

Cartographie de la contrainte hydrique des sols forestiers

Exemple sur les plateaux calcaires du Nord-Est de la France

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

Les catalogues de station forestière ont été conçus dans un contexte où le climat était considéré comme stable, et il est aujourd'hui difficile de prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans le choix des essences. Le renouveau des méthodes de spatialisation en lien avec l'utilisation des systèmes d'informations géographiques a permis de réaliser une carte numérique représentant la contrainte hydrique pour les plantes en tout point de l'espace. Combinée avec des scénarios d'évolution du climat et connaissant les exigences écologiques des espèces, cette carte pourra être utilisée pour améliorer le découpage des stations, déterminer les zones potentiellement vulnérables et affiner les recommandations des essences.

Ce projet a été mené en partenariat entre le Lerfob^(a) du centre AgroParistech-Engref de Nancy, les CRPF Champagne Ardenne et Lorraine, le pôle recherche et développement de l'ONF ainsi que les directions territoriales Lorraine et Bourgogne-Champagne-Ardenne de l'ONF. Son objectif était de créer, de valider et de déterminer l'utilisation possible pour le forestier de cartes numériques décrivant la variabilité spatiale de l'eau du sol. Reconnue à la fois comme étant un des facteurs les plus importants vis-à-vis de la ressource forestière, elle est probablement l'un des plus affectés par le changement climatique.

Cependant, son estimation, qui se fait traditionnellement à l'échelle de la parcelle, nécessite de relever de nombreux paramètres, rendant cette approche impossible sur de vastes échelles. La caractérisation de la contrainte hydrique à l'échelle de la région naturelle est aujourd'hui très

difficile à réaliser pour le gestionnaire et se fait là où des catalogues où des guides de stations existent, de façon qualitative à travers l'utilisation de quelques critères simples à relever. Le développement depuis une quinzaine d'années des systèmes d'informations géographiques et des méthodes de cartographie numérique des facteurs écologiques ouvre de nouveaux horizons.

Cependant, la contrainte hydrique est le plus souvent caractérisée à l'aide de données climatiques qui ne prennent pas en compte la capacité du sol à stocker l'eau.

Nous avons calculé au cours de ce projet une carte numérique décrivant les variations spatiales de la ressource en eau des sols à l'échelle d'une région naturelle de taille importante. Nous faisons le point sur la nature de l'information produite, les avantages et les inconvénients liés à leur utilisation, ainsi qu'à leur intérêt pour des besoins

pratiques. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur l'exemple du Guide pour le choix des essences des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne⁽¹⁾.

Réalisation de la carte de la contrainte hydrique

Le principe du calcul du bilan hydrique a été utilisé dans une forme simplifiée, permettant d'évaluer mensuellement la contrainte en eau, dans la limite de la réserve utile maximale des sols, disponible en tout point de la zone étudiée (RUM^{(b)(2)}). Chaque mois, les apports sont matérialisés par les précipitations estimées à la surface de la canopée qui s'ajoutent au stock d'eau présent à la fin du mois précédent. Les départs sont matérialisés par l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui est conditionnée par les températures et le rayonnement solaire. Lorsque les départs sont supérieurs aux apports, la réserve utile (RU^(c)) diminue.

Lorsque la quantité d'eau disponible dans le sol n'est plus en quantité suffisante pour satisfaire l'ETP, on parle alors d'évapotranspiration réelle (ETR), dont la valeur est inférieure à celle de l'ETP. Les quatre intrants nécessaires à ce calcul (pluie, température, rayonnement solaire et RUM des sols) existent sous forme de cartes numériques réalisées par le Lerfob. La carte des RUM (réserve utile maximale) a été construite à partir d'estimations de terrain concernant le premier mètre de sol. Elle se base sur plus de 100 000 placettes de l'IFN pour lesquelles la RUM a été évaluée selon les classes de pédotransfert d'Al Majou ^(d), donnant lieu à une cartographie par cellules de 500 m de côté qui prend en compte la variabilité des grandes unités géologiques et de la topographie ⁽³⁾.

