

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, Champagne-Ardenne et Bourgogne -



Mémoire de fin d'études

Source des illustrations (page précédente) :
Photographie : Jean-Baptiste Richard
Carte numérique : Base de données Digitalis LERFoB

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, Champagne-Ardenne et Bourgogne -

Mémoire de fin d'études

Jean-Baptiste RICHARD
18^e Promotion, 2007 - 2011

Septembre 2011

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Caractérisation des contraintes hydriques des sols forestiers à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues des stations forestières. Application aux plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne et Bourgogne	Mots clés : Contraintes hydriques, cartographie prédictive, déficit d'évaporation, catalogue de stations
AUTEUR : Jean-Baptiste RICHARD	Promotion : FIF 19
Caractéristiques : 1 volume ; 150 pages ; 57 figures ; 20 tableaux ; 1 carte	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : AgroParisTech ENGREF – LERFoB et CRPF Champagne Ardenne		
Nom du responsable : Christian PIEDALLU Fonction : Ingénieur de recherche		
Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : Christian PIEDALU		
Tronc commun <input checked="" type="checkbox"/>	Stage en entreprise <input type="checkbox"/>	Autre <input type="checkbox"/>
Option <input type="checkbox"/>	Stage à l'étranger <input type="checkbox"/>	
D. d'approfondissement <input type="checkbox"/>	Stage fin d'études <input checked="" type="checkbox"/>	
Date de remise : septembre 2011		
Contrat avec Gref Services Nancy <input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON		

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

- Consultable et diffusable
- Confidentiel de façon permanente
- Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

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 sept 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.

Abstract

We calculated soil water balance for the whole France using climatic and edaphic data that we first identified as most accurate. From this balance, we extracted and spatialized seven indices of water availability for plants using a digital mapping software. For each index we tested its ability to predict the distribution of the main forest tree species to identify the most efficient to explain this distribution. The selected index has been mapped at the scale of the Champagne-Ardenne, Lorraine and Bourgogne limestone plateau, and the potentiality and limits of the integration of this map to the forest station guides and catalogues have been discussed.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'avancement de mes travaux.

Tout d'abord, je remercie l'Office national des forêts, le Centre de la propriété forestière, l'Inventaire forestier national ainsi que le réseau RENCOFOR pour m'avoir fourni les données nécessaires à mes travaux.

Merci à Thomas Villiers et à Grégoire Thauvin pour les débats techniques et méthodologiques qu'ils ont nourris, ainsi que pour la bonne humeur partagée tout au long de ces huit mois de stage.

Merci encore à Marie, Pierre, Gaby, Romain, Vincent, ainsi que l'ensemble de l'équipe du LERFoB pour leurs conseils techniques et le partage de leur savoir faire en matière de logiciels statistiques ou SIG, d'écologie des essences, de changement climatique.

Je n'oublie pas non plus les membres de l'équipe du CRPF Champagne-Ardenne pour m'avoir si bien accueilli et pour m'avoir apporté leurs connaissances et leurs remarques quant au sujet. Je tiens à adresser une mention spéciale à Laurence Carnnot Milard, pour m'avoir aidé à comprendre les subtilités du guide des stations qu'elle a rédigé.

J'adresse de plus mes remerciements aux membres du RMT AFORCE impliqués dans ce projet, pour l'avoir suivi avec intérêt et entretenu la discussion au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Enfin, je tiens particulièrement à remercier chaleureusement Christian Piedallu et Sylvain Gaudin, encadrants du stage, pour leur soutien, leurs conseils et surtout le temps qu'ils m'ont consacré sans compter malgré leur emploi du temps surchargé.

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	3
Table des annexes	6
Listes des figures	8
Liste des tableaux	12
Index alphabétique des sigles et abréviations	14
Introduction : présentation de l'étude et objectifs généraux.....	15
1. Localisation de l'étude et contexte général.....	16
1.1. Présentation de la zone d'étude.....	16
1.1.1. Localisation, géologie et climat	16
1.1.2. Couverture de la zone par les différents catalogues et guides de station	17
1.2. Le changement climatique et ses impacts sur la forêt française	18
1.3. Impact des changements climatiques sur la foresterie en France	21
1.3.1. Revue des différents impacts	21
1.3.2. Impacts sur la distribution des essences	22
1.3.3. Impacts sur la productivité forestière	23
1.3.4. Adaptation des forêts aux changements climatiques	24
1.4. Estimation du bilan hydrique édaphique	27
1.4.1. L'eau du sol : l'élément le plus limitant pour le développement des arbres forestiers	27
1.4.2. Modélisation du bilan hydrique édaphique : les grands principes	27
1.4.3. Comparaison de différentes méthodes de calcul de bilan hydrique édaphique	29
1.4.4. Variations dans les calculs d'ETP	31
2. Méthodologie générale	33
2.1. Organisation de l'étude	33
2.2. Données disponibles pour les calculs de bilans hydriques	33
2.2.1. Données de rayonnements solaires	34
2.2.2. Données de températures	34
2.2.3. Données de précipitations	35
2.2.4. Réserve utile maximale des sols	35

2.3.	méthode de validation et comparaison des différents indices écologiques	36
2.4.	Comparaison de l'humidité des sols évaluée selon les guides de stations et la carte numérique des bilans hydriques réalisée	42
2.4.1.	Méthode	42
2.4.2.	Données disponibles	42
3.	Résultats.....	44
3.1.	Identification des meilleurs bases de données disponibles pour le calcul des bilans en eau	44
3.1.1.	Validations statistiques des modèles climatiques	44
3.1.2.	Comparaison des capacités prédictives des modèles LERFoB et AURELHY	52
3.1.3.	Conclusions quant au choix des données climatiques	54
3.1.4.	Réserve utile maximale des sols	54
3.1.5.	Récapitulatif des données retenues pour les calculs de bilans en eau	59
3.2.	Choix d'un indice synthétique du bilan hydrique des sols	60
3.2.1.	Présentation de différents indices de l'eau dans le sol	60
3.2.2.	Identification d'un indice synthétique de l'eau disponible dans le sol	62
3.3.	Validation de la carte numérique des déficits d'évaporation.....	65
3.3.1.	Comparaison statistique des données calculées et extraites du SIG	66
3.3.2.	Capacité prédictive du déficit d'évaporation estival vis-à-vis de la distribution des essences	72
4.	Discussion : apports de la carte numérique des bilans hydriques aux informations stationnelles.....	74
4.1.	Comparaison des méthodes d'estimation des contraintes hydriques utilisées dans le guide pour l'identification des stations et la carte des déficits d'évaporation	74
4.2.	Lien entre les déficits d'évaporation et les limites d'unités stationnelles	76
4.2.1.	Comparaison des groupes d'unités stationnelles aux contraintes hydriques estivales similaires identifiées dans le guide et à partir de la carte des déficits hydriques	77
4.2.2.	Cohérence des informations fournies par le guide et par la carte des déficits hydriques	79
4.2.3.	Finesse des estimations des contraintes hydriques sur chaque unité stationnelle à partir des deux outils	82
4.2.4.	Potentialités de la carte des déficits d'évaporation pour aider à la cartographie les stations	83
4.2.5.	Apports de la carte des RUM au pas de 50 m	83
4.3.	Comparaison des prédictions de distribution d'essences par la carte des déficits hydriques avec les essences préconisées par le guide des stations sur chaque unité stationnelle	84

4.3.1.	Comparaison des amplitudes de distribution des essences sur les plateaux calcaires et la France	86
4.3.2.	Comparaison entre la distribution et la productivité des essences vis-à-vis des contraintes hydriques.....	87
4.3.3.	Apports de la carte des déficits d'évaporation par rapport aux guides de stations.	88
4.3.4.	Apports potentiels de cette approche vis-à-vis du changement climatique.....	89
4.4.	Synthèse : potentialités d'utilisation de la carte	93
5.	Propositions d'intégration des analyses issus de la carte des déficits d'évaporation dans le guide des stations.....	94
5.1.	Dans les fiches descriptives des unités stationnelles	94
5.1.1.	Aide à la détermination des stations.....	94
5.1.2.	Prise en compte de la variabilité spatiale au sein d'une unité stationnelle	94
5.1.3.	Prise en compte du risque climatique.....	94
5.2.	Dans les fiches de description des essences	95
5.3.	En dépliant annexe.....	96
	Conclusion	97
	Références bibliographiques.....	99
	Liste des contacts.....	106
	ANNEXES	108

Table des annexes

Annexe 1 : Caractérisation des contraintes hydriques du sol pour prendre en compte le changement climatique dans les catalogues de station : calendrier des tâches.....	111
Annexe 2 : répartition moyenne annuelle des précipitations sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (données Météo-France sur la période 1960-1990).....	112
Annexe 3 : répartition moyenne annuelle des températures sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (données Météo-France sur la période 1960-1990).....	113
Annexe 4 : revue des différents impacts potentiels des changements du climat sur les essences et les peuplements forestiers pour les différentes grandes régions bioclimatiques françaises	114
Annexe 5 : les principales méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle	115
Annexe 6 : Localisation des relevés effectués selon trois maillages imbriqués (250m, 100 m et 50 m) sur les sites de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec	117
Annexe 7 : Localisation des trois transects réalisées lors de la deuxième phase de terrain.....	118
Annexe 8 : 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.....	120
Annexe 9 : 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)	121
Annexe 10 : 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)	122
Annexe 11 : Diagrammes de corrélation entre les données de rayonnement solaire moyen prédit par les modèles Hélios 2007 et 2010, et mesuré sur la période 1961-1990 par Météo France (86 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de al France (86 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison	123
Annexe 12 : Cartes des écarts saisonniers entre les rayonnements solaires (MJ/m ²) prédits par le modèle Hélios 2010 et mesurés sur 86 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison (écarts interpolés sur toute la France)	124
Annexe 13 : Diagrammes de corrélation entre les données de températures moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (493 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison	125

Annexe 14 : Diagrammes de corrélation entre les données de températures moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (493 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle des plateaux calcaires pour chaque saison	126
Annexe 15 : Cartes des écarts saisonniers entre les températures (°C) prédites par le modèle Hélios 2010 et mesurées sur 235 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison	127
Annexe 16 : Diagrammes de corrélation entre les données de précipitations moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (471 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison	128
Annexe 17 : Diagrammes de corrélation entre les données de précipitations moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (471 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle des plateaux calcaires pour chaque saison	129
Annexe 18 : Cartes des écarts saisonniers entre les précipitations (mm) prédites par le modèle et mesurées sur 471 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison	130
Annexe 19 : Diagrammes de corrélation entre les valeurs de RUM extraites de la carte au pas de 50 m et 500 m et les valeurs calculées sur les placettes de relevés du site de Bois l'Evêque selon trois maillages imbriqués : 250 m sur 500 ha (a), 100 m sur 40 ha (b) et 50 m sur 10 ha (c)	131
Annexe 20 : cartes comparatives des différents indices de l'eau dans le sol, calculés au pas de 50m par la méthode de Palmer, à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne.....	133
Annexe 21 : Choix d'un indice hydrique édaphique synthétique : étude de la capacité des différents indices à prédire la répartition de 37 essences forestières.....	135
Annexe 22 : Comparaison cartographique des déficits d'évaporations calculés à partir des RUM basse résolution (en haut) et haute résolution (en bas).....	137
Annexe 23 : Quelques règles aidant au pré-zonage des stations et à l'interpolation de données ponctuelles pour réaliser une carte des stations (Bazin et Gaudin, 2003)	138
Annexe 24 : Un exemple d'intégration des données issues de la carte numérique des déficits d'évaporation dans une fiche descriptive d'unité stationnelle.....	139
Annexe séparée : carte des déficits d'évaporation modélisés à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne	

