



**HAL**  
open science

# UTILISATION DE CARTES PREDICTIVES POUR AMELIORER LA PRISE EN COMPTE DE LA CONTRAINTES HYDRIQUE DANS LE CHOIX DES ESSENCES

Jean-Baptiste Richard, Christian Piedallu, Sylvain Gaudin, Myriam Legay

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Richard, Christian Piedallu, Sylvain Gaudin, Myriam Legay. UTILISATION DE CARTES PREDICTIVES POUR AMELIORER LA PRISE EN COMPTE DE LA CONTRAINTES HYDRIQUE DANS LE CHOIX DES ESSENCES. *Revue forestière française*, 2013, LXV (1), pp.37-56. 10.4267/2042/51441 . hal-00871639v2

**HAL Id: hal-00871639**

**<https://hal.science/hal-00871639v2>**

Submitted on 30 Oct 2013

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

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

# UTILISATION DE CARTES PRÉDICTIVES POUR AMÉLIORER LA PRISE EN COMPTE DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE DANS LE CHOIX DES ESSENCES

Jean-Baptiste RICHARD, Christian PIEDALLU, Sylvain GAUDIN, Myriam LEGAY

L'impact du changement climatique sur la forêt est une préoccupation importante au sein de la communauté forestière (Legay *et al.*, 2007 ; Legay *et al.*, 2008 ; Riou-Nivert, 2008). Le réchauffement en cours agit principalement sur les températures et la disponibilité en eau du sol, dont l'évaluation reste difficile à réaliser (Landmann *et al.*, 2003).

Les facteurs du milieu, dont la ressource en eau, sont traditionnellement caractérisés sur le terrain au moyen des typologies de stations (Brethes, 1976 ; Becker *et al.*, 1980). Les stations y sont définies comme des unités géographiques homogènes vis-à-vis des principaux facteurs influençant la distribution et la croissance des arbres, et sont décrites, au sein d'une région naturelle, dans des catalogues ou des guides. Elles sont identifiées sur le terrain à partir d'indicateurs tels que l'altitude, l'exposition, la position topographique, ou encore la flore indicatrice (Cajander, 1926). L'utilisation des typologies existant actuellement pour un certain nombre de régions naturelles permet la réalisation de cartes des stations à l'aide d'un travail d'inventaire sur le terrain (Bazin et Gaudin, 2003). Pour chaque unité ainsi définie, des conseils de gestion et notamment de choix d'essences sont fournis.

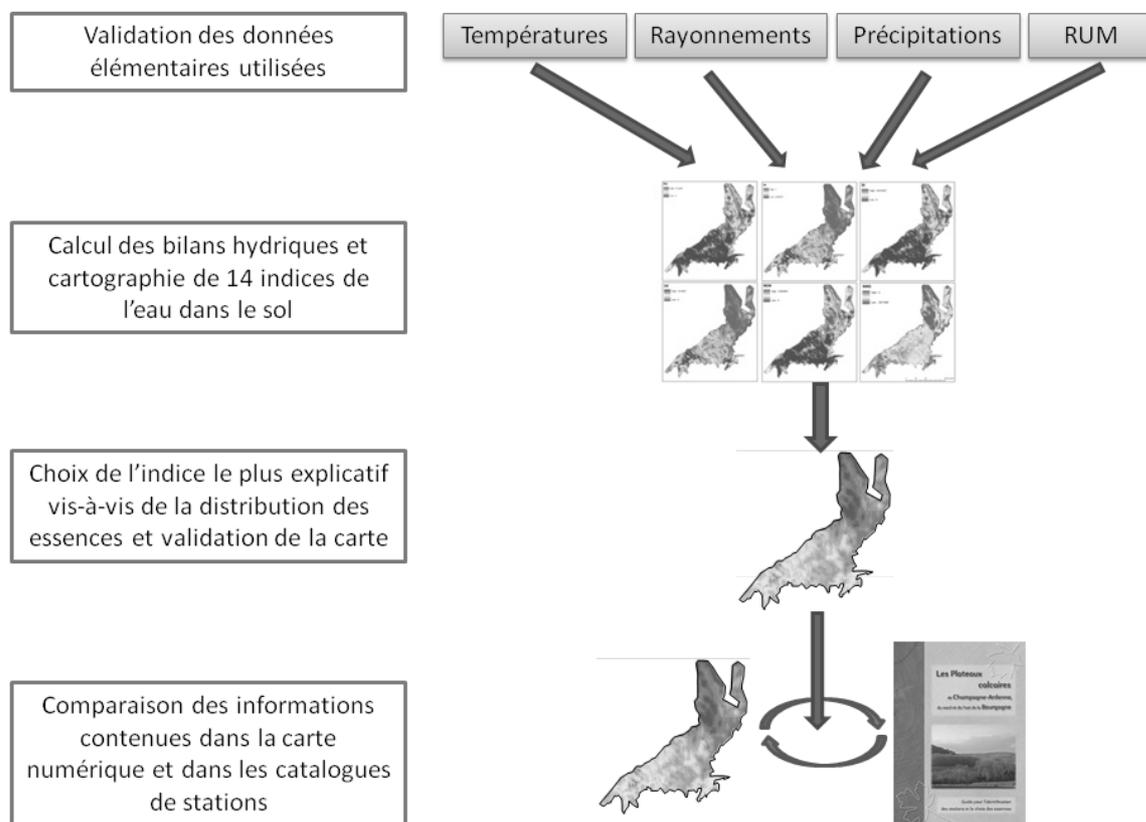
Le concept de station forestière a été élaboré dans les années 1970, en partant de l'hypothèse que les conditions écologiques étaient stables dans le temps. Or les changements rapides de climat observés ces dernières décennies ont montré que les principaux facteurs agissant sur la distribution et la croissance des espèces variaient fortement à l'échelle de temps de la révolution forestière. Ainsi, les températures moyennes ont augmenté de 1,2 °C au cours du siècle dernier ; durant la même période, la répartition annuelle des pluies a été modifiée (Moisselin *et al.*, 2002). Les climatologues prédisent pour la France que les températures vont continuer à augmenter fortement dans les prochaines décennies, et que les bilans en eau vont être impactés, avec une tendance à la diminution de la ressource hydrique et l'augmentation du nombre et de l'intensité des sécheresses (IPCC, 2007). La majorité des documents de gestion existants ne permettent pas de prendre en compte l'impact potentiel du changement climatique sur les forêts, leurs préconisations pouvant être inadaptées face aux nouvelles conditions climatiques (Gaudin, 2008 ; Riou-Nivert, 2008).

Depuis une vingtaine d'années, de nouvelles approches se sont fondées sur le développement de cartes numériques permettant de représenter les variations spatiales des principaux facteurs écologiques responsables de la distribution ou de la productivité des essences (Scull *et al.*, 2003). Cette notion de cartographie prédictive, développée par Franklin (1995), concerne aussi bien la prédiction d'une information dans le futur que la prédiction d'une valeur en un lieu où elle n'a pas été mesurée. Le développement des systèmes d'information géographique (SIG) et la puissance de calcul des outils informatiques permettent actuellement la réalisation de modèles et de cartes à haute résolution spatiale, compatibles avec les besoins des gestionnaires (McBratney *et al.*, 2003). Cette approche quantitative a l'avantage de fournir à faible coût une information en tout point du territoire. Un des points limitant concernant la caractérisation spatiale de la contrainte hydrique réside dans l'évaluation de la réserve utile maximale des sols (RUM). La réalisation récente d'une carte des RUM pour la France (Piedallu *et al.*, 2011) ouvre la porte à des calculs de bilan en eau des sols (Piedallu *et al.*, 2012).

## OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Notre objectif est d'évaluer la pertinence et l'intérêt d'une carte numérique concernant le bilan en eau des sols afin de permettre d'améliorer la prise en compte des effets potentiels du changement du climat dans le choix des essences. Les résultats obtenus ont été comparés aux préconisations contenues dans les catalogues ou guides des stations existants. Nous avons choisi de travailler sur les Plateaux calcaires du Nord-est de la France car le guide des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du Nord et de l'Est de la Bourgogne (Milard, 2004), qui couvre une part importante de cette zone, doit être mis à jour pour permettre la prise en compte des effets du changement climatique dans le choix des essences.

Dans un premier temps, nous avons évalué la pertinence des données élémentaires qui ont été utilisées pour le calcul de bilan en eau (figure 1). Ensuite, nous avons comparé deux méthodes de calcul du bilan en eau des sols et 7 indices pouvant être calculés selon chacune de ces méthodes. Cette étape a conduit à la sélection d'une méthode et d'un indice, évalués selon leur capacité à expliquer la distribution des principales essences françaises. L'indice retenu a ensuite été cartographié et validé sur la France entière au pas de 50 mètres. Nous avons enfin examiné quelle aide pourrait apporter la carte numérique pour améliorer les conseils en matière de choix des essences sur les Plateaux calcaires de Lorraine, de Champagne-Ardenne, et du Nord et de l'Est de la Bourgogne.



