



CONVENTIONS DE RECHERCHE IDF et ECOFOR n° 2010.22

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

Rapport final

30 octobre 2011

C. Piedallu *, J.B. Richard*, T. Villiers *, S. Gaudin, F°. Lebourgeois *, M. Legay **, V. Perez *, S. Davillier *, E. Thirion *, G. Riofrio-Dillon *, M. Nicolas **, T. Kochert **, M. Cazet **, L. Carnnot-Milard °, A. Madesclaire °°, R. Hodapp °°

* Agroparistech-Engref, 14 rue Girardet, CS14216, 54042 Nancy Cedex

** ONF, pôle R&D de Nancy, bat 802 - les merises, 54840 Velaine en Haye

° CRPF Champagne -Ardenne, Maison de la forêt et du bois, Complexe agricole du Mont-Bernard, Route de Suippes, F-51000 Châlons-en-Champagne

°° CRPF Alsace lorraine, 41 avenue du Général de Gaulle - 57050 Le Ban Saint-Martin

Remerciements

Les participants à ce projet (AgroParisTech-Engref, CRPF et ONF) tiennent à remercier les financeurs qui ont permis la réalisation de ce travail : à travers le RMT AFORCE l'IDF et le GIP ECOFOR, la DRAF et la Région LORRAINE. Nous tenons également à remercier l'IFN dont nous avons utilisé les données nouvelles méthode qui sont mises à disposition des utilisateurs via le web, ainsi le DSF qui a mis à disposition les données du réseau Biosoil.

Sommaire

1	Rappel des objectifs.....	6
2	Méthode de travail.....	7
2.1	Méthode de calcul des bilans en eau.....	8
2.2	Validation et comparaison de la qualité prédictive des cartes.....	12
2.3	Zone d'étude.....	13
2.4	Les données disponibles.....	15
2.4.1	Les bases de données spatialisées sous SIG utilisées.....	15
2.4.2	Les données ponctuelles utilisées pour la validation.....	18
2.4.3	Les données des catalogues des stations.....	21
3	Résultats.....	25
3.1	Validité des données utilisées et comparaison des données Météo France et Lerfob.....	25
3.1.1	Validité des données utilisées.....	25
3.1.2	Comparaison des modèles de pluie et de température du lerfob et de Météo France.....	27
3.2	Indentification d'un indice caractérisant la contrainte hydrique.....	29
3.3	Comparaison des cartes de bilan en eau aux données traditionnellement utilisées.....	30
3.4	Création et validation des cartes de bilan en eau.....	32
3.4.1	Cartographie des déficits d'évaporation.....	32
3.4.2	Validation nationale des déficits d'évaporation.....	35
3.4.3	Validation des déficits d'évaporation au sein de la zone d'étude.....	36
3.5	Utilisation dans le cadre des catalogues de stations forestières.....	38
3.5.1	Comparaison des méthodes d'estimation de la contrainte hydrique à l'aide des cartes de stations et de la carte des déficits d'évaporation.....	38
3.5.2	Comparaison des cartes de stations et de la carte des déficits d'évaporation pour déterminer les potentialités des essences au regard de la contrainte hydrique.....	41
3.5.3	Prise en compte des effets du changement climatique dans les guides ou catalogues de station.....	43
4	Conclusion générale.....	44

1 Rappel des objectifs

Les outils permettant le choix des essences, comme les catalogues de stations forestières, ont du mal à prendre en compte les effets potentiels du changement climatique (Gaudin, 2008; Landmann *et al.*, 2008; Riou-Nivert, 2008a, b). Or, une forte demande se fait sentir lors de la création de guides ou de nouveaux catalogues, ou lors de la mise à jour des documents existants (Legay *et al.*, 2007). La contrainte hydrique, analysée à travers le calcul d'un bilan hydrique, est reconnue à la fois comme étant un des facteurs les plus importants vis-à-vis de la ressource forestière, et probablement l'un des plus affectés par le changement climatique. Cependant, son estimation, qui se fait traditionnellement à l'échelle de la placette, est très coûteuse, rendant cette approche impossible sur de vastes échelles (Granier *et al.*, 1999; Berges and Balandier, 2010). Actuellement, les informations cartographiques disponibles pour la France concernent les bilans hydriques climatiques, qui représentent la différence entre les pluies et l'évapotranspiration ($P - ETP$). Cependant, du fait de l'importance du compartiment sol qui permet de stocker pendant l'hiver de l'eau disponible pour les plantes pendant l'été, cette donnée est susceptible d'être très imprécise. La prise en compte du compartiment sol dans le calcul du bilan en eau est donc nécessaire pour une évaluation plus fine.

L'objectif du travail était de créer, de valider et de déterminer l'intérêt et l'utilisation possible pour le forestier de cartes numériques décrivant la variabilité spatiale de l'eau du sol. Ce travail a été réalisé en mobilisant divers outils liés aux systèmes d'informations géographiques et aux techniques de cartographie prédictive (Franklin, 1995; McBratney *et al.*, 2003), à travers différentes étapes :

- Réalisation d'une carte de bilan en eau des sols à l'échelle régionale, en sélectionnant les données et les méthodes les plus appropriées ;
- Validation des données produites et les comparaisons à celles qui sont classiquement utilisées ;
- Evaluation de leur utilisation possible dans le cadre de la mise à jour d'un catalogue des stations forestières. Nous avons profité de la refonte prévue du guide des stations « les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne », rédigé par Laurence Milard (CRPF) en 2004 pour tester les potentialités liées à la carte produite.

Ce travail a été réalisé en un an, et a mobilisé une équipe pluridisciplinaire de chercheurs et de gestionnaires forestiers, du centre AgroParisTech-Engref, des CRPF Champagne Ardenne et Alsace Lorraine, et de l'ONF. Il a donné lieu à l'embauche de deux étudiants de niveau master 2, Jean Baptiste Richard (Richard, 2011) issu de la FIF et Thomas Villiers stagiaire IAE (Villiers, 2011), qui ont soutenu en septembre 2011 et dont les rapports de stage sont disponibles. Vu la courte durée des projets, ces deux stagiaires ont travaillé en parallèle. Jean-Baptiste Richard a axé son travail sur le choix des indices et leur utilisation dans le cadre des catalogues de stations. Thomas Villiers a travaillé à l'amélioration de la composante concernant la réserve utile maximale des sols (RUM), qui est la plus difficile à prendre en

compte, en lien avec un projet cofinancé par la Région et la Draf Lorraine. Ce travail a également été réalisé en lien avec la thèse de Christian Piedallu qui a comparé la pertinence des indices produits avec les indices de bilan hydrique climatique classiquement utilisés. Le travail présenté ci-dessous représente la synthèse de ces trois travaux, et plus particulièrement le travail qu'a effectué Jean-Baptiste Richard. Deux comités de pilotage réunissant les principaux acteurs de ce projet se sont également réunis pour faire le point sur l'avancée des travaux et proposer des pistes. De ces travaux, une première publication destinée à une revue scientifique internationale est en cours de soumission (Piedallu *et al.*, submitted), et une deuxième destinée à une revue nationale est en cours d'élaboration.

Après avoir présenté le site d'étude et la méthode utilisée, nous détaillerons les résultats qui sont issus de la synthèse de ces travaux et qui seront présentés sous la forme de 5 parties :

- comparaison des données disponibles et choix des couches
- identification d'un indice pertinent de bilan en eau des sols
- création et validation des cartes de bilan en eau,
- comparaison des cartes produites aux indices de bilan hydrique climatiques précédemment utilisés ;
- utilisation des cartes produites dans le cadre des catalogues de station forestière

Nous concluons en présentant un petit guide simplifié résumant l'usage et les limites des cartes produites.

2 Méthode de travail

Dans un premier temps ; nous avons comparé différentes possibilités de calcul d'un indice de bilan en eau, en fonction des données disponibles, de la méthode de calcul utilisée, et enfin des indices utilisés (Figure 1). Cette première étape a conduit à l'identification d'un indice pertinent pour représenter la contrainte hydrique, qui a été cartographié sur la France entière au pas de 50 mètres. Les cartes ainsi créées ont été validées avec les données qui étaient disponibles, puis elles ont été comparées avec les données traditionnellement utilisées de bilans hydriques climatiques. Une fois terminée cette étape d'évaluation de la robustesse des indices cartographiés, nous nous sommes focalisés sur la zone des plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne afin d'examiner à partir de cas concrets quelle aide pourrait apporter cette carte pour prendre en compte l'évolution de la ressource hydrique dans l'évaluation de la vulnérabilité des espèces, et la détermination du choix des essences.

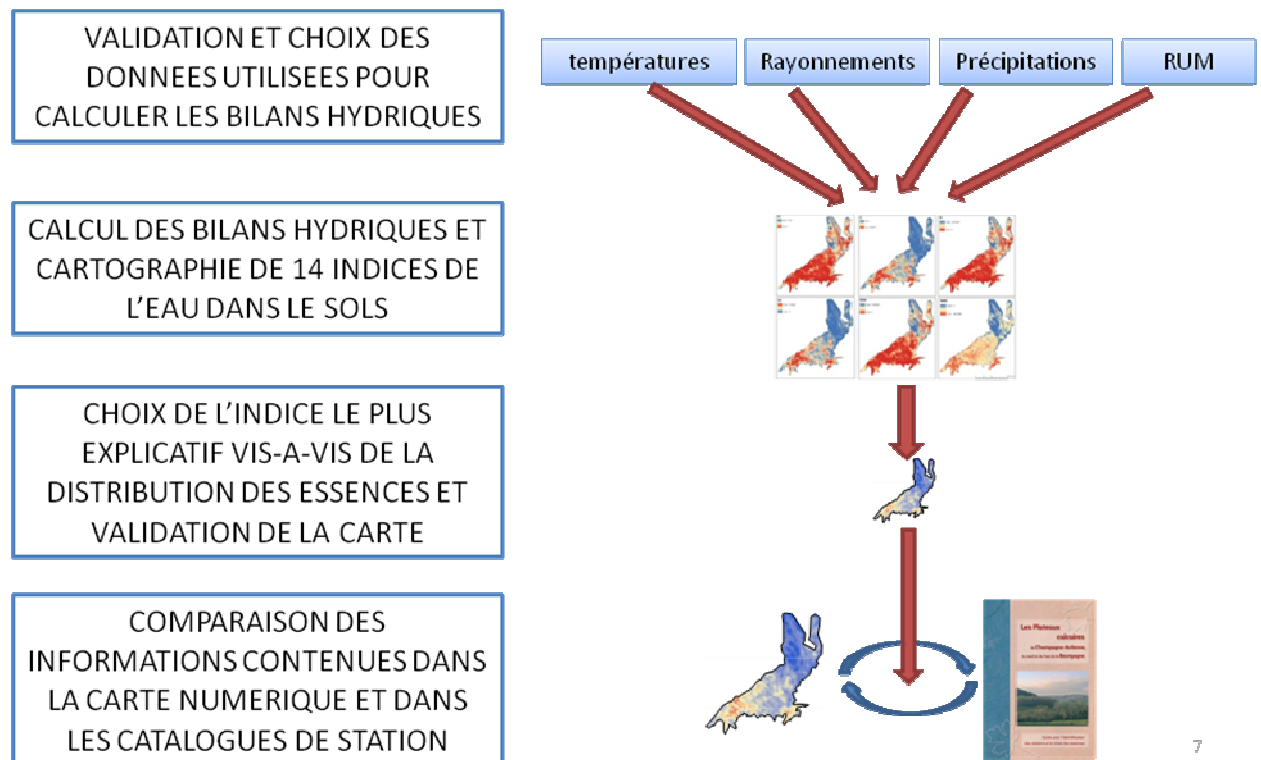


Figure 1 : organisation générale de l'étude

2.1 Méthode de calcul des bilans en eau

Le calcul du bilan hydrique a pour objectif de caractériser l'évolution de la quantité d'eau disponible pour un couvert végétal dans le temps. C'est un calcul complexe qui peut être réalisé avec différents niveaux de simplification selon les données disponibles et le pas de temps considéré (Thornthwaite and Mather, 1955; Palmer, 1965; Granier *et al.*, 1999). Il va être dépendant de trois composantes essentielles, les apports en eau, la demande climatique, et la capacité du sol à stocker l'eau. La quantité d'eau disponible pour les plantes, encore appelée réserve utile (RU), fluctue au fil de l'année, dans la limite de la réserve utile maximale du sol (RUM), qui représente la quantité maximale d'eau qu'une plante peut extraire d'un sol donné. La vitesse de variation du contenu en eau va dépendre aussi en grande partie des caractéristiques du couvert, de la profondeur d'enracinement, de la surface de feuilles et de la phénologie. Le principe de calcul du bilan hydrique pour une période t peut s'écrire de la façon suivante (Figure 2):

$$RU_{(t)} = RU_{(t-1)} + (Pi_{(t)} - In_{(t)}) - ETR_{(t)} - Dr_{(t)} - Dl_{(t)} + AL_{(t)}$$

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

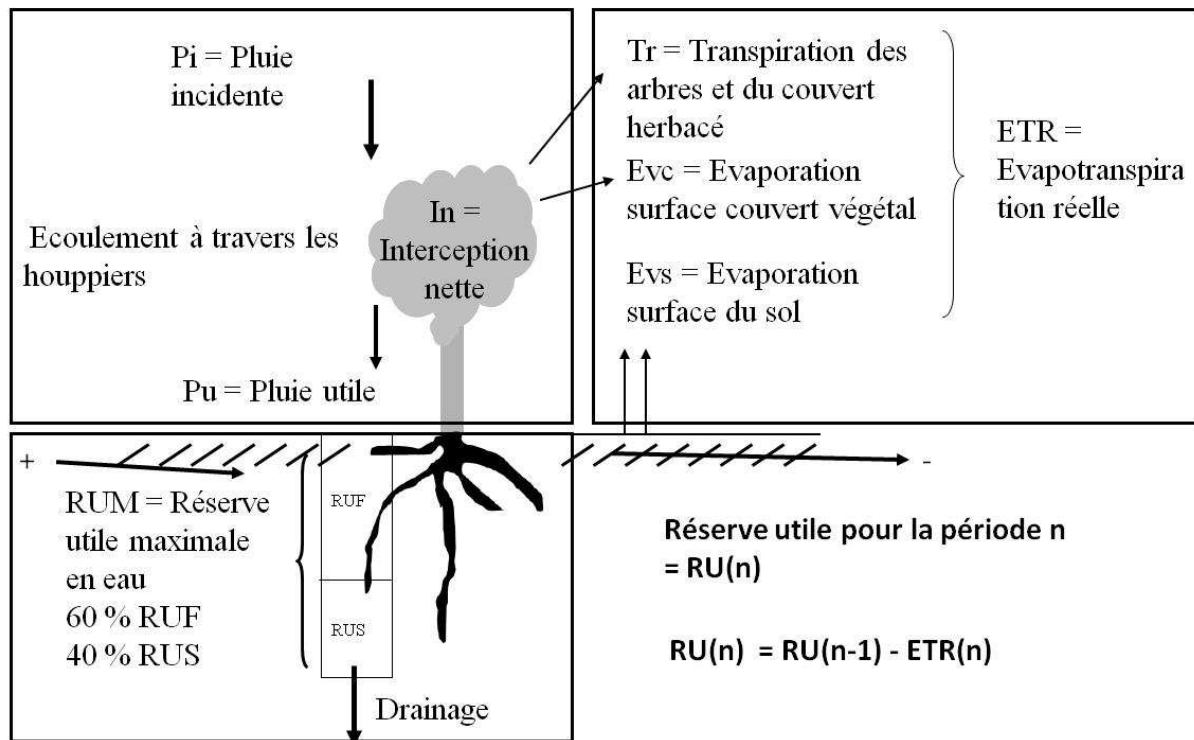


Figure 2 : Schéma simplifié du bilan hydrique sous couvert forestier. RUF = réserve utile facilement utilisable pour les plantes, RUS = réserve utile de survie plus difficilement mobilisable.

Les apports en eau vont être conditionnés par la pluviométrie, minorée par l'interception par la végétation qui représente sous nos latitudes entre 25 et 35% des pluies, plus importante sous forêt sempervirente que décidue (Aussenac, 1970). Nous avons choisi de ne pas prendre en compte les effets du couvert végétal, du fait du manque d'information pour ce qui le concerne à l'échelle de la France, et de son évolution rapide dans le temps. Le calcul du bilan en eau correspond donc aux conditions d'un sol nu, ce qui permettra de faire des simulations dans un contexte de changement de climat, alors que de nombreux changements concernant l'occupation du sol sont attendus.

Le stockage dans le sol se fait dans la limite de la RUM, qui 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. Au cours de ce travail nous avons utilisé la carte des RUM de France produite par pixels de 1 km² à partir des données de l'IFN et de fonctions de pédotransfert (Piedallu *et al.*, 2011). Dans le but d'améliorer la résolution spatiale de ces données, une seconde carte par pixels de 50 mètres de côté a été élaborée par Thomas Villiers pour les 2/3 de la zone d'étude environ (Villiers, 2011). Les travaux liés à ces deux cartes seront présentés lors de ce travail. L'estimation des flux latéraux ou verticaux (départs et apports latéraux) reste complexe et sa prise en compte donnera lieu à des travaux ultérieurs, celle-ci n'étant pas possible dans le temps imparti à ce travail. L'eau restante va être stockée dans le sol en fonction du volume de terre disponible, elle sera facilement mobilisable par la plante pour les premiers 60% de la RUM, plus difficilement extractible par la suite (Granier *et al.*, 1999).

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).

Un autre paramètre important pour le calcul du bilan hydrique est 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 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. 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 (Lebourgeois and Piedallu, 2005). 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; Rosenberry *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2005; Fisher *et al.*, 2011). L'ETP de Turc a été sélectionnée car elle est reconnue comme l'un des meilleurs compromis entre le nombre de données requises et les performances (Lu *et al.*, 2005). 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.

La cartographie du bilan hydrique peut être réalisée à l'aide de différentes méthodes de calcul, les plus connues étant celles de Palmer (Palmer, 1965) et de Thornthwaite (Thornthwaite and Mather, 1955), que nous allons comparer.

La réserve utile du sol d'un mois m est définie selon Thornthwaite et Mather (1955) en fonction de celle du mois précédent ($m-1$) par :

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

Si $P - ETP < 0$, alors la réserve utile diminue selon une exponentielle négative, et l'évapotranspiration réelle est définie par :

$$ETR = P - (RU(m) - RU(m-1)) = P - \Delta RU$$

Palmer (1965) a une approche différente de la dynamique de l'eau dans le sol. Il divise le sol en une couche de surface (réserve utile facilement utilisable, RUF, qui représente 60% de la RUM) où l'eau est facilement extractible, et une couche profonde, où l'eau est plus difficilement utilisable (RUS : réserve utile de survie).

Ainsi, $RUM = RUF + RUS$ 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, l'eau prélevée dans la RUS pour une période de t_1 à t_2 étant une fraction de la quantité d'eau disponible à t_1 :

$$\begin{array}{l} RUS(t_2) - RUS(t_1) = (P + |RUF(t_2) - RUF(t_1)| - ETP) \times RUS(t_1) / RUM \\ ETR = P - (RU(t_2) - RU(t_1)) \end{array}$$

Ces calculs de bilan en eau donnent lieu à la production d'un nombre important d'indices qui permettront de caractériser l'énergie disponible pour la plante à travers l'ETR, l'eau disponible à travers la RU, 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, 1990; 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 (Thorntwaite and Mather, 1955). D'autres indices sont cités dans les 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 ces différents indices afin de déterminer si certains sont plus performants que d'autres.

Liste des indices évalués :

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 (Stephenson, 1998; 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).

$$\begin{array}{l} SWD = RUS - RU = 0,4 \times RUM - RU, \text{ si } RU < RUS \\ \text{Sinon } SWD = 0 \end{array}$$

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 et Fitzpatrick, 1969), définit par le rapport RU/ETP . Il caractérise ainsi l'eau disponible dans le sol par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère.

