



HAL
open science

Cartographie de l'évolution du stock d'eau disponible pour la végétation des sols forestiers lorrains, dans un contexte de changement climatique.

Christian Piedallu, Jean-Baptiste Richard, Vincent Perez Perez, Thomas Villiers, Jean-Daniel Bontemps, Bernard Jabiol, Sébastien Daviller, Jean-Claude Gégout, François F. Lebourgeois, Gabriella Riofrio-Dillon, et al.

► To cite this version:

Christian Piedallu, Jean-Baptiste Richard, Vincent Perez Perez, Thomas Villiers, Jean-Daniel Bontemps, et al.. Cartographie de l'évolution du stock d'eau disponible pour la végétation des sols forestiers lorrains, dans un contexte de changement climatique.. 2014. hal-00976603

HAL Id: hal-00976603

<https://hal.science/hal-00976603>

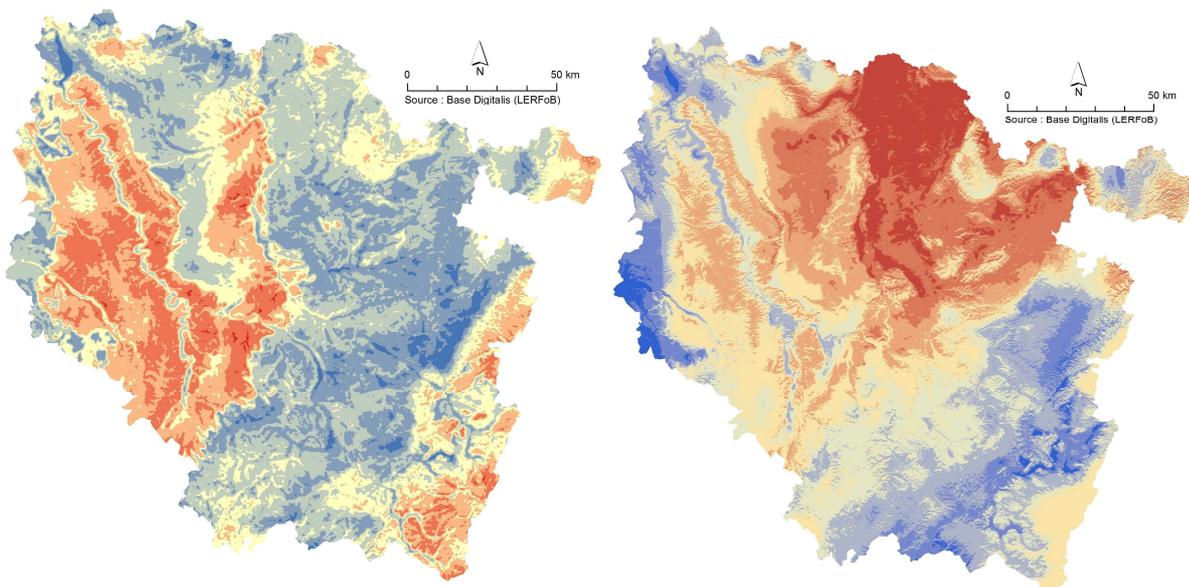
Submitted on 10 Apr 2014

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

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

Cartographie de l'évolution du stock d'eau disponible pour la végétation des sols forestiers lorrains, dans un contexte de changement climatique.

Convention 2011-2014 région Lorraine n° 2011-2810
Convention 2011-2014 DRAAF n° ETU-201-8
Rapport final mars 2014



C. Piedallu , JB Richard, V. Perez, T Villiers, JD Bontemps, B.Jabiol , S.Daviller, JC Gégout, F. Lebourgeois, G. Riofrio, I. Seynave, F.Spicher, E. Thirion, E. Ulrich, M. Nicolas.

Organisme (s) gestionnaire (s) des crédits ;

AgroParisTech-ENGREF

Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt Bois (LERFOB)

Organisme (s) associés (s);

ONF

Réalisation du rapport :

Piedallu Christian, JB Richard, V. Perez, T Villiers.

Coordonnées du coordinateur du projet :

PIEDALLU Christian

Ingénieur en écologie forestière, spécialiste en géomatique

AgroParisTech-ENGREF, 14 rue Girardet, CS 14216, F-54 042 NANCY Cedex

Tel : 03.83.39.68.77

Fax : 03.83.39.68.78

Mail : christian.piedallu@agroparistech.fr

Participants du projet :

<i>Personnes impliquées dans le programme de recherche</i>	<i>Qualité</i>	<i>Spécialité</i>
<i>Équipe Écologie Forestière-LERFoB</i>		
BONTEMPS Jean Daniel	IGREF	Modélisation, fertilité des essences
BERNARD Jabiol	Enseignant chercheur	Pédologue
DAVILLER Sébastien	Technicien	Relevés de terrain
GÉGOUT Jean-Claude	Professeur	Modélisation, comportement des essences
LEBOURGEOIS François	Enseignant chercheur	Comportement des essences, bioclimatologie
PEREZ Vincent	Technicien	Géomatique
PIEDALLU Christian	Ingénieur de recherche	Géomatique
RICHARD Jean Baptiste	Stagiaire Ingénieur	Calculs de bilan en eau
RIOFRIO Gabriella	Stagiaire M2	Relevés de terrain
SEYNAVE Ingrid	Ingénieur de Recherche	Base de données, productivité
VILLIERS Thomas	Stagiaire Ingénieur	Modélisation de la RUM
SPICHER Fabien	Technicien	Relevés de terrain
THIRION Erwin	Technicien contractuel	Relevés de terrain
<i>ONF</i>		
Erwin ULRICH	Ingénieur	Réseau RENECOFOR
Manuel NICOLAS	Ingénieur	Réseau RENECOFOR

Mots-clés : changement climatique, bilan hydrique, sols forestiers, vulnérabilité, cartographie numérique, outils d'aide à la gestion forestière.

Résumé

Nous avons modélisé sous SIG les différentes composantes nécessaires pour calculer le bilan en eau des sols, avec une résolution spatiale fine, inexistante auparavant. Ces données ont été validées, puis nous avons comparé différentes méthodes de calcul des bilans en eau et indices disponibles, mettant en évidence l'intérêt de l'utilisation de cartes de réserve en eau des sols mais aussi de déficit d'évaporation, très complémentaires. L'intérêt de ces indices au regard des données climatiques traditionnellement utilisées pour caractériser l'eau disponible pour les plantes (pluies, bilan hydrique climatique) a été démontré. Les cartes des indices calculés ont été validées avec les données disponibles ou collectées dans le cadre de cette étude, à des échelles allant de la France entière à la Lorraine, et jusqu'à la parcelle forestière. Les résultats, qui sont cohérents par rapports à des calculs réalisés ponctuellement à partir de calculs plus complexes, montrent que malgré les difficultés et les imprécisions liées à l'estimation de la RUM sur le terrain, il est possible de réaliser des cartes d'indices hydriques combinant des données de sol et de climat qui aient du sens y compris à l'échelle locale.

Des jeux de cartes ont été produits pour la Lorraine pour différentes périodes passées, présentes, et futures. Elles ont permis de mettre en évidence une forte variabilité spatiale de la contrainte hydrique à l'échelle de la région. Les évolutions au cours des 50 dernières années montrent que la réserve en eau disponible pour les plantes a globalement diminuée en Lorraine, particulièrement dans le nord est de la région, et pour les périodes de printemps et d'été qui correspondent à la saison de végétation. Les diminutions de RU entre les périodes 1961-1985 et 1985-2010 peuvent atteindre localement 5% sur l'année, et jusqu'à 50 % pour les mois d'été dans les zones de faible RUM. En automne, une stagnation voire une augmentation de la réserve en eau peut être localement observée. Cependant, dans la plupart des cas, l'augmentation de la pluviométrie hivernale n'est pas utile au regard de la réserve utile pour les plantes, les sols lorrains étant généralement saturés en hiver.

Des simulations pour les périodes futures montrent une diminution marquée de la ressource en eau, mais avec un large panel d'incertitudes selon le modèle utilisé. Elles confirment l'importance d'une approche saisonnière, la période de végétation (printemps et été) étant particulièrement affectée, avec des répercussions en automne. Ainsi, les diminutions prédites de RU estivales s'échelonnent entre 10 et 70% selon le modèle PCM, et entre 40 et plus de 90% selon le modèle Hadcm3. L'étude des conséquences sur la ressource forestière de ces changements de ressource en eau est aujourd'hui un enjeu majeur pour une gestion durable de nos forêts.

Sommaire

1. Choix d'une méthode de calcul du bilan en eau des sols.....	9
11. Rappel sur le principe général de calcul du bilan en eau des sols.....	9
12. Formules de bilan hydrique utilisées.....	11
13. Description des indices issus du bilan hydrique utilisés	12
2. Les données utilisées pour le calcul du bilan en eau.....	13
21. Le rayonnement solaire	13
22. Les températures et les précipitations	13
23. La réserve utile maximale des sols.....	14
24. Validation des indices calculés	15
3. Résultats	19
31. Comparaison entre les différents indices de bilan hydrique calculés.....	19
32. Comparaison entre les indices de bilans hydriques édaphiques et les indices climatiques	20
33. Réalisation des cartes de contrainte hydrique pour différentes périodes	22
4. Bilan des travaux réalisés : avancées, principales limites, perspectives d'amélioration et d'utilisation.....	48
41. Principales avancées.....	48
42. Principales limites	49
43. Perspectives d'utilisation et d'amélioration	50
Bibliographie	53

Rappel des objectifs

L'objectif de cette étude était de permettre de caractériser le stock d'eau des sols disponible pour les plantes à l'échelle des forêts de la région Lorraine, et son évolution dans un contexte de changement de climat. Ce travail passe par l'estimation sur l'ensemble du territoire Lorrain d'un bilan hydrique mensuel intégrant à la fois le compartiment sol (réserve utile des sols) et le compartiment climat (apports en eau, évapotranspiration).

5 étapes de travail avaient été prévues :

- Etape 1 : calcul sous SIG au pas de temps mensuel et sur plusieurs années du bilan hydrique dit édaphique selon différentes formules existant dans la bibliographie (formules de Thornthwaite et Mather (1955 et 1957), Palmer (Palmer, 1965) , ...)
- Etape 2 : comparaison des calculs réalisés et validation à partir de calculs de bilans hydriques journaliers mesurés sur les placettes du réseau RENECOFOR (sous réseau météorologique) (Ulrich 1995), choix de la formule la plus performante.
- Etape 3 : à l'aide de la formule sélectionnée, calcul du bilan hydrique pour différentes périodes représentatives de conditions climatiques différentes au cours de la période 1960-2008 pour l'ensemble de la Lorraine.
- Etape 4 : détermination de l'évolution du stock d'eau au cours des 50 dernières années
- Etape 5 : simulation de l'évolution future possible. Les projections au XXIème siècle seront réalisées à l'aide d'au moins un modèle climatique (GCM) validé par le GIEC (les données fournies par le centre de Tyndall seront utilisées (Mitchell et al, 2004)).

Les cinq étapes initialement prévues ont été réalisées. Ce travail s'est fait en lien avec une convention IDF et ECOFOR qui a permis d'examiner l'utilisation des indices calculés dans le cadre de catalogues ou de guides de stations forestières (Piedallu *et al.*, 2011b), et à partir de divers travaux de stage (Richard, 2011; Villiers, 2011) et de thèse (Piedallu, 2012). Il a également donné lieu à différentes publications dans des revues nationales ou internationales à comité de lecture (Bertrand *et al.*, 2011 ; Piedallu *et al.*, 2012; Piedallu *et al.*, 2013; Richard *et al.*, 2013). Enfin, un serveur web financé par la région Lorraine et la DGER du ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt a été créé en parallèle, et un certain nombre de couches SIG ou de métadonnées¹ produites dans le cadre de cette étude y sont accessibles (<http://silvae.agroparistech.fr/home/>). Les articles publiés dans le cadre de ce travail sont accessibles sur mon profil Researchgate (https://www.researchgate.net/profile/Christian_Piedallu/?ev=hdr_xprf) ou google scholar (<http://scholar.google.fr/citations?user=jv3fwL4AAAAJ&hl=fr>).

Nous allons maintenant présenter des éléments de méthode, les principaux résultats, les apports et limites de ces travaux.

¹ Fiches décrivant les données produites

Préambule

Le calcul du bilan en eau des sols est complexe et nécessite de nombreuses données liées au climat, au sol, et à la végétation. Du fait de cette complexité, il est principalement estimé ponctuellement sur des placettes à partir de relevés de terrain permettant la collecte de nombreux paramètres (Granier *et al.*, 1999). Une cartographie des variations de la ressource en eau est très difficile à envisager à partir de ce type d'approche, une forte densité d'estimations nécessitant des données relativement coûteuses à collecter étant requise. Une autre approche peut être mise en place à partir de données écologiques dont la distribution spatiale est connue (Dyer, 2004). Si la distribution des paramètres climatiques est plutôt bien caractérisée à partir de cartes (Benichou and Le Breton, 1987; Vidal *et al.*, 2010), la mauvaise connaissance de la variabilité spatiale des données de sol est un frein important à cette approche. Il s'agit principalement de pouvoir caractériser la capacité maximale du sol à stocker l'eau, encore appelée réserve en eau maximale des sols ou RUM.

A l'échelle de la France, deux approches ont principalement été développées pour cartographier les RUM, à partir de cartes de sol existantes ou à partir des données d'inventaires. Ainsi, la carte des sols d'Europe a permis de dériver des valeurs de RUM au 1/1000000ème pour la France (Le Bas *et al.*, 1997). Cependant, cette échelle n'est pas compatible avec une approche régionale. Une autre carte a été développée selon cette approche, à une échelle plus locale (1/250000ème), pour la région Languedoc Roussillon. Cependant, cette méthode est parfois critiquée car elle ne prend pas en compte les variations des propriétés des sols au sein des unités décrites, et les critères de classement des sols peuvent ne pas correspondre à ceux des propriétés cartographiées (Leenhardt *et al.*, 1994; Voltz *et al.*, 1997). La seconde approche est basée sur l'utilisation de données d'inventaire, et a permis la réalisation d'une carte au pas kilométrique à l'échelle des forêts de France (Piedallu *et al.*, 2011a). Il a été déterminé que cette carte était utilisable à des échelles régionales, bien que de nombreuses imprécisions soient liées à la nature des données et des méthodes utilisées. D'autre part, la méthode de spatialisation utilisée (krigeage à partir de données localisées tous les kilomètres) ne permet pas de prendre en compte des variations locales dues à des changements de substrat ou influencées par la topographie.

Enfin, si ces cartes caractérisent la capacité maximale du sol à stocker l'eau, elles ne permettent pas d'estimer le stock d'eau disponible pour une période donnée. Des calculs de ce type sont réalisés par Météo France pour calculer un indice de sécheresse, mais ils ne prennent pas en compte les variations de profondeur de sol et sont basés sur paramètres pédologiques dérivés de la carte d'Europe au 1/1000000ème. Enfin, différentes formules permettent l'estimation du bilan en eau, et différents indices peuvent être produits, caractérisant la quantité d'eau disponible ou le stress pouvant être subi par les plantes. La performance des différentes méthodes d'estimation et des indices obtenus a peu été étudiée et le choix d'un indicateur pertinent n'est pas évident a priori.

Lors de ce travail, nous avons cherché à lever un certain nombre de points de blocage en vue de réaliser une carte à l'échelle de la Lorraine :

- Amélioration de la pertinence locale de la carte des RUM. Nous sommes partis des méthodes d'estimation utilisées pour la réalisation de la carte des RUM de France (Piedallu *et al.*, 2011a), tout en cherchant à améliorer les techniques de spatialisation. Ainsi, deux nouvelles cartes ont été élaborées par des techniques de modélisation, au pas de 500 mètres et au pas de 50 mètres. Les trois cartes (résolution de 1 km, 500 m, et 50 m) ont été comparées ;
- Choix de la méthode de calcul des bilans en eau : trois méthodes ont été comparées : le modèle à un compartiment de Thornthwaite et Mather (Thornthwaite and Mather, 1955), le modèle à deux compartiments de Palmer (Palmer, 1965), ainsi que celui de Bontemps qui a adapté le modèle de Thornthwaite pour deux compartiments (Bontemps, 2006).
- Choix des indices appropriés : pour chaque méthode de calcul du bilan en eau, 7 indices utilisés dans la littérature ont été comparés.

A l'issue de cette phase comparative, la meilleure méthode de calcul et les indices les plus pertinents ont été sélectionnés, par comparaison de leur capacité à prédire la distribution des principales essences présentes en France. Une validation des indices calculés a été réalisée sur différents jeux de données et des cartes ont été produites pour différentes dates, passées, présentes, et futures. L'évolution du stock d'eau disponible dans le sol a également été estimée.

1. Choix d'une méthode de calcul du bilan en eau des sols

11. Rappel sur le principe général de calcul du bilan en eau des sols

Le bilan hydrique est un calcul complexe qui permet de caractériser la quantité d'eau disponible dans le sol pour la végétation pour une période donnée. Il va être dépendant de quatre composantes essentielles (Figure 1) :

- **les apports climatiques en eau** : ils sont déterminés par la pluviométrie qui peut être minorée par l'interception du couvert végétal, qui varie entre 25 et 35% selon les types de couverts forestiers (Aussenac, 1970)

- **la demande climatique** : elle est conditionnée l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui représente la quantité maximale d'eau que peut restituer dans l'atmosphère un couvert végétal en pleine activité physiologique (Thornthwaite, 1948). Elle se caractérise à la fois par la transpiration des arbres et l'évaporation de l'eau à la surface du sol et dans le couvert végétal (Lebourgeois and Piedallu, 2005). De nombreuses méthodes d'estimation de l'ETP existent, utilisant des formules basées sur les températures, intégrant le rayonnement solaire, ou des formules plus complexes prenant en compte des processus énergétiques et qu'on pourra qualifier de formules écophysiological. Différentes études ont permis la comparaison des nombreuses formules existantes, mettant en évidence la performance de la méthode Penman-Monteith pour les formules écophysiological, et de la méthode de Turc pour les formules empiriques (Itenfisu *et al.*, 2003). Si l'ETP permet une évaluation de la demande climatique sans limitation de réserve en eau, l'évapotranspiration réelle (ETR) caractérisera l'eau qui a réellement pu être évaporée ou transpirée en fonction de la ressource en eau disponible dans le sol.

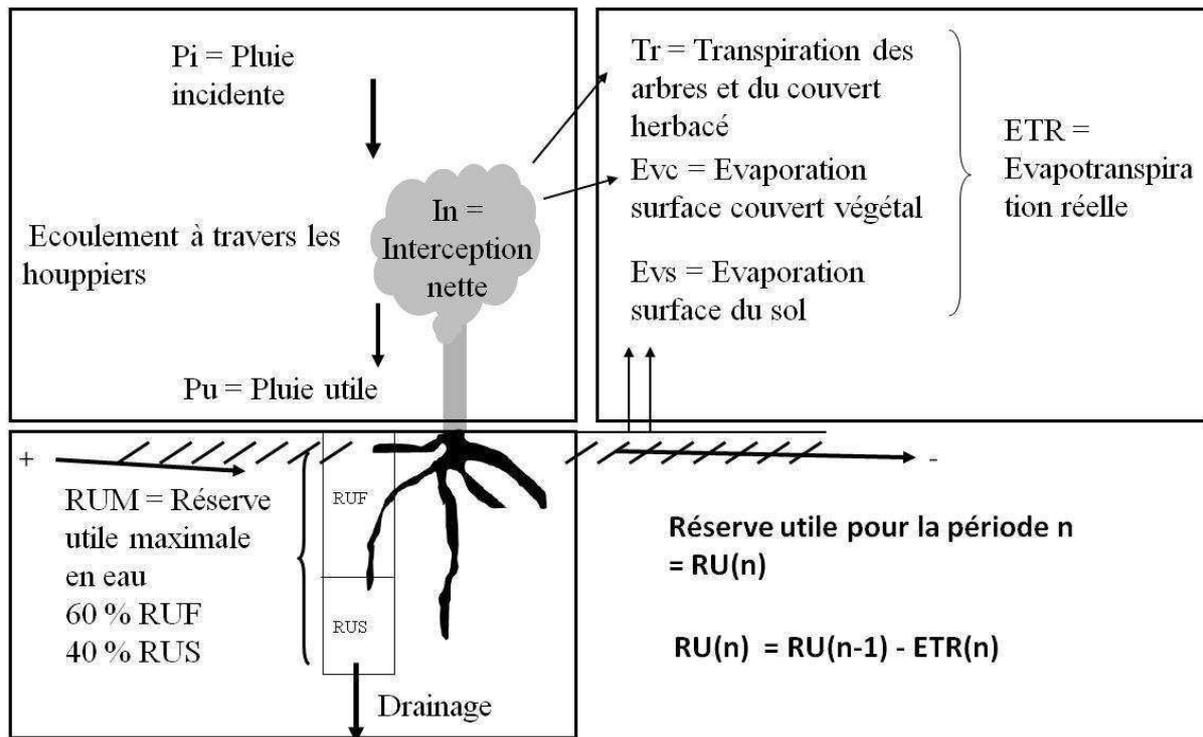


Figure 1 : Schéma simplifié du bilan hydrique sous couvert forestier. RUF = réserve utile facilement utilisable pour les plantes, RUS = réserve utile de survie plus difficilement mobilisable.

- **la capacité du sol à stocker l'eau à proximité du système racinaire** : la quantité maximal d'eau que le sol peut stocker, la RUM, va dépendre de la charge en cailloux et de la profondeur de sol, ainsi que de la capacité de rétention en eau qui est principalement fonction de la texture et de la densité apparente. La RUM peut être subdivisée en deux, les premiers 60% étant facilement mobilisables (RUF), les 40% plus difficilement (RUS = réserve utile de survie). La capacité des plantes à extraire l'eau du sol est directement liée aux racines fines, qui vont dépendre principalement de la texture du sol et des contraintes physiques pouvant limiter leur développement (engorgement, charge en cailloux, toxicité de certains éléments, profondeur du sol, ...). Quand le sol le permet, le système racinaire peut se développer à des profondeurs importantes, les racines les plus profondes jouant un rôle important lors des épisodes de grande sécheresse (Rambal, 1984; Lebourgeois and Jabiol, 2002). On estime que 10% des racines fines en profondeur assurent plus de 90% de l'approvisionnement en eau en fin de saison. Aussi, l'estimation de la RUM devrait être réalisée en fonction de la profondeur d'enracinement des plantes et au prorata de la densité de racines. Vu que les moyens nécessaires pour une telle évaluation sont impossibles à mobiliser lors d'une approche spatiale, nous allons utiliser des valeurs pour une profondeur maximale de 1 mètre, qui paraît cohérente pour évaluer la productivité des espèces (Berges and Balandier, 2010).

- **les flux latéraux et verticaux de surface et de subsurface** : il s'agit d'apports et de départs latéraux à la surface ou dans le sol, et de percolation verticale vers les zones profondes. Ces divers flux ont potentiellement des effets importants sur la végétation (Curt *et al.*, 2001) mais sont très difficiles à estimer, par manque de connaissance et d'outils disponibles. Les travaux existants sont principalement menés par des hydrologues dans le but de calculer des quantités d'eau s'écoulant à l'échelle du bassin versant, et ne sont pas adaptés aux besoins des écologues qui veulent estimer l'eau disponible pour les plantes en tout point

du territoire. Il n'existe aujourd'hui pas de moyen de les intégrer dans des calculs spatialisés, bien que l'enjeu soit important.

