 12

1.2 Le risque sécheresse en France 13

1.3 Le risque sécheresse en Bretagne 14

1.4 Le changement climatique de l'échelle globale à l'échelle régionale 15

1.5 Agriculture durable et changement climatique 17

1.6 Les sécheresses : définition et étude grâce au bilan hydrique 18

1.6.1 Définition des sécheresses 18

1.6.2 Un outil d'identification de la sécheresse pédologique : le bilan hydrique 20

1.7 Les climats bretons façonnés par la géographie de la péninsule 22

1.7.1 Les grandes tendances à l'échelle du territoire 22

1.7.2 Le climat du littoral : une influence maritime variable 23

1.7.3 Le climat des terres marqué par la diminution de l'influence océanique 25

1.8 Spatialisation de l'aléa sécheresse en Bretagne 27

Synthèse : Un climat océanique, sensible aux sécheresses, riche en nuances à l'échelle de la région Bretagne 29

CHAPITRE 2 - IMPACT DES SECHERESSES : SENSIBILITE D'UN TERRITOIRE ET VULNERABILITE D'UNE ACTIVITE ECONOMIQUE MAJEURE EN BRETAGNE : L'AGRICULTURE 31

Introduction 32

2.1 Les sécheresses historiques majeures et leurs impacts 32

2.1.1 Les sécheresses rapportées dans les écrits historiques 33

2.1.2 Les sécheresses observées par dendrochronologie 34

2.2 Les impacts des grandes sécheresses du 20ème siècle 34

2.3 L'agriculture bretonne, vulnérable face aux sécheresses 38

2.3.1 Importance de l'agriculture dans l'économie régionale et nationale 39

2.3.2 Diversité spatiale de l'agriculture face à la ressource atmosphérique en eau 40

2.4 L'apport de l'agrométéorologie et l'agroclimatologie pour étudier la vulnérabilité des systèmes agricoles aux sécheresses 41

2.4.1 Les effets du climat sur les cultures bretonnes 43

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

2.4.2 L'agroclimatologie appliquée aux forêts 45
2.4.3 La vulnérabilité de l'élevage breton face au climat 46
2.5 Les enjeux de la gestion de l'eau pour l'agriculture en Bretagne 47
Synthèse : L'apport des sécheresses passées et de leurs enseignements quant à la vulnérabilité de l'agriculture 50
CHAPITRE 3 - LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : OBSERVATIONS ET PERCEPTIONS AU 20EME SIECLE, SIMULATIONS DES EVOLUTIONS POSSIBLES AU 21EME SIECLE 51
Introduction 52
3.1 De la notion d'effet de serre à la conceptualisation du changement climatique 52
3.2 Observations et perceptions du changement climatique au 20ème siècle 57
3.3 Les scénarios socio-économiques du GIEC 58
3.3.1 La famille A2 59
3.3.2 La famille A1 60
3.3.3 La famille B1 61
3.3.4 Discussion sur le choix de ces scénarios et de leur représentativité 63
3.3.5 Présentation des nouveaux scénarios 65
3.4 Lien entre scénarios d'émission de gaz à effet de serre et projections climatiques 67
3.5 Les projections climatiques pour le 21ème siècle 69
Synthèse : Le changement climatique au 20ème et 21ème siècle, de l'observation à la modélisation 72
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE 73
PARTIE 2 - METHODES DE MODELISATION DES SECHERESSES A L'INTERFACE ENTRE LE SOL ET L'ATMOSPHERE, A PARTIR DE PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LE 21EME SIECLE 75
INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE 77
CHAPITRE 4 - LA MODELISATION DU CLIMAT : DES MODELES CLIMATIQUES GLOBAUX AUX PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES 79
Introduction 80
4.1 Les modèles climatiques globaux 80
4.2 La régionalisation des projections climatiques 82
4.2.1 La régionalisation dynamique 83
4.2.2 La régionalisation statistique 83
4.3 Les simulations climatiques : méthodologie et qualité des données 84
4.3.1 Le modèle ARPEGE-Climat 85
4.3.2 La désagrégation statistique CERFACS 86
4.3.2.1 Base de données SAFRAN 89
4.3.2.2 Le logiciel Dsclim 89
4.3.2.3 Limitations et avantages des données simulées 90
4.3.3 Comparaison des données observées (Météo-France) et des données désagrégées CERFACS 91
4.4 L'interpolation des données climatiques : affiner la résolution des données climatiques jusqu'à 1 km 101
Synthèse : Utilisation des projections climatiques régionalisées 106

CHAPITRE 5 - LA MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE EN BRETAGNE : UN OUTIL D'IDENTIFICATION DES SECHERESSES DU 20EME SIECLE AU 21EME SIECLE **107**