2.2 Validation et comparaison de la qualité prédictive des cartes

Différentes validations et comparaisons ont été réalisées pour déterminer les méthodes et les données les plus performantes entre :

- Les méthodes de calcul de Palmer et de Thornthwaite
- Les différents indices disponibles
- Les calculs de bilans hydriques climatiques et édaphiques

Ces comparaisons ont été réalisées pour partie à l'aide de jeux de mesures indépendantes quand cela était possible. Cependant, dans un nombre important de cas, il n'a pas été possible d'utiliser de tels jeux de données (il n'est pas possible de comparer l'efficacité des méthodes de Palmer et de Thornthwaite à l'aide de jeux de mesures par exemple). Dans ce cas, elles ont été réalisées en fonction de la capacité prédictive des indices vis-à-vis la distribution des essences forestières les plus courantes de France. Ce travail a été fait à l'aide de modèles linéaires généralisés (GLM) (ter Braak and Looman, 1986; McCullagh and Nelder, 1997) ou de modèles additifs généralisés (GAM) (Hastie and Tibshirani, 1990). Les GLM ont été utilisés car il s'agit d'une des méthodes les plus couramment utilisées pour prédire des données binaires (présence ou absence de l'espèce), facile à mettre en œuvre pour réaliser des cartes prédictives. Les GAM ont également été mises en œuvre car elles permettent l'élaboration de courbes de réponses asymétriques.

Différents types de modèles ont été utilisés. Des modèles univariés ont été réalisés, quand la réponse statistique de chaque indice écologique utilisé seul, en calibrant autant de modèles qu'il y a de variables à tester. D'autres modèles sont calibrés avec un nombre limité de facteurs écologiques qui sont inclus systématiquement dans le modèle. Le but est d'évaluer

l'effet d'un indice écologique une fois pris en compte d'autres facteurs qui sont reconnus pour leur importance vis-à-vis des espèces considérées, et qui sont sélectionnés à priori. Le critère d'évaluation statistique des modèles est l'Area Under Curve (AUC), qui est estimée selon la méthode de la courbe ROC (Fielding and Bell, 1997). Le principe de calcul de la courbe ROC se fonde sur l'évaluation de la performance d'un grand nombre de seuils possibles, afin de déterminer la part de présences et d'absences bien prédites par le modèle. L'AUC est un indicateur global de performance indépendant du choix d'un quelconque seuil. Cet indicateur qui est comparable entre les modèles s'échelonne entre 0.5 (aucun pouvoir explicatif) et 1 (la distribution observée est totalement expliquée par le modèle). Pour expliquer la distribution d'une espèce, on considère qu'à partir de 0.7 un modèle complet est acceptable, qu'il est bon entre 0.7 et 0.8 et très bon au-delà de 0.9 (Swets, 1988).

2.3 Zone d'étude

La zone d'étude s'étend sur les plateaux calcaires de Bourgogne, Champagne-Ardenne et Lorraine. Cette zone représente 18 310 km², et s'étend sur 10 départements et 3 régions administratives (Figure 3). Le substrat géologique est composé de calcaires du Jurassique moyen et supérieur, disposés en une succession de couches dont certaines sont plus sensibles à l'érosion que d'autres. Cette érosion différentielle a façonné la topographie des plateaux calcaires, créant un relief plus ou moins marqué par une succession de cuestas (« côtes ») et de dépressions, entaillées par des vallées (Milard, 2004; Rabu and Chanteraine, 2004). L'altitude sur la zone d'étude varie entre 100 mètres et 550 mètres environ, le point culminant se situant dans le nord-est bourguignon (région d'Is-sur-Tille). Sur l'ensemble de la zone d'étude, les précipitations moyennes varient entre 650 et 1100 mm par an (données Météo-France sur la période 1961-1990, Benichou et Le Breton, 1987), et sont bien réparties sur toute l'année. D'une manière générale, les pluies sont plus abondantes au nord-est du site d'étude, tandis que le nord de la Bourgogne (Nièvre, Yonne et Côte d'Or) ainsi que l'est aubois (région de Bar-sur-Seine) sont un peu moins arrosés. Concernant les températures moyennes annuelles, les valeurs s'étalent de 8,5°C à 11°C (Benichou and Le Breton, 1987). Cependant, les différences locales de température par rapport aux moyennes régionales peuvent être relativement fortes, du fait de la position topographique, de l'exposition et du confinement.

Si la carte de bilan en eau des sols et l'analyse de son utilisation possible ont bien été réalisés à l'échelle des plateaux calcaires du nord est de la France, certaines analyses ont été faites à l'échelle de la France entière, les modèles de bilan en eau ayant été initialement calculés sur cette emprise. En outre, la validation a aussi été réalisée à des échelles plus locales (Figure 4).

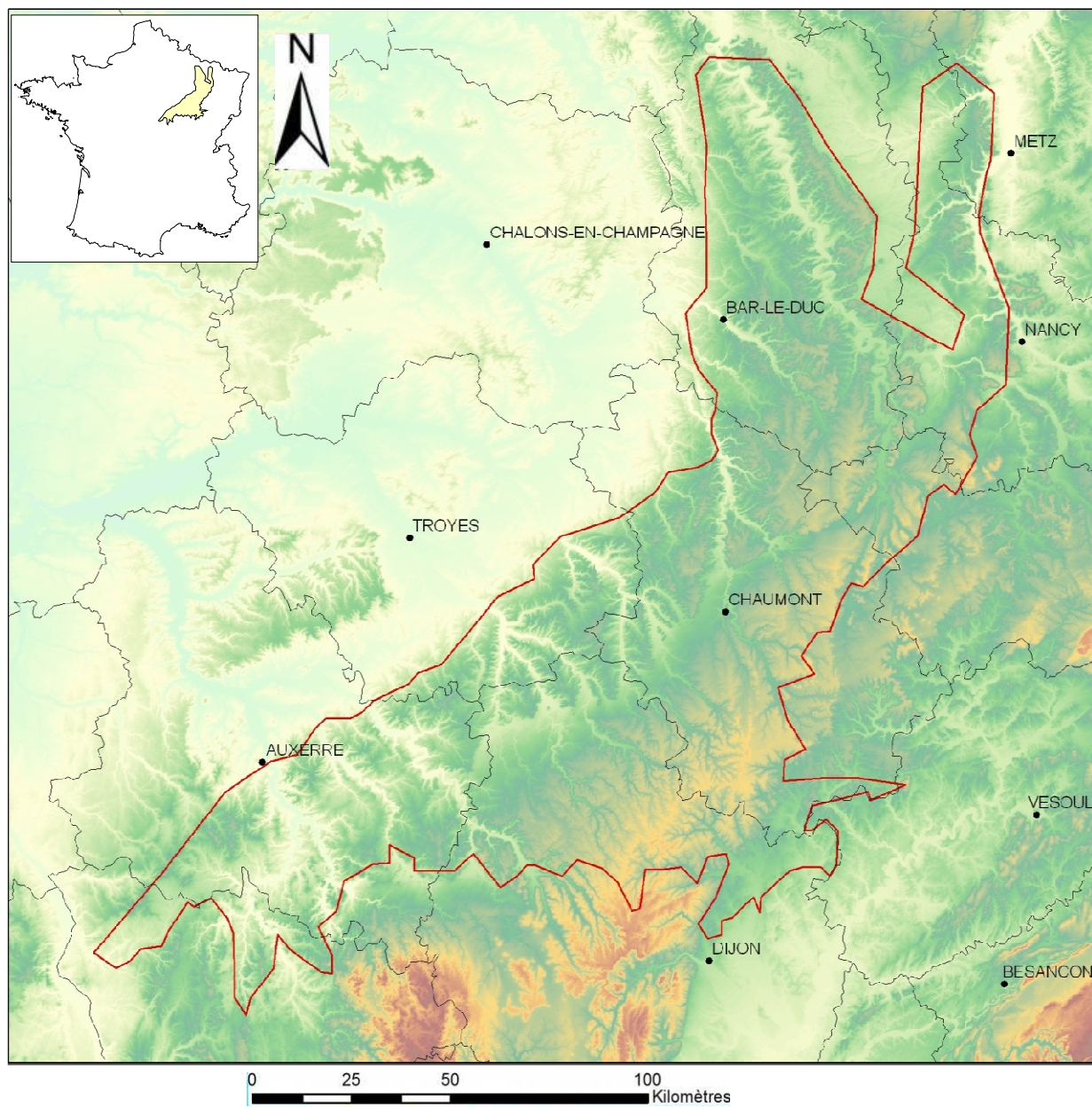


Figure 3 : Zone d'étude des plateaux calcaires

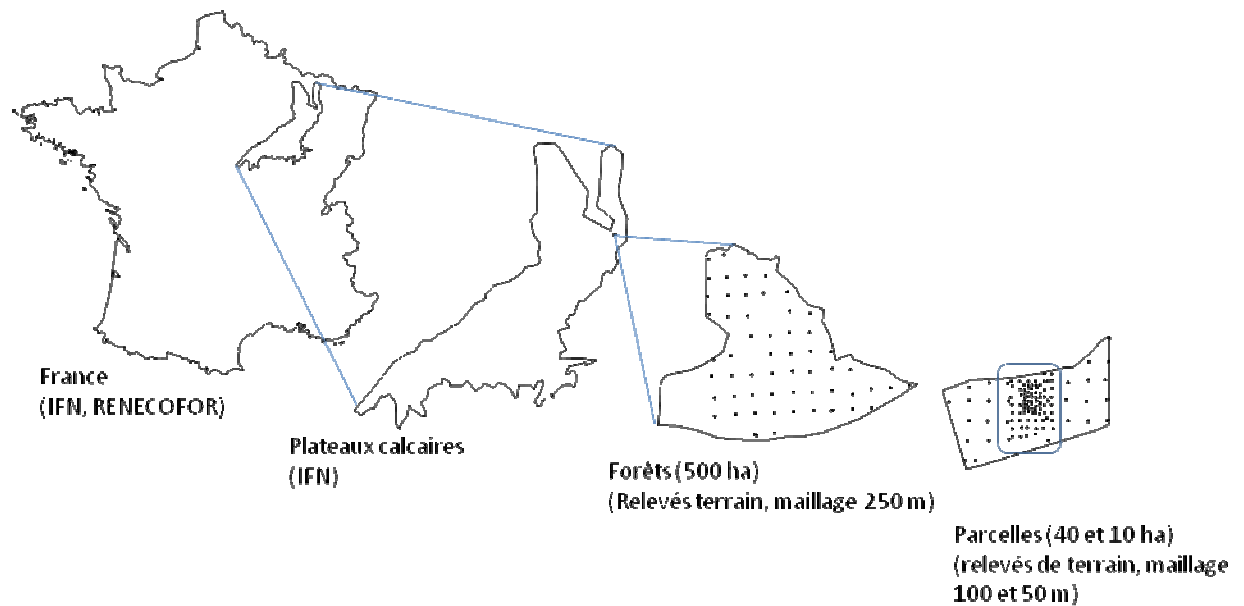


Figure 4 : Différentes emprises utilisées pour la validation

2.4 Les données disponibles

Une grande quantité de données ont été mobilisées lors de ce projet. Elles concernent à la fois des couches nécessaires à l'élaboration ou la comparaison des calculs spatialisés, des jeux de données utilisés pour la validation des cartes de bilan en eau, et les cartes des stations réalisées sur le terrain.

2.4.1 Les bases de données spatialisées sous SIG

Différents types de données écologiques entrent dans les calculs des bilans en eau des sols que nous avons calculés : les précipitations, les températures, le rayonnement solaire, et la réserve utile maximale des sols (RUM).

2.4.1.1 Le rayonnement solaire

Le modèle SAFRAN (système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige), développé par Météo-France caractérise le rayonnement solaire au sol (en W/m^2) sur la France au pas de 8 km, tenant compte principalement de la latitude, de la topographie et de la nébulosité (Quintana-Segui *et al.*, 2008). 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) (Piedallu and Gegout, 2007; Piedallu and Gegout, 2008).

2.4.1.2 Les températures et les précipitations

Deux modèles sont disponibles : le modèle climatique AURELHY calculés par Météo-France (Benichou et Le Breton, 1987). Il modélise les températures et les 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. Des modèles de températures et de précipitations ont également été réalisés au LERFoB, dans le but de mieux prendre en compte les effets de la topographie locale, et de pouvoir évaluer dans l'espace les changements de climat à des pas de temps plus fins que les moyennes trentenaires fournies par Météo France (Bertrand *et al.*, 2011). Ces modèles ont été validés (Richard, 2011). La capacité prédictive de ces deux catégories de modèles sera comparée pour les températures et les précipitations afin de déterminer celui qui est le plus adapté aux besoins de l'étude.

2.4.1.3 La réserve utile maximale des sols

Nous avons utilisé la carte des RUM des sols forestiers de France qui a été améliorée à partir de la méthode développée en 2010 (Piedallu *et al.*, 2010). Ces améliorations portent sur la méthode de spatialisation, qui par l'utilisation de co-variables géologiques et topographiques disponibles à l'échelle de la France, ont permis la réalisation d'une carte au pas de 500 mètres (Figure 5). Cependant, du fait de la forte variabilité locale des paramètres qui déterminent la RUM, une telle résolution spatiale 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. C'est pour cette raison qu'une étude spécifique, non prévue au départ, a été menée en parallèle dans le but de réaliser une carte des RUM à fine résolution spatiale (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 la topographie. Il a permis la réalisation d'une carte au pas de 50 mètres qui couvre environ les 2/3 de la zone d'étude (Figure 6). Les performances des indices de bilan en eau calculés à partir de ces deux cartes seront comparées, bien que l'essentiel du travail présenté soit réalisé avec la carte au pas de 500 mètres. En effet, celle-ci a l'avantage de couvrir l'ensemble du site étudié, chose qu'il était impossible de réaliser avec la carte au pas de 50 mètres dans le temps imparti pour cette étude.

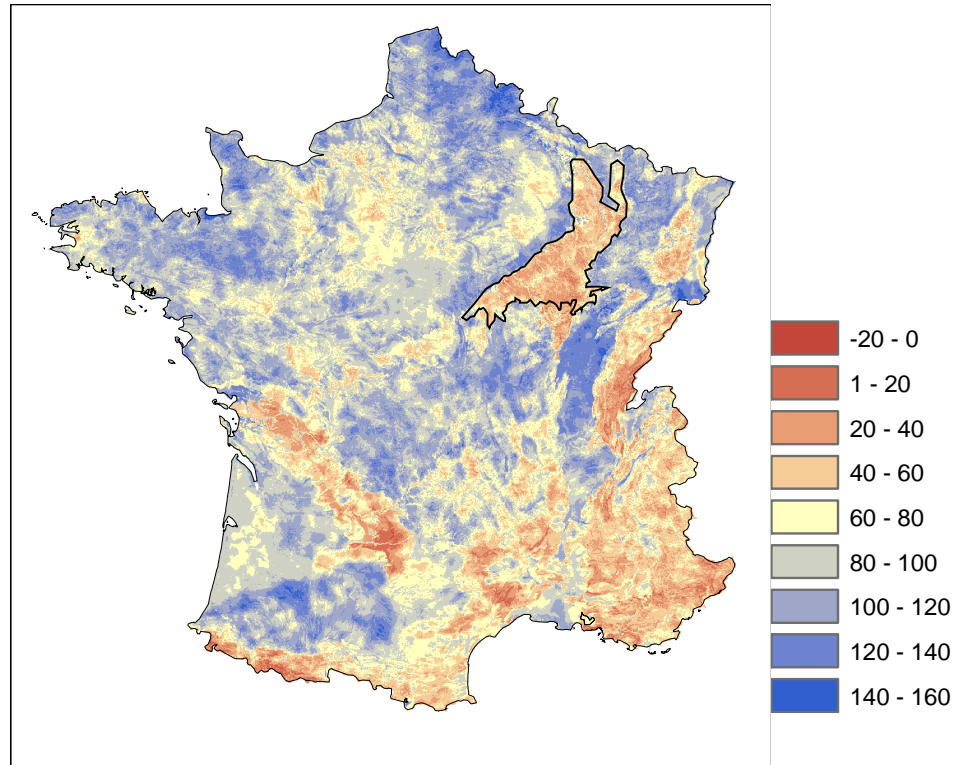


Figure 5 : Cartographie au pas de 500 m de la réserve utile maximale des sols en France (mm) et sur les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Bourgogne et Lorraine

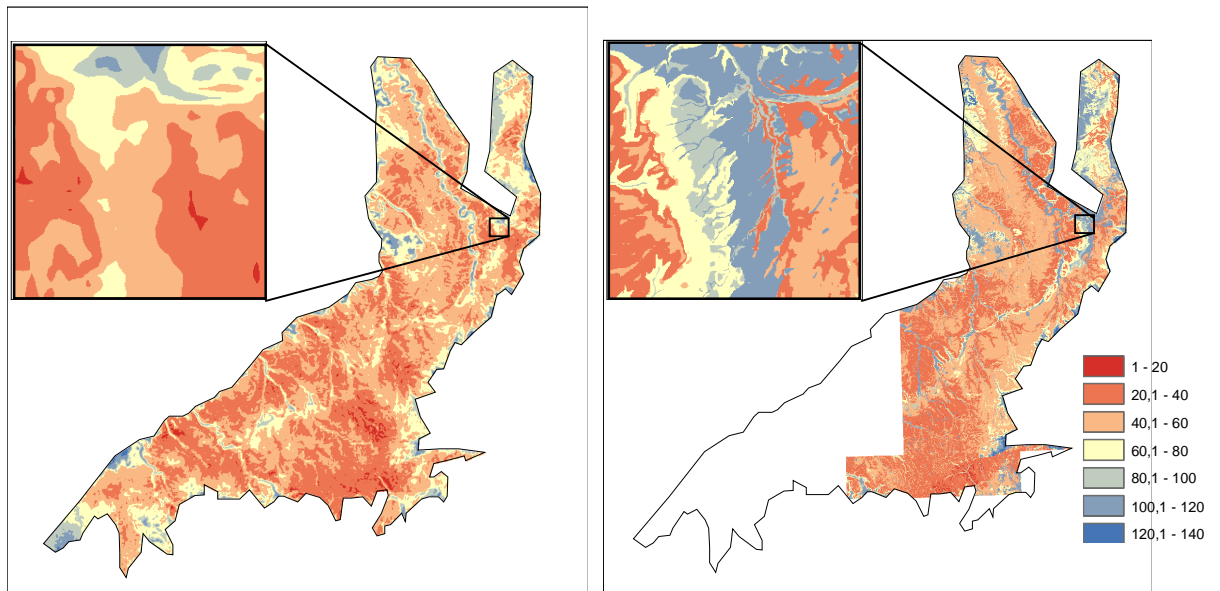


Figure 6 : Réserves utiles maximales des sols cartographiées au pas de 500 mètres (à gauche) et au pas de 50 mètres (à droite) sur les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne Bourgogne et Lorraine (en mm).

2.4.2 Les données ponctuelles utilisées pour la validation

2.4.2.1 Base de données IFN

Nous avons utilisé 32 544 placettes de la base de données IFN nouvelle méthode pour la période 2005-2009, réparties de façon homogène sur la France entière (Figure 7). Les données de description des sols ont permis un calcul des réserves utiles maximales (RUM) des sols forestiers afin de comparer les différents modèles spatialisés disponibles. L'inventaire floristique relevé sur ces placettes a en outre permis la modélisation de la distribution des principales essences disponibles sur le territoire Français. Le nombre très important de placettes permet à la fois d'utiliser cette base de données sur la France entière et sur la zone des plateaux calcaires (1124 relevés disponibles).

