

Géologie du bassin de la Loire

Pierre Nehlig

▶ **To cite this version:**

Pierre Nehlig. Géologie du bassin de la Loire. Géosciences, 2010, 12, pp.10-23. hal-00663278

HAL Id: hal-00663278
https://brgm.hal.science/hal-00663278

Submitted on 26 Jan 2012

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.



Géologie du bassin de la Loire

Les roches qui constituent le *substratum* du bassin versant de la Loire ont une histoire géologique longue de plus de 500 millions d'années. Le fleuve tel que nous le connaissons est très récent. Cet article explore ces deux facettes et montre que les paysages que nous rencontrons aujourd'hui ont beaucoup changé au cours des temps et que leur histoire n'est pas figée.



Pierre Nehlig

Service Géologie, BRGM

p.nehlig@brgm.fr

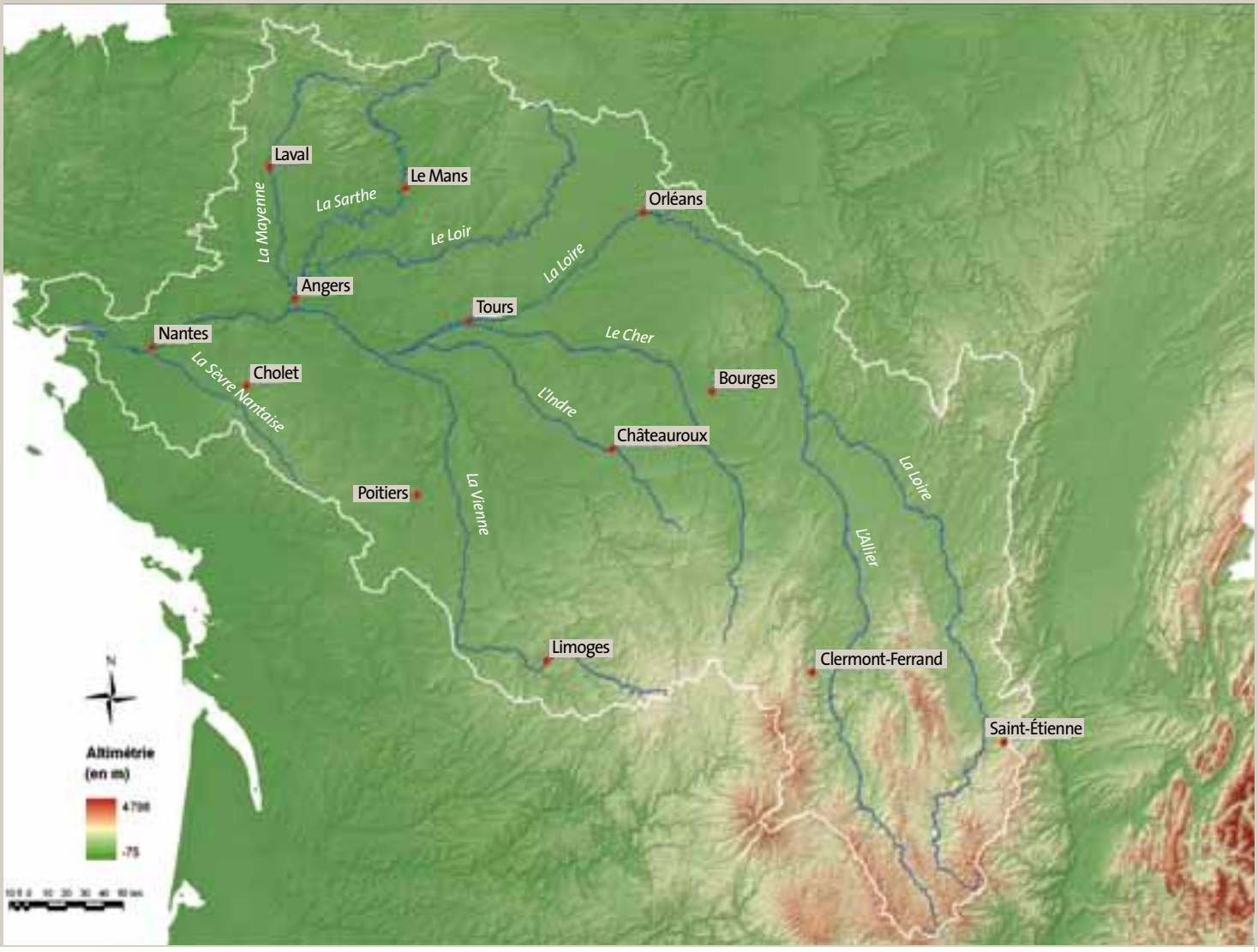
Gorges de l'Allier, Velay, bassin du Puy, Limagnes, Sologne, Beauce, Touraine, Anjou, sont autant de noms qui évoquent des paysages caractéristiques, identifiables par une physionomie qui leur est propre : formes de relief, types de végétation, modes de construction, couleur des terres, lignes d'horizons... Selon l'échelle d'observation, le relief, la culture de celui qui l'observe, on y verra pour certains principalement la végétation, pour d'autres la part de l'homme, ou encore le relief. Mais la composante essentielle de ces paysages, celle dont l'appréhension est souvent la plus difficile, est celle du *substratum* minéral, de la géologie. C'est bien elle qui s'impose dès que le recul est suffisant. Reliefs, géo-ressources minérales et énergétiques, aléas naturels, potentiel agricole et industriel..., c'est le monde minéral qui conditionne une grande part des paysages ainsi que l'implantation humaine.

Longtemps l'habitat s'est concentré le long des voies de communications naturelles que constituaient les fleuves. La Loire et ses affluents ne dérogent pas à la règle et ont structuré le bassin et son développement économique. Il n'est pas étonnant qu'en retour plusieurs barrages et d'importantes protections latérales contre les crues aient vu le jour. Si la Loire est souvent présentée comme le « dernier grand fleuve sauvage » en France, cette appellation est abusive. Depuis l'Antiquité elle a connu des aménagements pour favoriser la

Maisons troglodytes creusées dans les escarpements de craie-tuffeau du lit majeur de la Loire entre Amboise et Saumur.

Cave houses dug into the chalky tuffeau of the Loire's flood plain between Amboise and Saumur.

© F. Michel, BRGM Im@gé.



navigation et protéger les populations riveraines de ses crues. Pour autant, la Loire n'est pas uniquement un « fleuve d'aspect sauvage ». Elle reste un agent géologique puissant qui transporte chaque année des millions de tonnes de sable, d'argile et d'éléments dissous depuis le Massif central et les régions environnantes vers la mer. Ce transport n'est pas uniforme et se traduit localement par des alternances de dépôts sédimentaires et des incisions dans les lits des rivières et leurs berges qui sont susceptibles d'affecter les infrastructures économiques.

Le bassin de la Loire

La Loire sur plus de 1 000 km draine un bassin de 117 000 km², de l'Ardèche à la Bretagne [Bouchardy *et al.* (2002)]. Étonnamment, le fleuve ne coule pas au milieu de son bassin *(figure 1)*. À l'exception de la Maine qui vient grossir la Loire à Angers, on ne trouve en rive droite que quelques petits affluents venus du Vivarais, du Charolais et du Morvan. La ligne de séparation des eaux avec le Rhône et la Seine est très proche du cours même de la Loire. En revanche, en rive gauche affluent l'Allier, presque aussi important que la Loire à la confluence près de Nevers, mais aussi le Cher, l'Indre, la Creuse et la Vienne *(figure 1)* pour ne citer que les plus grands.

Fig.1 : Principales composantes du relief et de l'hydrologie du bassin de la Loire.

Fig. 1: Main components of the relief and hydrology of the Loire Basin.



Photo 1 : Site troglodyte à trois étages creusé dans des dépôts de lahars du Cantal (La Roche Percée à Fraisse Haut dans la vallée de l'Alagnon, affluent de l'Allier).

Photo 1: A three-storey troglodyte structure hollowed out of lahar deposits in the Cantal region (La Roche Percée at Fraisse Haut, in the valley of the Alagnon, a tributary of the Allier River).

© P. Nehlig.