Listes des figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (trait rouge) sur fond de carte géologique (les zones en bleu représentent les calcaires du jurassique).....	16
Figure 2 : Scénarii d'émissions de gaz à effet de serre pour la période 2000 – 2100 et projections relatives aux températures en surface.	18
Figure 3 : Variations relatives des précipitations pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à janvier et de juin à août.	19
Figure 5 : Températures mesurées par 97 postes Météo-France pour la période 1961-2008, et prévisions pour la période 2000 - 2100	19
Figure 5 : Cartographie de l'évolution des températures moyennes en France sur la période 1901 – 2000	19
Figure 6 : Evolution globale des températures moyennes annuelles entre les périodes 1961-1990 et 2040-2070 (données Tyndall, modèle HadCM3, scénario A2).....	20
Figure 7 : Evolution des températures moyennes annuelles et du cumul annuel moyen des précipitations entre les périodes 1961-1990 et 2040-2070 selon le scénario A2 du GIEC et le modèle HadCM3 sur les plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne.....	21
Figure 8 : Proposition de découpage de la France en zones homogènes face au changement climatique et impact estimé du changement climatique sur les écosystèmes forestiers selon la zone.	21
Figure 9 : Cartographie et proportions du territoire couvert par les aires biogéographiques actuellement et potentiellement en 2100, selon les deux scénarii B2 et A2	22
Figure 10 : Deux scénarii théoriques d'évolution de la production forestière française au XXI ^e siècle sous l'hypothèse d'une évolution progressive ou sous l'hypothèse d'"accidents" de production.....	23
Figure 11 : Démarche proposée pour prendre en compte les changements climatiques dans les catalogues de station.....	26
Figure 14 : les différentes composantes d'un bilan hydrique édaphique	27
Figure 16 : Cartographie de la modélisation de la réserve utile maximale des sols en France (mm) et sur les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Bourgogne et Lorraine au pas de 500m.....	35
Figure 14 : Réserves utiles maximales des sols cartographiées à basse résolution et haute résolution à l'échelle des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne Bourgogne et Lorraine	36

Figure 15 : Localisation des postes Météo France ayant fourni les données pour la validation du modèle LERFoB.....	37
Figure 16 : Localisation des 471 postes Météo-France utilisés pour la validation du modèle de précipitations.....	37
Figure 17 : Localisation des 86 postes Météo-France indépendants du jeu de calibration utilisé pour valider les modèles de rayonnements solaires Hélios 2007 et 2010	37
Figure 22 : localisation géographique des 25 placettes du réseau RENECOFOR utilisées pour cette étude.....	38
Figure 23: Distribution spatiale des 32 544 placettes de relevés de l'Inventaire Forestier National.....	38
Figure 24 : localisation des 543 relevés Biosoil utilisés pour valider les modèles de RUM à l'échelle de la France.....	39
Figure 26 : principe de calcul de l'amplitude et de l'optimum écologique (exemple théorique). La zone blanche située sous la courbe et centrée sur l'optimum représente 80% de l'aire sous la courbe	42
Figure 22 : Données de rayonnement solaire au pas de 50 m issues du modèles Hélios 2010 et écarts de rayonnements annuels prédits entre les données Hélios 2007 et Hélios 2010.....	44
Figure 23 : Relation entre les valeurs de rayonnement solaire annuel moyen sur la période 1961-1990 mesurées par Météo-France sur les 86 postes du jeu de validation et modélisées en 2007 et 2010.	45
Figure 24 : Carte des erreurs de prédictions interpolées à partir des données du jeu de validation sur la France et les plateaux calcaires de Lorraine, Champagne et Bourgogne pour les modèles de 2007 et 2010.	46
Figure 25 : Températures moyennes annuelles prédites au pas de 50 m par le modèle LERFoB	48
Figure 26 : Carte des différences entre les prédictions de températures moyennes annuelles des modèles LERFoB et AURELHY (moyenne sur la période 1961 - 1990).	48
Figure 27 : Corrélation entre les températures mensuelles et annuelle (°C) sous couvert forestier sur la période 1996-2007 mesurées par Météo France et issues du modèle LERFoB.	49
Figure 28 : Carte des résidus du modèle LERFoB par rapport aux données mesurées sur les postes Météo France (°C).....	49
Figure 39 : Corrélation entre les données de températures annuelles prédites par le modèle et mesurées sur les 15 postes Météo France compris dans un rayon de 50 km autour de la zone d'étude.	49
Figure 30 : Carte du cumul des précipitations annuelles modélisées par le modèle LERFoB	50
Figure 31 : Carte des différences entre les cumuls des précipitations annuelles moyennes prédits par les modèles LERFoB et AURELHY	50

Figure 32 : Corrélation entre les précipitations moyennes annuelles (mm) sur la période 1996-2007 mesurées par Météo France et issues du modèle LERFoB..	51
Figure 33 : Carte des résidus de précipitations moyennes annuelles entre les valeurs mesurées et prédites sur le jeu de postes météo France ayant servi à la validation du modèle LERFoB.....	51
Figure 34 : Comparaison des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) mesurées par 471 postes Météo France et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle des plateaux calcaires	51
Figure 45 : Corrélation entre les données de précipitations annuelles prédites par le modèle LERFoB et mesurées sur les 59 postes Météo France compris dans un rayon de 50 km autour de la zone d'étude..	52
Figure 36 : Comparaison de la capacité prédictive des modèles de températures (moyennes annuelles) LERFoB et Météo-France vis-à-vis de la distribution de 40 essences forestières.....	53
Figure 37 : Comparaison de la capacité prédictive des modèles de précipitations (moyennes annuelles) LERFoB et Météo-France vis-à-vis de la distribution de 40 essences forestières.....	53
Figure 49 : Corrélation entre les données de RUM prédites par le modèle intégrant les covariables et mesurées sur 542 placettes du réseau européen Biosoil, indépendantes des placettes IFN ayant servi à la calibration du modèle	54
Figure 39 : Comparaison des modèles de RUM avec ou sans covariables	54
Figure 40 : Carte des réserves utiles maximales au pas de 500 m sur la zone des plateaux calcaires (en mm) et localisation des 1123 placettes IFN ayant servi à la validation du modèle	55
Figure 41 : Carte des écarts entre la RUM estimée sur les placettes IFN nouvelle méthode et la RUM cartographiée au pas de 500 m sur la zone des plateaux calcaires (en mm)	56
Figure 53 : Comparaison de la capacité prédictive des valeurs de RUM extraites des modèles avec ou sans covariables et estimées sur les placettes IFN vis-à-vis de l'indice de fertilité de trois essences forestières.....	56
Figure 56 : Un exemple théorique expliquant les difficultés à rendre compte de la variabilité spatiales de la RUM avec précision	58
Figure 44 : 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	64
Figure 45 : Comparaison des déficits d'évaporation calculées à partir des données de 25 placettes RENECOFOR pour les mois de juin, juillet et août et extraites du SIG sur ces mêmes placettes	66
Figure 46 : Comparaison des déficits d'évaporation estivaux calculés à partir de données relevées sur les placettes IFN et extraites du SIG sur ces mêmes placettes sur toute la France et sur les plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne.....	67

Figure 47 : Validation statistique de la carte des déficits d'évaporation estivaux Thornthwaite sur la France et la zone des plateaux calcaires	68
Figure 48 : Cartographie des écarts de prédiction des déficits d'évaporation estivaux de Thornthwaite par rapport aux estimations sur les 32544 placettes IFN.	68
Figure 65 : Pourcentage de la variance des déficits d'évaporation observé expliqué par les cartes numériques construites à partir des RUM au pas de 500 m et 50 m pour différentes échelles considérées (sites de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec).....	69
Figure 50 : Corrélations entre les déficits d'évaporation calculés sur les placettes de Villey-le-Sec et Bois l'Evêque et extraits des cartes numériques intégrant les RUM au pas de 500 m et au pas de 50 m à différentes échelles : 500 ha (maillage 250 m) ; 40 ha (maillage 100 m) ; 10 ha (maillage 50m)....	71
Figure 51 : Valeurs de déficits d'évaporation pour lesquelles se situent 80% des relevés des unités stationnelles définies dans le guide Milard (unités stationnelles harmonisées sur toute l'emprise de la zone d'étude).....	76
Figure 52 : Comparaison de la capacité à prédire la présence des différentes unités stationnelles des cartes numériques de déficits hydriques construites d'après les RUM au pas de 500 m et de 50 m.	84
Figure 71 : Comparaison des amplitudes écologiques vis-à-vis du déficit d'évaporation de quatre essences forestières calculées à l'échelle de la France et des plateaux calcaires avec celles des différentes unités stationnelles (US harmonisées sur toute la zone des plateaux calcaires)..	85
Figure 54 : Illustration théorique de la mise en évidence à partir de données issues des cartes numériques des déficits d'évaporation d'une station à risque vis-à-vis du changement climatique.	90
Figure 55 : Illustration théorique de la mise en évidence à partir de données issues des cartes numériques des déficits d'évaporation d'une station évoluant favorablement pour une essence à cause du changement climatique.....	91
Figure 56 : Exemple théorique de l'identification à partir des cartes numériques de déficits d'évaporation estivaux d'une station pour laquelle le changement climatique induit peut de risque pour une essence donnée	91
Figure 57 : Exemple théorique d'une unité stationnelle où seule une partie de l'US présente un risque vis-à-vis du changement climatique.	92

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des catalogues et guides de stations couvrant les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne	17
Tableau 2 : Évolution de la productivité de cinq essences forestières pour trois région françaises sur la période 1985 – 1993.....	23
Tableau 3 : Simulations de remplissage et de vidange du réservoir en eau des sols selon les deux méthodes de calcul de bilans hydriques édaphiques utilisées dans cette étude	31
Tableau 4 : nombre de postes Météo-France dont des données de températures ou de précipitations ont été utilisées pour calibrer ou valider les modèles climatiques spatialisés	37
Tableau 5 : description du dispositif de relevés sur les forêts de Bois l'Evêque et Villey-le-sec (Meurthe et Moselle) selon trois maillages imbriqués	39
Tableau 6 : Evaluation de la qualité d'un modèle en fonction des valeurs d'AUC	41
Tableau 7 : R ² , biais et RMSE entre les valeurs de rayonnements moyens annuels et mensuels sur la période 1961-1990, issus des modèles Hélios 2007 et 2010, et les mesures de 88 stations de relevé Météo-France à l'échelle de la France.....	45
Tableau 8 : Caractérisation de la variabilité des rayonnements solaires annuels moyens sur la France et les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne	46
Tableau 9 : Caractérisation des erreurs de prédictions de rayonnements solaires moyens annuels sur une zone de 50 km autour des plateaux calcaires	47
Tableau 10 : Comparaison des températures moyennes mensuelles et annuelles sous couvert forestier (°C) mesurées par 493 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle, et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle de la France.	48
Tableau 11 : Comparaison des températures moyennes mensuelles et annuelles sous couvert forestier (°C) mesurées par 493 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle, et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle des plateaux calcaires	49
Tableau 12 : Comparaison des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) mesurées par 471 postes Météo France et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle de la France	51
Tableau 13 : Comparaison des cartes de RUM à basse résolution et haute résolution via les coefficients de corrélation avec les RUM calculées à partir des relevés de terrain, et l'erreur quadratique moyenne	57
Tableau 14 : Variabilité des réserves utiles maximales de sols et des différents paramètres entrant dans son calcul à partir de mesures sur 10 placettes..	58

Tableau 15 : Gain moyen d'AUC pour les modèles de distribution de 37 essences forestières pour sept indices hydriques édaphiques, par rapport à des modèles basés uniquement sur des variables climatiques	63
Tableau 16 : Nombre d'essences pour lesquelles chaque indice est le plus performant pour prédire sa distribution	63
Tableau 17 : Comparaison des déficits d'évaporation (en mm) issus des cartes numériques calculées à partir des RUM 500 m et 50 m et des données estimées avec la RUM mesurée sur le terrain à plusieurs échelles.....	69
Tableau 18 : synthèses des principales différences concernant l'estimation de la sécheresse édaphique entre le guide des stations et la carte des déficits d'évaporation.	75
Tableau 19 : Effectifs de chaque groupe d'unités stationnelles homogènes vis-à-vis des disponibilités en eau identifiés dans le guide Milard et à partir de la carte des déficits d'évaporation	79
Tableau 20 : qualité des modèles prédictifs des unités stationnelles en fonction des déficits d'évaporation ayant servi au calcul des amplitudes écologiques des US	81

Index alphabétique des sigles et abréviations

AURELHY : analyse utilisant le relief pour l'hydrométéorologie
AUC : *area under the curve*
CRPF : Centre régional de la propriété forestière
DE : déficit d'évaporation
ETP : évapotranspiration potentielle
ETR : évapotranspiration potentielle
GIEC : Groupement d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat
GIP ECOFOR : groupement d'intérêt public « écosystèmes forestiers »
IA : indice d'aridité
IFN : inventaire forestier national
IPCC : *intergovernmental panel on climate change*
LERFoB : Laboratoire d'étude de la ressource forêt bois
MNT : modèle numérique de terrain
ONF : Office national des forêts
P : précipitations
R² : coefficient de corrélation
RENECOFOR : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes Forestiers
REW : *relative extractible water* (eau extractible du sol relativement à la RUM)
RMSE : *root mean square error* (erreur quadratique moyenne)
RMT AFORCE : réseau mixte technologique « adaptation des forêts au changement climatique »
RU : réserve utile
RUM : réserve utile maximale
RUF : réserve utile facilement utilisable
RUS : réserve utile de survie
SAFRAN : système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige
SIG : système d'information géographique
SWD : *soil water deficit* (déficit hydrique édaphique)
T : transpiration réelle du couvert forestier
US : unité stationnelle

Introduction : présentation de l'étude et objectifs généraux

Les besoins d'adapter les pratiques sylvicoles pour anticiper les changements du climat, notamment en ce qui concerne le choix des essences et des actions de gestion, se font de plus en plus ressentir au sein de la communauté forestière. À l'heure actuelle, les guides et catalogues de stations, qui orientent ces choix, ont du mal à prendre en compte cet aspect d'un climat en évolution. La plupart ayant été créés avant les premières préoccupations concernant les modifications du climat, ils ne considèrent pas les éventuelles modifications des contraintes climatiques ou édaphiques pour les peuplements.