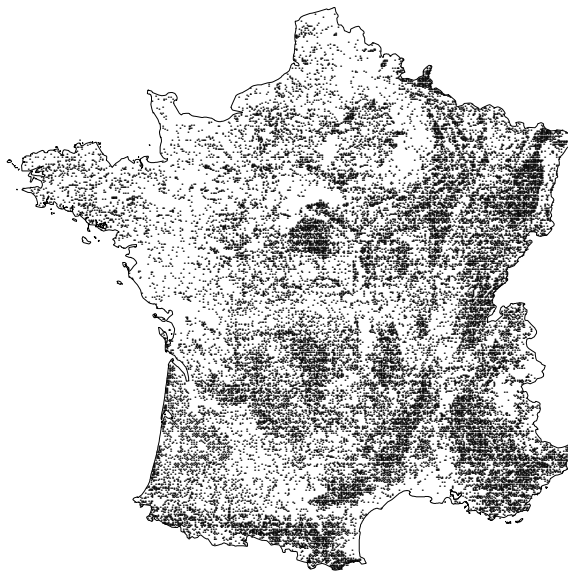


Figure 7: Distribution spatiale des 32 544 placettes de relevés de l'Inventaire Forestier National utilisées dans le cadre de cette étude

2.4.2.2 Les bases Renecofor et Biosoil

Le réseau RENECOFOR est un réseau de suivi des écosystèmes forestiers instauré en 1992, avec pour objectif de détecter les éventuels changements dans les écosystèmes forestiers et d'identifier l'origine de ces changements (Ulrich, 1995). Dans le cadre de cette étude ont été utilisées les données des 25 placettes du sous-réseau météorologique, qui sont équipées d'un système de mesure de données climatiques (Figure 8). Ces placettes fournissent ainsi des données de températures et précipitations en forêt, ainsi que des données de description des sols et des peuplements forestiers. Sur 7 de ces placettes sont de plus relevés les rayonnements solaires. Ces données, indépendantes de celles ayant servi à la calibration des modèles SIG de bilans en eau des sols, ont permis de valider les cartes prédictives de bilan en eau produites, à l'échelle de la France. Seules les données de rayonnements solaires de 18 placettes devront être extraites du SIG pour compléter les 7 dotées de mesures originales et pouvoir calculer ces bilans.

Biosoil est un réseau à l'échelle européenne visant à produire un inventaire des sols pour le réseau européen de surveillance des forêts (Durant *et al.*, 2011). Cette base nous a été transmise dans le cadre de ce travail par le DSF (Département Santé des Forêts) dirigé par JL Flot. Nous avons calculé des valeurs de RUM sur 543 placettes de ce réseau à partir de mesures de textures, d'estimations de profondeur et de charge en cailloux.

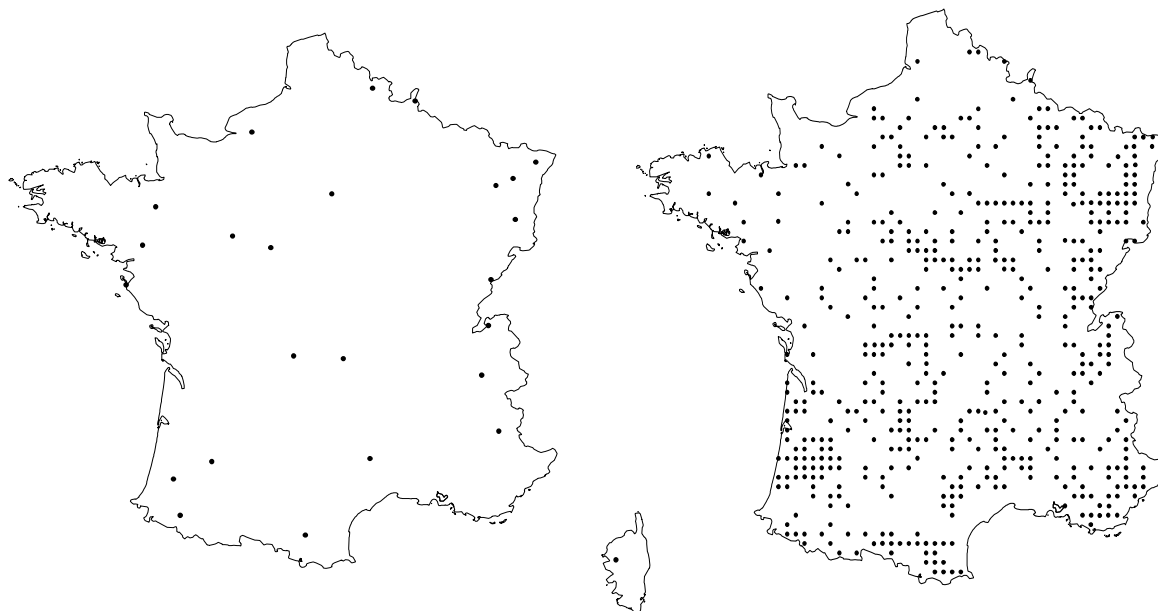


Figure 8 : localisation géographique des 25 placettes du réseau RENCOFOR (à gauche) et des 543 placettes du réseau Biosoil (à droite) utilisées.

2.4.2.3 Campagne de terrain de Bois l'évêque et Villiers le sec

Un des objectifs du travail réalisé est de produire des cartes numériques qui puissent être utilisées localement par les gestionnaires. Il est donc nécessaire de valider localement les modèles élaborés. Nous avons mis en place une campagne de relevés de terrain dans les forêts de Bois l'Evêque et de Villey-le-Sec (Meurthe et Moselle), situées entre Nancy et Toul, dans une zone où les plateaux calcaires sont entaillés par la Moselle. Les relevés ont été effectués selon trois maillages imbriqués (250, 100 et 50 m) et ont permis l'estimation des RUM des sols sur ce maillage (Table 1, Figure 9).

site	Nombre de placettes	maillage	Surface échantillonnée	Echelle de validation des cartes numériques
Bois l'Evêque, Villey-le-Sec	92	250 m	500 ha	massif, forêt
Bois l'Evêque	47	100 m	40 ha	quelques parcelles
Bois l'Evêque	36	50 m	10 ha	une parcelle

Table 1 : description du dispositif de relevés sur les forêts de Bois l'Evêque et Villey-le-sec

Ces données ont été utilisées pour comparer les performances des données produites à l'aide des différentes couches de RUM (pas de 500 m et pas de 50 m).

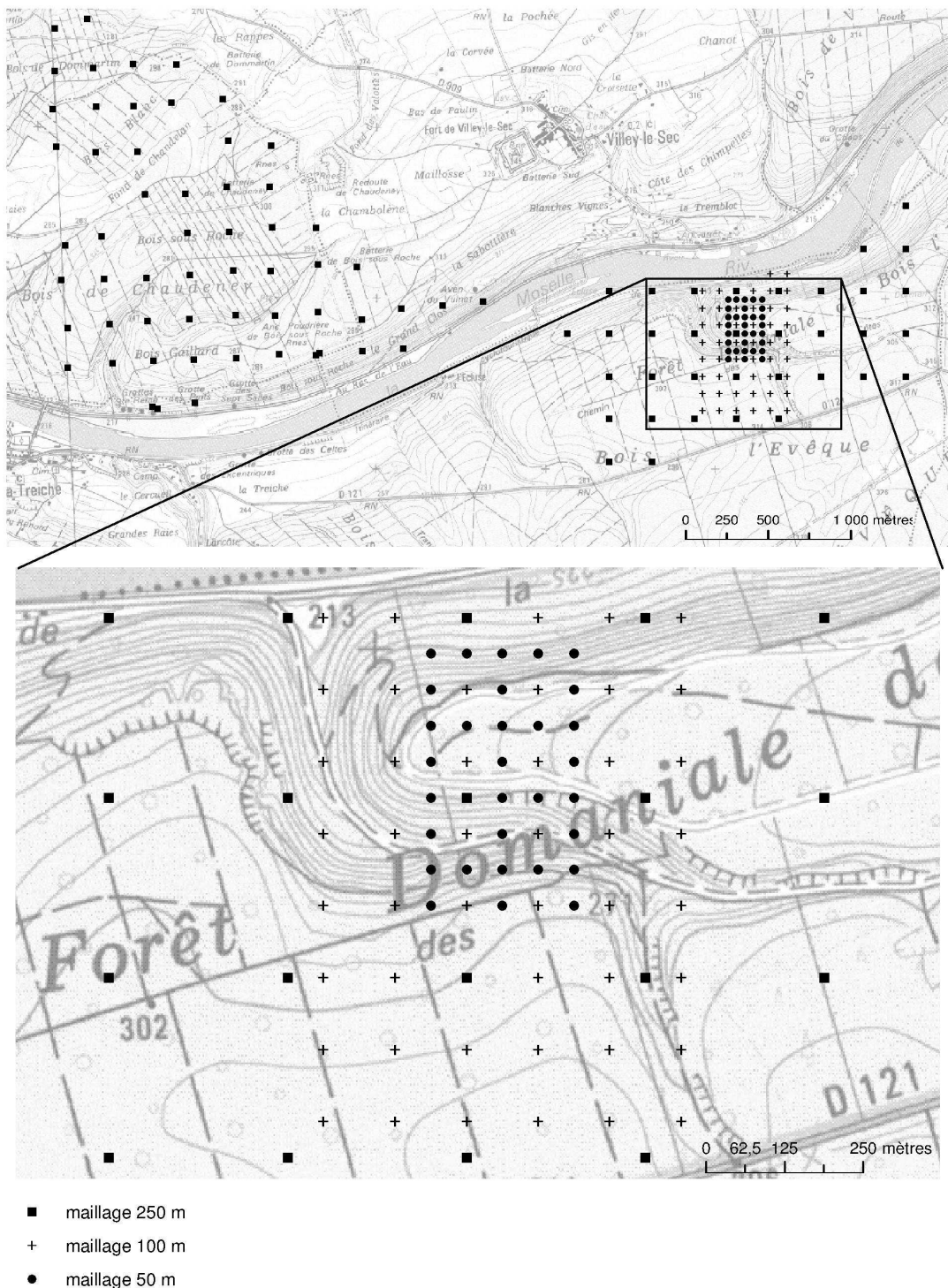


Figure 9 : présentation du dispositif de relevés sur les forêts de Bois l'Evêque et Villey-le-sec

2.4.2.4 Relevés de terrain sur les plateaux calcaires de Bourgogne

Une question posée lors de la création des cartes numériques de bilan en eau concerne l'estimation des erreurs de prédiction et la différenciation des erreurs dues aux relevés de terrain et induites par la cartographie. Afin de compléter les relevés réalisés à Bois l'évêque et à Villiers le sec, et d'évaluer la variabilité des mesures au sein des prédictions d'un pixel, nous avons mis en place un deuxième dispositif d'inventaire sous forme de transects en différents points des plateaux calcaires (Annexe 1). Trois transects ont été mis en place, le long desquels une description des sols a été effectuée afin d'évaluer la réserve utile maximale des sols. Les transects ont été positionnés à partir de cartes topographiques et des cartes numériques de façon à couvrir le plus grand gradient possible de RUM. Nous avons de plus voulu estimer les variations très locales sur une placette carrée de 50m x 50m (placette correspondant à un pixel des cartes numériques). Sur dix points de relevés, nous avons matérialisé cette placette et nous avons réalisé une fosse en cinq points de la placette à l'aide de sondages à la pioche puis à la tarière (un sondage au centre, et quatre autres situés à 20 m et orientés à 50, 150, 250 et 350 grades par rapport à ce point central). La profondeur du sol, la charge en éléments grossiers et la texture des différents horizons ont été décrits sur ces sondages selon un protocole similaire à celui utilisé par l'IFN.

2.4.3 Les données des catalogues des stations

Au cours de ce travail, nous avons comparé les potentialités des espèces en fonction de la quantité d'eau disponible estimée selon l'information fournie par les catalogues de stations forestières présent sur la zone d'étude, et la carte numérique représentant la contrainte hydrique. Pour cela, nous avons eu recours à des cartes numériques des stations forestières, qui proviennent des bases de données SIG de l'Office National des Forêts et du CRPF. Nous avons ainsi compilé 13 460 relevés surfaciques décrivant 551 forêts, réparties sur toute la zone d'étude. Ces polygones sont issus de l'interpolation « à dire d'expert » de relevés ponctuels fait sur le terrain selon la typologie en vigueur. La base de données obtenue est très hétérogène, certains relevés ont été réalisées à partir du catalogue des stations, d'autres à partir du guide des stations, et d'autres à partir de groupes stationnels divers. A l'échelle d'un catalogue ou d'un guide des stations, les données étaient exploitables, mais il n'était pas possible d'avoir une vision d'ensemble. Dans un premier temps nous nous sommes focalisés sur les stations forestières du guide des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004) (Tables 2 et 3). Dans un deuxième temps, et dans l'objectif d'élargir la réflexion à l'ensemble de la zone, une harmonisation des codes de stations a été réalisée. Les correspondances entre les différentes nomenclatures ont été effectuées à partir du tableau des correspondances inclus dans le guide des stations des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004) (Table 4)

Code station	Description
US1	Hêtraie-Chênaie sur substrat carbonaté de plateau très sec à mésophile
US2	Hêtraie-Chênaie-Charmaie sur argile de décarbonatation peu épaisse de plateau
US3	Hêtraie-Chênaie-Charmaie sur argile de décarbonatation épaisse de plateau
US4	Hêtraie-Chênaie-Charmaie sur limon peu épais et faiblement acide de plateau
US5	Hêtraie-Chênaie (-Charmaie) sur limon épais faiblement acide à acide de plateau
US6	Erablaie -Tiliaie sur éboulis de versant ombragé
US7	Hêtraie (-Chênaie-Charmaie) de versant ombragé calcaire à neutre
US8	Chênaie pubescente de versant ensoleillé
US9	Hêtraie-Chênaie de versant ensoleillé calcaire
US10	Hêtraie-Chênaie-Charmaie de versant mésotherme
US11	Chênaie-Charmaie de bas de versant ou de fond de vallon calcaire et sec
US12	Chênaie pédonculée-Charmaie de bas de versant ou de fond de vallon mésophile
US13	Chênaie pédonculée-Frênaie de fond de vallon frais large (13 a) ou étroit (13 b)
US14	Frênaie-Erabraie de fond de vallée
US15	Aulnaie-Frênaie (-Ormaie)
US16	Aulnaie marécageuse

Table 2 : liste des unités stationnelles (US) décrites dans le guide des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004)

		Type de matériau	Profondeur du sol prospectable	Réserve en eau du sol	Niveau trophique	Principales propriétés	Potentialités	
Situation de plateau	US 1	Matériau carbonaté	+ (+ +)	+ (+)	Calcaire	Terre fine carbonatée avant 15 cm	Très faibles à faibles	
	US 2	Argile sur calcaire	+ (+)	+	Assez calcaire à neutre	Profondeur prospectable < 40 cm	Très faibles à moyennes	
	US 3	Argile sur calcaire	++ (+)	++	Neutre	Profondeur prospectable > 40 cm	Moyennes à assez bonnes	
	US 4	Limons peu épais sur argile	+++ (+)	+++	Peu acide	Sol relativement profond	Assez bonnes à bonnes	
	US 5	Limons peu épais sur argile	++++	+++ (+)	Assez acide à très acide	Parfois présence de chailles	Très bonnes à moyennes	
Situation de versant	ombragé	US 6	Eboulis grossiers	+ (+ +)	+ (+)	Calcaire à neutre	Enracinement difficile	Moyennes
		US 7	Coluvions carbonatés	++ (+)	+ (+)	Calcaire à neutre	Forte humidité atmosphérique	Très bonnes à bonnes
	enseleillé	US 8	Coluvions carbonatés	+	+	Calcaire	Forte sécheresse	Très faibles
		US 9	Coluvions diverses	+ (+ +)	+	Calcaire	Sécheresse marquée	Très faibles à faibles
	mésotherme	US 10	Coluvions diverses	++ (+)	+ (+)	Calcaire à peu acide	Carbonatation du sol	Moyennes à bonnes
Situation de bas de versant ou de fond de vallon	US 11	Colluvions argilo-caillouteuses	+ (+)	+	Calcaire	Sol peu profond et faible réserve en eau	Faibles à très faibles	
	US 12	Colluvions argilo-caillouteuses	++ (+)	++	Calcaire à peu acide	Carbonatation du sol variable	Assez bonnes	
	US 13	Colluvions argilo-caillouteuses	++++	++++	Calcaire à peu acide	Risque de gelées tardives ou précoces	Bonnes	
Situation de fond de vallée	US 14	Coluvions diverses	+++ (+)	+++ (+) (excédentaire)	Calcaire à neutre	Risque de gelées tardives ou précoces	Bonnes	
	US 15	Alluvions modernes sur grève	++ (+)	+++ excédentaire	Neutre (à calcaire)	Engorgement du sol parfois long	Moyennes	
	US 16	Alluvions modernes sur grève	++ (+)	+++ excédentaire	Neutre (à calcaire)	Engorgement du sol parfois long	Faibles	

+ = faibles

++ = moyennes

+++ = importante

++++ = très importantes

Les parenthèses indiquent des variations du paramètre étudié au sein de l'unité stationnelle. Par exemple, + (+) signifie que la profondeur du sol ou la réserve en eau peu être selon les cas faible à moyenne.

Table 3 : Tableau synthétique des caractéristiques des unités stationnelles telles que décrites dans le guide des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004)

US guide	Types de stations des catalogues			Codes CORINE Biotope	Codes directive « Habitats »
	J.C. RAMEAU	C. NICLOUX	M.C. DECONNINCK		
US 1	1110, 1120, 1130	110, 120, 130	1120, 1130-2	41.16	9150-1-2-4
US 2	1210, 1220, 1230	100, 130, 140, 150, 160, 170	1130-1, 1130-3, 1210, 1220	41.13 41.16	9130-5 9150-2
US 3	1240	140, 180	1230	41.13	9130-5
US 4	1310	190	1310	41.13	9130-5-6
US 5	1320, 1330, 1340, 1410, 1420	195	1320, 1330, 1410	41.13 41.11	9130-6 9110-1
US 6	2600	245	2600	41.41	9180-4
US 7	2400, 2500, 2700	225, 235	2500	41.13	9130-5-8
US 8	2100	/	2110	41.16 41.71	9150-1 /
US 9	2210, 2220, 2300, 2810 _a	210, 220, 230, 240, 250	2120, 2130	41.16	9150-1-2-4
US 10	2810 _b , 2820	260, 290	2220, 2230	41.13	9130-5
US 11	2230, 3110	240, 300	3100	41.24	9160-1
US 12	2900 _a , 3110, 3140, 3210	310, 320, 360, 370	3300	41.24	9160-1-2
US 13	2900 _b , 3120, 3130, 3220	330	3200	41.24	9160-1-2-3
US 14	5110	340	/	44.3	91E0-5
US 15	5120, 5130	350	/	44.33	91E0-8-10-11
US 16	5130, 5210	/	/	44.33 44.91	91E0-11 /

Les codes des habitats prioritaires de la directive « Habitats » figurent en rouge.

Certains types de stations peuvent correspondre à plusieurs unités stationnelles. Dans ce cas, leur numéro figure plusieurs fois dans le tableau.

Avertissement : ce tableau est destiné à présenter aux gestionnaires les relations entre unités stationnelles, types de stations et habitats. Comme ils ne sont pas découpés de manière strictement identique, des ajustements pourront être effectués

Table 4 : Tableau des correspondance entre les différents types de stations décrits dans guides et catalogues couvrant la zone des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Bourgogne et Lorraine et les unités stationnelles du guide des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (d'après Milard, 2004)

3 Résultats

3.1 Validité des données utilisées et comparaison des données Météo France et Lerfob

3.1.1 Validité des données utilisées

Parmi les données pouvant être utilisées pour le calcul de bilan hydrique édaphique, nous avons validé un certain nombre d'entre elles, 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 500 m (Richard, 2011) (Table 5) (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 ultérieurement).

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	0,29												

Table 5 : R^2 entre les données des modèles 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 les valeurs moyennes annuelles (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 500 m ($n = 542$ placettes du réseau Biosoil)

Les résultats montrent que les températures sont globalement très bien prédites ($R^2 = 0,93$ pour les moyennes annuelles). À l'échelle de la France, les précipitations et le rayonnement solaire le sont un peu moins mais restent bien prédits ($R^2 =$ entre 0,78 et 0,82 pour les moyennes annuelles). 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 est relativement faible ($R^2 = 0,29$). 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). 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 10). Les données locales utilisées pour la validation peuvent ainsi fournir des informations qui ne sont pas représentatives de la zone étudiée. Les valeurs de 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.