La quantité d'eau disponible pour les plantes, encore appelée réserve utile (RU), fluctue au fil de l'année, dans la limite de la RUM. Le principe de calcul du bilan hydrique pour une période t peut ainsi s'écrire de la façon suivante (Figure 1):

$$RU(t) = RU(t-1) + (Pi(t) - In(t)) - ETR(t) - Dr(t) + DI(t) + AL(t)$$

Avec RU = réserve utile, Pi = pluie incidente, In = interception par le couvert, ETR = évapotranspiration réelle, Dr = drainage par percolation, DI = départs latéraux, Al = apports latéraux.

12. Formules de bilan hydrique utilisées

Le calcul du bilan en eau peut se calculer au pas de temps mensuel ou journalier, avec un nombre de données intrant plus ou moins important, à savoir à minima des températures et de rayonnement solaire pour le calcul de l'ETP avec la formule de Turc, de la pluviométrie, et des valeurs de RUM (Choisnel, 1992). Des calculs plus complexes nécessitent de connaître les caractéristiques du couvert, la profondeur d'enracinement, la surface foliaire, la phénologie des espèces, ... Nous avons choisi de calculer des indices mensuels et de ne pas prendre en compte les effets du couvert végétal, du fait du manque d'informations précises quant à l'occupation du sol sur de vastes échelles, et de leur évolution rapide dans le temps. Le calcul du bilan en eau correspond donc aux conditions climatiques au sommet de la canopée, ce qui permettra de faire des simulations dans un contexte de réchauffement de climat, alors que de nombreux changements concernant l'occupation du sol sont attendus. Cependant, il sera facile de modifier le programme afin d'intégrer des paramètres d'interception du couvert. Le calcul a été effectué avec différents types de formules couramment utilisées dans la littérature :

- 1) **Thorntwaite et Mather (1955)** : la réserve utile du sol d'une période t est définie en fonction de celle du mois précédent ($t-1$) par :

Si $P_{(t)} \geq ETP_{(t)}$, alors $RU_{(t)} = \text{valeur minimum entre } RU_{(t-1)} + P_{(t)} - ETP_{(t)} \text{ and } RUM$, et $ETR_{(t)} = ETP_{(t)}$

Si $P_{(t)} < ETP_{(t)}$, alors $RU_{(t)} = RU_{(t-1)} \times \exp\{(P_{[t]} - ETP_{[t]})/RUM\}$, et $ETR_{(t)} = RU_{(t-1)} + (P_{[t]} - RU_{[t]})$

- 2) **Palmer (1965)** : le sol est divisé en une couche de surface (RUF), et une couche profonde, (RUS) :

$$RUM = RUF + RUS \text{ et } RUS = 0,4 \times RUM.$$

Si $P - ETP > 0$, on a :

$$\begin{array}{ll} RU(t) = RU(t-1) + P - ETP & \text{si } RU(t) < RUM \\ RU(t) = RUM & \text{si } RU(t) \geq RUM \end{array}$$

Si $P - ETP < 0$, la RUF se vide d'abord de façon linéaire, puis la RUS :

Vidage de la RUF :

$$RU_t = RU_{t-1} + P - ETP$$

Vidage de la RUS :

$$RU_t = RU_{t-1} + ((P - ETP) + (RU_{t-1} - RUS)) * (RU_{t-1} / RUM)$$

- 3) **Bontemps (2008)** : une variante des modèles précédents a été testée, le modèle de Thornthwaite ayant été adapté pour fonctionner à deux compartiments. La réserve utile se remplit de façon linéaire, selon une modalité commune à Palmer et Thornthwaite, mais la réserve facilement utilisable (RUF) se vide de façon linéaire (comme pour le bilan hydrique de Palmer), tandis que la RUS se vide selon une exponentielle négative (comme pour le bilan hydrique de Thornthwaite). Cette méthode n'ayant pas montré de meilleurs résultats, elle ne sera pas présentée. En effet, les calculs de Palmer et Thornthwaite ayant l'avantage d'avoir été abondamment discutées et éprouvées dans la littérature.

13. Description des indices issus du bilan hydrique utilisés

De ce calcul de bilan en eau, différents indices peuvent être calculés, qui permettent de caractériser l'eau disponible à travers la RU, l'énergie disponible pour la plante à travers l'ETR, ou encore le stress hydrique, à l'aide d'indices traduisant l'intensité de la sécheresse, la durée, ou la date de départ du déficit (Stephenson, 1998). Parmi les indices de stress les plus connus, nous pouvons citer le déficit d'évaporation (DE) qui permet de caractériser la demande évaporative non satisfaite par l'eau disponible (différence entre l'ETP et l'ETR), ou l'indice d'aridité qui se définit par le rapport ETR sur ETP (Thornthwaite and Mather, 1955). D'autres indices sont cités dans des études écophysiologicals, comme par exemple le « relative extractible soil water » (REW), calculé à l'aide du rapport RU sur RUM et indiquant un niveau de vidage de la RUM (Granier *et al.*, 1999). Lors de ce travail, nous allons comparer 7 de ces indices afin de déterminer si certains sont plus performants que d'autres pour caractériser la distribution des essences, dans l'objectif d'en sélectionner un ou deux pour la suite de l'étude:

- La **réserve utile RU** donne une estimation directe de l'eau disponible pour les plantes à un temps t, en millimètres.
- L'**évapotranspiration réelle ETR** représente la perte d'eau par évaporation ou transpiration pour un site donné compte tenu des disponibilités en eau dans le sol (Stephenson, 1998).
- Le **déficit d'évaporation DE** est défini comme la différence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle. Il représente l'eau manquante dans le sol pour que la demande évaporative soit pleinement satisfaite (Dyer, 2009).
- Le **soil water deficit (SWD)** compare la quantité d'eau dans le sol à un temps donné à une valeur-seuil qui définit un début de stress hydrique (début de régulation physiologique de la transpiration du couvert végétal par fermeture des stomates foliaires) : la réserve utile de survie ou RUS (Granier *et al.*, 1999) :

$$SWD = RUS - RU = 0,4 * RUM - RU, \text{ si } RU < RUS, \\ \text{Sinon } SWD = 0$$

- L' **indice d'aridité IA** qui compare la disponibilité en eau à la demande évaporative de l'atmosphère via des valeurs d'évapotranspiration réelles et potentielles (Nix and Fitzpatrick, 1969; Doorenbos, 1979; Zierl, 2001). Cet indice est défini par :

$$IA = \frac{ETR}{ETP}$$

- Le « **relative extractible water** » **REW** :

$$REW = \frac{RU}{RUM} = \frac{W - W_w}{W_f - W_w}$$

W étant l'eau contenue dans le sol à un temps t, W_w l'eau contenue dans le sol au point de flétrissement permanent, et W_f la quantité d'eau à la capacité au champ (Granier *et al.*, 1999; Breda *et al.*, 2006).

- Le « **stress index** » (**SI**) (Nix and Fitzpatrick, 1969), défini par le rapport RU/ETP. Il caractérise ainsi l'eau disponible dans le sol par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère.

2. Les données utilisées pour le calcul du bilan en eau

Différents types de données écologiques spatialisées sont nécessaires pour le calcul du bilan hydrique des sols et la production de cartes sur la Lorraine selon les critères définis ci-dessus : les précipitations, les températures, le rayonnement solaire, et la réserve utile maximale des sols (RUM). Nous avons calculé et sélectionné les données d'entrée dans l'optique d'optimiser la discrimination de ces paramètres aux échelles locales sur l'ensemble du territoire étudié.

21. Le rayonnement solaire

Le modèle SAFRAN, développé par Météo-France, fournit des valeurs de rayonnement solaire au sol (en W/m²) sur la France au pas de 8 km, tenant compte principalement de la latitude, de la topographie et de la nébulosité (Vidal *et al.*, 2010). Il n'a pu être utilisé du fait de l'importance de la résolution spatiale qui ne permet pas de prendre en compte les variations dues à la topographie qui sont un déterminant important de la disponibilité en eau. Nous avons utilisé le modèle Hélios qui existe à une résolution beaucoup plus fine (50m) et qui intègre les effets de la topographie locale (pente, altitude, exposition, effet de masque), et des effets à large échelle liés aux variations de latitude et de nébulosité (Piedallu and Gegout, 2007; Piedallu and Gegout, 2008).

22. Les températures et les précipitations

Deux modèles sont disponibles auprès de Météo France : le modèle climatique AURELHY (Benichou and Le Breton, 1987) et le modèle SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010). Le modèle SAFRAN ne peut être utilisé à cette échelle pour les mêmes raisons que pour le

rayonnement solaire, et le modèle AURELHY pose également un certain nombre de problèmes pour une utilisation à l'échelle régionale. En effet, il produit des températures et des précipitations moyennes mensuelles et annuelles sur la France au pas du kilomètre en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5 km. De ce fait, la donnée est relativement lissée dans les zones de montagne, particulièrement pour les températures qui sont très fortement influencées par l'altitude. D'autre part, le modèle AURELHY n'est pas validé, et les données mensuelles sont fournies par périodes de 30 ans non compatibles avec le besoin de caractériser le climat ou des évolutions de climat pour les périodes plus fines. De ce fait, nous avons recalculé des modèles de températures et de précipitations dans le cadre de cette étude, dans le but de mieux prendre en compte les effets de la topographie locale, et de pouvoir évaluer les variations spatiales des changements de climat à des pas de temps plus fins que les moyennes trentenaires fournies par Météo France. Ces modèles ont été réalisés sur la France entière afin d'éviter des effets de bord. Nous avons utilisé les données des postes Météo France complets sur la période 1960-2010, qui ont été modélisés à l'aide de covariables géographiques, topographiques, ou liées à l'occupation du sol ou au climat, en utilisant des techniques couramment utilisées dans la littérature combinant modélisation et interpolation des résidus (Ninyerola *et al.*, 2000). Les cartes de températures ont été produites au pas de 50 mètres et les modèles de précipitations au pas du kilomètre. Pour une description plus complète des méthodes utilisées, consulter l'article de Bertrand et al (Bertrand *et al.*, 2011), ainsi que les fiches de métadonnées accessibles à partir du portail SILVAE (http://silvae.agroparistech.fr/home/?page_id=495).

Une comparaison des cartes produites par Météo France et le LERFoB est disponible dans le rapport de stage de JB Richard (Richard, 2011). Elle montre globalement de faibles écarts, logiquement majoritairement localisés sur les zones de montagne ou des zones de forte transition climatique (Alsace, Normandie, Cévennes pour les pluies par exemple). Une comparaison de ces modèles a également été réalisée au regard de leur capacité à prédire la distribution de 40 essences françaises parmi les principales. Ces travaux, qui sont également détaillés dans le rapport de stage de JB Richard (Richard, 2011), montrent à l'échelle de la France des performances entre les modèles relativement similaires pour les températures, et une efficacité un peu meilleure du modèle LERFoB pour les précipitations. Ces résultats sont à prendre avec précaution car il s'agit de tests de capacité prédictive et non d'une validation. Ceci dit, ils suggèrent que les modèles du LERFoB ne seraient a priori pas moins performants que ceux du modèle AURELHY. Du fait de la plus fine résolution en zone de montagne, de la possibilité de réaliser des calculs pour des périodes définies différentes des normales AURELHY, et de la connaissance des imprécisions des modèles, les calculs réalisés au LERFoB ont été choisis pour la suite des travaux.

23. La réserve utile maximale des sols

Trois cartes des RUM ont été utilisées :

- la carte des RUM des sols forestiers de France au pas de 1 kilomètre développée en 2011 (Piedallu *et al.*, 2011a) (Figure 3 A) ,
- une carte au pas de 500 mètres élaborée dans le cadre de cette étude avec le même jeu de données ponctuelles. Les améliorations ont porté sur la méthode de spatialisations, qui par l'utilisation de co-variables géologiques et topographiques disponibles à

l'échelle de la France, ont permis la réalisation d'une carte avec des pixels un peu plus fins (Figure 3 B).

- Une carte au pas de 50 mètres développée sur la Lorraine dans le cadre de cette étude. En effet, du fait de la forte variabilité locale des paramètres qui déterminent la RUM, une résolution spatiale de 1 km ou 500 m demeure probablement encore insuffisante, surtout pour des applications locales à l'échelle de la forêt ou de la parcelle, telles qu'elles sont requises par la communauté forestière. La méthodologie développée pour la mise en place de cette carte des RUM à fine résolution est consultable dans le rapport de stage de Thomas Villiers (Villiers, 2011). Ce travail s'est fondé sur l'utilisation de la carte géologique numérique au 1/50000^e, qui a été harmonisée pour les besoins de l'étude, et d'indices caractérisant principalement la topographie, qui ont été utilisés pour modéliser la RUM (Figure 3 C).

La comparaison des trois cartes à l'échelle de la Lorraine montre globalement une bonne cohérence spatiale (Figure 3). Les cartes réalisées à l'aide de modèles (B et C) laissent cependant voir une variabilité spatiale plus importante. Un zoom au 1/100000^e sur la région de Nancy (Figure 4) permet de mieux voir les différences entre ces cartes aux échelles locales. Les effets de la prise en compte de la géologie au 1/50000^e apparaissent nettement (Figure 4 C), les effets des placages limoneux (tâches de couleur jaune ou bleue correspondant à des réserves maximales en eau plus importantes) apparaissent nettement sur les plateaux calcaires à faible RUM.

24. Validation des indices calculés

Les différents indices utilisés pour le calcul de bilan hydrique édaphique ont été validés à l'échelle de la France entière. Il s'agit du modèle Hélios (Rayonnement solaire), des modèles de températures et de précipitations du Lerfob, et des données de RUM au pas de 1 km ou de 500 m (Table 2). Les données de RUM élaborées au pas de 50 m calculées localement n'ont pu être validées à cette échelle et les résultats seront présentés uniquement pour la Lorraine.

Indice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	an
Hélios	0,89	0,84	0,82	0,62	0,66	0,62	0,68	0,65	0,73	0,79	0,84	0,89	0,82
Temp	0,94	0,95	0,94	0,93	0,93	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93	0,94	0,93	0,93
Prec	0,69	0,71	0,76	0,77	0,82	0,83	0,85	0,83	0,82	0,74	0,77	0,66	0,78
RUM 1 km	0,24												
RUM 500 m	0,29												

Table 2 : R² entre les données utilisées pour le calcul de bilan en eau et des mesures réalisées sur des jeux de données indépendantes à l'échelle de la France, pour chaque mois de l'année (de 1 à 12) et l'année(an) : modèle de rayonnement solaire (Hélios, n = 88 postes de mesure de Météo France, validation des valeurs moyennes sur la période 1971-2000), températures et précipitations (Temp et Prec, n = 493 postes de mesure Météo France, validation des valeurs moyennes sur la période 1996-2008), RUM au pas de 1 km ou de 500 m (n = 542 placettes du réseau Biosoil).

À l'échelle de la France, les résultats montrent que les températures sont globalement très bien prédites, avec un $R^2 = 0,93$ pour les moyennes annuelles. Les précipitations et le rayonnement solaire montrent également de bonnes performances, bien qu'elles soient un peu inférieures ($R^2 =$ entre 0,78 et 0,82 pour les moyennes annuelles, voire Table 2). Ces performances concernant les variables climatiques concordent avec celles d'autres études menées dans des contextes climatiques différents mais également variés (Ninyerola *et al.*, 2000). La prédiction des RUM est beaucoup plus délicate et le R^2 entre valeurs estimées par la carte et mesurées sur le terrain étant relativement faible à l'échelle de la France (R^2 entre 0,24 et 0,29 selon la couche). Cette différence entre variables climatiques et variables édaphiques est logique pour plusieurs raisons : tout d'abord, les données climatiques sont plus faciles à mesurer que les RUM, dont l'estimation est empreinte d'un grand nombre de simplifications et d'imprécisions, et probablement également d'erreurs de mesure (dans le jeu de calibration mais aussi dans le jeu de validation). De plus, les RUM présentent une variabilité spatiale probablement beaucoup plus importante que les variables climatiques, la profondeur du sol ou la charge en cailloux pouvant varier fortement à des échelles très locales (Mummery *et al.*, 1999; Richard *et al.*, 2013). Cette forte variabilité spatiale rend plus difficile à la fois la création de la carte des RUM et sa validation. En effet, les valeurs prédites par le modèle numérique donnent une valeur moyenne par pixel, alors que la validation se fait à l'aide de mesures ponctuelles caractérisant les conditions à l'échelle de la fosse pédologique (Figure 2). Les données locales utilisées pour la validation peuvent ainsi fournir des informations qui ne sont pas représentatives de la zone étudiée. Les R^2 qui définissent le lien entre la carte numérique et les mesures du jeu de validation témoignent de différences qui peuvent aussi bien être dues à des imprécisions de la carte qu'à l'absence de représentativité d'une partie du jeu de validation. Il est également à noter que les performances de la carte des RUM évaluées sur un jeu indépendant de 1455 placettes IFN à l'échelle de la Lorraine montrent des performances bien meilleures : $R^2 = 0,47$ et RMSE = 28 mm pour la carte des RUM au pas de 500 m, $R^2 = 0,54$ et RMSE = 26 mm pour la carte au pas de 50 m (Villiers, 2011).

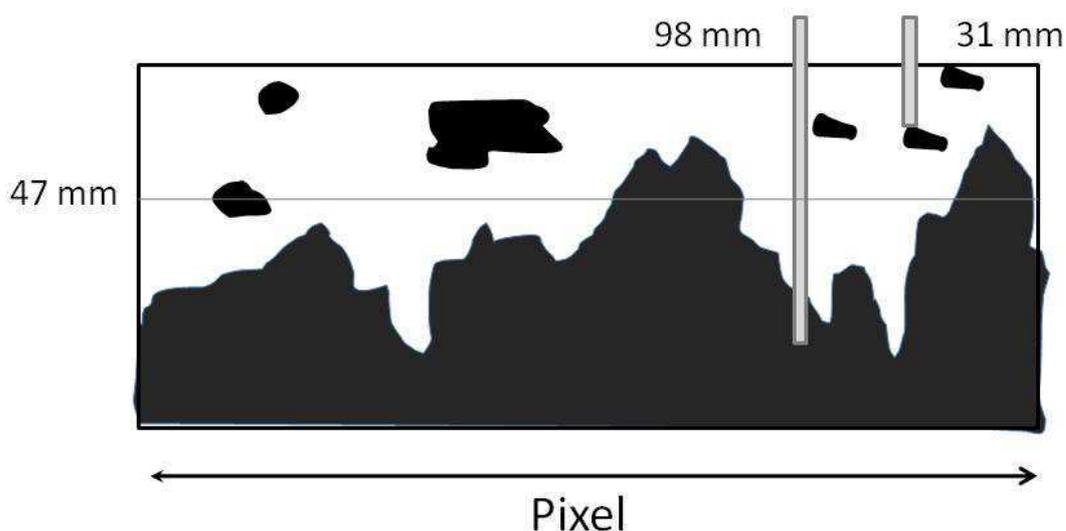


Figure 2 : schéma théorique illustrant les difficultés de validation des modèles numériques de RUM avec des données ponctuelles. Le trait gris représente la valeur de RUM prédite dans le pixel. Du fait de l'importante variabilité spatiale des RUM, la mesure faite localement (barres verticales) peut ne pas être représentative des conditions moyennes.

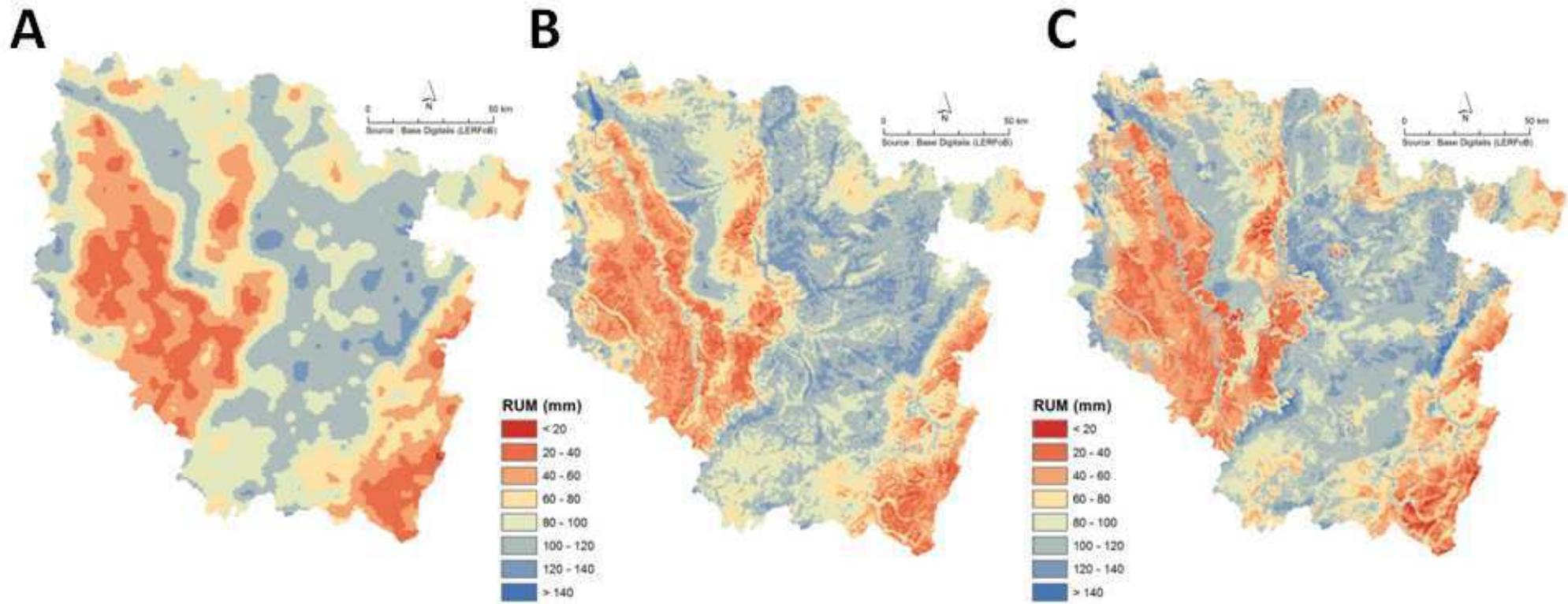


Figure 3 : Cartes des réserves utiles maximales des sols (RUM) élaborées au pas de 1km (A), 500 m (B), et 50 m (C) sur l'ensemble de la Lorraine.