La contrainte hydrique est l'une des plus déterminantes vis-à-vis du choix des essences. Or elle est aussi l'une des plus difficiles à quantifier sur de vastes territoires, et probablement l'une des plus affectées par la modification du climat.

Les récents développements des méthodes, des outils de modélisation et de cartographie, et des performances des matériels informatiques rendent aujourd'hui possible de modéliser et cartographier les bilans en eau des sols. Nous pouvons alors identifier différents indices reflétant la disponibilité de l'eau pour les plantes. Il est important pour le gestionnaire de pouvoir disposer d'informations relativement fines dans l'espace concernant l'état de la contrainte hydrique et de son évolution à l'échelle de vastes territoires.

Les présents travaux visent à étudier les possibilités d'utilisation de ces indices dans le cadre des catalogues de stations forestières. Ils ont été construits à partir de l'exemple précis des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Lorraine et Bourgogne. L'objectif à terme est de pouvoir généraliser cette approche à de plus vastes secteurs. Il s'agit donc ici de :

- choisir, parmi une gamme d'indices dérivés des calculs de bilans hydriques des sols forestiers, celui permettant d'expliquer au mieux la distribution actuelle des principales essences forestières françaises ;
- valider et évaluer la pertinence d'une cartographie numérique de l'indice retenu à plusieurs échelles ;
- discuter des potentialités, de la pertinence et des limites de l'intégration de la carte obtenue dans les catalogues et guides de stations forestières. Quels apports cet outil peut-il donner aux informations existantes des catalogues et guides de stations ?
- à terme, cette étude vise à contribuer à l'adaptation des documents de gestion à un contexte climatique en évolution, et aider à orienter les conseils de gestion qu'ils fournissent en tenant compte de ce contexte. Les connaissances quant à l'évolution future des données climatiques rendent les cartes de bilans hydriques projetables dans le temps. Est-il alors possible d'évaluer par le biais de ces cartes les modifications des stations forestières engendrées par le changement climatique ?

Nous avons mené cette étude en plusieurs temps. Tout d'abord, nous avons sélectionné et validé les données disponibles pour calculer les bilans hydriques des sols forestiers. Ensuite, nous avons calculé ces bilans et identifiés les indices des contraintes hydriques qui en découlent. Nous avons sélectionné et cartographié l'indice le plus explicatif de la distribution des essences et nous avons validé la carte numérique de cet indice. Enfin, nous avons discuté des apports de cette carte aux informations contenues dans les guides et catalogues de station, aujourd'hui et dans la perspective d'un changement du climat. Les intérêts et limites de chaque indice ont été discutés.

1. Localisation de l'étude et contexte général

1.1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1.1.1. Localisation, géologie et climat

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. Ces plateaux représentent une part essentielle de la surface boisée de trois de ces régions. Ils constituent un enjeu sylvicole et paysager majeur, lié à leur grande diversité en termes de climat, de topographie, d'hydrologie, d'habitats et de biodiversité.

Le substrat géologique de cette zone 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 et Chanteraine, 2004). L'altitude sur la zone d'étude varie entre 100 mètres et 550 mètres environ, le point culminant de la zone se situant dans le nord-est bourguignon (région d'Is-sur-Tille).

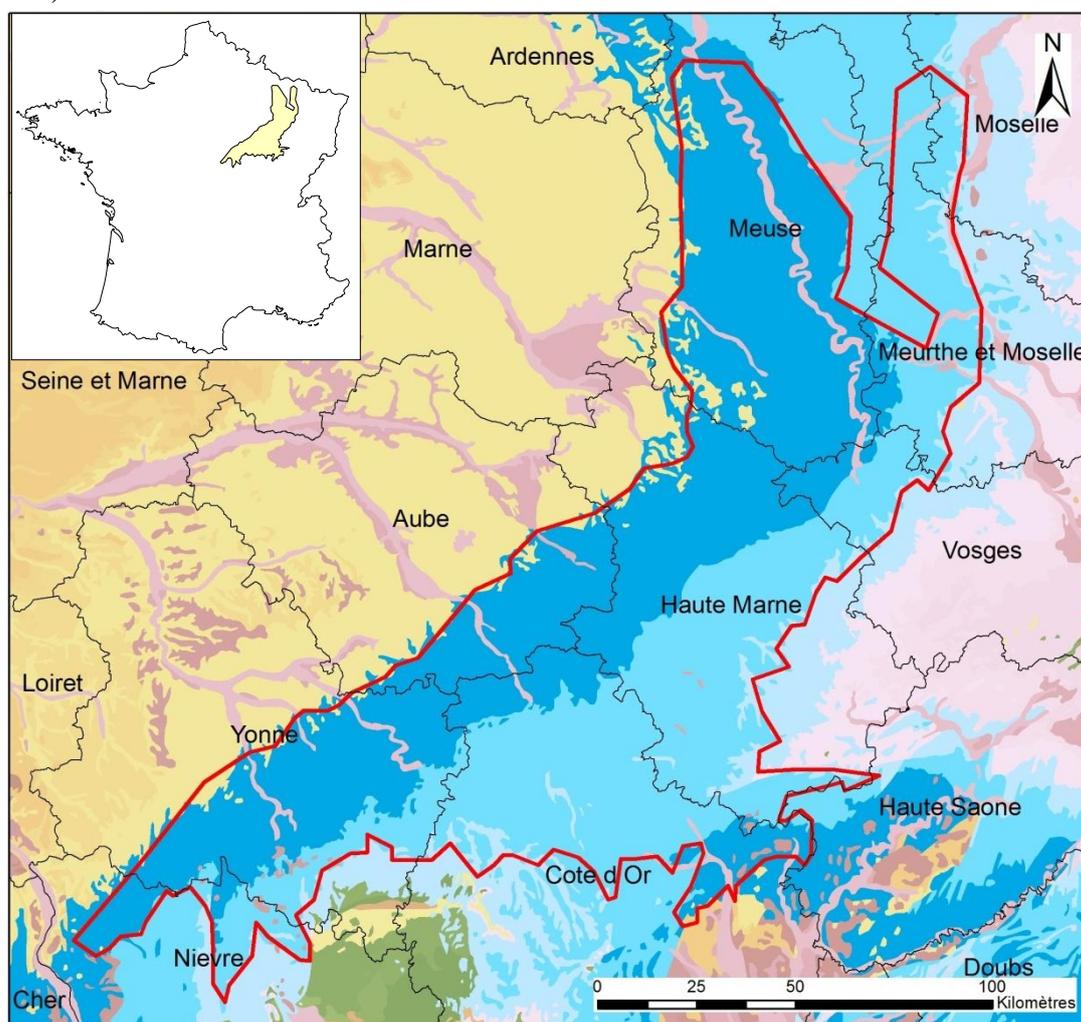


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (trait rouge) sur fond de carte géologique (les zones en bleu représentent les calcaires du jurassique) – Sources : Laboratoire d'étude de la ressource forêt bois (LERFoB), Rabu et Chanteraine, 2004

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 de la zone, 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 arrosées (cf. **Annexe 2**).

Concernant les températures moyennes annuelles les valeurs sur la zone d'étude s'étalent de 8,5°C à 11°C (Benichou et Le Breton, 1987). Cependant, les différences locales de température par rapport aux moyennes régionales peuvent être relativement fortes. Cela est dû à la position topographique, l'exposition et le confinement pour certains secteurs spécifiques (cf. **Annexe 3**).

1.1.2. Couverture de la zone par les différents catalogues et guides de station

Le **catalogue de station** décrit les différentes conditions de milieu rencontrées en forêt sur une aire donnée. Chaque unité décrite est appelée **type de station**. Les catalogues de station étant parfois jugés comme peu utilisables pour un travail de terrain, en raison de leur complexité et de leur encombrement (Milard, 2004 ; Riou-Nivert, 2005), des **guides simplifiés d'identification des stations** ont été créés pour rendre les informations contenues dans les catalogues plus accessibles et plus pratiques pour un travail de terrain. Ces guides décrivent des groupes de types de stations semblables, nommés **unités stationnelles (US)**.

Les différents guides et catalogues couvrant l'ensemble de la zone d'étude sont construits de manière relativement homogènes. Les critères d'identification et les clés de détermination des stations sont très proches entre les différents documents. Le premier critère pris en compte pour la détermination de la station est la position topographique, qui permet d'évaluer selon la pente, l'exposition ou le confinement les mouvements latéraux d'eau, l'ensoleillement et l'humidité atmosphérique. La description d'un profil-type de sol par type de station ou unité stationnelle permet de caractériser la capacité de stockage en eau des sols, la richesse chimique du milieu et, dans certains cas, la stabilité des peuplements (station sur éboulis). Enfin les données estimées grâce à la position topographique et la description des sols sont affinées grâce à un inventaire d'espèces végétales indicatrices, dont la présence est liée à un type de milieu particulier. Le climat considéré est un climat moyen sur la zone couverte par le document.

départements	Catalogue(s) de stations	Guide d'identification des stations
Meuse, Meurthe-Et-Moselle, Vosges	<i>Les plateaux calcaires de Lorraine – Types de stations et potentialités forestières</i> , Becker <i>et al.</i> , 1980	<i>Le choix des essences forestières sur les plateaux calcaires de Lorraine</i> , Madesclaire et Rameau, 1991
Aube, Haute-Marne, Côte d'Or, Yonne	<i>Typologie des stations forestières de Haute-Marne</i> , T1 « Plateaux Calcaires, Vallée oxfordienne », Rameau et Didier, 1985 <i>Catalogue des types de stations forestières des Plateaux Bourguignons</i> , Chouffot et Rameau, 1985	<i>Les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne – guide pour l'identification des stations et le choix des essences</i> , Milard, 2004
Yonne, Côte d'Or	<i>Catalogue des types de stations forestières des Plateaux Bourguignons</i> , Chouffot et Rameau, 1985	

Tableau 1 : Liste des catalogues et guides de stations couvrant les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne

Les catalogues et guides de station découpent donc de manière empirique un continuum de disponibilités en eau, ou de richesse chimique des sols en classes homogènes. Ce découpage permet au gestionnaire de pouvoir identifier les grands gradients sur la zone qu'il étudie et d'adapter sa gestion en conséquence.

1.2. LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SES IMPACTS SUR LA FORET FRANÇAISE

Si le changement climatique est aujourd'hui un phénomène largement reconnu par la communauté scientifique, sa prise en compte n'en est pas moins récente, et les incertitudes liées à ses conséquences sur la forêt sont telles qu'il est difficile de s'y préparer. Les paragraphes suivants représentent une synthèse des connaissances actuelles concernant le changement climatique, ses impacts potentiels sur la forêt française et la nécessité d'adapter les documents de gestion forestière qu'il induit.

1.2.1.1. A l'échelle mondiale

Plusieurs scénarii, développés par le GIEC (groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat) sont exposés suivant différentes hypothèses d'émission de gaz à effet de serre résultant de l'évolution mondiale de la démographie, de l'économie et de la technologie (IPCC, 2007). Tous tendent vers une augmentation significative des températures, de 1 à 4°C environ entre 2000 et 2100 (**Figure 2**). Le régime des précipitations mondiales risque aussi d'être perturbé d'ici 2100 (**Figure 3**), s'intensifiant aux hautes latitudes, et diminuant dans les zones intertropicales.