**Figure 1 : Organisation générale de l'étude**

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Méthodes de calcul des bilans hydriques

Le bilan hydrique permet d'estimer la quantité d'eau disponible dans le sol pour les plantes en tout point de l'espace. La capacité de stockage en eau du sol est limitée par sa réserve utile maximale (RUM). Les arrivées d'eau dans le système sont essentiellement représentées par les précipitations, tandis que les départs se font *via* l'évapotranspiration (ETP), qui correspond au cumul de l'eau évaporée ou transpirée par le couvert végétal et le sol (Choisnel, 1992 ; Granier *et al.*, 1995). L'ETP, calculée selon la formule de Turc (Turc, 1961), dépend de la température et du rayonnement solaire (Lebourgeois et Piedallu, 2005). Deux méthodes de calcul des bilans en eau parmi les plus courantes ont été utilisées pour chaque mois de la période de référence 1961-1990, à partir des formules de Palmer (Palmer, 1965) et de Thornthwaite (Thornthwaite et Mather, 1955). Lorsque les entrées d'eau sont supérieures à l'évapotranspiration, l'eau s'accumule dans le sol dans la limite de la RUM. Dans le cas où les précipitations ne suffisent plus à compenser l'évapotranspiration, la quantité d'eau disponible dans le sol diminue selon une exponentielle négative avec la méthode de Thornthwaite, et lorsqu'il reste moins de 40% d'eau dans le sol de façon linéaire avec la méthode de Palmer.

Pour chacune des deux méthodes, nous avons calculé sept indices issus de la littérature scientifique, par saison, sur l'année et pour la période de végétation (d'avril à octobre) (tableau I) (Stephenson, 1990 ; Nix et Fitzpatrick, 1969), représentant différentes manières d'appréhender l'eau contenue dans le sol et le stress hydrique subi par les végétaux. Nous avons ensuite évalué leurs performances afin de sélectionner l'indice le plus pertinent (Stephenson, 1990 ; Bréda *et al.*, 2006).

| <b>Indice</b> | <b>Définition</b>  |
|---------------|--|
| RU            | Réserve utile des sols : quantité d'eau disponible pour les plantes à un moment donné, exprimée en millimètres.  |
| REW           | <i>Relative extractable water</i> : quantité d'eau disponible pour les plantes exprimée en % de la réserve utile maximale (Bréda <i>et al.</i> , 2006).  |
| ETR           | Évapotranspiration réelle : quantité d'eau (en millimètres) pouvant être réellement évapotranspirée par le couvert végétal, en fonction de la réserve en eau du sol disponible (par opposition à l'évapotranspiration potentielle, ETP, qui représente l'évapotranspiration dans le cas où l'eau dans le sol n'est pas limitée. (Stephenson, 1990 ; Stephenson, 1998). |
| DE            | Déficit d'évaporation : différence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle (en millimètres) (Stephenson, 1990 ; Stephenson, 1998).   |
| IA            | Indice d'aridité : rapport ETR/ETP (Nix et Fitzpatrick, 1969).   |
| SWD           | <i>Soil water deficit</i> : rapport entre la RU et un seuil physiologique fixé à 40 % de la RUM (Granier <i>et al.</i> , 1999).  |
| SI            | <i>Stress index</i> : rapport entre la réserve utile du sol et l'ETP (Nix et Fitzpatrick, 1969).   |

**Tableau I : Les différents indices dérivés du bilan hydrique des sols.**

### **Validation des données nécessaires au calcul des bilans hydriques**

Le calcul des bilans hydriques fait appel à des données de rayonnement solaire, de températures (entrant dans le calcul de l'ETP), de précipitations et de RUM des sols. Le rayonnement solaire a été estimé pour chaque cellule de 50 mètres de côté à l'aide du modèle Hélios (Piedallu et Gégout, 2007), les températures en milieu forestier et les précipitations ont été prédites au LERFoB par pixels respectivement de 50 mètres, et de 1 km (Bertrand *et al.*, 2011). L'interception de la pluie due au couvert végétal et les apports

latéraux n'ont pas été pris en compte dans le calcul du bilan en eau. La réserve utile maximale des sols (RUM) utilisée est estimée pour une profondeur prospectable d'un mètre maximum, sur l'ensemble de la zone d'étude, par pixels de 500 m de côté (Piedallu *et al.*, 2011).

Afin de s'assurer de la pertinence des données utilisées, nous avons comparé les valeurs prédites par chacun de ces modèles à des mesures sur le terrain réparties sur toute la France (tableau II). Pour déterminer l'importance du lien entre donnée mesurée et donnée modélisée, nous avons utilisé le coefficient de détermination ( $R^2$ ), une valeur proche de 1 témoignant d'une bonne qualité de prédiction du modèle.

| modèle                | origine des données de validation | effectif du jeu de validation |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| rayonnements solaires | Postes Météo-France               | 86                            |
| températures          | Postes Météo-France               | 493                           |
| précipitations        | Postes Météo-France               | 471                           |
| RUM                   | Réseau Européen Bio Soil          | 542                           |

**Tableau II : Origine et nombre de mesures utilisées pour valider les données nécessaires au calcul des bilans hydriques**

### Détermination de la capacité des indices de bilan en eau à expliquer la distribution des essences

Afin de pouvoir comparer la performance des quatorze indices calculés, nous avons modélisé, en utilisant chacun d'entre eux, la distribution de 37 essences forestières parmi les plus communes naturellement présentes en France (Charme, Châtaignier, Chêne sessile, Chêne pédonculé, Chêne pubescent, Érable champêtre, Érable plane, Érable sycomore, Épicéa, Hêtre, Mélèze...), en utilisant la régression logistique (Ter Braak et Looman, 1986). Elle permet, à partir des relevés floristiques en présence-absence, de prédire le long d'un gradient écologique une probabilité de présence des espèces (Guisan et Zimmermann, 2000). Nous avons utilisé 32 455 relevés de l'Inventaire forestier national (IFN) collectés sur la France entière pendant la période 2004-2009. Pour chaque indice évalué, nous avons comparé un modèle construit à partir de deux variables thermiques calculées sur la période 1961-1990 (le nombre de jours avec des températures supérieures à 5 °C, et le minimum des températures moyennes mensuelles), et un autre ajoutant à ces deux variables thermiques l'indice dont nous voulions évaluer la performance. Les deux variables thermiques ont été choisies car elles sont très utilisées dans la littérature, et caractérisent deux aspects complémentaires : le froid et la chaleur. La qualité de chaque modèle a été évaluée selon l'AUC (*area under the curve*) (Swets, 1988). La différence d'AUC entre le modèle thermique et celui qui intègre en plus une variable hydrique a permis de comparer l'efficacité de chaque indice de bilan hydrique pour prédire la distribution des principales essences forestières. L'indice permettant d'obtenir le gain d'AUC le plus élevé a été utilisé pour réaliser la carte numérique.

### Validation de la carte retenue

La carte de l'indice retenu a été validée à l'aide de différents jeux de données (réseaux RENECOFOR, IFN, placettes de terrain), pour des échelles allant de la France entière, en passant par les Plateaux calcaires du Nord-Est, et jusqu'à la forêt de Bois-l'Évêque, située à 30 km au sud-ouest de Nancy (Meurthe-et-Moselle). À l'échelle nationale, nous avons utilisé 25 placettes du sous-réseau météorologique du réseau RENECOFOR (Ulrich, 1995) où sont collectées des données de sol et de climat permettant le calcul du bilan en eau. Afin de pallier le faible nombre de données disponible à partir de ce réseau, nous avons également utilisé les données nouvelle méthode de la base IFN pour la période 2004-2009, soit 32 544 placettes à l'échelle nationale et 1 124 placettes à l'échelle des Plateaux calcaires du Nord-est. Les données de description des sols ont permis un calcul des réserves utiles maximales (RUM) des sols forestiers

indépendantes de celles utilisées pour la réalisation de la carte. Enfin, des valeurs de RUM ont été estimées sur le terrain dans la forêt de Bois-l'Évêque, sur trois maillages emboîtés de placettes distantes de 250 m (n = 92), de 100 m (n = 47) et de 50 m (n = 36). Pour les jeux de données IFN et de la forêt de Bois-l'Évêque, aucune donnée climatique n'étant relevée sur ces placettes, et nous avons utilisé celles disponibles dans les couches du SIG, seules les variations de RUM étant, de fait, indépendantes.

### Comparaison des informations fournies par la carte de bilan en eau et les catalogues de stations forestières pour le choix des essences

Nous avons comparé les informations fournies par les catalogues de stations forestières et celles apportées par la carte numérique pour estimer la contrainte hydrique et recommander le choix des essences. La région étudiée étant couverte par plusieurs catalogues et guides des stations (Becker *et al.*, 1980 ; Rameau *et al.*, 1985 ; Chouffot *et al.*, 1985 ; Madesclaire *et al.*, 1991), nous avons harmonisé toutes les données stationnelles dont nous disposons à partir des unités décrites dans le guide des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du Nord et de l'Est de la Bourgogne, Milard, 2004), qui couvre la majorité de la zone d'étude.