Pour les données climatiques, nous avons utilisé des cartes produites par le Lerfob indiquant des valeurs moyennes mensuelles pour la période 1961-1990, par pixels de 50 m de côté pour le rayonnement solaire et la température et par pixel de 1 km de côté pour les précipitations. Le calcul du bilan en eau permet de produire différents indices pour chaque mois de l'année, comme la réserve utile (RU), qui représente l'eau disponible pour les plantes, ou 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).

Dans le cadre du projet, nous avons choisi d'utiliser le déficit d'évaporation estival pour caractériser la contrainte hydrique des sols, cet indice permettant une bonne discrimination des aires de distribution des principales essences françaises ⁽⁴⁾. La carte réalisée couvre la zone des plateaux calcaires du Nord-est de la France, par pixels de 50 m de côté.

Figure 1 : principe du bilan en eau des sols simplifié utilisé pour calculer les cartes mensuelles de contrainte hydrique

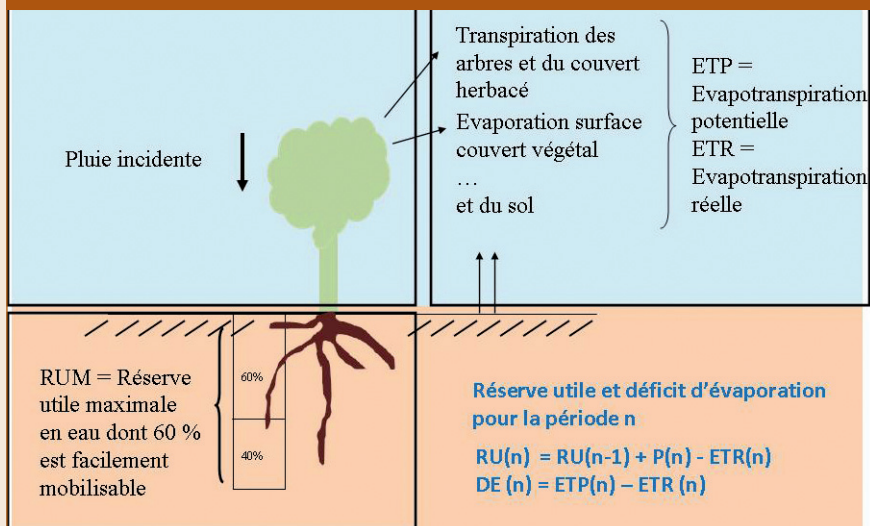


Figure 2 : cartographie du déficit d'évaporation estival (cumul de juin, juillet et août) sur la zone des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne et zoom au 1/50 000^e sur un vallon au sud-est de Troyes. Une valeur de déficit d'évaporation élevée (couleur rouge) indique une plus forte contrainte hydrique.