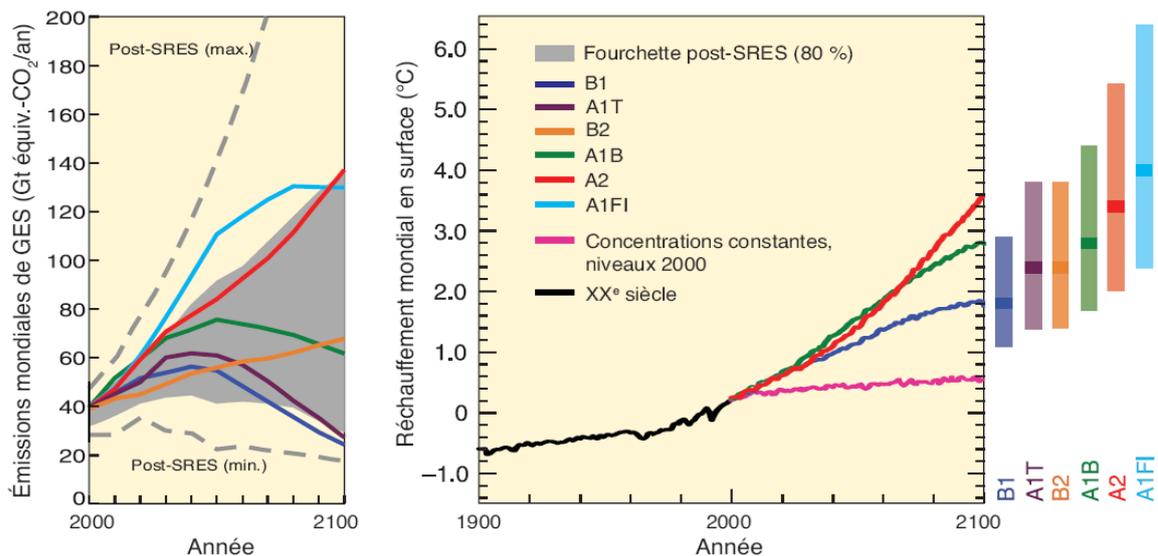


Figure 2 : Scénarii d'émissions de gaz à effet de serre pour la période 2000 – 2100 et projections relatives aux températures en surface (IPCC, 2007).

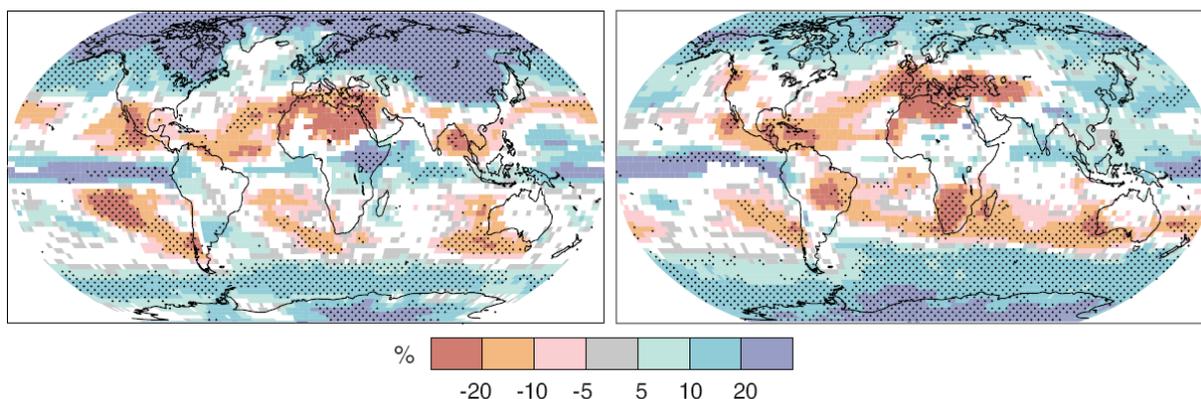


Figure 3 : Variations relatives des précipitations (%) pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999. Les valeurs indiquées sont des moyennes tirées de plusieurs modèles, obtenues à partir du scénario A1B du SRES pour des périodes allant de décembre à janvier (à gauche) et de juin à août (à droite).

1.2.1.2. A l'échelle nationale

En France, il est possible de voir une évolution du climat depuis les années 1990 (Figure 5) (Piedallu *et al.*, 2009 ; Moisselin *et al.*, 2002). Cependant, les évolutions du climat ne sont homogènes ni dans l'espace, ni dans le temps (Figure 4) (Moisselin *et al.*, 2002).

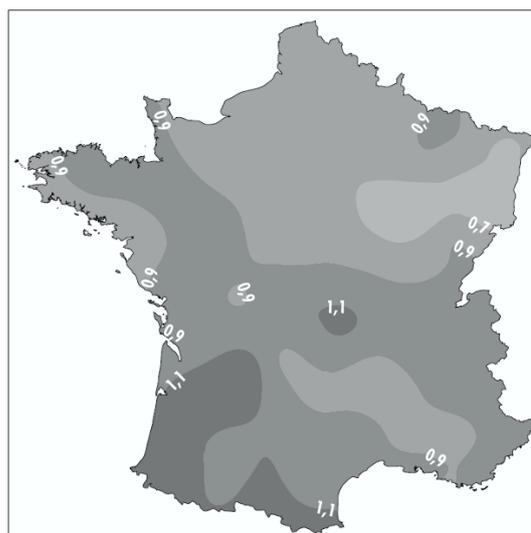


Figure 4 : Cartographie de l'évolution des températures moyennes en France sur la période 1901 – 2000 (en degrés par siècle) (Moisselin *et al.*, 2002)

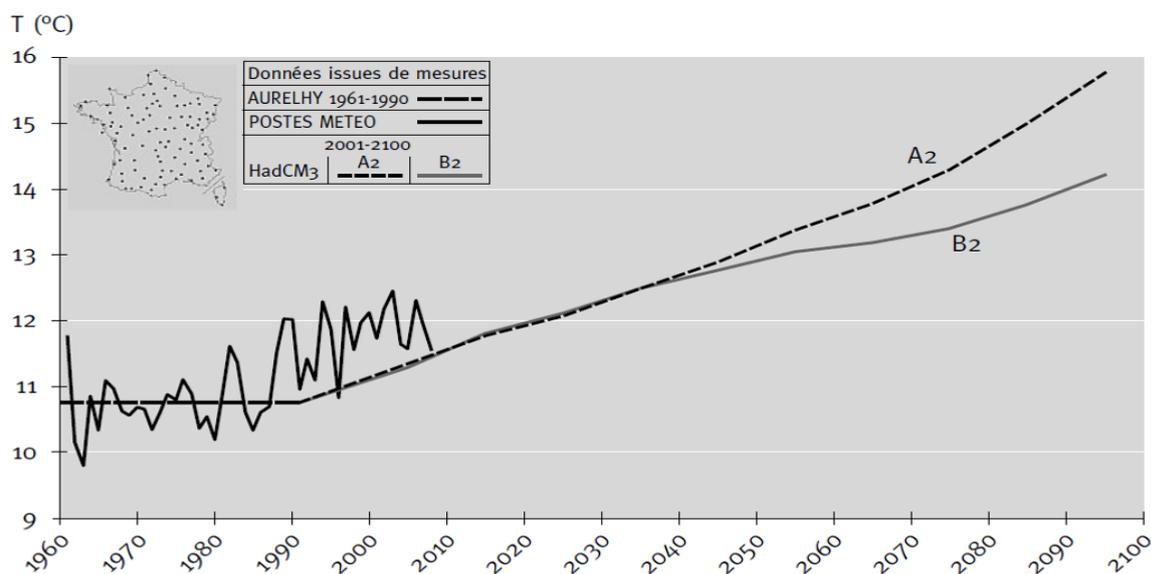


Figure 5 : Températures mesurées par 97 postes Météo-France pour la période 1961-2008, et prévisions pour la période 2000 - 2100 (Piedallu *et al.*, 2009)

Planton (2004) décrit les prévisions des modèles climatiques français pour la fin du XXI^e siècle en fonction des deux scénarii du GIEC les plus probables actuellement (A2 et B2). À l'échelle nationale, les différents modèles climatiques prévoient une accentuation des contrastes saisonniers au cours du XXI^e siècle, avec une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur estivales, ainsi qu'une distribution moins homogène des précipitations sur l'année, avec des périodes de précipitations intenses en hiver et des périodes de sécheresse plus prononcée l'été (Planton, 2004).

Afin de quantifier l'ampleur de l'augmentation des températures moyennes annuelles en France, une analogie a été faite avec un déplacement des conditions climatiques de 180 km vers le nord (Roman-amat, 2007).

On note également que les prévisions climatiques mettent en évidence des disparités régionales à l'échelle du territoire français. La hausse des températures semble ainsi plus forte dans les régions du sud-ouest et sur le pourtour méditerranéen, mais est plus modérée dans la moitié nord du pays (**Figure 6**).

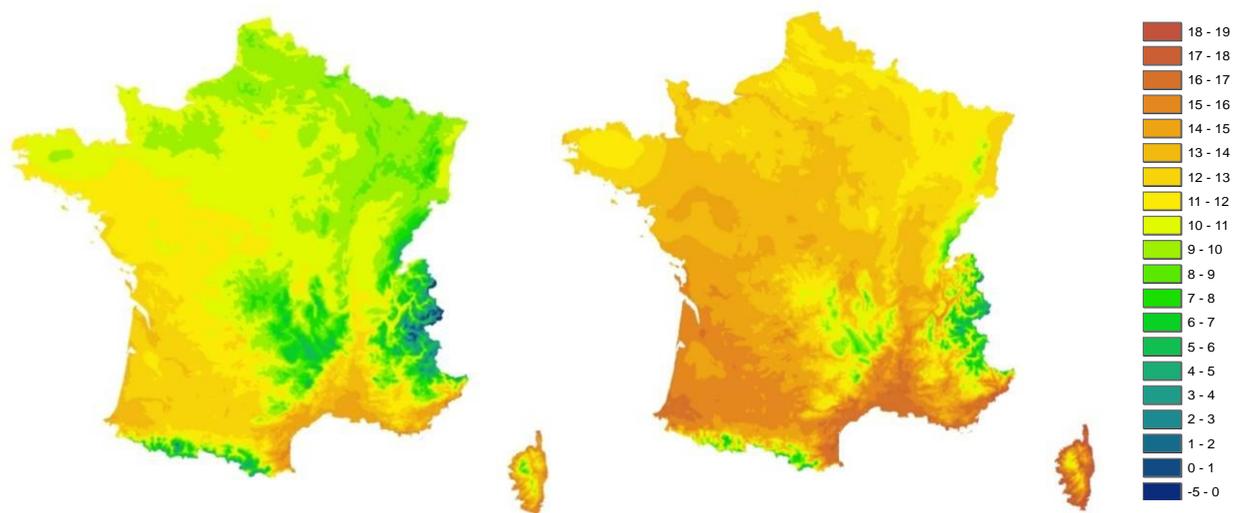


Figure 6 : Evolution globale des températures moyennes annuelles entre les périodes 1961-1990 (à gauche) et 2040-2070 (à droite) (données Tyndall, modèle HadCM3, scénario A2) (données de la base Digitalis, LERFoB)

La pluviométrie moyenne en France est globalement en hausse (hausse de 0,5 à 1% par décennie au cours du XX^e siècle pour les moyennes et hautes latitudes continentales). Cependant, les changements globaux du climat modifieraient non seulement le total annuel des précipitations, mais aussi la répartition de ces précipitations sur l'année, avec une accentuation des contrastes entre les saisons. Ducouso et Déqué (2005) montrent ainsi une redistribution des précipitations saisonnières, avec une diminution de la pluviométrie en été et surtout en automne, et une augmentation en hiver et au printemps.

1.2.1.3. À l'échelle de la zone d'étude

L'étude des changements potentiels de températures moyennes annuelles entre les périodes 1961-1990 et 2040-2070 selon le scénario A2 du GIEC (données Tyndall, base de données Digitalis, LERFoB) montre que les températures risquent d'augmenter de 2 à 4°C, les plus fortes hausses de températures pouvant être observées en Bourgogne. On pourrait de même observer des variations dans le régime des précipitations. On pourrait ainsi voir le cumul des précipitations baisser de 150 mm à la frontière avec la Champagne humide et augmenter de 150 mm à l'est des plateaux calcaires Lorrains.