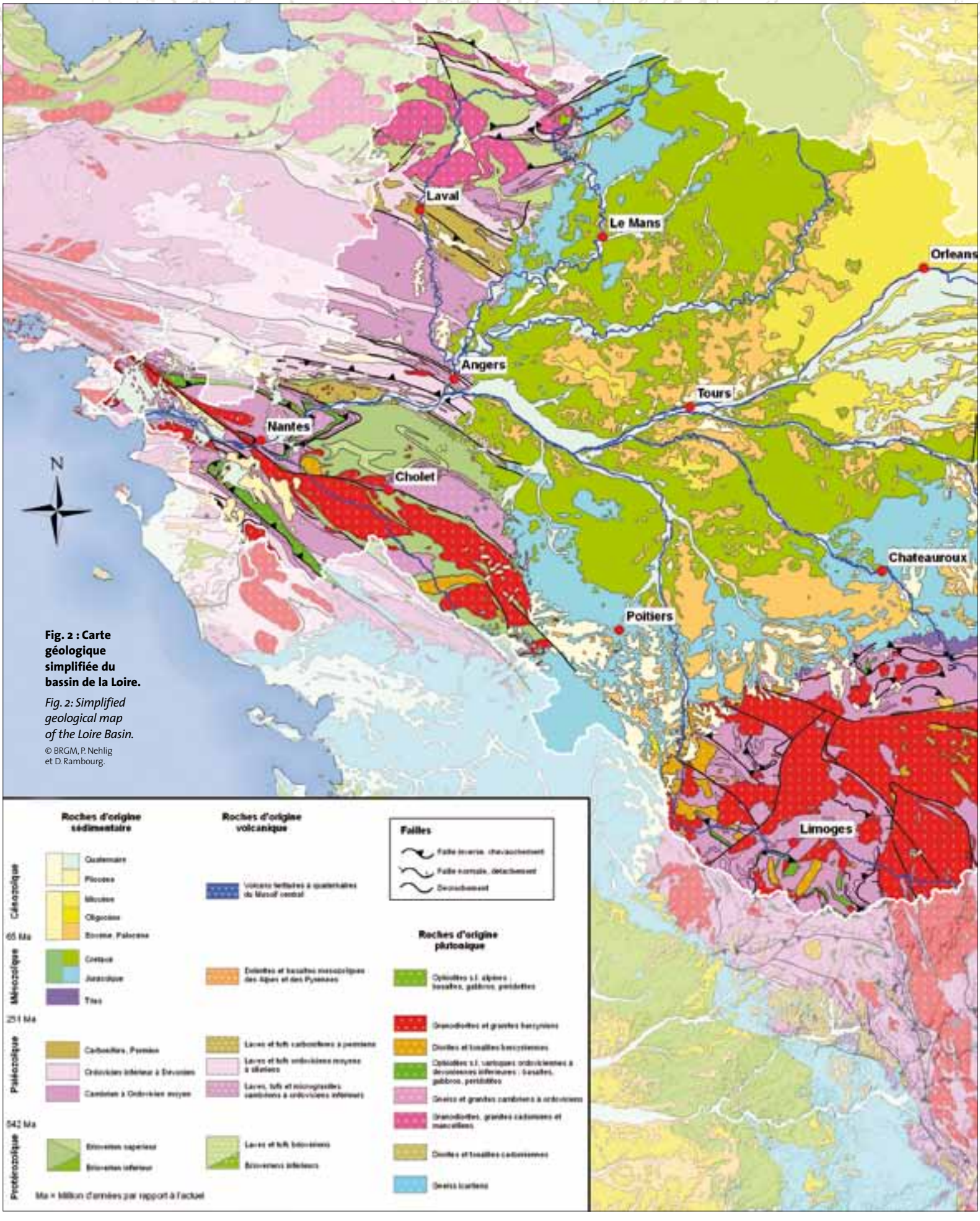


Fig. 2 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Loire.

Fig. 2: Simplified geological map of the Loire Basin.

© BRGM, P. Nehlig et D. Rambourg.


Bourges
Clermont-Ferrand
Saint-Etienne
Géosciences pour une Terre durable
brgm
10 5 0 10 20 30 40 50 km

Étonnamment, le fleuve ne coule pas au milieu de son bassin.

La disposition de ce réseau hydrographique traduit de façon très nette la dissymétrie du relief du bassin versant avec un ensemble de rivières tournées vers l'Atlantique, alors que le Rhône et la Méditerranée sont plus proches en zone amont. Le Massif central se présente comme un territoire basculé, relevé du côté des Alpes au sud-est et plus affaissé du côté de l'Atlantique au nord-ouest.

Une autre curiosité de la Loire attire le regard. Un grand coude affecte son tracé entre Gien et Orléans ainsi que ses affluents de rive gauche (Cher, Indre et Vienne). D'abord nord-sud, l'écoulement passe à est-ouest comme si le *substratum* de l'ensemble du bassin avait été basculé à un moment donné de l'histoire géologique du fleuve.

Le bassin de la Loire draine trois régions géologiques distinctes avec un sous-sol varié dans sa nature lithologique et dans ses reliefs : le Massif central, le bassin de Paris et le Massif armoricain. La carte géologique *(figure 2)* illustre ces grands ensembles, qui comprennent du socle cristallin dans le Massif central et dans le Massif armoricain, des terrains sédimentaires d'âge paléozoïque en Anjou, jurassique dans le Berry, en Bourgogne et en Poitou, crétacé en Touraine et cénozoïque en région Centre.

Le Massif central

Le Massif central, comme son voisin le Massif armoricain, est une entité aisément identifiable sur la carte géologique de la France. Il appartient à un très vaste ensemble géologique qui a constitué dans la deuxième partie du Paléozoïque (il y a 300 Ma) une grande chaîne de montagnes, la chaîne varisque ou hercynienne, vraisemblablement analogue par sa taille à l'actuelle chaîne de l'Himalaya. Les roches de cette chaîne, très arasées par l'érosion dès 255 Ma, forment aujourd'hui l'ossature géologique de l'Europe de l'Ouest. Elles affleurent dans le Massif central et le Massif armoricain et constituent le *substratum* des roches sédimentaires plus récentes du bassin de Paris.

Sur la carte de la *figure 2*, quelques couleurs bien caractéristiques soulignent les grandes unités géologiques qui structurent le massif. La couleur rouge prédomine, car hormis les volcans auxquels il doit une grande partie de sa célébrité, le Massif central est avant tout

► Le sous-sol de la Loire vu du ciel

José Perrin – BRGM, Service Géologie – j.perrin@brgm.fr
Sétareh Rad – BRGM, Service Géologie – s.rad@brgm.fr

La géophysique aéroportée qui a pris son essor il y une cinquantaine d'années consiste à quadriller le territoire avec un aéronef équipé d'instruments de mesure aptes à caractériser à distance certaines propriétés physiques du sol et du sous-sol. Complémentaire de la carte géologique, cette méthode apporte une information homogène sur leur géométrie et leurs caractéristiques physiques. Selon la taille des instruments géophysiques, les contraintes de relief, les impératifs de sécurité, un hélicoptère ou un avion léger effectuent des vols à basse altitude (< 100 mètres) de façon à imager les formations géologiques en haute résolution.

Ces levers s'appuient sur des méthodes d'acquisition « active » comme l'électromagnétisme ou « passive » tels le magnétisme et la radiométrie spectrale.

– L'électromagnétisme renseigne sur la conductivité des roches : cette méthode permet de différencier les argiles, des roches compactes ou encore imprégnées d'eaux douces ou salées jusqu'à plus de 200 mètres de profondeur.

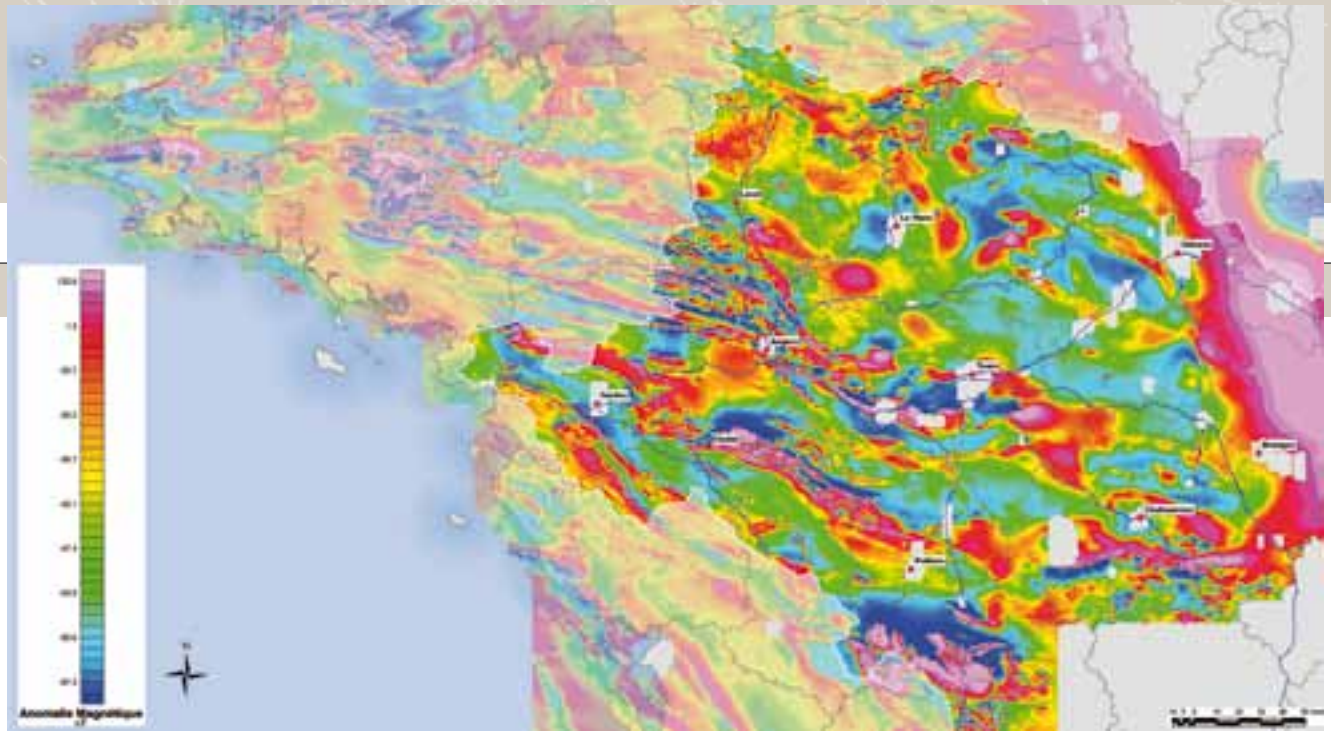
– Le magnétisme permet d'identifier la nature et la structure des formations géologiques en fonction de leurs concentrations en minéraux magnétiques. Cette méthode est couramment utilisée par l'industrie minière pour la détection directe de gisements métalliques ou en géologie pour la cartographie des structures profondes, de manière indirecte, en vertu de la présence disséminée dans les roches de minéraux aimantés.

– La radiométrie spectrale enregistre le rayonnement gamma émis par la radioactivité naturelle émanant des premiers décimètres du sol. Cette méthode décèle les types de roches caractérisées par des teneurs ou des proportions particulières de radioéléments. Cette empreinte radiométrique est une clé supplémentaire dans l'identification lithologique ; on parle alors de spectrofaciès.

Les deux dernières méthodes sont mises en œuvre simultanément pour la couverture géophysique aéroportée haute résolution du territoire français. Avec la réalisation au printemps 2010 de la zone de jonction entre le Massif armoricain (levé de 1998) et de la région Centre (levé de 2008), il existe désormais une couverture continue du quart nord-ouest de la France. Les cartes obtenues donnent une perception nouvelle du cadre géologique du bassin de la Loire.