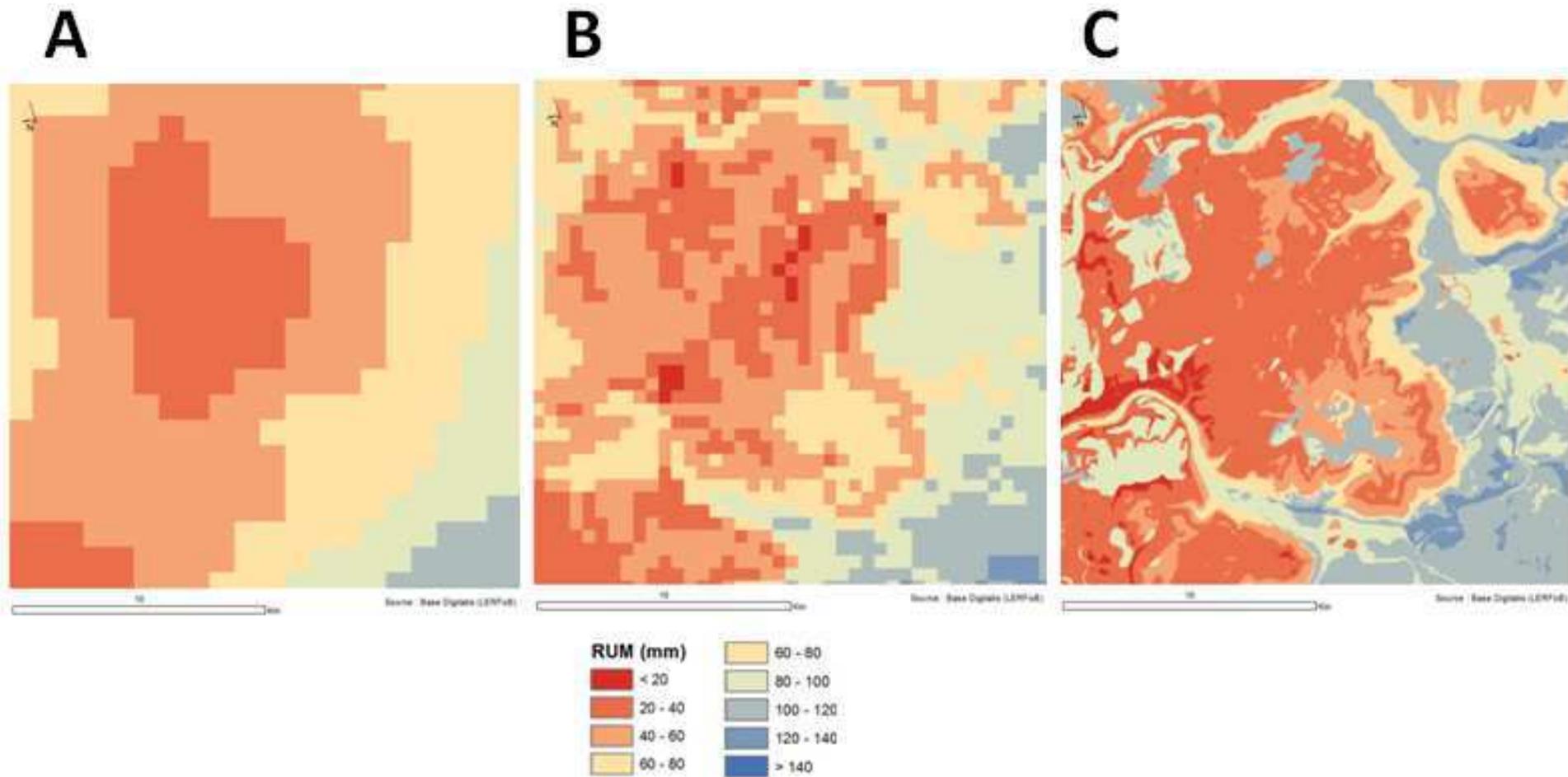


Figure 4 : Cartes des réserves utiles maximales des sols (RUM) élaborées au pas de 1km (A), 500 m (B), et 50 m (C) sur la région de Nancy (plateau de Haye, échelle 1/100000 eme)

3. Résultats

31. Comparaison entre les différents indices de bilan hydrique calculés

Les 7 indices calculés selon les 2 méthodes² ont été comparés au regard de leur capacité à expliquer la distribution des principales essences présentes en France. Un modèle de distribution de chacune des 37 essences a été élaboré en incluant les indices de bilan hydrique de Thornthwaite et Palmer pour chaque saison, la saison de végétation (d'avril à octobre) et pour l'année. Ces modèles sont réalisés à partir de 32 544 relevés floristiques en présence/absence de l'Inventaire Forestier National (Drapier and Cluzeau, 2001). Cela représente donc un total de près de 3000 modèles (37 espèces * 2 méthodes * 7 indices * 6 périodes), dont l'efficacité a été évaluée grâce à leur AUC. L'AUC est un indicateur de qualité des modèles (Fielding and Bell, 1997), variant entre 0,5 et 1, une valeur supérieure à 0,7 étant considéré comme correcte. Les modèles ont été calibrés dans un premier temps uniquement avec des indices thermiques (minimum des températures mensuelles moyennes calculées sur la période 1961 – 1990 et nombre de jours où l'on mesure des températures supérieures à 5°C). Un deuxième modèle a été réalisé pour chaque essence en ajoutant un par un les indices de bilan en eau évalués. La différence entre le modèle purement thermique et le modèle incluant l'indice de bilan en eau a ensuite été calculée. Cette différence a permis de comparer la performance des différents indices et déterminer leur capacité à expliquer la distribution des essences étudiées (table 3).

période	Palmer							Total	Thornthwaite							Total
	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD	Palmer	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD	Thornthwaite
hiver	0,035		0,014				0,001	0,017	0,035		0,014				0,001	0,017
printemps	0,035	0,001	0,011	0,001	0,010	-0,012	0,002	0,007	0,035		0,011	0,009	0,010	-0,012	0,000	0,009
été	0,038	0,041	0,030	0,040	0,040	0,039	0,022	0,036	0,036	0,044	0,030	0,042	0,025	0,036	0,018	0,033
automne	0,031	0,010	0,019	0,009	0,013		0,013	0,016	0,031	0,009	0,018	0,009	0,013		0,013	0,015
annuel	0,036	0,041	0,014	0,039	0,024	0,001	0,021	0,025	0,036	0,043	0,013	0,041	0,017	0,002	0,019	0,024
période de végétation	0,036	0,041	0,016	0,039	0,025		0,021	0,030	0,035	0,043	0,016	0,041	0,018		0,018	0,028

Table 3: Gain moyen d'AUC pour les modèles de distribution de 37 essences forestières incluant les différents indices issus du bilan en eau des sols, par rapport à des modèles basés uniquement sur des variables climatiques (minimum des températures mensuelles moyennes calculées sur la période 1961 – 1990 et nombre de jours avec des températures supérieures à 5°C). Les indices hydriques sont calculés à partir des bilans hydriques de Palmer et Thornthwaite pour chaque saison, sur une saison de végétation (d'avril à octobre inclus) et sur l'année entière (Richard, 2011).

Ces résultats montrent que la période estivale permet le mieux de discriminer la distribution des espèces forestières. Les indices les plus efficaces sont le déficit d'évaporation (DE) et l'indice d'aridité de Thornthwaite (IA), ainsi que le déficit d'évaporation de Palmer (indices estivaux, annuels et calculés sur la période de végétation). Le déficit d'évaporation estival de Thornthwaite semble cependant être légèrement plus efficace que les autres, avec un gain

² Tous les indices présentés dans cette partie sont calculés avec la carte des RUM au pas de 500 mètres.

d'AUC par rapport à un modèle purement thermique de 0,044. Les écarts de gains d'AUC entre ces différents indices (estivaux ou annuels) sont cependant relativement faibles, du fait de fortes corrélations entre eux. Afin de vérifier ce choix, nous avons également compté le nombre d'essences pour lesquelles chaque indice est le plus performant (Table 4). Les résultats confirment la suprématie des indices estivaux et la meilleure performance du déficit estival de Thornthwaite.

	Palmer							Total Palmer	Thornthwaite							Total Thornthwaite	Total général
	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD		RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD		
hiver	6.1		1.4					7.4	6.1		1.4					7.4	14.9
printemps	0.7	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.7		1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	4.1
été	4.1	0.9	6.8	0.9	3.6	6.8	0.4	23.4	0.0	11.5	10.8	0.7	0.0	0.0	0.0	23.0	46.3
automne	0.0	0.4	2.7	0.4	0.0		0.0	3.5	2.7	0.4	0.0	0.4	0.0		0.0	3.5	6.9
annuel	5.4	4.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	9.8	0.0	1.4	0.0	0.7	0.0	0.0	1.4	3.4	13.2
période de végétation	1.4	4.1		0.0	0.0		0.4	5.8	0.0	6.8		0.7	0.0		1.4	8.8	14.6
Total	17.6	9.4	12.2	1.3	3.6	6.8	1.2	51.9	9.5	20.0	13.5	2.4	0.0	0.0	2.7	48.1	100.0

indices	Palmer							Thornthwaite						
	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD
gain d'AUC estival	0,038	0,041	0,030	0,040	0,040	0,039	0,022	0,036	0,044	0,030	0,042	0,025	0,036	0,018
nombre de modèles en meilleure variable	13,5	5,0	6,8	0,9	3,6	10,8	2,7	5,4	27,0	14,9	4,1	0,0	2,7	2,7

Table 4 : Pourcentage d'essences pour lesquelles la distribution est mieux prédite pour chaque indice, calculé pour chaque saison, sur une saison de végétation et sur l'année entière (table du haut), et parmi les variables estivales seulement (table du bas) (Richard, 2011). Lorsque plusieurs indices arrivent à égalité de performance pour une même essence, chacun d'entre eux se voit affecté d'une valeur de 1 divisé par le nombre d'indices arrivant à égalité, ce qui explique les valeurs décimales (par exemple si 2 indices arrivent à égalité, une valeur de 0,5 a été ajoutée à chaque indice).

Cette analyse conduit à sélectionner le déficit d'évaporation estival (somme des déficits de juin, juillet et août) calculé selon Thornthwaite pour la suite de cette étude.

32. Comparaison entre les indices de bilans hydriques édaphiques et les indices climatiques

Nous avons cherché à évaluer si ces indices de bilan hydrique édaphiques³ étaient plus performants que les indices climatiques traditionnellement utilisés, la pluie et les bilans hydriques climatiques estimés par la différence entre la pluie et l'ETP. A l'échelle nationale, nous avons comparé l'apport de différents indices hydriques (RU et DE d'un côté, pluie et bilan hydrique climatique de l'autre) une fois ajoutés à la température minimale du mois de janvier et à la somme des degrés jours au-delà de 5°C, pour modéliser la distribution de 37 essences parmi les plus communes (utilisation de 32827 placettes de la base de l'IFN) (Piedallu *et al.*, 2013). Les modèles prenant en compte le bilan en eau des sols sont statistiquement plus efficaces que ceux construits sur des paramètres uniquement climatiques (différence moyenne en AUC +0.019; n = 37, test de Student, t = 3.68, d.f. = 36; P = 0.0008) (Figure 5). Quand les indices thermiques sont pris en compte, l'ajout des pluies ou des bilans

³ Les indices présentés dans cette partie sont calculés avec la carte des RUM au pas de 500 mètres

hydriques climatiques augmente l'AUC de 0.76 à 0.80, et jusqu'à 0.82 en utilisant le bilan hydrique des sols. Cependant, ces différences ne sont pas homogènes selon les espèces, les hygrophiles et les xérophiles étant nettement plus améliorées par la prise en compte du compartiment sol que les mésophiles qui sont relativement indifférentes à la méthode d'estimation de l'eau disponible pour les plantes. Ces résultats montrent que même si la RUM des sols est difficile à évaluer, sa prise en compte à travers le calcul de bilan hydrique édaphique permet d'améliorer la prédiction de la distribution des essences de façon conséquente pour un certain nombre d'entre elles. Elle valide l'intérêt d'utiliser les calculs de bilan en eau des sols pour cartographier la disponibilité de la ressource en eau.

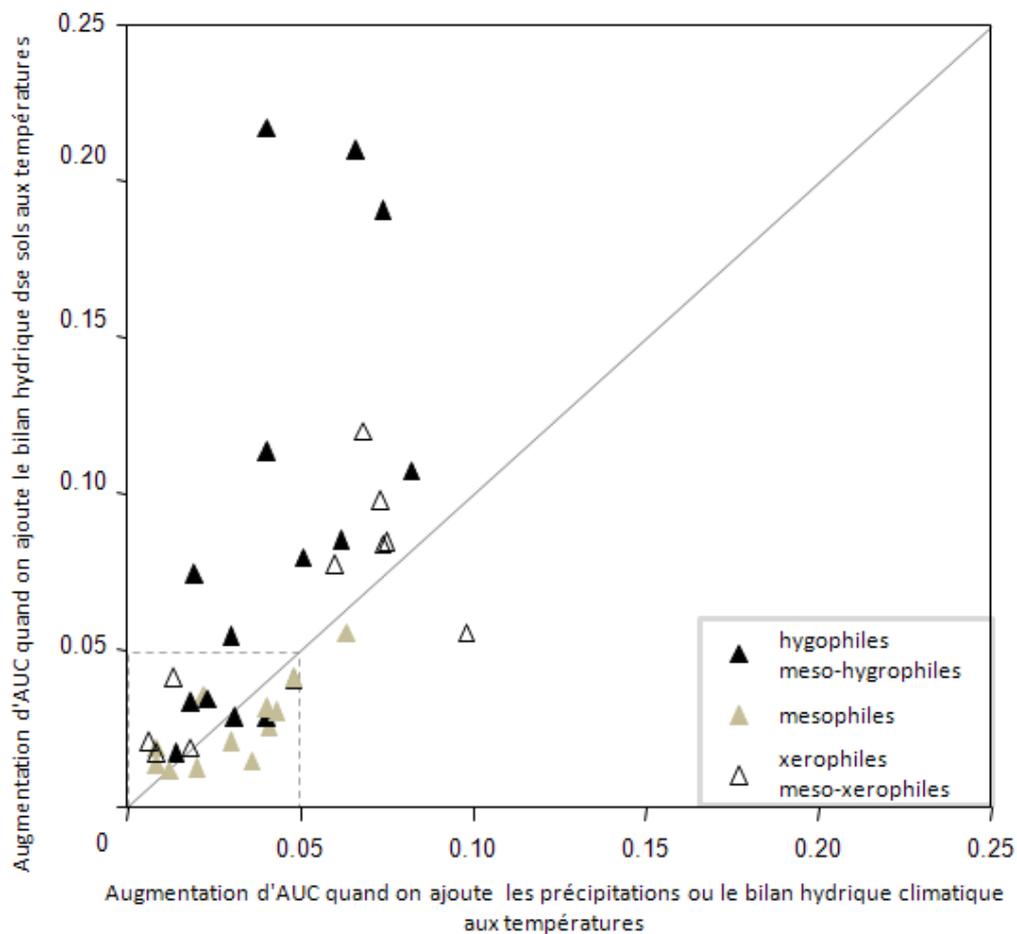


Figure 5: Augmentation d'AUC pour les modèles de distribution des espèces basés sur des variables thermiques (température minimale d'hivers et somme des températures au dessus de 5°C), en incluant l'indice le plus efficace parmi les indices climatiques (précipitations, bilans ou déficits hydriques climatiques), ou le bilan en eau des sols (réserve utile ou le déficit d'évaporation) ($n = 37$ espèces). L'augmentation d'AUC moyenne pour les modèles incluant un indice hydrique climatique est de 0.041 contre 0.060 quand l'eau du sol est prise en compte (Piedallu et al., 2013).

33. Réalisation des cartes de contrainte hydrique pour différentes périodes

331. Calcul de la carte des DE pour la période 1961-1990

Le bilan en eau des sols a été calculé sur la Lorraine pour la période 1961-1990 en utilisant les cartes de RUM au pas de 500 mètres et de 50 mètres. Dans cette partie, les cartes réalisées avec la carte des RUM au pas de 50 m seront présentées (Figure 6). Elles concernent les RU qui représentent la quantité d'eau disponible pour les plantes, et les DE estivaux, qui ont été identifiés lors de l'étape précédente pour leur capacité à déterminer la distribution des espèces, et qui représentent un indicateur de stress hydrique. Même si des valeurs sont fournies pour l'ensemble du territoire, seules les données présentes dans les régions forestières ont été validées et il est probable que la pertinence de la carte soit moindre en dehors de ces zones du fait d'une plus grande approximation sur les RUM (les données climatiques étant de qualité égale). Nous rappelons également que les températures prises en compte pour cette carte correspondent à celles enregistrées sous forêt (l'ensemble du territoire est donc considéré comme forestier), et que les valeurs de bilan en eau correspondent à celles simulées au sommet de la canopée.

Cette carte permet de mettre en évidence une grande hétérogénéité de la réserve en eau disponible pour les plantes à l'échelle du territoire Lorrain. Les pentes des montagnes vosgiennes, les plateaux calcaires et la Warndt (région de St Avold) apparaissent nettement avec une RU plus faible, alors que les fonds de vallées vosgiennes, les plateaux lorrains, et la plaine de la Woivre apparaissent avec une plus forte réserve. Cette réserve est globalement sous estimée, du fait que les RUM soient calculées pour un mètre de sol maximum, alors que les racines profondes qui jouent un rôle important en cas de sécheresse peuvent descendre au-delà. Cependant, la profondeur de sondage de 1 m est considérée comme suffisante pour les études sur la croissance (Berges and Balandier, 2010). Cette sous estimation est probablement plus importante dans les zones de plateaux calcaires du fait des difficultés de prospection dans les zones fracturées, où les racines des arbres parviennent quand même à s'implanter.

La cartographie des DE d'été, qui évalue l'intensité du stress hydrique pouvant être subi par les plantes (figure 7), montre là aussi des valeurs contrastées sur la Lorraine. Les zones les plus déficitaires se situent principalement au nord de Nancy, selon un axe nord sud suivant la vallée de la Moselle, les rebords de plateaux calcaires, et la Woivre. On constate que dans certaines régions de faible RU (ouest des plateaux calcaires, Vosges du nord, pentes du massif vosgien), la demande climatique étant faible (faible ETP), le déficit hydrique édaphique est peu important. Cela signifie que dans certains endroits peu d'eau peut être disponible mais elle suffit à satisfaire les besoins des plantes. Ces valeurs de RU et de DE sont les indices hydriques qui sont les plus efficaces pour expliquer la distribution des espèces arborées (Piedallu *et al.*, 2013).

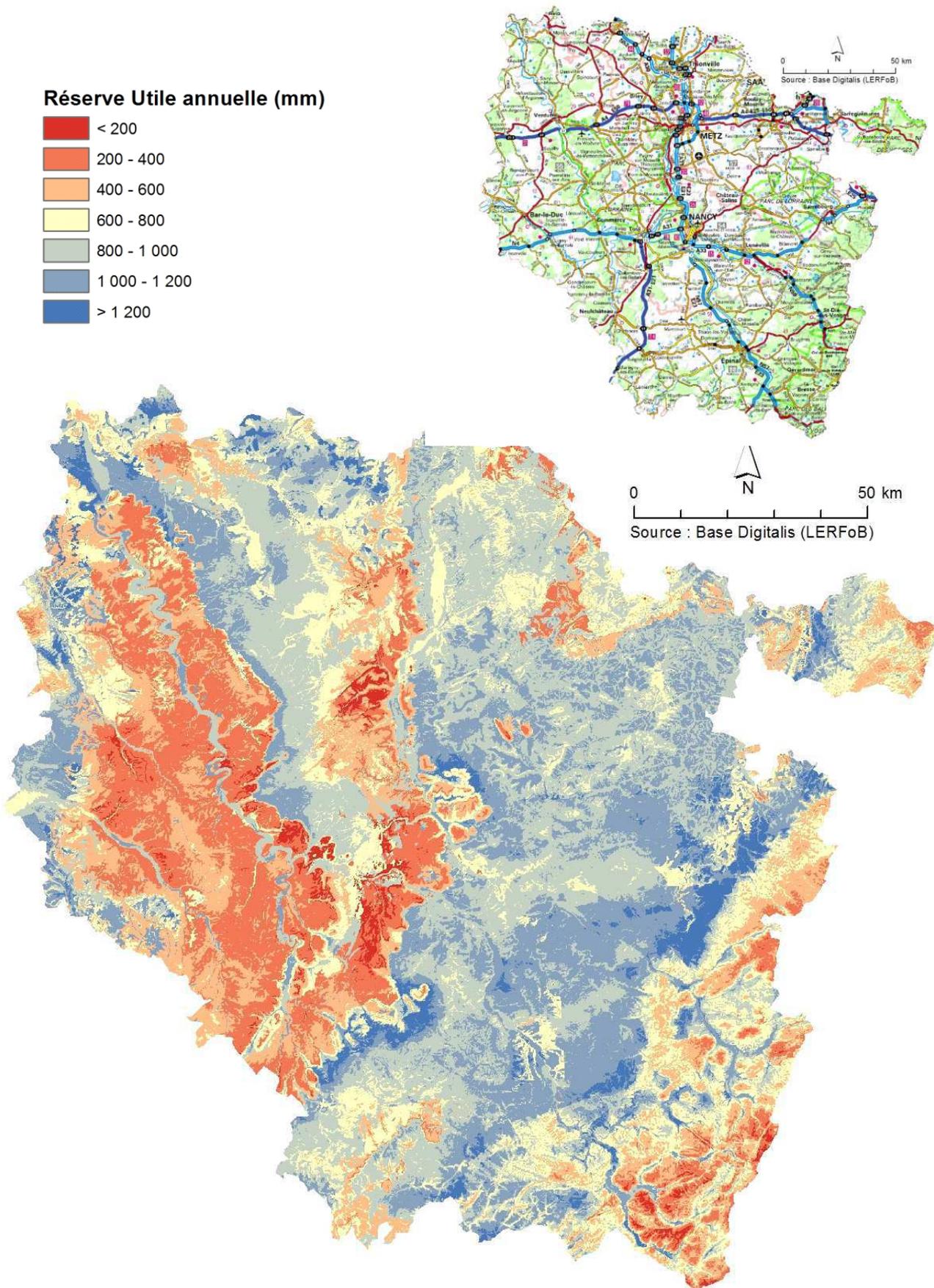


Figure 6 : RU annuelle (somme des RU des chaque mois de l'année), valeurs moyennes pour la période 1961-1990 sur la Lorraine, réalisé en utilisant la carte des RUM au pas de 50 m.