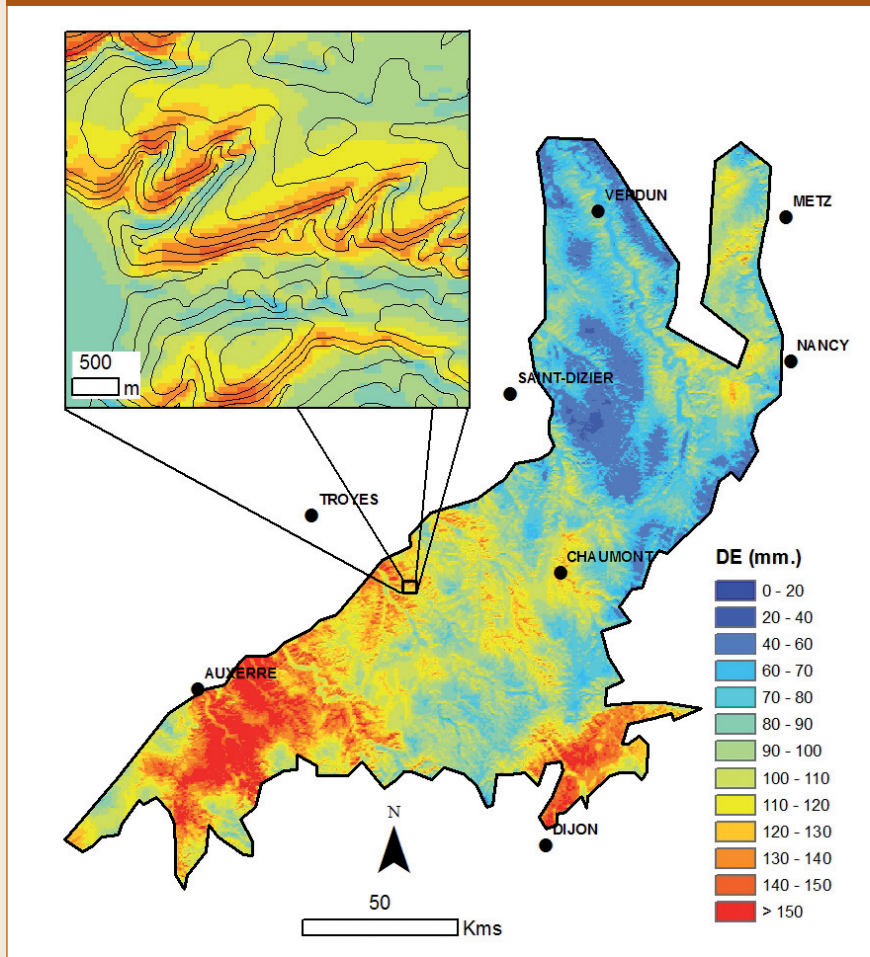
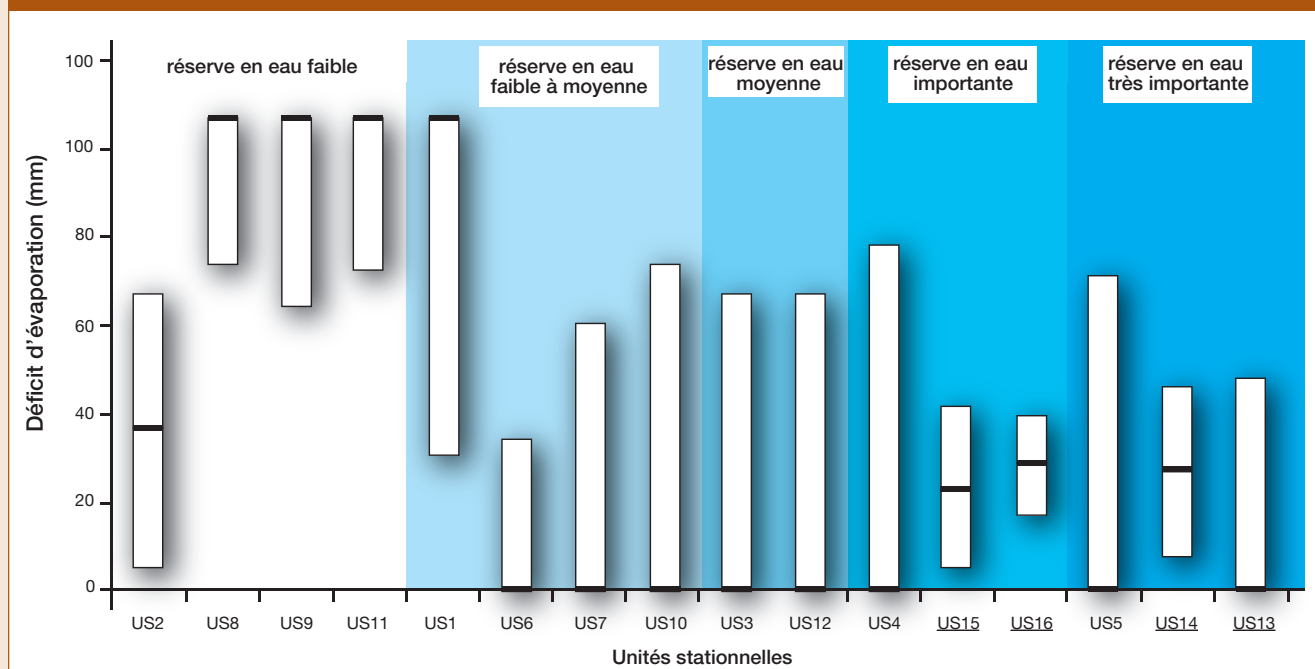


