



HAL
open science

8.7. Stockage et restitution de l'eau

Isabelle Cousin, Olivier Therond

► **To cite this version:**

| Isabelle Cousin, Olivier Therond. 8.7. Stockage et restitution de l'eau. 2017. hal-02789434

HAL Id: hal-02789434

<https://hal.inrae.fr/hal-02789434>

Submitted on 5 Jun 2020

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.

8.7. Stockage et restitution de l'eau

8.7.1. Spécification biophysique des SE

Expert coordinateur : Isabelle Cousin

Contributeur scientifique : Olivier Therond

Les ressources en eau des écosystèmes sont classiquement classées en deux catégories, l'eau « bleue » (des lacs, rivières, océans, nappes phréatiques) et l'eau « verte » (Falkenmark and Rockstrom, 2006; Liu *et al.*, 2009) ; cette dernière représente la quantité d'eau pluviale stockée par le sol et restituée à l'atmosphère par évapotranspiration du système sol-plante (Figure 8-7-1). L'agriculture pluviale utilise uniquement l'eau verte, tandis que l'agriculture irriguée utilise l'eau verte et l'eau bleue. Les pratiques d'irrigation assurent ainsi 40 % de la production alimentaire mondiale (OCDE, 2002) sur 18 % des terres agricoles (Siebert *et al.*, 2005), mais les volumes d'eau prélevés pour l'irrigation représentent actuellement 70 % à 85 % du volume d'eau prélevé pour les activités humaines (Jury and Vaux, 2007; Liu *et al.*, 2009; Jamin *et al.*, 2011). Pourtant, on estime que la contribution de l'eau verte à la production agricole est 4 fois supérieure à la contribution de l'eau bleue, aussi bien à l'échelle nationale qu'à l'échelle globale (Maes *et al.*, 2009; Rockstrom *et al.*, 2009) (voir Figure 8-7-2).

Figure 8-7-1. Les concepts d'eau bleue et d'eau verte, d'après (Falkenmark and Rockstrom, 2006).

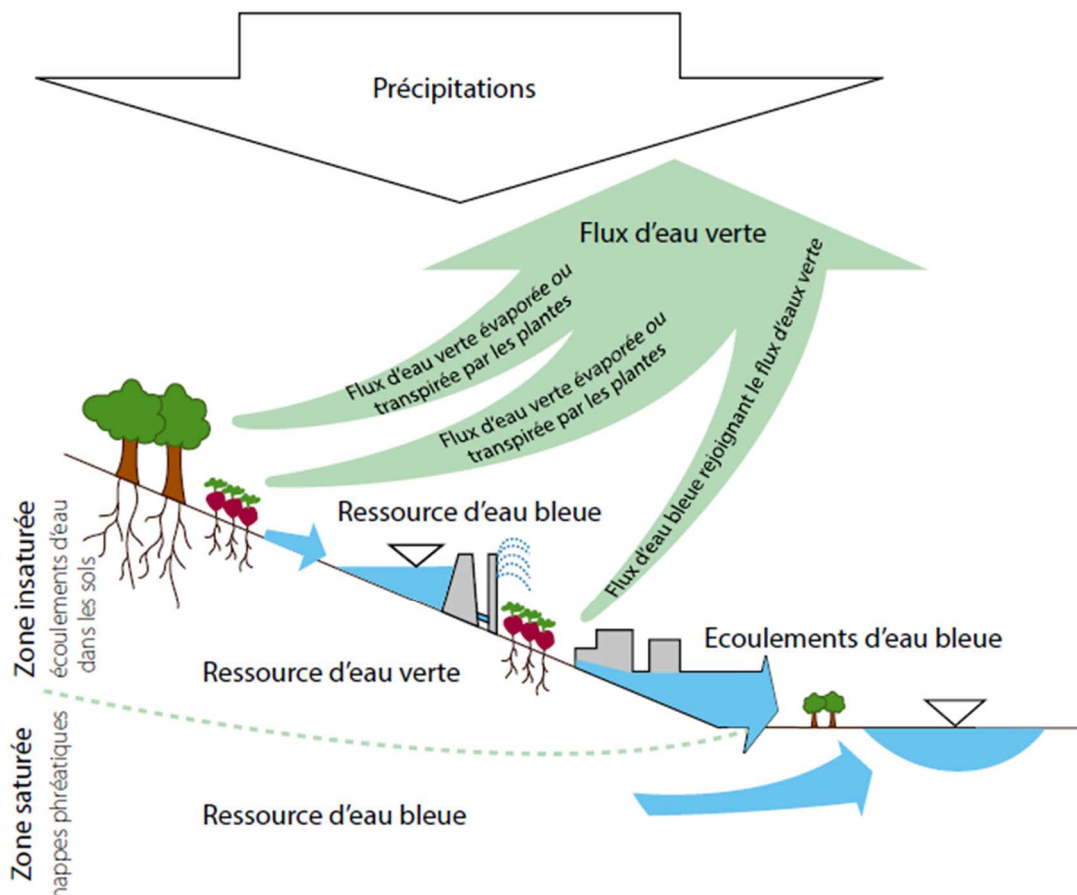
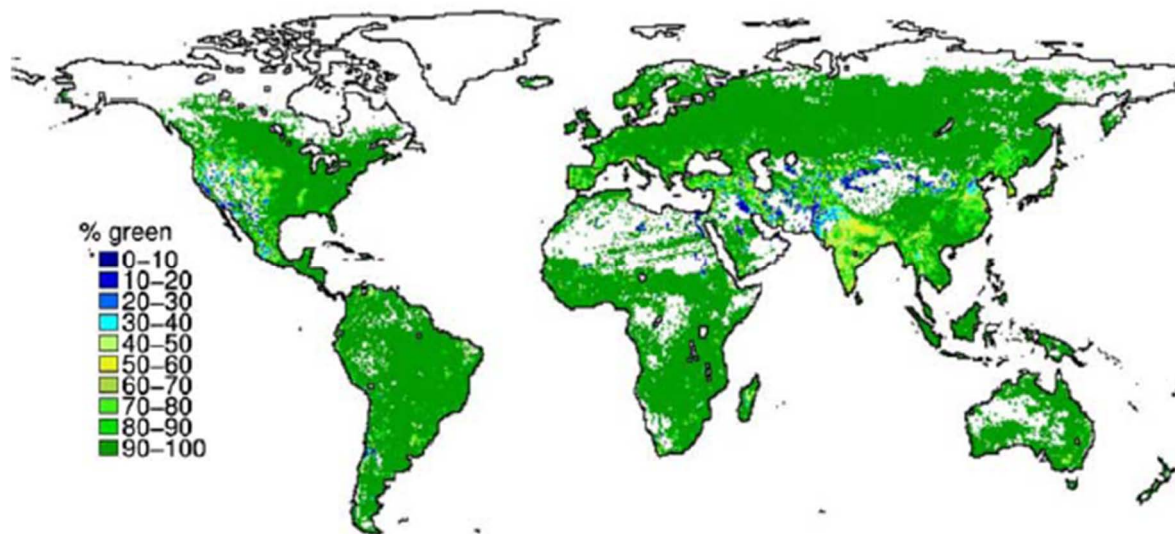


Figure 8-7-2. Proportion d'utilisation de l'eau verte (quantité d'eau verte / [quantité d'eau verte + quantité d'eau bleue]) en agriculture (cultures et prairies) (Rockstrom *et al.*, 2009).



8.7.1.1. Dénomination précise et nature des SE

Dans le cadre de l'étude EFESE-écosystème agricoles, les SE sont conceptualisés en tenant compte des bénéficiaires susceptibles d'en dériver des avantages : le gestionnaire de l'écosystème agricole (ou agriculteur) d'une part, et la société dans son ensemble d'autre part. En d'autres termes, seules les composantes des écosystèmes agricoles directement utilisables par l'agriculteur ou la société peuvent être conceptualisées comme des SE. Dans le cas des SE liés à la régulation des ressources en eau des écosystèmes, la distinction de deux SE en lien avec la régulation de la ressource en eau verte d'une part, et celle en eau bleue d'autre part, n'est pas totalement satisfaisante. En effet, l'eau verte englobe l'eau transpirée par le couvert végétal et l'eau évaporée par le sol. Or, l'eau évaporée par le sol ne contribue pas directement à la production de la biomasse : elle ne constitue pas un SE rendu à l'agriculteur ni à la société, mais un des processus liés au fonctionnement de l'écosystème.

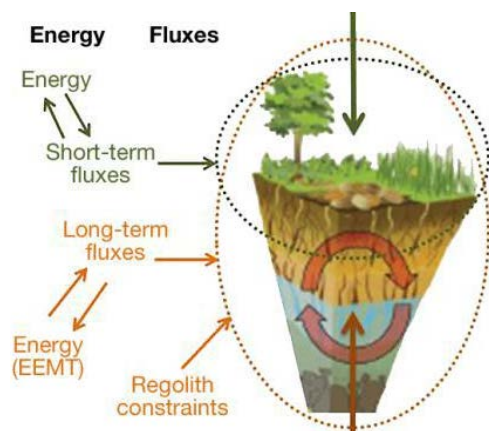
Nous définissons donc ici deux SE liés à la capacité de l'écosystème à stocker et à restituer de l'eau : (i) « **stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées** » et (ii) la « **stockage et restitution de l'eau bleue** ».

L'extension verticale théorique de l'écosystème fournissant ces SE s'étend du sommet de la canopée à la base de la zone saturée (Field *et al.*, 2015), soit au-delà de la zone racinaire. Cependant, l'évaluation des SE « **stockage et restitution de l'eau bleue** » sur l'ensemble de la zone critique incluant toute la zone insaturée et toute la zone saturée (Cf. section 3.1.2.4 et Figure 8-7-3) conduirait à considérer également le fonctionnement des aquifères – ce qui relève du champ des écosystèmes aquatiques – et nécessiterait la mise en œuvre de modèles de cultures couplés à des modèles hydrogéologiques dont le paramétrage reste actuellement incertain sur de nombreux aquifères. Certains aquifères présentant un temps de transfert¹ pouvant atteindre plusieurs années et étant très étendus, l'évaluation à une résolution spatiale fine d'un SE qui couvrirait toute la zone critique serait très difficile à réaliser, alors même que l'identification d'un bénéficiaire serait délicate. En conséquence, même si l'ensemble de la zone critique contribue aux SE rendus par les écosystèmes, nous privilégions ici la qualification des quantités d'eau générées par des flux « à court terme » (i.e. infra-annuels à annuels), et, en cohérence avec le champ d'analyse d'EFESE-écosystèmes agricoles, nous bornons l'emprise verticale de l'écosystème à la base de la profondeur maximale d'enracinement. Cette conceptualisation permet de bien différencier les flux d'eau transpirée par les cultures de rente et d'eau bleue, dessine un cadre spécifique aux écosystèmes agricoles, et permet d'utiliser le même dispositif d'évaluation que celui utilisé pour l'évaluation biophysiques du SE de « **Régulation de la qualité de l'eau vis-à-vis de l'azote, du phosphore et du**

¹ Le temps de transfert correspond à la durée nécessaire à une goutte d'eau pour traverser entièrement le système hydrologique.

carbone organique dissout » (section 8.11). Notons également que nous qualifierons ici la quantité restituée par l'écosystème, sans préjuger de la localisation géographique de la restitution².

Figure 8-7-3. La zone critique de fourniture des services écosystémiques, d'après (Field *et al.*, 2015).



Ces deux SE relatifs à la capacité de l'écosystème agricole à stocker et restituer de l'eau se substituent aux quatre SE suivants de la classification CICES : i) eaux de surface pour la consommation potable, ii) eaux souterraines pour la consommation potable, iii) eaux de surface à d'autres fins que la boisson, iv) eaux souterraines à d'autres fins que la boisson. L'association des eaux pour la consommation et des eaux à d'autres fins que la boisson est justifiée par le fait que celles-ci sont produites *via* des procédés de traitements industriels³ à partir d'une eau brute, stockée et restituée par l'écosystème agricole, entre autres. Cette distinction réalisée dans CICES relève donc plus d'une distinction de la nature des **avantages** dérivés de l'eau brute que de celle de **SE** différents. L'analyse conjointe des eaux de surface et des eaux souterraines est justifiée par la nature des écosystèmes considérés, à savoir les écosystèmes agricoles, et donc par la borne inférieure du système, à savoir la base de la zone racinaire.

On notera que l'on traite ici des quantités d'eau stockées et restituées par l'écosystème agricole, indépendamment de sa qualité (teneur en éléments potentiellement polluants, par exemple). On ne traitera pas non plus du cas particulier de l'eau restituée par l'écosystème agricole lors d'inondations, que celles-ci soient liées uniquement à des épisodes pluvieux exceptionnels ou à la conjonction d'épisodes pluvieux et de remontées de nappe.

Ces deux SE concernent tous les écosystèmes agricoles.

8.7.1.2. Bénéficiaire(s) et avantage(s) dérivé(s) des SE

Nous définissons deux types d'avantages dérivés des SE relatifs à la capacité de l'écosystème à stocker et restituer de l'eau, et deux catégories de bénéficiaires.

Le SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées » bénéficie directement **au gestionnaire de l'écosystème (agriculteur)**, qui en dérive un avantage en termes de quantité d'eau qu'il devrait apporter par irrigation pour obtenir la même production végétale.

² Quinteiro *et al.* (2015), dans leur review sur l'application de l'Analyse du Cycle de Vie à l'évaluation du volume d'eau verte produite par les écosystèmes, indiquent en effet que certaines études spécifient explicitement si l'eau verte évapotranspirée est ensuite restituée au même bassin versant ou à un bassin versant différent.

³ A l'exception des eaux de source qu'un temps de séjour très long dans l'ensemble de la zone non saturée permet de filtrer, purifier et rendre potable. Etant donné l'extension verticale de l'écosystème que nous proposons, cette situation n'est donc pas à envisager. A l'exception également de l'eau de puits non polluée utilisée ponctuellement par un bénéficiaire isolé. Celui-ci ne constituant pas un collectif dénombrable, nous écartons également cette situation du puits non pollué.

Le SE « stockage et restitution de l'eau bleue » bénéficie directement à la **société**, qui en dérive des avantages pour différents collectifs de bénéficiaires, dont les gestionnaires de l'écosystème agricole, pour des usages diversifiés : agricoles, industriels, domestiques, récréatifs et culturels.

8.7.1.3. Déterminants biophysiques clefs du SE

Les principaux déterminants biophysiques du niveau de fourniture des SE relatifs à la capacité de l'écosystème à stocker et restituer de l'eau sont les processus à l'origine des flux d'eau ascendants, descendants et latéraux au sein du système sol-plante.

Pour le SE « stockage et restitution de l'eau bleue », les déterminants principaux sont i) les **processus d'écoulement d'eau par gravité** - à savoir la **percolation** à la base du sol, le **ruissellement** à la surface du sol et les **écoulements latéraux hypodermiques** et ii) le **processus d'évapotranspiration**. La percolation dépend de l'état hydrique du sol et des caractéristiques et des propriétés⁴ du sol qui conditionnent les flux d'eau (voir ci-dessous). Le ruissellement est sous la dépendance principale de l'état de surface du sol et du taux de couverture de la végétation, deux éléments qui conditionnent au premier ordre la conductivité hydraulique de l'horizon de surface, et donc détermine le partage entre infiltration et ruissellement. Les flux latéraux hypodermiques sont sous la dépendance principale de l'état hydrique du sol et des propriétés hydriques des différents horizons du sol, notamment du rapport⁵ de conductivité hydraulique entre deux horizons superposés, et de la topographie. L'évapotranspiration est composée de deux processus : l'évaporation et la transpiration (voir paragraphe suivant). L'évaporation dépend de l'état hydrique du sol et des caractéristiques et des propriétés du sol qui conditionnent les flux d'eau.

Pour le SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées », le déterminant principal est le **processus de transpiration**. Ce processus de transfert d'eau vertical ascendant dépend à la fois de la nature du couvert végétal, de la dynamique de son cycle végétatif (qui peut se représenter au travers de l'évolution du coefficient cultural⁶) et des caractéristiques et propriétés du sol. Certains processus hydriques spécifiques contribuent également aux transferts d'eau ascendants dans le sol vers ou *via* les plantes, tels que les **exsudations d'eau** par les racines lors du processus d'ascenseur hydraulique⁷, ou les **remontées capillaires**. Les exsudations sont de faible envergure puisqu'elles peuvent contribuer pour 7% en moyenne à la transpiration (Doussan *et al.*, 2006). Les remontées capillaires, au contraire, peuvent fournir une contribution significative aux besoins en eau des cultures : en zone de nappe peu profonde, elles peuvent être à l'origine de 30 à 60 % à l'évapotranspiration (Vergnes *et al.*, 2014).

Remarque : on notera que l'on décrit ici les processus qui permettent de fournir directement (transpiration) ou indirectement (remontées capillaires, exsudations par les racines) de l'eau aux plantes cultivées, et non pas l'ensemble des processus qui permettent des flux verticaux ascendants. Notre approche, même si elle est inspirée par la définition du concept d'eau verte, s'en démarque notablement puisque l'on s'intéresse aux quantités d'eau générées par des flux transpirés, et non pas évapotranspirés.

Il est important de noter qu'il existe un **antagonisme biophysique intrinsèque entre la percolation à la base du sol et l'évapotranspiration à la surface du sol**. En effet, on décrit de façon classique que, lorsque le stock d'eau du sol est évapotranspiré par la plante pour élaborer sa biomasse, la quantité d'eau percolée (ou drainée) est faible ; de façon corollaire, la quantité d'eau percolée est d'autant plus élevée que la quantité d'eau évapotranspirée est faible.

⁴ Nous distinguons ici les **processus**, qui sont les déterminants du SE. Des **propriétés** du sol permettent d'évaluer ces processus (notamment par paramétrisation de modèles) ; courbe de rétention en eau et conductivité hydraulique, par exemple, sont des propriétés. Ces propriétés sont sous la dépendance de **caractéristiques** des sols (teneur en matière organique, texture, par exemple).

⁵ Les flux latéraux hypodermiques se produisent en particulier lorsqu'un horizon de forte conductivité hydraulique est situé au-dessus d'un horizon de faible conductivité hydraulique. L'eau circule alors sur le toit de cet horizon et ne s'y infiltre pas ou peu.

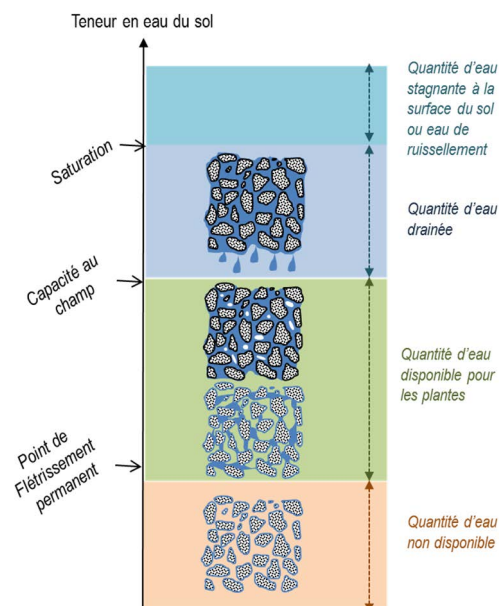
⁶ Rapport entre l'évapotranspiration de la culture et l'évapotranspiration potentielle ; il intègre les effets des 4 caractéristiques primaires qui distinguent une culture de la culture de référence, à savoir la hauteur de la culture, la résistance de surface sol - végétation, l'albédo, l'évaporation de sol (Allen *et al.*, 1998).