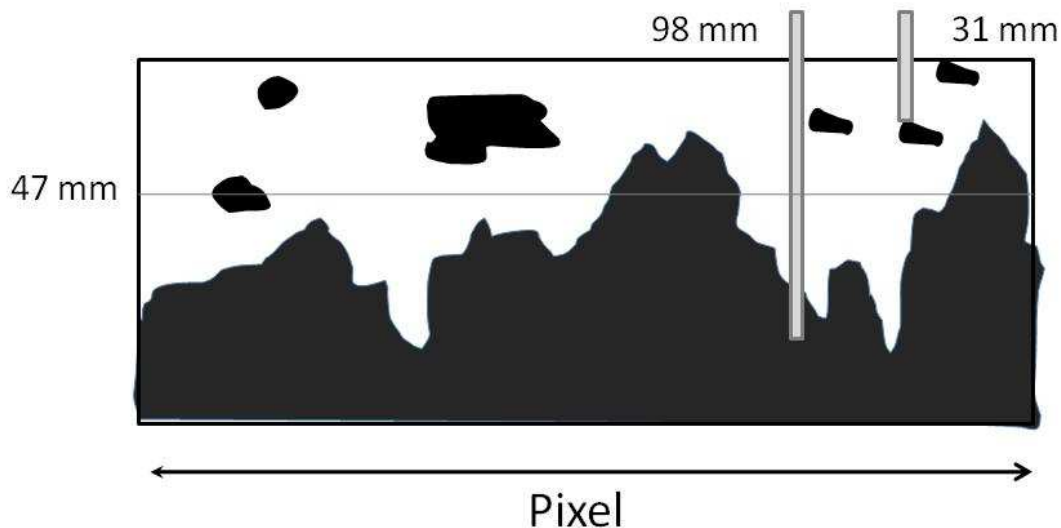


Figure 10 : schéma théorique illustrant les difficultés de validation des modèles numériques de RUM avec des données ponctuelles. Le trait rouge représente la valeur de RUM prédite dans le pixel. Du fait de l'importante variabilité spatiale des RUM, la mesure faite localement (barres verticales) peut ne pas être représentative des conditions moyennes.

Afin de vérifier cette hypothèse et d'estimer la variabilité locale des mesures, nous avons réalisé 5 évaluations de la RUM pour des placettes disposées en étoile et distantes de 20 m. les résultats répétés sur 10 dispositifs sont présentés en table 6.

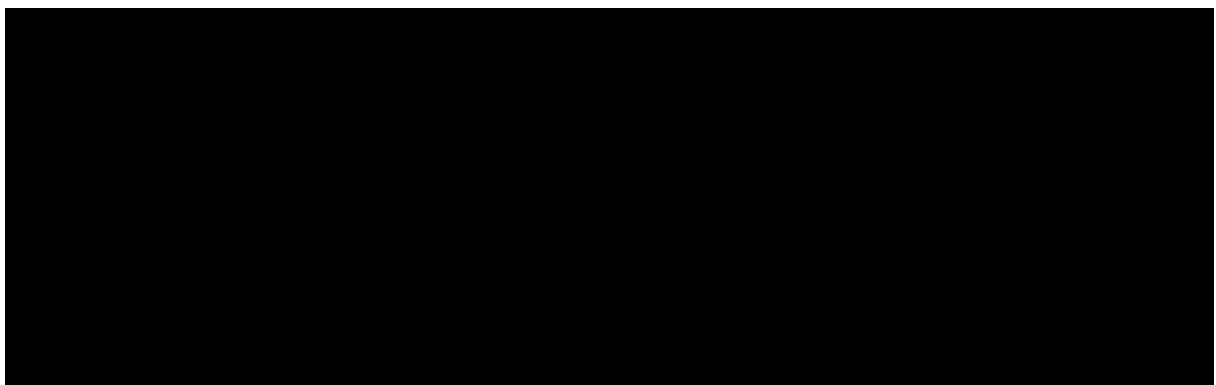


Table 6 : Variabilité des réserves utiles maximales de sols et des différents paramètres entrant dans son calcul à partir de 5 mesures proches permettant de caractériser 10 sites de 250 m² de surface (Richard, 2011).

Les résultats obtenus confirment une forte variabilité des mesures à l'échelle locale, des variations de RUM du simple au triple pouvant être enregistrées au sein d'un carré de 50 mètres de coté. L'amplitude moyenne entre les 5 mesures réalisées sur chacune des 10 placettes est de 29,1 mm pour une valeur de RUM moyenne de 45,8 mm, ce qui représente 64% de la valeur moyenne de la RUM. Ces résultats sont propres au contexte de plateaux calcaires (sols hétérogènes) et sont réalisés sur un faible nombre de répétitions (10) et mériteraient d'être complétés par d'autres relevés. Cependant, ils illustrent plusieurs points :

- La RUM est extrêmement variable à une échelle très locale sur plateaux calcaires
- Un sondage local (pioche+ tarière) réalisé dans ce contexte n'est pas représentatif des conditions de RUM moyennes de la zone
- La validation de la carte qui représente des conditions moyennes au sein d'un pixel avec des évaluations ponctuelles de ce type est biaisée. Il serait possible de réduire ce biais en multipliant les prélèvements selon le modèle utilisé ici afin d'estimer sur le terrain les conditions moyennes du pixel mais cette méthode est très coûteuse et difficile à mettre en œuvre.
- La validation de la carte des RUM à cette échelle n'a qu'une valeur relative et des moyens complémentaires devront être mis en œuvre pour évaluer sa pertinence (tests de capacité prédictive de la distribution des espèces par exemple).

3.1.2 Comparaison des modèles de pluie et de température du lerfob et de Météo France

Malheureusement, il n'a pas été possible de valider les données du modèle Aurelhy de Météo France, du fait de l'impossibilité d'avoir une liste de postes qui soit indépendante de ceux qui ont été utilisés pour élaborer le modèle. De ce fait, nous avons comparé les capacités prédictives des modèles LERFoB et AURELHY vis-à-vis de la distribution de 40 essences forestières parmi les plus courantes (à l'exception des essences les plus introduites, voire Annexe 2 pour la liste des espèces avec les abréviations).

Pour ce qui concerne les températures, la comparaison des AUC entre les modèles LERFoB et AURELHY montre une capacité prédictive très proche entre les deux modèles, le modèle LERFoB prédisant mieux la distribution de 21 essences forestières sur les 40 considérées (contre 18 pour le modèle AURELHY), avec une AUC en moyenne de 0.004 au dessus de celle des modèles réalisés avec les données d'AURELHY (Figure 11). Nous en concluons que ces deux modèles sont quasiment similaires à l'échelle de la France, le léger avantage accordé au modèle LERFoB devant être confirmé sur un nombre plus important d'espèces.

	MF meilleur ←					equiv	→ LERFoB meilleur				
écarts d'AUC	-0,15	-0,1	-0,05	-0,01	-0,005	-0,0025	0,0025	0,005	0,01	0,5	0,1
	-0,1	-0,05	-0,01	-0,005	-0,0025	0,0025	0,005	0,01	0,5	0,1	0,15
essences		abal	fasy	acpl	potr	lade	saal	acca	acmo	alin	soau
		qupy	piab	fror	tico	rops		casa	acop	quhu	
			pice	mege		ulgl		saca	acps		
			piha	quil				ulla	algl		
			pini	soar					bepu		
			prpa						cabe		
			qupe						frex		
			qusu						pisy		
			saci						piun		
									quro		
									soto		
total	0	2	9	5	2	3	1	4	11	2	1
total			18			3			19		

Figure 11 : Comparaison des AUC des modèles de températures moyennes annuelles élaborés par le LERFoB et Météo-France pour prédire la distribution de 40 essences forestières. Les espèces de la partie droite sont mieux prédites par le modèle du Lerfob et celles de la partie gauche le sont mieux par le modèle AURELHY. Les abréviations des noms d'espèces sont explicitées en annexe 2.

Pour ce qui concerne les données de précipitations, la comparaison des AUC montre une meilleure prédiction de distribution de 25 essences forestières sur les 40 considérées pour le modèle du LERFoB, contre 9 pour le modèle AURELHY (Figure 12). Le modèle AURELHY prédit mieux la distribution de seulement un quart des essences considérées. L'AUC des modèles réalisés avec les données du LERFoB sont en moyenne de 0.016 au dessus de ceux réalisés avec les données d'AURELHY. Pour ce qui concerne les précipitations, le modèle LERFoB est plus efficace que le modèle AURELHY pour prédire la distribution des espèces étudiées.

	MF meilleur ←					equiv	→ LERFoB meilleur				
écarts d'AUC	-15	-10	-5	-1	-0,5	-0,25	0,25	0,5	1	5	10
	-10	-5	-1	-0,5	-0,25	0,25	0,5	1	5	10	15
essences		quhu	mege	fror	qupe	fasy	lade	abal	acca		
		qupy	pice			quro	soto	acmo	algl		
			pini			saal		acop	piha		
			potr			saca		acpl			
			ulla			saci		acps			
						soar		alin			
								bepu			
								cabe			
								casa			
								frex			
								piab			
								pisy			
								piun			
								prpa			
								quil			
								qusu			
								rops			
								soau			
								tico			
								ulgl			
total	0	2	5	1	1	6	0	2	20	3	0
total			9			6			25		

Figure 12 : Comparaison des AUC des modèles de précipitations moyennes annuelles élaborés par le LERFoB et Météo-France pour prédire la distribution de 40 essences forestières. Les espèces de la partie droite sont mieux prédites par le modèle du Lerfob et celles de la partie gauche le sont mieux par le modèle AURELHY. Les abréviations des noms d'espèces sont explicitées en annexe 2.

Ce comparatif nous montre que le modèle du LERFOB n'est pas moins performant que le modèle AURELHY pour prédire la distribution des espèces étudiées, et qu'il pourrait même dans certains cas être plus efficace (pour les précipitations par exemple). Ces résultats ne valent que pour les espèces étudiées et il serait intéressant d'élargir la liste à des espèces herbacées. D'autre part, il s'agit d'une tendance moyenne à l'échelle nationale, qui peut cacher des disparités dans un sens ou dans l'autre à des échelles plus locales. A la vue de ces résultats, nous choisissons d'utiliser les données du modèle LERFOB pour la suite du travail, car il semble globalement montrer de meilleurs résultats, probablement du fait d'une meilleure prise en compte de la topographie locale, il est validé, et il permet la réalisation de cartes sur des pas de temps variables. En effet, le modèle AURELHY ne permet que d'obtenir des moyennes mensuelles que pour des périodes de 30 ans (1961-1990 ou 1971-2000). Le fait de pouvoir réaliser des calculs sur des pas de temps variables ouvre la porte à un suivi des effets du changement de climat sur la quantité d'eau disponible pour les plantes, qui pourrait être réalisé ultérieurement. Enfin, contrairement au modèle AURELHY, les modèles de températures du modèle Lerfob permettent de prendre en compte les effets de versants, dont l'importance sur les températures est reconnue (Rorison *et al.*, 1986).

3.2 Identification d'un indice caractérisant la contrainte hydrique

Les 2 méthodes de calcul du bilan en eau (Palmer et Thornthwaite) ont été mises en œuvre, donnant lieu pour chacune d'entre elles au calcul de 7 indices décrits précédemment. Pour cela, les températures et les précipitations calculées par le Lerfob, le rayonnement solaire du modèle hélios, et la RUM des sols au pas de 500 m ont été utilisés. L'objectif est de comparer la performance de chacun des indices produits afin de détecter s'il y a des différences d'efficacité pour prédire la distribution des espèces, et de sélectionner le meilleur pour réaliser la carte sur la zone d'étude. Les valeurs saisonnières et annuelles, et durant la période de végétation de chacun des indices ont été évaluées, une fois les effets thermiques pris en compte. Ceux-ci ont été intégrés à travers des variables simulant le froid, représenté par le minimum des températures minimales de janvier, et la chaleur, représenté par la somme des degrés-jour (somme annuelle des températures supérieurs à 5°C). Ces deux indices sont classiquement utilisés dans la littérature internationale, et leur prise en compte permet d'évaluer chacun des indices hydriques en complément des effets thermiques, qui sont reconnus comme importants pour expliquer la distribution des essences. Les modèles de type GLM ont été élaborés en utilisant les 32 544 relevés floristiques disponibles en présence/absence de l'Inventaire Forestier National. L'efficacité de chaque modèle a été évaluée grâce à son AUC. Les résultats présentant le gain moyen d'AUC engendré par chaque indice hydrique sont présentés dans la table 7, et le nombre de modèles pour lesquels chaque indice est le plus efficace en table 8.

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 7 : Gain moyen d'AUC engendré par chaque indice évalué caractérisant la contrainte hydrique, en complément de la somme des degrés jours au-delà de 5°C et de la température minimale moyenne du mois le plus froid (n = 37 essences).

	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			0.0		7.4	6.1		1.4			0.0		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 8 : Pourcentage d'essences pour lesquelles chaque indice est le plus performant pour prédire sa distribution (en % du nombre total d'essences considéré) pour chaque saison, sur une saison de végétation et sur l'année entière (en haut), et parmi les variables estivales seulement (en bas).

Les résultats montrent que les indices estivaux sont les plus performants, et que certains indices (RU, DE, IA) sont plus efficaces que d'autres. L'indice le plus explicatif de la distribution des essences prises en compte apparaît être le déficit d'évaporation calculé selon la méthode de Thornthwaite, il sera utilisé pour la suite de l'étude. Cet indice est reconnu par la littérature car il permet de caractériser le niveau de stress hydrique auquel est soumis la plante, et sa sélection est cohérente avec la bibliographie internationale sur ce sujet (Stephenson, 1990; Stephenson, 1998). Cette analyse met aussi en évidence que certains indices peuvent être complémentaires et pourraient être utilisés conjointement (DE et ETR par exemple). Cependant, des écarts faibles ont été notés entre certains indices (RU, DE, ETR), et les méthodes de Palmer et de Thornthwaite semblent d'une efficacité proche. Ce travail de comparaison mériterait d'être complété en incluant un grand nombre d'espèces herbacées et des zones géographiques différentes.

3.3 Comparaison des cartes de bilan en eau aux données traditionnellement utilisées

Les différents travaux de validation réalisés à partir des données IFN ou des relevés de terrain effectués dans le cadre de cette étude ne permettent de valider que les variations de RUM du fait de que les données climatiques soient obtenues à travers les données SIG, et le réseau RENECOFOR ne permet une validation complète que sur quelques placettes. Aussi, nous avons employé une autre approche afin de vérifier si le calcul d'indices à partir du bilan hydrique des sols permettait de mieux prédire la distribution des principales essences françaises comparativement à des indices purement climatiques. Ces indices climatiques sont fondés sur la pluie ou la différence entre les pluies et les ETP, et sont le plus souvent utilisés dans la communauté internationale pour décrire les variations spatiales de la ressource en eau

sur de vastes emprises, les données de RUM des sols étant le plus souvent inaccessibles. A l'échelle nationale, nous avons comparé l'apport de différents indices hydriques une fois ajoutés à la température minimale du mois de janvier et à la somme des degrés jours au-dessus de 5°C, pour modéliser la distribution de 37 essences les plus communes. 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 13). Quand les indices thermiques sont pris en compte, l'ajout des pluies ou des bilans 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 (Piedallu *et al.*, submitted). 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.

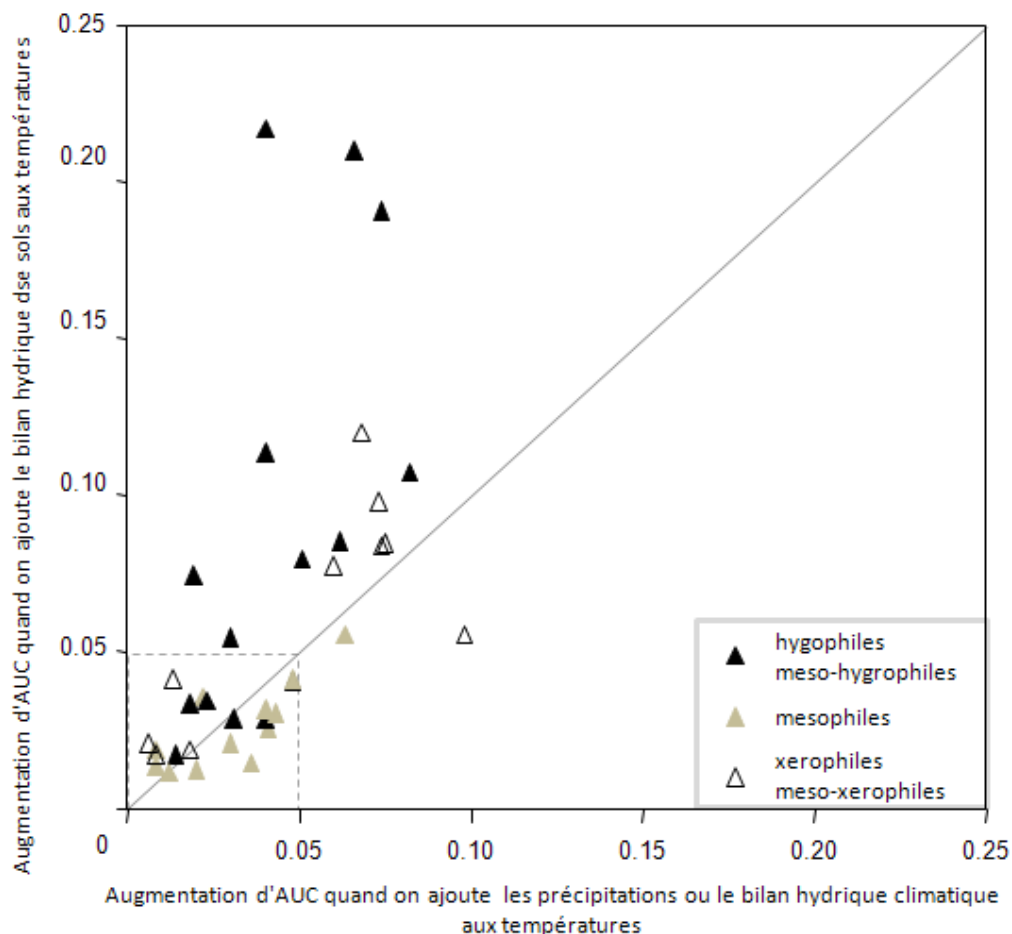


Figure 13: Augmentation d'AUC pour les modèles de distribution des espèces basés sur des variables thermiques (température minimale d'hivers et somme des températures au-dessus de 5°C), en incluant l'indice le plus efficace parmi les indices climatiques (précipitations, bilans ou déficits hydriques climatiques), 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.

D'autres travaux ont commencé dans l'objectif d'étudier les relations entre les indices de bilan en eau que nous avons produits et des indices traduisant le stress hydrique des végétaux mesurés à partir de données satellitales (Cheret and Denux, 2011; Drolon, 2011). Les premiers résultats semblent également montrer que les indices de stress obtenus par télédétection sont plus liés aux variables du bilan hydrique édaphique qu'à celles du bilan hydrique climatique. Si ces travaux étaient confirmés, ils renforceraient les résultats que nous avons obtenus avec les modèles de distribution des espèces, en démontrant la pertinence des calculs de bilans hydriques édaphiques par rapport aux indices climatiques.

3.4 Création et validation des cartes de bilan en eau

3.4.1 Cartographie des déficits d'évaporation

Nous avons cartographié au pas de 50 mètres les déficits d'évaporation estimés selon la méthode de Thornthwaite pour l'ensemble des plateaux calcaires à l'aide de la carte des RUM au pas de 500 mètres (nous l'appellerons DE, Figure 14), puis pour une partie de la zone d'étude à l'aide de la carte des RUM au pas de 50 mètres (DE') (Villiers, 2011). La Figure 15 présente la comparaison entre ces deux cartes.