Déficit hydrique :

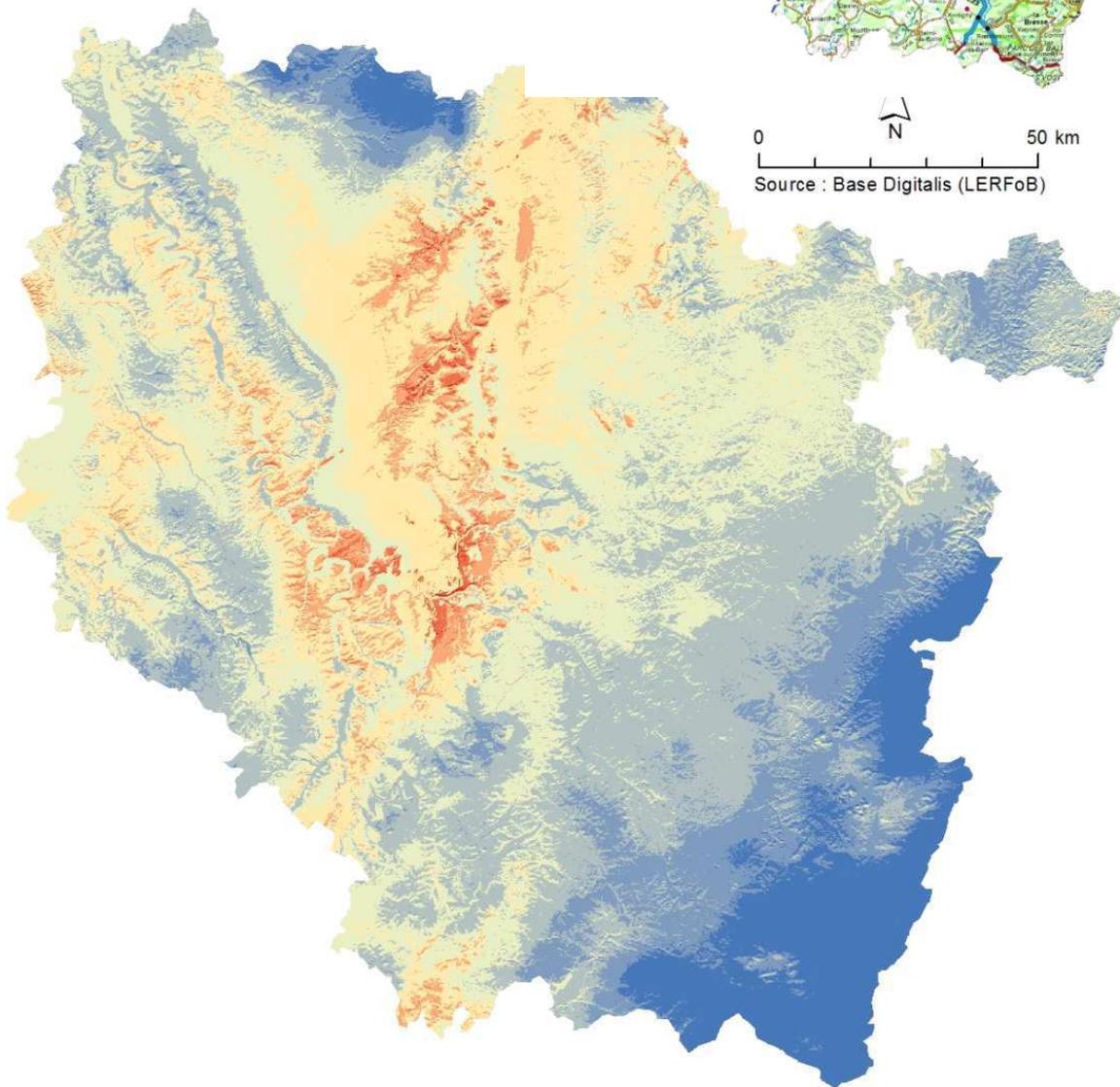
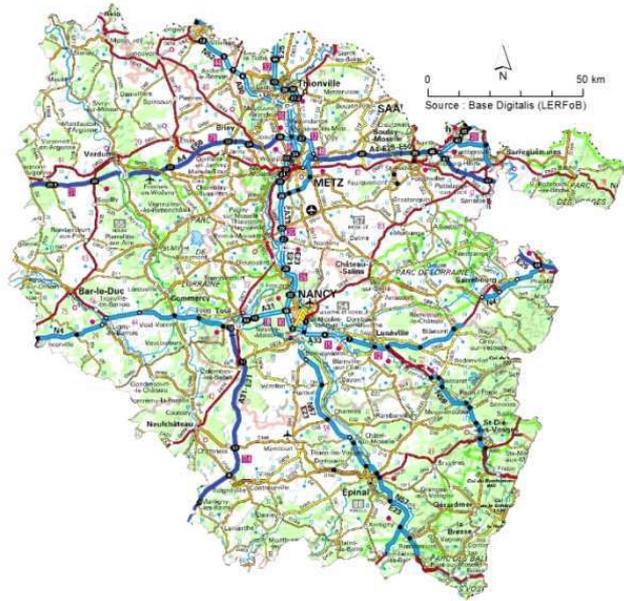
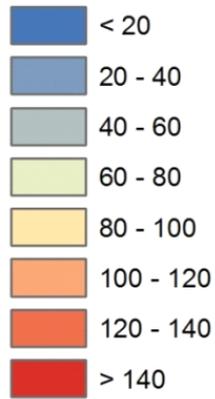


Figure 7 : DE estival (somme des DE de juin, juillet et août), valeurs moyennes pour la période 1961-1990 sur la Lorraine, réalisé en utilisant la carte des RUM au pas de 50 m.

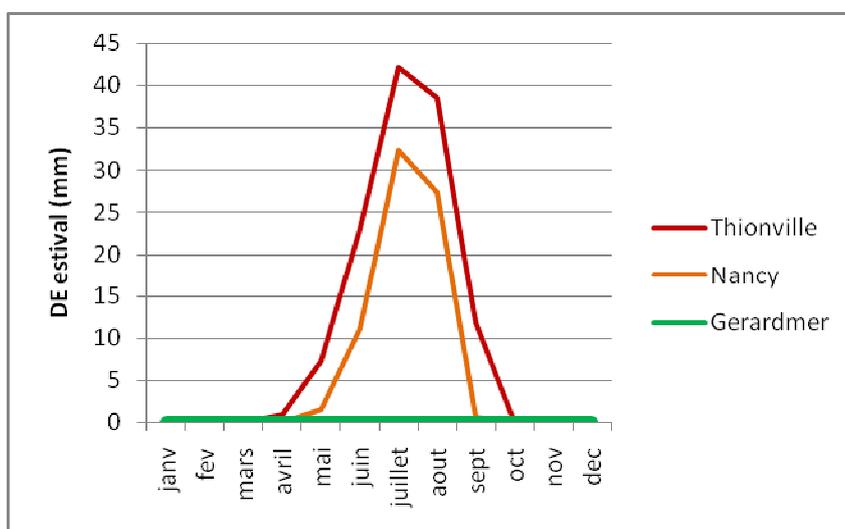
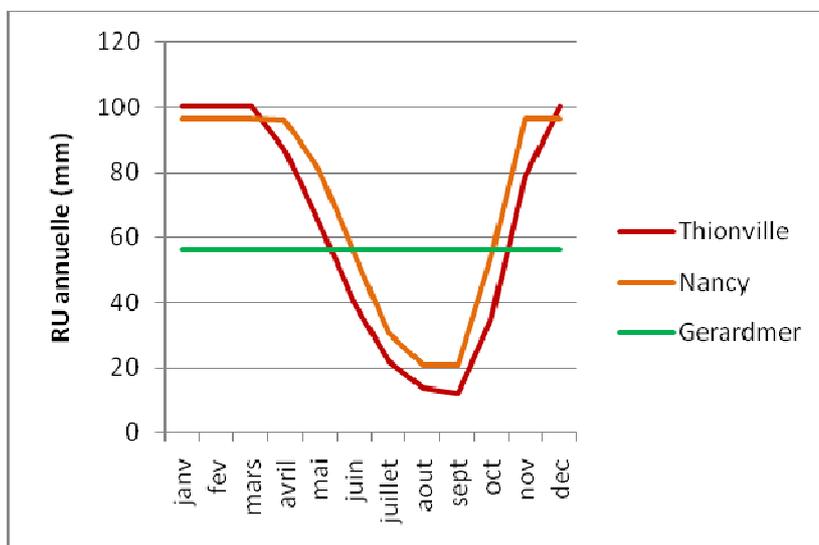


Figure 8 : Suivi au fil des mois des RU et DE moyens pour la période 1961-1990 calculés avec la carte des RUM au pas de 50 m, pour trois lieux en Lorraine.

L'évolution de la RU et du DE a été étudiée au fil des mois, en utilisant les valeurs moyennes pour la période 1961-1990. Pour cela, les valeurs mensuelles ont été extraites pour trois lieux répartis selon un gradient hydrique: Gérardmer dans une zone bien arrosée du massif vosgien, Thionville dans une des zones les plus chaudes de la région, et une ville intermédiaire, Nancy (Figure 8).

Les résultats montrent que pour les mois d'hiver la RU est à sa valeur maximale (la RUM), puis elle décroît au fil des mois d'été, atteignant un minimum au mois d'août, avant de se remplir à nouveau pendant l'hiver. Cette logique n'est pas suivie à Gérardmer, la RU restant à la valeur de la RUM toute l'année, du fait que les apports en eau soient supérieurs à l'ETP à l'échelle mensuelle (il n'y a donc pas vidage de la RU). Le fait que la RU de Gérardmer soit inférieure à celle des autres villes en hiver s'explique par le fait que la RUM y est plus basse. Il existe probablement en Lorraine tout un nombre de cas intermédiaire de vidage plus ou moins importants selon l'emplacement au sein de la région, certains coteaux calcaires en versant sud pouvant également présenter des déficits plus importants que ceux enregistrés à Thionville (Figure 7). De façon similaire, on voit un déficit d'évaporation estival apparaître pour les sites de Nancy et Thionville, de façon plus ou moins intense et plus ou moins tardive en fonction du stock d'eau initialement disponible (la RUM) et du climat. Ces résultats sont cohérents par rapport aux mesures ou simulations existantes (Lebourgeois *et al.*, 2005; Breda *et al.*, 2006) (Figure 9).

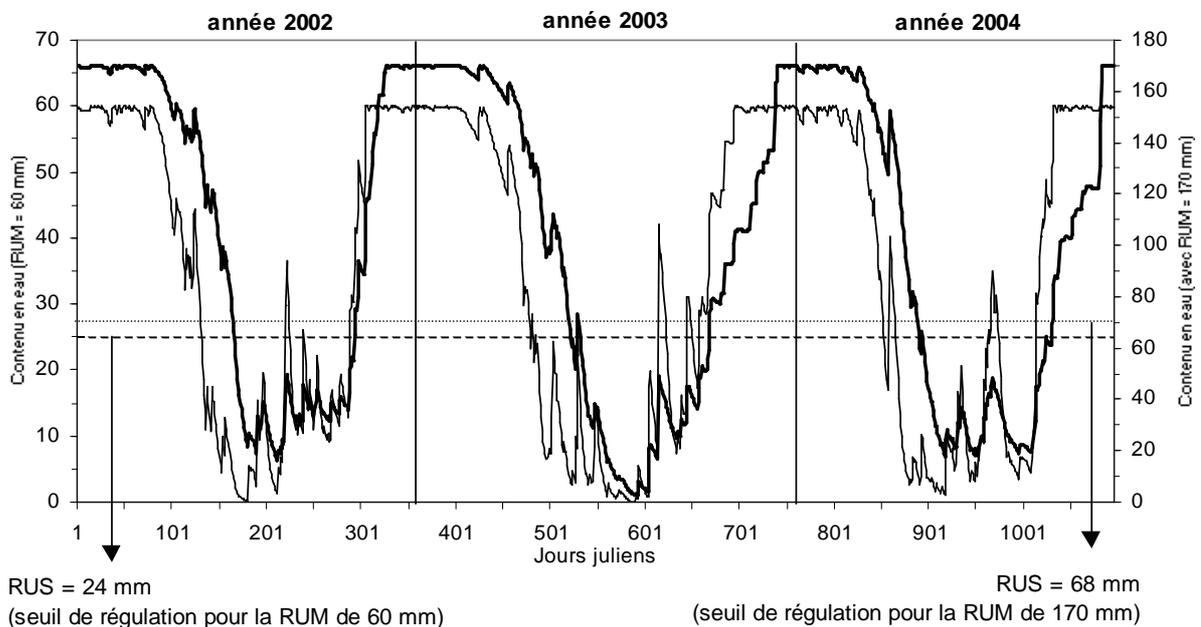


Figure 9 : Simulation d'évolution du contenu en eau du sol (RU, en mm) calculé en Lorraine à partir du logiciel Biljou (Granier *et al.*, 1999) au pas de temps journalier selon deux hypothèses de RUM pour 2002, 2003, et 2004, en hêtraie avec un LAI de 7 (communication personnelle F Lebourgeois).

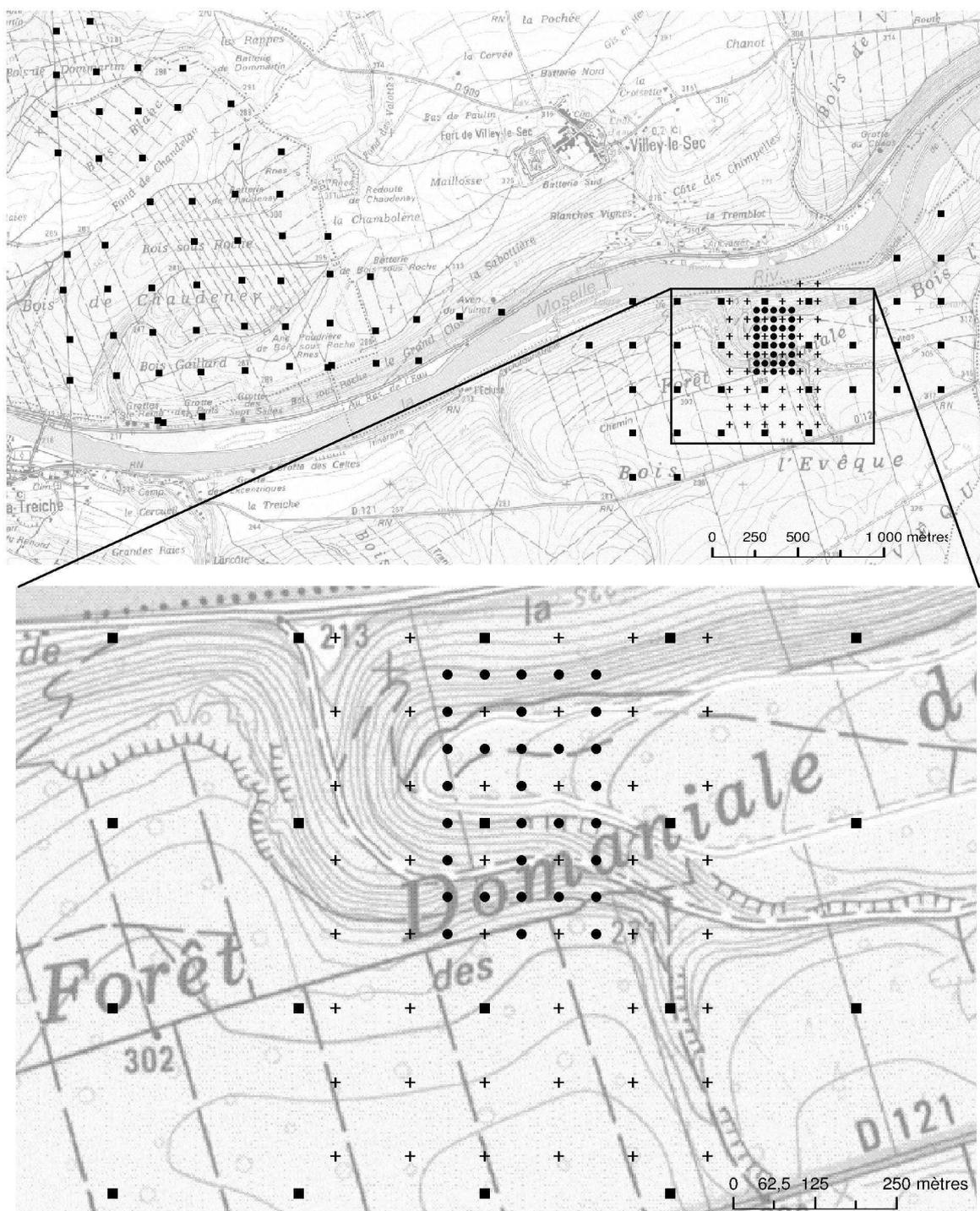
332. Validation des cartes produites pour la période 1961-1990

Il est très difficile de valider les cartes de bilan en eau des sols⁴ produites car il n'existe pas de jeu de données totalement adapté pour cela. De ce fait, la validation ne pourra

⁴ Sauf mention contraire, les indices présentés dans cette partie sont calculés avec la carte des RUM au pas de 500 mètres

être que partielle. Nous avons utilisé différents jeux de données disponibles ou collectés pour l'occasion :

- 25 placettes permanentes forestières du sous réseau météorologique RENECOFOR (réseau de suivi des écosystèmes forestiers (Ulrich, 1995)). Ces placettes mesurent le climat (températures, précipitations), et fournissent des données de description des sols et des peuplements forestiers. Sur 7 de ces placettes sont de plus relevées des valeurs de rayonnement solaire. Ces données, indépendantes de celles ayant servi à la calibration des modèles SIG de bilans en eau des sols, permettent de recalculer ponctuellement les bilans hydriques et ainsi de valider les cartes prédictives produites. Les principales limites viennent de l'absence de données de rayonnement solaire pour 18 placettes, qui devront être extraites du SIG. De plus, le nombre de placettes disponibles est limité, et la validation ne peut être réalisée que pour la France entière.
- Afin de pallier à ces faibles effectifs, nous avons utilisé différents jeux de placettes non permanentes existantes ou réalisées dans le cadre de cette étude. Ces données ont l'avantage d'exister à différentes échelles : respectivement 32544 et 1455 placettes IFN sur la France entière et sur la Lorraine (non utilisées lors du calcul des RUM), , ainsi qu'un jeu de placettes inventoriées dans le cadre de cette étude sur la forêt de Bois l'évêque-Villiers le sec (noté BEVS dans le texte). Ces placettes se situent sur les plateaux calcaires, à 30 km au sud est de Nancy, au niveau de la boucle de la Moselle : 92 placettes sur un maillage au pas de 250 mètres, 46 placettes sur un maillage de 100 m, et 37 placettes sur un maillage de 50 m (Figure 10). Si ces jeux de données permettent de travailler à différentes échelles et présentent des effectifs conséquents, ils ont pour inconvénient de ne pas avoir de mesures climatiques indépendantes. Ainsi, lorsque les bilans en eau des sols sont calculés, seules les valeurs de RUM sont indépendantes, les données climatiques étant extraites du SIG.



- maillage 250 m
- + maillage 100 m
- maillage 50 m

Figure 10 : localisation des relevés du dispositif BEVS (Bois l'évêque-Villiers le sec), localisé sur plateaux calcaires dans la boucle de la Moselle au sud ouest de Nancy.

3321. Utilisation du jeu de données RENECOFOR

Les données extraites des cartes de déficits d'évaporation mensuels pour chacun des mois de juin, juillet et août ont été comparées avec celles calculées sur les 25 placettes RENECOFOR réparties sur la France entière pour une période de données communes, 1996-2007. Pour cela, les bilans en eau ont été recalculés avec les données climatiques de cette période. On obtient un R^2 de 0,79 et une erreur quadratique moyenne de 7,5 mm. (Figure 11). On observe une relative bonne cohérence des données, excepté pour trois valeurs pour lesquelles le déficit d'évaporation extrait des cartes sous SIG est largement surestimé par rapport aux valeurs calculées, qui proviennent d'une placette située en Corse. Il n'est malheureusement pas possible d'étendre cette analyse à un nombre de postes plus important faute de données disponibles.

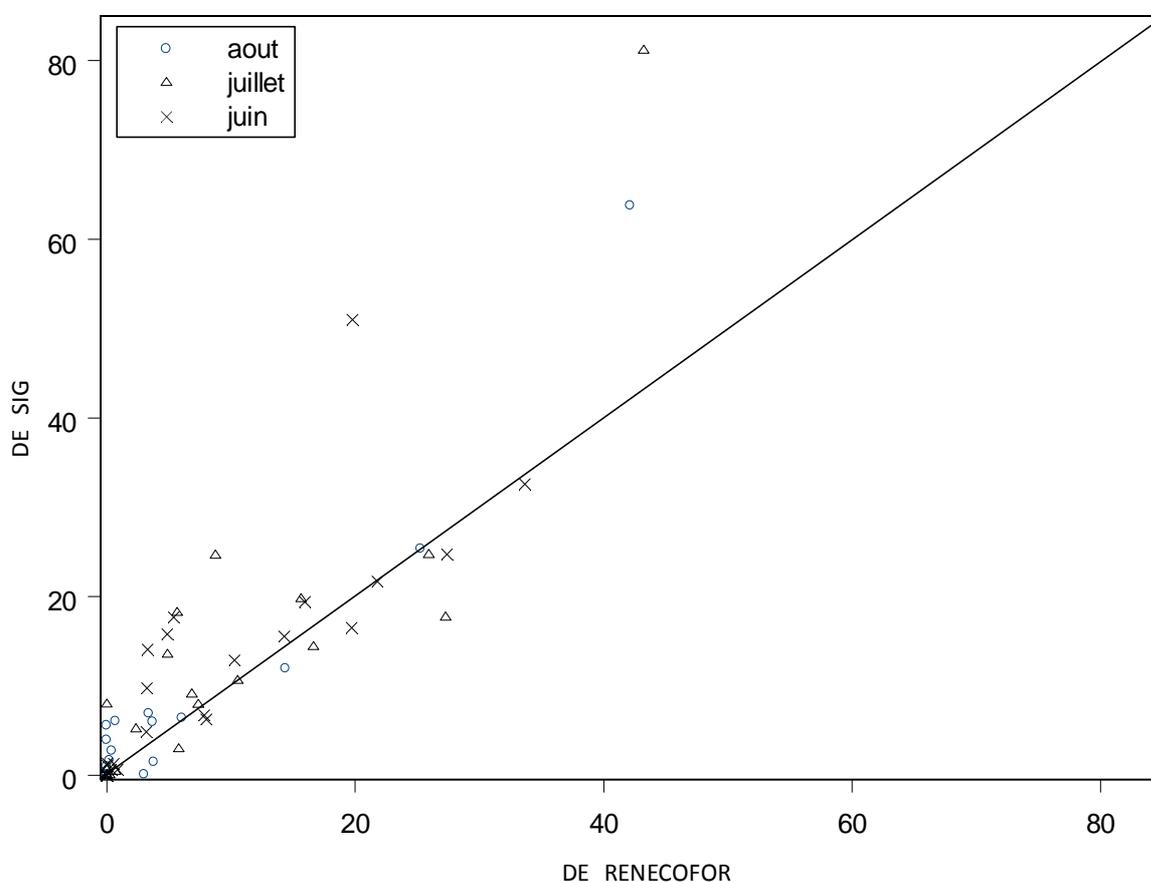


Figure 11: Comparaison des déficits d'évaporation de Thornthwaite pour les mois de juin, juillet et août (en mm) calculés à partir des données de 25 placettes RENECOFOR et extraits de la carte sous SIG ($n = 75$, période 1996-2007) (Richard, 2011).

3322. Utilisation du jeu de placettes non permanentes

L'utilisation du jeu de données de l'IFN à l'échelle nationale permet d'obtenir un R^2 de 0.88 avec une RMSE de 14,4 mm pour des valeurs variant de 0 à 337 mm. (Figure 12), avec des erreurs de prédiction non homogènes dans l'espace (Figure 13). Ces résultats

montrent une cohérence des bilans en eau à cette échelle, entre les indices calculés en utilisant la RUM calculée sur la placette ou extraite de la carte.

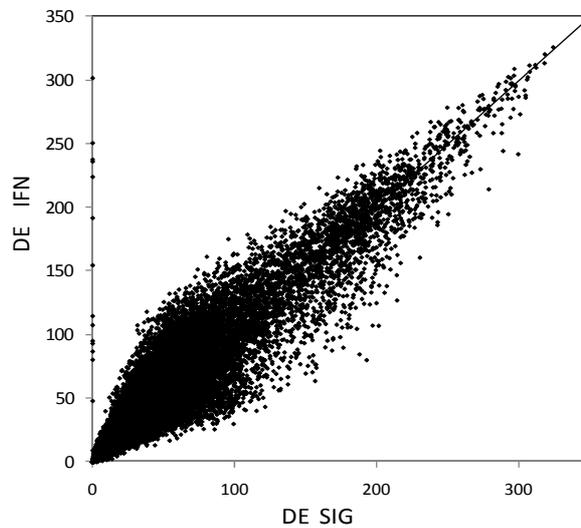


Figure 12 : Comparaison des déficits d'évaporation estivaux de Thornthwaite (en mm) calculées à partir des données de IFN pour la France entière sur un jeu indépendant ($n = 32544$) et extraites de la carte sous SIG (Richard, 2011).