⁷ L'ascenseur hydraulique est une redistribution nocturne de l'eau dans le profil de sol, notamment en situation agroforestière. Les racines situées en zone sèche, proches de la surface du sol, exsudent de l'eau transmises des racines situées en zone plus humide, donc en général plus profondément ancrées dans le sol. Ce processus se déroule pendant la nuit, lorsque la plante ne transpire pas (voir par exemple, Dupraz et Liagre, 2011)

L'ensemble de ces flux ascendants, descendants et latéraux sont décrits par des modèles de transfert en milieu poreux, de niveaux de complexité variés (équation de bilan hydrique, ou équation de Richards décrivant les transferts en milieu insaturé). Ces modèles sont paramétrés par des propriétés dépendantes à la fois de l'état hydrique du sol (teneur en eau du sol), et de caractéristiques des sols.

- La **teneur en eau du sol** varie au cours de l'année en fonction des flux d'eau entrant et sortant de l'écosystème.
- Les caractéristiques clefs du sol sont celles qui déterminent la structure du réseau poreux, que l'on peut synthétiser ici par la valeur de la **porosité totale** du sol ; ce sont donc, ici, principalement la **texture et la teneur en matière organique**. Les propriétés clefs du sol sont les propriétés hydriques du sol, à savoir la **courbe de rétention en eau et la conductivité hydraulique** en régime insaturé. En cohérence avec la proposition d'évaluation de ce SE par l'utilisation d'un modèle de culture basé sur le calcul du bilan hydrique (voir ci-après), on retiendra comme propriété-clef, au premier ordre, la **Réserve en Eau Utile maximale** ; celle-ci est définie par la connaissance i) de la profondeur du sol et ii) de deux points spécifiques de la courbe de rétention en eau : la **teneur en eau du sol à la capacité au champ** et la **teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent**. La teneur en eau « à la capacité au champ », est la valeur à laquelle les forces gravitaires permettant l'écoulement de l'eau par drainage, et les forces capillaires permettant la rétention de l'eau dans le sol, s'équilibrent. La teneur en eau dite « au point de flétrissement permanent », est la quantité d'eau retenue dans le sol avec une énergie supérieure à celle que les plantes peuvent exercer sur le sol pour en extraire de l'eau⁸. Ces deux valeurs caractéristiques de la teneur en eau permettent de calculer la Réserve en Eau Utile Maximale du sol, qui représente la quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et restituer aux racines pour la vie végétale (Figure 8-7-4)⁹. Ces deux variables sont soit mesurées en laboratoire, soit estimées par des fonctions de pédotransfert (Figure 8-7-5)¹⁰.

Figure 8-7-4. Valeurs de teneurs en eau caractéristiques dans les sols et volumes d'eau associés



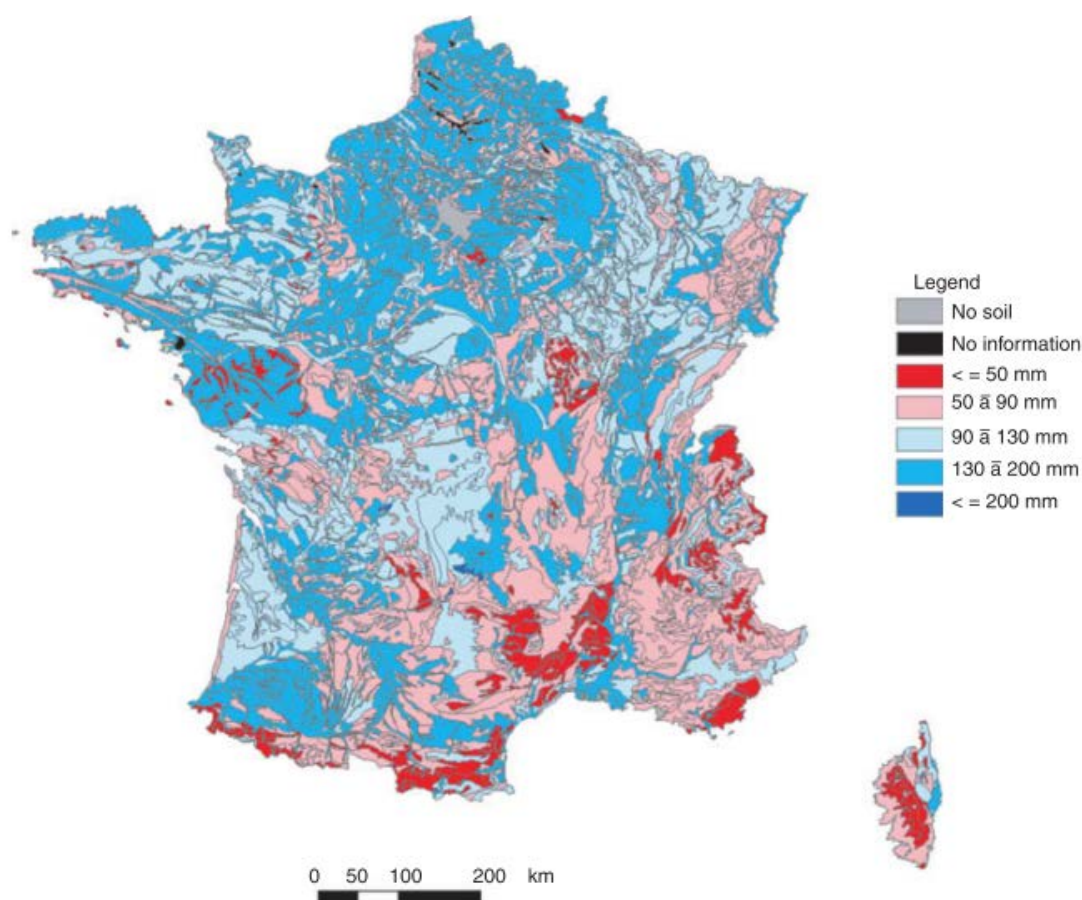
⁸ On notera donc que la variable-plante « coefficient cultural » et la variable-sol « teneur en eau au point de flétrissement permanent » intègrent des effets à la fois de la culture et du sol.

⁹ Pour des évaluations à l'échelle nationale, nous conseillons que la teneur en eau à la capacité au champ corresponde à la teneur en eau à un potentiel hydrique de -100 hPa, et que la teneur en eau au point de flétrissement permanent corresponde à la teneur en eau à -15800 hPa (voir, par exemple, Seneviratne *et al.*, 2010).

¹⁰ Pour une évaluation à l'échelle nationale, nous recommandons l'utilisation des FPT de Bruand *et al.*, (2004) et Al Majou *et al.* (2008), bien adaptées au contexte français, et celles de Toth *et al.*, (2015) développées récemment pour des études à l'échelle européenne. Les variables sol nécessaires au calcul de ces variables biophysiques sont disponibles dans les bases de données sol gérées par le GIS SOL (voir fiche sur les sols). Pour les sols caillouteux, on utilisera en outre les fonctions de (Tetegan *et al.*, 2011), pour tenir compte de la contribution de la phase caillouteuse à la Réserve Utile en Eau du sol et ajuster ainsi plus finement le bilan hydrique annuel (Tetegan *et al.*, 2015).

Figure 8-7-5. Carte de la RU sur le territoire national (Al Majou *et al.*, 2008).

Les valeurs de RU sont estimées à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000 (Le Bas *et al.*, 1997) et sont exprimées en mm.



8.7.1.4. Facteurs exogènes clefs du SE

Les SE de « stockage et restitution de l'eau » sont sous la dépendance du **climat**¹¹ (Bangash *et al.*, 2013), en particulier de la quantité de pluie journalière et annuelle et de la distribution intra-annuelle des pluies. En effet, la quantité d'eau qui arrive à la surface du sol représente l'entrée d'eau dans l'écosystème ; elle conditionne partiellement la valeur de certaines propriétés du sol, puisqu'elle agit directement sur la teneur en eau dans le sol (et, par exemple, les transferts d'eau dans le sol sont plus rapides lorsque la teneur en eau du sol est plus élevée).

Ces SE sont également sous la forte dépendance des **pratiques agricoles**, et notamment :

- les **pratiques de fertilisation**, qui, par leur influence sur le développement de la biomasse, influent sur le processus d'évapotranspiration, et modifient le niveau de fourniture du SE ;
- les **pratiques de travail du sol et de gestion des résidus**. Il convient ici de distinguer, d'une part, des pratiques qui modifient les propriétés de l'horizon de surface, et qui vont donc influencer sur la vitesse d'infiltration *dans le sol* et le partage infiltration-ruissellement et, d'autre part, des pratiques qui limitent la quantité d'eau qui arrive *à la surface du sol* (cas d'un mulch en surface). En milieu agricole, des pratiques de travail du sol qui augmentent la porosité de l'horizon de surface - et donc sa capacité

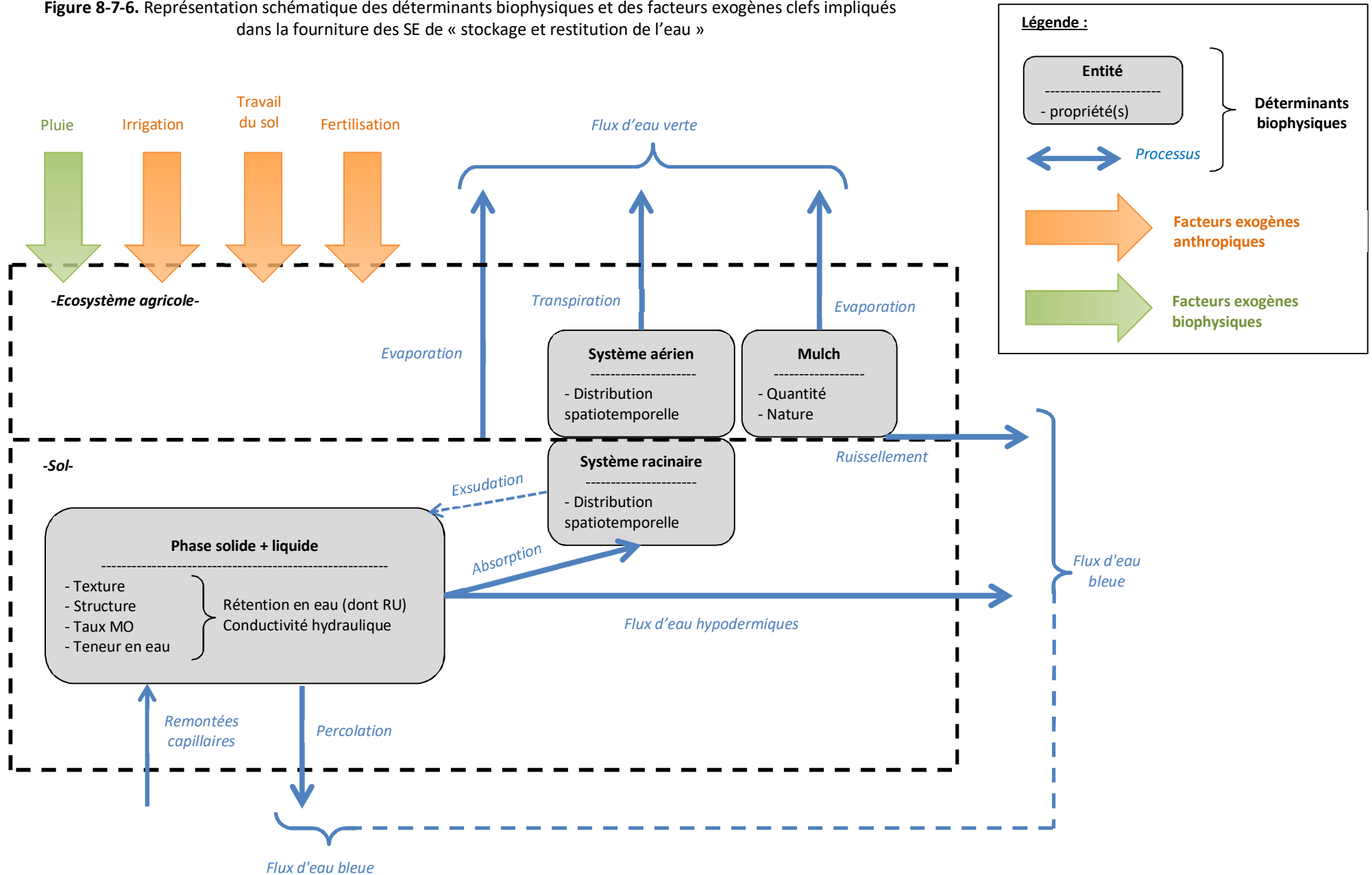
¹¹ D'ailleurs, les travaux récents sur l'impact du changement climatique sur les sécheresses montrent que la sécheresse édaphique, liée à une diminution de l'humidité du sol, s'aggraverait de façon plus intense et plus rapide que les sécheresses climatiques plus directement liées au déficit des précipitations (Soubeyrou *et al.*, 2011; Vidal *et al.*, 2012).

d'infiltration - permettent à l'eau de pluie de pénétrer dans le sol au lieu de ruisseler à la surface, mais cela ne préjuge pas du partage évaporation/infiltration qui dépend de la structure de l'ensemble des horizons. D'ailleurs, des exemples récents sur des forêts en climat de type tropical à saisonnalité marquée évoquent des situations où l'infiltration est faible alors que l'évapotranspiration est faible également, en raison de pratiques de travail du sol qui dégradent l'état de la surface (Krishnaswamy *et al.*, 2013). L'analyse de la littérature ne permet pas de dégager un consensus sur l'effet des pratiques de travail du sol sur le partage ruissellement/infiltration/évaporation dans les écosystèmes agricoles, car, d'une part, il est très dépendant de l'ensemble climat/système de culture et des pratiques de travail du sol elles-mêmes (ex. nature et conditions d'intervention), d'autre part, les effets de changements de pratiques de travail du sol sur la structure du sol ne s'expriment de façon stable qu'après plusieurs années (Bordes and Cousin, 2014).

- Les **pratiques d'irrigation, qui ont un statut particulier vis à vis des deux SE** analysés ici. En modifiant la teneur en eau du sol, l'irrigation influe sur les flux d'eau verte et d'eau bleue sortant de l'écosystème, le jour de l'apport et à plus ou moins court terme. De ce fait, elle influe sur le développement de la biomasse et donc sur les flux d'évapotranspiration. Il est important de noter que pour un type de pratiques d'irrigation donné (quantité et fréquence des apports d'eau), la capacité du sol à stocker et restituer de l'eau détermine l'efficacité de ces pratiques à répondre, en complément du SE rendu à l'agriculteur, aux besoins en eau des plantes cultivées. Dans certaines conditions, ces pratiques d'irrigation peuvent générer des flux d'eau bleue c.-à-d. augmenter les flux d'eau percolés à la base du sol. Ainsi par exemple, une pluie importante, dans les jours qui suivent un apport d'eau par irrigation, peut conduire à une percolation à la base du système racinaire.

La figure 8-7-6 représente les déterminants biophysiques et facteurs exogènes clefs impliqués dans la fourniture des deux SE de « stockage et restitution de l'eau ».

Figure 8-7-6. Représentation schématique des déterminants biophysiques et des facteurs exogènes clés impliqués dans la fourniture des SE de « stockage et restitution de l'eau »



8.7.2. Evaluation biophysique du niveau de fourniture du SE

Expert coordinateur : Isabelle Cousin

Contributeur scientifique : Olivier Therond

Ingénierie de données : Eric Casellas, Julie Constantin, Anne Meillet, Thomas Poméon, Hélène Raynal

8.7.2.1. Méthodologie et indicateurs pour l'évaluation biophysique du SE

Stratégies d'évaluation définies dans la littérature

1. Indicateurs du programme MAES et du JRC

Les premiers travaux, notamment ceux conduits par le JRC pour cartographier les SE « d'approvisionnement en eau » à l'échelle européenne, définissent trois indicateurs (Maes *et al.*, 2011) : un indicateur de capacité « *Total area of inland water bodies and inland wetlands (ha)* », un indicateur de flux « *Total annual renewable freshwater supply (m3 year-1) by surface waters* » et un indicateur d'avantage « *Total annual freshwater consumption per sector* ». Ces trois indicateurs ne sont pas adaptés à l'évaluation des deux SE relatifs à la capacité de l'écosystème agricole à stocker et à restituer de l'eau, et le premier concerne uniquement l'eau bleue. De ce fait, nous ne retiendrons pas ces indicateurs pour l'évaluation du niveau de fourniture de ces SE.

Suivant la classification CICES, le projet MAES propose quatre indicateurs¹² :

- Pour les SE « *Surface Water for drinking* » et « *Ground water for drinking* », les indicateurs sont respectivement le « *High Nature Value Farmland* », qui ne paraît pas spécifique de la capacité de l'écosystème agricole à stocker et à restituer de l'eau^{13,14}, et le « *Areas important for groundwater abstraction in agro ecosystems* », dont les auteurs reconnaissent qu'il est très difficile à calculer avec les données actuellement disponibles. Ces deux types d'indicateurs ne sont pas retenus pour l'étude car le premier est un indicateur trop indirect du SE et le second concerne les écosystèmes aquatiques, hors du périmètre de la présente étude.
- Pour le SE « *Groundwater for non-drinking purposes* », l'indicateur retenu est l'évaluation des volumes d'eaux souterraines, indicateur que nous ne retiendrons pas puisqu'il est hors du périmètre de la présente étude.
- Pour le SE « *Surface water for non-drinking purposes* », l'indicateur proposé par le MAES est le « *Water exploitation Index* » (WEI), ou indice d'exploitation WEI selon sa traduction française proposée par l'ONU. Cet indice est défini par l'Agence Européenne de l'Environnement de la façon suivante : « *The water exploitation index (WEI) is the mean annual total abstraction of freshwater divided by the mean annual total renewable freshwater resource at the country level, expressed in percentage terms.* »¹⁵. Cet indicateur synthétise le rôle de l'ensemble des écosystèmes mis en jeu pour stocker et restituer de l'eau, et nous ne le retiendrons pas pour cette étude puisque non spécifique aux écosystèmes agricoles.

2. Indicateurs du fonctionnement de l'écosystème agricole

Comme indiqué dans la section 8.7.1, le fonctionnement des écosystèmes du point de vue du stockage et de la restitution de l'eau, est classiquement abordé dans la littérature sous l'angle de l'eau verte et de l'eau bleue.

¹² <http://biodiversity.europa.eu/maes/mapping-ecosystems/indicators-for-provisioning-services-cropland-and-grassland>

¹³ En effet, le *High Nature Value Farmland* est défini de la façon suivante par (Andersen, E., 2003. Developing a high nature value farming area indicator. Final report. EEA, Copenhagen. : « [...] those areas in Europe where agriculture is a major (usually the dominant) land use and where agriculture sustains or is associated with either a high species and habitat diversity, or the presence of species of European conservation concern, or both ».

¹⁴ Une cartographie nationale de cet indicateur, réalisée par le JRC, est déjà disponible: Pointereau, P., Paracchini, M.L., Terres, J.M., Jiguet, F., Bas, Y., Biala, K., 2007. Identification of High Nature Value farmland in France through statistical information and farm practice surveys. JRC report.

