PSDR4 TIP TOP - Un outil sur les paysages agricoles, l'eau et la transition agroécologique

Trévisan D.[1,2], Janin C.[3], Taillandier P. [4,5,6], Sarrazin B.[7]

[1] INRAE UMR Carrtel, 75 avenue de Corzent, BP 511, F-74203 Thonon les bains

[2] INRAE UMR iEES, 4 place Jussieu, F-75252 Paris Cedex

[3] Université Grenoble Alpes UMR Pacte, 14 bis Avenue Marie Reynoard, F-38000 Grenoble

[4] INRAE UR MIAT, Toulouse, France

[5] IRD/SU UMI UMMISCO, Hanoi, Vietnam

[6] Thuyloi WARM, Hanoi, Vietnam

[7] ISARA, Unité Agroécologie et Environnement, 23 rue Baldassini, F-69364 Lyon cedex 07

Correspondance : dominique.trevisan@inrae.fr

Résumé

Cet article concerne les résultats acquis par le projet TIP TOP du Programme PSDR4. Il a eu pour ambition de documenter les paysages agricoles pour rendre compte d'éco-fonctionnalités liées aux écoulements d'eau, telles la fermeture du grand cycle de l'eau, la valorisation des éléments nutritifs et la protection des sols, des ressources en eau et des zones humides. Un aperçu de l'interface OPALE (OPerational Assesment of Landscape Ecofonctionnalities), développée dans cet objectif, est présenté, incluant les principes essentiels des modèles constitutifs. Il s'agit d'abord d'une construction collective, avec un module relatif à la fabrique du paysage par les exploitations, en lien avec les règles de décision et contraintes d'agriculteurs éleveurs, céréaliers ou maraîchers. On décrit ensuite le fonctionnement paysager par le biais de fonctions relatives: (i) aux pressions exercées par les activités agricoles sur le paysage-bassin versant et (ii) à leur transfert vers le réseau hydrographique par des techniques de traçage particulaire. Divers exemples illustrent les étapes du diagnostic opéré par OPALE et ses mises en perspective dans le cadre de simulations prospectives portant sur de nouvelles dynamiques agricoles ou de nouvelles configurations des structures et mosaïques paysagères.

Mots-clés : Systèmes agricoles, Règles de décision, Paysages agricoles, Hydrologie des bassins versants, Agroécologie.

Abstract: PSDR4 TIP TOP - A tool on agricultural landscapes, water and agroecological transition

The present article concerns the results acquired by the TIP TOP project of PSDR4 program. The ambition was to document agricultural landscapes to account for their water related eco-functionalities, such as the closure of the large water cycle, nutrient recovery, protection of soils, water resources and wetlands. We present an overview of the OPALE (OPerational Assesment of Landscape Ecofonctionnalities) interface developed for this purpose giving the principles of the constitutive models. In particular, we were involved, through collective participation, in the production of a module related to the construction of the landscape by farms, depending on the decision-making rules and constraints of farmers involved in breeding or crops or vegetable production. We then propose a description of the functioning of the landscape by means of functions related to: (i) the pressures exerted by agricultural activities on the landscape-watershed and; (ii) their transfer to the hydrographic network, evaluated by means of particle tracking techniques. Various examples illustrate the steps of the diagnostic carried out by OPALE and its usefulness for prospective simulations related to new agricultural dynamics or new configurations of landscape structures and mosaics.

Keywords: Farming systems, Decision rules, Agricultural landscapes, Crop management, Hydrological processes, Agroecology

Introduction

La transition agroécologique des exploitations agricoles a pour ambition de résoudre les défis actuels de la production agricole (Wezel et al., 2009 ; Hatt et al., 2018). Elle appelle des innovations à l'échelle de la parcelle et du paysage pour accroître les interactions entre les communautés végétales, animales et de micro-organismes. Les principaux défis sont certes de promouvoir des systèmes de production sur une base écologique tenant compte des activités économiques, des cycles biogéochimiques et des processus biologiques (Gascuel-Odoux et Magda, 2015), mais aussi de définir de nouvelles organisations des espaces agricoles valorisant les fonctionnalités écologiques des paysages (Poggi et al., 2021).

Les paysages agricoles peuvent être considérés comme des macro-écosystèmes résultant d'interactions entre la société humaine et des processus biophysiques, constituant « le miroir des relations passées et présentes entre les êtres humains et la nature environnante », (Vanier, 1995). Le paysage résulte d'arrangements spatiaux de divers éléments (champs agricoles, éléments urbains, forestiers ou semi-naturels tels que haies, bandes enherbées, fossés) et de flux opérant à différentes échelles temporelles et spatiales. Certains d'entre eux sont contrôlés par les activités humaines (flux d'énergie, de fertilisants, d'effluents agricoles, flux provoqués par les déplacements de troupeaux, etc.), d'autres sont inhérents au contexte biophysique (gravité, équilibres de phase).

Du fait de ces mouvements, un certain nombre d'enjeux méritent d'être analysés à l'échelle fine du paysage, comme par exemple la gestion des sols et la protection des ressources naturelles, la fermeture des cycles de l'eau et des nutriments, la maîtrise des contaminants, etc. Il s'agit ici d'innover en proposant des alternatives portant sur la reconfiguration des espaces, articulant entre eux des fonctions puits-sources impliqués dans la régulation des flux paysagers.

Le programme TIP TOP (Transferts diffus agricoles et Infrastructures Paysagères: modélisation participative et Optimisation agroécologique) de PSDR4 a porté l'ambition de documenter les paysages agricoles pour rendre compte de leurs éco-fonctionnalités liées aux écoulements d'eau, avec un certain nombre de questions opérationnelles : comment et en quoi le paysage joue sur les déplacements d'eau au sein des paysages et mouvements associés de solutés et de matières en suspension vivantes ou inertes ? Dans quelle mesure ces flux sont-ils organisés par les pratiques, les décisions agricoles et les enjeux des exploitations ? Quelles sont les évolutions envisageables du tissu d'exploitations ou des espaces non productifs du paysage permettant de renforcer la résilience des agro-écosystèmes : fermeture des cycles hydrologiques et des nutriments, effets tampon sur les contaminants, protection des sols, des masses d'eau et des milieux remarquables.