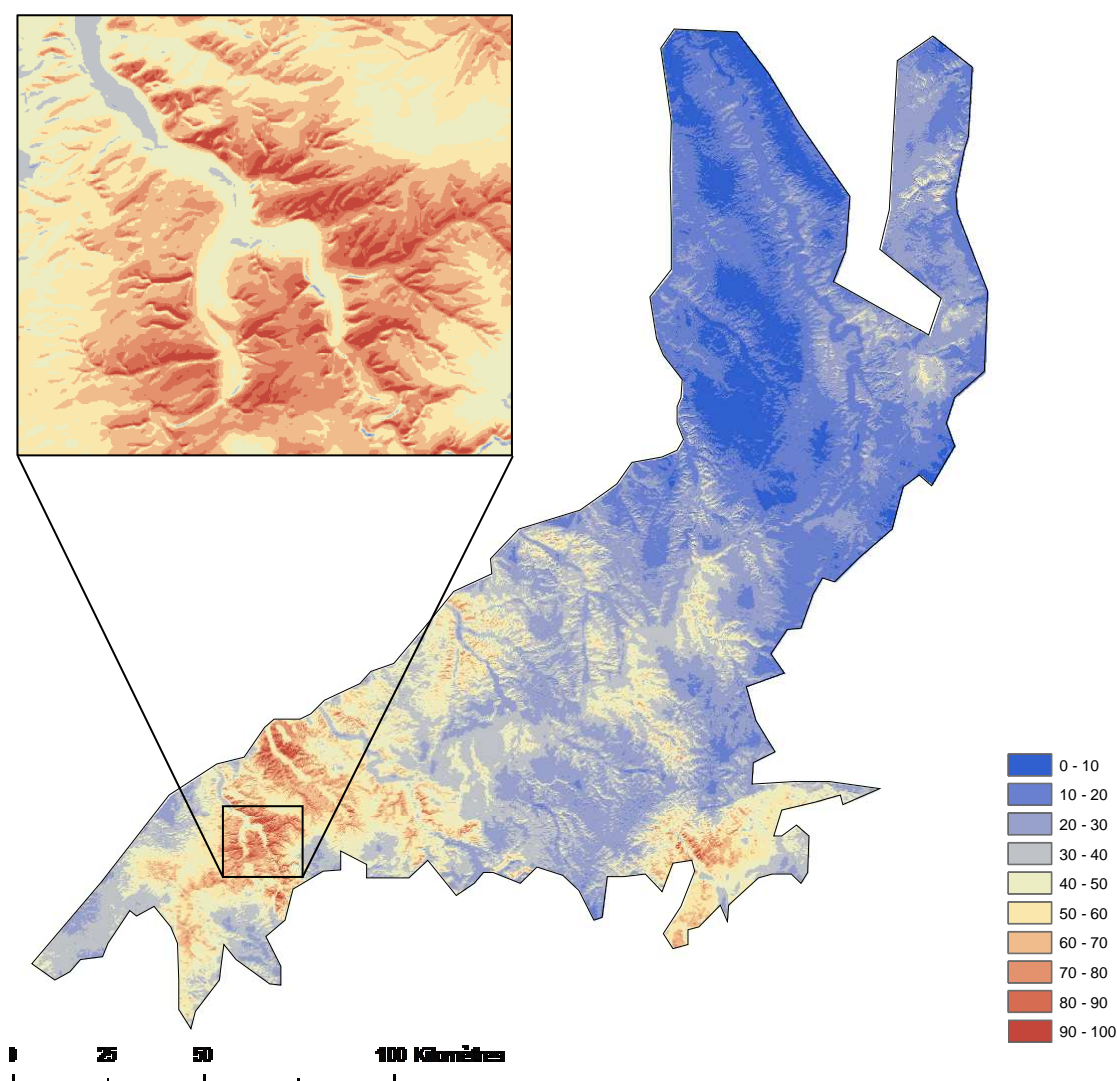


Figure 14 : Cartographie au pas de 50m du déficit d'évaporation estival (en mm) calculé selon Thornthwaite à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne.

La carte numérique obtenue met une évidence une hétérogénéité assez forte au sein de la zone d'étude vis-à-vis des contraintes hydriques estivales, selon un gradient nord sud (avec des valeurs variant de 0 à 123 mm, pour une moyenne sur la zone de 30mm et un écart-type de 16 mm) (figure 14). Elle permet de plus de bien distinguer les différences entre les différentes situations topographiques, les situations de versant frais, exposés au nord, présentant des déficits plus faibles, des versants ensoleillés étant plus secs. La carte du DE' présente la même structure spatiale, mais l'hétérogénéité locale des prédictions est augmentée du fait de la prise en compte assez fine des variations de substrats (Figure 15).

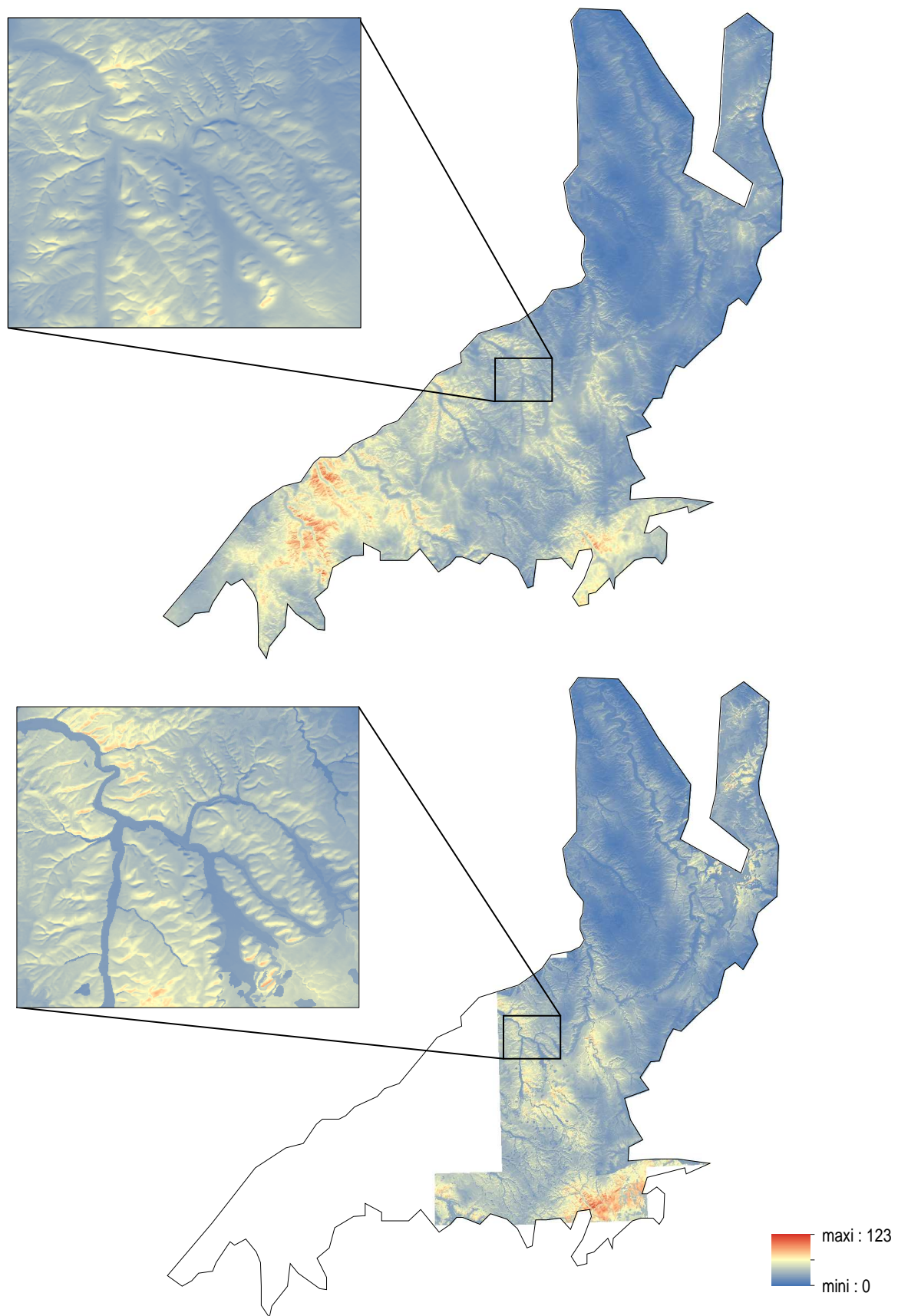


Figure 15 : Comparaison des cartes de déficits d'évaporations utilisant la carte des RUM au pas de 500 m (DE, en haut) et de 50 m (DE' en bas)

3.4.2 Validation nationale des déficits d'évaporation

La validation des valeurs de DE calculées a été réalisée à l'échelle de la France. Cette validation se heurte au manque de données disponibles concernant la teneur en eau des sols sur des pas de temps longs. Nous avons utilisé les deux jeux de données disponibles pour cet usage, les données des placettes RENEFOFOR, et les données des placettes IFN nouvelle méthode. Le réseau RENEFOFOR a le gros avantage de présenter un certain nombre de placettes avec des descriptions de sol et des mesures météorologiques qui permettent de calculer de façon totalement indépendante le bilan en eau. L'inconvénient réside principalement dans le faible nombre de placettes disponibles (25). Cette validation se fonde en outre sur 2 jeux de données de déficits d'évaporation calculés avec la même méthode (Thornthwaite) et ne permet pas d'estimer les incertitudes dues à l'application de cette formule. Le jeu de données de l'IFN ne pose pas le problème des effectifs car un grand nombre de placettes sont disponibles ($n = 32544$), mais par contre seule l'estimation de RUM est indépendante, les données climatiques nécessaires au calcul du déficit d'évaporation étant issues des couches SIG en l'absence d'autres possibilités.

3.4.2.1 Validation avec le jeu de données RENEFOFOR

Nous avons comparé les déficits d'évaporation mensuels cartographiés sur les mois de juin, juillet et août avec ceux estimés à partir des 25 placettes RENEFOFOR à l'échelle de la France. On obtient ainsi 75 couples de déficit d'évaporation SIG - RENEFOFOR. Pour ces données on obtient un R^2 de 0,79 et une erreur quadratique moyenne de 7,5 mm (Figure 16).

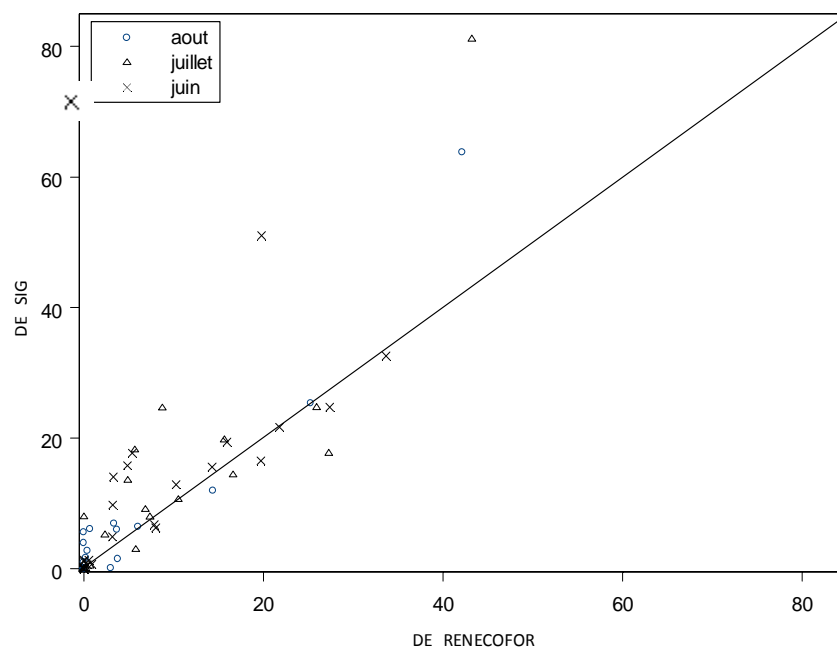


Figure 16 : Comparaison des déficits d'évaporation calculées à partir des données de 25 placettes RENEFOFOR pour les mois de juin, juillet et août et extraites du SIG sur ces mêmes placettes ($N = 25 * 3$ mois).

Ce graphique illustre la difficulté de valider les DE calculés avec un nombre si faible de points, sachant qu'un nombre important de placettes présentent des valeurs faibles de DE. Cependant, il semble que les valeurs cartographiées à l'échelle de la France soient cohérentes par rapport à celles mesurées sur les placettes RENECOFOR.

3.4.2.2 Validation avec le jeu de données IFN

Afin de palier le faible nombre de placettes utilisées lors de l'analyse précédente, une validation a été réalisée à l'échelle nationale avec les données de RUM indépendantes des relevés IFN nouvelle méthode (Figure 17). On obtient ainsi un R^2 entre les DE calculés sur les placettes IFN et la carte de 0,88 à l'échelle de la France, avec une erreur moyenne de prédiction de 16,44 mm. Ces résultats montrent une bonne cohérence globale des données issues du SIG et mesurées sur le terrain, malgré des différences parfois importantes qui peuvent être attribuées à la forte hétérogénéité locale des RUM dont nous avons discuté auparavant.

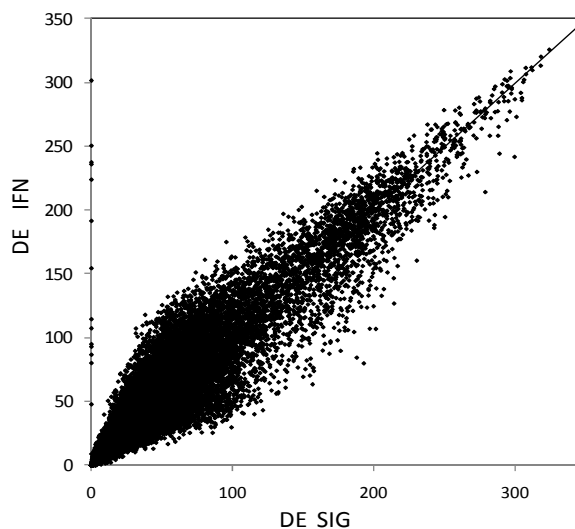


Figure 17 : Comparaison des déficits d'évaporation estivaux (somme des déficits de juin, juillet et août) calculés à partir de données relevées sur les placettes IFN (DE IFN) et extraites du SIG ($n = 32544$ placettes)

3.4.3 Validation des déficits d'évaporation au sein de la zone d'étude

Après une comparaison nationale, nous nous sommes focalisés sur la zone d'étude afin d'évaluer les performances de la carte au regard de mesures de terrain. Cependant, comme précédemment, seules les données de RUM sont indépendantes, du fait de l'impossibilité de mesurer le climat sur les placettes de validation utilisées. Afin de pouvoir prendre en compte des effets d'échelle et de méthode de fabrication de la carte, nous avons comparé la performance de la carte des DE et des DE' pour différentes emprises, allant du nord est de la France (voire rapport T. Villiers, 2011), à la zone des plateaux calcaires commune entre les

deux cartes, et les trois maillages très locaux réalisés en forêts de Bois l'évêque et Villiers le sec décrits dans la méthodologie (Figure 18).

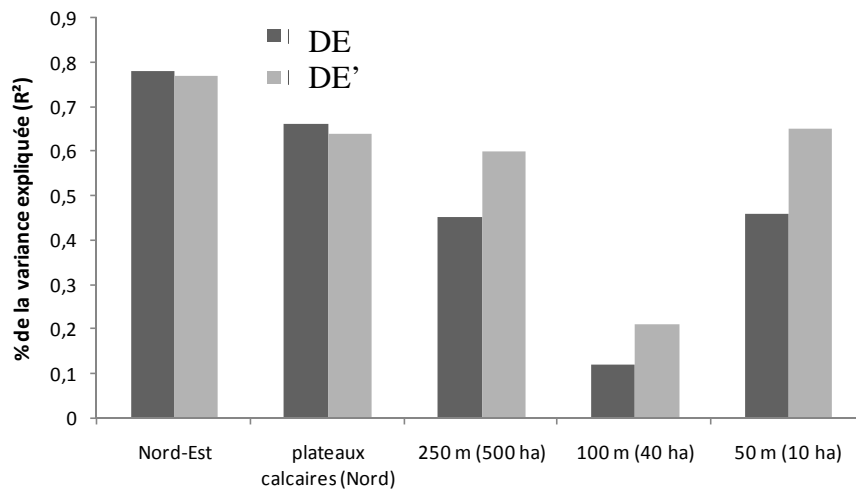


Figure 18 : Part de la variance des déficits d'évaporation estimés sur le terrain expliquée par les cartes numériques de DE et DE' sur des emprises de taille décroissante (quart nord est de la France, partie centre et nord des plateaux calcaires, maillages de 250 – 100 et 50 m sur la forêt de Bois l'évêque/Villiers le sec).

Les résultats montrent que la carte des DE réalisée à l'échelle de la partie étudiée des plateaux calcaires est bien corrélée aux mesures réalisées sur un jeu indépendant de placettes IFN, mais que cette corrélation diminue à des échelles locales. Ainsi, à l'échelle de la partie des plateaux calcaires étudiés, le R^2 est de 0.77 pour une RMSE de 4.24. L'augmentation du R^2 constatée avec le maillage au pas de 50 mètres provient du fait que ce maillage est localisé sur une zone de fortes pentes et donc très contrastée, alors que le maillage au pas de 100 m est principalement localisé sur un plateau plus homogène (Figure 9). La carte des DE' réalisée avec la carte des RUM au pas de 50 mètres (Villiers, 2011) a une performance similaire à la carte des DE à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude mais est plus performante à des échelles plus locales. Cette différence est logique, elle illustre la meilleure prise en compte des variations locales induites par les changements de géologie (Figure 19). Elle met également en évidence qu'un potentiel d'amélioration non négligeable est disponible à travers la généralisation de la carte des RUM au pas de 50 mètres à l'ensemble de la zone étudiée.

D'autre part, ces résultats montrent qu'il est possible de réaliser des cartes de déficit d'évaporation qui aient du sens à l'échelle de la forêt (maillage de 250 mètres) ou à l'échelle de la parcelle (maillages de 100 et 50 mètres). Ce résultat est important car il démontre un potentiel d'utilisation aux échelles requises par les gestionnaires. Cependant, nous voyons également que les performances sont dépendantes du site étudié et la réplication d'un tel protocole sur d'autres forêts permettrait d'étoffer ces résultats.

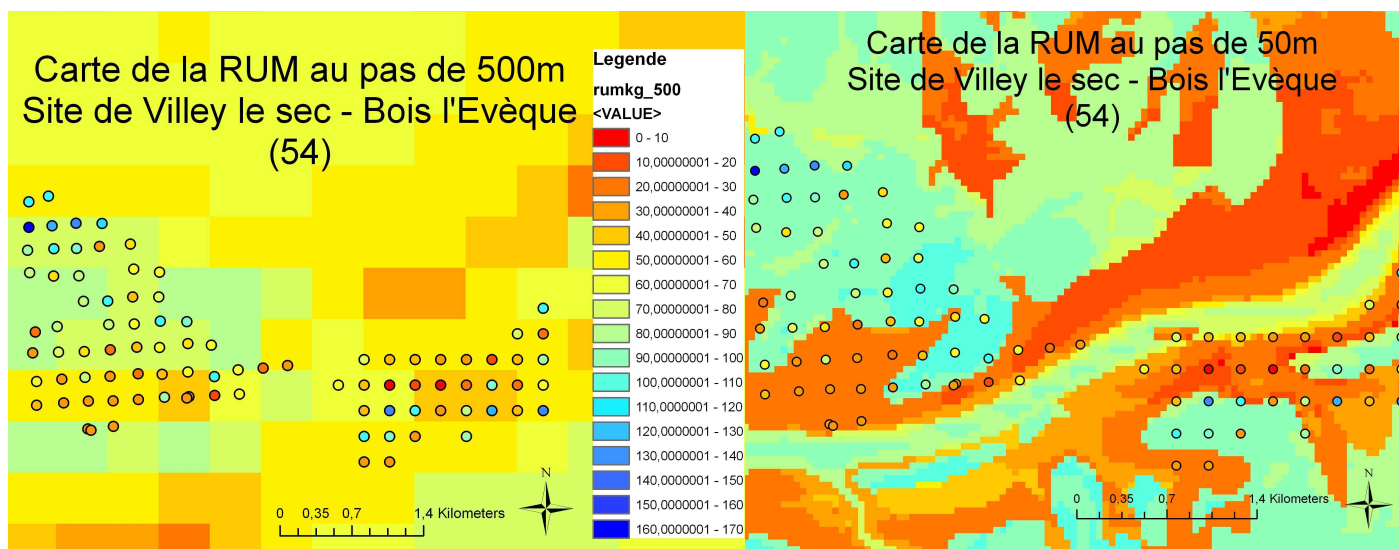


Figure 19 : Comparaison des RUM prédites en utilisant la carte au pas de 500 m (à gauche) et au pas de 50 mètres (à droite). Les points représentent les estimations de RUM réalisées sur le terrain (Villiers, 2011). Les codes de couleurs entre les mesures et le modèle spatialisé sont les mêmes.