Nous avons relevé les valeurs de l'indice de contrainte hydrique extraites de la carte numérique pour chaque unité stationnelle cartographiée par le personnel de terrain de l'ONF et du CRPF Champagne-Ardenne. Nous avons déterminé ensuite, pour chaque unité stationnelle, la valeur la plus commune de cet indice (l'optimum), ainsi que les 80 % des valeurs les plus fréquentes, en utilisant la méthode de calcul de l'amplitude écologique (Gégout et Pierrat, 1998). Selon le même principe, nous avons calculé pour quatre essences (Hêtre, Chêne sessile, Frêne et Pin sylvestre) les valeurs de l'indice de contrainte hydrique les plus favorables vis-à-vis de leur distribution ou de leur croissance. Nous avons ainsi comparé, pour chaque unité stationnelle, les contraintes hydriques et les préconisations vis-à-vis de ces essences fournies par le guide et indiquées par la carte numérique.

## RÉSULTATS

### Performance des données élémentaires utilisées

| Modèle              | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | an   |
|---------------------|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|-----------|---------|----------|----------|------|
| Rayonnement solaire | 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 |
| Températures        | 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 |
| Précipitations      | 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    |         |      |       |      |      |         |      |           |         |          |          |      |

**Tableau III : Coefficients de détermination estimés à l'échelle de la France entre les données des modèles utilisés pour le calcul de bilan en eau et des jeux de mesures indépendants, pour chaque mois de l'année et les valeurs moyennes annuelles (an) : modèle de rayonnement solaire Hélios (n=86) , températures (n=493), précipitations (n = 471), et de RUM (n=542)**

À l'échelle de la France, les prédictions sont très bonnes pour les températures ( $R^2 = 0,93$  pour les moyennes annuelles), et bonnes pour les précipitations et le rayonnement solaire ( $R^2 = 0,78$  et  $0,82$  respectivement pour les moyennes annuelles) (tableau III). Ces performances 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, mais aussi certainement d'erreurs de mesures (dans le jeu de calibration mais aussi dans

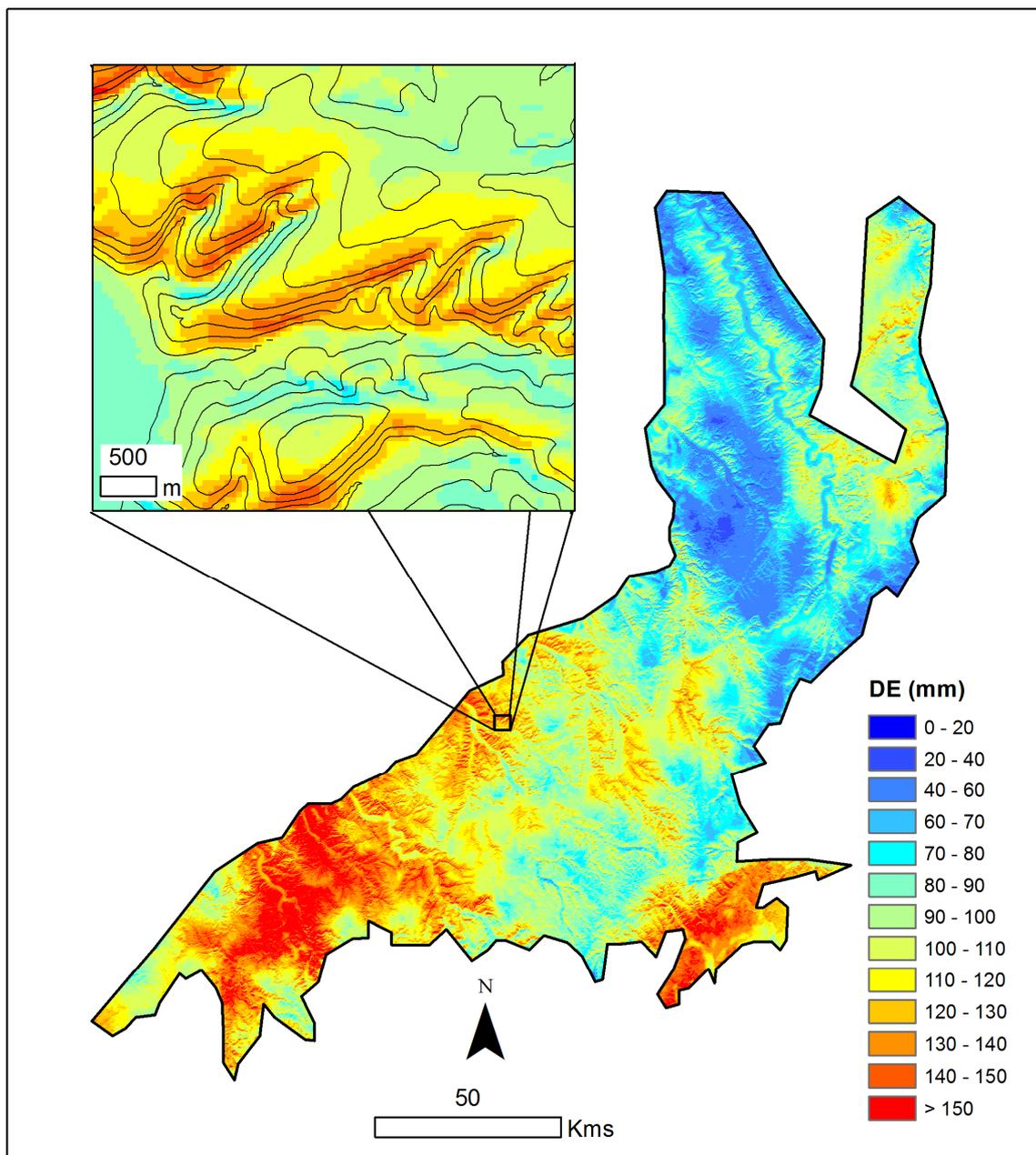
le jeu de validation). De plus, les RUM présentent une variabilité spatiale beaucoup plus importante que les variables climatiques, la profondeur du sol ou la charge en cailloux pouvant varier fortement à des échelles très locales (Mummery *et al.*, 1999). Cette forte variabilité spatiale rend plus difficile 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 carré de 500 m de côté, alors que la validation se fait à l'aide de mesures ponctuelles caractérisant les conditions à l'échelle métrique de la fosse pédologique. Les données locales utilisées pour la validation peuvent ainsi fournir des informations non représentatives du pixel étudié.

### Sélection de l'indice le plus performant pour caractériser la contrainte hydrique

Nous avons comparé la capacité de chaque indice à prédire la distribution de 37 essences forestières, en utilisant le gain d'AUC comme indicateur de la qualité de prédiction des indices (tableau IV). Le meilleur gain d'AUC est obtenu par le déficit d'évaporation (DE) calculé selon la méthode de Thornthwaite. Cet indice résulte de la différence entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR). Si l'ETP représente la demande évaporative des végétaux dans le cas où l'eau disponible n'est pas limitée, l'ETR représente l'eau évaporée et transpirée dans la limite des stocks d'eau disponibles dans le sol. En cas de sécheresse édaphique, les végétaux régulent leur transpiration par une réaction physiologique (fermeture des stomates foliaires). L'ETR devient alors inférieure à l'ETP, proportionnellement à l'intensité de stress hydrique des végétaux. Le déficit d'évaporation représente alors l'intensité du stress hydrique pour les plantes. Cet indice a été sélectionné puis cartographié à l'échelle de la France avec une résolution de 50 m (figure 2).

| période               | Palmer |       |       |       |       |        |       | Thornthwaite |       |       |       |       |        |       |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                       | RU     | DE    | ETR   | IA    | REW   | SI     | SWD   | RU           | DE    | ETR   | IA    | REW   | SI     | SWD   |
| hiver                 | 0,035  |       | 0,014 |       |       | 0,001  |       | 0,035        |       | 0,014 |       |       | 0,001  |       |
| printemps             | 0,035  | 0,001 | 0,011 | 0,001 | 0,010 | -0,012 | 0,002 | 0,035        |       | 0,011 | 0,009 | 0,010 | -0,012 | 0,000 |
| été                   | 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 |
| automne               | 0,031  | 0,010 | 0,019 | 0,009 | 0,013 |        | 0,013 | 0,031        | 0,009 | 0,018 | 0,009 | 0,013 |        | 0,013 |
| annuel                | 0,036  | 0,041 | 0,014 | 0,039 | 0,024 | 0,001  | 0,021 | 0,036        | 0,043 | 0,013 | 0,041 | 0,017 | 0,002  | 0,019 |
| période de végétation | 0,036  | 0,041 | 0,016 | 0,039 | 0,025 |        | 0,021 | 0,035        | 0,043 | 0,016 | 0,041 | 0,018 |        | 0,018 |