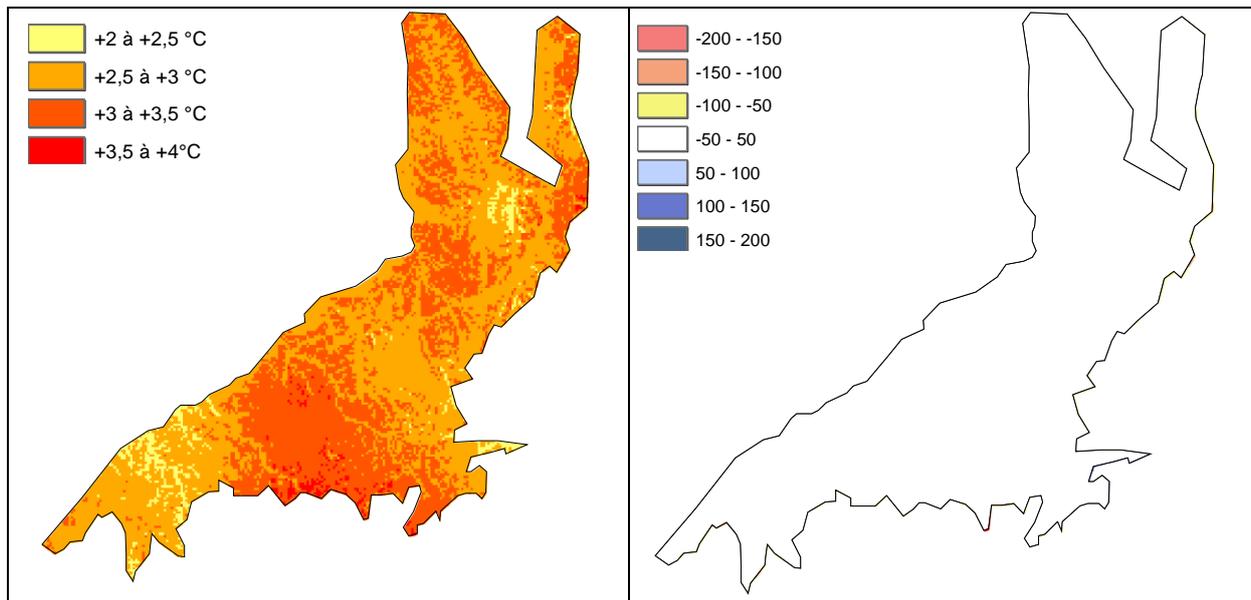


Figure 7 : Evolution des températures moyennes annuelles (en °C, à gauche) et du cumul annuel moyen des précipitations (en mm, à droite) entre les périodes 1961-1990 et 2040-2070 selon le scénario A2 du GIEC et le modèle HadCM3 (données de la base Digitalis du LERFoB) sur les plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne.

1.3. IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA FORESTERIE EN FRANCE

1.3.1. Revue des différents impacts

Afin d'évaluer les inconvénients liés à la non prise en compte des effets de changements climatiques dans les catalogues de station, il est nécessaire d'identifier les impacts que celui-ci pourrait avoir sur les forêts. Le changement global du climat n'étant pas homogène sur le territoire, il est possible d'identifier des différences entre les grandes régions bioclimatiques françaises. Une revue des différents impacts attendus sur chacune de ces régions au niveau de la production ligneuse, de la phénologie des arbres, des changements d'aires de répartition et des risques physiques (incendies, tempêtes, érosion) et sanitaires pour les peuplements est présentée en **Annexe 4**.

On peut alors, à partir de la synthèse des études menées en France, tenter de classer les régions françaises suivant un degré de risque pour les peuplements (Roman-amat, 2007).

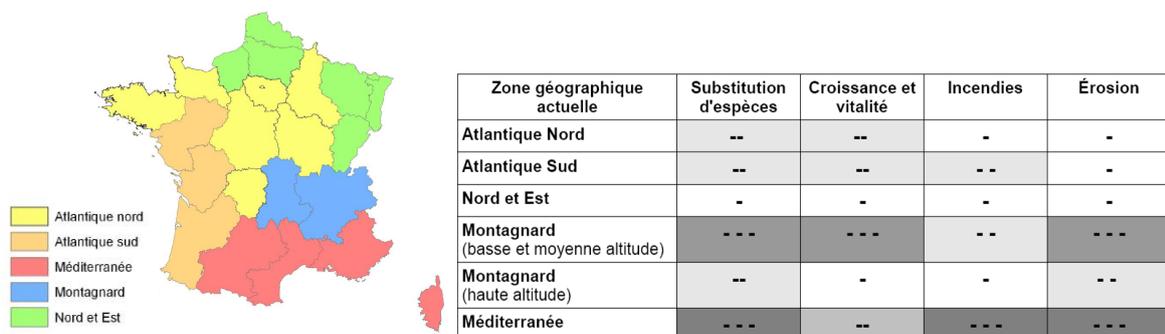


Figure 8 : Proposition de découpage de la France en zones homogènes face au changement climatique et impact estimé du changement climatique sur les écosystèmes forestiers selon la zone : - faible ou nul ; -- moyen ; --- majeur (Roman-amat, 2007).

Ce premier découpage est pragmatique et suit les limites administratives. Les résultats sont donc à considérer avec la plus grande prudence.

1.3.2. Impacts sur la distribution des essences

Une étude de la répartition des grands groupes d'essences forestières (Badeau *et al.*, 2004) met en évidence des zones où les probabilités de présence des communautés d'essences risquent de changer, ce qui pourrait impacter la sylviculture dans ces régions (**Figure 9**). Badeau *et al.* montrent que selon les scénarii climatiques, les grands groupes d'essences présents dans certaines régions risquent de changer.

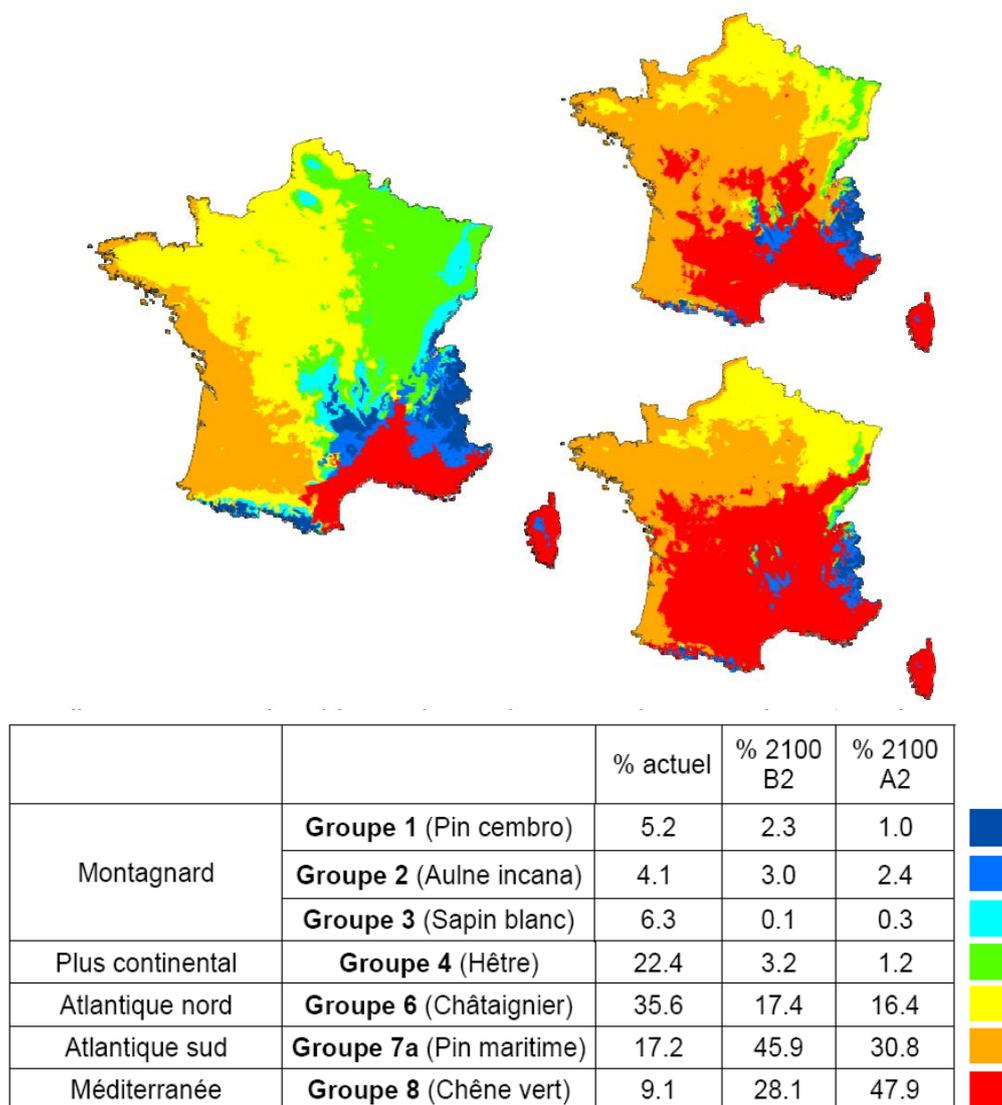


Figure 9 : Cartographie et proportions du territoire couvert par les aires biogéographiques actuellement (carte de gauche) et potentiellement en 2100, selon les deux scénarii B2 (carte en haut à droite) et A2 (carte en bas à droite) (Badeau *et al.*, 2004)

Les cartes ci-dessus montrent un changement important dans le quart nord-est recouvrant le site d'étude. Cependant, ces études ne tiennent compte que de paramètres climatiques et n'abordent pas l'aspect des traits de vie des espèces, c'est-à-dire leur capacité à s'adapter aux changements ou à migrer pour coloniser de nouvelles niches climatiques, leur comportement face à la compétition d'autres espèces, etc. (Badeau *et al.*, 2005). De plus, elles ne sont construites qu'à partir de variables climatiques

et ne tiennent compte d'aucune donnée de sol (réserve utile, engorgement, richesse chimique). Plusieurs études ont cependant montré que la distribution de certaines essences pourrait être modifiée par les changements du climat (Piedallu *et al.*, 2009, Landmann *et al.*, 2008, Badeau *et al.*, 2004.).

1.3.3. Impacts sur la productivité forestière

Les modifications du climat en France sont susceptibles d'avoir un impact non négligeable sur les écosystèmes forestiers et la production ligneuse. Becker *et al.* (1994), à partir des d'une étude de la croissance radiale de cinq espèces sur la période 1985 – 1993, montrent une augmentation globale de la productivité de ces essences, liée à l'augmentation conjointe des températures moyennes et de la concentration atmosphérique en CO₂ (**Tableau 2**).

Des études de la hauteur dominante des peuplements amènent aux mêmes conclusions (Bontemps *et al.*, 2009). L'ampleur de ces variations dépend fortement de la région et de l'essence étudiée, mais la production forestière française a indubitablement augmenté depuis le siècle dernier (Lebourgeois, 2005).

essence	Sapin pectiné	Epicéa commun	Hêtre	Chêne sessile	Chêne pédonculé
Evolution de la productivité	+ 145 %	+ 130 %	+ 90 %	+ 90 %	+ 55 %
Zone d'étude	Vosges, Jura	Vosges	Vosges	Lorraine	Lorraine

Tableau 2 : Évolution de la productivité de cinq essences forestières pour trois régions françaises depuis le milieu du XIX^e siècle jusqu'aux années 1990 (Beckert *et al.*, 1994)

Ce phénomène est assez général en Europe, avec néanmoins des différences régionales assez marquées. Du moment que les disponibilités en eau sont suffisantes pour les arbres forestiers, une augmentation de la température moyenne aurait des effets plutôt positifs sur la production forestière (Albert et Schmidt, 2010). Cependant, l'intensification et l'allongement des périodes de sécheresses notamment en limite des aires de répartition des essences pourraient provoquer une baisse de la production ligneuse dans le futur (Jump *et al.*, 2006 ; Piovesan *et al.*, 2008). A terme, on craint une diminution globale importante de la productivité forestière en France (Roman-amat, 2007).

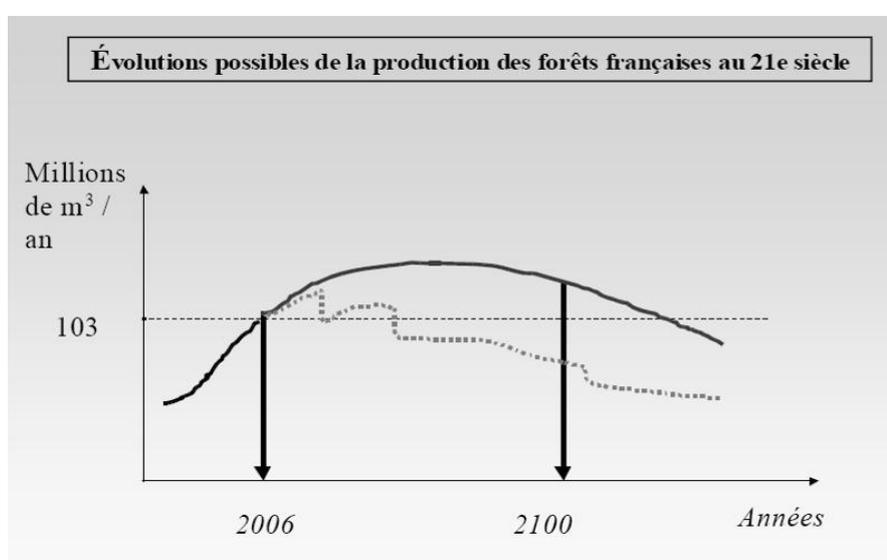


Figure 10 : Deux scénarii théoriques d'évolution de la production forestière française au XXI^e siècle sous l'hypothèse d'une évolution progressive (trait plein) ou sous l'hypothèse d'"accidents" de production (trait tireté) (Roman-amat, 2007)

1.3.4. Adaptation des forêts aux changements climatiques

Nous avons vu que le changement climatique avait un impact non négligeable sur les forêts françaises. Les essences peuvent naturellement faire face à ces changements selon différents mécanismes, mais la gestion forestière devra tenir compte des risques pour minimiser ces impacts.