¹⁵ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/use-of-freshwater-resources/use-of-freshwater-resources-assessment-2>

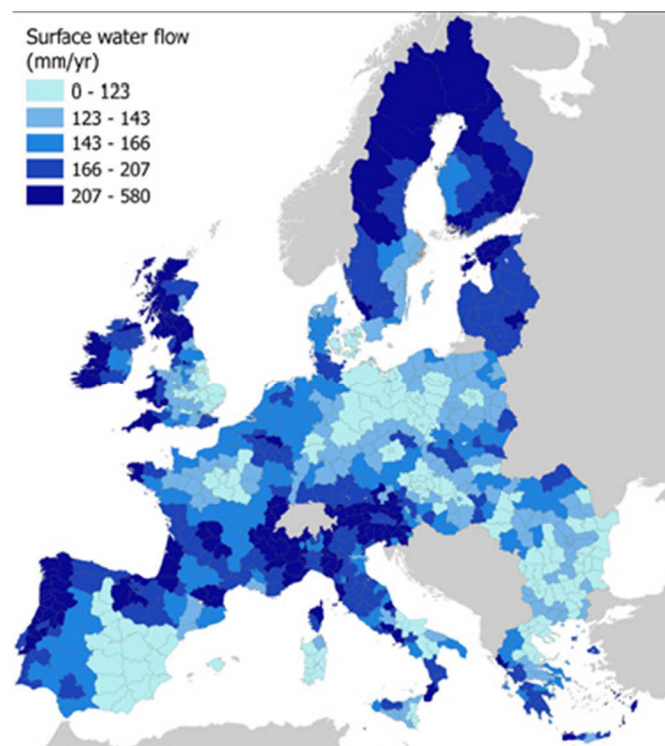
- *Quantité d'eau annuelle que l'écosystème agricole a effectivement restituée sous forme d'eau verte.*

La quantité restituée par l'écosystème sous forme d'eau verte correspond à la « **quantité d'eau évapotranspirée** » par la culture et par le sol. Cet indice, lorsqu'il est calculé à l'échelle annuelle, est utilisé par de nombreux auteurs, et notamment par Liu *et al.* (2009; 2013) qui l'appliquent spécifiquement dans le contexte des écosystèmes agricoles en tenant compte des types de cultures. Cependant, la quantité d'eau évaporée ne contribue pas directement à la production de la biomasse (l'agriculteur n'en dérive pas spécifiquement un avantage – voir section 8.7.1). Aussi, cet indice n'est pas pertinent dans le cadre d'EFESE-écosystèmes agricoles.

- *Quantité d'eau annuelle que l'écosystème a effectivement restituée sous forme d'eau bleue*

La quantité restituée sous forme d'eau bleue est la « **quantité d'eau annuelle percolée à la base du sol, ruisselée à la surface du sol et circulant via les écoulements hypodermiques** ». Elle est classiquement représentée par le « **Rendement en Eau** » (*Water yield*), défini par (Bangash *et al.*, 2013; Fan and Shibata, 2014) comme la différence entre la somme annuelle des précipitations et la quantité d'eau annuelle évapotranspirée. Dans les paysages où le type de sol et la pente conduisent éventuellement à du ruissellement, on peut également utiliser comme indicateur la « **quantité d'eau annuelle ruisselée** » (Liquete *et al.*, 2011). Cet indicateur est déjà disponible à l'échelle européenne, avec une résolution départementale pour le territoire national (Figure 8-7-7).

Figure 8-7-7. Quantité d'eau annuelle ruisselée, moyennée entre 1990 et 2003, d'après (Liquete *et al.*, 2011)



Indicateurs et méthodologie d'évaluation retenus dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles

Compte-tenu de l'analyse des indicateurs proposés dans la littérature, la **quantité d'eau transpirée par la culture de rente pendant sa période de croissance (entre le semis et la récolte)** et le **rendement en Eau annuel** sont les deux indicateurs retenus pour représenter respectivement les SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées » et « stockage et restitution de l'eau bleue » dans EFESE-écosystèmes agricoles. Ils peuvent être évalués par une modélisation du bilan hydrique. Nous présentons ci-après la méthodologie de calcul, et les données à mobiliser pour la mettre en œuvre.

1. Quantification des variables nécessaires au calcul des indicateurs par simulation du bilan hydrique

Les variables nécessaires à l'évaluation du bilan hydrique sont, outre les variables biophysiques présentées ci-après : la **quantité d'eau pluviale**, la **teneur en eau du sol**, la **quantité d'eau évapotranspirée**, la **quantité d'eau ruisselée**, et la **quantité d'eau percolée à la base du sol** (les quantités d'eau s'écoulant *via* les flux hypodermiques ne sont pas considérés ci-après). En situation de culture irriguée, on ajoute également la **quantité d'eau apportée par irrigation**.

Ces variables constituent les composantes du **bilan hydrique** défini comme suit :

$$\Delta S = P + I - E - R - D \quad [8.7.1]$$

où ΔS représente la variation de stock d'eau dans le sol (que l'on évalue comme la différence entre la teneur en eau initiale et la teneur en eau à un instant t), P représente les précipitations, I représente la quantité d'eau apportée par irrigation, E représente la quantité d'eau évaporée (par le sol) et transpirée (par les plantes)¹⁶, R représente la quantité d'eau ruisselée (à la surface du sol), et D représente la quantité d'eau percolée à la base du sol.

Pour évaluer de façon précise les indicateurs définis précédemment, il convient de calculer ces variables de façon journalière, puis de les cumuler sur une année hydrologique. Ce pas de temps journalier permet ainsi de prendre en compte les interactions entre ces flux d'eau pendant des périodes clés, comme par exemple les périodes de pluie très abondantes dont les effets sur le ruissellement ou la percolation sont dépendants du développement et du type de cultures.

Ces termes du bilan hydrique sont calculés par des modèles décrivant les échanges sol-eau [cas du modèle SWAT employé par (Notter *et al.*, 2012; Fan and Shibata, 2014) ou du modèle BCM employé par (Byrd *et al.*, 2015) par exemple] ou des modèles de cultures [cas du modèle EPIC employé par (Liu *et al.*, 2009) par exemple, ou du modèle CROPWAT employé par (Quinteiro *et al.*, 2015)]. Dans le cadre d'EFESE-écosystèmes agricoles, nous avons choisi d'utiliser le modèle de culture **STICS** (Brisson *et al.*, 2002), développé par l'Inra, qui calcule les composantes du bilan hydrique (cf. Annexe 8-A). Pour réaliser l'évaluation sur l'ensemble du territoire national, nous employons ce modèle dans sa version manipulant le bilan hydrique de la façon la plus simple, c'est-à-dire : i) dans des situations à plat et sans pente, ce qui ne produit donc pas de ruissellement et de flux latéraux, et ii) en ne tenant compte ni des écoulements préférentiels (voir paragraphe suivant) ni des remontées capillaires (dont les équations sont actuellement difficilement paramétrables de façon réaliste sur l'ensemble du territoire). Ces choix sont liés au fait que, dans cette étude, la variabilité de la topographie au sein de chaque unité pédoclimatique n'est pas prise en compte. Ces choix de modélisation ne permettent pas de représenter les situations de pente importante ou de sols très battants pendant une période pluvieuse d'interculture (Cf. section 8.5).

Notons qu'à des échelles très locales, des modèles tenant compte des écoulements préférentiels, qui contribuent à une réalimentation plus rapide de la zone sous-racinaire, pourraient s'avérer plus performants que la version du modèle STICS utilisée dans cette étude. Ces écoulements préférentiels sont à prendre en compte notamment dans des sols très fissurés, ou dans des sols où l'activité lombricienne est très intense sur l'intégralité du profil de sol. Ces modèles, dont une revue est disponible dans Simunek *et al.* (2003), décrivent explicitement les écoulements préférentiels en partitionnant l'espace poreux en deux types de zones, certaines pour lesquelles les transferts sont lents, et d'autres pour lesquelles des pores d'assez grande taille permettent des transferts plus rapides. Cependant la mise en œuvre de ce type de modèle nécessitant des données fines et précises sur les sols n'est pas envisageable actuellement sur l'ensemble de la France et dans le cadre des moyens disponibles dans EFES-écosystèmes agricoles. C'est également le cas pour l'utilisation de la version du modèle STICS représentant les effets de ces « macroporosités », dont le paramétrage n'est actuellement réaliste que sur un nombre très limité de situations.

¹⁶ Dans le cas particulier de l'évapotranspiration, la méthode InVEST (<http://www.naturalcapitalproject.org/invest/>) est utilisée par plusieurs auteurs (Bangash *et al.*, 2013; Hamel and Guswa, 2015) et permet un calcul direct de l'évapotranspiration. L'analyse de données temporelles de télédétection peut également être mise en œuvre (Karimi and Bastiaansen, 2015).

2. Evaluation des indicateurs à partir des données d'intérêt

Les termes du bilan hydrique évalués par STICS permettent de calculer les deux indicateurs retenus pour les SE de « stockage et restitution de l'eau » et prendre en compte les effets de l'irrigation sur les différents flux d'eau étudiés.

1. Quantité d'eau transpirée par la culture de rente pendant sa période de croissance (entre le semis et la récolte)

Cet indicateur est une sortie directe du modèle STICS.

2. Rendement en Eau annuel (Rdt)

Il est évalué, avec les variables définies à l'équation [8.7.1.] de la façon suivante :

$$\text{Rdt} = P - E (+ I) \quad [8.7.2]$$

où P représente la quantité d'eau annuelle apportée par la pluie, E représente les quantités d'eau annuelles évaporée par le sol, évaporée par le mulch, et transpirée par l'ensemble des cultures présentes pendant la période d'évaluation. I représente la quantité d'eau annuelle apportée par l'irrigation. Elle permet d'analyser l'effet de ce type de pratique.

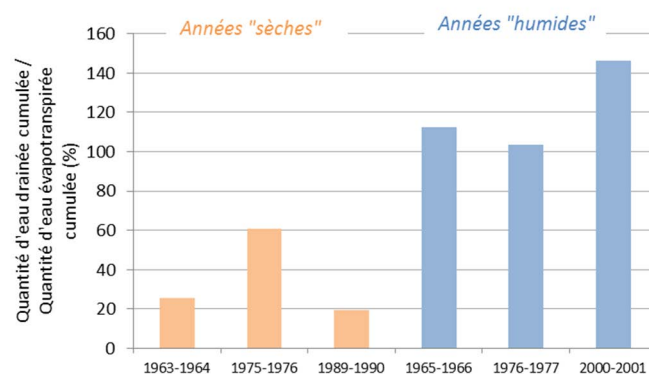
Ce calcul est réalisé sur l'année hydrologique, soit du 1^{er} septembre d'une année *n* au 31 août de l'année *n+1*.

On notera ici que la *quantité d'eau transpirée par la culture de rente pendant sa période de croissance* (indicateur 1) et la *quantité d'eau annuelle transpirée par l'ensemble des cultures présentes du 1^{er} septembre au 31 août* (variable nécessaire au calcul de l'indicateur 2) sont des variables différentes.

3. Données disponibles pour la modélisation, échelles spatiales et stratégies pour des évaluations pluriannuelles

Les données d'entrée « sol » nécessaires à l'utilisation de modèles pour l'évaluation des indicateurs du SE sont disponibles, à différentes échelles, dans les bases de données sol disponibles auprès de l'US INRA Infosol (voir section 8.4.5). Une vigilance particulière concerne le choix (et le nombre) des années climatiques qui permettront d'évaluer des moyennes interannuelles des indicateurs mentionnés plus haut, tout particulièrement pour prendre en compte la variabilité des flux d'eau percolée et évapotranspirée et du possible antagonisme biophysique entre ces deux flux. En effet, dans leur analyse de sensibilité concernant l'utilisation de la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000, Le Bas *et al.* (2015) montrent que le rapport entre quantité d'eau percolée cumulée et quantité d'eau évapotranspirée cumulée est fortement dépendante du climat (Figure 8-7-8) : en année « sèche », la proportion d'eau pluviale évapotranspirée est nettement supérieure à la proportion d'eau drainée, alors que l'on observe le contraire pour des années « humides ». Afin d'appréhender la variabilité de ces flux et de leur relation les simulations avec STICS sont conduites au pas de temps journalier sur 30 années climatiques passées, 1984 à 2013, à la résolution d'unité spatiale correspondant au croisement des unités cartographiques de sols de la carte des sols au 1/1 000 000 et des mailles SAFRAN de description du climat (8 x 8 km) de Météo-France.

Figure 8-7-8. Rapport entre la quantité d'eau percolée annuelle et la quantité d'eau évapotranspirée annuelle pour un ensemble de simulations réalisées sur une unité de la Base de Données Géographique des Sols de France pour une culture de blé (d'après Le Bas *et al.*, 2015).



4. Le cas de l'irrigation

Dans certaines régions à fort déficit hydrique, les pratiques agricoles actuelles incluent l'irrigation : c'est le cas, classiquement, de la culture de maïs grain ou fourrage dans le grand Sud-Ouest ou en Alsace par exemple. Pour évaluer le niveau de SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées » effectivement rendu par l'écosystème agricole, c.-à-d. en l'absence d'apports extérieurs d'eau (par irrigation), le calcul des indicateurs est réalisé à partir de l'analyse de simulations dites « artefact », où l'on simule la croissance de la culture et les flux d'eau associés sans apport d'eau par irrigation. Dans un deuxième temps, les niveaux de transpiration et de rendement en eau ainsi estimés sont comparés à ceux simulés pour les pratiques « actuelles », c.-à-d., avec irrigation sur maïs pour les systèmes comportant ce type d'usage du sol. La comparaison des indicateurs calculés « avec artefact » et « en situation réelle » permet d'évaluer la part de l'eau transpirée par la culture de rente fournie par l'irrigation (relativement à celle restituée par l'écosystème) et d'analyser les effets des pratiques d'irrigation sur les flux d'eau. Notons que, pour d'autres SE quantifiés à l'aide du modèle STICS, d'autres types d'artefacts ont été simulés (Cf. Annexe 8-A). L'analyse des SE relatifs à la capacité de l'écosystème agricole à stocker et restituer de l'eau est conduite sans la prise en compte de ces éventuels autres artefacts.

8.7.2.2. Stratégie retenue pour l'évaluation biophysique du SE

Les deux indicateurs retenus pour ce service sont :

- la quantité d'eau transpirée par la culture de rente
- le rendement en eau¹⁷.

Les trois grands types de questions auxquelles l'analyse cherche à répondre sont les suivants :

1. Quels sont les valeurs et/ou les ordres de grandeur des 3 indicateurs de SE ? Comment ces indicateurs varient-ils en fonction de la culture, de la séquence de culture (y.c. les couverts intermédiaires), des caractéristiques du sol, et des caractéristiques du climat ? Quelle est la distribution spatiale des niveaux de fourniture des deux SE évalués ?
2. Dans quelle mesure la présence de cultures intermédiaires détermine-t-elle le niveau de fourniture des SE ?
3. Quels sont les effets de l'irrigation sur les flux d'eau verte et bleue ?

Pour chaque indicateur, l'analyse est conduite selon trois axes en lien avec les déterminants principaux potentiels du SE :

- **L'effet de la séquence de culture** ; pour analyser cet effet, nous utilisons une typologie relative à la durée des séquences de culture : monocultures, rotations « de durée moyenne », c'est-à-dire inférieures ou égales à trois ans, rotations « de durée longue », c'est-à-dire supérieures ou égales à quatre ans ; nous analysons également l'effet de la présence ou non de cultures intermédiaires dans la rotation. Les figures 8-7-9 et 8-7-10 présentent l'organisation spatiale de ces typologies. On notera que les cultures intermédiaires ne sont pas présentes pour toutes les unités de simulation, notamment en Alsace, dans la région climatique dite « Bassin du Sud-Ouest » et sur les quelques unités de simulation localisées dans la région climatique de type « méditerranéen franc » (voir ci-dessous et figure 8-7-13), puisque ces régions sont essentiellement conduites en monocultures. Les rotations de durée intermédiaires sont localisées essentiellement au Nord de la région Centre et sur une ceinture Nord Bourgogne, Sud-Est de Champagne-Ardenne et Est de la Lorraine. Les rotations longues sont peu fréquentes.

- **L'effet du sol ou de ses propriétés** ; pour analyser le rôle du déterminant « sol », nous utilisons la caractéristique « Réserve Utile Maximale (RUM) du sol » (Figure 8-7-11). Celle-ci s'appuie sur la carte des sols au 1/100000, et l'un des déterminants importants de cette RUM est la texture de l'horizon de surface (Figure 8-7-12). La répartition de la RUM selon les classes « < 40 mm ; 40-80 mm ; 80-120 mm ; > 120 mm » a été déterminée sur la base de la distribution des RUM des unités pédoclimatiques sur lesquelles sont réalisées les simulations STICS. Elle permet de discriminer des sols à très faible réserve en eau (< 40 mm), localisés très

¹⁷ La quantité d'eau annuelle percolée à la base du sol et ruisselée à la surface du sol est également calculée et analysée comme variable intermédiaire pour interpréter le rendement en eau. Nous n'en présentons pas les résultats ici.

ponctuellement sur les unités de simulation en grandes cultures notamment en Languedoc-Roussillon, des sols à réserve en eau importante (> 120 mm) ; essentiellement dans le Nord de la France et dans le Sud-Ouest.

- **L'effet des caractéristiques du climat** ; pour analyser le rôle du climat, nous utilisons la typologie en huit grands types de climats proposée par Joly *et al.* (2010) (Figure 8-7-13 et Encadré 8-7-1). Cette typologie est construite sur l'analyse des précipitations annuelles et de la température de l'air annuelle. Pour notre analyse, elle discrimine, par exemple, le « climat du Bassin du Sud-Ouest » (type 7) où les cultures simulées par le modèle sont majoritairement de type Blé - tournesol - maïs et le « climat méditerranéen franc » (type 8) où la culture simulée est majoritairement du blé. On notera qu'il n'y a pas d'unité de simulation avec des cultures intermédiaires en climat méditerranéen franc (type 8) (Figures 8-7-9 et 8-7-13).

Ces trois typologies d'analyse ne sont pas indépendantes et, pour chaque indicateur, on restitue les résultats de l'analyse selon la ou les typologie(s) le(s) plus pertinente(s). On notera que les unités de simulation où l'on simule du maïs irrigué dans la séquence de culture sont localisées essentiellement en région Alsace, en climat semi-continentale (type 2), et en région Sud-Ouest, en climat océanique (type 4) et de climat « type du Sud-Ouest » (type 7) (Figure 8-7-14). Dans le Sud-Ouest, cela correspond de plus à des surfaces où la RUM est comprise en 40 et 80 mm.

Encadré 8-7-1. Les différents types de climat en France selon Joly *et al.* (2010)

Type 1 : les climats de montagne - Les influences montagnardes et/ou semi-continentales y sont prépondérantes, c'est-à-dire que le cumul de précipitation est élevé, avec une forte variabilité interannuelle des précipitations du mois de juillet. La température moyenne est inférieure à 9,4°C. Ce climat s'étend sur l'ensemble des zones de montagne.

Type 2 : le climat semi-continentale et le climat des marges montagnardes – ces climats regroupent les zones de périphérie montagnarde, avec des températures moins froides qu'en montagne, et des précipitations légèrement plus faibles. Ils s'étendent en Bourgogne, Alsace et Lorraine.