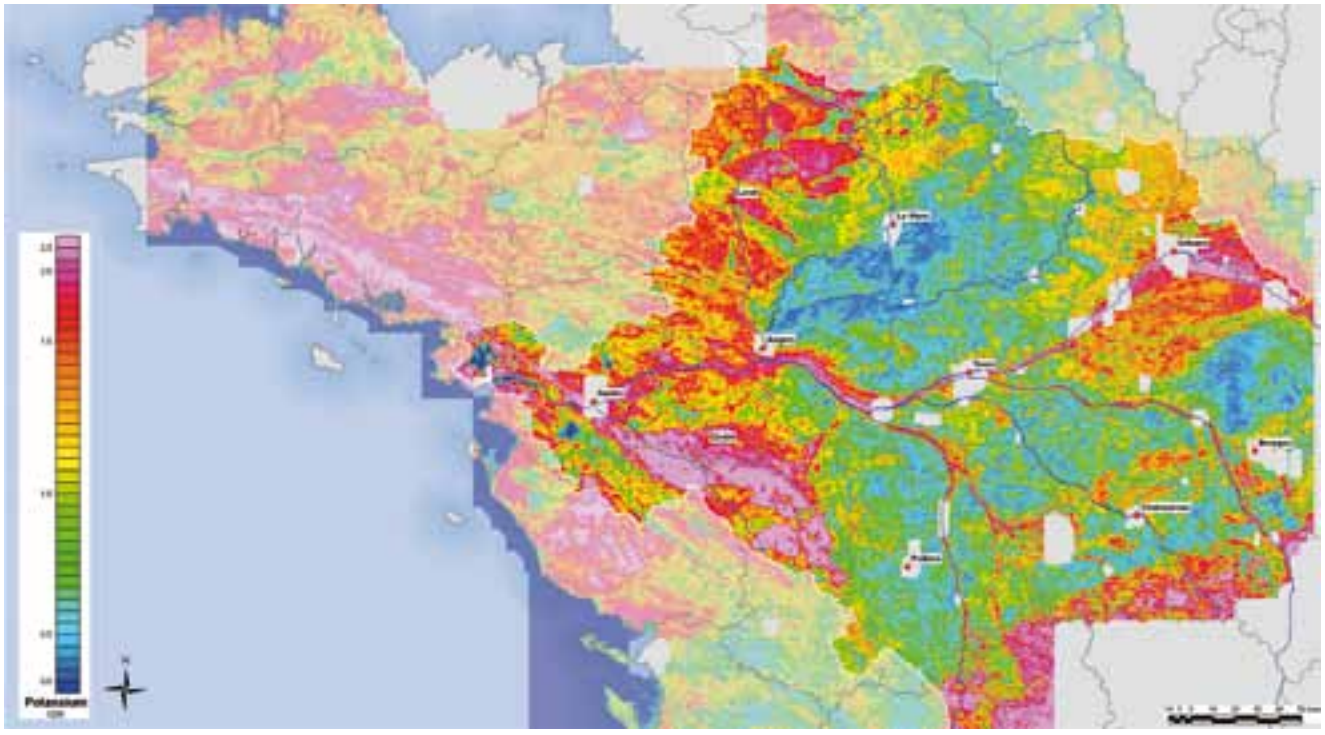
La radiométrie spectrale montre l'origine des sédiments transportés par la Loire au cours de son histoire : sables de Sologne ou minéraux issus du lessivage des terrains volcaniques ou granitiques du Massif central. La carte magnétique met en avant l'aspect structural où l'on observe bien un alignement qui contraint l'écoulement de la Loire.

Ces données complétées par les observations de terrain donnent accès à une nouvelle approche de la cartographie géologique et contribuent à l'amélioration de la connaissance du régolithe *(encadré page 17)* sur lequel nous vivons.



Carte aéromagnétique – *Aeromagnetic map*

L'aéromagnétisme ne renseigne pas directement sur la présence d'eau. Néanmoins cette carte contribue à la compréhension des contrôles géologiques sur les systèmes aquifères. En effet, les failles et cisaillements qui compartimentent le Massif armoricain s'expriment ici avec beaucoup de contrastes, les contreforts du Massif central également. La vision continue de leur prolongement sous le seuil du Poitou, comme à plus grande profondeur sous le bassin de Paris jusqu'en région Centre, devient possible. Cette structuration, parfois très ancienne et réactivée plusieurs fois tout au long de l'histoire géologique jusqu'à aujourd'hui (séisme de Hennebont, Morbihan, en 2002 sur la branche sud du cisaillement sud-armoricain), joue un rôle primordial sur le contrôle de l'érosion, de la sédimentation et au final sur l'organisation du réseau hydrographique de la Loire.



Carte aérospectrométrique – *Aero spectrometry map*

Les mesures de spectrométrie γ sont classiquement visualisées sous forme de carte des trois éléments Potassium-Uranium-Thorium. Cette imagerie en couleur révèle sous forme bien lisible les variations en proportions relatives des teneurs en radioéléments. La figure ci-dessus présente les teneurs pour le potassium, un exemple en Sologne signale un excès de potassium caractéristique des formations argileuses.

En Bretagne, le socle cristallin affleurant apparaît avec les couleurs les plus vives, nuancées selon les massifs, mais traduisant toujours une richesse plus élevée en radioéléments. Ainsi, la similarité des spectrofaciès atteste de l'origine des alluvions du bassin de la Loire comme produits de démantèlement des granites du Massif central. Curieusement leur extension est confinée au lit majeur de la Loire, du Cher et de la Vienne.

une terre de granites. Limousin, Millevaches, Morvan, Forez, Margeride, Velay... pour n'en citer que quelques-uns, plus de la moitié du socle du Massif central est composé de granites mis en place entre -400 et -300 Ma. Leur formation est contemporaine de la surrection de la chaîne varisque.

Ces granites sont intrusifs dans des roches plus anciennes, comme des gneiss et des schistes d'âge antérieur à l'histoire varisque. Ces roches sont représentées dans les teintes roses et brunes sur la carte géologique *(figure 2)* : série cévenole près de la source de la Loire, série du Haut Allier entre Prades et Brioude.

Au nord du Massif central, la partie orientale du bassin versant de la Loire est formée par une protubérance du socle au niveau du Morvan. Cette région est drainée dans sa partie orientale par l'Arroux, le plus important des affluents de rive droite et qui a la particularité de couler dans le sens N-S.

L'observation de la carte géologique *(figure 2)* permet d'identifier de façon très nette les deux plaines intérieures du Massif central, orientées nord-sud et représentés par une couleur jaune dominante : à l'ouest la vallée de l'Allier ou Grande Limagne, de Brioude à Moulins, et à l'est, la vallée de la Loire, Limagne, ou plaine, du Forez, au nord de Saint-Étienne. Leur altitude varie entre 300 et 400 mètres, alors que celle des reliefs environnants dépasse fréquemment les 1 000 mètres. Grande et Petite Limagnes sont séparées par les reliefs des Monts du Forez et se rejoignent au nord, pour n'en faire plus qu'une au niveau de Moulins, dans le Bourbonnais. Les deux Limagnes correspondent à des compartiments effondrés du socle varisque dans lesquels des sédiments lacustres et marins se sont accumulés à l'Oligocène (-34 à -23 Ma). On observe de façon très distincte sur la carte le tracé des failles nord-sud qui délimitent les deux bassins d'effondrement.

Les surfaces bleu foncé sur la carte géologique *(figure 2)* représentent les épanchements volcaniques mis en place dans le Velay, le Cantal, le Cézallier, le Mont-Dore, le Devès, le Sancy et la chaîne des Puys depuis les derniers 10 Ma. La dernière activité volcanique au lac Pavin date d'à peine 6 700 ans. Les coulées volcaniques du Velay dans les vallées de la Loire et de l'Allier ont momentanément bloqué l'incision depuis 3 Ma, mais elles n'ont pas engendré de ruptures de pente permanentes du cours du lit, ainsi que le montre le lissage général des profils longitudinaux. Mais les effusions volcaniques ont provoqué localement des changements de cours dans les secteurs amont de la Loire et de l'Allier : à Arlempdes, Langeac, Paulhaguet et Brioude par exemple.

Le Bassin de Paris

Après le Massif central, la Loire draine le sud-ouest du bassin de Paris. Au sud, sur le versant septentrional du Massif central, les couleurs violettes de la carte géologique *(figure 2)* indiquent la présence de formations du Trias (grès, calcaires, argiles) – déposés entre -250 et -200 Ma. Viennent ensuite des auréoles concentriques et relativement régulières de terrains jurassiques, (calcaires et marnes), datés de -200 à -145 Ma et représentés par une teinte bleue. La Loire entre Decize et Nevers et l'Allier au seuil du Veurdre recoupent ces terrains résistants et obliquent vers l'ouest avant d'emprunter le fossé de la Loire, une structure distensive qui canalise les deux cours d'eau selon un axe méridien jusqu'à Briare où elles recoupent les terrains d'âge crétacé *(en vert sur la carte de la figure 2)* ; argiles, sables et craie (-145 à -65 Ma) qui affleurent aussi en Touraine.

Le centre du bassin est constitué de roches déposées au Cénozoïque de -65 Ma à nos jours *(couleurs orangé et jaune sur la carte)* : sables de Sologne et calcaires karstiques de Beauce à l'aval d'Orléans.

La sortie de la Loire du bassin de Paris s'effectue directement dans les formations crétacées du Turonien (de Tours) avec son cortège de châteaux, d'églises et de maisons construites avec et dans la craie-tuffeau.