3.5 Utilisation dans le cadre des catalogues de stations forestières

Une fois la carte des déficits d'évaporation calculée et évaluée selon les différentes méthodes disponibles et à différentes échelles, nous avons cherché à évaluer son utilisation potentielle dans le cadre de la réalisation ou la refonte de catalogues ou guides de stations forestières. Nous avons travaillé à la fois sur les stations harmonisées à l'échelle de la zone d'étude (Cf. méthodologie), puis nous nous sommes focalisés sur le guide des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004). L'objectif était de comparer la prise en compte du gradient hydrique par les typologies des stations et par la carte numérique, et de déterminer les utilisations pratiques de la carte.

3.5.1 Comparaison des méthodes d'estimation de la contrainte hydrique à l'aide des cartes de stations et de la carte des déficits d'évaporation

Les guides et catalogues de stations de la zone d'étude donnent une description qualitative de l'eau disponible pour les plantes, en qualifiant la ressource en eau de faible à très importante, à partir de paramètres essentiellement topographiques et pédologiques (Annexe 3) :

- la position topographique, qui indique si la zone est une zone de départ, d'arrivée latérale d'eau ou une zone avec de faibles déplacements latéraux d'eau (plateau, plaine).

- l'exposition qui représente indirectement l'évapotranspiration (moyenne sur plateaux, faible sur les versants nord et les fonds de vallons confinés, forte sur les versants ensoleillés) ;
- quelques données de sol (texture, pierrosité, présence d'argile) ;
- des indications fournies par la flore indicatrice (Milard, 2004).

Nous avons utilisé la base de codages stationnels disponibles et géoréférencés, qui a été harmonisée selon la procédure décrite dans la méthodologie, puis croisée avec la carte des déficits d'évaporation afin de caractériser la gamme des déficits d'évaporation pour lesquels une unité stationnelle est présente (Figure 20). On observe une hétérogénéité relativement importante des unités stationnelles (US) au sein des 5 groupes définis dans le guide, ainsi qu'une amplitude assez forte de DE au sein d'une US. D'une manière générale, il y a peu de cohérence entre les deux approches. On remarque par exemple que certaines stations considérées dans le guide comme ayant une réserve hydrique faible à moyenne sont considérées comme peu contraignantes en termes de sécheresse à partir de la carte des déficits d'évaporation (US 6 par exemple). A l'inverse, une station considérée comme sèche dans le guide peut présenter des valeurs de déficits d'évaporation faibles (US 1 par exemple).

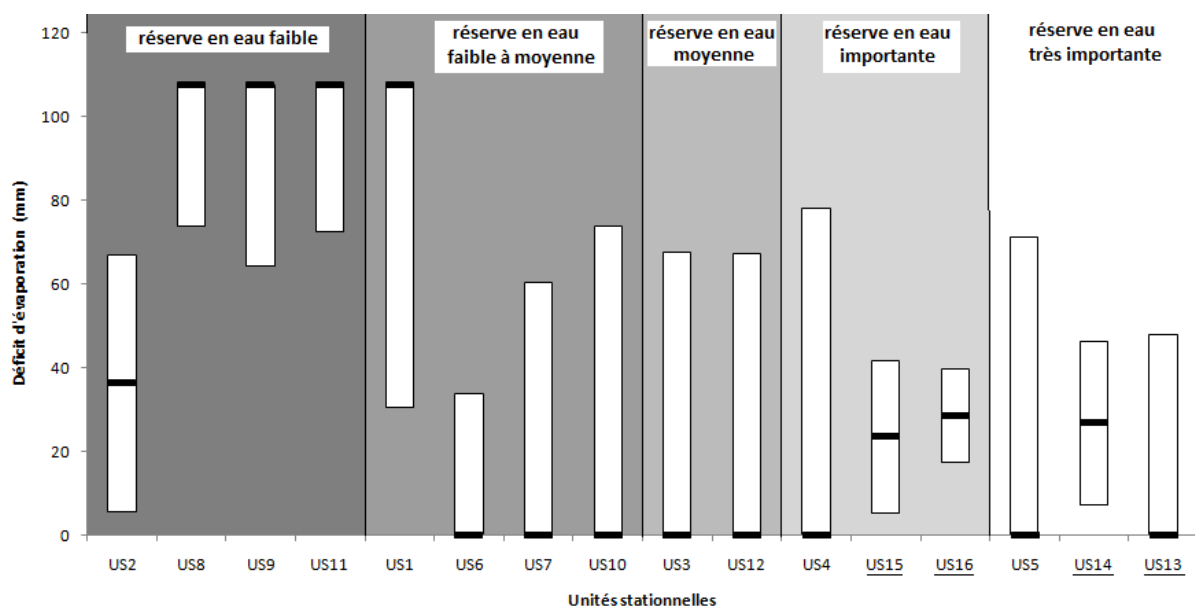


Figure 20 : Comparaison des caractéristiques hydriques des unités stationnelles harmonisées sur l'ensemble de la zone selon les indications données dans les catalogues des stations et la carte des déficits d'évaporation. Les barres blanches représentant la gamme de valeurs pour lesquelles 80% de l'US est présente, la barre noire représentant l'optimum. Les unités stationnelles dont le nom est souligné peuvent présenter un engorgement temporaire hivernal (US 13 à 15) ou permanent (US16). Voir tables 2 et 3 pour la description des US.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les différences entre les deux approches. Le codage stationnel est réalisé localement principalement à l'aide de données topographiques, de sol ou floristiques, tandis que la carte des DE intègre une part importante du climat qui est considérée comme pas trop hétérogène au sein des catalogues. De plus, la carte des DE prend en compte une variabilité des profondeurs de sol et donc des RUM, qui sont considérées comme assez peu variables au sein d'une US. La carte des DE induit donc une variabilité spatiale différente des codages stationnels, qui est probablement plus importante à l'échelle de vastes zones. Cela est d'autant plus vrai que la zone d'étude considérée est grande et concerne les typologies harmonisées. La table 9 résume les principaux avantages et inconvénients des deux méthodes.

	Avantages	Inconvénients
Guide des stations	<p>Prise en compte des conditions locales estimées sur le terrain</p> <p>Prise en compte indirecte des apports latéraux en eau</p>	<p>Difficulté d'estimation de la RUM sur le terrain</p> <p>Pas de variabilité climatique (pluie, températures, ETP)</p> <p>Pas de prise en compte de la variabilité spatiale des profondeurs du sol et de la RUM (une même valeur est affectée à toute l'US)</p> <p>Estimation de l'eau disponible avec des facteurs indirects assez sommaires</p> <p>Approche non quantitative (pas de simulations de variations du stock d'eau possible)</p> <p>Risque d'erreurs de codages ou de cartographie du fait d'opérateurs multiples</p>
Carte des DE	<p>Prise en compte de la variabilité spatiale du climat (pluie, température, rayonnement solaire), et de la RUM.</p> <p>Estimation mécaniste de la quantité d'eau du sol</p> <p>Prise en compte d'une variabilité au sein des US</p> <p>Approche quantitative permettant de simuler l'évolution du stock d'eau du sol dans un contexte de changement de climat).</p> <p>Méthodologie uniforme et facile à généraliser</p>	<p>Donnée modélisée et non pas mesurée (ajout d'une erreur liée à la spatialisation à l'erreur de mesure)</p> <p>Dans sa version actuelle ne prend pas en compte les apports latéraux en eau et les apports des nappes</p> <p>Ne permet pas de modéliser les zones humides et les éboulis</p>

Table 9 : Avantages et inconvénients des méthodes d'estimation de l'eau du sol utilisant les codages stationnels et la cartographie des déficits d'évaporation.

3.5.2 Comparaison des cartes de stations et de la carte des déficits d'évaporation pour déterminer les potentialités des essences au regard de la contrainte hydrique

Nous avons comparé les informations fournies par le guide des stations et par la carte des DE concernant les préconisations en terme d'essences selon le gradient de ressource en eau, en se focalisant sur 4 essences ayant des exigences variées : le hêtre, le chêne sessile, le frêne, et le pin sylvestre (Figure 21). La gamme des valeurs de DE favorables à la distribution, et à la productivité (pour le hêtre et le chêne sessile) ont été comparés au positionnement de chacune des stations vis-à-vis du gradient de DE. La comparaison des aires de distribution des espèces à l'échelle de la France et des plateaux calcaires montre une bonne concordance, sauf pour le chêne sessile qui apparaît plus xérophile sur plateaux calcaires que sur le reste du territoire. Cela peut être dû à des choix ou à une histoire sylvicole, ou à des problèmes de concurrence avec le hêtre qui a une forte régénération sur ces zones de forte humidité atmosphérique. Pour le hêtre et le chêne sessile, le comportement hydrique est semblable selon qu'on regarde sa distribution ou sa productivité à l'échelle de la France.

La comparaison entre les gammes de DE favorables à la distribution et à la croissance et les préconisations des US montre un certain nombre d'enseignements :

- L'essence peut être conseillée alors que la gamme de DE n'est pas adaptée : c'est le cas pour le hêtre (US9, US1), ou pour le chêne sessile (US11) par exemple. Il semblerait que pour ces cas le stress hydrique soit défavorable aux essences proposées, et un réexamen des essences conseillées devrait être réalisé, particulièrement dans un contexte de baisse prévue de la ressource en eau.
- Une station peut être présente sur une part du gradient favorable et défavorable à l'essence : c'est le cas par exemple de l'US 1 pour les 4 essences étudiées, ainsi que de certaines US pour le frêne. Pour ces US, un redécoupage pourrait être envisagé en fonction des valeurs seuil de contrainte hydrique.
- Le gradient hydrique de la station correspond à celui de la distribution et de la croissance de l'espèce, mais celle-ci n'y est pas forcément recommandée. Cela peut être du fait d'autres facteurs qui peuvent être discriminants pour l'espèce étudiée et chaque cas doit alors être étudié avec attention. C'est le cas par exemple des US 12 à 16 qui sont déconseillées pour le hêtre à cause de l'hydromorphie.

D'une manière générale, on peut s'interroger sur le manque de concordance entre l'évaluation de la ressource en eau faite par les guides ou catalogues et l'information fournie par la carte des DE. Le frêne est par exemple déconseillé dans les US 2, 6, 7 et 10 dont la réserve en eau est jugée faible à moyenne. Or, la carte des DE n'indique pas de déficit incompatible avec la présence du frêne sur ces stations. Dans ces cas, un réexamen des potentialités au regard de l'information fournie par la carte des DE permettrait peut être d'élargir la liste des essences potentielles. Ces travaux ont été réalisés à l'échelle des plateaux calcaires avec des codes de stations harmonisés sur l'ensemble de la zone, ce qui peut conduire à augmenter l'amplitude du gradient de DE pour lesquelles les stations sont présentes. Cependant, la réalisation d'une comparaison semblable à l'échelle du catalogue de L. Millard a permis de mettre en évidence la même typologie de cas que celle décrite ci-dessus, à une échelle plus locale.

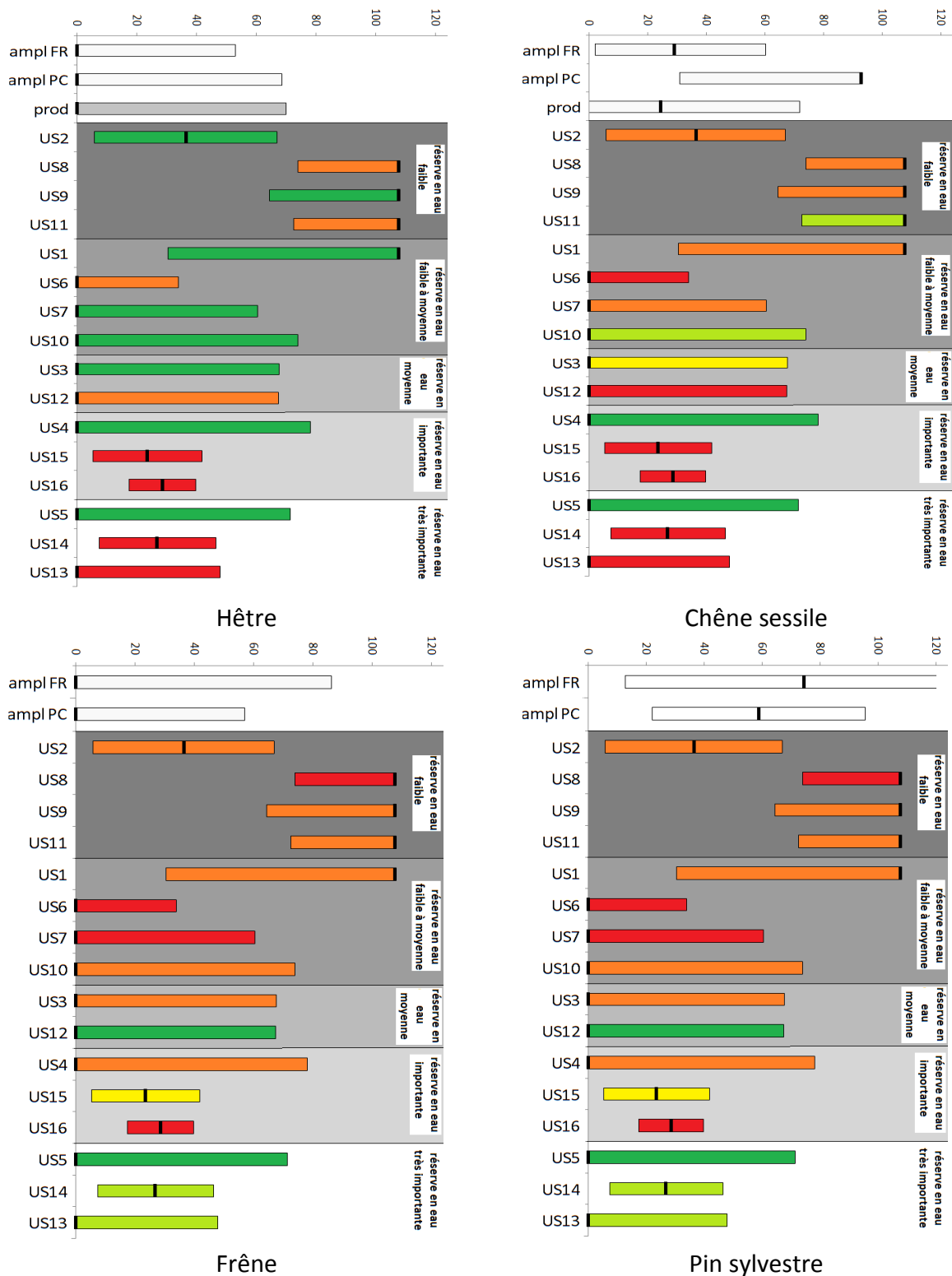


Figure 21 : Préconisations vis-à-vis du hêtre, du chêne sessile, du frêne, et du pin sylvestre au sein des unités stationnelles harmonisées, en fonction du DE. Les barres de couleur représentent la gamme de DE pour laquelle 80% des stations se situent. Les couleurs représentent les préconisations vis-à-vis de chacune des essences selon le guide des plateaux calcaires (Millard, 2004) : vert foncé : conseillée; vert clair : conseillée à des fins productives ; jaune : peut être maintenue à but cultural et biologique; orange : peut être maintenue à but cultural et biologique, mais son introduction est déconseillée ; rouge : déconseillée. On été ajoutées les amplitudes de distribution de ces espèces vis-à-vis du DE (barres blanches) pour la France (ampliFR) et pour les plateaux calcaires (ampliPC). Pour le hêtre et le chêne pédonculé une troisième barre blanche (prod) indique les valeurs de DE pour lesquels 80% des productivités les plus élevées sont rencontrées (Seynave et al., 2006; Seynave et al., 2008). Les barres noires représentent les optimums.

3.5.3 Prise en compte des effets du changement climatique dans les guides ou catalogues de station

Le changement de climat agit en augmentant les températures et en diminuant la ressource en eau (du fait de l'augmentation de l'ETP qui pourrait éventuellement s'ajouter à des diminutions de pluies estivales). Le calcul de la carte des DE permet une approche dynamique qui n'est pas possible à travers l'approche stationnelle traditionnelle. En effet, le DE est calculé à partir de données de températures, de précipitations, de rayonnement solaire et de RUM. Or, les données climatiques de l'IPCC (IPCC, 2007) permettent de simuler selon différents modèles et scénarios l'évolution des températures, de la pluviométrie, et du rayonnement solaire. Il est donc possible de représenter dans l'espace et dans l'évolution du stock d'eau disponible pour les plantes et d'évaluer la vulnérabilité des différentes essences en fonction de ces changements. Ces calculs ne faisaient pas l'objet de cette convention et devront faire l'objet de nouvelles recherches. Cependant, de façon théorique, différents cas peuvent être évoqués (figure 22) :

- L'essence est déjà dans des conditions limites dans la station et elle ne sera plus adaptée (cas 1)
- Les conditions sont actuellement trop humides pour l'essence au sein de l'US considérée et celle-ci va être favorisée par le changement de climat (cas 2)
- Le changement de climat n'impacte pas l'essence de fait de sa forte amplitude (cas 3)

D'autre part, il est tout à fait probable que le changement de climat affecte les stations de façon différentielle, et que par exemple une station ne soit plus favorable à une essence dans sa marge sud alors qu'elle l'est encore dans sa marge nord.

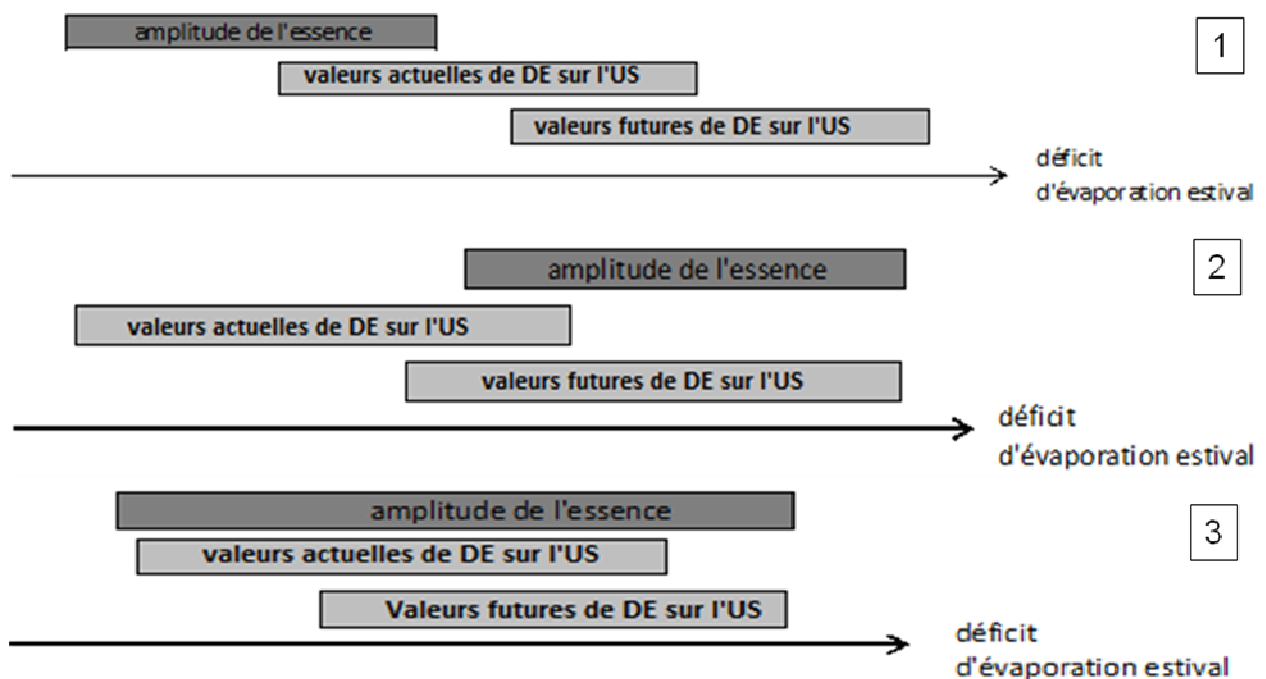


Figure 22 : différents scénarios d'évolution de la gamme des déficits d'évaporation (DE) des unités stationnelles (US) en fonction des valeurs d'amplitude favorable à l'essence.