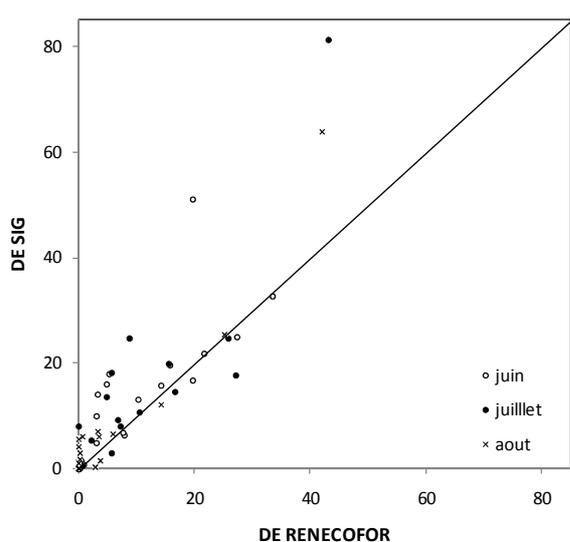
**Tableau IV : Gain moyen d'AUC pour 37 essences, engendré par différents indices caractérisant la contrainte hydrique, en complément du nombre de jours avec des températures supérieures à 5 °C et de la température minimale moyenne du mois le plus froid. Le gain moyen d'AUC indique l'apport de l'indice de bilan en eau considéré une fois pris en compte les aspects thermiques. Il est calculé de la façon suivante : AUC du modèle construit à partir de l'indice hydrique et des deux indices thermiques - AUC du modèle uniquement calibré avec les deux indices thermiques. Le gain d'AUC est plus important pour le déficit d'évaporation (DE) calculé en été selon la méthode de Thornthwaite (valeur surlignée en rouge).**



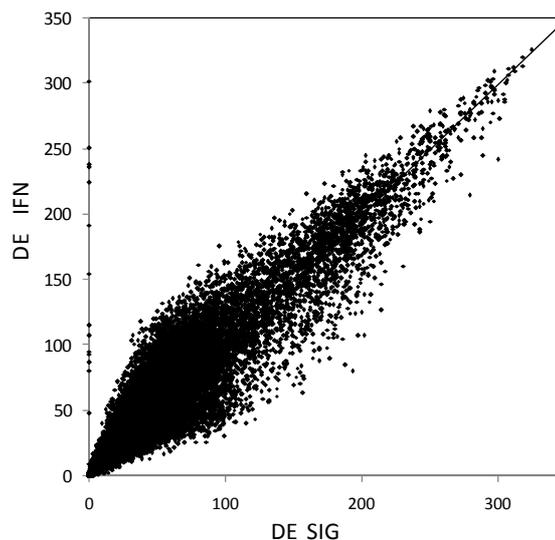
**Figure 2 : Cartographie au pas de 50 m du déficit d'évaporation estival (cumul de juin, juillet et août) calculé à partir des bilans hydriques de Thornthwaite sur la zone des Plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne et zoom au 1/50 000 sur un vallon au sud de Troyes. Une valeur de déficit d'évaporation élevée (couleur rouge) indique une plus forte contrainte hydrique.**

### Validation de la carte des déficits d'évaporation estivaux

À l'échelle nationale, nous avons comparé les valeurs de déficit d'évaporation prédites par la carte à celles calculées à partir des données relevées sur 25 placettes du réseau RENECOFOR (figure 3a). On obtient un  $R^2$  de 0,79 et un écart moyen entre les valeurs prédites et mesurées de 7,5 mm (erreur quadratique moyenne).



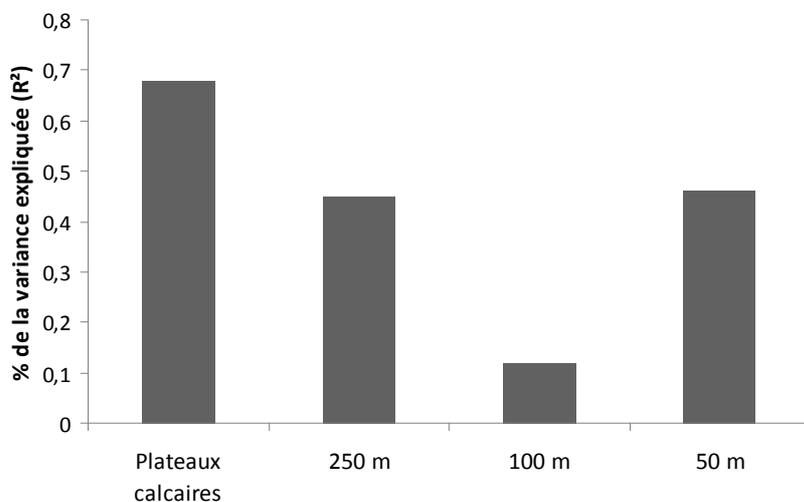
**Figure 3a : Comparaison des valeurs de déficits d'évaporation (DE) extraites de la carte et calculées à partir des données de 25 placettes RENECOFOR réparties sur la France (n = 25 × 3 mois).**



**Figure 3b : Comparaison des déficits d'évaporation estivaux (DE) pour les mois de juin, juillet et août calculés sur la France à partir des données de 32 544 placettes IFN et extraites de la carte numérique.**

Une évaluation complémentaire des données de la carte a été réalisée avec les données de RUM estimées sur les relevés IFN (figure 3b). On obtient un  $R^2$  de 0,88, avec une erreur moyenne de prédiction de 16,4 mm, pour un gradient de déficit d'évaporation variant entre 0 et 300 mm. Ces résultats montrent pour la France une bonne cohérence globale des données de la carte numérique, malgré des différences qui peuvent être parfois importantes, pouvant être attribuées à la forte hétérogénéité locale des RUM.

La capacité de la carte des déficits d'évaporation à prédire la distribution de la ressource en eau a également été évaluée à des échelles plus locales, allant de la région naturelle à la parcelle (figure 4). Les résultats montrent une bonne corrélation à l'échelle des Plateaux calcaires, mais qui a tendance à diminuer à des échelles plus locales. Les différences de performances constatées entre le maillage au pas de 100 m et de 50 m résultent du choix du site : le maillage au pas de 50 m est localisé sur une zone de fortes pentes et donc très contrasté du point de vue des variables utilisées par le modèle de RUM, alors que le maillage au pas de 100 m est principalement localisé sur un plateau plus homogène.



**Figure 4 : Part de la variance des mesures de terrain expliquée par la carte des déficits d'évaporation (DE) à l'échelle des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Bourgogne et Lorraine et sur les différents maillages de Villey-le-Sec et Bois-l'Évêque (pas de 250, 100 et 50 m).**

## Comparaison de la contrainte hydrique estimée selon les guides des stations et la carte numérique

Les guides et catalogues de stations de la zone d'étude donnent une description qualitative de l'eau disponible pour les plantes (Milard, 2004), en qualifiant pour chaque unité stationnelle la ressource en eau de faible à très importante, à partir :

- de la position topographique, qui indique si la zone est une zone de départ latéral d'eau (bord de plateau, haut de pente), d'arrivée (fond de vallon, vallée) ou une zone avec de faibles déplacements latéraux d'eau (plateau, plaine) ;
- de l'exposition, qui fait varier localement l'évapotranspiration (moyenne sur plateaux, faible sur les versants nord et les fonds de vallons confinés, forte sur les versants sud) ;
- d'une estimation moyenne de la RUM par unité stationnelle réalisée à partir d'une synthèse de relevés de terrain ;
- de la flore indicatrice.

On observe une hétérogénéité relativement importante du déficit d'évaporation au sein des unités stationnelles (US), qui permettent de définir cinq classes de réserve en eau à partir du guide (figure 5). Il y a donc une faible 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). À l'inverse, une station considérée comme sèche dans le guide peut présenter des valeurs de déficits d'évaporation relativement faibles (US 2 par exemple).

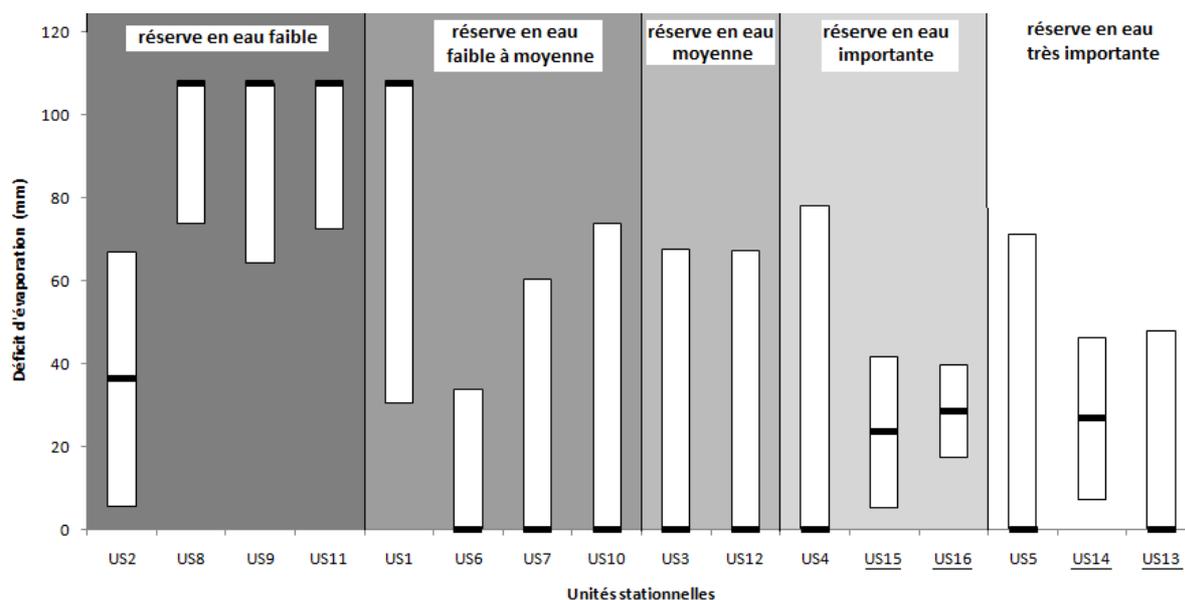


Figure 5 : Comparaison des caractéristiques hydriques des unités stationnelles de la zone d'étude selon les indications données dans les catalogues et extraites de la carte des déficits d'évaporation. Les barres blanches représentent 80 % des valeurs de déficit d'évaporation pour laquelle l'US est présente, la barre noire représentant les valeurs les plus fréquentes. Les unités stationnelles dont le nom est souligné peuvent présenter un engorgement temporaire saisonnier (US 13 à 15) ou permanent (US16).