Figure 3 : réserve en eau pour les plantes estimée pour chaque unité stationnelle (US) selon les indications fournies dans le guide pour le choix des essences des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne et extraites de la carte des déficits d'évaporation estivale (une valeur élevée correspond à un stress hydrique plus élevé).

La barre blanche correspond à la gamme des déficits d'évaporation majoritairement rencontrée au sein d'une unité stationnelle. Le trait noir correspond aux valeurs de déficit d'évaporation les plus fréquemment rencontrées pour chaque unité stationnelle.



Caractéristiques de la carte produite

La carte réalisée met en évidence aussi bien des variations à large échelle dues aux changements de RUM des sols ou du climat, que des variations locales induites par la topographie. Par exemple, on observe des différences entre les versants nord ou les zones confinées plus humides, et les versants sud plus secs, d'autant plus que la pente est forte. La cohérence des données produites a été vérifiée par comparaison avec des estimations réalisées à l'aide de relevés de terrain, montrant la pertinence de la carte pour une gamme d'échelle allant de l'ensemble de la zone d'étude jusqu'à quelques parcelles forestières^(4, 5). La principale difficulté rencontrée lors de son élaboration provient de la difficulté à quantifier la RUM des sols sur le terrain. La répétition de cinq estimations de RUM dans un rayon de 25 m a montré une variabilité importante,

avec des valeurs de RUM pouvant varier du simple au double⁽⁴⁾. Ces différences s'expliquent par les imprécisions liées aux données relevées sur le terrain et aux méthodes utilisées pour le calcul de la RUM, et surtout par une forte variabilité locale dans un contexte de plateaux calcaires.

Comparativement à une estimation ponctuelle, la carte restitue une tendance moyenne permettant de lisser les valeurs prédites, ce qui permet de minimiser l'effet d'erreurs d'observation ou de relevés non représentatifs de la zone inventoriée. Par contre, du fait de ce lissage, la carte ne permet pas de restituer finement les effets liés aux changements brusques de nature du sol ou la présence de très petites unités. Des travaux menés en parallèle ont cependant montré qu'il était possible d'améliorer la qualité des estimations des RUM aux échelles les plus locales, en prenant en compte les in-

formations des cartes géologiques numériques du BRGM^(e) au 1/50 000^e pour affiner les prédictions⁽⁵⁾. Il existe donc un potentiel d'amélioration non négligeable de la prise en compte de la variabilité locale des RUM par rapport à la carte qui est présentée ici. Malgré la difficulté d'évaluation de la capacité de stockage du sol, **il a également été démontré que les cartes de bilan hydrique des sols ainsi produites étaient plus efficaces pour discriminer la distribution des essences comparativement aux cartes de pluies ou de bilans hydriques climatiques calculées par différence entre la pluie et l'ETP et traditionnellement utilisées⁽⁶⁾.**

Mise en relation de la carte avec le guide pour le choix des essences

La comparaison de la contrainte hydrique déterminée pour chaque unité stationnelle (US) selon les indications



© B. Jabiol, AgroParisTech

Évaluation sur le terrain de la réserve en eau maximale disponible pour les arbres afin de valider les modèles réalisés.