Le Massif armoricain

En Anjou, aux Ponts-de-Cé, la Loire quitte le bassin de Paris et pénètre le Massif armoricain en recoupant des terrains sédimentaires paléozoïques jusqu'à Ancenis, puis une série métamorphique jusqu'à Nantes où apparaissent les granites du cisaillement sud-armoricain. La Loire atteint l'océan au niveau de l'estuaire de Saint-Nazaire.

L'histoire géologique

La Loire donne l'illusion d'un paysage immuable. L'histoire géologique nous apprend qu'il n'en est rien. La mosaïque de roches et de paysages qui caractérise son bassin est le résultat de processus géologiques longs où se sont conjuguées des forces profondes (convection dans le manteau terrestre à l'origine entre autres du volcanisme), des forces tangentielles (forces tectoniques qui construisent les montagnes) et des forces de surface (érosion, transport et sédimentation). Malgré leur extrême complexité géologique, le détail de leur formation est maintenant bien connu grâce à la réalisation d'une cartographie précise des roches et des structures que l'on y trouve (http://infoterre.brgm.fr) *(encadrés pages 15 et 17)*. La construction du sous-sol du bassin de la Loire a commencé il y plus de 500 Ma et se poursuit encore aujourd'hui.

> *« La mosaïque de roches et de paysages est le résultat de processus géologiques longs. »*

La cartographie du régolithe : le chantier pilote Sologne

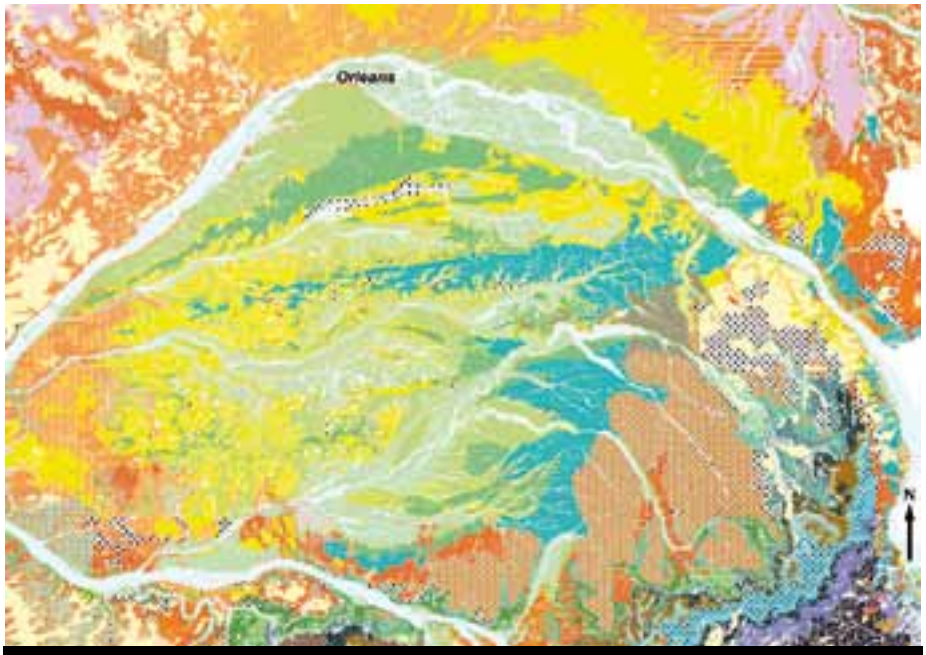
Frédéric Lacquement – BRGM, Service Géologie – f.lacquement@brgm.fr
François Prognon – BRGM, Service Géologie – f.prognon@brgm.fr

Les enjeux sociétaux modernes en termes de gestion de la ressource en eau, des matières premières, de l'aménagement du territoire et du développement des nouvelles technologies énergétiques (géothermie basse et très basse énergie) reposent tous sur une bonne connaissance du milieu géologique avec lequel l'homme interagit : le régolithe[1]. Un état des lieux de la connaissance de cet environnement à l'échelle du territoire national a été mené en 2009 par Lacquement et al. ; il met en évidence une grande hétérogénéité dans la quantité et la qualité des données disponibles sur ces formations géologiques.

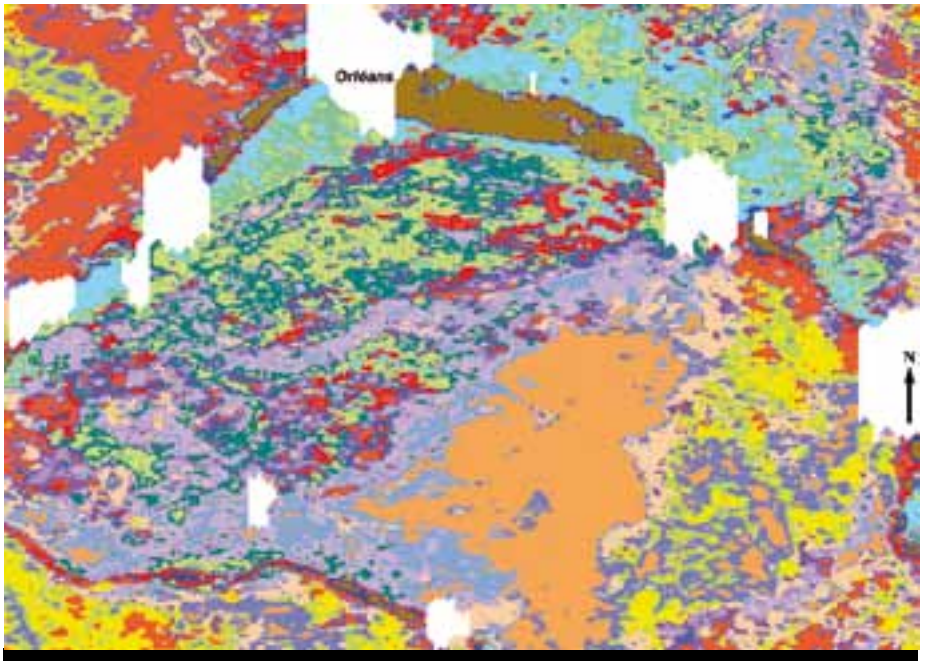
L'ambition est désormais de définir une nouvelle méthodologie d'étude des formations de surface à partir d'une étude croisée de données de géophysique aéroportée, de données de forages, de la topographie, de datations, des données géologiques existantes ainsi que de nouvelles observations de terrain.

Du fait de sa complexité géologique, la Sologne a été choisie comme cible des premières études. L'accumulation dans ce secteur de formations détritiques drainées par la Loire et ses affluents depuis plusieurs millions d'années ont permis de créer un enchevêtrement complexe de terrasses étagées et de cônes alluviaux emboîtés.

Les données de radiométrie spectrale obtenues lors de la campagne de géophysique aéroportée donnent une mesure de la concentration en uranium, thorium et potassium des roches de surface *(cf. encadré p.14)*. La combinaison entre ces trois éléments permet de définir des familles de ratios et d'intensités proches. En Sologne, 18 familles spectrales peuvent être ainsi définies. La distribution cartographique de ces familles suggère clairement des homogénéités géographiques se rapprochant de celles des cartes géologiques actuelles dans certains secteurs. À d'autres endroits, des ensembles géographiques semblent être homogènes spectralement alors que ce n'est pas le cas sur les cartes géologiques existantes. La combinaison de ces données radiométriques avec les autres données disponibles, complétées par des contrôles de terrain, permettra la réalisation de nouvelles cartes renseignant la géologie de surface. À terme, les travaux porteront sur la recherche d'une information continue et objective rendant compte de la géométrie en 3D des objets géologiques de surface, de leur relation géométrique, leur mode de mise en place et si possible de leur paramétrage.



Carte géologique de la Sologne à 1/50 000.
Geological map of the Sologne region at 1:50,000 scale. © BRGM.



Carte des familles spectrales. Classification ascendante hiérarchique sur données radiométriques aéroportées U, K et Th.
Map of spectral families. Classification by order of increasing importance based on airborne radiometric data for U, K and Th. © BRGM.

(1) – Régolithe : ensemble des formations géologiques affleurantes à sub-affleurantes dont la genèse ou les propriétés actuelles résultent de processus supergènes (interaction entre la lithosphère et l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère), quel qu'en soit l'âge. Il est consitué de formations autochtones (meubles ou consolidées) issues de processus d'altération supergène, d'âge variable, situées dans la frange supérieure de l'écorce terrestre et de formations allochtones qui regroupent l'ensemble des dépôts sédimentaires issus de processus de remaniement et de transport et n'ayant pas subi de diagenèse d'enfouissement.

Référence : Lacquement F., Prognon F., Prognon C., Courbouleix S., Quesnel F., Karnay G. et Thomas E. avec la collaboration de J.-P. Quinquis, P. Martin, D. Rambourg et P. Lebret (2009) – État des lieux de la connaissance cartographique du régolithe de la France métropolitaine à 1/1 000 000. BRGM/RP- 57932 - FR, 42 p., 6 fig., 1 tab, 2 pl. hors-texte, 1 CD.