Type 3 : Le climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord - Les précipitations sont faibles (moins de 700 mm de cumul annuel), surtout en été, et la variabilité interannuelle des précipitations est faible. Les températures sont intermédiaires (environ 11°C en moyenne annuelle) mais leur variabilité interannuelle est élevée. Ce climat s'étend sur l'ensemble du Bassin Parisien, dans la vallée moyenne de la Loire, le Nord du Massif central et la vallée de la Saône.

Type 4 : Le climat océanique altéré (transition entre le climat océanique franc de type 5 et le climat océanique dégradé de type 3) - Les précipitations moyennes cumulées sont de l'ordre de 800 à 900 mm et tombent surtout l'hiver, l'été étant assez sec. La température moyenne annuelle est assez élevée (12,5°C). Ce climat s'étend, d'une part, le long d'une fine bande entre le Nord-Pas-de-Calais et la Normandie et, d'autre part, vers le sud-ouest du Massif central et le nord des Pyrénées.

Type 5 : Le climat océanique franc - Les précipitations sont annuellement abondantes (un peu plus de 1000 mm) : elles sont fréquentes en hiver, avec une forte variabilité interannuelle. L'été est également pluvieux mais les cumuls sont réduits. Les températures sont modérées, avec de faibles amplitudes annuelles. Ce climat s'étend en bordure de la mer du Nord, en Normandie, Bretagne, Vendée, Charentes.

Type 6 : Le climat méditerranéen altéré - Les précipitations moyennement abondantes (800-950 mm) mais réparties très inégalement au cours de l'année : l'automne et l'hiver sont humides (avec des variabilités interannuelles cependant), tandis que l'été est sec. La température moyenne annuelle est élevée, et l'été est toujours chaud. Ce climat s'étend sur les Alpes de Haute-Provence et la Drôme, en Ardèche, et entre les Pyrénées et l'Hérault.

Type 7 : Le climat du Bassin du Sud-Ouest - Les précipitations sont peu abondantes en cumul annuel (moins de 800 mm), avec une faible variabilité interannuelle ; leur intensité est faible l'hiver (précipitations océaniques) et plus élevées l'été (perturbations orageuses venant de l'Espagne ou du golfe de Gascogne). La température moyenne annuelle est élevée (supérieure à 13°C), avec une forte amplitude thermique annuelle. Ce climat est centré sur le bassin moyen de la Garonne/

Type 8 : Le climat méditerranéen franc - Les caractères climatiques de ce climat sont très tranchés, plus que dans chacun des sept précédents types. Le cumul annuel des précipitations est faible avec un été aride mais un hiver plutôt bien arrosé malgré un faible nombre de jours de pluie. Les températures annuelles sont élevées, associées à des jours froids rarissimes et des jours chauds fréquents. Ce climat s'étend en bordure de la Mer Méditerranée, en Camargue, dans la Vallée du Rhône jusque dans la Drôme.

Figure 8-7-9. Identification des unités pédoclimatiques EFESE-EA pour lesquelles des cultures intermédiaires ont été simulées dans la rotation

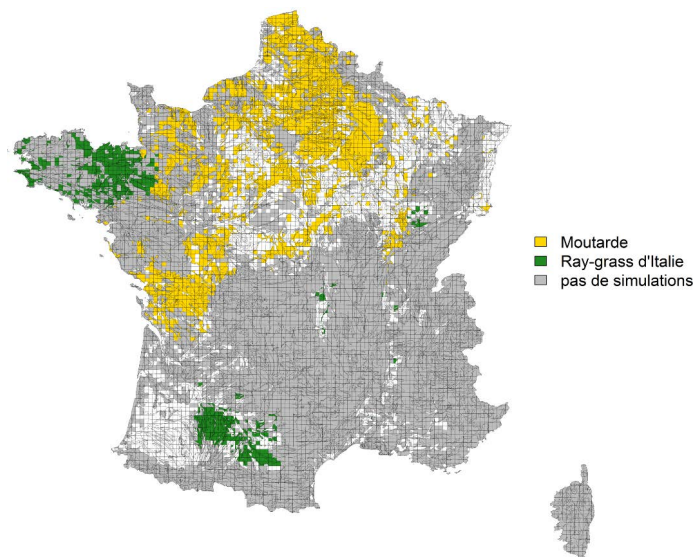


Figure 8-7-10a. Proportion de monocultures simulées dans chaque unité pédoclimatique EFESE-EA

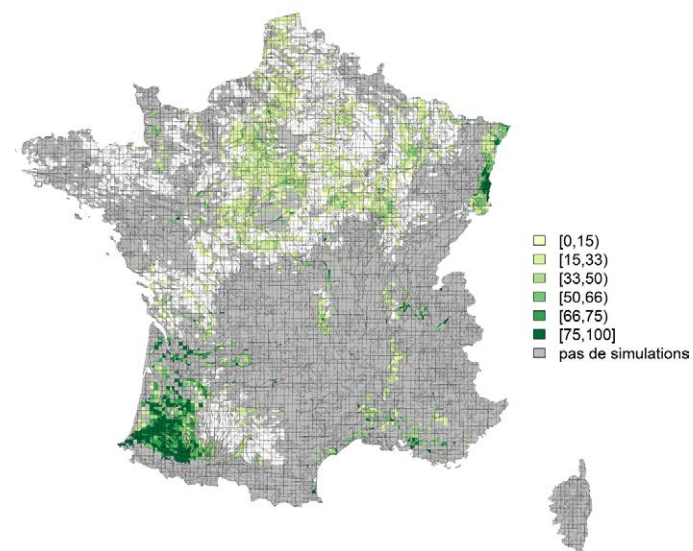


Figure 8-7-10b. Proportion de séquences de cultures simulées dont la durée est 2 à 3 ans dans chaque unité pédoclimatique EFESE-EA

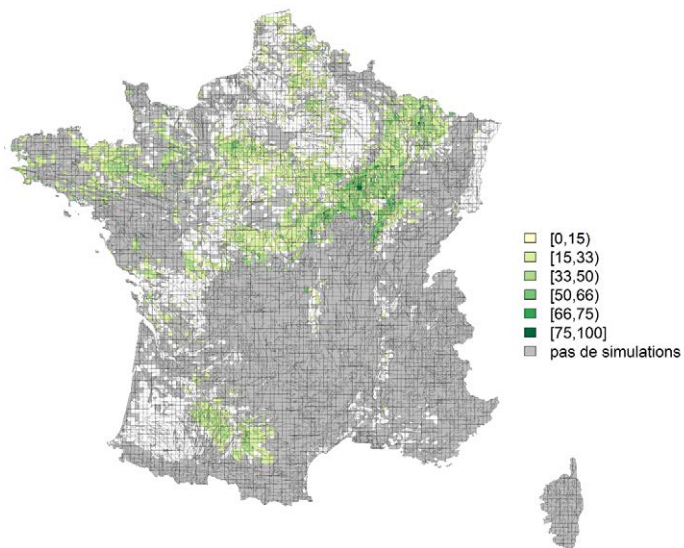


Figure 8-7-10c. Proportion de séquences de cultures simulées dont la durée est supérieure ou égale à 4 ans dans chaque unité pédoclimatique EFESE-EA

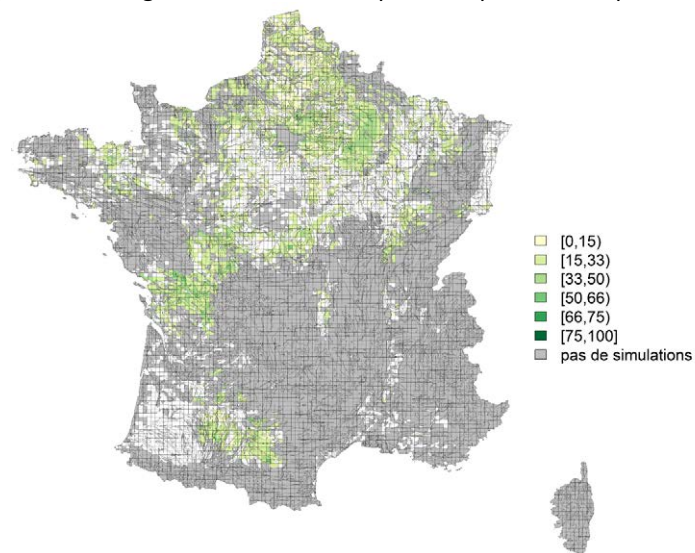


Figure 8-7-11. Réserve en Eau Maximale des sols (RUM) moyenne dans chaque unité pédoclimatique EFESE-EA

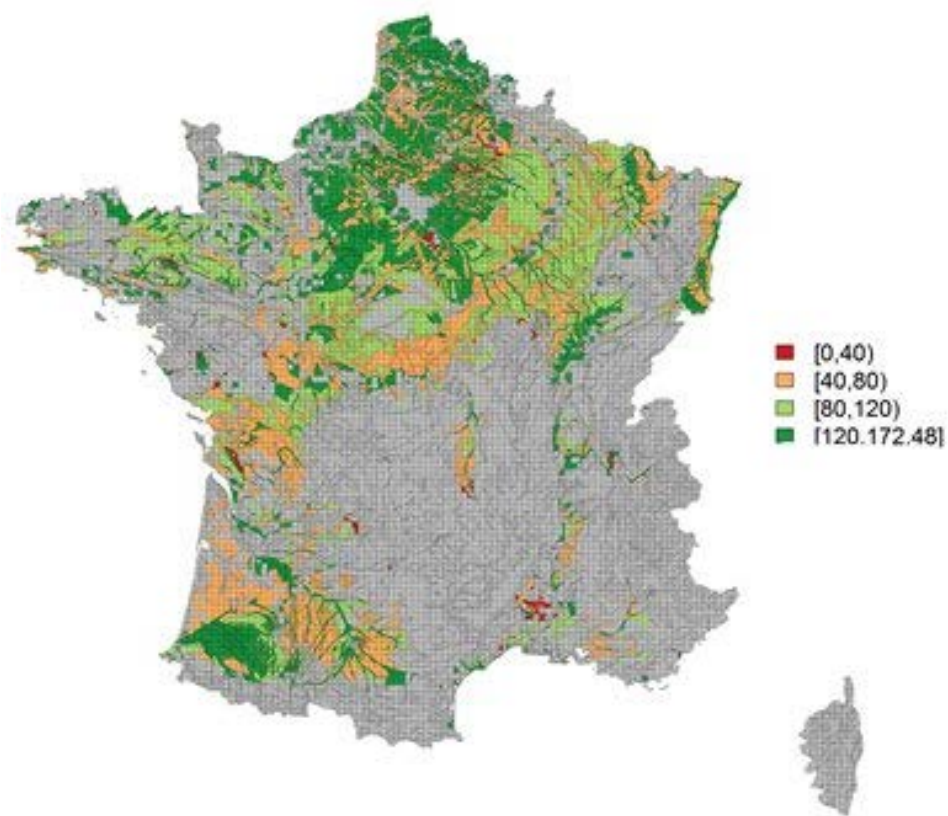
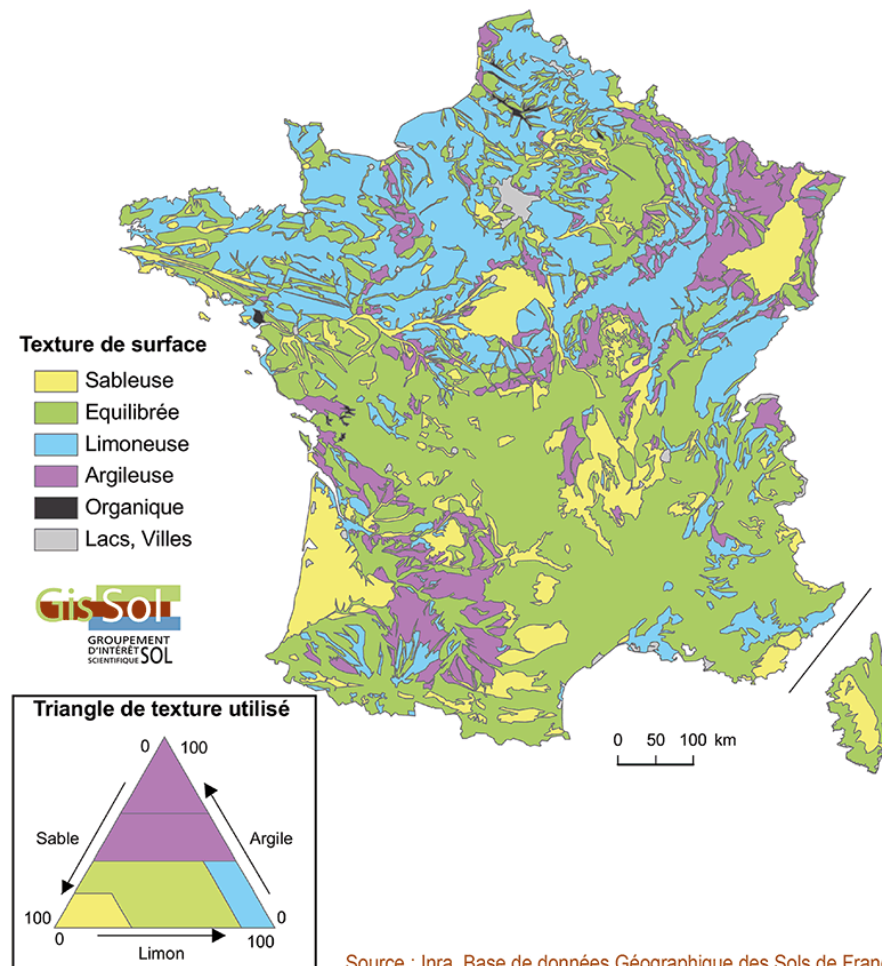


Figure 8-7-12. Les 5 classes de texture dominante de l'horizon de surface des sols de France (Inra, 1998)



Source : Inra, Base de données Géographique des Sols de France à 1/1 000 000, 1998.
<https://www.gissol.fr/donnees/cartes/la-texture-des-horizons-superieurs-du-sol-en-france-metropolitaine-1883>

Figure 8-7-13. Les 8 grands types de climat en France (Joly *et al.*, 2010)

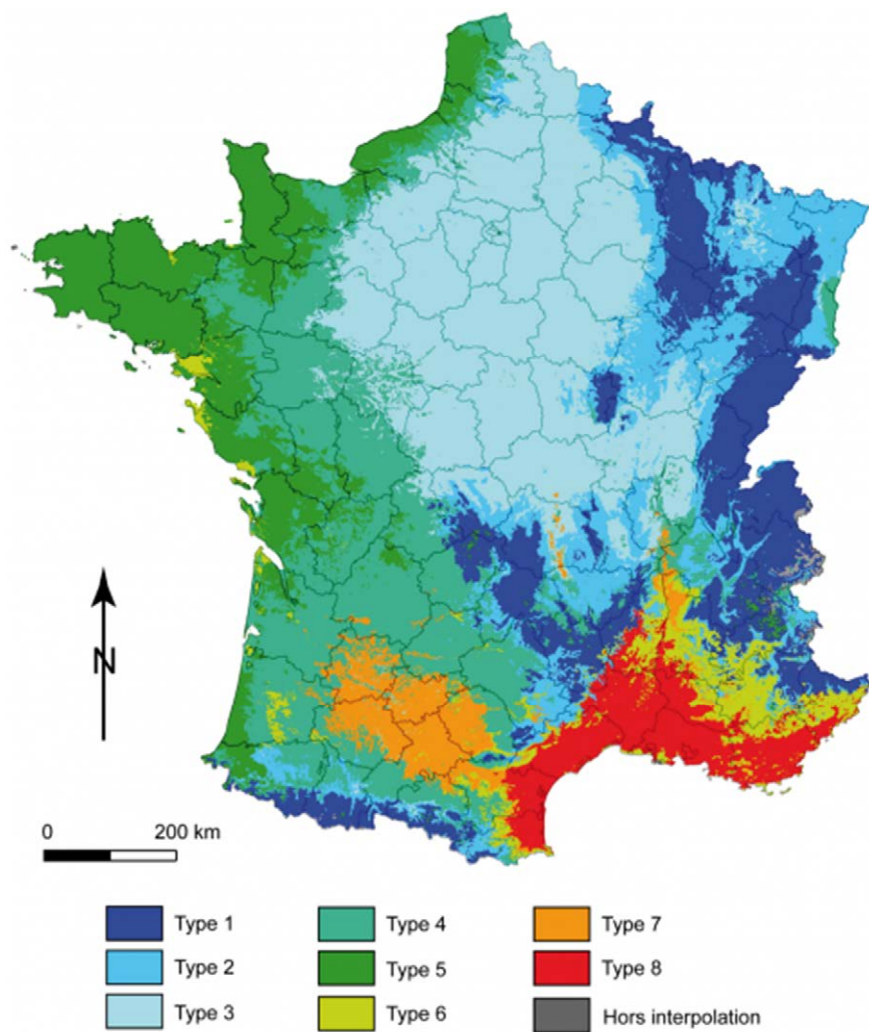
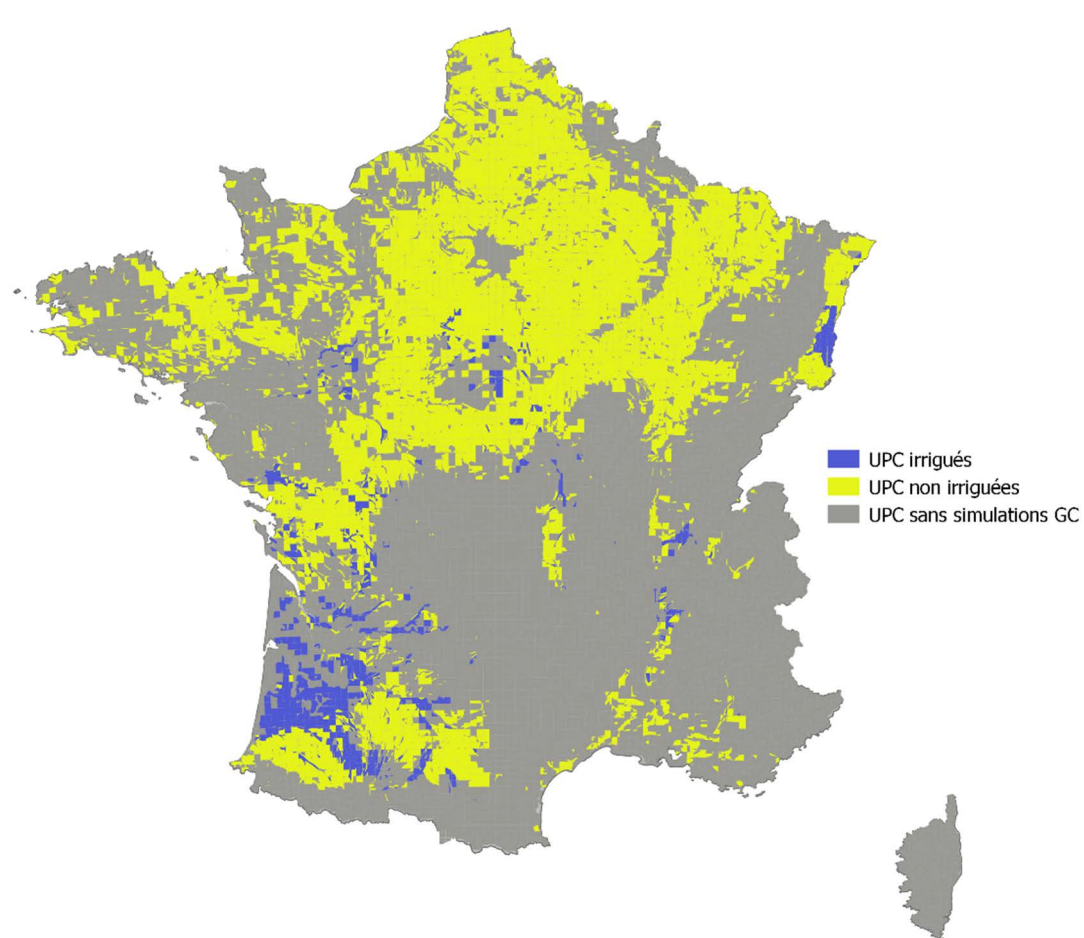


Figure 8-7-14. Unités pédoclimatiques EFESE-EA dans lesquelles l'irrigation du maïs est simulée



8.7.2.3. Analyse des résultats

Evaluation du niveau de SE effectivement rendu par l'écosystème

Nous présentons ci-après l'analyse des résultats des simulations réalisées dans les situations où les cultures sont non irriguées, y compris dans les zones où elles sont classiquement irriguées (c'est le cas, par exemple, du maïs dans la région Sud-Ouest, sous les climats de types 4 à 7). Les pratiques agricoles autres que l'irrigation (pratiques de fertilisation, par exemple) ne sont pas modifiées (simulation factorielle, « toutes choses égales par ailleurs ») (Cf. Annexe 8-A).

1. SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées »

Sur l'ensemble des UPC considérées, la quantité moyenne d'eau transpirée annuellement par la culture de rente varie de 63 à 295 mm (moyenne de 153 mm).

La transpiration de la culture de rente exprimée en fonction de la RUM varie de 94 à 182 mm en moyenne selon les classes de RUM, pour l'ensemble des unités pédoclimatiques (Figure 8-7-15¹⁸), avec des valeurs extrêmes de 62 mm à 300 mm. Elle est d'autant plus faible que la RUM du sol est faible. On constate également que la variabilité de l'indicateur (exprimée par la différence entre les espaces interquartiles des box-plots), est du même ordre de grandeur pour toutes les valeurs de RUM (de 17 à 20 mm), même si les valeurs extrêmes les plus basses concernent les très faibles RUM et les valeurs extrêmes les plus hautes concernent les sols qui présentent une RUM élevée.

L'expression de la transpiration en fonction de la séquence de culture montre que celle-ci est de l'ordre de 150 mm en moyenne quelle que soit la longueur de la séquence, mais que cet indicateur est le plus variable pour les monocultures, et le moins variable pour les séquences de longueur intermédiaire. Il est important de noter que ce SE étant évalué en moyenne annuelle sur une période de 30 ans pendant laquelle les séquences de culture sont enchaînées, son niveau est directement lié à la nature de la culture ou des cultures composant la séquence. Ainsi, par exemple, toutes choses égales par ailleurs, le niveau moyen de transpiration associée à une monoculture de maïs sera différent de celui associé à une rotation blé-tournesol.

La transpiration dépend peu du type de climat : elle varie de 140 à 160 mm en moyenne selon les types de climat ; on notera cependant que pour le climat de type 7 (« climat du Bassin du Sud-Ouest »), la transpiration est notablement plus élevée : ce point est à mettre en relation avec la nature des cultures réalisées (comme par exemple le maïs) et les caractéristiques de ce type de climat, où les précipitations sont plus abondantes en été qu'en hiver, et où la température est plus élevée. Ces conditions météorologiques sont donc favorables à la conduite de cultures de printemps (Joly *et al.*, 2010).

L'analyse spatiale des valeurs de la transpiration nuance les observations par type de climat : elle est en effet à la fois la plus élevée et la plus faible dans le Sud-Ouest, où le climat peut être à la fois « océanique altéré » (type 4) ou « du Sud-Ouest » (type 7). La transpiration est également ponctuellement plus élevée en Alsace, et dans le nord du Bassin Parisien, où les précipitations sont importantes (Figure 8-7-16).

¹⁸ Pour les figures 8-7-15, -17, -19, -21, -22 et -24, les box-plots sont construits de la manière suivante :

- la valeur centrale (trait gras) du graphique représente la médiane ;
- les bords inférieurs et supérieurs du rectangle symbolisent respectivement la valeur maximale du 1^e et du 3^e quartile (50 % des observations se trouvent à l'intérieur du rectangle) ;
- les extrémités des moustaches symbolisent la distribution des 95 % des observations situées entre moins 2 écarts types et plus deux écarts types de la moyenne.
- la moyenne ne figure pas dans ces graphes et est citée uniquement dans le texte

Figure 8-7-15. Transpiration annuelle moyenne de la culture de rente (en mm) évaluée pour des systèmes de culture sans irrigation (y compris dans les UPC où les cultures sont classiquement irriguées)

Données présentées en fonction de la Réserve en eau Utile Maximale du sol (a.), de la longueur de la séquence de culture (b.) et du type de climat (c.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat ; le climat de type 0 représente quelques unités de simulation où la définition du climat n'était pas possible)

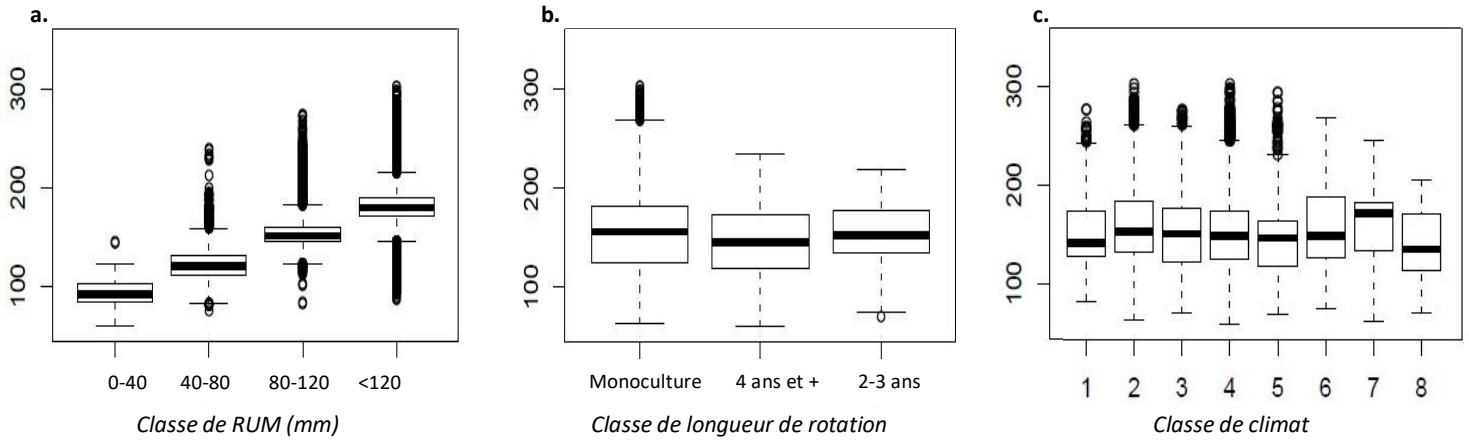
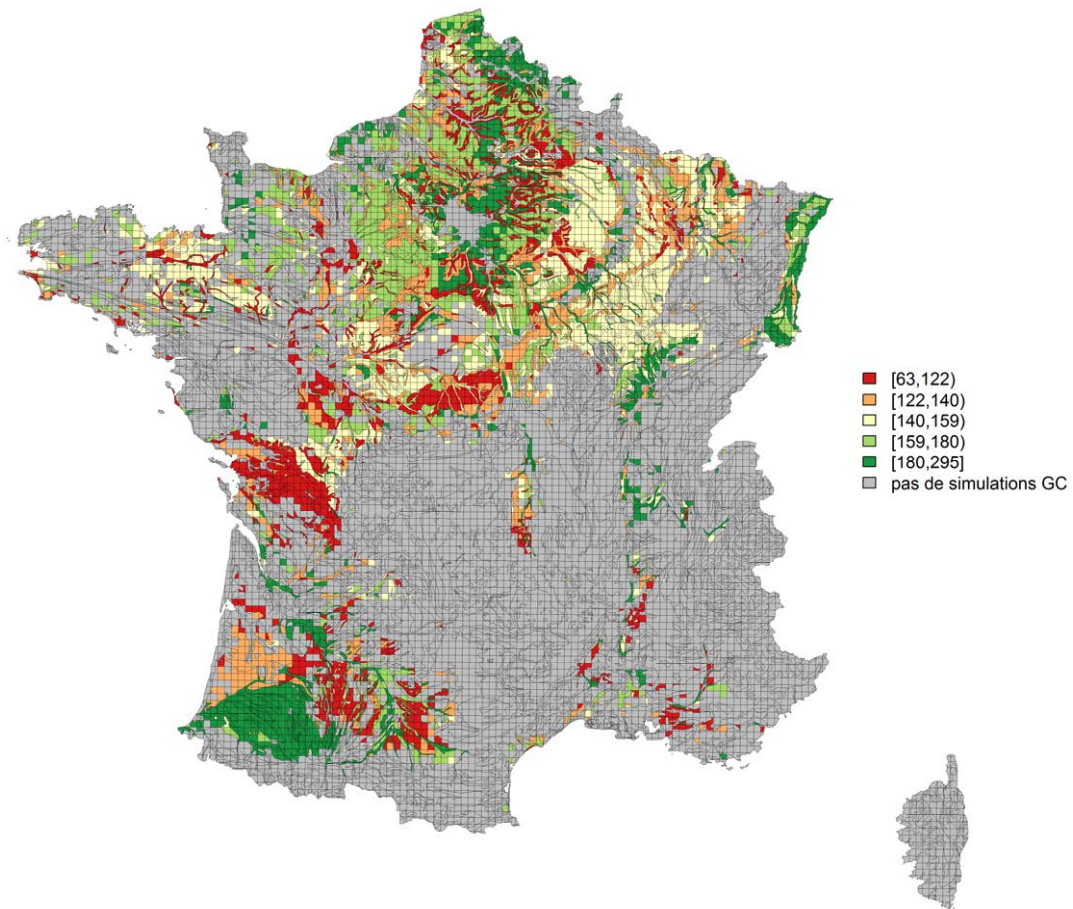


Figure 8-7-16. Carte de la transpiration annuelle moyenne des cultures de rente (en mm) des systèmes de culture sans irrigation (y compris dans les UPC où les cultures sont classiquement irriguées)

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-EA
 Unités pédoclimatiques grisées = pas de simulation "grandes cultures"
 Les classes de valeurs correspondent à des quintiles.



2. SE « stockage et restitution de l'eau bleue »

Toutes UPC "grandes cultures" confondues, le rendement en eau annuel varie de 55 à 1119 mm/ha, avec une moyenne de 315.

Le **rendement en eau** est d'autant plus élevé que la RUM est faible : il est de l'ordre, en moyenne, de 300 mm, pour des RUM supérieures à 120 mm, et de l'ordre de 430 mm pour les RUM inférieures à 40 mm (Figure 8-7-17). Les sols les plus épais peuvent stocker plus d'eau : ils sont ainsi favorables à la transpiration et à la production de biomasse, mais l'évaluation de l'évaporation montre qu'ils sont également plus sensibles à la perte en eau par évaporation, ce qui concourt *in fine* à un rendement en eau plus faible sur ces types de sol. On note également que la variabilité du rendement en eau est importante, avec des espaces interquartiles de 130 mm (pour une RUM comprise entre 40 et 80 mm) à 240 mm (pour une RUM inférieure à 40 mm).

L'expression du rendement en eau en fonction de la longueur de la séquence de culture montre que celui-ci est de l'ordre de 300 mm en moyenne ; il est d'autant plus variable que la séquence est courte.

Le rendement en eau moyen en fonction du climat est particulièrement contrasté, de 200 mm en moyenne pour le climat « du Bassin du Sud-Ouest » (type 7) jusqu'à 500 mm en moyenne pour le climat montagnard (type 1), où les précipitations élevées, les températures faibles, et les sols courts sont favorables à la percolation de l'eau à la base du sol, ce que confirment par ailleurs les évaluations de la quantité d'eau drainée à la base du sol.

L'analyse spatiale des valeurs du rendement en eau montre que celui-ci est faible en Alsace, en de nombreux points du Bassin Parisien, au Nord de la région Poitou-Charentes, et ponctuellement dans le Bassin du Sud-Ouest. Il peut être ponctuellement élevé en Bretagne et au Sud de la Garonne, dans des unités de simulation où la RUM est localement élevée (Figure 8-7-18).

On retiendra donc, aussi bien pour l'indicateur « transpiration de la culture de rente entre le semis et la récolte » que pour l'indicateur « rendement en eau », que la typologie basée sur la Réserve en Eau Utile Maximale des sols est pertinente pour interpréter les résultats : la transpiration est d'autant plus élevée et le rendement en eau d'autant plus faible en moyenne que la RUM est élevée. La typologie basée sur l'analyse du climat, si elle s'avère utile pour la description de l'indicateur « rendement en eau », est moins pertinente pour l'analyse de la transpiration de la culture de rente. La longueur de la rotation a peu d'effet sur les valeurs médianes de la transpiration et du rendement en eau, mais, pour ces deux indicateurs, la variabilité tend à être d'autant plus élevée que la rotation est courte. Enfin, les valeurs des indicateurs sont difficiles à interpréter dans une typologie par classe de climat, mais on note que le rendement en eau est beaucoup plus sensible aux types de climat que ne l'est la transpiration.

Figure 8-7-17. Rendement en eau annuel moyen évalué pour des systèmes de culture *sans irrigation* (y compris dans les unités pédoclimatiques où les cultures sont classiquement irriguées)

Données présentées en fonction de la Réserve en eau Utile Maximale du sol (a.), de la longueur de la séquence de culture (b.) et du type de climat (c.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat ; le climat de type 0 représente quelques unités de simulation où la définition du climat n'était pas possible)

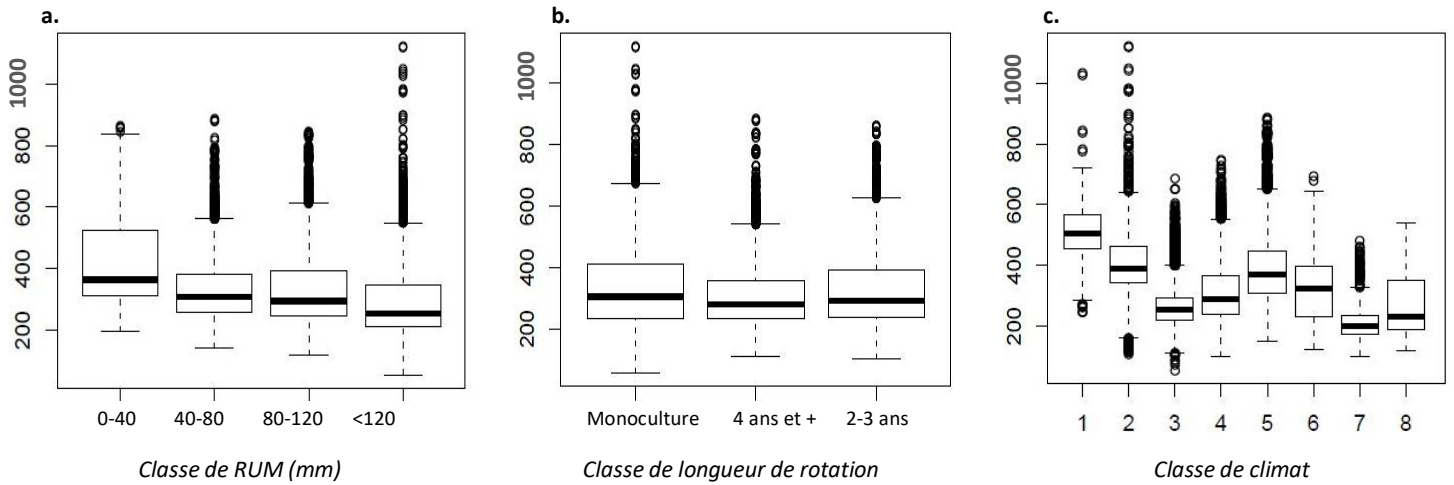
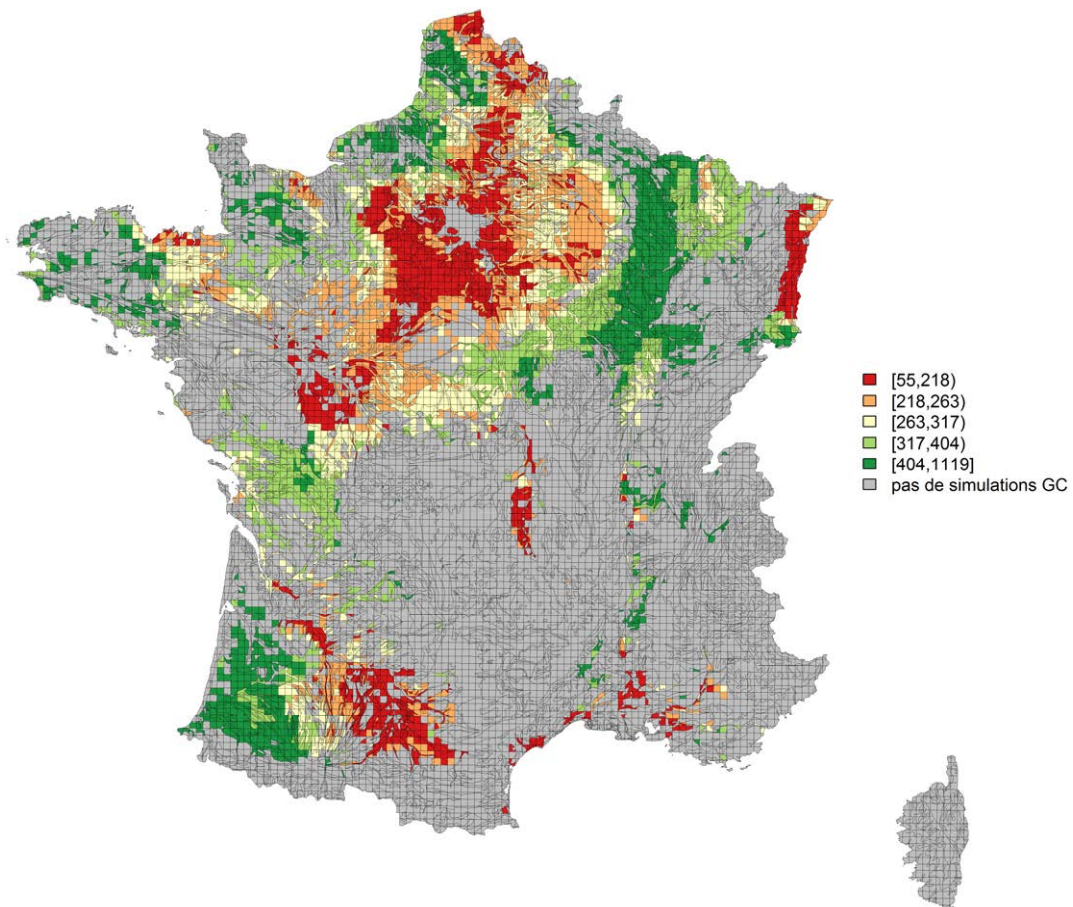


Figure 8-7-18. Carte du rendement en eau annuel moyen évalué pour des systèmes de culture *sans irrigation* (y compris dans les unités pédoclimatiques où les cultures sont classiquement irriguées)

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-EA
 Unités pédoclimatiques grisées = pas de simulation "grandes cultures"
 Les classes de valeurs correspondent aux quintiles.