Introduction 108

5.1 Présentation des paramètres du bilan hydrique 108

5.1.1 L'évapotranspiration : paramètre climatique majeur du bilan hydrique 108

5.1.1.1 L'évapotranspiration potentielle 109

5.1.1.2 L'évapotranspiration maximale 111

5.1.2 L'occupation du sol 111

5.1.2.1 La base CORINE Land Cover 113

5.1.2.2 Les données issues de la télédétection 115

5.1.3 La réserve hydrique des sols 117

5.1.3.1 L'évapotranspiration réelle 118

5.1.4 Cycle de l'eau et sécheresse 118

5.2 Spatialisation du bilan hydrique 119

5.2.1 Evolution du calcul du déficit d'évaporation 119

5.2.2 Le bilan hydrique mensuel 120

5.2.3 Le bilan journalier 122

5.2.4 L'apport de la carte pédologique détaillée 124

5.2.5 L'apport de l'occupation du sol dans un bilan hydrique 128

5.3 Le paramètre d'intérêt : DE, et un équivalent utilisé par d'autres scientifiques : SWI 129

5.4 Effet du CO_2 dans le processus de photosynthèse des végétaux, conséquences pour l'ETP 129

Synthèse : Utilisation d'un bilan hydrique à l'échelle régionale 133

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE 135

PARTIE 3 - DU CLIMAT PASSE AU CLIMAT FUTUR : EVOLUTION DE LA FREQUENCE ET L'INTENSITE DES SECHERESSES EN BRETAGNE ET SES CONSEQUENCES POUR L'AGRICULTURE **137**

INTRODUCTION DE LA TROISIEME PARTIE 139

CHAPITRE 6 - FREQUENCE ET INTENSITE DES SECHERESSES AU 20EME SIECLE **141**

Introduction 142

6.1 Caractéristiques climatiques de 5 stations bretonnes au cours du 20ème siècle 142

6.1.1 Situation moyenne du début du 20ème siècle 142

6.1.2 Situation moyenne de la fin du 20ème siècle 144

6.2 130 ans de suivi des sécheresses 148

6.2.1 Rennes et Brest : deux tendances régionales 148

6.2.2 Evolution du déficit d'évaporation pour 7 stations bretonnes 150

6.3 Variabilité spatio-temporelle de la réserve hydrique 153

6.4 Fréquence et intensité des sécheresses pour 7 stations 155

Synthèse : Caractéristiques des sécheresses en Bretagne au 20ème siècle 158

CHAPITRE 7 - EVOLUTION DE LA FREQUENCE ET DE L'INTENSITE DES SECHERESSES AU COURS DU 21EME SIECLE **159**

Introduction 160

7.1 Discussion sur les incertitudes et les biais des données utilisées 160

7.2 Conséquences de la prise en compte de l'occupation du sol dans le calcul du déficit d'évaporation 162
7.2.1 Evolution du déficit d'évaporation entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle (occupation du sol de type gazon) 162
7.2.2 Evolution du déficit d'évaporation entre la fin du 20ème siècle et la fin du 21ème siècle pour plusieurs stations bretonnes (occupation du sol réelle) 163
7.2.3 Evolution du déficit d'évaporation au 21ème siècle à Rennes et Brest selon une occupation du sol de type « gazon » 166
7.3 Tendances moyennes mensuelles de l'évolution des sécheresses au 21ème siècle selon trois scénarios du GIEC 168
7.3.1 Suivi du déficit d'évaporation estival pour trois scénarios SRES du GIEC 168
7.3.2 Suivi du déficit d'évaporation mensuel pour trois scénarios SRES du GIEC, pour quatre stations bretonnes 172
7.3.3 Suivi de la recharge hivernale pour trois scénarios SRES du GIEC 176
7.4 Tendances moyennes journalières de l'évolution des sécheresses à la résolution kilométrique 179
7.4.1 Suivi du déficit d'évaporation estival selon trois scénarios SRES 179
7.4.2 Variations journalières du DE pour quelques stations bretonnes 186
7.4.3 Recharge hivernale 191
Synthèse : Des sécheresses plus intenses et plus fréquentes au cours du 21ème siècle en Bretagne 193
CHAPITRE 8 - SUIVI DES SECHERESSES SELON DEUX INDICES, ET DE LEURS CONSEQUENCES SUR L'AGRICULTURE 195
Introduction 196
8.1 Evolution des sécheresses au 21ème siècle d'après l'indice SWI de Météo-France 196
8.1.1 Comparaison avec le déficit d'évaporation 196
8.1.2 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario B1 197
8.1.3 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario A1B 203
8.1.4 Evolution du SWI sur la période estivale d'après le scénario A2 208
8.2 Durabilité des systèmes agricoles actuels dans le contexte du changement climatique 213
8.2.1 Comportement hydrique de la végétation en situation de réserve utile importante 215
8.2.2 Comportement hydrique de la végétation en situation de réserve utile moyenne 219
8.2.3 Comportement hydrique de la végétation en situation de faible réserve utile 223
Synthèse : Perception des sécheresses par un autre indice et réflexion sur la durabilité des cultures bretonnes dans le contexte du changement climatique 229
CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE 231
CONCLUSION GENERALE 233
BIBLIOGRAPHIE 239
LISTE DES FIGURES 261
LISTE DES TABLEAUX 269
TABLE DES MATIERES 271