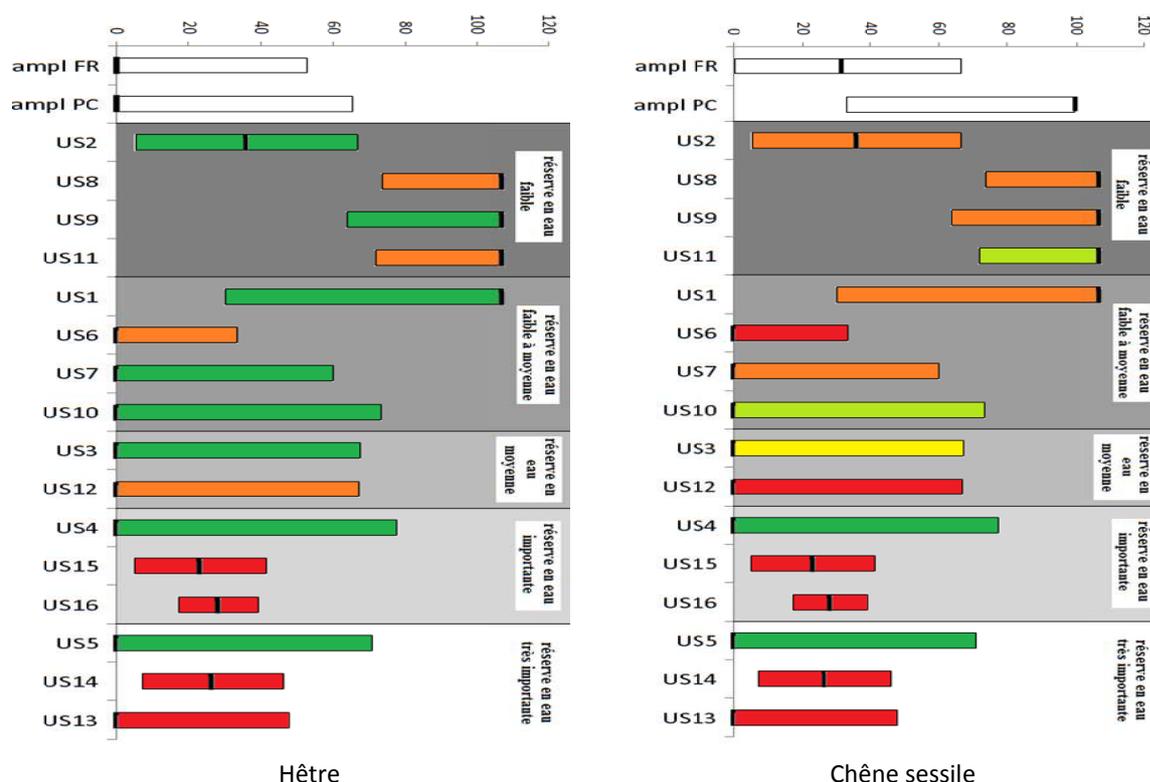
## Comparaison des cartes de stations et de la carte des déficits d'évaporation pour déterminer les potentialités des essences au regard de la contrainte hydrique

Nous avons comparé les conseils de choix d'essences en fonction des ressources en eau décrites dans le guide des stations ou identifiées sur la carte des déficits d'évaporation, en nous focalisant sur quatre

essences ayant des exigences variées : le Hêtre, le Chêne sessile, le Frêne, et le Pin sylvestre (figure 6). Nous avons pour cela identifié pour chaque essence les valeurs de déficits d'évaporation les plus fréquentes. 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 les Plateaux calcaires du Nord-Est de la France que sur le reste du territoire. Cela peut être dû à l'histoire sylvicole de cette région, ou à des problèmes de concurrence avec le Hêtre qui a une régénération très dynamique sur ces zones à forte humidité atmosphérique.

La comparaison entre les deux approches apporte un certain nombre d'enseignements :

- L'essence peut être conseillée par le guide alors que la gamme de déficit d'évaporation ne semble pas adaptée : c'est le cas pour le Hêtre (US 9), ou pour le Chêne sessile (US 11) par exemple.
- Une unité stationnelle peut n'être que partiellement favorable à une essence du point de vue hydrique : c'est le cas par exemple de l'US 1 pour le Hêtre, le Chêne sessile et le Frêne. Pour ces unités stationnelles, un redécoupage pourrait être envisagé en fonction des valeurs seuil de contrainte hydrique mises en évidence.
- L'unité stationnelle présente globalement un gradient hydrique correspondant aux exigences des essences, mais le guide ne préconise pas le choix de ces essences. Cela peut être dû à d'autres facteurs qui peuvent être discriminants pour l'espèce étudiée : c'est le cas par exemple sur les US 12 à 16 pour lesquelles le Hêtre est déconseillé à cause de l'hydromorphie. L'US 6 semble favorable au Frêne et au Hêtre, mais le guide en déconseille l'usage à but productif en raison du mauvais enracinement et de la faible stabilité de ces essences sur les pentes fortes et éboulis qui caractérisent ces stations. Enfin, le guide déconseille le choix du Pin sylvestre sur les US 1, US 2, US 8 et US 9 en raison de la présence de calcaire dans la terre fine de ces sols, que cette essence ne supporterait pas.



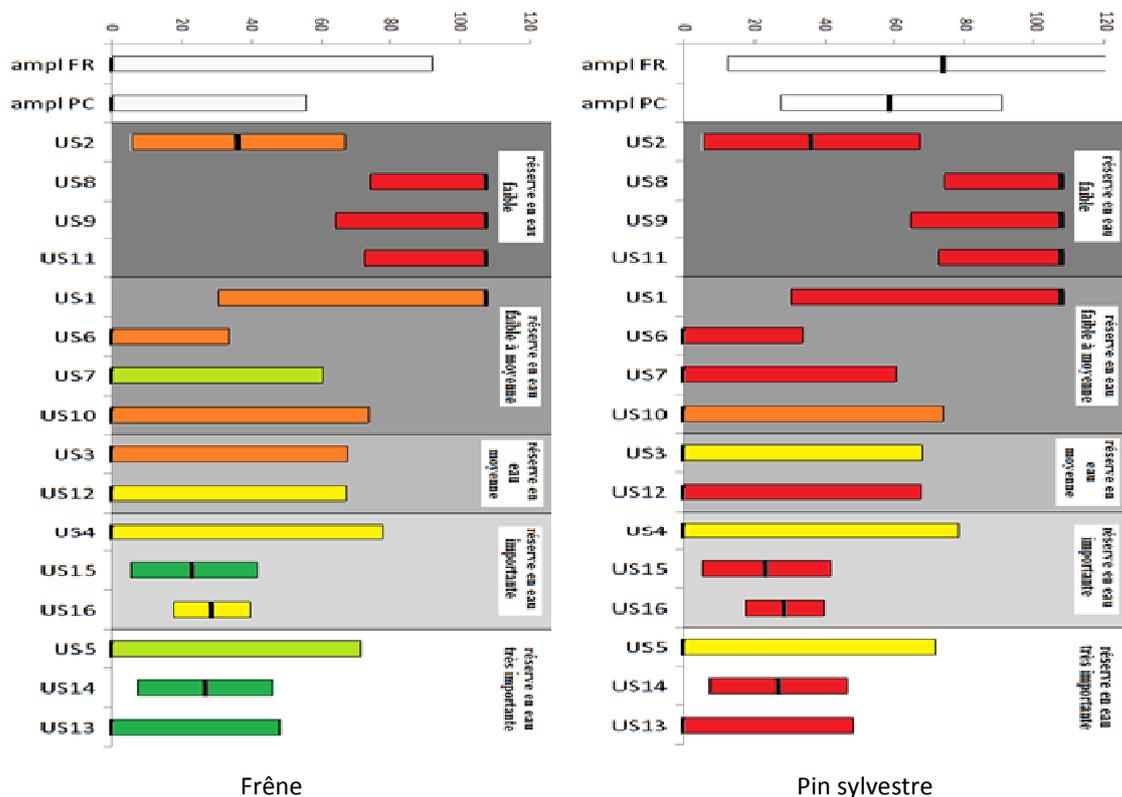


Figure 6 : Essences préconisées pour chaque unité stationnelle (Hêtre, Chêne sessile, Frêne, et Pin sylvestre), au regard de la contrainte hydrique indiquée par le guide des stations et la carte des déficits d'évaporation (DE). Les barres de couleur représentent la gamme de valeurs de DE pour laquelle 80 % des stations de l'US sont présentes. Les couleurs représentent les préconisations vis-à-vis de chacune des essences selon le guide des Plateaux calcaires (Milard, 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. Ont été ajoutées les amplitudes de distribution de ces espèces vis-à-vis du DE (barres blanches) pour la France (ampl FR) et pour les Plateaux calcaires (ampl PC). Les barres noires représentent les optimums.