Evaluation des effets de l’irrigation sur les flux d’eau dans l’écosystème

Pour analyser les effets de l’irrigation sur les flux d’eau, on compare ici les niveaux de transpiration et rendement en eau des écosystèmes avec du maïs irrigué, avec les niveaux de SE effectivement rendu par ces mêmes écosystèmes agricoles c.-à-d. les niveaux de transpiration et de rendement en eau permis par l’écosystème sans irrigation.

On rappelle ici que, dans le plan de simulation d’EFESE-écosystèmes agricoles, par souci de simplification, seul le maïs est simulé avec une irrigation. Du fait du manque de données sur les dates et doses d’irrigation par année et par situation pédoclimatique, l’irrigation est simulée selon un protocole automatique dans le modèle STICS : elle est déclenchée automatiquement en fonction d’un indicateur de stress hydrique, de manière à couvrir 85% des besoins de la culture (Cf. Annexe 8-A). La figure 8-7-14 présente les unités de simulation contenant des séquences de culture avec du maïs irrigué. Les résultats des simulations des systèmes de culture actuels (avec irrigation) sont présentés en complément en fin de section 8.7.

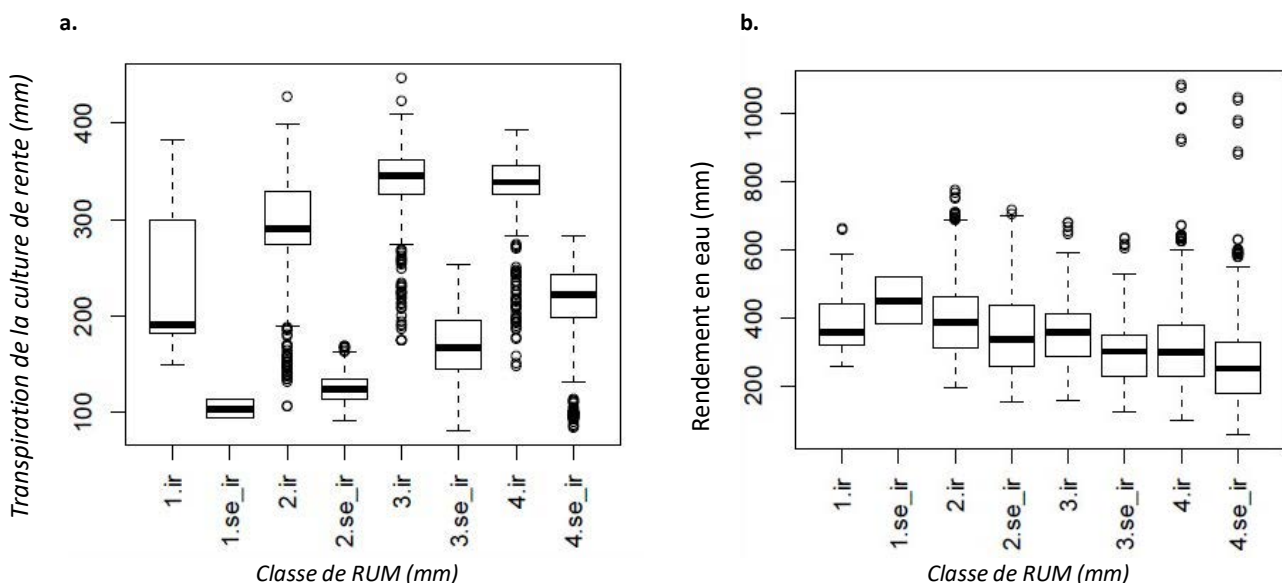
Les valeurs de la transpiration de la culture de rente sont significativement plus élevées pour les simulations avec irrigation des maïs de la séquence de culture, que pour les simulations où ils ne sont pas irrigués. Les différences entre les valeurs médianes des situations avec irrigation et sans irrigation sont les plus élevées pour les RUM intermédiaires (Figure 8-7-19a) : cet effet concerne probablement les unités de simulation localisées dans le Sud-Ouest.

Les différences de valeurs de rendement en eau, entre les simulations avec et sans irrigation sont faibles, avec des différences sur les valeurs médianes par classe de RUM de l’ordre de quelques dizaines de mm (Figure 8-7-19b) : ces différences ne sont cependant pas négligeables en termes de recharge des aquifères. Excepté pour les valeurs de RUM inférieures ou égales à 40 mm, le rendement en eau est plus faible sans irrigation. Ces différentiels faibles laissent entendre que l’eau d’irrigation est généralement « non perdue », et effectivement utilisée pour la production de biomasse. Cependant ce faible effet de l’irrigation sur le rendement eau est aussi lié au fait que l’irrigation simulée est une irrigation optimisée pour couvrir 85 % des besoins en eau de la plante (Cf. section 8.7.2.3).

Figure 8-7-19. Valeurs de la **transpiration de la culture de rente (a.)** et du **rendement en eau annuel (b.)** selon les classes de RUM

Le label « ir » indique que les rotations ont été simulées avec de l’irrigation sur les cultures de maïs (systèmes de cultures actuels) ; le label « se-ir » indique que les rotations ont été simulées sans irrigation, même pour les unités de simulation où le maïs est classiquement irrigué.

(On notera que ces box-plots « ci » sont différents de ceux présentés aux figures 8-7-15, 8-7-17, 8-7-19 et 8-7-21 car ils ne concernent que les unités de simulation comportant du maïs irrigué dans le système de culture actuel)



On retiendra donc que l'apport de l'irrigation sur maïs a des conséquences contrastées pour les deux flux d'eau analysés. L'irrigation influe peu, en moyenne, le rendement en eau moyen annuel (flux moyen d'eau bleue). Elle a cependant une influence plus marquée sur les flux d'eau transpirée par la culture de rente, qui est significativement plus élevée en situation d'irrigation. **Il convient cependant de tempérer éventuellement ces résultats au regard des choix de modélisation et simulation du dispositif de l'étude.** En effet, dans le dispositif de simulation utilisé, la représentation d'une irrigation optimisée pour réduire le stress hydrique du maïs, ne prend pas en compte les contraintes sociotechniques de fonctionnement de l'irrigation au sein des exploitations agricoles. Elle tend, par définition, à maximiser l'efficacité des apports d'eau vis à vis des besoins des cultures irriguées et à très fortement limiter les flux d'eau bleue. Les perspectives de travaux de recherche pour lever ces limites de l'analyse sont présentées dans la section suivante.

Couverture des besoins en eau des cultures par le SE de stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées

Pour les cultures conduites sans irrigation, le SE couvre la totalité des besoins en eau des cultures (correspondant à leur transpiration réelle). Pour les cultures irriguées, ces besoins en eau sont couverts par deux « sources » d'eau : ce SE et l'eau apportée par irrigation. Pour estimer le poids relatif de ces deux sources d'eau pour les cultures irriguées, dans cette étude le maïs, le ratio entre la quantité d'eau annuelle apportée par l'écosystème (quantité d'eau transpirée – quantité d'eau apportée par irrigation) et la quantité d'eau transpirée a été estimé¹⁹. L'estimation de ce ratio permet d'évaluer la contribution du SE "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées" à la couverture des besoins en eau du maïs irrigué. Nous faisons ici l'hypothèse que l'irrigation n'est conduite que sur la culture de rente, entre la date de semis et la date de récolte (Figure 8-7-20). On constate que la contribution du SE aux besoins en eau du maïs est en moyenne de l'ordre de 60 % pour le climat de type 2 (semi-continentale), c'est-à-dire pour les maïs irrigués d'Alsace, où les précipitations sont en moyenne faibles en juillet. En revanche, dans le Sud-Est, pour les quelques unités de simulation en climat de type 8 (méditerranéen franc), présentant un été classé aride, la contribution du SE aux besoins en eau du maïs irrigué est en moyenne de 10 %. En région Sud-Ouest, pour les climats de type 4 (océanique altéré) et 7 (climat du Bassin du Sud-Ouest), cette contribution est de l'ordre de 40 %. Le rôle du SE est de l'ordre de 25 % en moyenne pour les sols à texture sableuse ou à texture très argileuse, reconnus pour leur faible Réserve Utile Maximale. En effet, seule une faible quantité d'eau peut être stockée dans ce type de sol, et, en période estivale, au moment du maximum de transpiration, la quantité d'eau résiduelle présente dans le sol n'est plus accessible aux plantes.

Notons que dans environ 20 % des UPC, l'irrigation couvre en moyenne la quasi-totalité des besoins en eau des cultures (UPC en rouge sur la Figure 8-7-21). Les déterminants biophysiques et facteurs exogènes de ces situations restent à analyser précisément.

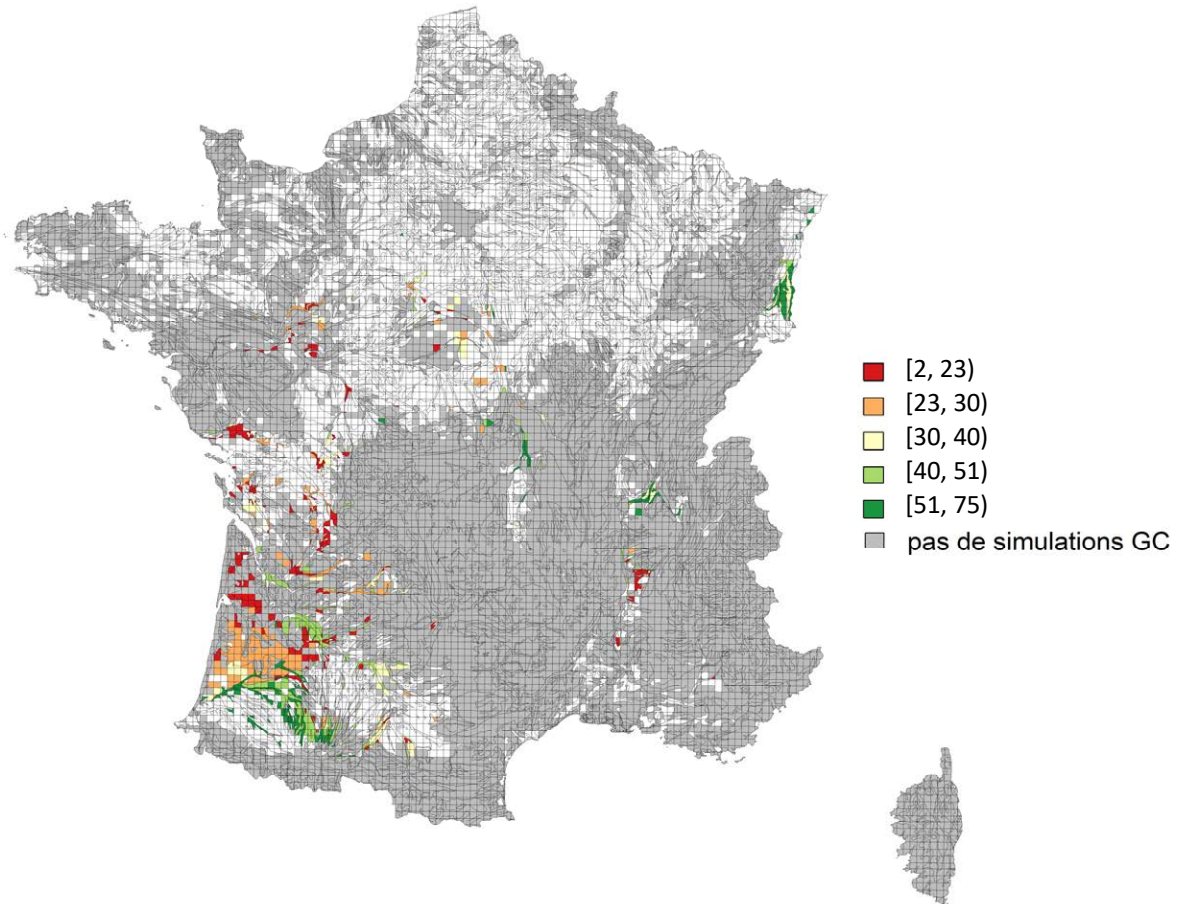
Notons que l'analyse du poids relatif du SE dans la couverture des besoins en eau du maïs irrigué est réalisable ici parce que les apports d'eau d'irrigation sont optimisés en fonction des besoins en eau de la culture et, de ce fait, comme mentionné dans la section précédente, ont un effet négligeable sur les flux d'eau bleue. L'eau apportée par l'irrigation est donc essentiellement transpirée par la culture et très peu perdue par percolation au delà du système racinaire.

¹⁹ Le calcul du ratio est réalisé pour chaque année de maïs puis la moyenne des ratios annuels sur les années de maïs est calculée.

Figure 8-7-20. Carte de la contribution du SE "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées" à la couverture des besoins en eau de la culture de rente (maïs), pour les unités de simulation portant des séquences de culture avec irrigation.

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-EA

Unités pédoclimatiques grisées = pas de simulation "grandes cultures"



Influence de la présence de cultures intermédiaires sur le niveau de SE

On compare ici les valeurs des indicateurs de transpiration et de rendement en eau calculés pour les systèmes de culture non irrigués (y compris dans les zones où les cultures sont classiquement irriguées) comportant des couverts intermédiaires, et pour ces mêmes situations de production (simulations) sans culture intermédiaire. Nous souhaitons ainsi discuter des deux hypothèses suivantes :

- La présence de cultures intermédiaires influe peu sur la transpiration de la culture de rente, car elle ne transpire pas aux mêmes périodes que la culture de rente ;
- La présence de cultures intermédiaires diminue le rendement en eau, car elle transpire pour assurer sa production de biomasse.

On rappelle que, dans le dispositif de simulation d'EFESE-écosystèmes agricoles, les couverts intermédiaires sont simulés pour les seules unités pédoclimatiques incluses dans une zone vulnérable telle que définie en 2012 dans le cadre de la directive Nitrates (Cf. Annexe 8-A). Ces cultures intermédiaires sont semées et détruites suivant les dates médianes régionales observées.

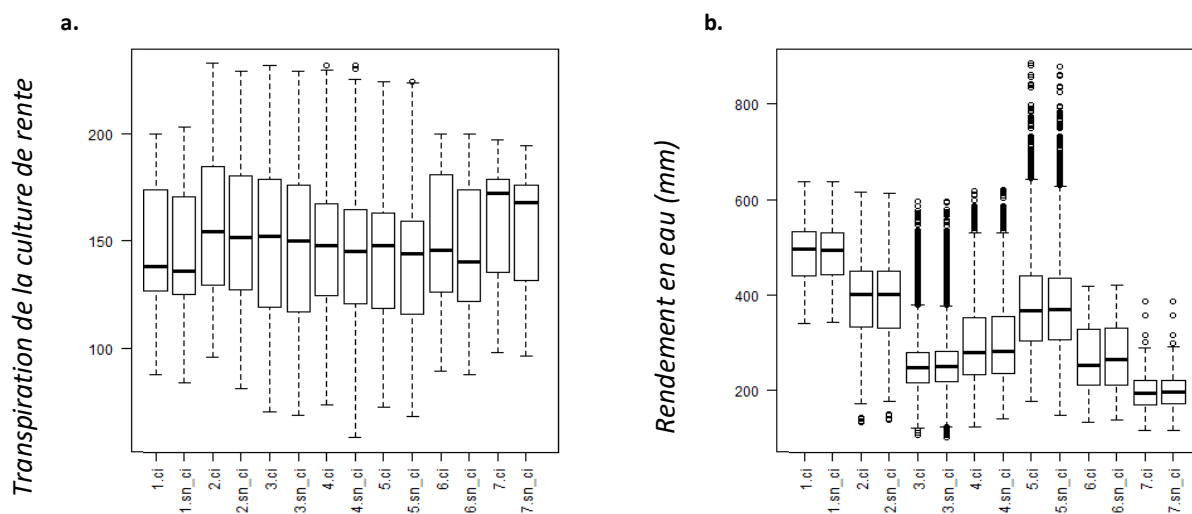
Conformément à notre première hypothèse, la présence d'une culture intermédiaire n'a pas d'influence, en moyenne, sur la transpiration moyenne des cultures de rente des rotations simulées (Figure 8-7-21a). Cependant, sous certains climats (par exemple, climat de type 2 ou climat de type 4), le 1^{er} quantile est inférieur pour les systèmes de culture qui présentent des cultures intermédiaires que pour ceux qui n'en présentent pas : il est possible que la teneur en eau du sol au moment du semis de la culture de rente ait été plus faible lorsque celle-ci a été précédée d'une culture intermédiaire, et que, en conséquence, la croissance des cultures en début de cycle de végétation ait été plus délicate. Ces situations restent néanmoins marginales à l'échelle de l'ensemble des unités de simulation.

En revanche, et contrairement à notre seconde hypothèse, la présence d'une culture intermédiaire n'affecte pas, en moyenne le rendement en eau annuel (Figure 8-7-21b). Des modalités nouvelles de gestion des cultures intermédiaires – par exemple des cultures intermédiaires de durée plus longues – pourraient être testées dans des applications futures et conduire à une remise en cause de cette conclusion.

Figure 8-7-21. Valeurs de la **transpiration de la culture de rente** (a.) et du **rendement en eau annuel** (b.) selon les classes de climat

Le label « ci » indique que les rotations ont été simulées avec des couverts intermédiaires avant les cultures de printemps (sauf entre deux maïs) ; le label « sn-ci » indique que les rotations ont été simulées sans culture intermédiaire

(On notera que ces box-plots « ci » sont différents des boxplots présentés aux figures 8-7-15C et 8-7-17C puisqu'ils ne concernent que les systèmes de culture en zone vulnérable ; on notera également qu'il n'y a naturellement pas de box-plots pour le climat de type 8 – type méditerranéen – pour lequel il n'y a pas de zones vulnérables)



8.7.2.3. Discussion et perspectives

Axes de discussion méthodologiques

Choix des limites de l'écosystème

Dans le cadre de cette étude, nous avons posé comme limite inférieure de l'écosystème, la base de la zone racinaire. Pour l'évaluation SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées », évalué par l'indicateur « transpiration de la culture de rente », ce choix est légitime. Pour l'évaluation du SE « stockage et restitution de l'eau bleue », l'indicateur « rendement en eau » tel qu'il est défini dans notre étude décrit uniquement la quantité d'eau qui sort de la zone racinaire sous un écosystème agricole ; il ne constitue donc pas un rendement en eau au sens hydrologique ou hydrogéologique du terme, lequel nécessiterait la prise en compte de flux latéraux de surface (ruissellement) ou de profondeur (écoulements hypodermiques) sur l'ensemble de la zone non saturée (pas uniquement la zone racinaire) et de la zone saturée. Cette prise en compte nécessiterait un couplage avec un modèle hydrologique, sur une zone d'étude qui ne serait pas restreinte à un écosystème agricole mais serait étendue à l'ensemble d'un bassin versant. En conséquence, et comme nous l'avons déjà précisé au paragraphe 8.7.1, la localisation géographique de la quantité d'eau restituée par un ou des écosystèmes d'un bassin versant serait à préciser.