Si les analyses des formes paysagères et de leurs liens aux activités peuvent être outillées par nombre de méthodes opérationnelles (diagnostic territoriaux, systèmes d'indicateurs agro-environnementaux, boîtes à outils et supports méthodologiques d'accompagnement), elles restent bien souvent sectorielles et limitées pour des approches prospectives. Pertinentes pour accompagner des concertations, force est de constater qu'elles ne permettent que rarement de simuler sur une base quantitative les effets prévisibles de solutions ou de décisions possibles. Les recherches du projet TIP TOP ont pour objectif de répondre à ces besoins, avec l'élaboration de démarches et des outils d'accompagnement permettant non seulement de réfléchir à des problématiques et pistes d'action à partir d'états des lieux sur le paysage et l'eau, mais aussi de pouvoir tester des pistes de solutions. Il s'agit de fournir des données enrichies aux décideurs, sous forme de cartes et de tables interactives relatives aux flux d'eau et aux matières véhiculées par l'eau, pour leur permettre d'analyser ce qu'il est possible de proposer comme scénario de recomposition paysagère. C'est aussi de les accompagner dans un processus croisé de diagnostic et de prospective, multi-acteurs et participatif autour d'une interface informatique d'accompagnement proposant des allers retours et tests-réponses pour la mise en commun et le débat des solutions.

Loin de vouloir techniciser les processus de décision collectifs, l'idée est d'associer intelligences humaines et artificielles, analyse des formes paysagères existantes ou produites en lien avec les flux

visibles ou discrets du milieu biophysique, en traitant particulièrement ceux ayant des incidences sur les états et qualités de l'eau dépendantes des éléments qu'elle transporte.

Notre démarche de travail repose sur plusieurs constructions, avec dans un premier temps la collecte de savoirs locaux (par enquêtes, visites de terrain et ateliers d'échanges) ou construits portant sur les déterminants du paysage, avec en particulier l'analyse de travaux préalables sur les contraintes et modes d'utilisation de l'espace dans les systèmes d'élevage (Marie et al., 2016) ou les déterminants des choix d'utilisation de l'espace et de l'évolution des surfaces dans le cas du maraîchage et des grandes cultures (Taillandier et al., 2012). On a donc eu pour souci de développer un module de calcul générique - la fabrique du paysage - pour aborder un ensemble vaste de questionnements soulevés dans des contextes très différents de bassins de production agricole. Il simule la composante agricole du paysage, avec la mosaïque de situations culturales qui, associées aux surfaces et infrastructures « non productives », compose le parcellaire, structure l'espace et évolue au fil des saisons selon les objectifs du tissu d'exploitation agricoles. Lors de cette étape, notre analyse s'est appuyée sur un concept central, celui des règles de décisions en exploitation agricole. Ces dernières sont construites dans l'objectif de valoriser les ressources du territoire pour la production d'unités fourragères dans le cas de l'élevage ou d'unités de vente composant les assolements dans le cas des productions végétales.

En deuxième lieu, nous avons développé un module eau pour rendre compte des effets de la distribution et de l'évolution des biomasses fabriquées sur les circulations de l'eau, réalisant des bilans hydriques pour chacune des cellules d'un espace de calcul maillé formant bassin versant. Les choix méthodologiques tiennent compte de la diversité des processus régulant la circulation de l'eau et des liens entre organisation paysagère et trajectoires de l'eau. Cette approche permet d'évaluer les aptitudes ou contraintes du paysage à répondre aux enjeux de la transition agro-écologique dans une gamme étendue de conditions de sol et de pente. Dans cet objectif, le module eau intègre différents formalismes relatifs au développement végétal (Gérard-Marchant et al., 2006), à l'hydrologie des sources variables (mécanismes contrôlant le déclenchement de ruissellement de surface par saturation des sols, Obled et Zin, 2004), aux ruissellements de surface générés par la battance des sols (Cerdan et al., 2002), à l'évolution des nappes profondes alimentées par percolation de l'eau au travers des sols (Arnold et Fohrer, 2005) et enfin aux échanges nappes-rivière (Gurnell, 1978).

La suite du texte propose les résultats acquis par le programme. Ils se déclinent en une interface opérationnelle et ses guides d'utilisation. On donne ensuite la confrontation des résultats des modèles aux conditions réelles des assolements et surfaces fourragères des exploitations, ainsi qu'aux enregistrements de flux d'eau et d'éléments exportés par les paysages à l'échelle de bassins versants. On apporte enfin des exemples d'application montrant l'usage de l'outil par des groupes d'acteurs impliqués dans des prospectives sur leur territoire. Les simulations effectuées sont utiles pour accompagner les décisions sur des leviers potentiels de transition agroécologique, discutés et partagés par les différentes parties prenantes.

1. Principaux résultats obtenus

1.1 L'interface OPALE

OPALE (OPerationnal Assessment of Lanscape Ecofunctionalities) (Figure 1) est disponible à l'adresse https://github.com/TipTop-PSDR/OPALE. On y trouve des instructions, avec un utilitaire d'installation des exécutables et un jeu de fichiers tests. Le détail des procédures, algorithmes et calculs est donné dans Trévisan et al. (2021).

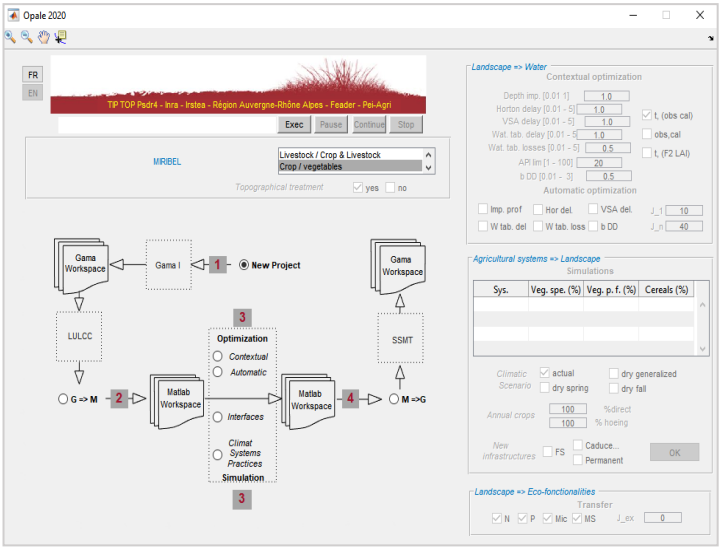


Figure 1 : Interface OPALE. Un schéma central, des boutons et plages d'entrées de données guident l'utilisateur dans les étapes du diagnostic.