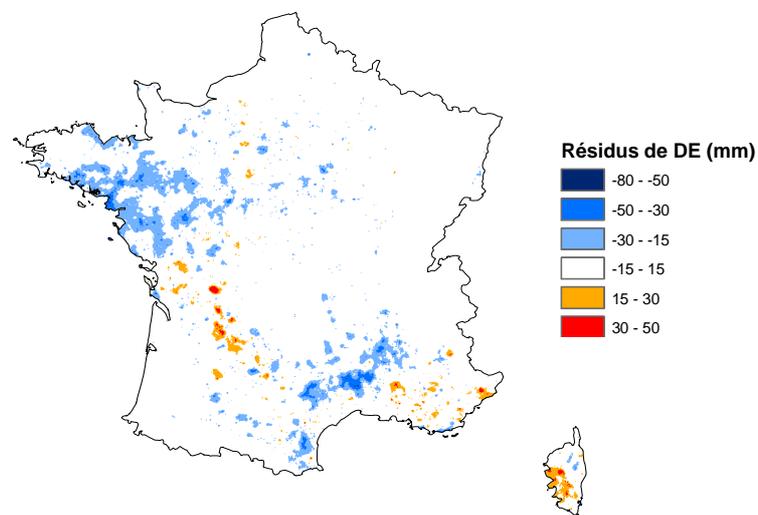


Figure 13 : Carte des écarts de déficit d'évaporation estival de Thornthwaite entre les valeurs calculées sur un jeu indépendant de placettes IFN ($n = 32544$), et extraites de la carte sous SIG (Richard, 2011). Une valeur positive indique une surestimation des données SIG.

La comparaison des valeurs calculées sur des placettes indépendantes et extraites du SIG à également été réalisée à des échelles variant de la Lorraine à la parcelle forestière. Deux versions des déficits d'évaporation calculés sous SIG ont été utilisées, basés sur la carte des RUM au pas de 500 m et la carte au pas de 50 m (Table 5, Figure 14).

	Lorraine	BEVS maillage 250 m	BEVS maillage 100 m	BEVS maillage 50 m
nombre de placettes	1455	92	46	37
DE moyen (calcul placettes)	6,8	29,1	6,6	7,7
DE calculé avec RUM 500 m				
R ² (RUM 500m)	0,31	0,45	0,12	0,46
RMSE (RUM 500m)	8,73	12,2	11,5	11,6
Biais (RUM 500m)	-4,5	-5,2	0,1	-2,3
DE calculé avec RUM 50 m				
R ² (RUM 50m)	0,77	0,60	0,21	0,65
RMSE (RUM 50m)	4,24	9,3	14,4	15,4
Biais (RUM 50m)	0,6	0,6	5,8	10,7

Table 5 : Relation entre les déficits d'évaporation estivaux de Thornthwaite (en mm) calculés sur des placettes de terrain indépendantes et extraites des cartes sous SIG, pour différentes emprises allant de la Lorraine à la parcelle (Richard, 2011).

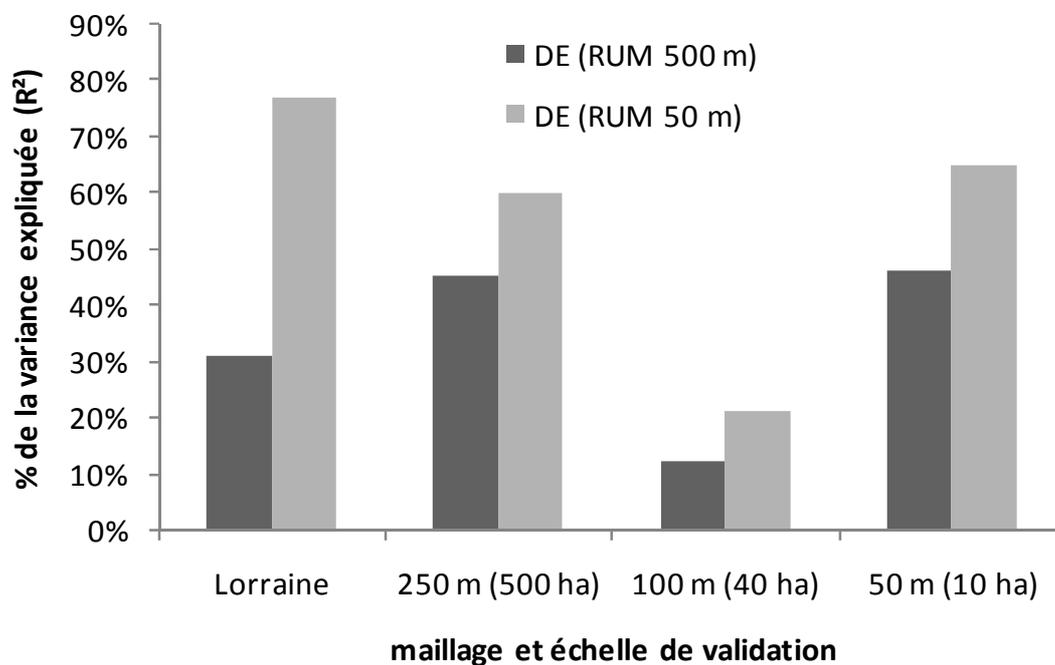
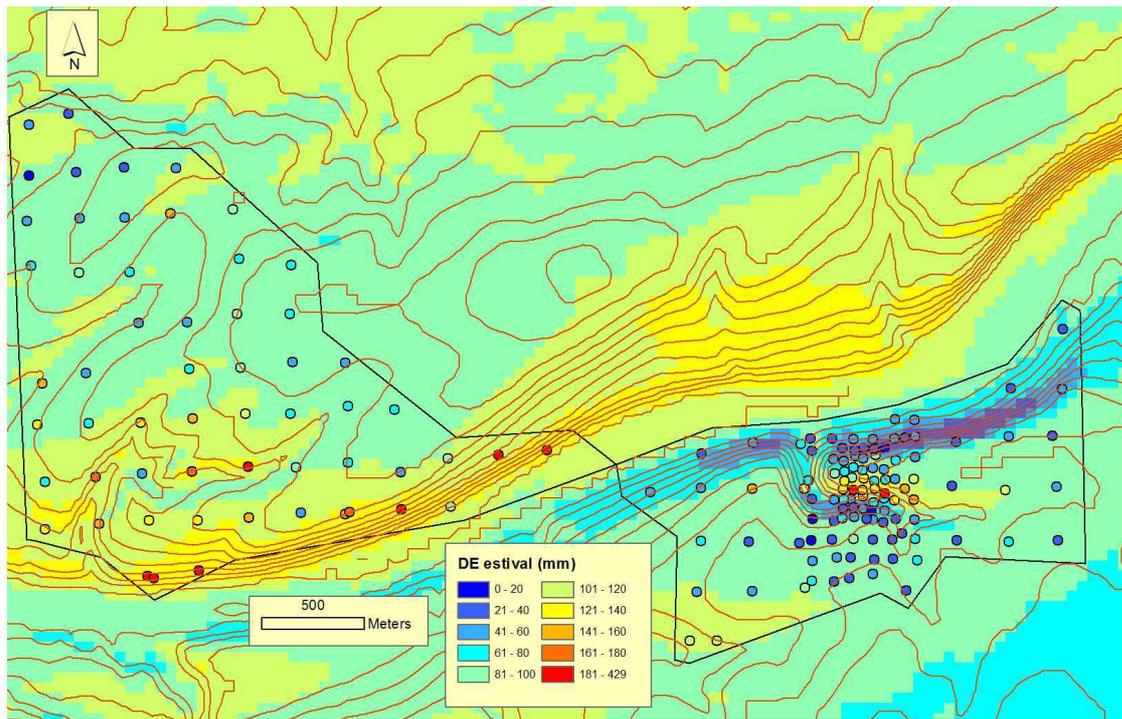


Figure 14 : Pourcentage de variance des déficits d'évaporation estivaux de Thornthwaite (en mm) calculées sur des placettes de terrain expliquée par les cartes réalisées sous SIG, pour différentes emprises allant de la Lorraine à la parcelle (Richard, 2011).

Les résultats obtenus montrent que les cartes des RU et des DE sont cohérentes avec les relevés de terrain pour toute la gamme des échelles étudiées. La plus faible performance du modèle observée pour le maillage au pas de 100 mètres résulte d'une plus faible variabilité des conditions géologiques sur cette emprise (Figures 15 et 16). A l'échelle des forêts de BEVS, la variabilité des DE est principalement induite par la topographie (versants nord plus humides, versants sud plus secs), et par la profondeur du sol conditionnée par les effleurements calcaires et les placages limoneux. L'utilisation des cartes géologiques du BRGM pour la production de la carte des RUM au pas de 50 mètres permet de mettre en évidence ces zones sur la Figure 16 (taches bleu turquoise), qui n'apparaissent pas sur la Figure 15 qui n'utilise pas les cartes au 1/50000ème. Il faut cependant noter que toutes les cartes géologiques ne prennent pas en compte les dépôts superficiels correctement, et que de ce fait la qualité des données produites peut être hétérogène sur de faibles distances et dans des contextes géomorphologiques similaires.

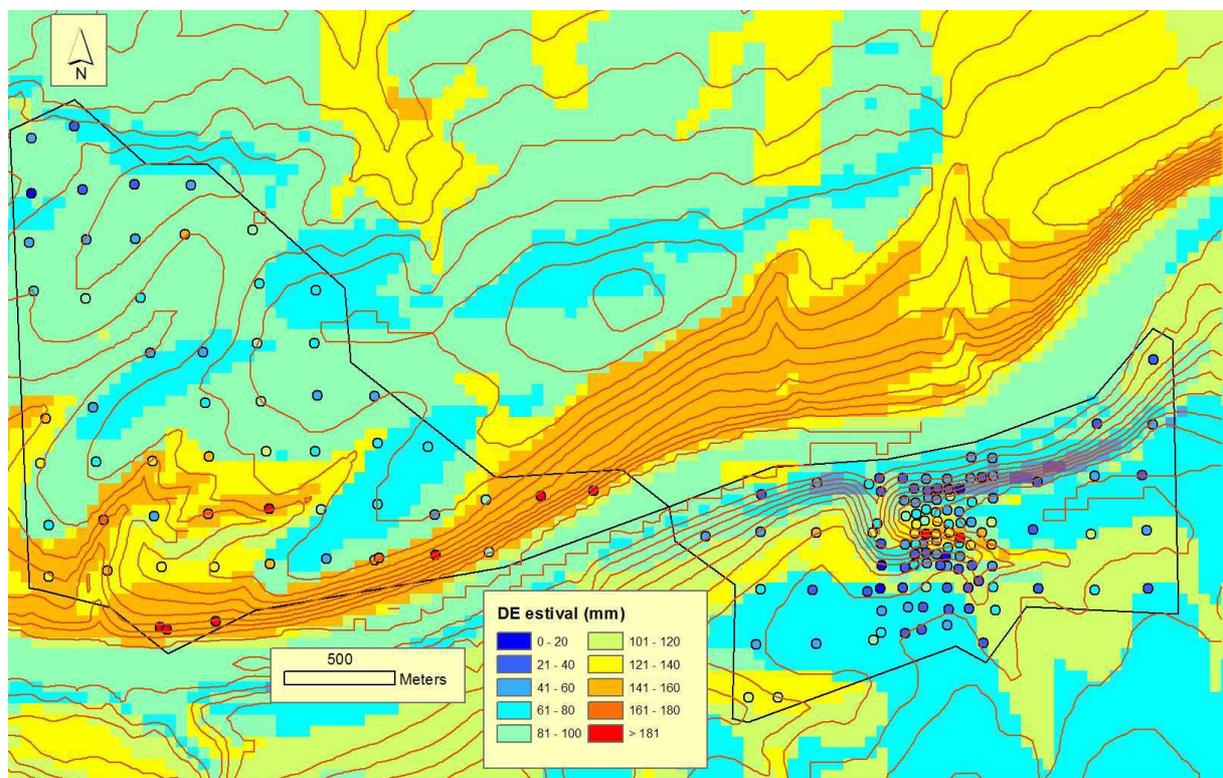
Si cette analyse souligne la bonne cohérence de l'approche cartographique par rapport à l'approche terrain, il ne faut pas oublier que les données climatiques utilisées sont communes entre les deux jeux de données. Pour aller plus loin il serait nécessaire de comparer des jeux de données totalement indépendants, mais de telles informations n'existent pas en France. On peut tout de même supposer que le biais engendré par l'utilisation de modèles climatiques communs est relativement limité. En effet, il a été démontré lors de la validation des données intrant (table 2) que les données les plus incertaines provenaient des RUM des sols. Il est cependant probable que les corrélations obtenues soient plus optimistes que dans la réalité, car elles ne prennent pas en compte les incertitudes liées à la modélisation du rayonnement solaire, de la température, et des précipitations.

La figure 14 souligne la meilleure performance des indices calculés avec la carte des RUM au pas de 50 m, et ce quelle que soit l'échelle testée. Ces résultats sont en accord avec ceux de T Villiers (Villiers, 2011) qui avait validé les cartes des RUM au pas de 500 m et de 50 m à l'échelle de la Lorraine avec un jeu indépendant de 1455 placettes indépendantes de l'IFN, et qui avait montré une meilleure performance de la carte au pas de 50 mètres ($R^2 = 0,47$ et $RMSE = 28$ mm pour la carte des RUM au pas de 500 m, $R^2 = 0,54$ et $RMSE = 26$ mm pour la carte au pas de 50 m). Ils démontrent que les méthodes de spatialisation à haute résolution spatiale de la RUM, intégrant des covariables topographiques et géologiques, permet une amélioration dans la cartographie des paramètres du bilan en eau des sols.



Source : Base Digitalis (LERFoB)

Figure 15 : carte des déficits d'évaporation estivaux extraits des cartes SIG et estimés sur les placettes pour la période 1961-1990 sur les forêts de BEVS, en utilisant la carte des RUM au pas de 500 m.



Source : Base Digitalis (LERFoB)

Figure 16 : carte des déficits d'évaporation estivaux extraits des cartes SIG et estimés sur les placettes pour la période 1961-1990 sur les forêts de BEVS, en utilisant la carte des RUM au pas de 50 m.

333. Cartographie de l'évolution passée des bilans en eau sur la Lorraine

Nous nous sommes penchés ensuite sur l'évolution des bilans en eau du sol au cours de ces dernières décennies. Pour cela, nous avons recalé les modèles climatiques que nous avons développé au cours de cette étude sur des périodes charnières au regard du changement de climat. Le milieu des années 1980 ayant montré une forte évolution des températures, nous avons créé un jeu de données pour la période 1961-1985 et un autre pour la période 1986-2010 (Figure 17).

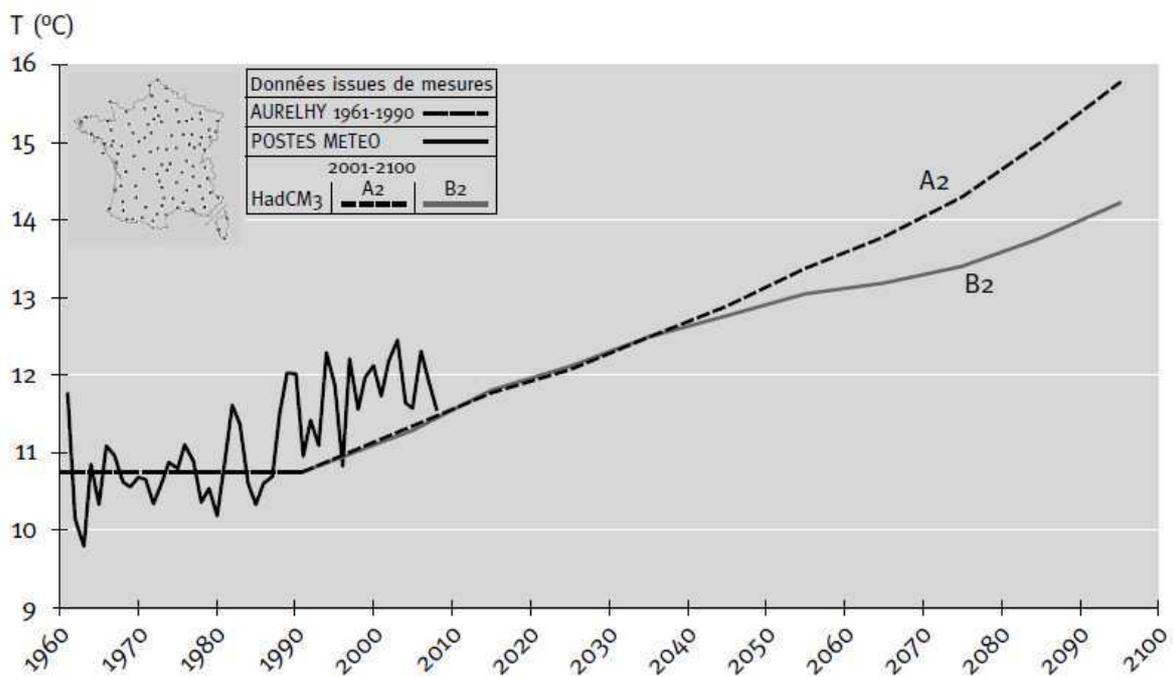


Figure 17 : Evolution des températures moyennes annuelles mesurées sur 97 postes météo France pour la période 1961-2008, et tendances pour la période 2000-2100 selon le GCM HadCM3 et les scénarios A2 et B2 (lissé à l'aide de moyennes mobiles sur 30 ans)

La Figure 18 présente les évolutions de RU entre ces deux périodes. On observe un contraste important entre le nord de la région (plaines de la région Metz, Thionville, jusque dans la région de Sarreguemines) où la RU a globalement diminué, alors que dans les Vosges et dans la partie ouest de la région (Argonne, ...), des augmentations sont constatées. Ces évolutions, modérées, peuvent atteindre jusqu'à 5 % de la RU initiale, selon les zones (Figure 18 D). Cette analyse est confirmée lors de l'examen de la carte des DE annuels qui accentue les contrastes au sein de la zone concernée par la baisse des RU, les rebords de plateaux calcaires et le nord de la vallée de la Moselle voyant une augmentation des DE plus marquée (Figure 19).

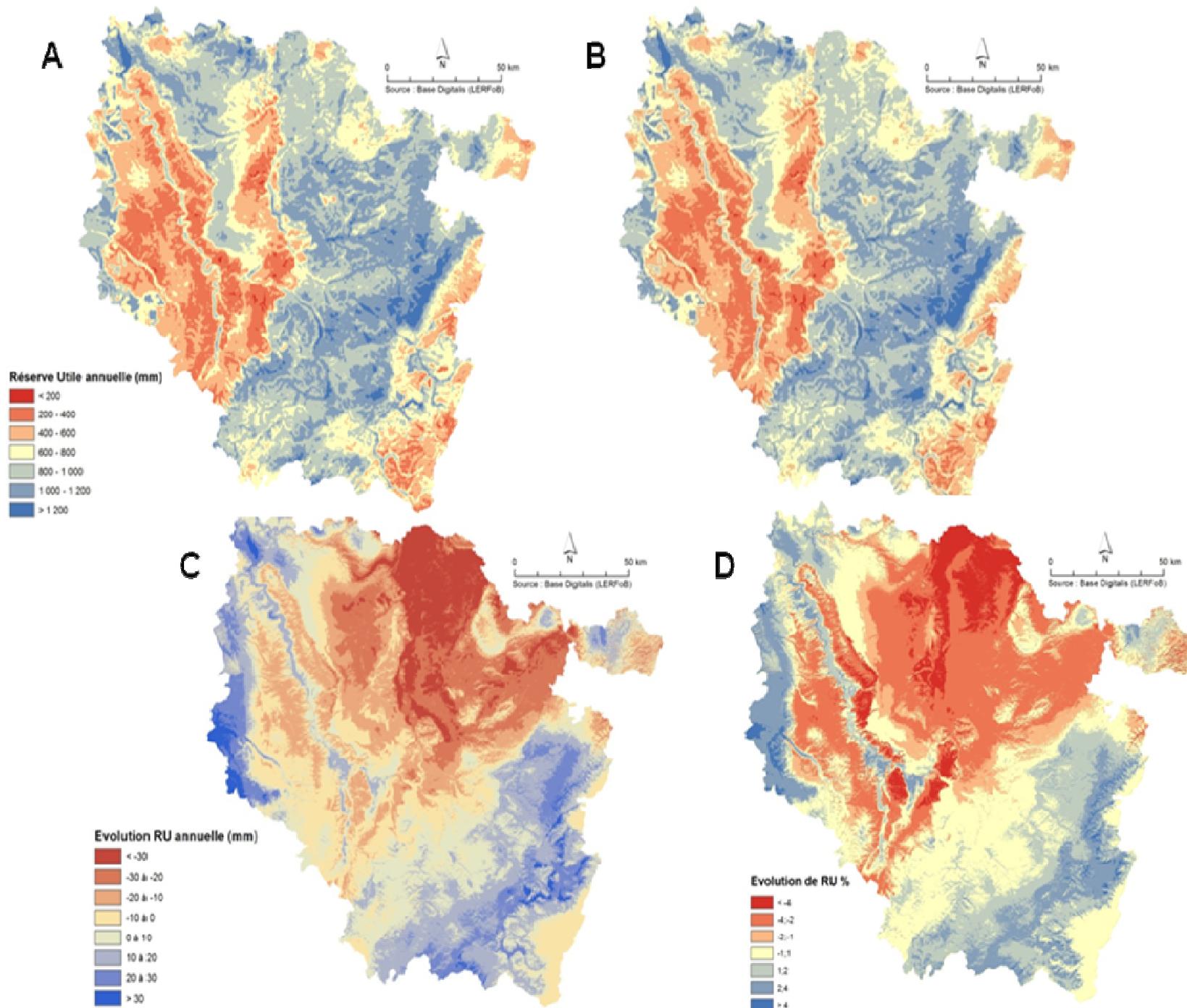


Figure 18 : cartographie des RU annuelles (somme des RU de chaque mois, en mm) pour les périodes 1961-1985 (A) et 1986-2010 (B). La carte C présente les évolutions entre les deux périodes (en mm d'eau), et la carte D les évolutions relatives en %. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 500 m. a été utilisée

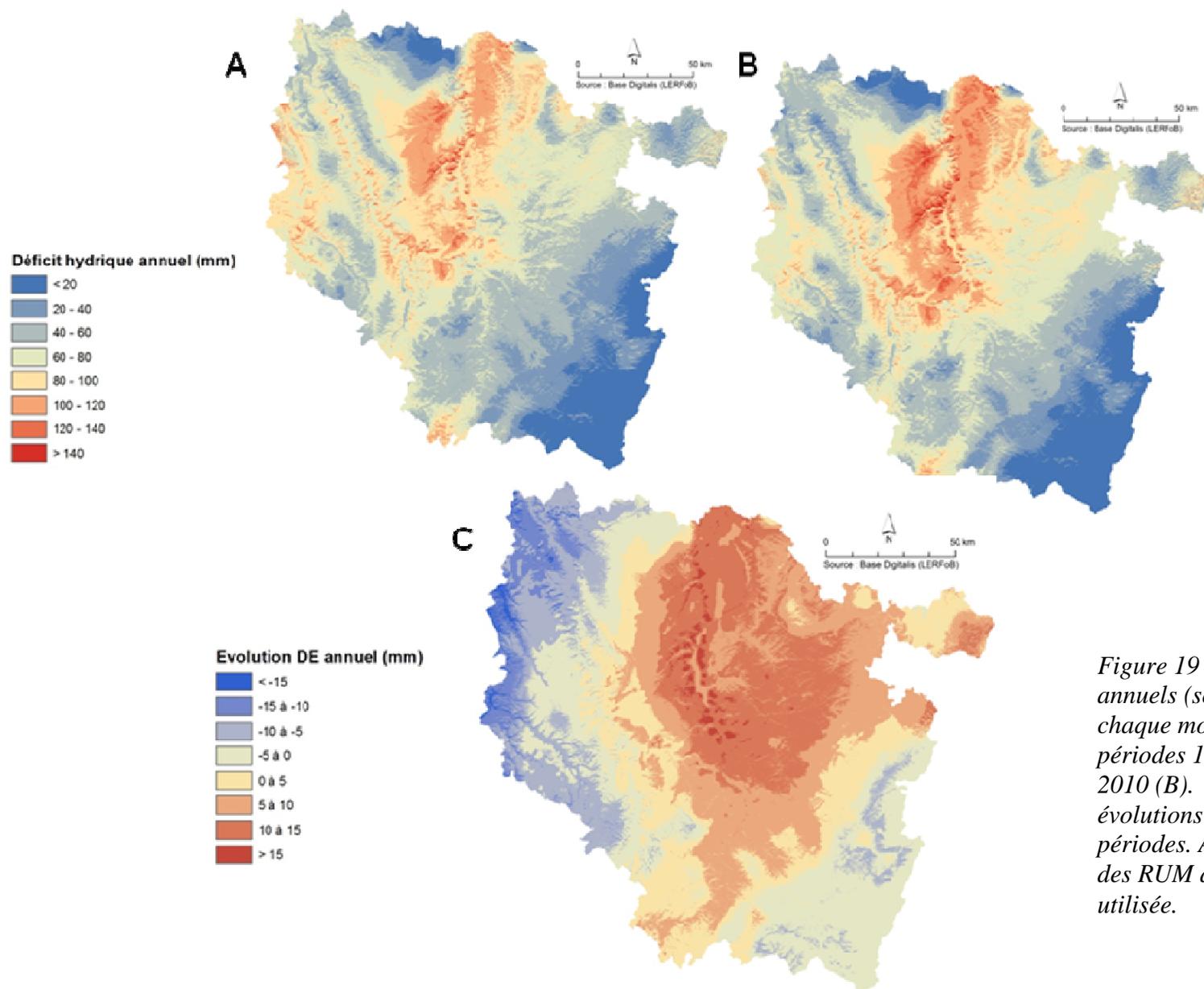


Figure 19 : cartographie des DE annuels (somme des DE de chaque mois, en mm) pour les périodes 1961-1985 (A) et 1986-2010 (B). La carte C présente les évolutions entre les deux périodes. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 500 m. a été utilisée.