4 Conclusion générale

Nous avons montré qu'il était possible de calculer une carte des déficits d'évaporation qui permettait de refléter assez finement les variations spatiales de la contrainte hydrique et qui avait du sens à différentes échelles. Nous avons également mis en évidence les difficultés d'élaboration et de validation d'une telle donnée. Un point crucial réside dans l'estimation de la RUM des sols. Nous avons montré qu'il était très difficile de l'estimer sur le terrain, du fait des erreurs inhérentes à tout relevé (surtout lorsque les opérateurs sont différents), et surtout de la forte hétérogénéité spatiale rencontrée sur plateaux calcaires. Ainsi, nous avons relevé une amplitude d'estimation sur 5 placettes positionnées au sein d'un carré de 50 mètres de côté de 29 mm avec un écart type moyen pour caractériser un même site d'environ 10 mm. Ces résultats montrent qu'une seule estimation de terrain peut être inadaptée pour refléter les conditions locales en contexte de plateaux calcaires. La carte des RUM utilisée pour le calcul de DE se fonde sur des relevés IFN qui sont probablement empreints de la même incertitude. L'étape d'interpolation ajoute une nouvelle incertitude en permettant la prédiction de la RUM à un endroit où elle n'a pas été mesurée. Par contre, elle lisse les erreurs de mesures ou les informations des placettes qui ne sont pas représentatives de la zone étudiée. Il est donc très difficile de savoir quelle est la part de l'imprécision qui vient de l'estimation sur la placette et celle qui vient de la méthode de spatialisation. L'erreur d'estimation sur la placette peut être comparée avec des erreurs de prédiction de la carte des RUM obtenues à différentes échelles, qui sont de l'ordre de 25-30 mm. Cependant, les jeux de validation utilisés sont également empreints des mêmes imprécisions que ceux qui ont été évoqués auparavant, et l'estimation de ces incertitudes cumule l'erreur liée à la carte et celle liée au jeu de validation, sans qu'il soit possible là encore de faire la part des choses. Une solution afin de valider correctement la carte consisterait à répliquer 5 fois par exemple chaque fosse utilisée pour la validation, mais cette méthode demanderait un travail très important.

Malgré les nombreuses imperfections liées à l'estimation des RUM et à leur cartographie, nous avons montré que sa prise en compte apportait logiquement une sérieuse plus value dans l'estimation de l'eau disponible pour les plantes, et permettait d'améliorer parfois de façon très conséquentes la détermination de l'aire de distribution de certaines essences sensibles à l'eau. Nous avons également mis en évidence que la réalisation de cartes des RUM au pas de 50 mètres en utilisant des covariables géologiques fines offrait un potentiel d'amélioration des cartes existantes, principalement aux échelles locales. Les cartes de déficit d'évaporation obtenues ont ainsi non seulement du sens à l'échelle d'une région naturelle, mais nous avons montré qu'elles pouvaient en avoir à l'échelle locale de la forêt voire de la parcelle. Leur performance sera cependant dépendante de la qualité de la carte géologique, des erreurs, oublis ou imprécisions d'unités géologiques pouvant se traduire par des erreurs locales potentiellement fortes. Par exemple, certaines cartes géologiques ne font pas figurer les limons de plateau qui conditionnent l'obtention de RUM beaucoup plus favorables que sur les calcaires avoisinant. **La carte obtenue permet donc une estimation de la variabilité locale qui se doit d'être vérifiée en fonction des connaissances des opérateurs de terrain et de sondages appropriés.** Elle pourra également être confrontée aux relevés stationnels là où ils existent, ceux-ci pouvant être utilisés pour corriger d'éventuelles imperfections existantes.

La création de cartes numériques de bilan en eau à fine résolution spatiale permet de caractériser la contrainte hydrique sur de vastes emprises, avec un relativement faible coût

d'investissement au regard de celui des collectes des données stationnelles sur le terrain. Leur utilisation pour améliorer les outils existants pourrait se faire à trois niveaux (Table 10) :

- 1) **Utilisation des cartes numériques de bilans en eau en parallèle des catalogues de stations** : une carte des bilans en eau pourrait être fournie en complément des catalogues de stations existants, afin de préciser les potentialités des essences et d'évaluer leur sensibilité au changement de climat. Sa cartographie permettrait de moduler les préconisations au sein d'une même unité stationnelle, et éventuellement de participer au redécoupage des unités si celles-ci ne sont pas pertinentes au regard de la contrainte hydrique. Pour cela, il serait nécessaire de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour le bon développement de chaque espèce concernée, de façon identique à ce qui a été présenté. Des simulations de l'évolution du stock d'eau du sol pour différentes périodes permettraient de caractériser selon la localisation la vulnérabilité des différentes espèces vis-à-vis de la ressource en eau (des cartes complémentaires évaluant la vulnérabilité de chaque espèce pourraient être fournies). Les principaux inconvénients liés à cette méthode concernent le risque que l'introduction de paramètres hydriques ne soit pas cohérente avec le découpage stationnel traditionnel, et la focalisation de l'impact du changement de climat sur les aspects hydriques aux dépens des aspects thermiques.

- 2) **Réalisation de cartes prédictives des stations**. Une approche plus globale peut être envisagée à travers la caractérisation des principales composantes déterminant les types de station (climat, eau et nutrition des sols), afin de prédire la distribution de conditions stationnelles sur un vaste territoire. Cette approche analytique a déjà été utilisée pour réaliser une carte prédictive des stations forestières dans le massif vosgien (Gégout *et al.*, 2008). Elle est fondée sur l'utilisation de bases de données phytoécologiques servant à réaliser une analyse factorielle des correspondances (AFC) dont les axes sont modélisés à l'aide des indices écologiques spatialisés (les trois premiers axes de l'AFC réalisée pour le massif Vosgien étaient climatiques, trophiques et hydriques). Les cartes de bilan en eau que nous avons réalisées pourraient permettre de rendre dynamiques les types de station prédits, en faisant évoluer le climat et l'eau du sol en fonction des différentes projections existant pour le futur. Il y aurait ainsi production de cartes prédictives des stations valides pour un pas de temps donné, le sylviculteur choisirait la carte adaptée en fonction des échéances de gestion. Les principales limites de cette approche résident dans le découpage des continuums écologiques issus des AFC sous forme de stations, qui reste relativement arbitraire (Piedallu *et al.*, 2006).

	<i>Catalogues de stations traditionnels</i>	<i>Cartes numériques de bilan en eau couplées aux outils existants</i>	<i>Cartes prédictives des stations</i>	<i>Cartes de distribution ou de croissance des espèces</i>
<i>Type d'approche Information fournie</i>	<i>Synthétique Type de station et essences potentielles</i>	<i>Mixte Type de station, carte des bilans en eau et essences potentielles</i>	<i>Synthétique Type de station et essences potentielles en termes de distribution ou de croissance</i>	<i>Thématique Potentialité de chaque espèce en termes de distribution ou de croissance</i>
<i>Cartographie</i>	<i>Travail de terrain complémentaire nécessaire</i>	<i>Du facteur hydrique uniquement</i>	<i>De tous les facteurs en tous points de l'espace</i>	<i>Des potentialités de toutes les essences pour l'ensemble de la zone</i>
<i>Emprise concernée</i>	<i>La forêt</i>	<i>Le catalogue de stations</i>	<i>La région naturelle</i>	<i>Une grande région naturelle voire de la France entière selon la résolution des données</i>
<i>Prise en compte du changement climatique</i>	<i>A dire d'expert</i>	<i>Simulations pour le facteur hydrique uniquement</i>	<i>Simulations possibles pour tous les facteurs</i>	<i>Simulations vis-à-vis de la distribution et de la croissance de toutes les essences</i>
<i>Facilité de mise en œuvre</i>	<i>Déjà existant</i>	<i>Quelques mois de travail pour un catalogue</i>	<i>Au moins 1 an de travail pour une grande région naturelle</i>	<i>2-4 ans de travail pour un pays entier</i>
<i>Avantages</i>	<i>Méthode connue et maîtrisée</i>	<i>Ne modifie pas les habitudes de travail Permet d'intégrer la sensibilité des espèces au changement prévu de régime hydrique</i>	<i>Approche quantitative de toutes les composantes de la station Fournit une carte couvrant de larges emprises à faible coût.</i>	<i>Permet une approche plus fine par essence en différenciant croissance et distribution Fournit directement des cartes de potentialité couvrant de larges emprises à faible coût.</i>
<i>Inconvénients</i>	<i>Difficulté à évaluer les effets du changement climatique Coût de la cartographie de terrain Zones cartographiées limitées</i>	<i>Problème de cohérence possible entre l'approche stationnelle et la carte numérique Approche partielle des conséquences du changement de climat car ignore les effets thermiques</i>	<i>Le découpage des gradients écologiques en stations est relativement empirique</i>	<i>Nécessite la généralisation de la cartographie de la distribution et de la croissance des espèces Modifie les habitudes et nécessite d'inventer de nouvelles méthodes de travail</i>

Table 10 : Evaluation de différentes possibilités d'utilisation pour les gestionnaires des cartes de bilan en eau

- 3) Utilisation d'une **approche analytique basée sur des modèles spatialisés caractérisant la distribution ou la croissance d'un grand nombre d'espèces à l'échelle d'un vaste territoire**. Un tel outil pourrait être élaboré à l'aide d'un grand nombre de couches numériques décrivant la distribution, la croissance, ou encore la vulnérabilité au changement global (risque de perte de croissance, de mortalité) pour l'ensemble des essences concernées. L'outil développé ne se focaliserait plus sur les facteurs écologiques mais directement les potentialités de chaque essence. Ces modèles pourraient indiquer pour chaque pixel les conditions favorables à la présence et à une bonne croissance de chacune d'entre elle dans des conditions climatiques actuelles. Des simulations permettraient également d'étudier les évolutions possibles à différentes échéances selon des hypothèses de changement de climat. Ces informations pourraient être agrégées pour produire une donnée synthétique plus facilement accessible par le gestionnaire. Elles se présenteraient par exemple sous forme d'une couche de données numériques utilisable sous SIG indiquant pour chaque pixel un niveau de potentialité de chacune des essences, et un niveau de risque caractérisant l'évolution de la productivité et de la mortalité. Il serait ainsi possible de cartographier pour l'ensemble de la zone les potentialités d'une essence et son niveau de vulnérabilité, ou de réaliser des combinaisons entre essences en fonction de critères de vulnérabilité. Grace aux indices de bilan en eau calculés lors de ce travail, tous les indices nécessaires à la réalisation de ce type d'outil seraient disponibles. Par contre, les cartes de distribution et de croissance des espèces n'existent actuellement que pour quelques unes d'entre elles et devraient être généralisées à l'ensemble des essences. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle s'affranchit du problème lié à la combinaison des facteurs écologiques entre eux, qui est propre à chaque espèce. Les principales limites sont liées au changement de pratique professionnelle que son usage pourrait induire, et à la nécessité de mettre en place de nouvelles méthodes de travail couplant l'usage de ces modèles et les nécessaires vérifications ou compléments de terrain qui seraient à réaliser. Des essais sur des zones test permettraient de préciser les difficultés pratiques liées à leur mise en œuvre.

Le travail réalisé est une première étape qui démontre la possibilité de réaliser des cartes numériques de bilan en eau des sols sur de vastes emprises et ayant une pertinence locale. Volontairement, les effets du couvert végétal n'ont pas été pris en compte (interception, processus de régulation stomatique, ...), malgré leur importance vis-à-vis du bilan en eau. Il est ainsi possible de faire des simulations qui soient indépendantes des évolutions de couvert, qu'elles soient dues aux pratiques sylvicoles ou aux évolutions induites par le changement de climat. Une limite importante des travaux réalisés vient du fait que la dynamique de l'eau du sol ne soit pas encore prise en compte. Des améliorations devront être mises en œuvre afin d'essayer d'intégrer les apports et départs latéraux en eau, ainsi que les effets de nappes. Ces travaux devront être complétés par une évaluation des changements de disponibilité en eau en fonction des hypothèses du GIEC. Connaissant les valeurs de déficit d'évaporation tolérées par chaque espèce et l'évolution des déficits d'évaporation selon la zone, il sera ainsi possible de cartographier des zones de vulnérabilité au stress hydrique, pour les espèces présentes mais aussi vis-à-vis d'espèces exogènes à la zone d'étude. De tels outils qui pourraient être généralisés à l'échelle des catalogues ou guides de stations forestières ou

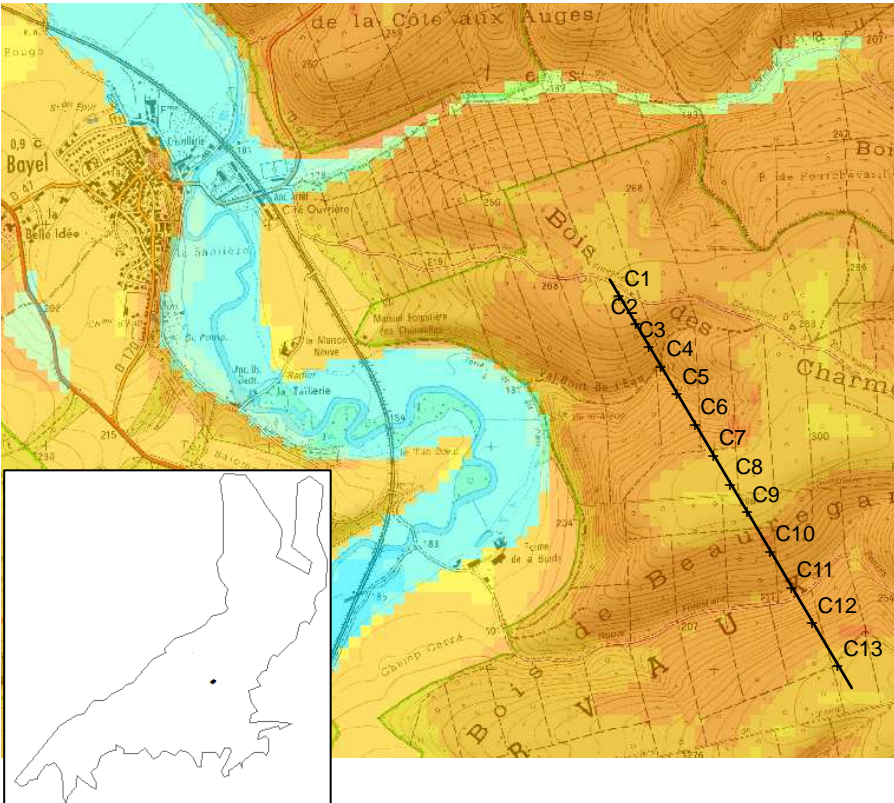
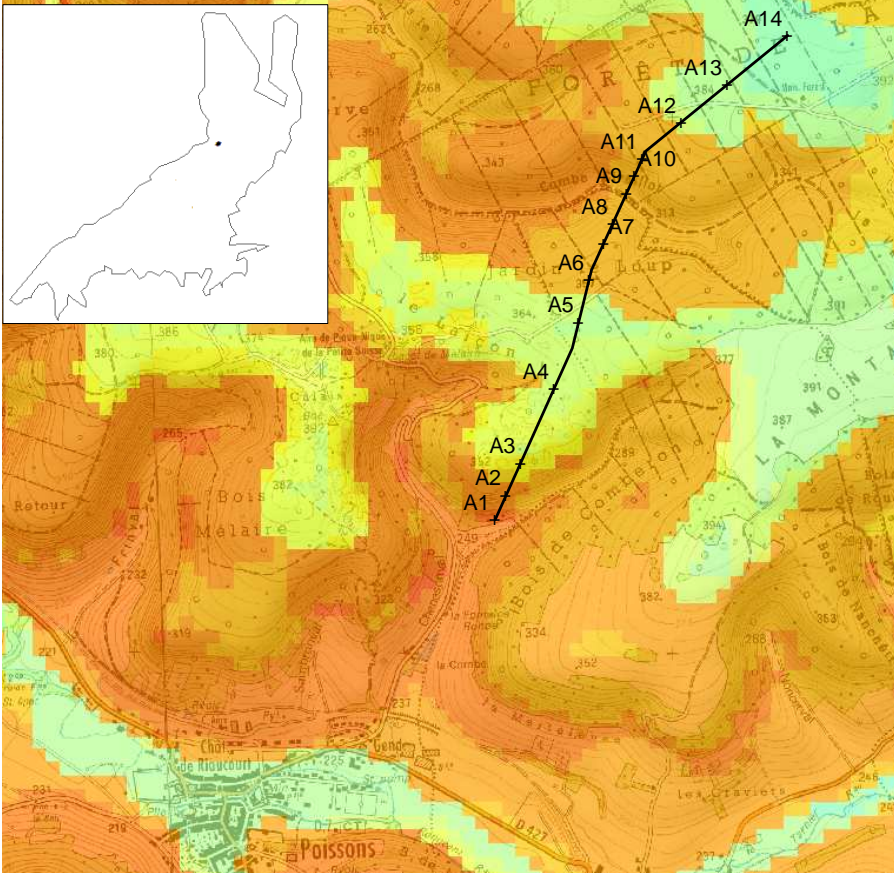
sur de plus vastes zones permettraient de contribuer à l'adaptation des forêts Françaises au changement de climat. Ils ne doivent cependant pas faire oublier les effets des changements de températures qui peuvent également influencer fortement la vitalité des essences. Afin de pouvoir communiquer la carte des déficits d'évaporation aux gestionnaires, un petit guide d'utilisation de la carte produite est présenté en Annexe 4.