Le paysage est représenté par plusieurs dynamiques (Figure 2) avec plusieurs plans et un emboitement de modèles FEMT: (i) F portant sur une fonction relative à la fabrique du paysage, entrant dans le champ des LULCC, Land Use and Land Cover Change (Ellis et Pontuis, 2007); (ii) E donnant une fonction d'élaboration d'un stock de matière (nutriments, contaminants) potentiellement mobilisable lié aux pressions exercées par les activités sur l'espace; (iii) M, relatif à une fonction de mobilisation de ce stock lors d'évènements pluvieux et; (iv) T, portant sur une fonction de transfert, décrivant les dynamiques d'exportation à l'exutoire des bassins versants.

Donnons l'exemple de l'érosion diffuse des sols d'un territoire où les surfaces de sol sensibles (sols mis à nu lors des calendriers culturaux) ont été identifiées par un modèle F. Le stock de particules de terre potentiellement exportables par le bassin versant relève d'un processus d'élaboration E, correspondant ici au détachement de particules de terre par les phénomènes de splash liés à l'impact des gouttes de pluies. Ce stock de particules détachées est collecté par des lames d'eau ruisselant à la surface des sols (mobilisation M). Selon les trajectoires d'eau, tout ou partie du stock mobilisé est transféré à l'exutoire du paysage-bassin versant. Le transfert est modulé en fonction de l'effet tampon de zones enherbées ou forestières, ou encore à la faveur de la ré infiltration des lames d'eau de ruissellement en mouvement à la surface des pentes. De nouvelles particules peuvent être générées durant leur parcours, du fait de la concentration des eaux de ruissellement et de l'incision des sols qu'elle provoque. L'ensemble de ces phénomènes est représenté par une modélisation T relative aux dynamiques puits-source.

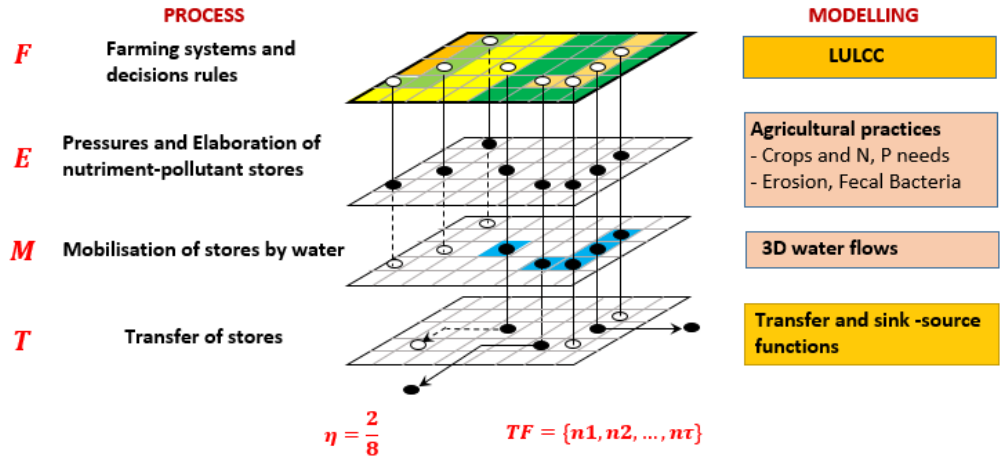


Figure 2 : Schéma d'ensemble des processus et plans de calcul analysés dans OPALE. L'espace de calcul est représenté par un domaine maillé formant bassin versant, avec des cellules unitaires de 25m x 25m.

Le plan F (Figure 2) concerne les structures et les formes du paysage, construites à partir des règles de décision et des choix opérés dans les systèmes agricoles. Ils sont modélisés dans OPALE avec des algorithmes LULCC des systèmes d'élevage ou grande culture/maraîchage. Le plan E correspond aux pressions exercées dans le paysage par les pratiques agricoles. Il est référencé via des démarches relatives aux indicateurs environnementaux (comme par exemple Territ'eau[1]). A ce titre, chaque occupation de sol est documentée en termes de besoin en éléments nutritifs, sur la base des références agronomiques du COMIFER (2013), de la sensibilité à la battance (Vansteelant et al., 1997) ou de stocks de bactéries fécales déduit des pratiques d'épandage ou des modalités de pâturage (Trévisan et al., 2002). Dans l'exemple de la Figure 2, huit pratiques critiques individualisant une unité de pression ont été identifiées, chacune représentée par un cercle noir. Le plan M fait intervenir les processus hydriques et rend compte de l'efficience des lames d'eau à mobiliser les stocks de matières disponibles au transfert. Ici cinq particules sont mobilisées. Le plan T est relatif aux phénomènes puits-sources. Il est au centre de la modélisation OPALE, générant deux indicateurs synthétiques du fonctionnement paysager: d'une part une évaluation de la résilience du paysage vis-à-vis de la perte de matière, avec la mesure de la variable η donnée par le ratio entre la quantité d'unités de pression exportées et d'unités de pression initiales (dans l'exemple de la Figure 2, la valeur est égale à 2/8); d'autre part la dynamique d'exportation *TF* des pressions exercées, mesurée via un traçage particulaire et un dénombrement jour par jour des unités de pressions arrivant à l'exutoire du paysage-bassin versant.

Les fonctions de transfert *TF* sont au cœur de la modélisation des paysages. Elles donnent les quantités de pression exportées journalièrement à l'exutoire durant une période τ. Leur intérêt est d'apporter, par les techniques de modélisation globale (Trévisan et al., 2019), une estimation des flux $\phi(t)$ de différents types de matières véhiculées par l'eau, avec $\phi(t)=u\ E(t)M(t)*TF(\tau)$, où *u* est un paramètre de conversion d'unité, *E(t)* une fonction d'élaboration donnant un stock de matière potentiellement mobilisable (pression) et *M(t)* une fonction de mobilisation du stock par un écoulement de surface, hypodermique ou profond (comprise entre 0 et 1), l'astérisque représentant par convention le produit de convolution. Il faut admettre une multitude de dynamiques de transfert, fonctions des régimes météorologiques, de l'humidité des sols et des connexions hydrologiques entre les différents compartiments du paysage (Mc Guire et al., 2005). OPALE permet l'examen des dynamiques de transfert au cours d'évènements pluvieux correspondant à un état remarquable du paysage-bassin versant. L'utilisateur peut choisir un évènement associé à une dynamique de transfert type, représentative par exemple des crues de printemps, des écoulements en périodes de récolte, de la reprise hydrologique d'automne ou encore de l'étiage hivernal.