La chronologie des terrasses fluviatiles fossiles de la Loire

Hélène Tissoux – Museum national d'histoire naturelle et BRGM – tissoux@mnhn.fr

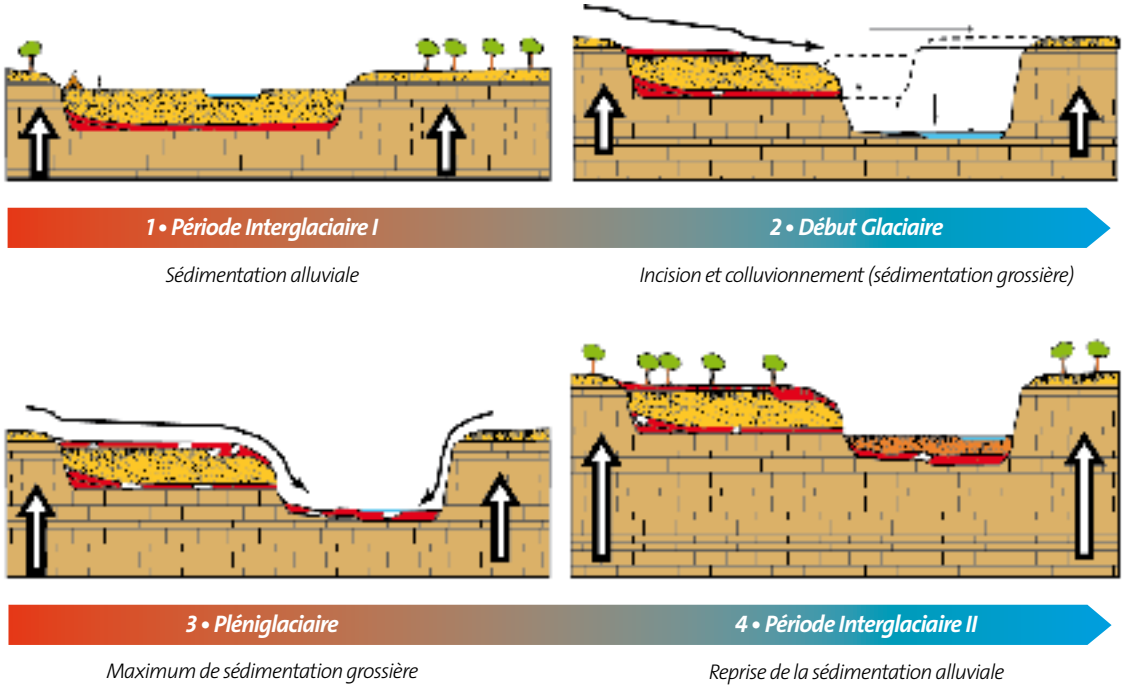


Fig. 1 : Formation des terrasses fluviatiles étagées de la vallée de la Loire au Plio-Pléistocène sous l'effet combiné du forçage climatique et d'un soulèvement tectonique global du Bassin parisien. L'enfoncement du cours d'eau entraîne la création d'un système de terrasses étagées dans lequel chacune d'elles correspond généralement à un cycle glaciaire-interglaciaire, les plus anciennes terrasses étant les plus hautes par rapport au lit actuel de la Loire.

Fig. 1: The formation of stepped fluvial terraces in the Loire Valley during the Plio-Pleistocene under the combined effects of climate forcing and a generalized tectonic uplift of the Paris Basin. The subsidence of the watercourse results in the creation of a system of stepped terraces, each step of which generally corresponds to a single glacial-interglacial cycle, the oldest ones being those highest above the present-day Loire River bed.

© H. Tissoux.

Dans le cadre des études géologiques menées sur les formations alluviales, les données chronologiques permettent d'obtenir des informations d'ordre dynamique et climatique. Connaître l'âge du dépôt des différentes terrasses d'une vallée permet ainsi d'estimer sa vitesse d'incision, les mouvements tectoniques locaux ou régionaux qui l'affectent, l'évolution spatiale et géométrique du cours d'eau ou les variations climatiques régionales.

Les premières chronologies des dépôts fluviatiles, établies au cours du XIX^{e} siècle, étaient relatives. Elles reposaient sur les principes de la stratigraphie, notamment sur la paléontologie qui permet d'élaborer une biochronologie fondée sur les successions de faunes et les fossiles directeurs. Ainsi, dès 1929, dans le bassin de la Loire moyenne, Denizot dénombra quatre terrasses fossiles dans la vallée du Loir pour lesquelles il proposa une chronologie relative à partir de leurs altitudes, de la présence des fossiles et de la succession des cultures préhistoriques rencontrées.

La mise au point de la méthode radiocarbone en 1946 marqua le début des datations dites « absolues ». Ces méthodes ont alors été appliquées à la datation des restes fossiles contenus dans les dépôts sédimentaires alluviaux ou des grains de quartz qui les constituent.

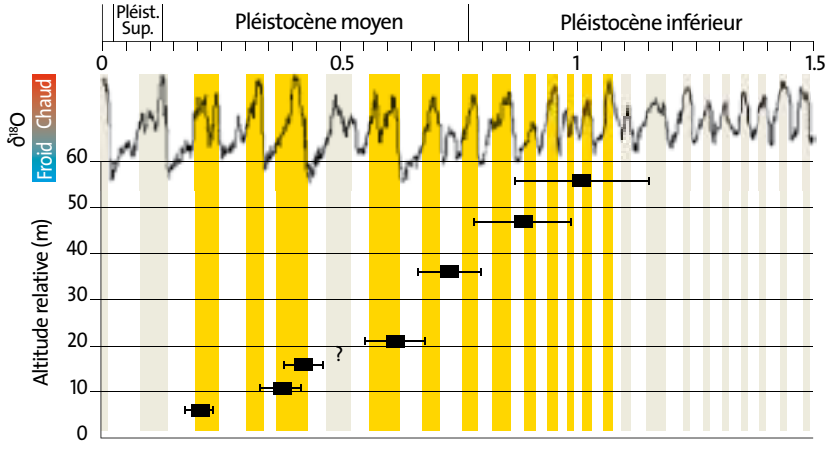


Fig. 2 : Exemple de datation de terrasses fluviatiles fossiles par résonance paramagnétique électronique et corrélation entre l'âge des dépôts et les cycles glaciaires-interglaciaires quaternaires : transect de la vallée du Loir à Pezou, au nord de Vendôme.

© Colloque Q7 – Besançon 17-19 février 2010 ; travaux en cours dans le cadre du PCR « Les premiers peuplements humains dans les formations alluviales du bassin moyen de la Loire en région Centre » MNHN - Ministère de la Culture – Région Centre. Courbe isotopique d'après Lisiecki et Raymo, 2005.

Fig 2: An example of dating of fossil fluvial terraces by Electron Paramagnetic Resonance and a correlation between the age of the deposits and Quaternary glacial-Interglacial cycles: a transect of the Loir Valley at Pezou, north of Vendôme.

© Symposium Q7 - Besançon, 17-19 February 2010; work in progress within the framework research programme "The earliest human populations in the alluvial formations of the middle Loire basin in the Centre region" MNHN - Ministry for Culture - Centre region. Isotopic curve after Lisiecki and Raymo, 2005.

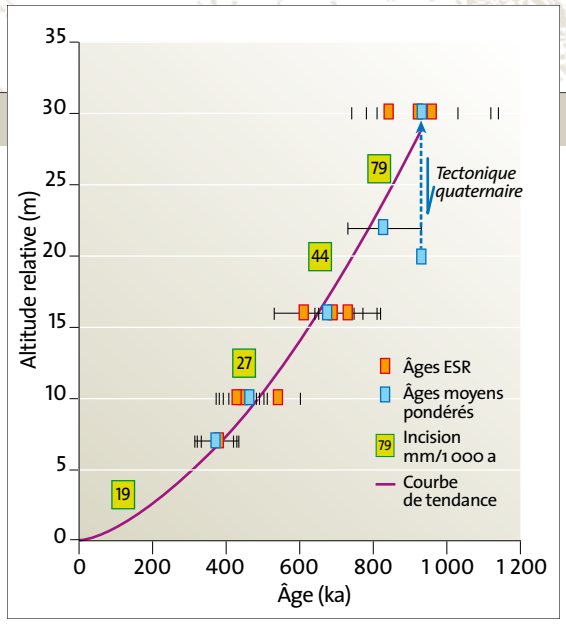


Fig. 3 : Distribution des âges ESR obtenus en fonction de l'altitude relative de différents témoins de nappes alluviales fossiles échantillonnés dans la vallée du Cher en aval de Vierzon. Des vitesses d'incision moyennes en sont déduites.

D'après Despriée *et al.*, 2003 ; Voinchet *et al.*, 2010 et les travaux en cours dans le cadre du PCR « Les premiers peuplements humains dans les formations alluviales du bassin moyen de la Loire en région Centre » MNHN - Ministère de la Culture – Région Centre, avec l'aimable autorisation des auteurs.

Fig. 3: Distribution of Electron Spin Resonance ages versus the relative altitudes of different witnesses of fossil aquifers sampled in the Cher Valley downstream from Vierzon. Mean incision rates are deduced.

From Despriée *et al.*, 2003; Voinchet et al., 2010 ; and work in progress within the framework research programme "The earliest human populations in the alluvial formations of the middle Loire basin in the Centre region" MNHN - Ministry for Culture - Centre region.

Parmi elles, la méthode de la Résonance Paramagnétique Électronique (ESR) est particulièrement adaptée à la datation des systèmes de terrasses, car son domaine d'application couvre plusieurs millions d'années. Elle est basée sur l'accumulation, au sein du réseau cristallin du quartz, de défauts créés par la radioactivité naturelle au cours du temps. Son utilisation dans différents affluents de la Loire a permis de distinguer et de dater une dizaine de nappes dont les âges couvrent l'ensemble du Quaternaire et sont bien corrélés aux cycles climatiques *(figures 1, 2 et 3)*. La chronologie de ces enregistrements quaternaires est similaire à celles d'autres systèmes du bassin anglo-parisien, tels que la Somme ou la Tamise. Cette méthode appliquée au système fluviatile de la Loire sur les nappes repérées en bordure nord de la Sologne, permettra de retracer les grandes étapes de la mise en place complexe du fleuve actuel.

Bibliographie : J. Despriée, P. Voinchet, J.J. Bahain, H. Tissoux, C. Falguères, J. Dépont and J.-M. Dolo (2007) – Les nappes alluviales pléistocènes de la vallée moyenne du Cher (région centre, France) : contexte morphosédimentaire, chronologie ESR et Préhistoire : premiers résultats. Quaternaire 18(4) 349-368. **P. Voinchet, J. Despriée, H. Tissoux, C. Falguères, J.-J. Bahain, R. Gageonnet and J.-M. Dolo (2010)** – ESR chronology of alluvial deposits and first human settlements of the middle Loire basin (Region Centre, France). Quaternary Geochronology 5 (2-3), 381-384.