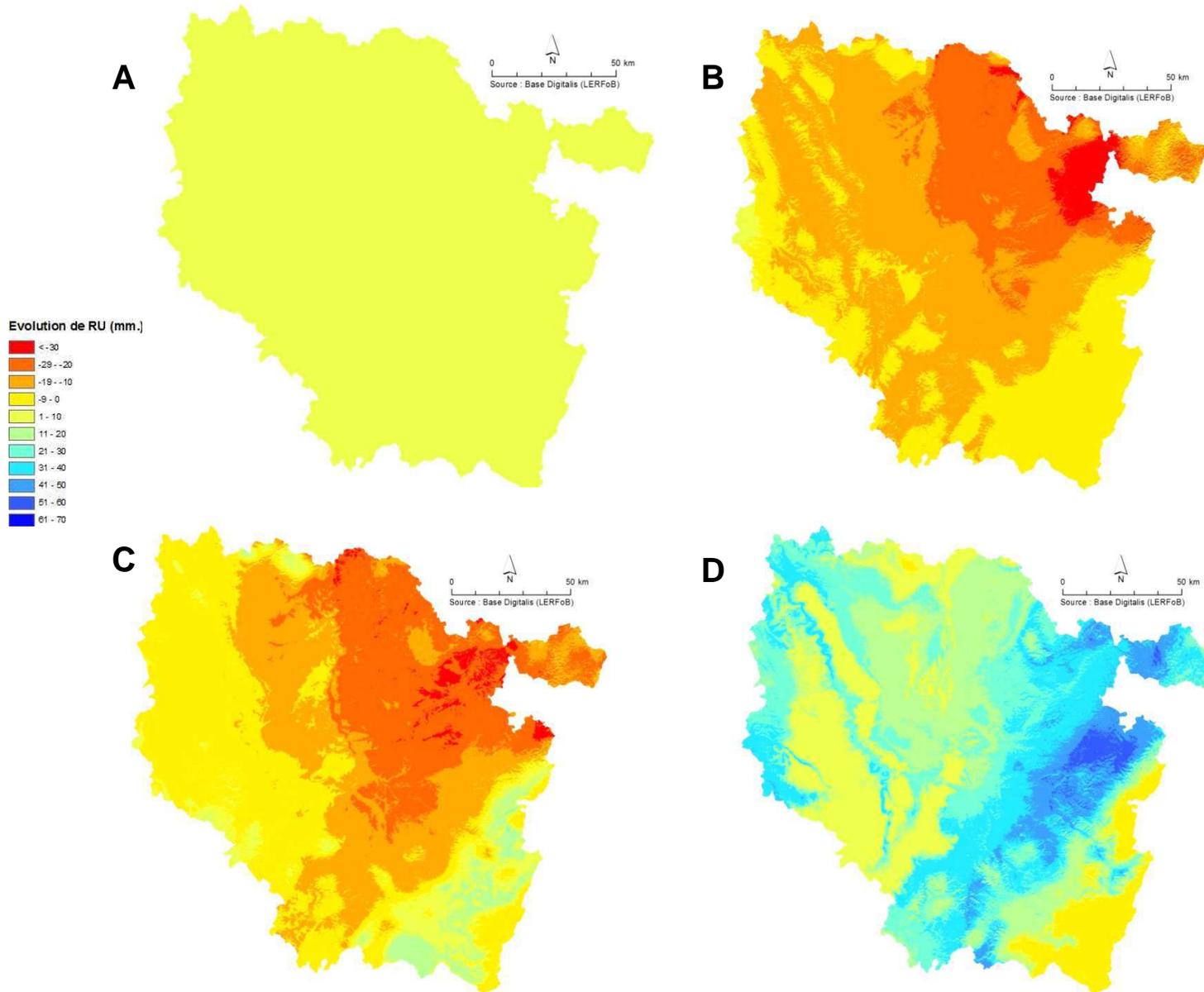


Figure 20 : cartographie des évolutions de RU saisonnières (somme des RU de chaque mois de la période, en mm.), entre les périodes 1961-1985 et 1986-2010. A : en hiver, B : au printemps, C : en été, D : en automne. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 500 m. a été utilisée.

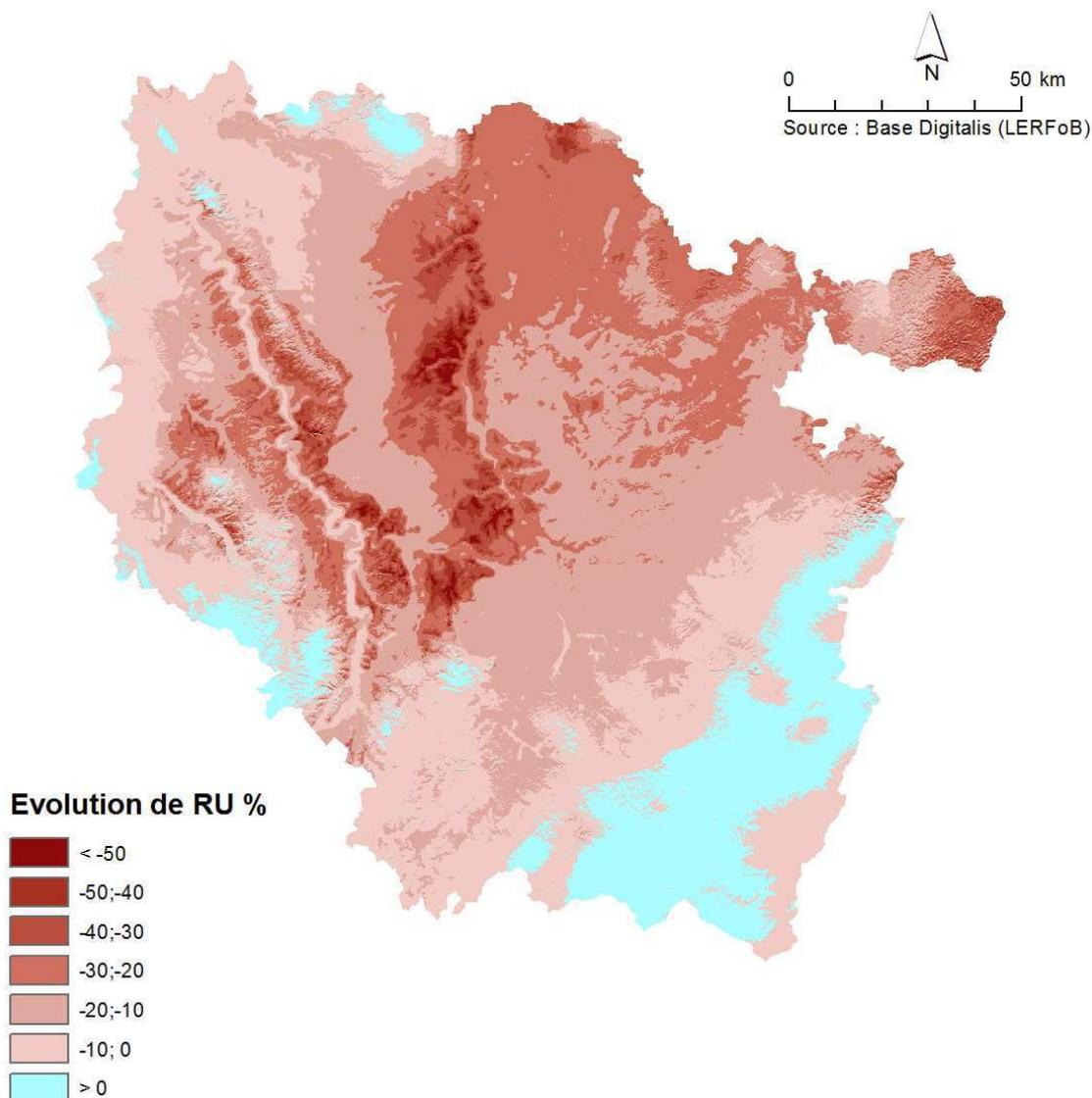


Figure 21 : évolutions relatives (en %) des RU estivales (somme des RU de juin, juillet et août, en mm.), entre les périodes 1961-1985 et 1986-2010. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 500 m. a été utilisée.

Un examen plus détaillé montre des différences selon la saison. Au cours de cette période, les déficits en eau se sont creusés principalement pour les périodes printanières et estivales (Figure 20), tandis que l'hiver et l'automne ont été plus humides que dans le passé. Cette évolution peut entraîner une diminution de la ressource en eau beaucoup plus marquée que celle observée avec les moyennes annuelles, allant jusqu'à 20 ou 25 % de la RU en été sur les plateaux lorrains, et plus sur les plateaux calcaires à faible RUM (jusqu'à 50 %) (Figure 21). Elle est principalement la résultante de la combinaison de l'évolution de la pluviométrie et des températures, qui présentent des gradients importants à l'échelle de la région. Cette diminution observée lors de la saison de végétation n'est que peu compensée par l'excédent de pluviométrie automnal et hivernal. En effet, il ne profite que peu à la végétation qui est au repos, les sols ne pouvant stocker l'excédent d'eau qui dépasse la RUM dans la plupart des cas (ce qui explique qu'en hiver aucun changement de RU ne soient observé). Par contre, le

creusement du déficit en pleine période de végétation pourrait avoir des conséquences sur la végétation forestière, particulièrement dans le nord est de la région (région de Sarrebourg, Fénétrange, Sarreguemines, St Avold) qui semble le plus touché (Figure 20). Des études plus détaillées calculant les évolutions au cours de chaque année seraient nécessaires pour voir si les phénomènes de dépérissement observés dans cette région pourraient être en partie liés à ces évolutions de climat.

334. Cartographie de l'évolution potentielle des bilans en eau sur la Lorraine entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100

Les perspectives d'évolution de la réserve en eau des sols de Lorraine ont été calculées en utilisant différents modèles du GIEC (IPCC, 2001). Les données de l'AR3 ont été utilisées, en se basant sur le scénario a2 le plus probable, et deux modèles au comportement différenciés, le modèle PCM et le modèle Hadcm3 (figure 22). Ces données ont été téléchargées à résolution de pixels de 15 km auprès du centre de Tyndall (Mitchell *et al.*, 2004). Les anomalies de températures et de précipitations ont été calculées entre la période de référence 1961-1990 et la période future étudiée, et ces anomalies ont été interpolées et reportées sur les modèles climatiques décrits auparavant afin de simuler le climat futur. Le rayonnement solaire du modèle Hélios a été recalculé en prenant en compte la nébulosité prédite par les modèles PCM et Hadcm3. Les modèles de bilan en eau ont ensuite été mensuellement recalculés avec les valeurs moyennes pour la période 2071-2100. Vue l'importante résolution des données Tyndall, la carte des RUM au pas kilométrique a été utilisée à cette échelle.

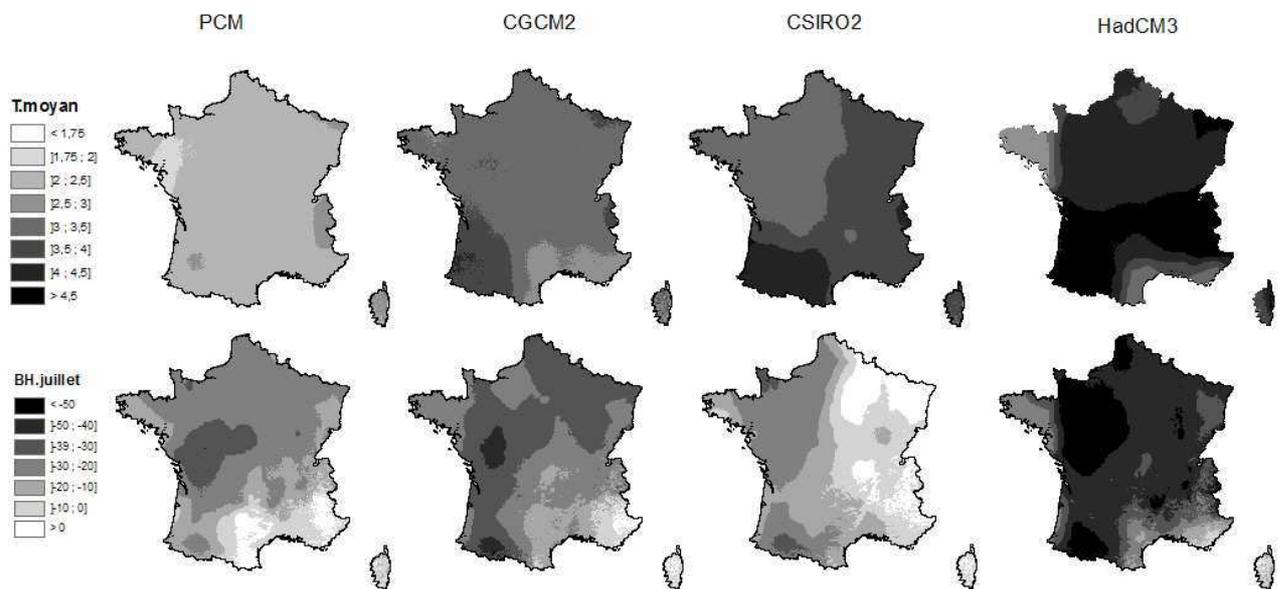


Figure 22 : Comparaison des anomalies entre 1961-1990 et 2070-2100 selon les 4 modèles de l'AR3 du GIEC fournis au pas de 16 km par el centre de Tyndall, pour les températures moyennes annuelles et les bilans hydriques climatiques de juillet (scénario a2)(Mitchell *et al.*, 2004)

Ces simulations montrent une large gamme d'évolutions possibles, le modèle PCM présentant une situation plutôt optimiste et le modèle Hadcm3 une version plus pessimiste. Dans les deux cas, on note une diminution de la ressource annuellement disponible (RU), de l'ordre de 10 à 150 mm avec le modèle PCM et de l'ordre de 30 à 300 mm avec le modèle Hadcm3 (Figure 23). Rapportée à la moyenne 61-90 des RU annuelles cumulées, cela représente des diminutions de ressource en eau variant globalement selon le modèle et la localisation entre 1 et 40%, avec une baisse moyenne de l'ordre de 5-10 % avec le modèle PCM et 15-20 % selon le modèle Hadcm3 (Figure 25). Selon ces cartes, la diminution de la réserve en eau concernerait principalement les zones actuellement les plus humides, l'Argonne, la Woëvre, les plateaux lorrains et le massif vosgien, tandis qu'elle resterait plus modérée les plateaux calcaires. Ces changements conduiraient à intensifier les déficits d'évaporation annuels sur une large part de la Lorraine (zones de basse altitude, figure 24). Ainsi, les déficits annuels prévus pour la période 2070-2100 pourraient atteindre ou dépasser 150 mm dans la basse vallée de la Moselle selon le modèle PCM, ce qui correspond aux valeurs présentes en région Parisienne ou la région d'Orléans-Vierzon pour 1961-1990, et atteindre 350 mm selon le modèle Hadcm3, ce qui correspond au climat 1961-1990 de Carcassonne. De tels changements suggèrent des conséquences potentiellement importantes sur la végétation des forêts lorraines. Un zoom sur les sites de Thionville, Nancy et Gérardmer a été réalisé (Figure 26). Il confirme la diminution de RU pour ces trois villes, et ce quel que soit le modèle utilisé. Les conséquences en terme d'évolution du DE sont fortes, on peut même noter une apparition d'un déficit sur le site de Gérardmer ayant eu un bilan positif jusqu'ici. Si on compare les évolutions relatives calculées entre les périodes passées et simulées pour les périodes futures (Table 6), on s'aperçoit que les changements à venir sur la RU pourraient représenter entre 1,4 et 3 fois la baisse déjà enregistrée pour Thionville, entre 2,3 et plus de 6 fois la baisse déjà enregistrée pour Nancy. La baisse relative la plus forte pourrait être enregistrée sur le site ayant actuellement le meilleur bilan en eau, Gérardmer, avec une baisse de RU annuelle simulée entre 8 et 23 % selon le modèle.

Nous avons également évalué l'intensité des changements possibles à l'échelle de la saison, les valeurs annuelles recouvrant d'importantes disparités lors de l'examen des changements entre 1961-1985 et 1985-2010. La distribution des RU saisonnières pour la période 1961-1990 (Figure 27) indique un début de décroissance de la RU au printemps (de mars à mai), puis une diminution estivale (de juin à août) qui reste encore marquée en automne (septembre à novembre), le stock d'eau se reconstituant en hiver. Ces résultats sont cohérents avec ceux observés au pas de temps mensuel, septembre restant un mois très déficitaire (Figure 8). Les cartes des simulations saisonnières possibles pour 2070-2100 montrent que les baisses de disponibilité en eau pourraient affecter les saisons de façon très différenciées (Figures 28 et 29). En effet, le stock d'eau étant maximal en hiver, l'augmentation des pluies n'affecterait pas les réserves en eau des sols disponible pour les plantes à cette saison. Par contre, au cours des autres saisons, d'importantes diminutions de RU sont prédites sur la quasi-totalité du territoire. Seuls certains secteurs des hautes Vosges pourraient conserver une RU similaire à celle calculée pour 1961-1990, et ce particulièrement au printemps et en automne, et principalement selon le modèle PCM le plus optimiste. Par contre, pour les périodes estivales, la baisse de RU pourrait être importante dans certains secteurs des Vosges, tout comme sur les plateaux calcaires. Dans ces secteurs, une baisse relative de 40 à 50 % est prédite par rapport à la période 1961-1990 selon le modèle PCM, et elle pourrait localement dépasser 90 % avec le modèle Hadcm3. Sur les plateaux lorrains et la plaine de la Woëvre, la diminution prédite reste élevée bien que plus modérée, avec des pertes prédites de 10 à 20 % selon le modèle PCM, et atteignant 70 à 80% selon le modèle Hadcm3.

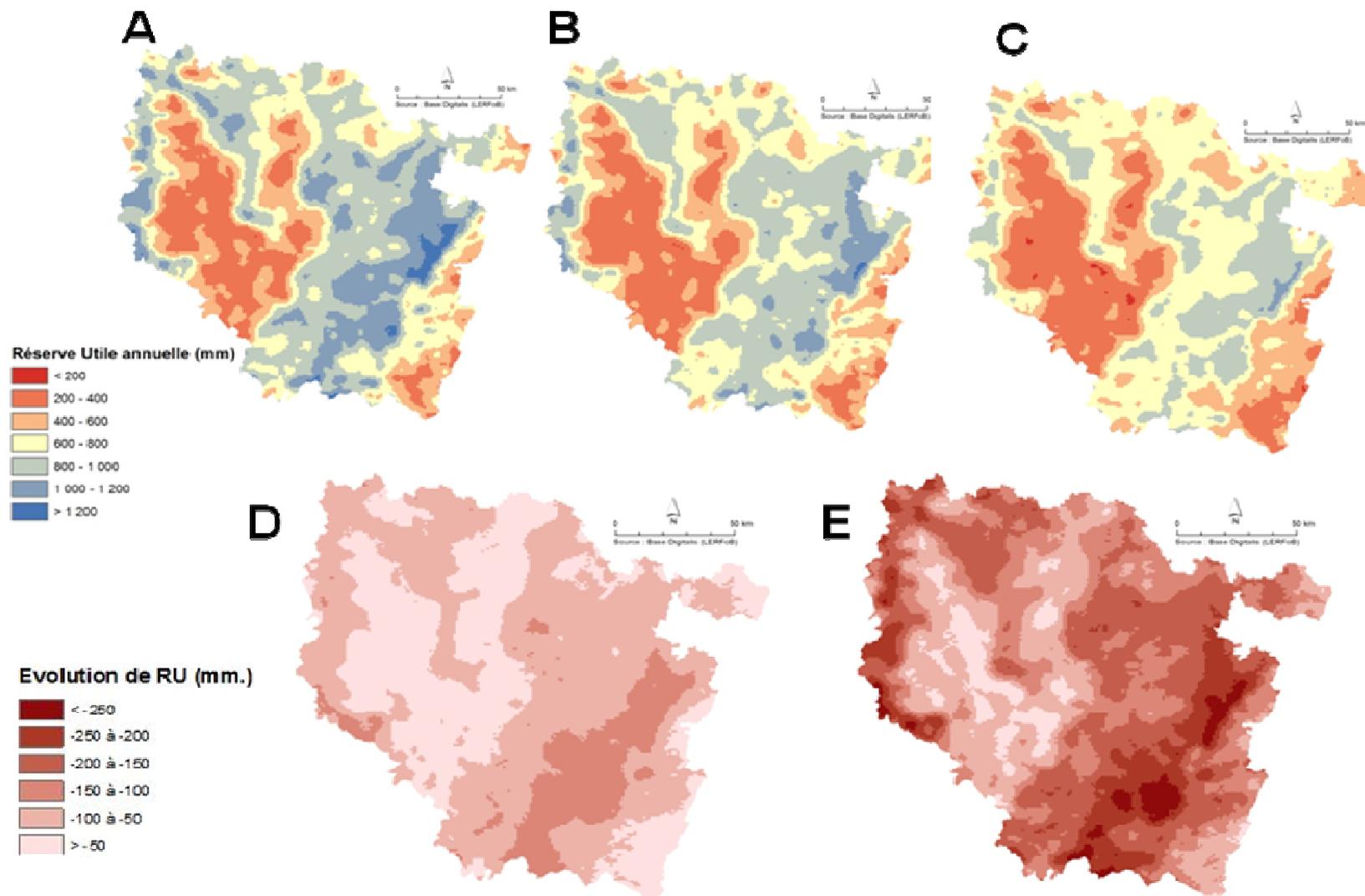


Figure 23 : cartographie des évolutions de RU annuelles (en mm.) selon les données du centre de Tyndall. A : RU pour 1961-1990, B : RU pour 2070-2100 (modèle PCM), C : RU pour 2070-2100 (modèle Hadcm3), D : évolutions 1961/1990-2070/2100 (PCM), E : évolutions 1961/1990-2070/2100 (HadCM3) (scénario a2).