Il existe également des transferts indépendants des contrôles puits-source assurés par les structures paysagères. C'est le cas des percolations verticales de l'eau au travers des sols, alimentant les nappes profondes. Dans ces phénomènes, les fonctions de transferts *TF* sont déterminés par les dynamiques d'exfiltration des nappes. OPALE permet leur description le cas échéant.

1.2 Fabrique du Paysage

Dans le contexte des grandes cultures et du maraîchage, les paysages changent chaque année en fonction des successions culturales et des règles de rotation. Nous nous sommes appuyés sur Houet et al. (2014) pour résoudre le problème d'allocation des cultures en construisant des graphes portant sur la succession de cultures pluriannuelles permises par les règles de rotation, puis sur une démarche d'optimisation pour sélectionner les successions favorables aux objectifs d'assolement des exploitations (Figure 3). Dans le contexte de l'élevage, nous avons développé une analyse de l'adéquation entre l'offre potentielle du parcellaire de prairie et la demande globale d'unités fourragères des troupeaux, en suivant des règles de priorité-contraintes pour l'affectation spatiale des pratiques fourragères (Marie et al., 2016).

[1] https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/territ_eau/

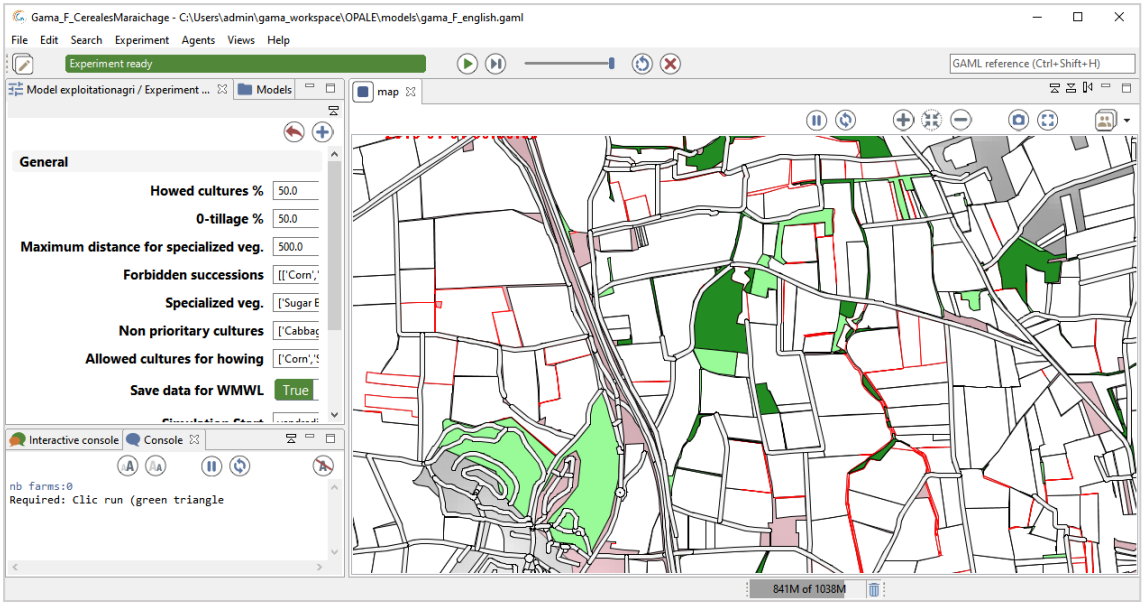


Figure 3 : OPALE, interface LULCC pour le choix de contraintes et règles de rotations des grandes cultures.

Les ratios des surfaces de culture ou de pratiques attendues et celles calculées sont centrés sur une valeur moyenne de 1 (Figure 4). Cela signifie que les paysages simulés sont assez réalistes par rapport aux besoins des exploitations. Dans le contexte du territoire d'élevage traité, quelques différences peuvent néanmoins ressortir, comme par exemple pour les pâtures P1 de proximité d'animaux productifs. Ces écarts résultent principalement de contraintes fortes posées sur les limites parcellaires, simplification qui n'autorise pas de subdiviser l'espace comme peuvent le faire les agriculteurs pour ajuster les besoins saisonniers du bétail à la production fourragère.

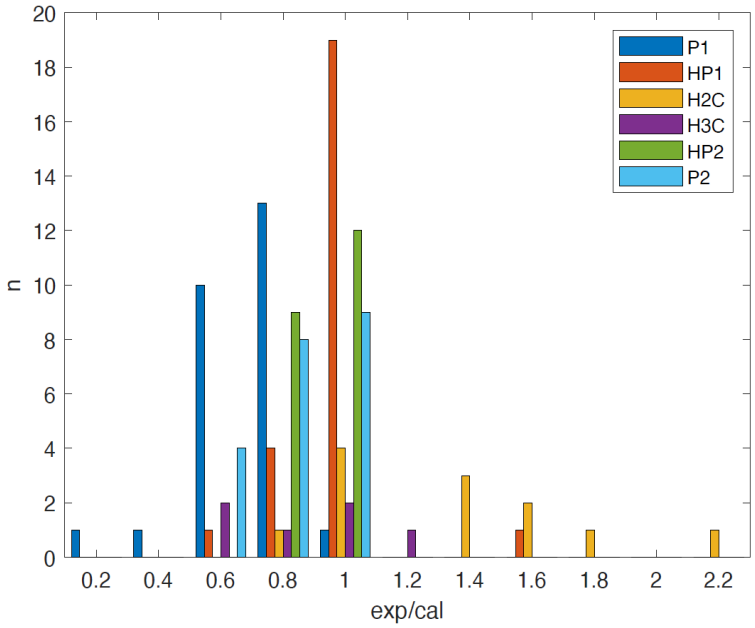


Figure 4 : Rapports entre les surfaces attendues et calculées. P1 : pâturage prioritaire ; HP1 : fauche une coupe puis pâture animaux prioritaires ; H2C : fauche deux coupes ; H3C : fauche trois coupes ou prairie temporaire ; HP2 fauche puis pâture animaux non productifs; P2 : pâturage animaux non productifs.