1.3.4.1. Adaptation naturelle des essences

La réponse des espèces aux changements climatiques peut se faire selon trois procédés, à des échelles de temps différentes : l'acclimatation (première génération), l'adaptation (à partir de la seconde génération) et la migration. L'acclimatation est une adaptation physiologique à l'échelle de l'individu, qui n'implique pas de modification du génome. L'adaptation résulte d'un changement physiologique lié à un changement dans le génotype d'une espèce. Elle peut se faire très rapidement : des populations déplacées peuvent présenter une adaptation aux nouvelles conditions de milieu dès la seconde génération (Skroppa et Kohmann, 1997).

Le brassage génétique influe grandement sur ces capacités d'adaptation : les flux de gènes entre deux populations peuvent provoquer une certaine uniformisation des comportements, élargir la variabilité adaptative des peuplements, ou un décalage adaptatif (introgression d'une population bien adaptée au changement par une seconde moins adaptée, par exemple). (Legay et Mortier, 2006).

1.3.4.2. Adaptation des pratiques sylvicoles aux changements fonctionnels des écosystèmes forestiers

En ce qui concerne les pratiques sylvicoles, il s'agit pour le gestionnaire de distinguer deux situations : les reboisements, et les peuplements en place (Charnet, 2005). Pour les situations de reboisement, le choix des essences doit se faire immédiatement, en tenant compte des risques locaux.

Pour les peuplements en place, il s'agit tout d'abord d'identifier les risques locaux en effectuant un diagnostic par peuplement vis-à-vis des risques climatiques à partir de l'historique des forêts, de l'autécologie des essences, de leur plasticité et de leur capacité d'adaptation, d'un diagnostic sanitaire, de la structure des peuplements, leur densité, leur stabilité (Riou-Nivert, 2005). Le gestionnaire pourra alors adapter sa sylviculture pour faire face à ces risques.

Installer des essences dans leur optimum climatique actuel permettrait, malgré les modifications des conditions climatiques, de rester dans des conditions incluses dans l'amplitude écologique des essences. Elles seraient en outre plus vigoureuses pour affronter un changement de ces conditions (comparé à une essence installée en conditions défavorables (Aussenac et Guelh, 2005).

Un travail sur l'économie de l'eau est indispensable : certains auteurs commencent à réfléchir à des pratiques sylvicoles visant à une utilisation optimale des ressources et une économie de l'eau du sol dans les zones où elle peut devenir un élément limitant. Cela nécessite alors une bonne compréhension du fonctionnement hydrique du terrain considéré (Charnet, 2005). Le gestionnaire aura alors besoin d'outils pratiques pour appréhender cette problématique. Les travaux actuels visent à aider le gestionnaire à identifier les zones à risque vis-à-vis des disponibilités en eau. Certaines précautions peuvent cependant déjà être prises, en limitant la demande évaporative des peuplements en dosant la surface foliaire des peuplements. Cela aiderait à réduire la fréquence et l'intensité des périodes de stress hydrique. Une sylviculture dynamique privilégiant un étage principal plutôt clair devrait permettre une meilleure répartition des ressources en eau entre et au sein des différentes strates. Une éclaircie du sous-étage lorsqu'il devient trop dense, sans toutefois réduire le peuplement à

une seule strate, permettra d'optimiser les ressources pour les arbres objectifs. Sur les plus jeunes plantations, le contrôle de la strate herbacée limitera la compétition pour l'eau si nécessaire. De plus, un labour et un sous-solage permettrait d'augmenter un peu la réserve utile des sols (Aussenac et Guelh, 2005).

La pérennité des peuplements pourra être maintenue en privilégiant le mélange d'essences, notamment dans les zones où l'essence principale est menacée. Les changements de productivité imposent d'adapter les modèles de croissance aux productivités futures.

Un travail sur les modes de renouvellement est également à envisager : la régénération naturelle serait envisageable lorsque l'essence dominante n'est pas menacée (Legay et Mortier, 2006). Elle a l'avantage de favoriser l'adaptation des essences aux évolutions de conditions de milieu *in situ*, et est à privilégier autant que possible.

Toutes ces réflexions et préconisations devront être référencées dans les documents de gestion, sur lesquels s'appuient les gestionnaires pour conduire leurs peuplements. Ceux-ci sont à l'heure actuelle basés sur des données climatiques considérées comme stables. Or aujourd'hui, le climat change. Il est alors nécessaire d'adapter les documents de gestion sylvicoles en conséquence.

1.3.4.3. Adaptation des documents d'aide à la gestion : exemple des catalogues de station

Le forestier aura deux objectifs :

- anticiper le changement climatique en choisissant les essences et provenances les plus adaptées ;
- accompagner le changement en gérant les crises provoquées par les aléas, en faisant face aux dépérissements et en adaptant la sylviculture (Legay et Mortier, 2006).

Pour remplir ces objectifs, il devra orienter sa gestion en tenant compte des contraintes environnementales (trophiques, climatiques, etc.) qui s'exercent sur chaque peuplement, contraintes qui sont répertoriées dans des documents décrivant sur une zone géographique donnée des unités homogène vis-à-vis des facteurs de croissance des arbres : les catalogues de stations forestières.

Or, les changements rapides du climat (sur l'échelle des temps de production forestière) modifient ces facteurs de croissance.

Recourir à une sylviculture adaptée aux changements climatiques nécessite alors de connaître quels sont les risques pour chaque peuplement, risques qui dépendent des paramètres thermiques, hydriques, et édaphiques qui caractérisent une station forestière. Or chaque station n'évolue pas de la même façon face aux changements du climat. La détermination des stations ou des parties de stations à risque devient alors un objectif majeur (Legay et Mortier, 2006).

L'utilisation des catalogues et guides de stations a souvent été limitée par leur hétérogénéité et leur complexité. Cependant, les travaux d'homogénéisation et de simplification conduits par l'IFN et le GIP ECOFOR conduisent à un regain d'intérêt pour les catalogues de station (Riou-Nivert, 2005).

La typologie des stations est fondée sur une composante physique (sol, position topographique, roche mère), très stable dans le temps, et une composante climatique (températures, précipitations etc.) (Charnet, 2005). Aujourd'hui, les changements affectant cette dernière font que certains des facteurs influençant la croissance des arbres et définissant la station forestière ne sont plus stables (Charnet,

2006 ; Gaudin, 2008). Les préconisations de gestion et de choix d'essence qui y figurent ne sont peut-être plus adaptées au contexte climatique futur. Il faut donc adapter ces documents pour anticiper les évolutions futures des conditions stationnelles et adapter les conseils de gestion qu'ils prodiguent.

La démarche d'adaptation de ces catalogues doit se faire à deux niveaux : régional, pour prendre en compte les évolutions climatiques globales et l'autécologie des essences, et local, pour évaluer les contraintes hydriques et la fertilité sur chaque station, et tenir compte des essences en place actuellement.

L'adaptation des préconisations de gestion nécessite d'évaluer un niveau de risque à l'échelle de la station, puis dresser un bilan des essences en place adaptées ou non au climat futur, et enfin conseiller les essences à introduire en plein ou ponctuellement. L'adaptation des catalogues de station est donc un premier pas vers une gestion efficiente des peuplements. Les fortes incertitudes concernant l'évolution du climat, ainsi que la rapidité de cette évolution par rapport à l'échelle de temps de la production forestière rend ce travail assez délicat. Les incertitudes quant à l'adaptation ou l'évolution des exigences écologiques des essences parallèlement aux changements climatiques constituent de plus un frein supplémentaire à cette démarche.

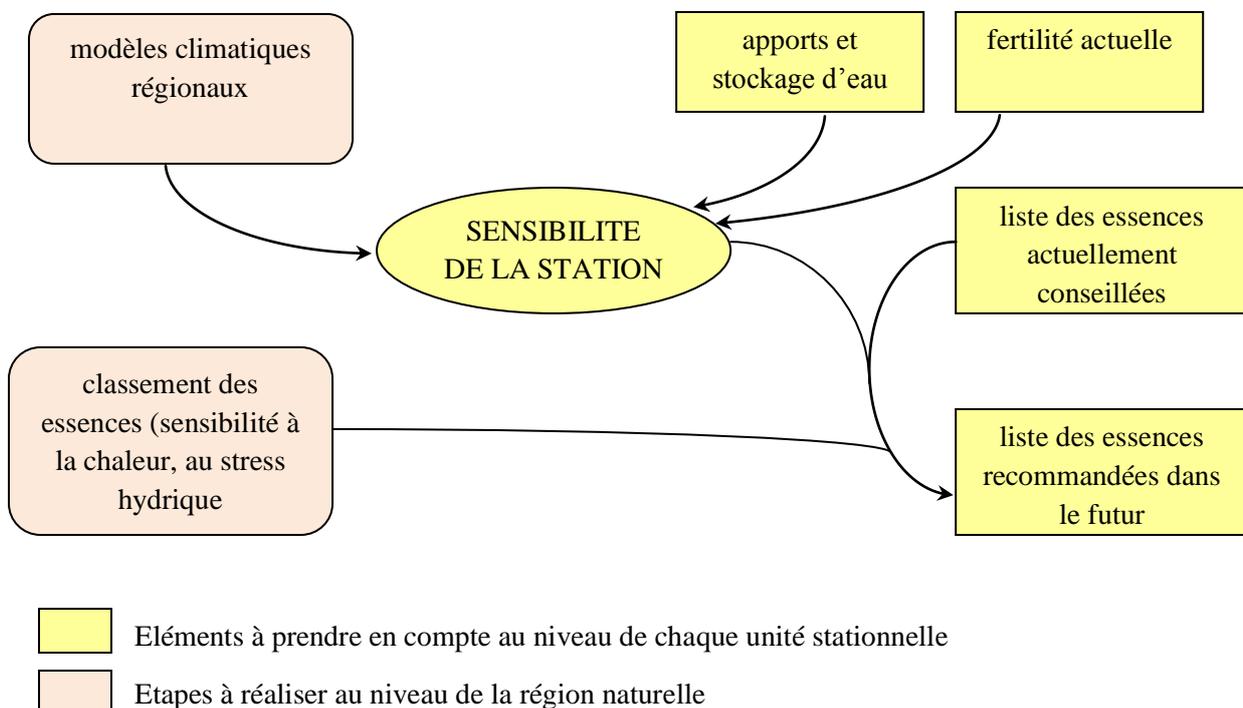


Figure 11 : Démarche proposée pour prendre en compte les changements climatiques dans les catalogues de station (Gaudin, 2008)

La première étape de l'adaptation des catalogues de station est de bien comprendre les caractéristiques de chaque unité stationnelle. Le bilan hydrique sur chaque station est l'un des paramètres les plus difficiles à appréhender, mais aussi l'un des plus déterminants pour la croissance des arbres (Stephenson, 1998).

1.4. ESTIMATION DU BILAN HYDRIQUE EDAPHIQUE

Anticiper les impacts du changement climatique à l'échelle de la station implique de connaître les gammes de valeurs de bilans en eau favorables aux essences, ainsi que l'évolution induite par le changement climatique concernant la quantité d'eau disponible pour les plantes. Il est donc d'abord nécessaire de caractériser les bilans hydriques de ses sols forestiers.

1.4.1. L'eau du sol : l'élément le plus limitant pour le développement des arbres forestiers en France

Le changement de régime hydrique est un des éléments les plus importants pour les arbres et les peuplements forestiers (Aussenac et Guelh, 2005 ; Lebourgeois *et al.*, 2005 ; Badeau et Bréda, 2008). Malgré l'augmentation globale des températures, un régime hydrique satisfaisant permet de ne pas observer de perturbation majeure quant à la distribution ou la croissance des essences forestières (Aussenac et Guelh, 2005). De plus, la répartition saisonnière des précipitations est déterminante, les essences forestières ayant besoin de mobiliser l'eau du sol pendant les périodes de développement végétatif actif.

L'augmentation des températures entraîne pour les espèces végétales une augmentation de la demande évaporative, laquelle implique alors que l'état et la croissance des arbres dépendra de la capacité de stockage des sols. L'impact d'un changement de régime hydrique sera donc plus important sur sol superficiel dans les zones actuellement fortement arrosées. Un stress hydrique important sur sols superficiels pourrait provoquer jusqu'à la mort des arbres, qui pourraient alors être remplacés par une végétation arbustive ou des landes. La forêt serait alors cantonnée aux zones où les sols sont plus profonds (Aussenac et Guelh, 2005).