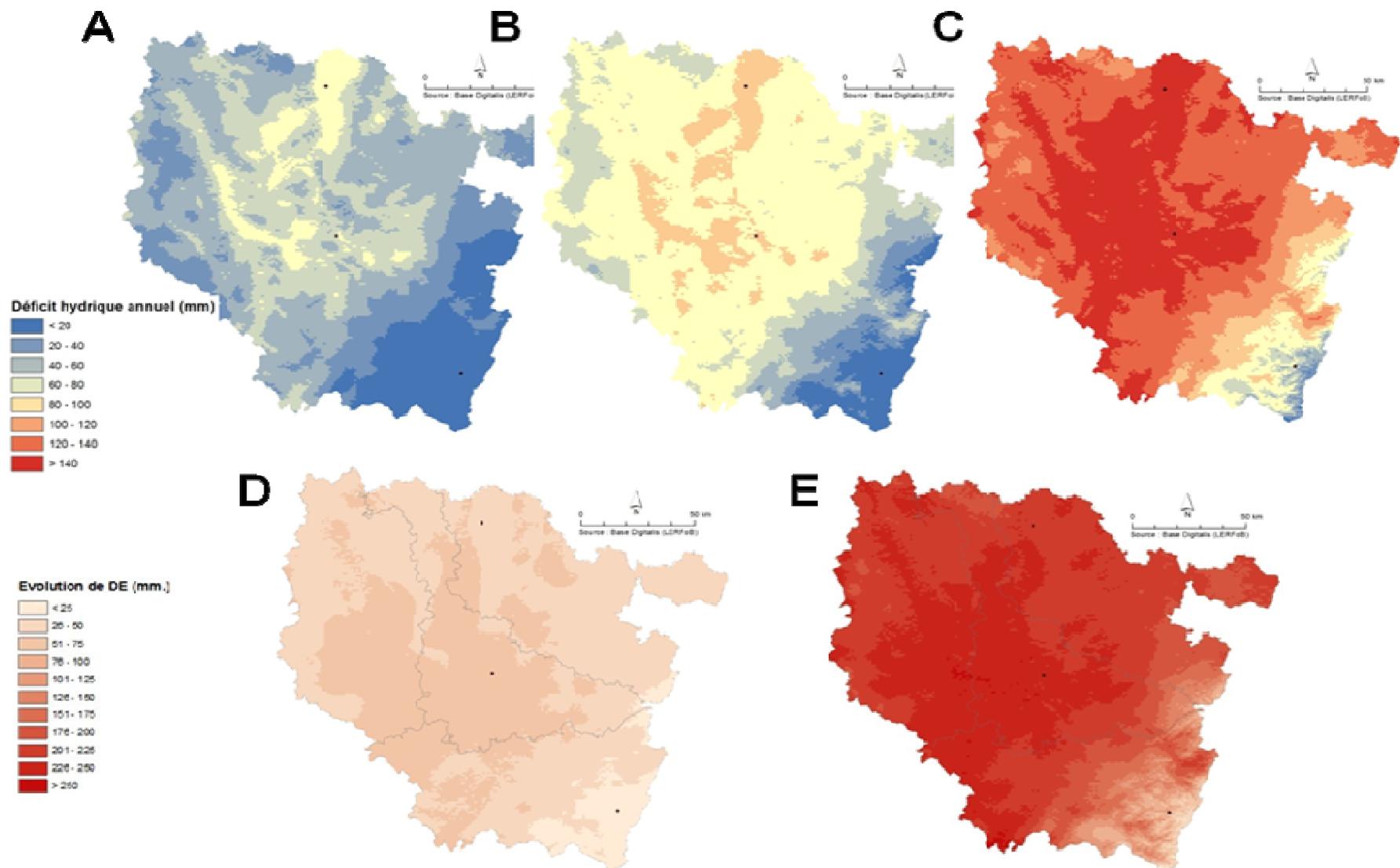


Figure 24 : cartographie des évolutions de DE annuelles (en mm.) selon les données du centre de Tyndall. A : DE pour 1961-1990, B : DE pour 2070-2100 (modèle PCM), C : DE pour 2070-2100 (modèle Hadcm3), D : évolutions 1961/1990-2070/2100 (PCM), E : évolutions 1961/1990-2070/2100 (HadCM3) (scénario a2).

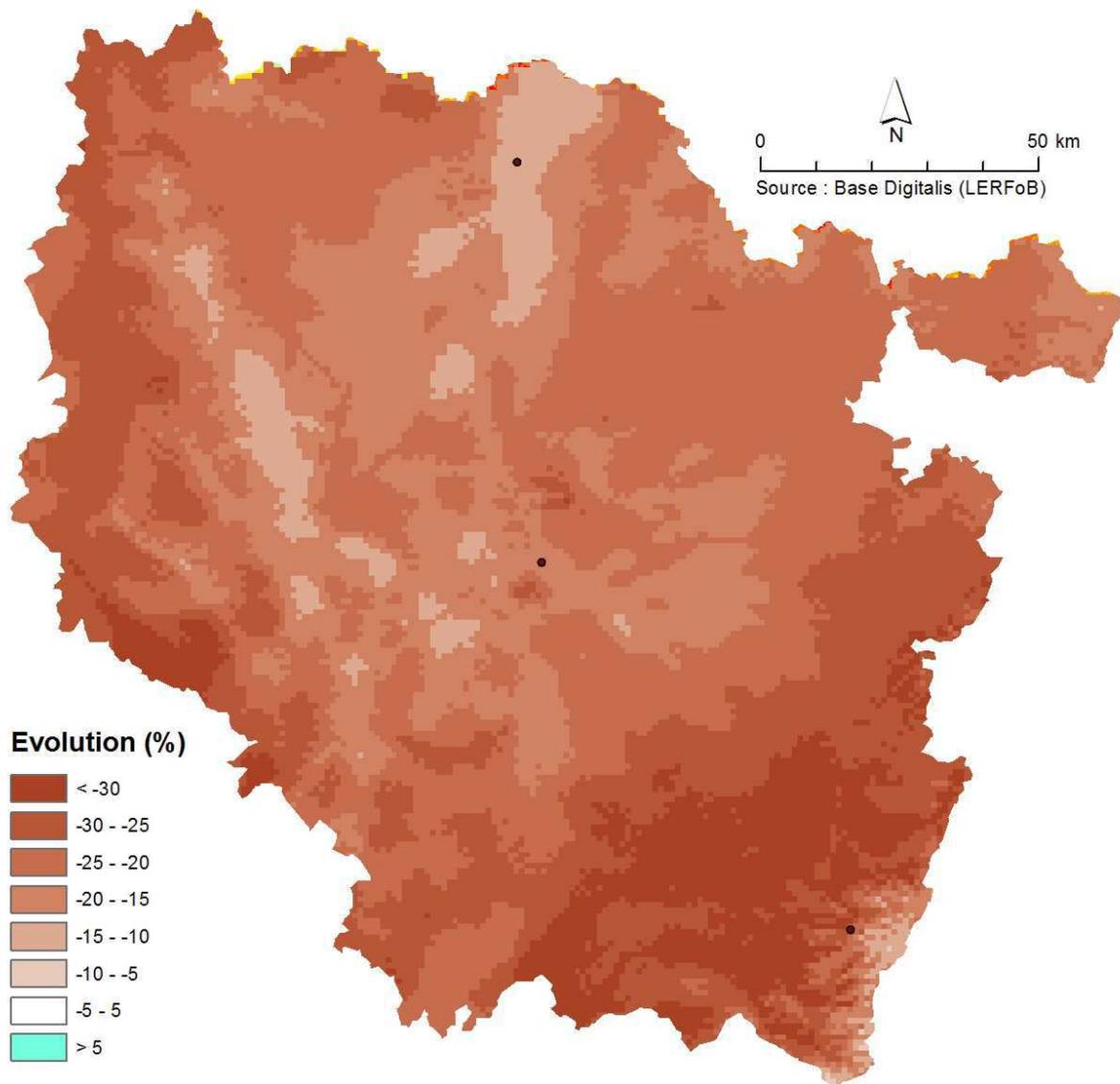


Figure 25: Evolution relative des RU annuelle cumulées (en %) selon les données du centre de Tyndall, modèle Hadcm3, scénario a2, entre 1961-1990 et 2070-2100.

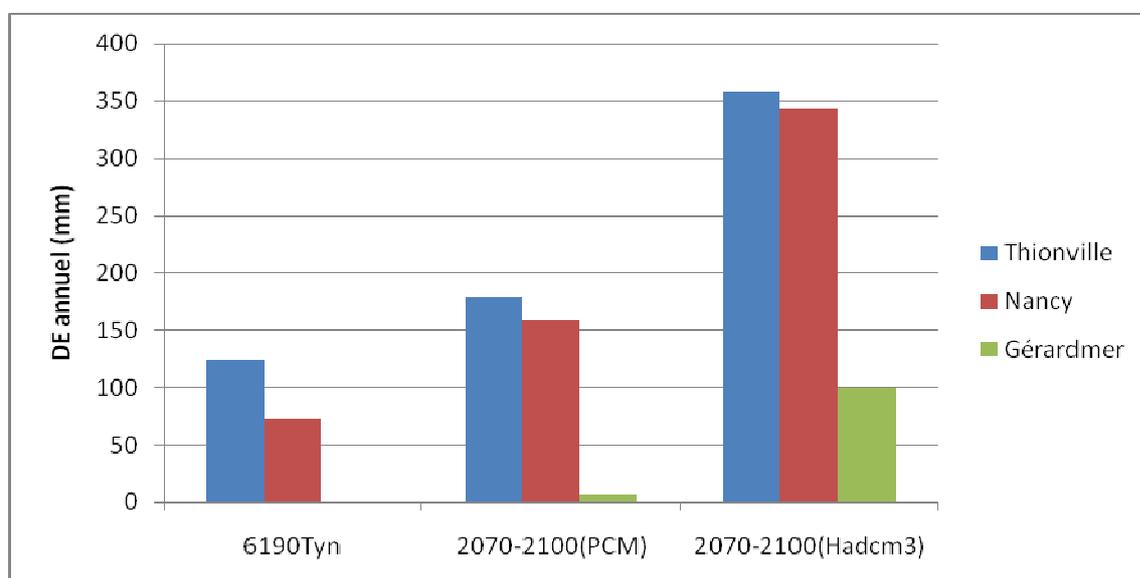
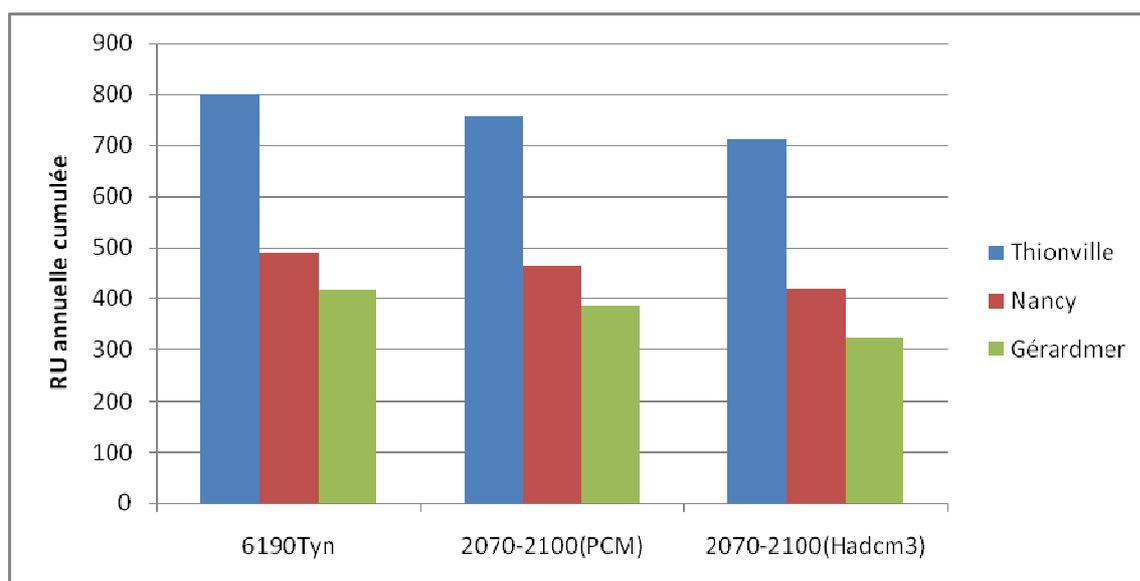


Figure 26 : Pour 3 villes de la région Lorraine, somme des RU annuelle (en haut) et DE cumulé de l'année (en bas) pour la période 1961-1990, puis simulations pour 2070-2100 selon les données du centre de Tyndall, modèles PCM et Hadcm3, scénario a2.

	85-10/61-85	2070-2100/61-90 (PCM)	2070-2100/61-90 (Hadcm3)
Thionville	-3,7	-5,3	-10,8
Nancy	-2,3	-5,3	-14,5
Gérardmer	0,0	-7,9	-22,8

Table 6 : comparaison des évolutions relatives des RU annuelles (en %) pour trois villes de Lorraine, entre la période 1961-1985 et 1985-2000, et les périodes 1961-1990 et 2070-2100 simulées par les modèles PCM et Hadcm3 scénario a2.

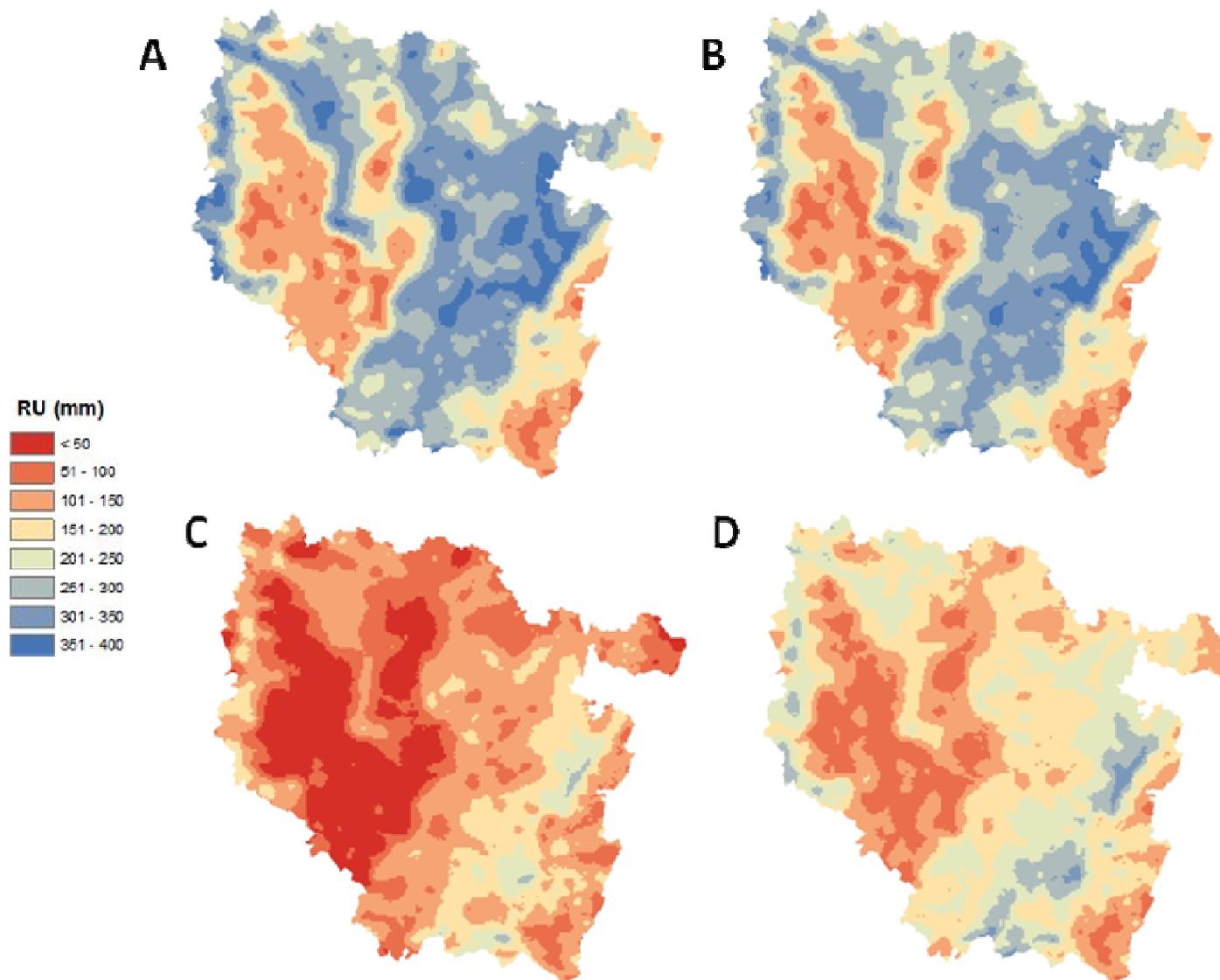


Figure 27 : RU saisonnières (somme des RU de chaque mois de la période, en mm.), pour la période 1961-1990 selon les données Tyndall. A : en hiver, B : au printemps, C : en été, D : en automne. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 1 km. a été utilisée.

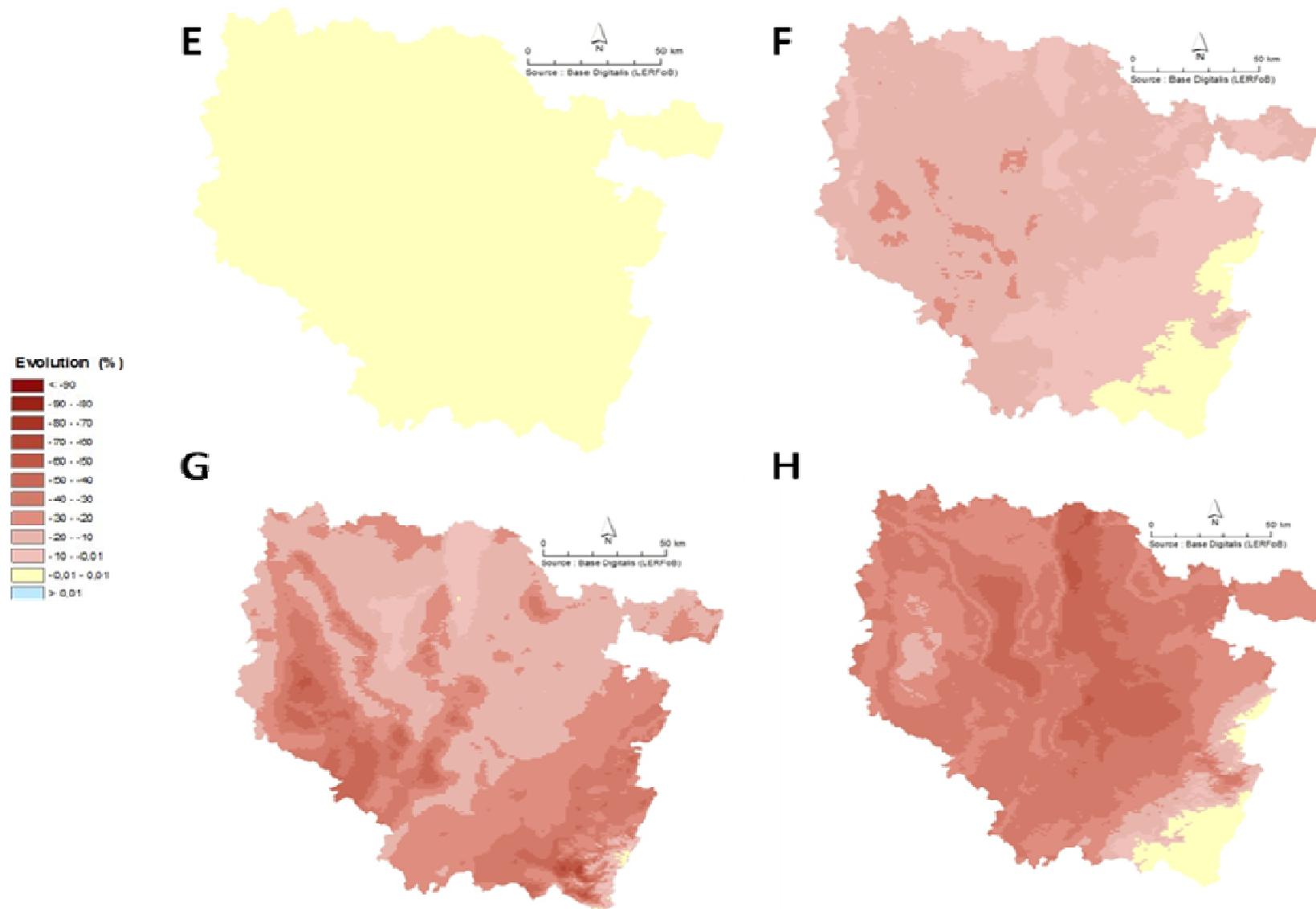


Figure 28 : Evolutions de RU saisonnières (en %), entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 selon le modèle PCM scénario a2 A : en hiver, B : au printemps, C : en été, D : en automne. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 1 km. a été utilisée.