1.3 Flux d'eau

OPALE a été testé sur trois bassins différents très tranchés en terme de conditions pédologiques et géomorphologiques. Les flux d'eau calculés sont en bonne adéquation avec ceux observés (Figure 5). Les réponses du module eau cadrent avec les contextes étudiés, et reflètent bien leurs particularités, que ce soit l'origine du ruissellement de surface, les dynamiques des nappes ou le fonctionnement du réseau hydrographique.

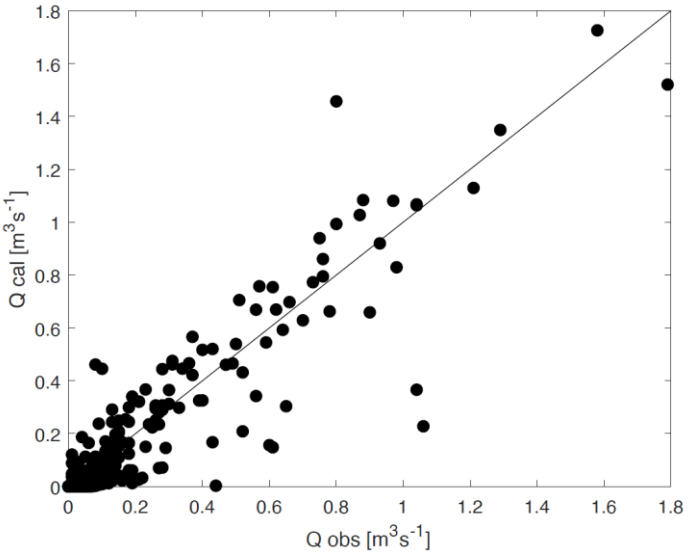


Figure 5 : Débit observé et débit calculé à l'exutoire d'un bassin versant dominé par des flux de ruissellement hortoniens.

1.4 Dynamiques de transfert

Les dynamiques de transfert d'un bassin versant de montagne sont de deux types (Figure 6). Lorsque les surfaces actives sont fortement connectées aux rivières (c'est par exemple le cas si les sols des bas-fonds sont saturés), les dynamiques sont rapides. Au contraire les transferts plus lents sont mis en évidence lorsque la restitution des matières véhiculées par les excès d'eau de surface est graduelle.

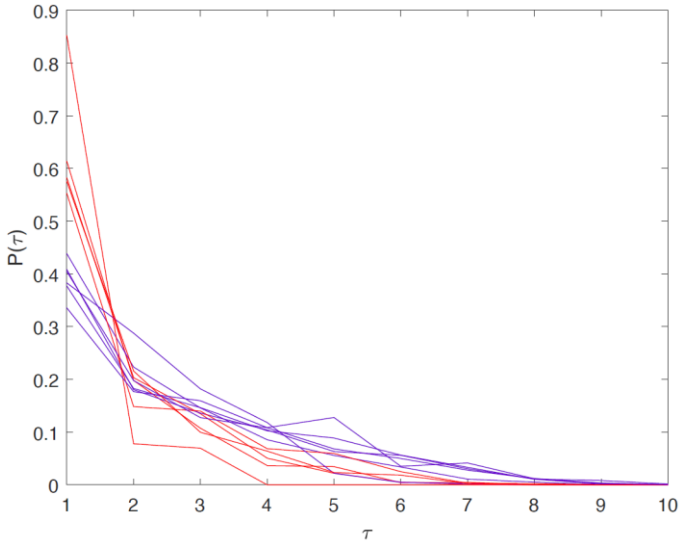


Figure 6 : Fonctions de transfert de bactéries fécales d'un paysage de montagne dominé par des systèmes d'élevage bovin. Courbes rouges : transfert rapide lié à la saturation préalable des fonds de vallée ; courbes violettes : transfert atténué par une saturation graduelle.

1.5 Flux de matière

La Figure 7 confronte les flux de matière en suspension calculés à ceux observés. Le coefficient de Nash Sutcliffe (NS) qui donne une expression non biaisée de l'adéquation des modèles (Wallach et al., 2013) est significatif (NS= 0.73). Ici *E(t)* est donné par l'extension antagoniste des surfaces battues des sols *F2(t)* et de celles *V(t)* protégées par les couverts végétaux (*E(t)= F2(t)-V(t)*), *M(t)* par la hauteur des ruissellements hortoniens. OPALE rend donc bien compte des phénomènes de battance et d'érosion des sols.

Des résultats similaires sont obtenus pour différentes matières et modalités de transfert, avec NS=0.61 pour les bactéries fécales issues des réservoirs bovins (bactéries strictement bovines, non humaines, typées par analyse biomoléculaire) à partir de zones de saturation des sols. Ici *E(t)* correspond au stock de bactéries fécales issues d'épandage ou de dépôts lors des pâturages et *M(t)* à la hauteur de ruissellement.

Pour les flux de nitrates mis en mouvement par la percolation de l'eau et transmis en solution à l'exutoire par l'exfiltration des nappes, le coefficient NS vaut 0.91 (*E(t)* est ici déduit d'un bilan azoté simplifié, *M(t)* correspondant aux volumes de percolation). NS=0.92 pour le phosphore total et 0.90 pour les matières en suspension, tous deux provenant de l'incision de l'axe d'écoulement. *E(t)* est ici donné par un indicateur combinant la longueur du réseau hydrographique actif et les chargements animaux instantanés, *M(t)* par les volumes d'exfiltration des nappes. Dans chacun de ces cas de figure c'est le facteur de conversion d'unité *u* qui permet de mettre en correspondance la nature indicative des pressions exercées aux flux observés (Trévisan et al., 2019).