Choix d'une évaluation des indicateurs par modélisation

Pour évaluer les SE de « stockage et restitution de l'eau », nous avons fait le choix d'une approche par modélisation, dont plusieurs composantes sont discutables :

- Le modèle de culture mise en œuvre (STICS) s'appuie sur un calcul du bilan hydrique par une approche de type réservoir (cf. paragraphe 8.7.2.1). Cette proposition est légitime pour des évaluations des flux d'eau dans la zone racinaire à des échelles nationale et régionale. Elle serait à prendre avec précaution pour des échelles plus fines, typiquement pour des échelles parcellaires, mais également, dans notre étude, pour certaines unités de simulation de faible surface. En effet, cette approche de type réservoir ne tient pas compte des processus spatiaux de ruissellement, que l'on peut effectivement négliger pour l'évaluation de l'indicateur « transpiration de la culture de rente », mais dont la non-prise en compte est plus discutable dans certaines situations pour l'indicateur « rendement en eau », par exemple lorsque les sols sont très peu épais, ou connus pour être battants. Cependant, cette non-prise en compte du ruissellement affecte essentiellement l'évaluation du niveau de SE actuel rendu ; dans l'hypothèse où les pratiques agricoles évolueraient vers une couverture des sols par la végétation plus fréquente et plus étendue (cultures intermédiaires, semis sous couvert, cultures associées, etc.), le ruissellement devrait être minimisé et le choix d'une modélisation en 1D devrait présenter moins de conséquence sur l'évaluation du niveau de SE rendu.
- Les apports d'eau à la culture dans le schéma de modélisation que nous avons retenue sont dus à la restitution d'eau de pluie et d'irrigation. On néglige donc, dans cette approche, des apports d'autres origines, par remontées capillaires ou par ascenseur hydrique, alors même que ceux-ci peuvent constituer des apports non négligeables à la culture (cf. paragraphe 8.7.1.3). De même que précédemment, ce choix est légitime pour des évaluations nationale ou régionale, mais serait discutable pour une évaluation à l'échelle locale.
- L'évaluation de l'effet de l'irrigation est basée sur l'utilisation du modèle dans une configuration où l'irrigation est optimisée pour couvrir 85 % des besoins en eau de la plante. Il conviendrait donc de confronter les quantités d'eau apportées automatiquement par l'irrigation pour chaque unité de simulation, aux quantités d'eau réellement apportées par les agriculteurs dans les parcelles concernées. Dans le même ordre d'idées, il serait également souhaitable de comparer les périodes d'irrigation simulées aux périodes réelles d'apport d'eau. Cette confrontation nécessiterait de ne pas analyser uniquement des moyennes interannuelles des valeurs des indicateurs, comme cela a été pratiqué dans cette étude, mais d'analyser finement une ou quelques années climatiques pour lesquelles des données mesurées de quantité d'eau d'irrigation sont disponibles. De plus, le mode d'irrigation automatique du modèle STICS mis en œuvre dans cette étude est conçu pour assurer la germination ; il peut ainsi arriver ponctuellement que, en situation de sol très sec, le modèle simule un apport d'eau d'irrigation, qui conduise à simuler une germination plus précoce en situation irriguée qu'en situation non irriguée. L'irrigation est ensuite simulée pour couvrir 85 % des besoins en eau de la plante à partir du 15 juin. Aussi, si après une germination permise par l'irrigation, la demande évaporatoire est

très élevée et que la teneur en eau du sol diminue ensuite très fortement jusqu'en deçà du point de flétrissement permanent avant la date de redémarrage de l'irrigation, la plantule ne se développe pas et meurt. Le simulation de ce type d'irrigation a ainsi conduit à une production de biomasse nulle, alors qu'une simulation sans irrigation peut conduire à germination plus tardive et à une production de biomasse faible mais non nulle (Le Bas *et al.*, 2015). Cet effet pernicieux ne s'observerait pas en conditions réelles, où l'agriculteur adapterait sa pratique d'irrigation aux conditions du milieu et à leur évolution supposée.

- Le module de bilan hydrique de STICS est paramétré à l'aide des propriétés hydriques des sols qui sont évaluées à partir de règles expertes sur la base des informations qualitatives contenues dans la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000 (Le Bas *et al.*, 1997). Les incertitudes sur ces propriétés, bien que non évaluées à ce jour, sont potentiellement élevées (Le Bas, 2016). L'évaluation du service rendu par un calcul moyen sur une trentaine d'années minimise l'effet *cumulé* des incertitudes liées aux propriétés des sols et de la variabilité interannuelle du climat. Elle ne s'affranchi cependant pas des incertitudes liées aux caractéristiques des sols, qui ne sont renseignées que de façon qualitative dans la base. D'ici un an, une couverture quasi-exhaustive de la France par la carte des sols au 1/250 000 - qui contient des informations quantifiées sur le type de sol et certaines de ses caractéristiques, notamment la teneur en argile et la teneur en matière organique – permettra une évaluation plus précise des propriétés hydriques des sols et réduira l'incertitude sur les sorties du modèle. Enfin, les propriétés hydriques des sols ont été considérées comme constantes au cours du temps donc au cours des trente années de simulation. Pourtant, ces propriétés peuvent évoluer significativement à l'échelle de la décennie lors d'un changement de système de culture (Bardy *et al.*, 2014) : la RUM du sol serait ainsi à réévaluer de façon récurrente au cours des simulations, en fonction de l'historique des séquences culturales et des pratiques de travail du sol des années précédentes.

Choix des typologies d'analyse

Pour analyser les indicateurs des SE de « stockage et restitution de l'eau », nous avons choisi trois typologies basées sur i) la valeur de la Réserve Utile Maximale, ii) la longueur de la séquence de rotations, et iii) le type de climat. Un retour sur le choix de ces typologies permet d'énoncer les points suivants :

- Le choix des classes de RUM permet d'identifier des valeurs différenciées des indicateurs calculés et, à cet égard, semble pertinent.

- La longueur de rotation représente une information très synthétique sur le système de culture ; le choix de cette typologie s'est avéré pertinent dans la mesure où nous avons analysé des informations intégrées sur 30 ans. Une autre typologie potentiellement informative pourrait s'appuyer sur la proportion respective des cultures de printemps et des cultures d'été, ou sur la proportion de cultures de maïs par rapport aux autres cultures, le maïs étant la seule culture irriguée dans notre système de simulation. De façon complémentaire, on pourrait analyser utilement les indicateurs pour les cultures de printemps et pour les cultures d'hiver de façon séparée (ce qui supposerait donc un retour vers des données annuelles et non des données intégrées sur 30 ans).

- Enfin, la typologie de climat que nous avons retenue a été élaborée par (Joly *et al.*, 2010) ; elle s'appuie uniquement sur des données relatives aux précipitations et à la température, que cela concerne leurs valeurs ou leurs répartition intra-annuelle. Cette typologie fait sens pour notre étude dédiée spécifiquement aux écosystèmes agricoles, dans la mesure où l'agriculteur choisit ses cultures en fonction des conditions spécifiques de pluie et de température. Cependant, cette typologie n'inclut pas explicitement l'évapotranspiration potentielle ; elle rend ainsi parfois difficile l'interprétation de l'indicateur « rendement en eau », dont on aurait pu attendre qu'il soit plus fortement sous l'influence du climat, puisque c'est le facteur exogène qui détermine les entrées d'eau dans le système. De façon corollaire, la typologie de (Joly *et al.*, 2010) intègre très partiellement des critères de saisonnalité, qui s'avèreraient pertinents pour interpréter plus finement l'indicateur « transpiration de la culture de rente », notamment si, comme nous l'avons proposé au paragraphe précédent, on traite séparément les cultures de printemps et les cultures d'été. Une piste pour améliorer la typologie de climat consisterait à spatialiser sur l'ensemble du territoire les indicateurs climatiques de la Veille AgroClimatique de l'Inra²⁰, qui propose déjà, par type de culture (blé ou maïs), la valeur du rapport Précipitations-Evapotranspiration Potentielle.

²⁰ http://w3.avignon.inra.fr/veille_agroclimatique/Home

Utilisation des simulations artefacts « sans irrigation / avec fertilisation »

Pour qualifier les SE de « stockage et restitution de l'eau », nous avons fait le choix de d'utiliser des simulations dont l'objectif était de représenter le niveau de SE correspondant à un niveau de développement de la biomasse permis par la restitution d'eau de pluie par l'écosystème sans apport d'irrigation mais en tenant compte des apports réels d'azote. Il s'agissait ainsi de ne pas mélanger les effets irrigation et fertilisation, cette dernière jouant un rôle essentiel dans le potentiel de production de biomasse, et donc dans celui de la transpiration. Le niveau de SE évalué correspond à celui rendu par l'écosystème agricole à l'agriculteur, considérant un niveau de production attendu, déterminé, entres autres, par ses pratiques de fertilisation.

Axes de discussion scientifiques

Choix et pertinence des indicateurs pour l'évaluation du SE

Dans cette étude, nous avons choisi de ne pas tenir compte de l'évaporation dans l'indicateur du SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées ». L'indicateur « transpiration de la culture de rente » n'est donc pas un indicateur de la quantité « d'eau verte », au sens où celle-ci est classiquement définie dans la littérature, car nous avons souhaité évaluer le SE dont l'agriculteur dérive un réel avantage ; l'eau évaporée étant « perdue » pour l'agriculteur, il n'aurait pas été justifié d'en tenir compte. En revanche, pour le SE « stockage et restitution de l'eau bleue », nous avons proposé l'indicateur « rendement en eau » classiquement utilisé dans la littérature. On considère ainsi, dans notre approche, que l'eau évaporée est « perdue » à la fois pour l'agriculteur et pour la société. Elle participe néanmoins au grand cycle de l'eau et contribue de ce fait à la régulation du climat à l'échelle globale, très au-delà de l'échelle traitée dans cette étude.

Par ailleurs, les deux indicateurs calculés sont difficilement hiérarchisables en fonction du climat, probablement pour deux raisons que nous avons partiellement évoquées précédemment : d'une part, la typologie de climat que nous avons retenue pour l'analyse des indicateurs ne tient pas compte de la demande évaporatoire ; d'autre part, le choix du calcul des indicateurs *via* des modélisations dynamiques sur une durée de trente ans permet d'intégrer les effets du système de culture et nivèle les variabilités interannuelles, mais il gomme également les effets de saisonnalité, puisqu'il ne permet pas de traiter séparément les cultures de printemps et les cultures d'été. Pour s'affranchir de ces limites, il conviendrait donc d'une part de proposer un indicateur qui tient compte de la demande climatique et d'autre part du type de cultures en place. Ainsi, par exemple, un indicateur de type « transpiration de la culture de rente / évapotranspiration maximale » permettrait d'estimer la part de l'eau restituée par l'écosystème relativement au besoin de eau de la culture et du climat.

Rôle des pratiques agricoles

Dans le cadre de l'évaluation des SE de « stockage et restitution de l'eau », nous avons analysé le rôle de l'irrigation sur les flux d'eau de transpiration et le rendement en eau et la contribution relative de l'irrigation à la couverture des besoins en eau des cultures. Cette analyse serait à prolonger, en identifiant, grâce à la simulation de scénarios, des stratégies d'irrigation minimale permettant un haut niveau de production de biens, une optimisation du niveau de l'ensemble des services qui en dépendent et une réponse aux enjeux liés à la gestion de l'eau.

Nous avons également conduit notre analyse sur le rôle de l'irrigation sans préjuger de l'*origine* de cette eau d'irrigation, c'est-à-dire sans que ne soit précisé si l'eau d'irrigation est prélevée dans une ressource « locale » (ex. nappe sous-jacente, court d'eau en bordure de parcelles) ou si elle est « importée » (i.e. qui serait apportée d'une autre région par des rivières ou canaux d'irrigation). Ceci n'est pas sans conséquence sur l'interprétation que l'on peut donner du rendement en eau. En effet, dans le premier cas, l'irrigation peut contribuer à diminuer localement les ressources en eau ; dans le second cas, l'apport d'eau exogène peut favoriser à la fois la transpiration et le drainage, et contribuer à améliorer la recharge des ressources locales. Une interprétation régionalisée des valeurs des indicateurs permettrait donc de contextualiser les résultats de l'analyse.

Quels que soient le contexte agropédoclimatique et les pratiques d'irrigation, on peut proposer des pratiques qui permettent de maintenir l'eau dans le sol disponible pour la transpiration suivant différentes stratégies :

- proposer des pratiques qui permettent **d'augmenter la RUM du sol et son utilisation**. On peut agir ici, à moyen terme, sur l'horizon de surface, avec des pratiques telles que la fertilisation organique qui, par apport de matière organique, augmente la porosité du sol de façon durable et permet un stockage d'eau favorable ; on peut également recommander de choisir des génotypes de cultures à enracinement profond, qui exploitent potentiellement la réserve d'eau disponible du sol sur toute son épaisseur ; on peut enfin recommander de limiter les pratiques d'exportation des éléments grossiers du sol de l'horizon de surface : si ces derniers limitent certaines activités mécaniques sur les parcelles, ils peuvent contribuer significativement à la Réserve Utile du sol (jusqu'à 60 % en milieu caillouteux) (Tetegan *et al.*, 2011) et céder de l'eau aux cultures en périodes de déficit hydrique (Tetegan *et al.*, 2015b).

- proposer des pratiques qui permettent de **favoriser l'apport d'eau au sol**, c'est-à-dire qui favorisent l'infiltration et diminuent le ruissellement. Des pratiques qui augmentent la porosité de l'horizon de surface (apport de matières organiques, labour occasionnel, par exemple) sont propices à l'infiltration, de même que le maintien d'une couverture végétale en surface du sol (couvert permanent, maintien des résidus de culture) ou un travail du sol très superficiel et sans retournement sont connues pour limiter le ruissellement (cf. section 8.5);

- proposer des pratiques qui permettent de **limiter les pertes en eau depuis le sol**, c'est-à-dire limiter l'évaporation. En effet, l'eau évaporée - si elle participe de façon utile au grand cycle de l'eau - n'est bénéfique, au plan local ni à l'agriculteur, dont les pratiques ont pour finalité de favoriser la transpiration, ni à l'aménageur, dont les décisions auraient pour objectif de favoriser la recharge d'aquifères naturels ou artificiels, profonds ou superficiels. Des pratiques de mulching ou de travail superficiel du sol limitent l'évaporation sans favoriser la transpiration, tandis que la présence d'une couverture végétale vivante, si elle limite l'évaporation, transpire et peut diminuer la quantité d'eau disponible pour la culture de rente. Cependant, il est bien question ici de « limiter » l'évaporation, et non de la supprimer : par exemple, la création d'une croûte en surface du sol, outre qu'elle contribue à augmenter le ruissellement, rompt la continuité hydraulique entre les horizons profonds du sol et l'atmosphère, ce qui contribue au développement de zones anoxiques dans le sol et n'est pas favorable à la transpiration.

Conclusion et perspectives

Les spécifications et évaluations conduites dans cette étude ont permis de formaliser la définition d'indicateurs permettant d'évaluer les SE de « stockage et restitution de l'eau ». La spécification du SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées » a permis de développer un indicateur original, la *transpiration de la culture de rente entre le semis et la récolte*, dont nous avons proposé des évaluations chiffrées : sa valeur moyenne à l'échelle nationale est de l'ordre de 150 mm par an. Le choix d'une évaluation par des simulations enchainées sur 30 ans d'un modèle de culture sur l'ensemble du territoire est également inédit, et a permis, de façon très originale, de calculer les indicateurs à l'échelle du système de culture. Dans des évaluations futures, une analyse approfondie des déterminants du niveau de fourniture des SE *via* l'utilisation de typologies d'analyse plus adaptées et l'élaboration d'indicateurs permettant de mieux prendre en compte les spécificités climatiques et des séquences de culture apporteront des éléments nouveaux. Enfin, ces indicateurs et leur protocole d'évaluation par modélisation s'avéreront particulièrement pertinents pour évaluer certaines pratiques ou systèmes de cultures qui n'ont pas été traités dans cette étude et qui sont actuellement en plein essor, comme le semis sous couvert, l'agriculture de conservation ou l'agroforesterie.

8.7.3. Evaluation économique du SE

Experts responsables : Maïa David, Vincent Martinet

8.7.3.1. Méthodologie et indicateurs pour l'évaluation économique du SE

Stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées :

Les simulations des systèmes de culture sans irrigation ont permis d'estimer le niveau de transpiration permis par le SE de restitution d'eau aux plantes cultivées. L'évaluation économique de ce SE peut-être réalisée en estimant le coût de l'eau d'irrigation qu'il serait nécessaire d'apporter pour maintenir ce niveau de transpiration en l'absence du SE ; autrement dit en se basant sur la « méthode des coûts de remplacement » (section D de l'introduction partie 3). Il est alors nécessaire de disposer d'une estimation du coût de cet apport artificiel en eau, à savoir des coûts d'irrigation (coûts fixe du matériel nécessaire, coût de l'énergie, redevances agence de l'eau, coûts de l'eau, forfait ou adhésion à des systèmes collectifs de fourniture d'eau, coûts d'entretien...).

Porter *et al.* (2009) et Ghaley *et al.* (2014) appliquent une méthode similaire pour comparer le SE qu'ils appellent « Cycle hydrique » pour quatre systèmes de production agricole d'une station expérimentale au Danemark. Ils utilisent un coût total de l'irrigation de 20 US\$ / 100mm d'eau / ha (valeur obtenue auprès du service local de conseil agricole). Sandhu *et al.* (2008) appliquent un coût de 33 US\$ /75 mm /ha pour la Nouvelle-Zélande (valeur obtenue auprès du Farm Management Group (2006)).

Il faut noter qu'avec cette méthode d'évaluation, l'eau restituée par l'écosystème est considérée comme un intrant substituable. Son coût de remplacement informe sur le niveau de SE dont l'agriculteur dérive un avantage. La valeur économique (à finalité de comptabilité) de ce SE est cependant intégrée dans la valeur de la production. L'estimation est réalisée France entière car les coûts de l'irrigation n'ont pas pu être spatialisés dans le cadre de l'étude (cf. section 8.7.3.4)

Stockage et restitution de l'eau bleue :

L'eau bleue bénéficie à la société, qui l'utilise pour de nombreux usages (agriculture, industrie, domestique, récréatif). La quantité d'eau bleue restituée par les écosystèmes agricoles a été estimée dans cette étude par simulation *via* le calcul du « rendement en eau » (*water yield*), c'est-à-dire la différence entre la quantité de précipitation et l'évapotranspiration. L'eau bleue restituée par les écosystèmes agricoles alimente les écosystèmes aquatiques, où elle contribue à la fourniture de SE par ces derniers (voir Maes *et al.*, 2014, p.42 et Table 8). Néanmoins, il n'est pas possible d'évaluer la part de cette contribution relativement à celle de l'eau bleue restituée par les autres types d'écosystèmes et qui rejoint elle aussi les écosystèmes aquatiques. **Pour éviter les doubles comptages, l'eau bleue fournie par les écosystèmes agricoles n'a donc pas été évaluée économiquement dans le cadre de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.**

8.7.3.2. Stratégie retenue pour l'évaluation économique du SE

L'évaluation économique suivant la méthode des coûts de remplacement du SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées » est basée sur la logique générale suivante :

Valeur économique de la quantité annuelle d'eau restituée aux plantes cultivées pour un espace géographique donné (€/an) = Volume moyen annuel d'eau transpirée par les cultures restituée par l'écosystème (en m³/an) x coût total de l'irrigation (en €/m³).