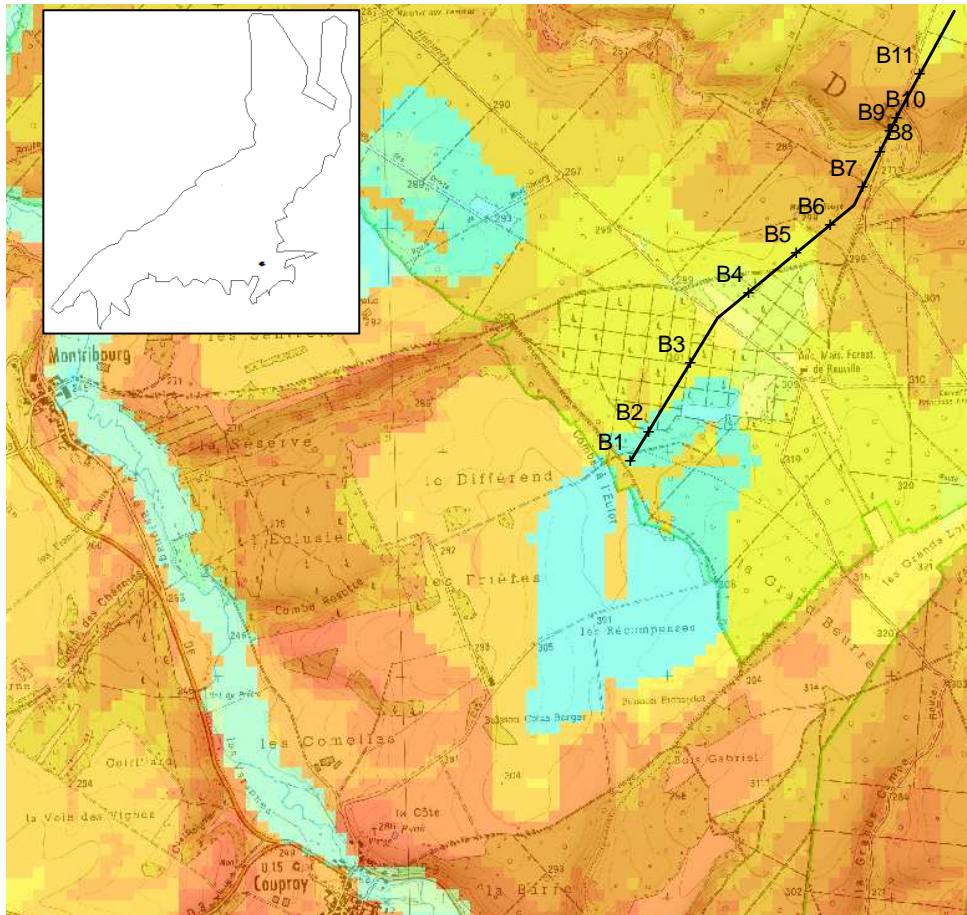
Bibliographie

- 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., de Ruffray, P., Vidal, C., Riofrio-Dillon, G., Pierrat, J., Gégout, J., 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature* accepted.
- 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.
- Cheret, V., Denux, J.P., 2011. Analysis of MODIS NDVI Time Series to Calculate Indicators of Mediterranean Forest Fire Susceptibility. *Giscience & Remote Sensing* 48, 171-194.
- 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 .:
- Drolon, V., 2011. Evaluation de l'apport de la télédétection pour la cartographie de la sensibilité de la végétation au feu. Application sur le territoire de l'Aude et des Pyrénées Orientales. Rapport de stage de Master 2- Parcours « Télédétection et Géomatique Appliquées à l'Environnement »(TGAE) 2010-2011, p. 59.
- Dyer, J.M., 2009. Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecology* 24, 391-403.
- Franklin, J., 1995. Predictive vegetation mapping: Geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography* 19, 474-499.
- Gaudin, S., 2008. La prise en compte des changements climatiques dans les guides de stations. *Forêt entreprise* 180, 34-39.
- Gégout, J., Piedallu, C., Cornu, J., Cluzeau, C., 2008. La cartographie prédictive des stations forestières : un nouvel outil au service du gestionnaire. Predictive mapping for forest sites - A new tool for forest managers. *Revue Forestiere Francaise* 30, 37-60.
- 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, 2007. AR4 - Climate change 2007 : synthesis report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Landmann, G., Dupouey, J.L., Badeau, V., Lefevre, Y., Bréda, N., Nageleisen, L.M., Chuine, I., F., L., 2008. le hêtre face aux changements climatiques : le hêtre en France en 2100 : la portion congrue ? *Forêt entreprise* 180, 28-33.
- Legay, M., Mortier, F., Lecreulx, P., Cordonnier, T., 2007. Changement climatique et gestion forestière : tirons les premiers enseignements. *Rendez-Vous Techniques* n°3 Hors-Série "Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques", 95-102.
- McBratney, A.B., Mendonca Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *geoderma* 117, 3-52.
- Milard, L. (Ed), 2004. Les Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne et du nord et de l'est de la Bourgogne. Guide pour l'identification des stations et le choix des essences. CFPPA de Crocigny.
- 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., Gegout, J., 2008. Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 1696-1706.
- Piedallu, C., Gégout, J., Bruand, A., Seynave, I., 2010. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma*, doi:10.1016/j.geoderma.2010.10.004.
- 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., 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., 2011. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma* 160, 355-366.
- Piedallu, C., Gégout, J.C., Cornu, J.F., Cluzeau, C., 2006. Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien, élaboration, validation et applications. Engref, p. 95.
- Piedallu, C., Gégout, J.C., Perez, V., Lebourgeois, F., submitted. Soil water balance improves determination of the distribution patterns of hygrophilous and xerophilous tree species.
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 92-107.
- Rabu, D., Chanteraine, J., 2004. Carte géologique de la France au millionième, 6e édition révisée.
- 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 -. In: FIF, r.d.s.d.i.a.d.l. (Ed.). Agroparistech-Engref, Nancy, France.
- Riou-Nivert, P., 2008a. Changement climatique, préparer l'avenir. *Forêt entreprise* 182, 17-29.
- Riou-Nivert, P., 2008b. Changements climatiques : les interrogations des sylviculteurs. *Forêt entreprise* 180, 14-27.
- Rorison, I.H., Sutton, F., Hunt, R., 1986. LOCAL CLIMATE, TOPOGRAPHY AND PLANT-GROWTH IN LATHKILL-DALE NNR . A 12-YEAR SUMMARY OF SOLAR-RADIATION AND TEMPERATURE. *Plant Cell and Environment* 9, 49-56.
- Seynave, I., Gegout, J.C., Herve, J.C., Dhote, J.F., 2008. Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth? *Journal of Biogeography* 35, 1851-1862.
- Seynave, I., Gégout, J.C., Herve, J.C., Dhôte, J.F., 2006. Facteurs écologiques et production du hêtre en France. *Forêt-Entreprise* 167, 41-45.
- Stephenson, N.L., 1990. Climatic control of vegetation distribution: The role of the water balance. *The American Naturalist* 135, 649-670.
- 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., Mather, J.R., 1955. The water balance. Laboratory of Climatology, Publication in Climatology. n°8.
- 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.
- 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.

Annexe 1 : Localisation des trois transects réalisées sur les plateaux calcaires





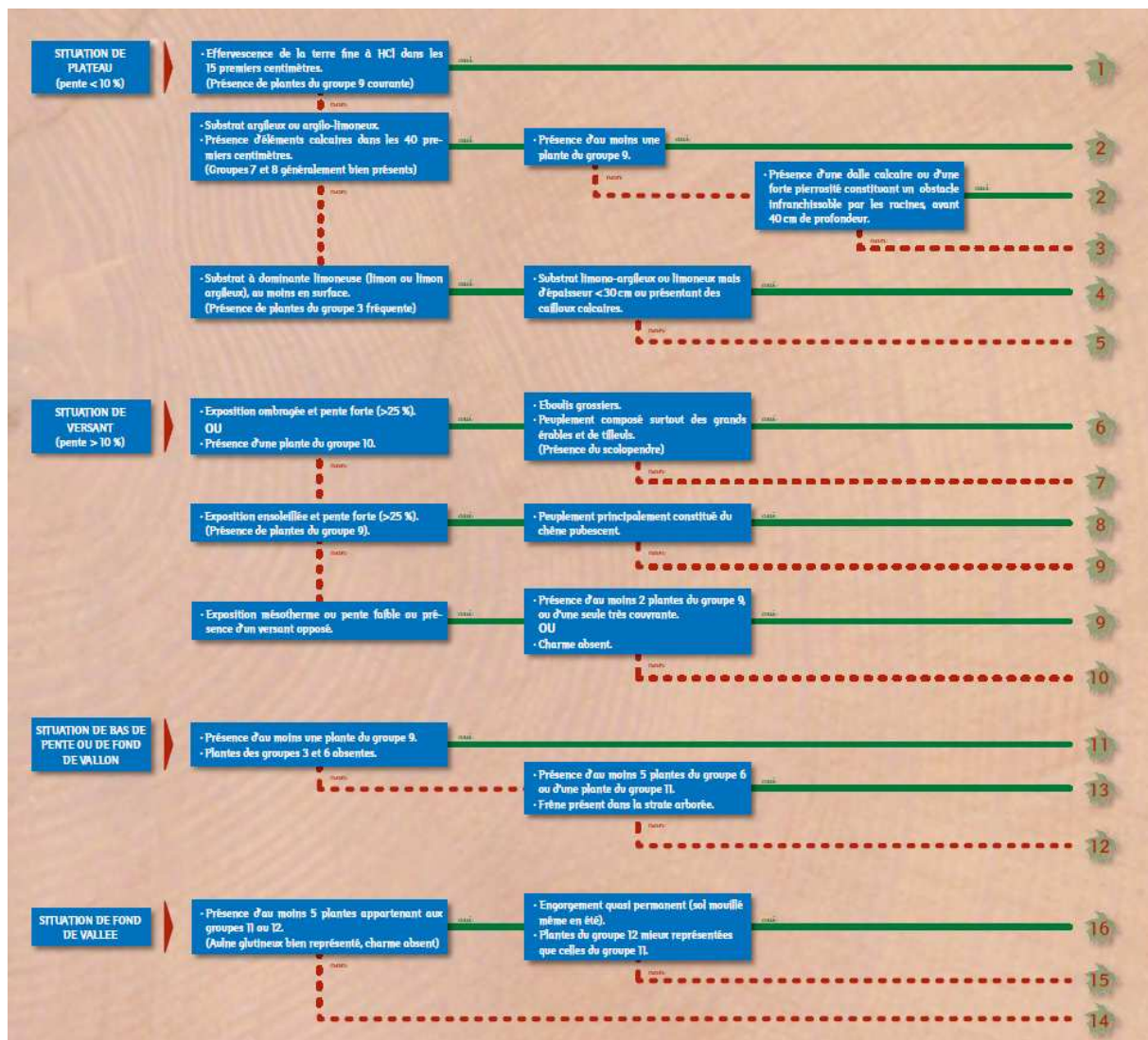
Valeur des réserves utiles maximales (mm) :

0 - 10	50,1 - 60	100,1 - 110	150,1 - 160
10,1 - 20	60,1 - 70	110,1 - 120	160,1 - 170
20,1 - 30	70,1 - 80	120,1 - 130	
30,1 - 40	80,1 - 90	130,1 - 140	
40,1 - 50	90,1 - 100	140,1 - 150	

Annexe 2 : Liste des espèces ayant servi à tester la capacité prédictive des modèles LERFoB et Météo-France concernant les températures et les précipitations vis-à-vis de leur répartition

essence	abréviation	climat	températures
<i>Abies alba</i>	abal	montagnard	froid
<i>Acer campestre</i>	acca	continental atlantique	large amplitude
<i>acer monspessulanum</i>	acmo	méditerranéen	thermophile
<i>Acer opalus</i>	acop	continental montagnard	mésophile
<i>Acer platanoïdes</i>	acpl	continental atlantique	mésophile
<i>Acer pseudoplatanus</i>	acps	continental montagnard	frais
<i>Alnus glutinosa</i>	algl	continental atlantique	frais
<i>Alnus incana</i>	alin	montagnard	frais
<i>Betula pubescens</i>	bepu	continental atlantique	large ampl
<i>Carpinus betulus</i>	cabe	continental atlantique	mésophile
<i>Castanea sativa</i>	casa	méditerranéen	thermophile
<i>Fagus sylvatica</i>	fasy	continental montagnard	frais
<i>Fraxinus excelsior</i>	frex	continental montagnard	mésophile
<i>Fraxinus ornus</i>	fror	continental atlantique	thermophile
<i>Larix decidua</i>	lade	montagnard	froid
<i>Mespilus germanica</i>	mege	atlantique	mésophile
<i>Picea abies</i>	piab	montagnard	froid
<i>Pinus cembra</i>	pice	montagnard	froid
<i>Pinus halepensis</i>	piha	méditerranéen	thermophile
<i>Pinus nigra</i>	pini	montagnard méditerranéen	mésophile
<i>Pinus sylvestris</i>	pisy	montagnard	mésophile
<i>Pinus uncinata</i>	piun	montagnard	froid
<i>Populus tremula</i>	potr	continental atlantique	large mapl
<i>Prunus padus</i>	prpa	continental montagnard	mésophile
<i>Quercus humilis</i>	quhu	méditerranéen	thermophile
<i>Quercus ilex</i>	quil	méditerranéen	thermophile
<i>Quercus petraea</i>	qupe	continental atlantique	frais
<i>Quercus pyrenaicum</i>	qupy	atlantique	thermophile
<i>Quercus robur</i>	quro	continental atlantique	frais
<i>Quercus suber</i>	qusu	méditerranéen	thermophile
<i>Robinia pseudoacacia</i>	rops	continental atlantique	large amplitude
<i>Salix alba</i>	saal	indifférent	large ampl
<i>Salix caprea</i>	saca	indifférent	large amplitude
<i>Salix cinerea</i>	saci	indifférent	large amplitude
<i>Sorbus aria</i>	soar	continental montagnard	thermophile
<i>Sorbus aucuparia</i>	soau	continental montagnard	large amplitude
<i>Sorbus torminalis</i>	soto	continental atlantique	thermophile
<i>Tilia cordata</i>	tico	continental montagnard	mésophile
<i>Ulmus glabra</i>	ulgl	continental montagnard	frais
<i>Ulmus laevis</i>	ulla	continental	frais

Annexe 3 : clef de détermination des unités stationnelles du guide des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004).



Annexe 4 : Guide d'utilisation simplifié de la carte des déficits d'évaporation (DE)

Méthode d'élaboration de la carte

La carte des déficits d'évaporation des sols forestiers des plateaux calcaires du nord est de la France a été élaborée à partir de modèles spatialisés de températures, de précipitations, de rayonnement solaire, et de réserve en eau maximale des sols élaborés au Lerfob (Piedallu and Gégout, 2007; Bertrand *et al.*, 2011; Piedallu *et al.*, 2011; Piedallu *et al.*, submitted). Ces modèles ont été calculés selon différentes méthodologies, pouvant faire intervenir des relevés de terrain (données météorologiques des postes Météo France, relevés de l'IFN) ou basés sur des calculs topographiques (rayonnement solaire), et utilisant différentes techniques de spatialisation (interpolation, modélisation à l'aide de variables dont la distribution spatiale est connue, ...). Le déficit d'évaporation représente la différence entre l'évaporation potentielle et l'évaporation réelle, plus sa valeur étant élevée plus le manque d'eau pour répondre à la demande climatique étant important. Cet indice qui permet de caractériser le niveau potentiel de stress hydrique d'un site a été calculé mensuellement pour les valeurs moyennes de la période 1961-1990, à l'aide des formules de Thornthwaite (Thornthwaite and Mather, 1955). Les données de rayonnement solaire et de températures donnent une information par pixels de 50 m de coté, les cartes de RUM par pixels de 500 m de coté, et les cartes de précipitations par pixels de 1 km de coté. La carte de déficits d'évaporation produite est au pas de 50 m, sachant que la principale limitation provient probablement de la résolution de la carte des RUM. De récents travaux permettent cependant d'utiliser des cartes de RUM plus fines (pas de 50 m) (voire Richard, 2011; Villiers, 2011).

Validation de la carte

La qualité de la carte a été évaluée de différentes manières. A l'échelle nationale, chacune des composantes a été validée, montrant de bonnes corrélations avec des mesures de terrain pour le rayonnement solaire ($R^2 = 0,82$, $n = 88$), les températures ($R^2 = 0,93$, $n = 493$), et les précipitations ($R^2 = 0,78$, $n = 493$). Les RUM sont plus difficiles à évaluer, on obtient un R^2 de 0.29 avec un jeu de 32544 placettes IFN. Cependant, ce chiffre doit être relativisé, la réalisation de 5 répétitions pour caractériser la RUM d'une placette de 250 m² ayant montré un écart moyen de prédiction de +/- 10 mm entre les placettes. Il est donc à la fois très difficile d'estimer sur le terrain une RUM qui soit représentative de la zone étudiée, et de valider la carte en question. Nous avons cependant démontré que la prise en compte de la RUM du sol permettait de mieux expliquer la distribution des espèces, particulièrement pour les espèces xérophiles ou hygrophiles, par rapport aux indices de pluie ou de bilans hydriques climatiques classiquement utilisés. Malgré la difficulté d'estimation des RUM, cette carte apporte une plus value assez importante par rapport aux données purement climatiques.

La carte des déficits d'évaporation a été validée pour chacun des mois de juin, juillet et août, avec les postes disponibles du sous réseau météorologique de RENECOFOR ayant des mesures de RUM, de températures et de précipitations indépendantes (n = 25 postes), avec un R² de 0.79 entre les valeurs mesurées et cartographiées. Du fait du faible nombre de placettes disponibles, nous avons également validé les déficits d'évaporation avec les données des placettes IFN, dont seules les valeurs de RUM sont indépendantes : le R² est alors de 0.88 pour la France (n = 32544). A l'échelle de la zone d'étude, nous avons obtenu un R² de 0,77 avec une RMSE de 4.24 en utilisant 1456 placettes du jeu IFN. Une validation à des échelles multiples allant des plateaux calcaires à la parcelle a montré que la carte des déficits d'évaporation pouvait être pertinente jusqu'à des échelles locales, principalement dans les zones de topographie variée. Une marge d'amélioration de la précision de la carte existe à des échelles locales en utilisant des techniques de calcul des RUM basées sur les cartes géologiques au 1/500000 ème, comme cela a été montré sur une partie du site d'étude.

Utilisation de la carte des DE

La carte des déficits d'évaporation permet de caractériser le niveau moyen de stress hydrique pour la période 1961-1990. Mise en relation avec la distribution des essences, elle permet de déterminer la gamme de valeurs favorables à chaque espèce. Ces données peuvent être utilisées lors de la création de guides et de catalogues afin de contribuer à déterminer les limites des types de stations. Lors de leur mise à jour, elle permet d'affiner et de redécouper les stations qui concerneraient un gradient hydrique trop important. Elle peut également permettre de préciser les listes d'essence recommandées ou non en fonction du niveau de stress hydrique. Son utilisation peut se faire soit au niveau de la clef d'entrée du catalogue lors de la détermination des types de stations, soit sous forme cartographique en modulant les recommandations d'un type de station en fonction des valeurs de déficit d'évaporation.

La carte produite peut également être directement utilisée sous sa forme numérique, à différentes échelles, comme composante permettant de réaliser des pré-cartographies de terrain, en stratifiant le territoire en zones homogènes, ou comme intrant à des modèles spatialisés représentant les types de stations forestières, la distribution ou la croissance des espèces. Etant donné qu'elle quantifie de façon numérique le stress hydrique en tout point du territoire, il est possible de recalculer les valeurs de déficit d'évaporation en fonction des modèles d'évolution du climat pour le XXI ème siècle. Les cartes ainsi générées vont pouvoir rendre compte d'une partie du degré de vulnérabilité des espèces aux changements de ressource en eau. Elles peuvent alors servir d'outil d'anticipation permettant de définir les espèces qui pourraient ne plus être à leur place ou celles au contraire qui pourraient être introduites.

Avertissement

Du fait de la fine résolution spatiale de la carte, il est possible de prendre en compte des effets relativement locaux dus aux changements de topographie par exemple. Il ne faut cependant pas oublier que cette carte est issue de modèles et que la valeur fournie est précise à ± 7.5 mm près. Dans certains cas particuliers, l'imprécision peut être bien plus importante. C'est le cas par exemple lorsque il y a présence d'unités géologiques très différentes des zones avoisinantes, de façon très locale (cas des placages limoneux sur plateaux calcaires par

exemple). On peut également penser que la carte sous estime la quantité d'eau disponible en bas de versant et la surestime en haut de versant, du fait qu'elle ne prenne pas en compte les apports latéraux en eau. Cela peut être compensé par une pondération théorique « à dire d'expert », mais il n'existe actuellement pas de moyen permettant de quantifier les flux sur les versants à l'échelle de la zone d'étude. Enfin, la carte n'est pas pertinente pour donner une évaluation de la quantité d'eau disponible dans les zones d'alimentation par les nappes, les marais ou les tourbières, ou les zones d'éboulis.

A l'échelle des plateaux calcaires, on peut estimer que la carte fournie permet d'identifier correctement les principaux facteurs de variabilité. Plus on évolue vers des échelles locales, plus le risque que la carte ne prenne pas en compte des particularismes locaux est grand. Dans ces cas, il est fortement recommandé à la fois de confronter la carte aux professionnels ayant une bonne connaissance de la forêt concernée, et de réaliser quelques placettes de terrain afin de vérifier les grands gradients mis en évidence. Lorsque des erreurs ou des imprécisions locales sont mises en évidence, un travail complémentaire de relevés de terrain peut être réalisé afin de corriger les zones incriminées. Seules les RUM peuvent être estimées sur le terrain, les données climatologiques disponibles sous SIG permettant de recalculer les déficits d'évaporation sur la zone en prenant en compte les données corrigées. Enfin, il ne faut pas oublier que cette donnée ne permet que de caractériser le comportement des espèces vis-à-vis du changement de ressource en eau, les changements de températures, entre autre, ayant également une forte influence sur le degré de vulnérabilité des espèces. Une évaluation générale de la vulnérabilité au changement de climat ne peut être réalisée uniquement à partir de ces données.