## Discussion

### Calcul du bilan en eau

Nous avons montré qu'il est possible de réaliser une carte numérique représentant la disponibilité en eau pour les plantes qui reflète assez finement les variations spatiales de la contrainte hydrique tout en ayant du sens pour une gamme d'échelles assez large. Bien que des écarts de performance importants puissent être constatés, le choix de la méthode de calcul (Palmer ou Thornthwaite) et de l'indice le plus pertinent n'est pas évident. Des analyses complémentaires (par exemple une analyse de la redondance des informations contenues par chacun des indices, *via* une analyse des composantes principales) devront être conduites afin de préciser l'intérêt de chacun de ces indices vis-à-vis de la distribution ou de la croissance des essences.

Si les paramètres climatiques nécessaires au calcul de bilans en eau ont montré de fortes relations avec un jeu de mesures indépendantes, ce n'est pas le cas de la RUM des sols. La carte des RUM utilisée pour calculer les bilans hydriques a été construite à partir d'estimations réalisées par l'IFN sur le terrain, qui ont été interpolées (Piedallu *et al.*, 2011). Or les estimations ayant servi à construire et valider la carte sont empreintes d'imprécisions du fait d'erreurs dans l'évaluation « à dire d'expert » des paramètres du sols intervenant dans le calcul (profondeur de sol, texture des horizons et charge en cailloux), et de la très

forte hétérogénéité spatiale rencontrée sur Plateaux calcaires. Nous avons tenté de caractériser cette variabilité à partir de cinq estimations réparties au sein d'une placette carrée de 50 m de côté (Richard, 2011). Du fait du faible temps disponible, seules 10 répétitions ont pu être réalisées. Or nous avons constaté que la RUM estimée ponctuellement au sein d'un même pixel variait en moyenne du simple au double en fonction du lieu de sondage. Nous en avons déduit plusieurs points concernant le contexte des Plateaux calcaires:

- la RUM semble extrêmement variable à une échelle très locale ;
- une seule estimation de terrain de la RUM (par un sondage à la pioche et à la tarière) n'est pas représentative des conditions locales. Il serait possible d'améliorer la pertinence du jeu de validation en multipliant les prélèvements à l'échelle du pixel, afin d'estimer sur le terrain les conditions moyennes du pixel, mais cette méthode est très coûteuse en temps et, de fait, assez 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 ou de la productivité des espèces par exemple).

Dans ce contexte, l'interpolation liée à la réalisation de la carte a pour avantage de lisser les informations estimées sur le terrain qui sont plus ou moins représentatives des conditions locales du fait d'erreurs d'estimation ou de la présence de conditions locales particulières. Ainsi, il a été montré que la capacité de la RUM extraite de la carte à prédire l'indice de fertilité de plusieurs espèces était assez proche de celle estimée directement à partir des placettes (Piedallu *et al.*, 2011). D'autres études ont également montré que des modèles de distribution des espèces ligneuses construits à partir d'indices issus du calcul de bilan en eau des sols étaient de meilleure qualité que ceux fondés uniquement sur la seule composante climatique (Piedallu *et al.*, 2012). La cartographie du bilan en eau des sols, malgré les limites liées à l'estimation de la RUM, semble donc constituer une avancée intéressante par rapport aux indices climatiques traditionnellement utilisés.

### **Avantages et limites de l'approche numérique par rapport à l'approche stationnelle**

Nous avons mis en évidence des différences importantes entre l'approche stationnelle et celle de la carte numérique. L'approche stationnelle permet une estimation qualitative de la ressource hydrique, principalement à partir de données topographiques et de la présence de certaines espèces indicatrices de milieux secs à humides. Le climat est considéré comme peu variable au sein de la zone étudiée, seuls les effets de topographie sont évalués à l'aide de l'exposition. Cette approche a l'inconvénient de se fonder sur des paramètres indirects dont on déduit des corrélations avec la teneur en eau des sols (tableau V). Par ailleurs, l'évaluation de la quantité d'eau disponible pour les plantes à l'échelle de l'unité stationnelle n'est réalisée qu'à dire d'expert. Aucune estimation de RUM n'est réalisée pour évaluer les spécificités locales du site, et la réserve en eau est considérée comme identique au sein d'une même unité stationnelle. Le fait que les unités stationnelles soient rarement discriminantes au regard de la RUM constitue une grande faiblesse des catalogues ou des guides de stations. De plus, les cartes des stations ont été réalisées à partir d'un maillage ponctuel de densité variable (maille de 100 m le plus généralement), qui a ensuite été transformé en couche de polygones "à dire d'expert", ce qui peut engendrer une perte de précision (Bazin et Gaudin, 2003). Cependant, cette approche a l'avantage d'intégrer des données de terrain notamment à travers la flore indicatrice, permettant d'affiner les prévisions en prenant en compte les conditions locales. Elle permet également d'intégrer indirectement les flux latéraux à travers la pente et la position topographique.

La carte des déficits d'évaporation permet une approche quantitative fondée sur un bilan des apports et des pertes d'eau en chaque point de l'espace. Elle prend en compte la variabilité des RUM à moyenne

échelle, et intègre assez finement les effets du climat. Elle a l'avantage de représenter un paramètre ayant une action physiologique sur la plante, comparable d'un point à l'autre du territoire. L'utilisation des données fournies par les modèles du GIEC (IPPC, 2007) permet également de simuler l'évolution du stock d'eau dans le sol selon différentes hypothèses de réchauffement climatique. Les principales limites de cette carte résident dans la difficulté à estimer précisément la capacité de stockage du sol, et dans le fait qu'elle ne prenne pas en compte l'alimentation en eau par les nappes, les apports latéraux en eau, ou encore les effets liés à la neige. Cependant, de futurs développements pourraient permettre ce type d'amélioration (Frankenberger *et al.*, 1999 ; Sheikh *et al.*, 2009). Une autre limite réside dans l'estimation de la RUM uniquement pour le premier mètre de sol, qui ne permet pas de prendre en compte l'effet des racines profondes, dont l'importance est reconnue lors des épisodes de sécheresse (Rambal, 1984 ; Bréda *et al.*, 2006). Enfin, la carte des RUM des sols existe actuellement avec une résolution spatiale de 500 mètres de côté, qui ne permet pas de rendre compte de la variabilité induite très localement par la topographie ou la géologie. Des études récentes ont cependant démontré qu'il était possible d'améliorer la pertinence locale de ces cartes par l'utilisation des informations issues de modèles numériques de terrain et des cartes géologiques du BRGM au 1/50 000 (Richard, 2011 ; Villiers, 2011). Du fait des limites existantes, il est nécessaire de vérifier la cohérence des prédictions lors de l'utilisation de la carte à l'échelle locale, en fonction des connaissances des opérateurs de terrain et de sondages ciblés. La réalisation de relevés de terrain pourrait permettre de corriger d'éventuelles imperfections existantes.

La comparaison de la ressource en eau estimée à l'aide des cartes de déficit d'évaporation ou du guide des stations montre des différences importantes entre ces deux approches, avec une forte hétérogénéité des valeurs de déficit d'évaporation au sein d'une même unité stationnelle. Cela est dû au fait que la carte montre variabilité spatiale de la ressource en eau plus importante, alors que l'estimation des ressources en eau au sein de chaque unité stationnelle est, par définition, uniforme. Ces résultats suggèrent que certaines unités stationnelles pourraient localement ne pas refléter correctement la quantité d'eau disponible pour les plantes, ce qui est d'autant plus vrai que nous avons travaillé sur une emprise importante, concernant plusieurs catalogues ou guides de stations forestières. La carte pourrait ainsi être utilisée pour affiner ou redécouper certaines unités en fonction de la ressource en eau disponible. Dans certains cas, il n'y a pas de cohérence entre les informations fournies par les catalogues et celles fournies par la carte des déficits d'évaporation. Cela tient en partie au fait que les guides ou les catalogues ne prennent pas en compte les apports liés aux précipitations. Il est en effet possible d'avoir une RUM faible (sol de profondeur modérée ou forte charge en cailloux) sans contrainte hydrique forte du fait d'une bonne alimentation en eau (topographie favorable, précipitations élevées) qui peut localement se combiner à une ETP modérée.