Lamy, Chloé. Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne - 2013

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA FREQUENCE ET L'INTENSITE DES SECHERESSES EN BRETAGNE

Résumé

Par le passé la Bretagne a connu des épisodes de sécheresses très intenses. Peu communs pour des régions caractérisées par un climat océanique, ils ont eu des conséquences notables à l'échelle du territoire. De nombreuses activités socio-économiques sont ainsi apparues vulnérables face à ces évènements. Durant la sécheresse de 1976, l'agriculture fut particulièrement touchée, avec des pertes de récoltes importantes. La sécheresse est donc un risque important à l'échelle du territoire breton. Or, le changement du climat observé depuis plusieurs décennies amène des doutes quant à l'évolution des sécheresses en termes de fréquence et d'intensité. Cette thèse propose ainsi une analyse des caractéristiques des épisodes secs en Bretagne selon trois scénarios SRES du GIEC : B1, A1B et A2. Les sorties climatiques désagrégées utilisées ont été comparées, dans un premier temps, aux observations, afin de s'assurer de l'adaptabilité des jeux de données pour une analyse de ce type. Pour chacun des scénarios deux types de bilans hydriques ont été calculés. Ils permettent d'obtenir des valeurs de déficit d'évaporation, paramètre illustrant l'intensité des sécheresses, ainsi que des valeurs de réserve hydrique qui mettent en évidence les périodes d'assèchement et de recharge des sols. Les premiers bilans hydriques, de résolution de 8 km et au pas de temps mensuel, proposent une vision générale sur le comportement hydrique des sols bretons. Les seconds, de résolution kilométrique et au pas de temps journalier, apportent plus de précision quant aux secteurs vulnérables et à l'intensité probable des épisodes secs. On peut ainsi voir que des sécheresses exceptionnelles, similaires à celle de 1976, seraient régulièrement observées à la fin du 21ème siècle d'après le scénario A2. La comparaison avec un indice de sécheresse utilisé par Météo-France confirme les tendances régionales attendues au 21ème siècle d'après les trois scénarios SRES. Une approche agronomique est également proposée dans cette thèse afin d'apprécier les impacts de différentes types de culture sur la réserve hydrique des sols.

Mots clés : Sécheresse, changement climatique, bilan hydrique, modélisation, Bretagne

CLIMATE CHANGE IMPACT ON THE FREQUENCY AND INTENSITY OF DROUGHTS IN BRITTANY

Abstract

Several extreme droughts occurred in Brittany during the past. Although they are rare in this oceanic region, their impacts are noticeable on the territory. Several socio-economical activities thus appeared to be vulnerable to dryness. In 1976, agriculture has been highly impacted during the drought, with important harvest loss. Droughts are therefore a significant hazard in Brittany. However, the changing climate observed for several decades raises issues on the way drought events might evolve in terms of frequency and intensity. This thesis offers an analysis of drought's characteristics in Brittany according to three IPCC's SRES scenarios : B1, A1B and A2. At first, disaggregated climate outputs have been compared to observed data to make sure of their suitability for this kind of study. For each scenario, two soil water balances have been calculated in order to get values of evaporation deficit, quantifying drought intensity, and of water storage, illustrating periods of emptying and filling of soils. Soil water balances calculated at a 8-km spatial resolution and monthly timescale displayed a general view of water content in Britannic's soils. Soil water balances calculated at a higher spatial resolution (1 km) and daily timescale brought more details than previous results in terms of intensity and localization of droughts. They revealed that droughts of similar intensity than that of 1976 might occur regularly at the end of the 21st century according to the A2 scenario. These results are confirmed by another drought index used by Météo-France. An agronomic approach is also developed in this thesis in order to reveal impacts of farming on soil water content.

Key words : Droughts, climate change, soil water balance, modeling, Brittany