Au Paléozoïque

L'orogenèse varisque ou hercynienne (-540 à -280 Ma) a abouti à la construction d'une imposante chaîne de montagnes qui occupait une grande partie de l'actuelle Europe de l'Ouest. À la fin du Paléozoïque, ces montagnes ont été érodées, faisant affleurer leurs racines constituées d'une épaisse série de roches métamorphiques (gneiss, micaschistes...) recoupées par des intrusions plutoniques (granites...). Ces roches affleurent aujourd'hui dans les massifs armoricain et central et se prolongent sous le bassin sédimentaire de Paris.

Au Mésozoïque

À partir de -250 Ma, la mer envahit progressivement la région. Ce phénomène traduit l'enfoncement (la subsidence) de la lithosphère varisque et conduit au dépôt d'une puissante série sédimentaire de plus de 3 000 mètres dont on retrouve les vestiges dans l'actuel bassin de Paris. La sédimentation, bien qu'active depuis plus de 250 Ma, y est très discontinue. L'eustatisme (variations du niveau de la mer) et la tectonique expliquent en partie la succession d'incursions (transgressions) et de retraits (régressions) enregistrée par la série sédimentaire du bassin.

Au Cénozoïque

La surrection des Pyrénées, puis celle des Alpes viennent perturber cette sédimentation et induisent le soulèvement et l'érosion d'une grande part des sédiments déposés dans le bassin. Elle est aussi accompagnée par la création de deux bassins d'effondrement nord-sud et dont la formation a été poursuivie par l'édification de volcans sur les plateaux du Massif central. Appelées Limagnes, ces bassins sédimentaires se sont formés à l'Oligocène et ont des profondeurs pouvant atteindre 2 500 mètres.

Arrêtons-nous un instant sur la formation de ces Limagnes et du volcanisme qui les accompagne. Au début de l'Oligocène, il y a 34 Ma, le Massif central était pour l'essentiel un plateau à très faible altitude. À l'Oligocène, des contraintes en extension provoquèrent la formation de failles normales et l'individualisation de bassins qui furent très rapidement occupés par des lacs avec quelques incursions marines. Au fur et à mesure de leur enfoncement, ces lacs se comblèrent de sédiments sableux, en périphérie, et plus marneux au centre. Cette période d'affaissement s'achève avec la fin de l'Oligocène et le comblement des derniers lacs au début du Miocène, il y a 20 Ma. Le volcanisme s'installe alors sur l'ensemble de l'Auvergne et affecte aussi les Limagnes. L'essentiel du

volcanisme se produit depuis 15 Ma, après la formation des Limagnes. Ce volcanisme est contemporain d'un soulèvement généralisé du Massif central de près de 1 000 mètres au sud qui se traduit par une importante érosion des remplissages sédimentaires des bassins d'effondrement (rifts) et la mise en évidence topographique des épaulements des rifts. C'est ainsi que le plateau basaltique de Gergovie, près de Clermont-Ferrand, domine de près de 400 mètres le cours actuel de l'Allier. La morphologie du bassin versant de la Loire orienté nord-sud puis est-ouest et la dissymétrie de la Loire au sein de son bassin est le résultat direct de la création des grands fossés oligocènes (Limagnes) et de cette surrection récente du Massif central.

Au début du Cénozoïque, le bassin de Paris voit la naissance d'une mer épicontinentale qui va subir de nombreuses incursions marines successives. Le bassin de Paris devient continental il y a 20 Ma avec la formation d'un grand lac dans lequel se dépose le calcaire de Beauce. À l'ouest, au Miocène (15 Ma), un bras de mer envahit un étroit sillon dont les limites géographiques préfigurent la vallée de la Loire de Nantes à Blois. C'est dans ce contexte que se déposent les faluns de Touraine avec leur extraordinaire richesse en fossiles.
La période récente, le Quaternaire, a été marquée dans le monde par des phases de glaciation qui ont provoqué à chaque fois un abaissement du niveau marin et favorisé une reprise de l'érosion, le rajeunissement des reliefs et le creusement des vallées. Les dépôts fluviatiles associés aux transferts de matériaux érodés sont alors déposés puis partiellement érodés et préservés au niveau de terrasses perchées *(encadré p. 18)*.

La Loire et ses alluvions

La Loire, comme tous les fleuves, est le collecteur de l'eau de pluie qui tombe sur son bassin versant. Cet écoulement permet l'érosion, le transport et le dépôt de sédiments de l'amont vers l'aval en fonction de la pente, de la granulométrie des éléments transportés, du débit d'eau et de la charge solide. L'étude des dépôts et des figures d'érosion permet de reconstituer l'histoire géologique du fleuve.

Le profil longitudinal de la Loire dessine une concavité relativement régulière. Quelques irrégularités peuvent être expliquées par les variations lithologiques et structurales rencontrées par le parcours de la Loire *(figure 3)*. L'incision verticale est maximum à l'amont. À 60 km de la source elle atteint environ 300 mètres, 150 à 100 mètres dans le bassin de Roanne et diminue vers l'aval : 75 mètres dans la cuvette bourbonnaise et 60 mètres en Sologne. Elle est du même ordre dans les roches cristallines du socle et dans les terrains sédimentaires des Limagnes. Par contre, la largeur des vallées dépend beaucoup de la nature des roches : gorges étroites sans terrasses conservées sur le socle et larges vallées avec système complexe de terrasses dans les zones sédimentaires. L'incision amont a pu être datée grâce aux coulées volcaniques. Ainsi la vallée de l'Alagnon – un affluent de l'Allier – s'est encaissée de plus de 200 mètres depuis la mise en place d'une coulée de basanite datée a plus de 5 Ma, soit une vitesse d'incision de l'ordre de 0,04 mm/an. La prise en compte de l'ensemble des données chronologiques permet d'affiner les rythmes et les vitesses d'incision des différents secteurs du bassin de la Loire [Larue (2003)].

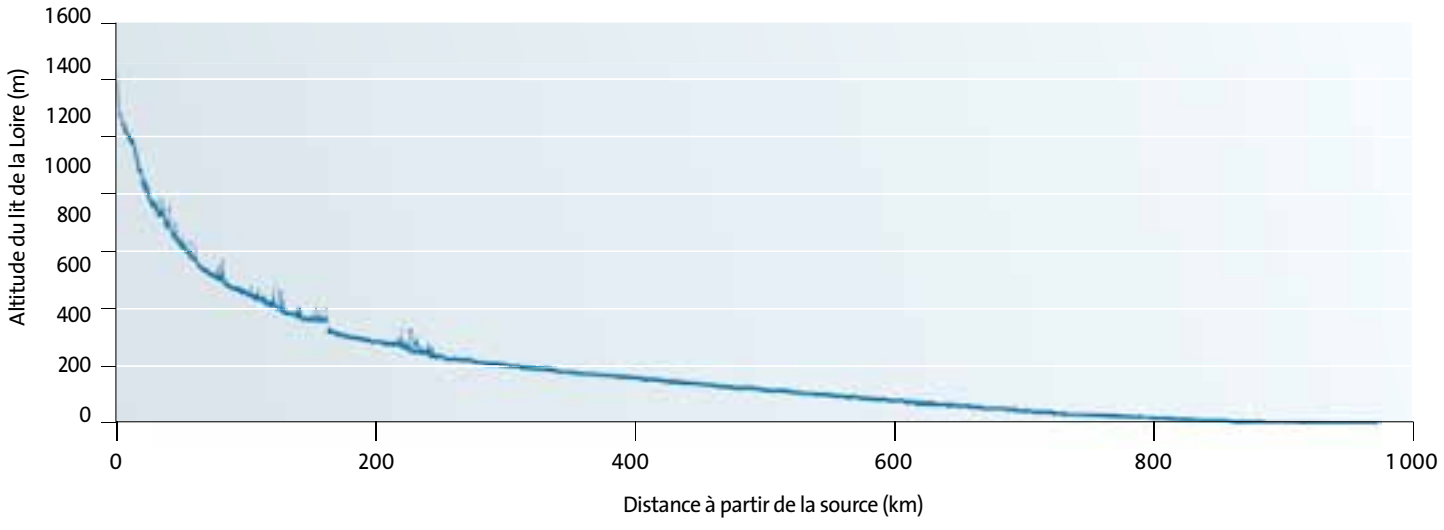
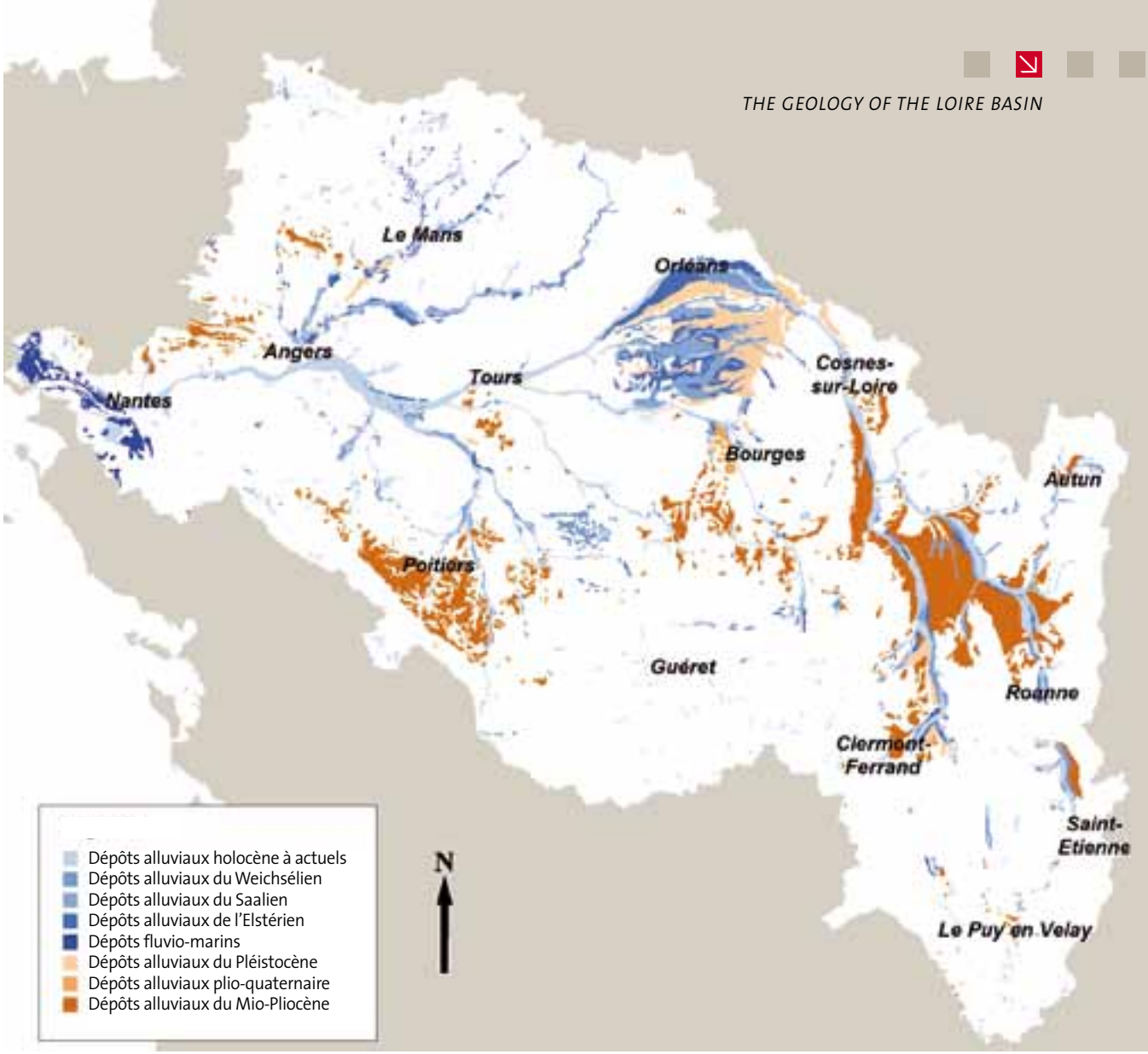