|                    | Avantages  | Inconvénients   |
|--------------------|--|---|
| Guide des stations | <ul style="list-style-type: none"> <li>Prise en compte des conditions locales estimées sur le terrain.</li> <li>Prise en compte indirecte des apports latéraux en eau.</li> <li>Méthodologie reconnue permettant une approche multifactorielle.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pas d'intégration de la variabilité climatique (pluie, températures, ETP).</li> <li>Mauvaise prise en compte de la variabilité spatiale de la RUM.</li> <li>Estimation de l'eau disponible avec des facteurs indirects.</li> <li>Pas de variabilité quantifiée au sein des unités stationnelles.</li> <li>Approche non quantitative (pas de simulations de variations du stock d'eau possible).</li> <li>Risque d'erreurs de codages ou de cartographie du fait d'opérateurs multiples.</li> <li>Coût de la cartographie.</li> </ul> |

|                                  |   |   |
|----------------------------------|---|---|
| Carte des déficits d'évaporation | Prise en compte de la variabilité spatiale du climat (pluie, température, rayonnement solaire), et de la RUM.<br>Estimation mécaniste de la quantité d'eau du sol.<br>Prise en compte de la variabilité au sein des unités stationnelles.<br>Permet de simuler l'évolution du stock d'eau du sol dans un contexte de changement de climat.<br>Faible coût de la cartographie. | Imprécision générée par l'utilisation de modèles.<br>Incertitude liée au choix de l'indice et de la méthode de calcul.<br>Difficulté de cartographie des RUM<br>Actuellement, pas de prise en compte des apports latéraux en eau et des apports des nappes (ne permet pas de modéliser les zones humides).<br>Pas de prise en compte des zones d'éboulis. |
|----------------------------------|---|---|

**Tableau V : Avantages et inconvénients des méthodes d'estimation de l'eau disponible pour les plantes utilisant les codages stationnels et la cartographie des déficits d'évaporation**

## **CONCLUSION : PERSPECTIVES D'UTILISATION DE LA CARTE NUMÉRIQUE POUR IDENTIFIER LES RISQUES LIÉS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Dans le contexte de changement climatique actuel, les catalogues ou guides de stations ne prenant pas en compte bilan en eau des sols sont d'un intérêt limité pour évaluer les risques à venir. La création de cartes numériques de déficit d'évaporation permet de caractériser la contrainte hydrique sur de vastes territoires, avec un coût d'investissement relativement faible au regard de celui des collectes des données stationnelles sur le terrain. L'amélioration des outils de gestion existants pourrait se faire selon trois axes différents :

- 1) Le plus pertinent résiderait probablement dans une approche analytique fondée sur des modèles spatialisés caractérisant la distribution ou la croissance d'un grand nombre d'espèces à l'échelle d'un vaste territoire. Ces modèles en plein essor (Seynave *et al.*, 2006 ; Piedallu *et al.*, 2009 ; Cheiab *et al.*, 2012) permettent de caractériser les zones favorables ou défavorables à chaque essence dans des conditions climatiques actuelles ou futures. La carte des déficits d'évaporation permettrait leur amélioration en donnant la possibilité d'intégrer la capacité de stockage en eau des sols aux données climatiques déjà utilisées. L'avantage de cette approche réside dans le fait que les potentialités peuvent être cartographiées en fonction de critères propres à chaque espèce. La principale difficulté est la gestion d'une quantité importante d'information en comparaison de la cartographie synthétique des stations. Par ailleurs, la concordance entre les sorties des modèles et la réalité doit être vérifiée sur le terrain.
- 2) En attendant la disponibilité de telles données, les cartes numériques de déficit d'évaporation pourraient être utilisées en parallèle des catalogues de stations : une carte pourrait être fournie en complément des guides ou catalogues existants, afin de préciser les potentialités des essences et d'évaluer leur sensibilité au changement de climat. Les préconisations pourraient ainsi être modulées au sein d'une même unité stationnelle en fonction de la contrainte hydrique. Pour cela, il serait nécessaire de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour le bon développement de chaque espèce en utilisant par exemple des modèles de niche (Guisan et Zimmermann, 2000). La difficulté consisterait cependant à faire concorder ces deux approches au sein d'un même document.
- 3) Une troisième voie consiste en la réalisation de cartes prédictives des stations. Elles sont élaborées à partir de cartes caractérisant les contraintes climatiques, hydriques et trophiques (Gégout *et al.*, 2008). Les cartes de déficit d'évaporation pourraient se substituer aux cartes de RUM des sols actuellement utilisées, permettant ainsi d'améliorer la prise en compte de l'eau réellement disponible pour les plantes et d'affiner la cartographie des espèces potentiellement favorables. L'enjeu demeure cependant de rendre dynamique cette cartographie dans le temps, en faisant par exemple évoluer la nature de la station en un lieu

donné en fonction des changements climatiques. Cette approche pourrait également être utilisée de façon transitoire.

Ce travail est une première étape qui démontre la possibilité de réaliser des cartes numériques caractérisant la ressource en eau disponible pour les plantes sur de vastes territoires, tout en ayant une pertinence locale. Ce type de carte peut être généralisé assez facilement à d'autres régions naturelles de la France métropolitaine. Des améliorations seront cependant nécessaires afin de mieux prendre en compte les effets locaux dus aux changements de substrats et à la topographie. Cette approche constitue une avancée vers la prise en compte des effets potentiels du réchauffement climatique dans les documents de gestion. Elle permet également de mieux déterminer les gammes de teneur en eau des sols favorables aux différentes espèces, qui sont actuellement mal connues. S'il devient possible de simuler l'évolution du stock d'eau dans le sol selon différentes hypothèses de changement climatique, il ne faut cependant pas perdre de vue que la disponibilité en eau n'est pas le seul paramètre déterminant la répartition ou la croissance des espèces végétales. Les effets des changements de températures ainsi que les paramètres permettant de caractériser la nutrition des sols doivent également être pris en compte. Ainsi, il reste délicat de tirer des conclusions quant à la vulnérabilité des essences face aux changements du climat. L'utilisation de cette carte permet avant tout de déterminer les zones où les conditions hydriques peuvent ou pourraient devenir limitantes en fonction des exigences des différentes espèces. Une vigilance accrue sur ces zones permettrait de confirmer ou d'infirmer les risques, et de progresser dans la compréhension des impacts du réchauffement climatique sur les forêts françaises.

## Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement le CRPF ainsi que les directions territoriales de l'ONF de Champagne-Ardenne, Lorraine et Bourgogne pour avoir fourni les cartes des stations nécessaires à ce travail. Nous remercions aussi les financeurs : le réseau mixte technologique AFORCE pour avoir financé et suivi avec intérêt ce projet, et pour avoir entretenu la discussion au fur et à mesure de l'avancement de ce projet, le GIP ECOFOR, la DRAAF de Lorraine, ainsi que la région Lorraine.

## References

- BAZIN (N.), GAUDIN (S.). - Test d'une méthode de cartographie rapide des stations forestières, synthèse générale - CRPF Champagne-Ardenne, Châlons-en-Champagne, 2003, 47 p.
- BECKER (M.), LE TACON (F.), TIMBAL (J.). - Les Plateaux calcaires de Lorraine. Types de stations et potentialités forestières. - Nancy : ENGREF Éditions, 1980 - 268 p.
- BERTRAND (R.), LENOIR (J.), PIEDALLU (C.), DE RUFFRAY (P.), VIDAL (C.), RIOFRIO-DILLON (G.), PIERRAT (J. C.), GÉGOUT (J. C.). - Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. - *Nature*, n°479, 2011, pp.417-420
- BRÉDA (N.), HUC (R.), GRANIER (A.), DREYER (E.). - Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. - *Annals of Forest Science*, n°63, 2006, pp.625-644.
- BRETHES (A.). - Catalogue des stations forestières du Plateau lorrain. Office National des Forêts - I.N.R.A., Nancy, 1976, 223 p.
- CAJANDER (A. K.). - The theory of forest types. - *Acta Forestalia Fennica*, n°29, 1926, pp.1-108.
- CHEIAB (A.), BADEAU (V.), BOE (J.), CHUINE (I.), DELIRE (C.), DUFRENE (E.), FRANÇOIS (C.), GRITTI (E. S.), LEGAY (M.), PAGE (C.), THUILLER (W.), VIOVY (N.), LEADLEY (P.). - Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. - *Ecology Letters*, n°15, 2012, pp.533-544.
- CHOISNEL (E.). - Le calcul du bilan hydrique du sol : options de modélisation et niveaux de complexité. - *Science du sol*, vol. XXX, 1992, n°1, pp.15-31.

CHOUFFOT (E.), RAMEAU (J. C.). – Catalogue des types de stations forestières des Plateaux bourguignons (3 tomes). – Université de Franche-Comté, Besançon, 1985, 200 p.

FRANKENBERGER (J. R.), BROOKS (E. S.), WALTER (M. T.), WALTER (M. F.), STEENHUIS (T. S.). - A GIS-based variable source area hydrology model. - *Hydrological Processes*, vol. XIII, 1999, pp.805-822.

FRANKLIN (J.). – Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. – *Progress in Physical Geography*, vol. XIX, n°4, 1995, pp. 474-499

GAUDIN, (S.). - La prise en compte des changements climatiques dans les guides de stations. - *Forêt entreprise*, n°180, 2008, pp.34-39.