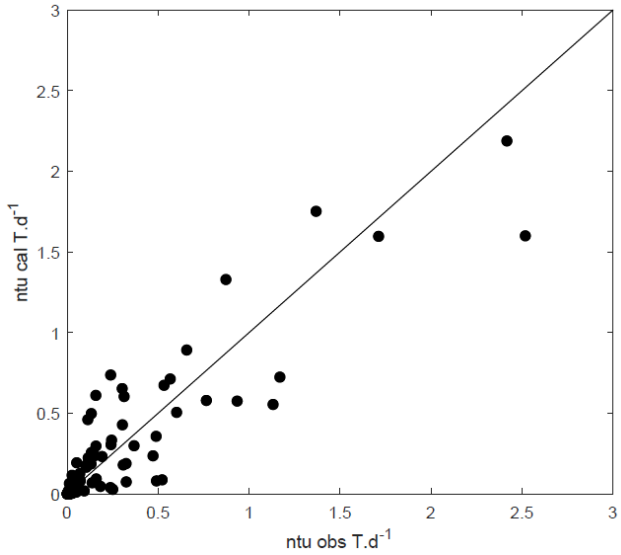


Figure 7 : Flux de matières en suspension observées et calculées.

1.6 Fonctions écosystémiques des paysages

On donne ici un exemple de cas concernant les bassins à vocation laitière où la spécialisation des systèmes de production a conduit à des paysages monotones dominés par l'herbe et où le maillage de l'espace par les interfaces paysagères est résiduel. Les éleveurs sont confrontés aux pullulations de campagnols et des contaminations des ressources en eau par des bactéries fécales d'origine bovine sont fréquentes. OPALE propose un processus itératif avec des allers retours sur des scénarios prospectifs d'évolution des paysages portant sur : (i) l'introduction de céréales à paille dans l'objectif de cloisonner les espaces et : (ii) la création d'un réseau de haies pour favoriser l'implantation des rapaces et prédateurs mais aussi pour créer des surfaces d'évaporation additionnelles à même d'isoler le réseau

hydrographique et de limiter l'extension des zones de saturation des sols et la mobilisation des stocks de bactéries fécales.

Les résultats obtenus, sont les quantités de pressions bactériennes exportées sur l'ensemble du calendrier cultural (Figure 8). Tous les scénarios testés présentent une amélioration par rapport à la situation initiale. Les meilleurs abattements sont ceux liés à la réduction des régimes pluviométriques, notamment au printemps lorsque les stocks bactériens à la surface du sol n'ont pas encore été élaborés par les pâtures. Ces scénarios s'avèrent en réalité très pénalisants pour les exploitations, avec une réduction notoire de leur autonomie fourragère. L'abattement est meilleur lorsque la proportion d'exploitations herbe-céréales à paille est augmentée de 10% (une pression supplémentaire de céréale à 20% augmente en réalité la surface de sols mis à nus, générant des flux de ruissellement hortoniens, à même de mobiliser des stocks bactériens avals). Les réseaux de haie de direction Nord Sud sont dans les conditions topographiques étudiés parallèles aux courbes de niveau. Ils interceptent donc mieux les flux de ruissellement dans leurs trajets vers les bas-fonds. L'association 10km Nord Sud et 10km Est Ouest apporterait un bon compromis en additionnant plusieurs bénéfices, tels les fonctions tampons des haies vis à vis des flux bactériens, l'ombrage qu'elles apportent aux troupeaux et leur fonction coupe-vent vis-à-vis des flux de vent dominants de la vallée étudiée.

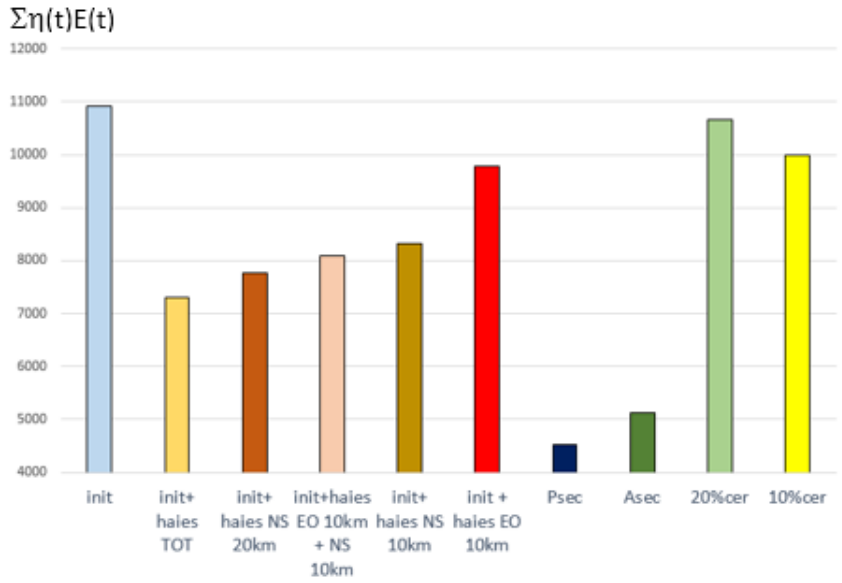


Figure 8 : Quantités annuelles de pressions bactériennes exportées. Init : état initial, Init+haies TOT : situation initiale + 20 km de haies orientées Nord Sud (NS) et 10 km de haies orientées Est Ouest (EO). Psec : scénario climatique à printemps sec ; Asec : scénario climatique à automne sec ; 20%cer : situation initiale + 20% d'exploitation sur système herbe-céréales à paille ; 10%cer : situation initiale +10% d'exploitation sur système herbe-céréale à paille.

2. Contribution au développement régional

Notre travail contribue aux enjeux de la transition agro-écologique. Nous apportons un ensemble de simulateurs, intégrés dans une interface commune pour aider à une vision systémique du paysage.

2.1 Un outil pour accompagner l'ingénierie paysagère

Les fonctions écosystémiques des interfaces paysagères sont étroitement liées à leur capacité à intercepter les flux d'eau. Le potentiel d'interception qui en résulte dépend des configurations paysagères et varie aussi selon les saisons culturales. L'ensemble induit des régulations plus ou moins forte du cycle de l'eau et des matières qu'elle véhicule (Figure 9).