Fig. 3 : Profil longitudinal de la Loire qui montre la concavité relativement régulière de la source à l'estuaire.

Fig. 3: Longitudinal profile of the Loire River which shows the relatively regular concavity between the headwaters and the estuary.

© P. Nehlig.



La vallée de la Loire n'est pas seulement une forme d'érosion car elle stocke aussi des sédiments. Les alluvions associées à la mise en place du réseau fluviatile sont aujourd'hui bien cartographiées *(figure 4)* mais leur âge est souvent mal contraint *(encadré p. 18)* et l'histoire des sables dits de Lozère, de Sologne et du Bourbonnais reste controversée [Tourenq et Pomerol (1995) ; Larue et Etienne, (2002)].

Au Miocène supérieur, une paléo-Loire s'écoulait vers le centre du bassin de Paris et y a déposé les sables de Lozère (dans l'Essonne) dont l'âge reste discuté. À partir du Burdigalien inférieur (vers 20 Ma) il semble que les bassins de la Loire et de la Seine aient pu évoluer séparément. Se déposent alors les sables de Sologne et les sables du Bourbonnais ; la partie médiane de ces derniers renferme des ponces à quartz du Mont-Dore datées à 3 Ma. Le sommet des sables du Bourbonnais est raviné par le « Fleuve à augite », une formation riche en augite (pyroxène) d'origine volcanique datée à 1,75 Ma et dont on retrouve des éléments dans le bassin de la Seine suggérant une possible connexion quaternaire entre la Loire et la Seine. En effet, certaines études paléogéographiques suggèrent qu'au Pleistocène, la paléo-Loire coulait vers le Nord et rejoignait la Seine alors qu'un autre fleuve – la Loire Atlantique – prenait sa source vers Gien et s'écoulait ensuite vers l'ouest en suivant approximativement le lit actuel de la Loire [Tourenq et Pomerol (1995)]. Par la suite, la surrection de l'axe NO-SE, allant des collines du Perche au Morvan, aurait entraîné la capture de la paléo-Loire ou Loire séquanaise (Loire-Seine) par la Loire Atlantique, produisant ainsi la Loire actuelle. Le lit de la Loire séquanaise serait aujourd'hui occupé par le Loing. Larue et Etienne (2002) remettent en question cette jonction pléistocène entre les deux fleuves.

Au Quaternaire, des âges absolus obtenus à partir de datations par Résonnance Paramagnétique Électronique sur quartz détritiques contenus dans les sédiments fluviatiles ont permis d'affiner la chronologie de mise en place des terrasses alluviales quaternaires. Elles conduisent à mettre en évidence la présence d'un grand nombre de terrasses étagées, formées à intervalle régulier pendant le dernier million d'années *(encadré p. 18)*.

Fig. 4 : Carte des alluvions du bassin de la Loire. La carte montre que près d'un cinquième de la surface du bassin de la Loire est occupé par des alluvions qui se sont mises en place depuis le Miocène.

Fig. 4: Map of alluvial deposits in the Loire Basin. The map shows that virtually one-fifth of the surface area of the Loire Basin is covered with alluvial deposits laid down since the Miocene.

© F. Lacquement, BRGM.

Des vallées de la Loire sous la mer

Isabelle Thinon – BRGM, Service Géologie – i.thinon@brgm.fr
Jean-Noël Proust – OSUR-CAREN, CNRS-Université de Rennes – Jean-Noel.Proust@univ-rennes1.fr
Fabien Paquet – BRGM, Service Géologie – f.paquet@brgm.fr

Fig. 1 : Morphologie actuelle du *substratum* antéquaternaire du plateau au large de la Loire (Thinon *et al.*, 2008) et réseaux des vallées de la Loire et de la Vilaine.

Modifié d'après Cressard & Augris, 1976 et Menier, 2004.

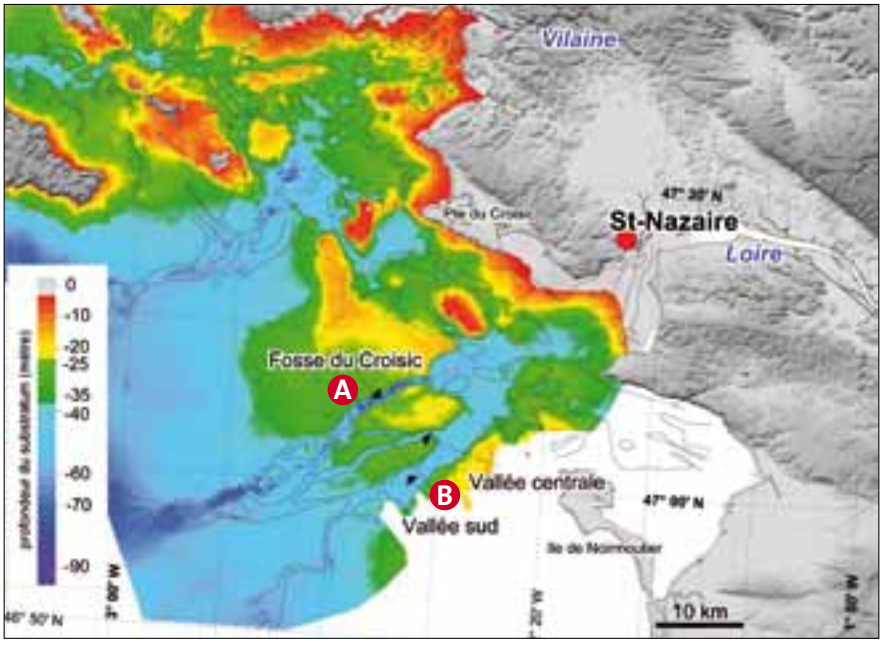
Fig. 1: Present-day morphology of the substratum *of the plateau offshore from the Loire River (Thinon* et al.*, 2008) and networks of the Loire and the Vilaine Valleys.*

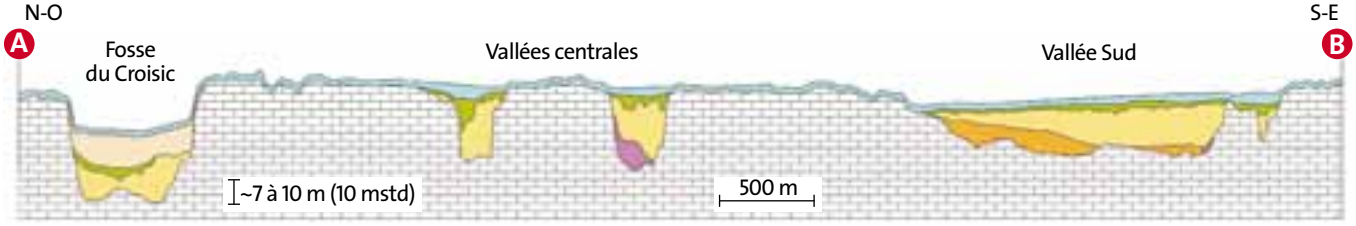
Modified from Cressard & Augris, 1976 and Menier, 2004.

Un réseau de vallées incisées a été mis en évidence sur le plateau continental au large de l'estuaire de la Loire dès les années 1960. Il résulte de l'incision par la Loire du *substratum* calcaire éocène émergé, lorsqu'elle rejoignait les littoraux des bas niveaux marins successifs associés aux variations glacio-eustatiques du Quaternaire (~ -100 m). La cartographie du réseau [Thinon *et al.* (2008)] ainsi que la distribution de son remplissage sédimentaire [Proust *et al.* (2010)] ont été obtenues à partir de l'interprétation de données sismiques.