Aussi, l'évaluation économique a été réalisée en quatre grandes étapes :

(i) Eau transpirée par culture : à partir des résultats de l'évaluation biophysique présentés précédemment, estimation d'une quantité moyenne annuelle d'eau transpirée en l'absence d'irrigation (mm/an) par culture et par UPC *via* une procédure de changement d'échelle prenant en compte le poids relatif des simulations dans l'UPC (Cf. Annexe 10-A) ;

(ii) Volume transpiré : estimation d'un volume moyen annuel d'eau transpirée par culture (m³/an) par unité pédoclimatique (UPC) *via* la multiplication des résultats de la première étape par les surfaces correspondantes de culture par UPC. Dans cette procédure, pour chaque culture simulée, la quantité moyenne d'eau transpirée estimée en étape (i) est extrapolée à l'ensemble de la surface de cette culture de l'UPC. Les surfaces utilisées ici correspondent à la surface totale moyenne par culture sur 2010-2012 dans l'UPC (moyenne des surfaces des RPG annuels) ;

(iii) Extrapolation : estimation d'un volume moyen annuel d'eau transpirée par culture (m³/ha/an) France métropolitaine. Dans cette procédure, pour chaque culture simulée, le volume moyen par ha estimé dans l'étape précédente est extrapolé, proportionnellement, à l'ensemble de la surface de la culture en France c.-à-d. aux surfaces non comprises dans les UPC simulées. Les surfaces utilisées ici correspondent à la surface totale moyenne sur 2010-2012 France entière par culture (moyenne des surfaces des RPG annuels). La surface totale d'extrapolation considérée ici est de 13 506 227 d'ha alors que la surface RPG moyenne de grandes cultures (y c. de cultures industrielles) France entière sur 2010-2012 est de 14 811 520 ha. La surface considérée dans cette évaluation économique correspond donc à plus de 91 % de la surface moyenne sur 2010-2012 de grandes cultures en France métropolitaine ;

(iv) Calcul du coût de remplacement : estimation des coûts associés aux volumes d'eau estimés en étapes (ii) et (iii). Pour cela, considérant la variabilité des coûts d'irrigation en France suivant les ressources mobilisés et les équipements d'irrigation mise en œuvre, un coût minimal du m³ d'eau (0,04 €/m³) et un coût maximal (0,335 €/m³) ont été utilisés. Ces deux types de coûts sont issus d'une analyse des données sur les coûts de l'irrigation recensés dans la littérature grise française (Cf. Annexe 8-F).

8.7.3.3. Analyse des résultats

Les résultats de l'évaluation économique sont présentés dans le tableau 8-7-1. Ils correspondent à un premier ordre de grandeur du coût de remplacement du SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées » pour les surfaces d'écosystèmes agricoles couvertes par les principales grandes cultures en France et la betterave sucrière, et doivent être analysés avec précaution. Ils sont d'autant plus incertains que la surface RPG d'une culture donnée dans les UPC simulées est faible relativement à la surface totale de cette culture en France. En effet, la qualité de l'extrapolation dépend de la représentativité du jeu de données simulées relativement à l'ensemble des surfaces de culture. Ainsi, l'évaluation sur les surfaces totales de pois de printemps et de maïs fourrage est particulièrement incertaine puisque les surfaces de ces cultures dans les UPC simulées représentent une part minoritaire de la surface totale de celles-ci, respectivement 19 % et 31 % des surfaces totales. Les évaluations pour le maïs grain et le tournesol sont elles aussi à analyser au regard de la représentativité des surfaces simulées (53 % des surfaces totales pour ces deux cultures). Ces faibles représentativités sont liées au fait que ces cultures sont faiblement représentées dans les séquences dominantes (en termes de surface) par UPC qui ont été simulées avec STICS dans EFESE-écosystèmes agricoles.

La variabilité observée des coûts du m³ d'eau d'irrigation, de plus d'un facteur 8 entre le coût minimal et le coût maximal, conduit, par construction, à une forte variabilité de l'estimation du coût de remplacement du SE estimé. Les coûts totaux pour l'ensemble des surfaces des cultures simulées varient ainsi d'un coût minimal estimé à 805 millions d'euros à un coût maximal estimé à 6 739 millions euros pour les 91% des surfaces de grandes cultures et cultures industrielles de France métropolitaine sur la période 2010 à 2012.

Une limite de ce raisonnement est qu'il est valable « toutes choses égales par ailleurs », c'est-à-dire en supposant que même en l'absence d'eau restituée par l'écosystème, la disponibilité de la ressource en eau pour l'irrigation et le coût de l'irrigation demeurent inchangés.

Tableau 8-7-1. Évaluation économique du SE « stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées »

La quantité moyenne d'eau restituée par l'écosystème (transpirée par la culture) est donnée à titre indicatif par type de culture. Voir explication de la procédure de calcul dans la section 8.7.3.2.

Les chiffres présentés dans ce tableau fournissent des premiers ordres de grandeur qu'il convient d'analyser au regard des hypothèses et des méthodes d'évaluation mobilisées.

Culture	Transpiration annuelle moyenne de la culture (mm/an)	Surface "UPC" de la culture = surface occupée par la culture dans les UPC où elle est simulée (ha ; moyenne 2010-12)	Coût de l'irrigation de la culture dans l'ensemble des UPC où elle est simulée (M€/an)		Surface totale de la culture = surface occupée par la culture à l'échelle France entière (ha ; moyenne 2010-12, extrapolation)	Coût de l'irrigation de la culture à l'échelle France entière (M€/an)		Représentativité des surfaces prises en compte dans le dispositif de simulation = surface "UPC" / surface totale
			Coût minimal	Coût maximal		Coût minimal	Coût maximal	
Betterave sucrière	172	302 335	21	177	437 165	31	256	69 %
Blé tendre	137	3 958 377	218	1 828	6 006 826	331	2 775	66 %
Orge	137	1 119 855	62	520	1 548 366	86	719	72 %
Colza	172	1 083 475	75	626	1 590 907	110	920	68 %
Maïs fourrage	158	385 833	25	213	1 264 859	83	697	31 %
Maïs grain	176	867 926	65	540	1 643 784	122	1 023	53 %
Pois de printemps	120	56 117	3	23	291 370	15	122	19 %
Tournesol	106	383 282	13	113	722 950	25	213	53 %

8.7.3.4 Perspectives de recherche

Plusieurs pistes d'amélioration de la qualité de l'évaluation économiques sont envisageables.

La simulation d'un plus grand nombre de séquences dans un plus grand nombre d'UPC permettrait d'améliorer la représentativité des estimations biophysiques et donc de l'évaluation économique. Cette amplification des simulations pourrait être orientée de manière à mieux couvrir les surfaces des cultures faiblement représentées dans le plan de simulation actuel.

Par ailleurs, il serait nécessaire de développer une base de données sur les coûts d'irrigation par UPC ou par Petite Région Agricole (PRA), en fonction des grands types de ressources et matériel utilisés, de manière à affiner et spatialiser l'estimation des coûts de remplacement présentés ci-avant. L'analyse de la faisabilité et des moyens nécessaires au développement de ce type de base de données reste à réaliser.

Enfin, dans des travaux futurs il serait souhaitable de borner le coût d'irrigation par la valeur de la marge brute de l'agriculteur (ou valeur moyenne des marges brutes par zones géographique). En effet, si les coûts d'irrigation sont plus élevés que la marge brute obtenue par l'agriculteur, celui-ci arrête sa production ou change de nature de production, et donc de nature d'écosystème agricole, plutôt que d'irriguer l'écosystème agricole en place en perdant de l'argent. Le coût subi par la société correspond alors à la variation de marge brute, qui est donc perdue en l'absence d'eau fournie par l'écosystème.

Complément : évaluation des flux d'eau transpirée et de rendement en eau pour les systèmes de culture actuels

Nous présentons ci-après, l'analyse des résultats des simulations réalisées pour les systèmes de cultures actuels, c'est-à-dire avec irrigation sur les cultures de maïs classiquement irriguées.

1. Flux d'eau transpirée

Comme pour l'analyse précédente, la **transpiration de la culture de rente** est en moyenne d'autant plus élevée que la RUM est élevée : elle varie en moyenne de 109 à 187 mm en moyenne, avec des valeurs extrêmes de 62 mm à 447 mm (Figure 8-7-22). Comme pour les systèmes sans irrigation, la variabilité exprimée par les espaces interquartiles est du même ordre de grandeur quelle que soit la classe de RUM, mais les valeurs extrêmes supérieures sont plus nombreuses et plus élevées pour les systèmes de culture irrigués que pour les systèmes sans irrigation.

L'expression de la transpiration en fonction de la séquence de cultures irriguées est de l'ordre de 150 mm, quelle que soit la longueur de la séquence, mais la variabilité pour les monocultures est très élevée, de l'ordre de 300 mm.

Enfin, la transpiration exprimée en fonction du climat est comparable, en valeur moyenne, à celle décrite pour les systèmes sans irrigation, bien que les outliers supérieurs soient plus nombreux et plus élevés. La variabilité de la transpiration pour le climat méditerranéen altéré (type 6) est particulièrement élevée, avec un espace interquartile de l'ordre de 150 mm.

La distribution spatiale de la transpiration de la culture de rente pour les systèmes de cultures actuels est comparable à celle des systèmes sans irrigation, avec des valeurs à la fois les plus élevées et les plus faibles dans le Sud-Ouest, et des valeurs ponctuellement élevées, en Alsace et dans le nord du Bassin Parisien (Figure 8-7-23).

2. Rendement en eau (eau bleue)

Le **rendement en eau** évalué pour les systèmes de cultures actuels est très proche du rendement en eau évalué pour les systèmes sans irrigation, pour les trois typologies employées dans cette étude, à l'exception de quelques unités de simulation, représentées ici par quelques outliers sur les box-plots (Figure 8-7-24). En conséquence, la distribution spatiale du rendement en eau est la même pour les systèmes de culture actuels que pour les systèmes sans irrigation, à l'exception de quelques unités de simulation où le rendement est plus élevé en système actuel, notamment dans le sud-ouest (Figure 8-7-25).

Figure 8-7-22. Transpiration annuelle moyenne de la culture de rente évaluée pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Données présentées en fonction de la Réserve en eau Utile Maximale du sol (a.), de la longueur de la séquence de culture (b.) et du type de climat (c.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat ; le climat de type 0 représente quelques unités de simulation où la définition du climat n'était pas possible)

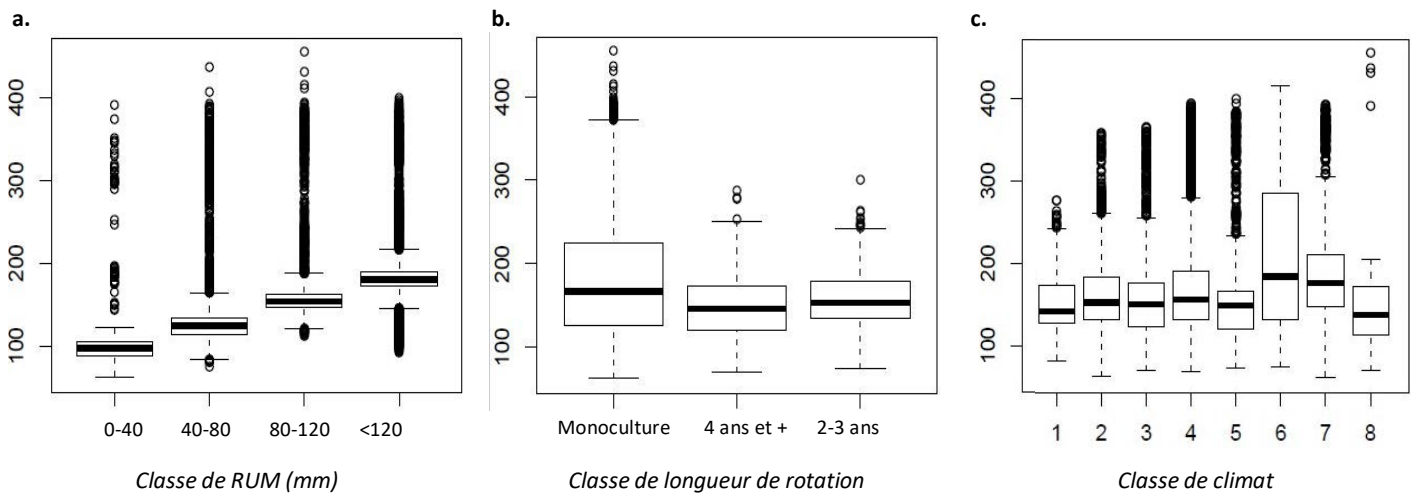


Figure 8-7-23. Carte de la transpiration annuelle moyenne de la culture de rente évaluée par le modèle STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFeSE-EA
 Unités pédoclimatiques grisées = pas de simulation "grandes cultures"
 Les classes de valeurs correspondent aux quintiles.

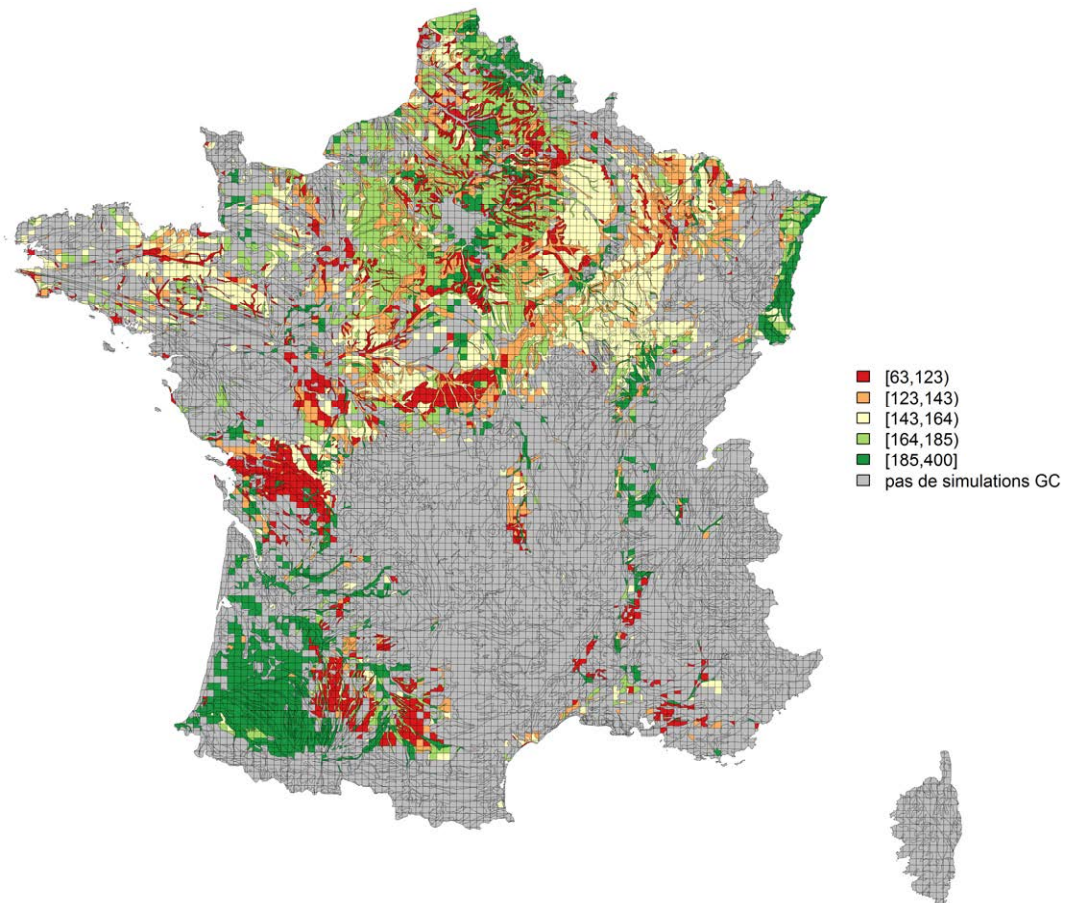


Figure 8-7-24. Rendement en eau annuel moyen (en mm) pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Données présentées en fonction de la Réserve en eau Utile Maximale du sol (a.), de la longueur de la séquence de culture (b.) et du type de climat (c.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat ; le climat de type 0 représente quelques unités de simulation où la définition du climat n'était pas possible)

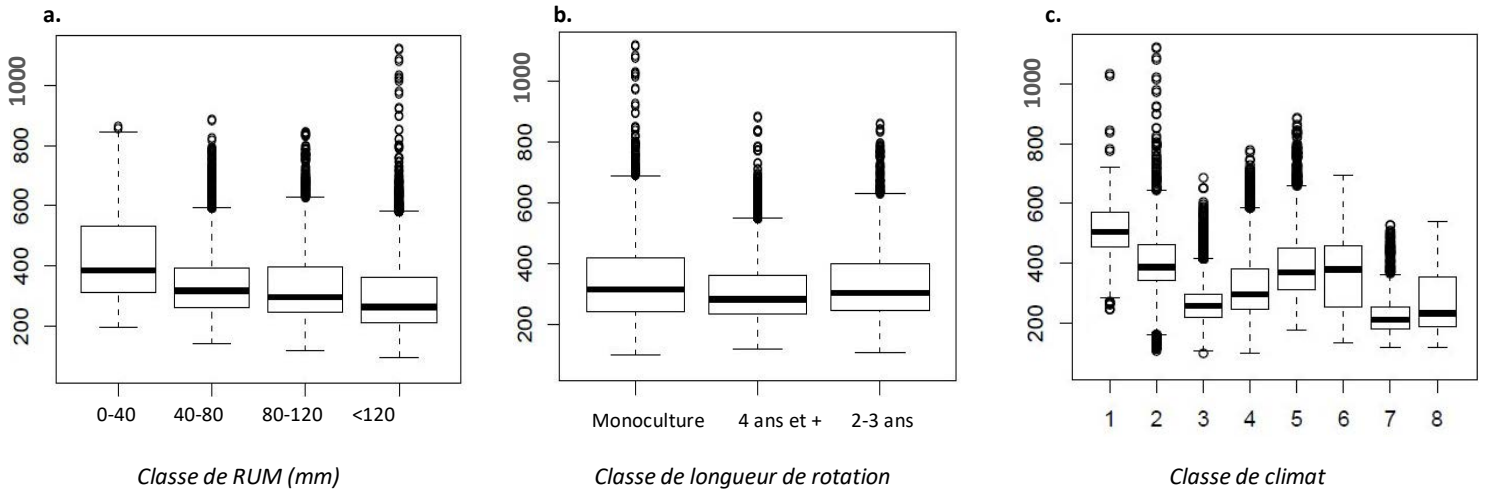


Figure 8-7-25. Carte des valeurs moyennes du rendement en eau évalué par le modèle STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-EA
 Unités pédoclimatiques grisées = pas de simulation "grandes cultures"
 Les classes de valeurs correspondent aux quintiles.