du guide pour le choix des essences locales, avec celle indiquée par la carte, montre globalement une **faible concordance entre les deux approches**. Pour une même unité stationnelle, on observe que la gamme des déficits d'évaporation prédite par la carte peut être conséquente. Cela s'explique principalement par la combinaison des variables de rayonnement solaire, de température, de précipitation et de RUM qui permet d'identifier une forte hétérogénéité spatiale des déficits d'évaporation, qui n'est pas bien restituée par la carte des stations. Plus l'emprise géographique concernée est importante, plus les différences sont fortes, les documents de gestion donnant des estimations de réserve en eau uniques au sein de chaque unité stationnelle et supposant le climat relativement homogène à l'échelle de la région naturelle. Par exemple, une faible réserve en eau est attribuée aux situations de plateau avec un sol caillouteux, alors qu'on observe des variations relativement importantes de la pluviométrie estivale sur de faibles distances, qui permet-

tent de fortement limiter le déficit en certains endroits.

Utilisation et limites de la carte produite

La réserve en eau n'est en général pas explicitement évaluée lors de la cartographie des stations sur le terrain, elle est le plus souvent estimée indirectement à travers des indices topographiques (pente, exposition, position topographique), la flore indicatrice ou des informations faciles à relever concernant le substrat (texture, charge en cailloux, ...).

La carte des déficits d'évaporation permet de fournir une information synthétique intégrant les effets du climat et du sol en tout point de la zone étudiée et à moindre coût. Elle peut être utilisée à l'échelle d'un ou de plusieurs catalogues ou guides des stations pour affiner la détermination des unités stationnelles ou redécouper celles existantes selon des critères hydriques plus fins. En lien avec les exigences écologiques des espèces, elle peut également servir à affiner les recommandations des essences en fonction de leur capacité à résister aux sécheresses. L'utilisation d'une approche quantitative permet d'évaluer la contrainte hydrique de façon similaire quelle que soit la zone étudiée, et ainsi de pouvoir effectuer des comparaisons entre différents secteurs, pouvant appartenir à des régions naturelles éloignées.

Il est ainsi possible d'évaluer les seuils de contrainte hydrique supportés par les essences en examinant leur comportement dans les régions plus méridionales.

La carte produite peut également être couplée avec les scénarios de changement climatique produits par le GIEC afin d'estimer l'évolution de la contrainte hydrique à diverses échelles de temps. **Elle constitue ainsi un moyen de quantifier l'impact poten-**

tiel des changements prévus de températures et de précipitations sur la ressource en eau disponible selon la zone étudiée.

La carte produite comporte aussi un certain nombre de limites qui doivent être considérées lors de son utilisation. Tout d'abord, les données utilisées sont issues de modèles mathématiques qui restituent dans l'ensemble correctement la distribution spatiale des phénomènes observés à l'échelle globale, mais qui peuvent présenter localement des imprécisions ou des erreurs.

D'autre part, la RUM des sols est probablement sous estimée sur l'ensemble du site d'étude. Les racines profondes des arbres peuvent descendre à une profondeur plus importante que celle prise en compte pour son estimation (1 m maximum), et ce particulièrement dans un contexte de plateaux calcaires fortement fragmenté. Or, l'effet des racines profondes est reconnu pour son importance lors d'épisodes de stress hydriques marqués. De plus, la carte des déficits d'évaporation ne prend pas en compte les apports latéraux en eau dus à la topographie ou aux nappes. La disponibilité en eau est ainsi probablement particulièrement sous estimée en zone de bas de versant et à proximité des cours d'eau ou des nappes phréatiques proches de la surface. Des travaux complémentaires sont envisagés afin de permettre la prise en compte d'une part de ces effets. Enfin, elle n'est pas valide dans certaines zones particulières que sont les éboulis, les tourbières et les zones humides, dont les spécificités ne peuvent être restituées par les modèles.

Conclusions

Le développement des cartes numériques touchant aux propriétés des sols permet de mettre à disposition des

gestionnaires un nouvel outil, pour affiner le choix des espèces et contribuer à l'adaptation des forêts vis-à-vis des effets du changement climatique. La carte produite lors de cette étude sera mise à disposition sur le site web de l'équipe écologie forestière du Lerfob (<https://www2.nancy.inra.fr/unites/lerfob/ecologie-forestiere/>).