GÉGOUT (J. C.), PIERRAT (J. C.). - L'autécologie des espèces végétales : une approche par régression non paramétrique - *Écologie* n°29, 1998, pp.473-482.

GÉGOUT (J. C.), PIEDALLU (C.), CORNU (J.), CLUSEAU (C.), - La cartographie prédictive des stations forestières : un nouvel outil au service du gestionnaire - *Revue Forestière Française* 30, 2008, pp.37-60.

GRANIER (A.), BADEAU (V.), BRÉDA (N.). - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. - *Revue Forestière Française*, n°68, 1995, pp.59-68.

GRANIER (A.) et al. - A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. - *Ecological Modelling*, n°116, 1999, pp.269-283.

GUISAN (A.), ZIMMERMANN (N.E.). - Predictive habitat distribution models in ecology. - *Ecological Modelling*, n°135, 2000, pp.147-186.

IPCC - Changements climatiques 2007 : rapport de synthèse. Un rapport du groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007, 103 p.

IPCC - Changements climatiques 2007 : Les bases scientifiques physiques - Contribution du groupe de travail I au 4ème rapport de l'IPCC - Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, 2007, 114 p.

LANDMANN (G.), BRÉDA (N.), HOUILLER (F.), DREYER (E.), FLOT (J.). - Sécheresse et canicule de l'été 2003 : quelles conséquences pour les forêts françaises ? - *Revue Forestière Française*, n°50, 2003, pp.299-306.

LEBOURGEOIS (F.), PIEDALLU (C.). - Comment appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. - *Revue Forestière Française*, vol. LVII, n°4, 2005, p.331-356.

LEGAY (M.), CORDONNIER (T.), DHÔTE (J. F.). - Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques. - *Revue Forestière Française*, n°60, 2008, pp.181-190.

LEGAY (M.), MORTIER (F.), LECREULX (P.), CORDONNIER (T.). - Changement climatique et gestion forestière : tirons les premiers enseignements. - *Rendez-vous Techniques* n°3 Hors-série "Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques", Office national des forêts, 2007, pp.95-102.

MADESCLAIRE (A.), RAMEAU (J. C.). – Le choix des essences sur les Plateaux calcaires de Lorraine. Guide pour l'identification des stations. - CRPF Lorraine-Alsace, 1991, 36 p.

MCBRATNEY (A. B.), MENDONCA SANTOS (M. L.), MINASNY (B.). - On digital soil mapping. - *Geoderma* n°117, 2003, pp.3-52.

MILARD (L.). - 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 Croigny, 2004, 116 p.

MOISSELIN (J. M.), SCHNEIDER (M.), CANELLAS (C.), MESTRE (O.). - Les changements climatiques en France au XXème siècle. Étude des longues séries homogénéisées de données de températures et de précipitations. - *La Météorologie*, 2002, pp.45-56.

MUMMERY (D.), BATTAGLIA (M.), BEADLE (C. L.), TURNBULL (C. R. A.), McLEOD (R.). - An application of terrain and environmental modelling in a large-scale forestry experiment. - *Forest Ecology & Management* n°118, 1999, pp.149-159.

NINYEROLA (M.), PONS (X.), ROURE (J. M.). - A methodological approach of climatological modelling of air temperature et precipitation through GIS techniques. - *International Journal of Climatology* n°20, 2000, pp.1823-1841.

NIX (H. A.), FITZPATRICK (E. A.). - An index of crop water stress related to wheat and grain sorghum yields. - *Agricultural Meteorology*, n°6, 1969, pp.321-337.

PALMER (W.C.). - Meteorological drought. Office of Climatology - Weather Bureau, Washington D.C. 1965, 59 p.

PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J. C.), PEREZ (V.), LEBOURGEOIS (F.), FIELD (R.). - Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. - *Global Ecology and Biogeography*, 2012, doi : 10.1111/geb.12012.

PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J. C.). - Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. - *Annals of Forest Science*, n°64, 2007, pp.899-909.

PIEDALLU (C.), GÉGOUT (J. C.), BRUET (A.), SEYNAVE (I.). - Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. - *Geoderma*, n°160, 2011, pp.355-366.

PIEDALLU (C.), PEREZ (V.), GÉGOUT (J. C.), LEBOURGEOIS (F.), BERTRAND (R.). - Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. - *Revue Forestière Française* vol. LXI, n°6, 2009, pp.567-593.

RAMBAL (S.). - Water-balance and pattern of root water-uptake by a *Quercus coccifera* L. evergreen scrub - *Oecologia* n°62, 1984, pp.18-25.

RAMEAU (J. C.), DIDIER (B.). - Typologie des stations forestières de Haute-Marne tome 1 : Plateaux Calcaires, Vallée Oxfordienne. - ONF et CRPF Champagne-Ardenne, DDAF Haute-Marne, 1985, 414 p.

RICHARD (J. B.). - 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 Champagne-Ardenne, de Lorraine et de Bourgogne - Rapport de fin d'études FIF, AgroParisTech-ENGREF, Nancy, 2011, 140 p.

RIOU-NIVERT (P.). - Changements climatiques : les interrogations des sylviculteurs. - *Forêt entreprise*, n°180, 2008, pp.14-27.

SCULL (P.), FRANKLIN (J.), CHADWICK (O. A.), McARTHUR (D.). - Predictive soil mapping: a review. - *Progress in Physical Geography*, n°27, 2003, pp.171-197.

SEYNAVE (I.), GÉGOUT (J. C.), HERVE (J. C.), DHÔTE (J. F.). - Facteurs écologiques et production du Hêtre en France. - *Forêt Entreprise*, n°167, 2006, pp.41-45.

SHEIKH (V.), VISSER (S.), STROOSNIJDER (L.). - A simple model to predict soil moisture: Bridging Event et Continuous Hydrological (BEACH) modelling. - *Environmental Modelling & Software*, n°24, 2009, pp.542-556.

STEPHENSON (N.L.). - Climatic control of vegetation distribution: The role of the water balance. - *The American Naturalist*, n°135, 1990, pp.649-670.

STEPHENSON (N.L.). Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. - *Journal of Biogeography*, n°25, 1998, pp.855-870.

SWETS (J. A.). Measuring the Accuracy of Diagnostic Systems. - *Science* 240, 1988, pp.1285-1293.

TER BRAAK (C. J. F.), LOOMAN (C. W. N.). - Weighted averaging, logistic regression and the Gaussian response model. - *Vegetatio* n°65, 1986, pp.3-11.

THORNTHWAITE (C. W.), MATHER (J. R.). The water balance. Laboratory of Climatology - *Climatology*, n°8, 1955

TURC (L.). - Évaluation des besoins en eau d'irrigation et évaporation potentielle. - *Annales agronomiques*, n°12, 1961, pp.13-49.

ULRICH (E.). - Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation - *Revue Forestière Française*, n°2, 1995.

VILLIERS (T.). - Cartographie prédictive à haute résolution spatiale de la réserve utile maximale du sol dans le Nord-est de la France. - Rapport de fin d'études FIF, AgroParisTech-ENGREF, Nancy, 2011, 69p.

|  |   |
|--|---|
| <p>Jean-Baptiste Richard<br/> Ingénieur chargé de mission<br/> CRPF Champagne-Ardenne<br/> Complexe agricole du Mont Bernard<br/> Maison régionale de la forêt et du bois<br/> 51 000 Châlons-en-Champagne<br/> jeanbapt.richard@gmail.com</p>     | <p>Christian Piedallu<br/> Ingénieur de recherche en écologie forestière<br/> spécialiste en géomatique</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. AgroParisTech, UMR1092, Laboratoire d'étude des ressources forêt bois (LERFoB)<br/> ENGREF, 14 rue Girardet, CS14216,<br/> FR-54042 Nancy Cedex France</li> <li>2. Centre INRA de Nancy,<br/> F-54280 Champenoux, France</li> </ol> |
| <p>Sylvain Gaudin<br/> Ingénieur expérimentation et développement<br/> CRPF Champagne-Ardenne<br/> Complexe agricole du Mont Bernard<br/> Maison régionale de la forêt et du bois<br/> 51 000 Châlons-en-Champagne<br/> sylvain.gaudin@crpf.fr</p> | <p>Myriam Legay<br/> Responsable du Pôle recherche et développement de Nancy<br/> Office national des forêts<br/> 11 rue de l'Île de Corse<br/> 54000 Nancy</p>   |

## Résumé

Nous avons calculé les bilans hydriques édaphiques sur la France à partir des données climatiques et édaphiques spatialisées, que nous avons tout d'abord évaluées comme les plus fines spatialement et les plus pertinentes. De ces bilans ont été identifiés et spatialisés à l'aide d'un outil de cartographie numérique quatorze indices de disponibilité en eau pour les plantes. La capacité de chaque indice à prédire la distribution des principales essences forestières a été testée afin d'identifier l'indice le plus explicatif de cette distribution. L'indice sélectionné a alors été cartographié à l'échelle des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Bourgogne et Lorraine, et les potentialités et limites de l'intégration de cette carte aux catalogues et guides de station afin d'adapter ceux-ci à aux changements climatiques ont enfin été discutés.