Le réseau est constitué de trois vallées principales d'environ 30 km de long, 0,7 à 4 km de large et 60 mètres de profondeur qui disparaissent à 50 km de la côte actuelle *(figure 1)*. Les vallées sont entièrement comblées par les sédiments, excepté la Fosse du Croisic *(figure 2)*. Le remplissage sédimentaire se compose de plusieurs unités d'âge supposé pléistocène à holocène, regroupées en deux ensembles principaux séparés par une surface majeure [Proust *et al.* (2010)]. L'ensemble inférieur (d'âge cromérien-eémien) correspondrait à une alternance de sédiments fluviatiles et marins, témoins des variations du niveau de la mer. L'ensemble supérieur (d'âge weichsélien–holocène) serait essentiellement marin.

Ces vallées incisées, actuellement immergées, se seraient formées suite à la réorientation du cours inférieur du fleuve Loire et de sa séparation de la Vilaine au Cromérien, entre 0,8 et 0,4 Ma.





- Silts et argiles de milieu marin ouvert (Holocène)
- Sables fins et silts marins restreints à estuariens (Pléistocène supérieur)
- Sables grossiers et fins à chenaux méandriformes (Pléistocène supérieur)
- Sables fins et silts marins restreints à estuariens (Pléistocène moyen)
- Sables grossiers à chenaux en tresse (Pléistocène moyen)
- Conglomérat et sables grossiers de pente (Pléistocène inférieur - moyen ?)
- *Substratum* gréso-carbonaté des vallées (Éocène)

Fig. 2 : Coupe (AB Fig. 1) au travers d'une paléo-Loire imageant la géométrie des unités du remplissage sédimentaire (modifié d'après Proust *et al.*, 2010).

Fig. 2: A cross-section (AB Fig. 1) cutting across the paleo-Loire which provides an image of the geometry of sedimentary fill units (modified from Proust et al.*, 2010).*

Bibliographie : **Cressard A.-P. & Augris C. (1976)** – Recherche de granulats marins pour l'approvisionnement de la Bretagne. Les gisements du Sud de la Bretagne. Ifremer. **Menier D. (2004)** – Morphologie et remplissage des vallées fossiles sud-armoricaines : apport de la stratigraphie sismique. Doctorat. Univ. Rennes 1. Mémoires Géosciences Rennes 110, p. 202 **Proust J.-N., Renault M., Guennoc P., Thinon I. (2010)** – Sedimentary architecture of the Loire River drowned valleys of the French Atlantic shelf. BSGF., 2010, t. 181, n 2, p. 129-149. **Thinon I., Menier D., Guennoc P., Proust J.-N. (2008)** – Carte géologique à 1/250 000 de la marge continentale, feuille Lorient. Coordinateurs : J.-N. Proust & P. Guennoc, Co-édition BRGM– CNRS.

À l'échelle du dernier siècle, les mouvements verticaux ont été évalués par Delfau et Lenôtre (1992) qui ont comparé les différences d'altitude de repères communs aux nivellements NGF (mesurés entre 1884 et 1900) et IGN (entre 1964 et 1985) du Massif central et du Bassin de Paris. Les différences mesurées indiquent que certaines zones sont en subsidence (Touraine, Berry, Poitou, Gâtinais ; elle dépasse 0,75 mm/an dans le Sancerrois) et d'autres en surrection (le Massif central avec plus de 2 mm/an dans le Velay et plus de 0,75 mm/an dans la région de Moulins). Ces déformations contrôlent certainement en partie la dynamique fluviale actuelle.

Mais ces données sont à comparer avec l'incision subactuelle du lit mineur de la Loire. En un siècle elle est de plus de 2 mètres au Bec d'Allier, 1,5 mètre à Orléans. Cette incision semble être liée pour l'essentiel [Garcin *et al.* (2006)] à la construction des digues de la Loire depuis plus de 500 ans, qui ont eu pour effet d'augmenter la pente du fleuve et donc sa capacité érosive.

Les principales causes responsables de la succession d'incisions et d'accumulations observées dans le bassin de la Loire sont connues : la tectonique (déformations verticales de la lithosphère terrestre), l'eustatisme (changement de volume des bassins océaniques par le jeu de la tectonique des plaques), et le climat (glaciations et variation de la température moyenne de la Terre provoquant une dilatation ou un rétrécissement des volumes d'eau dans les océans). Toutefois, la part de chacune d'entre elles en un point donné du Bassin de la Loire est souvent délicate à évaluer. Les variations de niveau de la mer associées aux glaciations quaternaires ne semblent pas avoir eu d'effet à l'amont d'Angers. La tectonique et le climat jouent donc le rôle principal dans le Massif central et le sud du Bassin de Paris. Si les cycles climatiques du quaternaire ont été invoqués pour expliquer la succession d'incisions et d'accumulations alluviales à l'origine des terrasses, ils n'expliquent pas l'approfondissement progressif des vallées au cours du Quaternaire pour lequel il est nécessaire d'invoquer un soulèvement régulier du socle et donc des causes tectoniques. L'origine de ce soulèvement reste débattue : causes profondes (convections dans le manteau) ou latérales (surrection des Alpes et flexure lithosphérique de l'avant-pays alpin).

Aujourd'hui et demain

On pourrait croire que les paysages de la Loire sont aujourd'hui figés. Il n'en est rien. La géologie nous apprend que les reliefs naissent, vivent et meurent. Mais leur mouvement est généralement imperceptible à l'œil nu car généralement inférieur à un millimètre par an, ce qui est bien faible. Mais à l'échelle du million d'années il en va tout autrement. Un déplacement de 0,5 mm par an équivaut à 500 mètres en un million d'années. Aujourd'hui encore, des portions entières du bassin de la Loire sont en surrection alors que d'autres s'affaissent. Ces mouvements entretiennent des reliefs sur lesquels agissent les agents érosifs.

N'oublions pas qu'il y a 18 000 ans à peine, alors que la grotte de Lascaux était déjà peinte, le niveau des mers se situait plus de 100 mètres plus bas qu'actuellement et la Loire rejoignait la mer à plusieurs dizaines de kilomètres des côtes actuelles *(encadré p. 22)*. En ce temps-là, le volcanisme de la chaîne des Puys était toujours actif. Plus près de nous, la pression démographique aux siècles derniers a eu pour corollaire un défrichage et une importante mise en culture des terrains du bassin de la Loire. Depuis lors, l'exode rural a entraîné une reforestation de beaucoup de ces versants autrefois pelés. Ces changements de pratique d'exploitation des sols ont mis en mouvement ou bloqués ailleurs d'importants stocks sédimentaires. Le réchauffement annoncé du climat, la poursuite de la montée des eaux, la croissance démographique et une pression accrue sur les ressources en eau, les géoressources minérales et énergétiques posent aujourd'hui de sérieux défis qui nécessitent une meilleure compréhension des processus géologiques superficiels et des dépôts géologiques associés pour le développement durable du bassin de la Loire.

Remerciements : *L'auteur remercie Frédéric Lacquement, José Perrin, François Prognon, Sétareh Rad, Damien Rambourg, Isabelle Thinon, Hélène Tissoux, Carol Zammit, pour leur collaboration à la réalisation de cette publication.*

The Geology of the Loire Basin

The Loire looks as if it were an unchanging landscape. Yet geologic history belies the fact. The construction of the mosaic of rocks and landscapes that make up the Loire Basin began over 500 Ma ago and still goes on today. This history begins with the uplift of an imposing mountain range.
By the end of the Paleozoic era, these mountains had been worn down, exposing their roots made up of a thick series of metamorphic rocks (gneiss, mica schist...) cut through by plutonic injections (granite...). These rocks outcrop today in the Armorican Massif and the Massif Central and extend beneath the sedimentary basin of Paris. During the Mesozoic era, starting with -250 Ma, a subsidence of the lithosphere results in the deposition of a heavy sedimentary series more than 3 000 mètres thick, remains of which are to be found today in the Paris basin. The sedimentation process, although ongoing over more than 250 Ma, is intermittent. Eustasy, variations in sea level, as well as tectonics partially account for the successive episodes of incursion and withdrawal recorded in the basin's sedimentary series. The opening of the Bay of Biscay, the surrection of the Pyrenees and of the Alps occur, disturbing this sedimentation, and lead to the uplift and ensuing erosion of a major part of the sediments laid down in the basin. These events are attended by the creation of the Limagnes region and continue with the edification of volcanoes on the uplands of the Massif Central. Recent geologic history is marked by the deposit, followed by the erosion, of great thicknesses of alluvial materials the ages of which are still subject to debate. Recently acquired geophysical, geological and geochronological data are shedding light on the recent geologic history of these deposits and accordingly of the paleo-Loire Rivers that laid them down.

Bibliographie : **Bouchardy Ch. (2002)** – La Loire, Vallées et vals du grand fleuve sauvage. Ed Delachaux et Niestlé. 288p. **Delfau M. et Lenôtre N. (1992)** – Mouvements verticaux actuels dans le Massif central et le sud du Bassin parisien. Comparaisons de nivellements. Rapports BRGM R35411 SGN/GEO92 35 p. **Garcin M. *et al.* (2006)** – Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. In l'érosion entre société, climat et paléoenvironnement. Ed Allée et Lespez Ed., p. 225-236. **Larue J.-P. et Etienne R. (2002)** – Les sables de Lozère et les sables de Sologne : nouvelles interprétations de deux décharges détritiques du Miocène inférieur, issues de la paléo Loire (Bassin parisien, France). Bull. Soc. Géol. France, 173, p. 185-192. **Larue J.-P. (2003)** – L'encaissement de l'Allier et de la Loire supérieure et moyenne (France) au Pliocène et au Pléistocène. Géomorphologie : relief, processus, environnement. N°3, p. 135-150. **Tourenq J. et Pomerol C. (1995)** – Mise en évidence par la présence d'augite du Massif central, de l'existence d'une pré-Loire-pré-Seine coulant vers la Manche au Pléistocène. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris), 320, 2A, p. 1163-1169.