Dans les régions les plus arrosées, un déficit pluviométrique pourrait avoir aussi de lourdes conséquences sur les peuplements sur sols à forte capacité de stockage de l'eau, ceux-ci ayant un système foliaire et racinaire moins adaptés aux conditions de sécheresse que les peuplements situés sur les stations actuellement plus sèches (Aussenac et Guelh, 2005).

1.4.2. Modélisation du bilan hydrique édaphique : les grands principes

1.4.2.1. Les grands principes

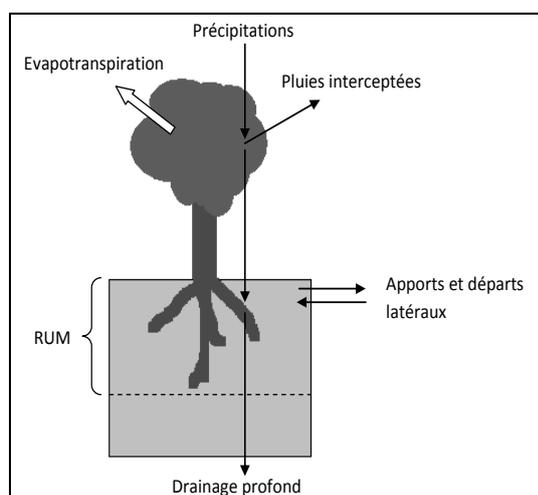


Figure 12 : les différentes composantes d'un bilan hydrique édaphique

Un bilan hydrique édaphique est un bilan des flux d'eau entrant et sortant d'un compartiment de sol pour une période de temps déterminé (Zierl, 2001 ; Zhang *et al.*, 2002 ; Alemaw et Chaoka, 2003 ; Andrew et Dymond, 2007). Pour les modèles les plus simples, les apports d'eau sont majoritairement issus des précipitations, qui représentent « l'offre » en eau, tandis que les sorties d'eau du système se font via l'évapotranspiration (demande) (Cantat *et al.*, 2010). L'évapotranspiration représente la quantité d'eau évaporée au niveau du sol et transpirée par la végétation.

Le régime hydrique des sols dépend de plus de leur capacité de stockage en eau mobilisable par la

végétation. La réserve utile maximale des sols (RUM) correspond alors à la quantité maximale d'eau stockable dans le sol sur la profondeur d'enracinement. Les modèles les plus complexes prennent en compte la quantité de précipitations interceptées par la canopée, le drainage de l'eau vers des horizons profonds du sol (surtout en hiver, lorsque celle-ci n'est pas mobilisée par la végétation), les apports et départs latéraux liés à la topographie et au ruissellement, et la profondeur d'enracinement (Granier *et al.*, 1999).

La connaissance de la réserve utile maximale en eau des sols est fondamentale pour ces modèles. Elle est généralement obtenue à partir de tables estimant sa valeur en fonction de la texture ou la charge en cailloux du sol. Certains auteurs (Li *et al.*, 1992 ; Granier *et al.*, 1999) distinguent différents horizons afin de modéliser l'eau contenue dans le sol en fonction de la profondeur. Ces modèles incluent alors généralement le potentiel hydrique des différents horizons pour identifier les différents flux entre ces horizons.

1.4.2.2. Modèles de bilans hydriques mensuels ou journaliers

Ces modèles permettent de calculer des bilans hydriques à des pas de temps fins. Granier *et al.* (1995) ont ainsi mis au point un modèle au pas de temps journalier. Ce type de modèle permet une approche plus fine mais demande une quantité de paramètres plus importante, tels que l'humidité relative ou le déficit de saturation de l'air, ou la vitesse du vent quotidienne. Ils demandent également de caractériser finement le peuplement, en relevant sur le terrain le type de peuplement par exemple (décidu ou sempervirent), et l'indice de surface foliaire (surface foliaire du peuplement rapportée à la surface projetée au sol du couvert). Ces modèles ne peuvent être utilisés à grande échelle car ils utilisent des données dont la distribution géographique n'est pas connue.

1.4.2.3. Emprise et finesse spatiale du calcul : estimations sur placettes et calculs SIG

Il existe actuellement de nombreux modèles spatialisés de bilans hydriques, utilisables par les écologues ou les forestiers. Si les modèles climatiques restent relativement accessibles, bien que leur résolution ne soit pas toujours adéquate aux besoins, les données concernant la RUM des sols sont rares (Piedallu *et al.*, 2010). Ces dernières sont plus souvent décrites ponctuellement. Nous avons cependant pu utiliser ici un modèle spatialisé des RUM développé au LERFoB, avec une résolution relativement fine (500 m). Les travaux en cours visent à cartographier les contraintes hydriques avec une grande finesse spatiale et sur une vaste étendue. Les bilans hydriques édaphiques ont ainsi été calculés au pas de 50 m sur toute la France.

1.4.2.4. Comment estime-t-on la ressource en eau des sols forestiers ?

A l'heure actuelle, les bilans hydriques édaphiques sont évalués de trois façons. Sur des sites peu étendus, les bilans en eau sont estimés grâce à des mesures ou des relevés très détaillés (Li *et al.*, 1992 ; Granier *et al.*, 1999). Ces mesures demandent cependant un matériel lourd et coûteux (Charnet, 2005).

Une autre méthode consiste à calculer ces bilans grâce à un système d'informations géographiques (SIG). Cependant, les données concernant les sols forestiers (réserve en eau maximale, profondeur d'enracinement etc.) étant peu disponibles ou alors seulement à des basses résolutions (Guisan et Zimmermann, 2000), la plupart des modèles faisant intervenir des bilans en eau sont construits uniquement à partir de variables climatiques pour prédire la distribution des espèces (précipitations, évapotranspiration du couvert végétal etc.) (Pinto et Gegout, 2005 ; Montoya *et al.*, 2009).

Enfin, il est possible d'estimer sur le terrain le fonctionnement hydrique d'une station, à partir des descriptions topographiques, du sol et de la flore indicatrice. On identifie de cette manière des « classes » de bilan en eau définies dans le guide ou le catalogue décrivant la station, qui ne permettent pas une estimation à fine résolution spatiale (les disponibilités en eau étant décrites à l'échelle d'une station), ni d'appréhender de façon précise les variations saisonnières. Ces estimations sont en outre parfois hasardeuses : le sol peut porter des traces d'un climat passé, ou composé de matériaux exogènes (matériaux d'érosion, remaniement). La végétation peut, quand à elle, être fortement influencée par la sylviculture, le travail du sol ou tout simplement le microrelief (Charnet, 2005).

1.4.3. Comparaison de différentes méthodes de calcul de bilan hydrique édaphique

Il existe différentes méthodes de calcul de bilans hydriques édaphiques qui sont en général construites sur les mêmes principes, l'eau disponible dans le sol étant calculée à partir de la réserve utile maximale en eau du sol, des précipitations et de l'évapotranspiration.

Cependant, selon les auteurs, les modalités de remplissage ou de vidange de la réserve en eau des sols diffèrent. Chaque méthode commence tout d'abord par étudier le signe de la différence entre la quantité d'eau entrant dans le système via les précipitations (P), et la demande évaporative estimée via l'évapotranspiration potentielle (ETP), calculée à partir de l'intensité du rayonnement solaire et de la température (Lebourgeois et Piedallu, 2005).

L'ETP correspond à la quantité d'eau évaporée et transpirée par la canopée dans le cas où l'eau disponible pour les plantes n'est pas limitée. Elle diffère donc de l'évapotranspiration réelle, qui lui est inférieure dans le cas où la quantité d'eau dans le sol disponible pour la végétation n'est plus suffisante pour que la transpiration du couvert soit maximale.

On calcule alors, en fonction de la quantité d'eau dans le sol, les variations de réserve utile (RU), l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement de l'eau excédentaire, ou le déficit d'évaporation (ETP-ETR). Nous avons choisi de nous intéresser aux méthodes de Palmer et de Thornthwaite car ce sont des méthodes pouvant être utilisées avec les jeux de données dont nous disposons, qui sont couramment utilisées dans la littérature et qui ont déjà fait leurs preuves.

1.4.3.1. Modèle à un compartiment de Thornthwaite

Thornthwaite et Mather (1955) ont ainsi mis au point la première méthode de calcul de bilan en eau dans le sol. Ce dernier est considéré comme composé d'un seul compartiment où l'eau est prélevée ou restituée de manière homogène. Ainsi, si $P - ETP > 0$, l'eau est accumulée dans le sol dans la limite de la capacité de rétention du sol (défini par la réserve utile maximale du sol, ou RUM). La réserve utile du sol d'un mois m est alors définie en fonction de celle du mois précédent (m-1) par :

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

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

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

1.4.3.2. Modèles à deux compartiments de Palmer

Palmer (1965) a une approche différente de la dynamique de l'eau dans le sol. En effet, dans ses calculs, le sol n'est plus constitué d'une couche unique et homogène, mais est divisé en une couche de surface (qui représente environ 60% de la capacité de stockage en eau du sol), où l'eau est facilement extractible, et une couche profonde, où l'eau est plus difficilement utilisable.

La réserve utile totale du sol est donc divisée en deux parties : une réserve utile facilement utilisable (RUF) et une réserve utile de survie (RUS) correspondant à l'eau contenue dans la couche profonde. Ainsi, $RUM = RUF + RUS$ et $RUS = 0,4 \times RUM$.

Si $P - ETP > 0$ (remplissage de la réserve utile du sol), on ne peut pas recharger l'horizon profond tant que l'horizon superficiel n'a pas atteint sa capacité maximum. Les deux couches se remplissent successivement, de manière linéaire. Au final, 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 $P - ETP < 0$, l'eau contenue dans la RUS ne peut être prélevée tant que la RUF n'est pas vide. La RUF diminue de façon linéaire, jusqu'à se vider complètement. Puis, lorsqu'elle est vide, l'eau prélevée dans le sol pour une période de t_1 à t_2 est une fraction de la quantité d'eau disponible à t_1 :

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

Ce modèle rend bien compte d'un effet seuil dû au fait que plus le sol sèche, plus l'eau qu'il contient encore est difficilement extractible (Breda *et al.*, 1995).

1.4.3.3. Autres modèles

D'autres modèles, généralement fondés sur le même raisonnement de base que les précédents, ont été mis en place.

Certains (Bontemps, 2008) adaptent par exemple le modèle de Thornthwaite à un modèle à deux compartiments. La réserve utile se remplit alors de façon linéaire, selon la modalité commune à Palmer et Thornthwaite, mais la réserve facilement utilisable (RUF) se vide de façon linéaire (comme pour le bilan hydrique de Palmer), tandis que la RUS se vide selon une exponentielle négative.

Pour la suite de l'étude, nous avons effectués les calculs de bilans en eau des sols à partir des méthodes de Palmer et Thornthwaite uniquement. Ces deux méthodes, contrairement aux autres, ont l'avantage d'avoir été abondamment discutées et éprouvées dans la littérature.

Afin de visualiser les différences entre les bilans hydriques de Thornthwaite et Palmer, nous avons modélisé le remplissage et la vidange de la RUM selon les deux méthodes pour un cas purement théorique. La RUM a été fixée à 100 mm dans les deux cas. L'évolution de la réserve utile a été calculée pour un pas de temps arbitraire. Le remplissage a été simulé à partir d'une RUM totalement vide ($RU = 0$ mm), pour un bilan hydrique climatique sur le pas de temps considéré ($P - ETP$) constant, fixé à +1mm. Pour la vidange, nous sommes partis d'une réserve en eau maximale ($RU = RUM$), et nous avons simulé un bilan hydrique climatique négatif constant, fixé à -5 mm (**Tableau 3**). On

remarque alors que non seulement les modalités de vidanges de la réserve utile diffèrent, mais aussi que la méthode de Palmer tend à vider la RUS beaucoup plus vite que le modèle de Thornthwaite. La rapidité de vidange de la RUF est cependant équivalente.