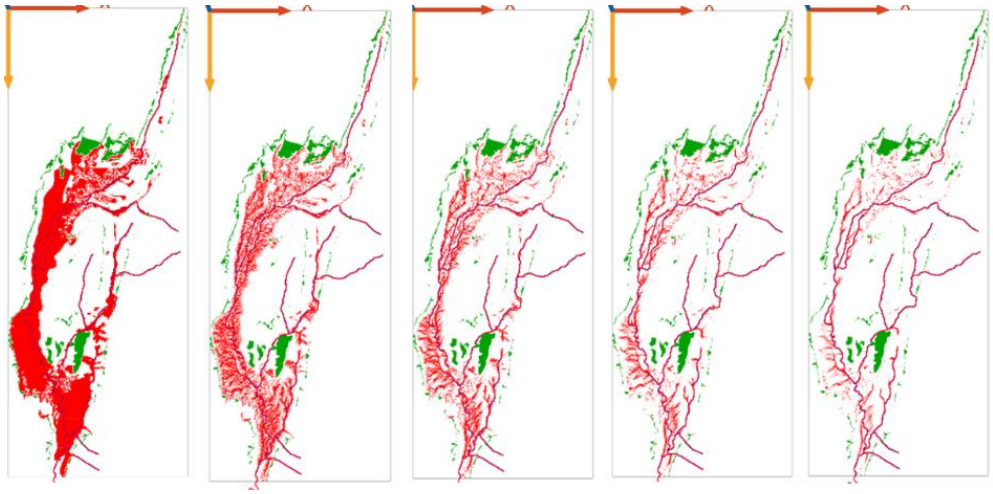


Figure 9 : Tracé de particules représentent les bactéries fécales à différents pas de temps après un événement critique printanier sur un bassin versant du Vercors.

Ainsi il se dessine progressivement des chemins préférentiels des particules en mouvement lors d'un événement météo critique. Ils constituent des couloirs de transmission entre zones émettrices de matières mobilisées et réseau hydrographique récepteur. Ces axes d'écoulement correspondent à des objets paysagers critiques que l'on peut facilement localiser avec OPALE pour mieux articuler entre elles les fonctions de régulation du paysage. Ces représentations permettent par exemple d'identifier les secteurs cibles de l'espace pour lesquels il peut y avoir compétition entre enjeux de régulation de la qualité de l'eau et d'objectifs de maintien de biodiversité, où on recherche des critères biogéochimiques précis. On voit bien que ces régulations se jouent à des échelles qui dépassent celle de la parcelle et de l'exploitation agricole, conférant de nouvelles propriétés aux agroécosystèmes. Il devient possible avec OPALE de piloter ces échelles pour la régulation et le couplage des cycles de C, P, N, les régulations biologiques et la protection des ressources naturelles.

Avec le workflow proposé par OPALE, on peut proposer plusieurs types de simulations pour finaliser un programme d'accompagnement, piloter ou argumenter sur des prospectives posées par les problématiques territoriales. On peut arrêter par exemple le diagnostic à l'étape du module Fabrique de paysage, lorsque l'intérêt ne porte que sur l'évaluation de tissus d'exploitations agricoles, sur les possibilités et contraintes de maintenir des objectifs de production, qu'ils soient fourragers pour l'alimentation animale ou organisationnels pour la conception des assolements. Les incertitudes sur ces thèmes sont en effet prégnantes, lorsque l'on doit faire face à des questions sur l'autonomie fourragère, les changements climatiques, l'agrandissement des exploitations, ou encore le recours à de nouvelles pratiques. L'interface OPALE offre la possibilité de sélectionner différentes options de simulation, de recomposer si besoin les proportions des systèmes d'exploitations en place dans le paysage, chacun d'entre eux portant des exigences spécifiques en termes d'objectifs et de contraintes d'organisation. On peut aussi les soumettre à de nouveaux scénarios climatiques.

2.2 Un outil d'exploration du paysage

Les diagnostics peuvent également être prolongés jusqu'à des étapes supplémentaires relatives au design de nouvelles infrastructures paysagères, avec la possibilité de choisir entre plusieurs types de couverts végétaux. C'est aussi la possibilité de configurer de nouveaux motifs ou trames paysagères en relation avec les modelés topographiques, la configuration du réseau hydrographique ou encore l'organisation du parcellaire productif. OPALE intègre de façon automatique un ensemble de bibliothèques de traitement géographique des motifs paysagers, pour les rendre interprétables en

matrices de calculs d'eau et de traçage particulaire. Si un des intérêts du traçage est bien d'identifier les zones critiques et les zones de transmission, l'étude du transfert est aussi intéressante en soit. Dans cet usage, OPALE fournit plusieurs indicateurs synthétiques, avec d'une part une évaluation de la résilience du paysage vis-à-vis de la perte de matière mesurée par η donnant le ratio entre la quantité d'unités de pression exportées et d'unités de pression exercées et d'autre part *TF*, la fonction de transfert. Cette fonction fournit un indicateur synthétique sur les dynamiques de restitution des pressions exercées sur le paysage-bassin versant, équivalent aux «breakthrough curves» obtenues expérimentalement pour tester le fonctionnement interne des systèmes naturels ou des réacteurs.

2.3 Un outil pour mieux s'approprier la complexité des régulations écosystémiques

Le diagnostic OPALE peut être poussé jusqu'à l'exploitation des propriétés des fonctions de transfert, via l'indication environnementale et la modélisation globale, pour évaluer les flux générés par les bassins versants. On se place ici sur des échelles d'utilisation de l'outil relatives au fonctionnement intégré des écosystèmes. L'outil offre la possibilité d'inférer, tester et examiner les relations existant entre activités humaines, formes paysagères et cycles ou couplages des éléments nutritifs par exemple. Une telle démarche revêt un caractère pédagogique pour mieux comprendre les dynamiques et régulations des pollutions diffuses, afin de limiter leur impact en aval sur les milieux récepteurs et la santé des populations humaines et animales. La démarche est utile aussi en amont pour la préservation des ressources naturelles : sols, eau voire biodiversité dans les bassins versants.

Les outils issus des travaux TIP TOP sont à notre connaissance des facteurs d'acquisition de nouvelles compétences par les acteurs locaux. Ils leur apportent un cadre d'appropriation de savoirs externes tout en contribuant eux même à l'élaboration d'un corpus de connaissance commun. Nous proposons une suite logicielle pour innover sur l'ingénierie des paysages, associant les savoirs multiples des agriculteurs et des acteurs territoriaux, qui comme le soulignent Guillou et al. (2013), ouvre sur la mise en cohérence et en réseau des propriétés écosystémiques des espaces cultivés/non cultivés.