La méthode de cartographie mise en œuvre peut être facilement appliquée à différentes régions naturelles situées en France. Elle présente l'avantage de fournir une information en tout point de l'espace, y compris dans les zones où il n'existe pas de catalogues ou de cartographies de terrain. Les modèles utilisés peuvent présenter localement des imprécisions, particulièrement pour ce qui concerne la RUM des sols lorsqu'il y a d'importantes variations locales de substrats. Pour un usage opérationnel, il est donc conseillé de vérifier la pertinence de la carte au regard des connaissances de terrain, et de réaliser quelques sondages ciblés afin de valider localement la variabilité prédite. En cas d'erreurs constatées, des mesures de terrain sur la zone incriminée peuvent permettre de corriger les problèmes liés à la prise en compte du sol. Les descriptions existantes qui peuvent refléter des conditions locales particulières à travers l'usage de la flore indicatrice par exemple, peuvent également être uti-

lisées pour corriger ou affiner localement la carte des déficits d'évaporation. L'amélioration, la diffusion et l'utilisation de ces données doivent être favorisées par une collaboration entre organismes de recherche et gestionnaires forestiers, telle que celle qui a été initiée lors de ce projet financé par le réseau Aforce et le GIP Écofor. ■

Christian Piedallu, Jean-Baptiste Richard, AgroParisTech-Engref Nancy.

Sylvain Gaudin, CRPF de Champagne Ardenne. Myriam Legay, ONF pôle recherche et développement de Nancy.

a) Laboratoire d'Étude de la Ressource Forêt-Bois

b) La réserve utile maximale ou RUM représente la quantité maximale d'eau disponible pour les plantes qu'un sol peut contenir.

c) La RU représente la quantité d'eau réellement disponible pour les plantes, elle est égale à la RUM lorsque les pluies ont permis de reconstituer la réserve, et tend vers 0 pendant les périodes de sécheresse.

d) Les classes de pédotransfert permettent de convertir les classes de texture relevées sur le terrain en teneur en eau pour un volume de sol donné. Les classes développées par Al Majou, plus efficaces que celles de Jamagne qui sont plus connues des forestiers, ont été utilisées pour ce travail dont la méthodologie a été décrite dans un article scientifique publié dans une revue internationale (3).

e) Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Résumé

L'eau disponible pour les plantes est évaluée dans les guides ou catalogues de stations à l'aide de données topographiques, de la flore indicatrice, ou de paramètres du sol faciles à relever. Cette méthode ne permet pas de rendre compte de la variabilité du climat et des effets des changements en cours. Une nouvelle approche est basée sur la réalisation de cartes numériques de la contrainte hydrique permettant d'évaluer en tout point de l'espace la ressource disponible pour les plantes, dans un contexte climatique actuel ou selon différentes hypothèses de réchauffement climatique.

Mots-clés : cartographie, bilan en eau des sols, catalogues de stations.

Bibliographie

- (1) Milard, L., 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, 76 p.
- (2) Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. *The water balance*. Laboratory of Climatology, Publication in Climatology. n°8.
- (3) 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, pp. 355-366.
- (4) Richard, J., 2011. *Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières - Applications aux plateaux calcaires de Lorraine et de Bourgogne - Rapport de stage FIF 3^e année, Agroparistech-Engref, Nancy, France, p. 135.*
- (5) Villiers, T., 2011. *Cartographie prédictive à haute résolution spatiale de la réserve utile maximale du sol dans le Nord-Est de la France*. Rapport de stage FIF 3^e année, Agroparistech-Engref, Nancy, France, p. 69.
- (6) Piedallu, C., 2012. *Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et la croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique*. Thèse, spécialité sciences forestières et du bois. AgroParisTech, Nancy, France, p. 281.