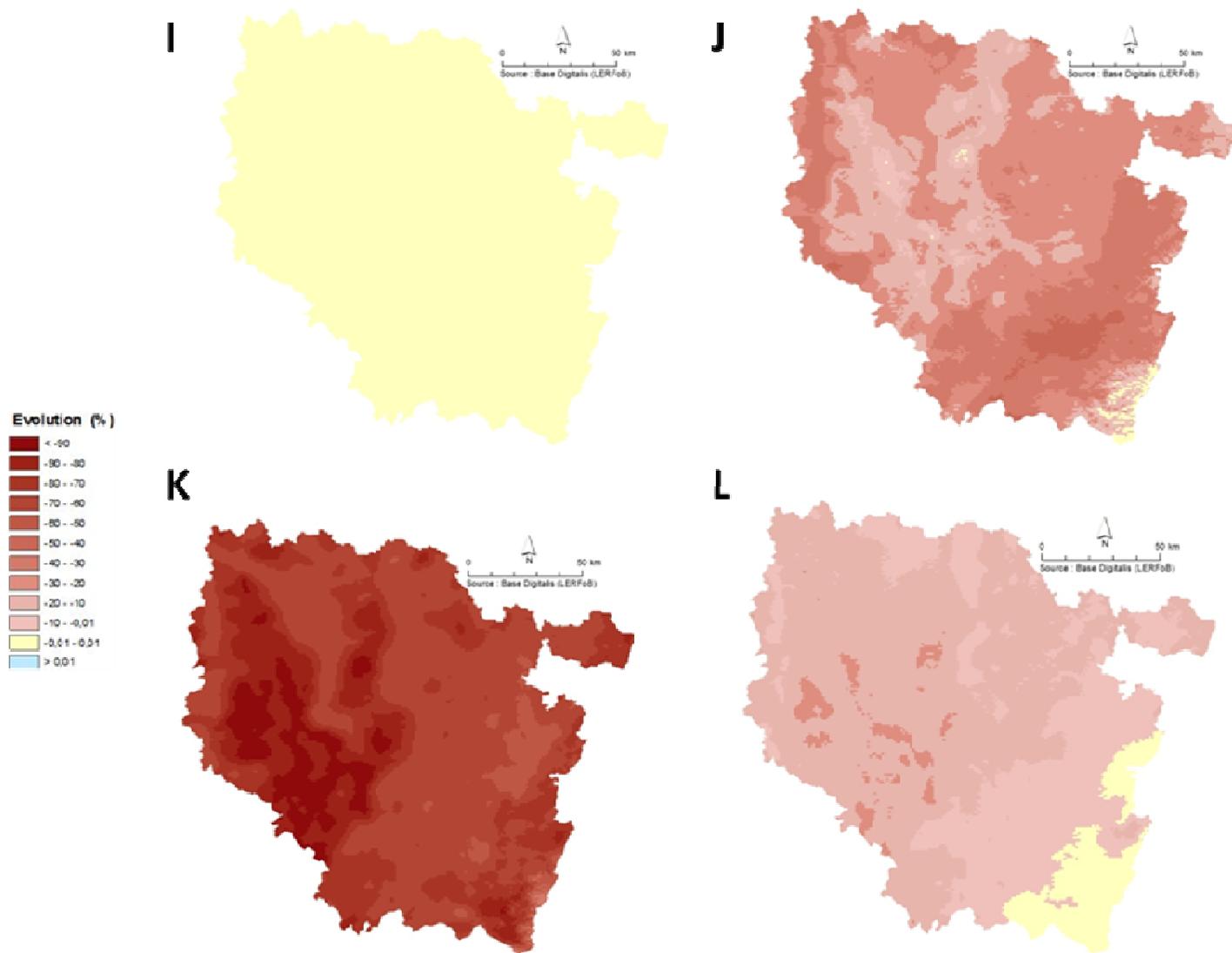


Figure 29 : Evolutions de RU saisonnières (en %), entre les périodes 1961-1990 et 2070-2100 selon le modèle Hadcm3 scénario a2 A : en hiver, B : au printemps, C : en été, D : en automne. A cette échelle, la carte des RUM au pas de 1 km. a été utilisée.

Cette baisse de RU estivale aurait des répercussions sur la RU automnale, celles-ci ayant du mal à se recharger. Cela pourrait signifier que certaines années sèches la RU pourrait ne pas être remplie à son niveau maximum (de la RUM) en hiver, reportant ainsi potentiellement des déficits en eau d'une année sur l'autre (hypothèse qui n'est pas prise en compte dans nos modèles, la RU de début janvier étant toujours égale à la RUM).

4. Bilan des travaux réalisés : avancées, principales limites, perspectives d'amélioration et d'utilisation...

4.1. Principales avancées

Les travaux réalisés ont permis le calcul des différentes composantes nécessaires pour le bilan en eau des sols, avec une résolution spatiale fine, inexistante auparavant. Ces données ont été validées, puis une méthode de calcul des bilans en eau et une comparaison des indices disponibles ont été effectués, mettant en évidence l'intérêt de l'utilisation de cartes de RU mais aussi de DE, très complémentaires (R^2 de 0,22 entre ces deux variables à l'échelle de la France). L'intérêt de ces indices au regard des données climatiques traditionnellement utilisées (pluies, bilan hydrique climatique) a été démontré. Les cartes des indices calculés ont été validées avec les données disponibles ou collectées dans le cadre de l'étude, à des échelles allant de la France entière à la parcelle forestière. Les résultats, qui sont cohérents par rapports à des calculs de bilans en eau réalisés ponctuellement, montrent que malgré les difficultés et les imprécisions liées à l'estimation de la RUM sur le terrain, il est possible de réaliser des cartes de bilan en eau des sols qui aient du sens y compris à l'échelle locale.

Des jeux de cartes ont été produits pour la Lorraine pour différentes périodes passées, présentes, et futures. Ces cartes ont permis de mettre en évidence une forte variabilité spatiale de la contrainte hydrique à l'échelle de la région. Les évolutions au cours des 50 dernières années montrent que la réserve en eau disponible pour les plantes a globalement diminuée en Lorraine, particulièrement dans le nord est de la région, et pour les périodes de printemps et d'été qui correspondent à la saison de végétation. Ces diminutions entre les périodes 1961-1985 et 1985-2010 peuvent atteindre localement 5% de perte de RU à l'échelle de l'année, et jusqu'à 50 % pour les mois d'été dans les zones de faible RUM. En automne, une stagnation voire une augmentation de la réserve en eau peut être localement observée. Cependant, dans la plupart des cas, l'augmentation de la pluviométrie hivernale n'est pas utile au regard de la réserve utile pour les plantes, les sols lorrains étant généralement saturés en hiver.

Des simulations pour les périodes futures montrent une aggravation marquée de la diminution de la ressource en eau, quel que soit le modèle utilisé, avec un large panel d'incertitudes selon le modèle utilisé. Ces simulations confirment l'importance d'une approche saisonnière, les périodes printanières et estivales étant particulièrement affectées, avec des répercussions en automne. Ainsi, les diminutions de RU estivales prédites s'échelonnent entre 10 et 70% selon le modèle PCM, et entre 40 et plus de 90% selon le modèle Hadcm3.

42. Principales limites

Les limites de ces analyses tiennent aux méthodes et aux données utilisées. Bien que l'utilisation de la formule de Thornthwaite au pas de temps mensuel soit très classique dans la littérature scientifique, un certain nombre d'imprécisions peuvent être générés par cette méthode de calcul. Pour ce qui concerne les variables climatiques utilisées, même si les modèles ont été validés, il est clair que des imprécisions subsistent, particulièrement aux échelles locales, et pour la pluviométrie. Ces imprécisions sont engendrées par la qualité des données utilisées pour calibrer les modèles, et les méthodes de spatialisation mises en œuvre. Si les résultats obtenus pour les périodes passées et présentes à l'échelle de la région sont globalement assez fiables au regard des données climatiques utilisées, il se peut que la variabilité cartographiée à des échelles locales n'ait pas de sens par rapport à la réalité.

Cependant, il est clair que la principale source d'incertitudes provient de la RUM des sols. Celle-ci est très difficile à évaluer sur le terrain. Le fait que la profondeur d'enracinement ne soit pas prise en compte, la difficulté à creuser à la pioche ou la tarière dans des sols caillouteux, les difficultés d'évaluation des textures ou de la charge en cailloux, l'imprécision des fonctions de pédotransfert existantes sont autant de limites à une bonne estimation. Il a également été démontré que la RUM varie très fortement sur de faibles distances, les relevés réalisés localement pouvaient ne pas être représentatifs de la placette qu'ils caractérisent (Richard, 2011).

Les techniques de spatialisation utilisées influencent également la qualité des cartes. Elles peuvent localement lisser la donnée ponctuelle utilisée pour leur calcul, et la dégrader, mais aussi localement en partie compenser l'incertitude des mesures et de fait améliorer la prédiction. Cette double action explique probablement la relative proximité des performances enregistrées entre les données des placettes et issues des cartes, observée lors de plusieurs études (Piedallu *et al.*, 2011a). Enfin, les bilans en eau ne prennent pas en compte les effets du couvert végétal, les effets déportés de la neige, et les apports et départs latéraux en eau. Cette dernière limite est probablement importante, des redistributions existant à l'échelle du versant. Cependant, il n'existe actuellement pas de modèles disponibles permettant de les appréhender à ces échelles.

Du fait des limites liées aux difficultés de sondage et au plafonnement de la profondeur prospectée à 1m, les données de RU prédites tendent probablement à sous-évaluer la ressource en eau, particulièrement dans les zones à forte charge en cailloux. L'impact induit par cette sous-estimation est probablement différent selon la zone géographique et l'essence étudiée, du fait de la variabilité morphologique des systèmes racinaires. Elle peut tendre à surestimer la quantité d'eau disponible perdue dans le cadre des changements de climat en cours ou à venir.

Enfin, les calculs spécifiquement liés aux évolutions de climat peuvent engendrer un certain nombre d'imprécisions. Le fait qu'un jeu de postes météorologiques identique soit utilisé pour les périodes 1961-1985 et 1985-2010 limite les biais lors des calculs des évolutions de climat entre les deux périodes. Cependant il est possible que les valeurs aux conditions limites des paramètres des modèles soient biaisées pour l'une ou l'autre de ces périodes. De ce fait, les évolutions prédites peuvent être localement sur ou sous-prédites. Enfin, les simulations faites pour les périodes futures sont empreintes d'un grand nombre d'incertitudes liées à la méconnaissance des politiques publiques mises en œuvre pour réduire l'effet de serre et à l'imprécision des modèles existants. Ces incertitudes se reflètent dans les différences qu'il est possible d'observer entre les modèles. Le scénario le plus probable a été sélectionné, et nous

avons fait le choix de réaliser des simulations avec deux modèles très différents, reflétant une gamme de possibilité d'évolution de la ressource en eau assez large. Pour aller plus loin, un plus grand nombre de modèles et de scénarios pourrait être utilisé, afin d'englober le plus grand nombre possible d'hypothèses et d'affiner la gamme des évolutions potentielles.

43. Perspectives d'utilisation et d'amélioration

Les cartes réalisées permettent de réaliser un suivi du stock de l'eau du sol au fil du temps, en utilisant des mesures pour les périodes passées et des simulations d'évolution pour le XXI^{eme} siècle selon différentes hypothèses de changement de climat. Les cartes de la période 1961-1985 ou 1961-1990 permettent de caractériser assez finement l'état initial de la ressource en eau, et de comprendre la variabilité spatiale de la ressource avant que les effets du changement de climat ne se fassent vraiment sentir. Cette information peut être mise en relation avec la distribution, la croissance, l'état de santé des espèces ou des communautés forestières. Il serait par exemple possible de déterminer les optimums écologiques et les amplitudes des différentes essences forestières afin de caractériser les zones qui leurs sont favorables au regard de la contrainte hydrique. De tels travaux permettraient de contribuer à mieux comprendre l'écologie des espèces arborées. Les résultats seraient utiles pour le choix d'essences adaptées aux contraintes locales dans le cadre de la gestion sylvicole, ou de reboisement de parcelles non forestières. Une telle approche permettrait également de détecter des plantations réalisées dans des conditions écologiques inappropriées.

L'information concernant la disponibilité en eau est souvent notée de façon indirecte dans les catalogues ou guides de station, de façon qualitative et à l'aide d'indicateurs topographiques ou liés à la charge en cailloux. Des essais de mise en correspondance entre les données des modèles et des données des guides ont montré des différences parfois importantes entre ces approches, le facteur climatique n'étant pas explicitement pris en compte dans les guides ou catalogues (au sein de la zone couverte par un catalogue ou d'un guide, le climat est censé être relativement constant, à la fois dans l'espace et dans le temps). La réalisation de cartes de bilan en eau permet une approche quantitative en intégrant à la fois la variabilité du sol et du climat. D'autre part, l'approche cartographique permet une mise en œuvre relativement rapide sur de vastes territoires, qui n'est pas possible de réaliser avec des inventaires de terrain, qui sont longs et coûteux. Aujourd'hui, une partie de la France n'est pas couverte par des catalogues ou guides de station, et quant ils existent, de larges part du territoire n'ont pas fait l'objet de cartographies. L'approche spatiale mise en place dans cette étude a permis de couvrir toute la Lorraine avec une résolution spatiale correspondant à celle des inventaires de terrain les plus fins, un point tous les 50 mètres. Par contre, pour un usage opérationnel, il ne faut pas oublier que les données sont issues de modèles, et qu'elles peuvent être localement imprécises voire carrément erronées. Avant tout usage opérationnel, il est donc nécessaire regarder les données avec un regard critique, et de réaliser des vérifications de terrain, voire des corrections si nécessaire, particulièrement pour ce qui concerne la RUM.

L'approche quantitative basée sur des modèles spatialisés offre le grand avantage de pouvoir réaliser des simulations d'évolution dans le temps. Contrairement à l'approche des catalogues qui est statique, il est désormais possible de quantifier les évolutions passées, et de chercher à prévoir les changements futurs. Ces nouvelles possibilités permettent à la fois de caractériser les fluctuations liées aux changements saisonniers ou au changement climatique, mais aussi de chercher à en évaluer les conséquences possibles sur la ressource. Il s'agit d'une étape fondamentale dans l'optique d'essayer d'adapter les forêts lorraines au changement de climat

en cours. Il s'agit en effet d'essayer de relier les changements de ressource en eau et les conséquences en terme de productivité, de problèmes de régénération, de changement d'aire de distribution d'espèces, ou de mortalité des essences, qui pourraient survenir en lien avec l'intensification de la contrainte hydrique. Une meilleure détermination des exigences écologiques des espèces, couplée à une bonne connaissance des évolutions du stock d'eau du sol, pourrait permettre d'identifier des risques pour des essences et des localisations spécifiques, à une échéance donnée. Il s'agit donc d'une avancée vers un monitoring des forêts, permettant de placer en vigilance des peuplements et des zones géographiques jugés à risque d'après les modèles. Les observations de terrain permettraient ensuite de confirmer ou d'infirmer les risques avant de tirer des conséquences en terme de gestion. Ces travaux pourraient aussi permettre de choisir des essences de remplacement si besoin, aidant à la caractérisation de leurs besoins en eau et en les mettant en concordance avec les simulations disponibles sur la zone concernée.

De nombreuses perspectives d'amélioration de ces travaux existent. Elles concernent tout d'abord l'amélioration des calculs de bilan en eau des sols. Le point probablement le plus important serait la prise en compte des flux latéraux en eau dans les modèles. Cela permettrait d'affiner la détermination des zones à risques, en intégrant la redistribution en eau à l'échelle du versant. Ensuite, la caractérisation de l'écologie des espèces au regard des paramètres de bilan en eau des sols permettrait d'affiner les zones potentiellement favorables aux espèces à une échéance climatique donnée. Enfin, les calculs de bilan en eau des sols ont été réalisés dans cette étude pour des périodes moyennes. L'étude de la variabilité interannuelle des réserves permettrait pour aller plus loin, en produisant des indices pour chaque mois de l'année, et ce pour de longues périodes. Ces données pourraient ensuite être reliées aux changements de distribution ou de croissance constatés sur les espèces forestière, dans le but d'améliorer notre compréhension de ces phénomènes. Une telle donnée permettrait également de chercher à quantifier les effets des événements extrêmes au regard des tendances à long terme.

Le réchauffement climatique est en marche et les études scientifiques montrent que de nombreuses conséquences sont en cours sur les forêts. Les simulations faites pour les périodes futures concordent vers une aggravation de ces conséquences, bien que de nombreuses incertitudes demeurent sur l'amplitude des changements à venir. Dans ce contexte, l'adaptation de nos forêts à ces changements est essentielle, d'autant plus que la gestion forestière se déroule sur des pas de temps longs. Cette adaptation passe par une meilleure connaissance de la disponibilité en eau et de ses évolutions sur le territoire, et une meilleure compréhension des exigences écologiques des espèces. L'amélioration de ces connaissances permettra de mieux comprendre les conséquences des fluctuations de la réserve en eau, et de mieux caractériser les risques, permettant de fournir des éléments de réponses aux gestionnaires forestiers.

Remerciements

Nous remercions pour leur aide au cours de ces travaux :

- l'IGN et son service d'inventaire forestier pour les données de sa base qui se révèlent essentielles pour des études telles que celles-ci, ainsi que les discussions autour de leur utilisation
- l'ONF pour la mise à disposition des données du réseau RNECOFOR, les diverses collaborations, et les discussions fertiles
- le CRPF pour sa participation à la comparaison avec des données stationnelles
- Météo France pour nous avoir permis d'accéder aux données des postes climatologiques
- Le BRGM qui nous a fourni les cartes géologiques.

Bibliographie

- Aussenac, G., 1970. Action du couvert sur la distribution au sol des précipitations. *Ann. Sci. For.* 27, 329-389.
- Benichou, P., Le Breton, O., 1987. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie* 7^{eme} série, n°19, 12.
- Berges, L., Balandier, P., 2010. Revisiting the use of soil water budget assessment to predict site productivity of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in the perspective of climate change. *European Journal of Forest Research* 129, 199-208.
- Bertrand, R., Lenoir, J., Piedallu, C., Riofrio-Dillon, G., de Ruffray, P., Vidal, C., Pierrat, J.C., Gegout, J.C., 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature* 479, 517-520.
- Bontemps, J.D., 2006. Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXI^{ème} siècle. Thèse ENGREF, 357 pages.
- Breda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. For. Sci.* 63, 625-644.
- Choisnel, E., 1992. Le calcul du bilan hydrique du sol : options de modélisation et niveaux de complexité. *science du sol*, 30, 1, 15-31.
- Curt, T., Bouchaud, M., Agrech, G., 2001. Predicting site index of Douglas-Fir plantations from ecological variables in the Massif Central area of France. *For. Ecol. Manage.* 149, 61-74.
- Doorenbos, J., 1979. Yield response to water / J. Doorenbos and A.H. Kassam ; with C.L.M. Bentvelsen ... [et al.]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome : .
- Drapier, J., Cluzeau, C., 2001. La base de données écologiques de l'IFN. The NFI's ecological data base. *Revue Forestière Française* 53, 365-371.
- Dyer, J.M., 2004. A water budget approach to predicting tree species growth and abundance, utilizing paleoclimatology sources. *Climate Research* 28, 1-10.
- Dyer, J.M., 2009. Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecology* 24, 391-403.
- Fielding, A.H., Bell, J.F., 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24, 38-49.
- Granier, A., Breda, N., Biron, P., Villette, S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116, 269-283.
- IPCC, 2001. AR3 - Climate change 2001 : impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of the working group II to the third assessment report of IPCC. Cambridge university press, Cambridge, p. 1032.
- Itenfisu, D., Elliott, R.L., Allen, R.G., Walter, I.A., 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129, 440-448.
- Le Bas, King, D., Daroussin, J., 1997. A tool for estimating soil water available for plants using the 1:1,000,000 Scale soil geographical data base of Europe. INRA - SESCOF, Ardon.
- Lebourgeois, F., Bréda N., Ulrich E., A, G., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees Structure and Function* 19, 385-401.

Lebourgeois, F., Jabiol, B., 2002. Enracinements comparés des chênes (sessile et pédonculé) et du hêtre sur différents matériaux. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Revue Forestière Française* 54, 17-42.

Lebourgeois, F., Piedallu, C., 2005. Comment appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. *Revue forestière Française* LVII, volume 4/2005, p331-356.

Leenhardt, D., Voltz, M., Bornand, M., Webster, R., 1994. Evaluating Soil Maps for Prediction of Soil-Water Properties. *European Journal of Soil Science* 45, 293-301.

Mitchell, T.D., Carter, T.R., Jones, P.D., Hulme, M., New, M., 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe : the observed record (1901-2000) and 13 scenarios (2001-2100). *Tyndall Centre Working Paper* 55, 1-25.

Mummery, D., Battaglia, M., Beadle, C.L., Turnbull, C.R.A., McLeod, R., 1999. An application of terrain and environmental modelling in a large-scale forestry experiment. *Forest Ecology & Management* 118, 149-159.

Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M., 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology* 20, 1823-1841.

Nix, H.A., Fitzpatrick, E.A., 1969. An index of crop water stress related to wheat and grain sorghum yields. *Agricultural Meteorology* 6, 321-337.

Palmer, W.C., 1965. *Meteorological drought*. Office of Climatology, Weather Bureau, Washington D.C.

Piedallu, C., 2012. Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et le croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique. Thèse, spécialité sciences forestières et du bois. Agroparistech, Nancy, France, p. 281.

Piedallu, C., Gegout, J., 2008. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1696-1706.

Piedallu, C., Gegout, J.C., 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. *Ann. For. Sci.* 64, 899-909.

Piedallu, C., Gégout, J.C., Bruand, A., Seynave, I., 2011a. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma* 160, 355-366.

Piedallu, C., Gegout, J.C., Perez, V., Lebourgeois, F., 2013. Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography* 22, 470-482.

Piedallu, C., Richard, J., Gaudin, S., Legay, M., 2012. Cartographie de la contrainte hydrique des sols forestiers. Exemple sur les plateaux calcaires du Nord-Est de la France. *Forêt-entreprise* 204.

Piedallu, C., Richard, J., Villiers, T., Gaudin, S., Lebourgeois, F., Legay, M., Perez, V., Davillier, S., Thirion, E., Riofrio-Dillon, G., Nicolas, M., Kochert, T., Cazet, M., Carnnot-Milard, L., Madesclaire, A., Hodapp, R., 2011b. Cartographie de l'évolution de la contrainte hydrique en contexte de réchauffement climatique, et exemple d'utilisation dans le cadre des catalogues et guides de stations forestières. In: *ECOFOR-AFORCE*, R.f. (Ed.), p. 60.

Rambal, S., 1984. Water-balance and pattern of root water-uptake by a quercus-coccifera L evergreen scrub *Oecologia* 62, 18-25.

Richard, J., 2011. Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières - Applications aux plateaux calcaires de Lorraine et de Bourgogne -. rapport de stage de la 3^{ème} année de la FIF, Agroparistech-Engref, Nancy, France.

- Richard, J., Piedallu, C., Gaudin, S., Legay, M., 2013. Utilisation des cartes prédictives pour améliorer la prise en compte de la réserve hydrique dans le choix des essences. *revue forestière Française* LXV, janvier-février 2013, 37-56.
- Stephenson, N.L., 1998. Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. *Journal of Biogeography* 25, 855-870.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The water balance. Laboratory of Climatology, Publication in Climatology. n°8.
- Ulrich, E., 1995. Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. *Revue Forestière Française* 47, 107-124.
- Vidal, J.P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30, 1627-1644.
- Villiers, T., 2011. Cartographie prédictive à haute résolution spatiale de la réserve utile maximale du sol dans le Nord-Est de la France. In: FIF, r.d.s.d.i.a.d. (Ed.). Agroparistech-Engref, Nancy, France, p. 69.
- Voltz, M., Lagacherie, P., Louchart, X., 1997. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area. *European Journal of Soil Science* 48, 19-30.
- Zierl, B., 2001. A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 242, 115-136.