Conclusion

Le programme TIP TOP apporte des connaissances nouvelles sur le développement et la simplification des outils de modélisation des fonctionnalités paysagères. La modélisation globale sur laquelle repose nos travaux s'appuie successivement sur des fonctions d'élaboration, de mobilisation et de transfert des matières véhiculées par l'eau. La démarche permet d'aborder un ensemble varié de problématiques, avec l'intérêt d'agréger différents types de savoirs pour modéliser la « fabrique » du paysage par les hommes et alimenter des indicateurs de pressions exercées par les activités agricoles sur leur environnement. Ces données sont ensuite couplées aux fonctions de mobilisation et transfert, d'ordre biophysique, déterminées par le climat, les sols, les pentes et les échanges avec les biomasses. D'autres problématiques pourraient être à notre sens abordées par le biais de cette approche telles que la question des xénobiotiques par exemple, ou encore celle de contaminants émergents, pour peu que l'on dispose d'une base d'expertise sur les pressions correspondantes et de mesures des concentrations in situ.

Le besoin était également de concevoir un outil flexible pour répondre à des problématiques environnementales variées, avec l'intérêt de conduire le diagnostic en un temps acceptable pour la prise de décision. Testés sur différents terrains, on montre que les paysages répondent selon des dynamiques propres, appréciées par l'intermédiaire d'indicateurs simples et normalisés (η et *TF*), à même d'établir des comparaisons prospectives sur les espaces paysagers des exploitations agricoles. On voit notamment qu'il existe des configurations paysagères exprimant des régimes brusque d'exportation en raison de la nature imperméable des sols et de l'absence de zone puits susceptibles d'intercepter les écoulements. Dans ce cas de réponse, la portée opérationnelle de projets misant sur ces fonctions

formes/flux des paysages est limitée. Il est plus intéressant ici de rechercher les moyens de contrôler ce qui conditionne l'élaboration des matières exportées, c'est-à-dire dans la sphère des activités, ce qui génère les pressions environnementales. Dans d'autres cas, lorsque des volumes de stockage transitoires peuvent intercepter les écoulements gravitaires, les fonctions de transferts sont moins abruptes, plus graduelles, laissant envisager cette fois le réel avantage d'une ingénierie environnementale de valorisation des interfaces du paysage. La fonction de transfert d'OPALE permet donc d'aider à catégoriser, organiser et optimiser un projet agro-environnemental paysager.

Remerciements

Les études présentées dans cet article ont reçu le soutien financier accordé par le 4e programme PSDR (INRA, IRSTEA, Région Auvergne Rhône Alpes, UE-FEADER) dans le cadre du projet « TIP TOP ».

L'ensemble des publications relatives aux 33 projets du programme PSDR4 sont consultables : https://www.psdr.fr/

Références bibliographiques

Arnold J., Fohrer N., 2005. Swat2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrological Processes 19, 563–572.

Cerdan O., Le Bissonnais Y., Couturier A., Saby N., 2002. Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. Hydrol. Process. 16, 3215–3226.

COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. Comifer, ISBN 978-2-910393-09-0.

Ellis E., Pontius R., 2007. "Land-use and land-cover change." In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [First published July 17, 2006; Last revised January 31, 2007; Retrieved May 3, 2007]. http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change

Gascuel-Odoux C., Magda D., 2015. Gérer les paysages et les territoires pour la transition agroécologique. Innovations Agronomiques 43, 95–106.

Gérard-Marchant P., Hively W.D., Steenhuis T.S., 2006. Distributed hydrological modelling of total dissolved phosphorus transport in an agri-cultural landscape, part I: distributed runoff generation. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 10, 245–261.

Gurnell A., 1978. The dynamics of a drainage network. Nordic Hydrology 9, 293 – 306.

Hatt S., Boeraeve F., Artru S., Dufrêne M., Francis F., 2018. Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: an agroecological perspective. Science of the Total Environment 621, 600–611.

Houet T., Schaller N., Castets M., Gaucherel C., 2014. Improving the simulation of fine-resolution landscape changes by coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. International Journal of Geographical Information Science 28, 1848–1876.

Marie M., Bensaid A., Delahaye D., 2016. Le rôle de la distance dans l'organisation des pratiques et des paysages agricoles : l'exemple du fonctionnement des exploitations laitières dans l'arc atlantique. Cybergeo: European Journal of Geography. DOI : 10.4000/cybergeo.22366.

McGuire K.J., McDonnell J.J., Weiler M., Kendall C., McGlynn B.L., Welker J.M., Seibert J., 2005. The role of topography on catchment-scale water residence time. Water Resour. Res. 41, W05002. https://doi.org/10.1029/2004WR003657

Obled C., Zin I., 2004. TOPMODEL : principes de fonctionnement et application. La Houille Blanche 1, 65–76.

Poggi S., Vinatier F., Hannachi M., Sanz Sanz E., Rudi G., 2021. How can models foster the transition towards future agricultural landscapes? Advances in Ecological Research 10.1016/bs.aecr.2020.11.004.

Taillandier P., Therond O., Gaudou B., 2012. A new BDI agent architecture based on the belief theory. Application to the modelling of cropping plan decision-making, in: International environmental modelling and software society (iEMSs).

Trévisan D., Vansteelant J., Dorioz J.M., 2002. Survival and leaching of fecal bacteria after slurry spreading on mountain hay meadows: consequences for the management of water contamination risk. Water Research 36, 275–283.

Trévisan D., Giguet-Covex C., Sabatier P., Quétin P., Arnaud F., 2019. Coupling indicators and lumped-parameter modeling to assess suspended matter and soluble phosphorus losses, Science of the Total Environment, 650 3027–3040.

Trévisan D., Taillandier P., Sarrazin B., Etienne D., Ayari N., Petitqueux C., Quétin P., Janin C., 2021. OPALE: OPerationnal Assessment of Landscape water Eco-functionalities. Environmental Modelling and Software, 148,105276.

Vanier M., 1995. The manufacturing process of territories in the Rhône-Alpes region actors, myths and practices. Géocarrefour 70-2, 93–103.

Vansteelant J., Trévisan D., Perron L., Dorioz J.M., Roybin D., 1997. Conditions d'apparition du ruissellement dans les cultures annuelles de la région lémanique. Relations avec le fonctionnement des exploitations agricoles. Agronomie 17, 65–82.

Wallach D., Makowski D., Jones J., Brun F., 2013. Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment. Academic Press.

Wezel A., Bellon S., Doré T., Vallod D., David C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agron. Sustain. Dev. DOI: 10.1051.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son DOI)