	Méthode de Thornthwaite	Méthode de Palmer
Réserve utile totale du sol	homogène	Divisé en RUS et RUF
Recharge de la RU	Linéaire	Linéaire
Décharge de la RUF	Exponentielle négative	Linéaire
Décharge de la RUS	Exponentielle négative	RU(t+1) est défini par une fraction de RU(t)

<p>RU=f(t)</p> <p>La réserve utile est ici simulée à partir d'une valeur de RUM de 50mm et un bilan hydrique climatique (P-ETP) constant (+1mm pour la charge, -5 mm pour la vidange de la réserve utile). Au départ, la réserve utile est maximale pour simuler la vidange, et nulle pour simuler le remplissage. Le pas de temps utilisé pour cette simulation est arbitraire.</p>	Charge	Charge
	Décharge	Décharge

Tableau 3 : Simulations de remplissage et de vidange du réservoir en eau des sols selon les deux méthodes de calcul de bilans hydriques édaphiques utilisées dans cette étude (Thornthwaite et Mather, 1955 ; Palmer, 1965)

1.4.4. Variations dans les calculs d'ETP

Outre les modalités de remplissage et de vidange de la réserve utile des sols, l'une des principales différences entre les calculs de bilans hydriques réside dans la méthode de calcul de l'évapotranspiration potentielle. Il existe environ 50 formules différentes pour l'estimer (Dyer, 2009), les plus usitées étant celles de Penman-Monteith (Penman, 1978 ; Granier *et al.*, 1999 ; Zierl, 2001 ; Kerkhoff *et al.*, 2004 ; Breda *et al.*, 2006), Turc (Dirnböck et Grabherr, 2000 ; Dyer, 2009) et Thornthwaite (Palmer, 1965 ; Li *et al.*, 1992 ; Wells *et al.*, 2004). Ces différentes méthodes de calcul sont présentées en **Annexe 5**.

L'ETP de Penman-Monteith prend en compte un grand nombre de données sur un pas de temps court (journalier). Elle fournit des valeurs proches de la réalité, mais demande un grand nombre de données source et est peu accessible au forestier de terrain.

La formule de Thornthwaite est beaucoup plus accessible, mais n'intègre pas l'intensité du rayonnement solaire, contrairement à celles de Penman ou de Turc.

Dans le cadre de cette étude, la méthode de calcul des évapotranspirations retenue sera celle de Turc, qui intègre les données de rayonnements solaires, et donc d'exposition et de latitude, mais reste relativement accessible au forestier de terrain. Il a été prouvé lors de comparaisons qu'il s'agit de l'une des méthodes les plus performantes lorsqu'il n'est pas possible de calculer celle de Penman-Monteith (Lu *et al.*, 2005).

2. Méthodologie générale

2.1. ORGANISATION DE L'ETUDE

Cette étude s'inscrit dans le cadre des activités du réseau mixte technologique AFORCE (adaptation des forêts au changement climatique). Ce groupement de forestiers et de chercheurs a pour objectif à court terme de fournir aux gestionnaires forestiers des outils opérationnels pour faire face aux changements du climat. Elle est co-encadrée par le Laboratoire d'étude de la Ressource forêt bois, et le centre régional de la propriété forestière de Champagne-Ardenne.

La caractérisation de la contrainte hydrique des sols en utilisant différentes méthodes extraites de la littérature scientifique a été récemment effectuée par le LERFoB *via* des calculs de bilans hydriques édaphiques (réalisation : C. Piedallu). Mon travail a consisté en différentes phases.

- 1) Comparaison et validation des données de base utilisées pour réaliser des calculs de bilan en eau (données climatiques et édaphiques). Des bilans hydriques avaient déjà été calculés au LERFoB. Cependant, de nouvelles données climatiques et édaphiques ont été développées depuis. Cette comparaison a permis de sélectionner des données plus pertinentes que celles utilisées auparavant pour réaliser à nouveau les calculs de la ressource en eau du sol.
- 2) Calcul avec les données identifiées comme étant les plus pertinentes des bilans hydriques édaphiques selon deux méthodes (Palmer et Thornthwaite) en utilisant les programmes du LERFoB. Recherche de différents indices utilisés dans la littérature pour synthétiser la sécheresse, calcul et évaluation de ces indices.
- 3) Sélection parmi ces indices (7 indices calculés selon deux méthodes de calcul, Palmer et Thornthwaite) du plus efficace pour expliquer la distribution des principales essences forestières françaises. Chacun de ces indices a été testé en étudiant sa capacité à prédire la distribution des principales essences forestières. Au final, un seul indice a été retenu.
- 4) Validation à différentes échelles de l'indice de contrainte hydrique sélectionné calculé sous SIG et comparaison avec des mesures de terrain. La carte numérique de l'indice retenu sera évaluée à différentes échelles (France, région naturelle, massif, forêt, parcelle).
- 5) Discussion des potentialités d'utilisation de la carte numérique de l'indice hydrique obtenue dans les catalogues et guides de stations. Quels apports ce nouvel outil peut-il avoir vis-à-vis des informations déjà existantes dans ces documents ? Comment peut-on l'intégrer à de tels documents et comment pourrait-il permettre de les rendre plus performants dans un contexte climatique changeant ?

2.2. DONNEES DISPONIBLES POUR LES CALCULS DE BILANS HYDRIQUES

La grande quantité de données numériques spatialisées dans la base Digitalis du LERFoB a permis de réaliser ce travail. Nous avons ainsi pu comparer les différents jeux de données disponibles.

Trois types de données écologiques entrent dans les calculs des bilans en eau des sols : les précipitations, l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée à partir de données de températures et de rayonnement solaire, et la réserve utile maximale des sols (RUM) correspondant à la capacité de stockage maximale en eau du sol utilisable par les plantes. Ces indices sont les données climatiques et édaphiques de base servant au calcul des bilans hydriques édaphiques. Nous disposons de plusieurs

versions de chaque indice (modèles à différentes résolutions, méthodes de calcul différentes...). Nous avons donc, pour chaque indice, choisi la version la plus pertinente pour calculer et cartographier l'eau dans le sol.

2.2.1. Données de rayonnements solaires

Plusieurs jeux de données sont disponibles pour les rayonnements solaires. 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). Son utilisation a été envisagée, mais la résolution grossière de ce modèle présente une limite trop importante pour ces travaux.

Le LERFoB a de son côté développé un modèle de rayonnement solaire (modèle Hélios) à une résolution beaucoup plus fine (50m) (Piedallu et Gegout, 2007 ; Piedallu et Gegout, 2008). Une première version de ce modèle, présente des rayonnements solaires moyens mensuels et annuels, calculés sur la période 1971 – 2000 à partir de paramètres locaux (pente, exposition, altitude, effet de masque) et de la latitude. Cette première version sera par la suite présentée comme le modèle Hélios 2007. Une seconde version d'Hélios a été calculée en améliorant la prise en compte de la nébulosité dans le modèle (Hélios 2010). Nous allons comparer ces deux versions pour vérifier si la dernière (Hélios 2010) permet bien d'améliorer les calculs initiaux.

2.2.2. Données de températures

Deux modèles de températures à fine résolution sont disponibles. Le premier, calculé par Météo-France, est extrait du modèle climatique AURELHY (Benichou et Le Breton, 1987). Il modélise les températures moyennes mensuelles et annuelles sur la France au pas du kilomètre en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5 km. Le jeu de postes de mesures Météo-France utilisé pour la calibration de ce modèle n'est pas identifiable et le modèle n'est pas validé.

Un modèle de températures a également été réalisé au LERFoB (Piedallu *et al.*, non publié). Ce modèle cartographie les températures moyennes au pas de 50m en tenant compte de l'altitude, du rayonnement solaire, de la position topographique, de la distance au littoral des différentes mers et de l'occupation du sol. Il a été calibré à partir de 493 postes Météo-France incluant les séries homogénéisées. Avant calibration du modèle, toutes les températures mesurées sur les postes de calibration ont été corrigées selon le type de milieu dans lequel se trouve chaque poste de mesure (milieu urbain, prairial, littoral ou forestier). Les températures peuvent en effet varier selon le type de milieu dans lequel elles ont été mesurées. Un coefficient multiplicateur a donc été appliqué à chaque mesure afin que chaque donnée de température utilisée pour calibrer le modèle LERFoB corresponde à une température sur une zone forestière. Ce modèle ne fournit donc que des températures sous microclimat forestier. Le type de milieu sur lequel se trouvent les postes Météo-France a été extrait à partir des données CORINE Land Cover (Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, 2009). Ce modèle a pour objectif d'essayer de palier certains problèmes reconnus concernant le modèle AURELHY, à savoir le manque de pertinence en zone de montagne dû au lissage de l'information, et le fait que la précision du modèle n'est pas connue. D'autre part, le modèle réalisé au LERFoB permet un calcul mensuel du climat année par année et non par normales de 30 ans comme pour le modèle AURELHY (Bertrand *et al.*, sous presses). Cette flexibilité dans le temps est importante pour pouvoir évaluer les changements d'eau du sol qui sont intervenues ces dernières décennies.

Contrairement au modèle AURELHY, qui est construit sur des données topographiques spatialisées avec une résolution de 5 km, le modèle LERFoB a été calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) spatialisant la topographie française au pas de 50 m.

A l'échelle de la France, la validation du modèle de températures LERFoB a été effectuée à partir des mesures de 493 postes météo-France indépendants du jeu de calibration, et répartis de façon homogène sur tout le territoire.

2.2.3. Données de précipitations

Nous avons là encore comparé le modèle AURELHY au pas du km produit par Météo-France (Benichou et Le Breton, 1987) et le modèle du LERFoB.

Le modèle du LERFoB a été calibré à partir de 419 postes Météo-France répartis de façon homogène sur le territoire. Il prédit les cumuls de précipitations avec une résolution de 1 km. Il prédit les précipitations à partir de la topographie (calculée à partir d'un MNT au pas de 50 m) et d'autres paramètres, comme la distance aux différentes mers bordant le territoire français.

Le modèle AURELHY pour les précipitations est construit à partir d'un MNT au pas de 5 km de la même manière que le modèle de température.

2.2.4. Réserve utile maximale des sols

Les modèle spatialisés utilisés (Piedallu *et al.*, 2010) évalue la RUM à l'échelle de la France avec une résolution de 1 km ou 500 m (**Figure 13**).

Le modèle au pas du kilomètre est construit à partir de l'interpolation sur toute la France de données obtenues ponctuellement à partir d'estimations des sols sur 100 307 placettes de l'IFN. La méthode d'interpolation utilisée est celle du krigeage ordinaire, considérée comme la plus juste des méthodes géostatistiques. Les RUM utilisées pour la calibration du modèle sont obtenues à partir de tables (fonctions de pédotransfert) estimant une capacité de rétention en eau des sols en fonction de la profondeur des sols, de la charge en éléments grossiers (cailloux) et de la texture des différents horizons (Al Majou, 2008). Une seconde carte a été réalisée avec une résolution de 500 m grâce à des techniques de modélisation au lieu du krigeage. Cette carte intègre un certain nombre de covariables permettant d'affiner les données modélisées et d'améliorer la spatialisation des données. Ces dernières intègrent ainsi la géologie (extraite d'une carte au 1/1 000 000), la topographie et le climat.

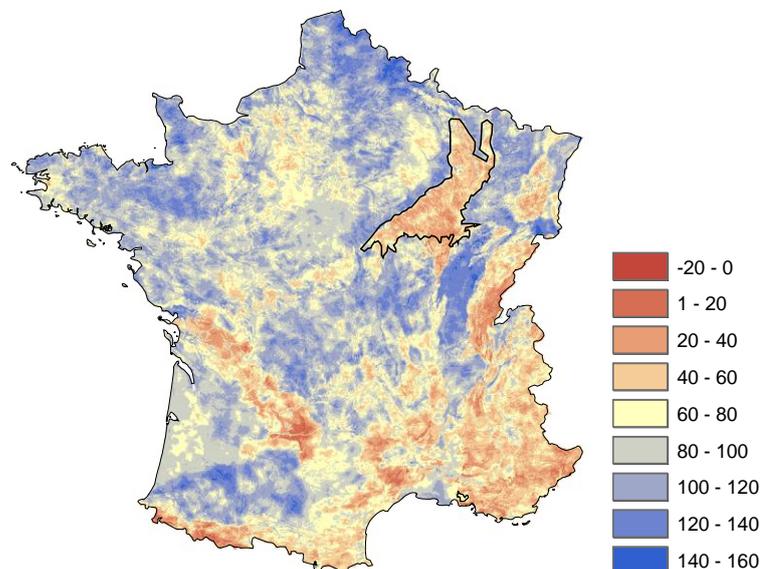


Figure 13 : Cartographie de la modélisation de la réserve utile maximale des sols en France (mm) et sur les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Bourgogne et Lorraine au pas de 500m

Une troisième carte des RUM a été élaborée en parallèle aux travaux présentés ici sur une zone d'étude plus réduite concernant le Nord-est de la France (Villiers, 2011). Cette carte reprend la

méthode de calcul de la carte présentée précédemment mais en se fondant sur des cartes géologiques à plus grande échelle (1/50 000), ce qui permet d'intégrer des informations plus fines spatialement, mais aussi plus précises, avec notamment des données concernant des formations géologiques superficielles (plaquages limoneux, alluvions récentes) que la carte géologique au 1/1000000 ne permet pas de distinguer. Ce dernier modèle n'intègre en outre aucune donnée climatique.

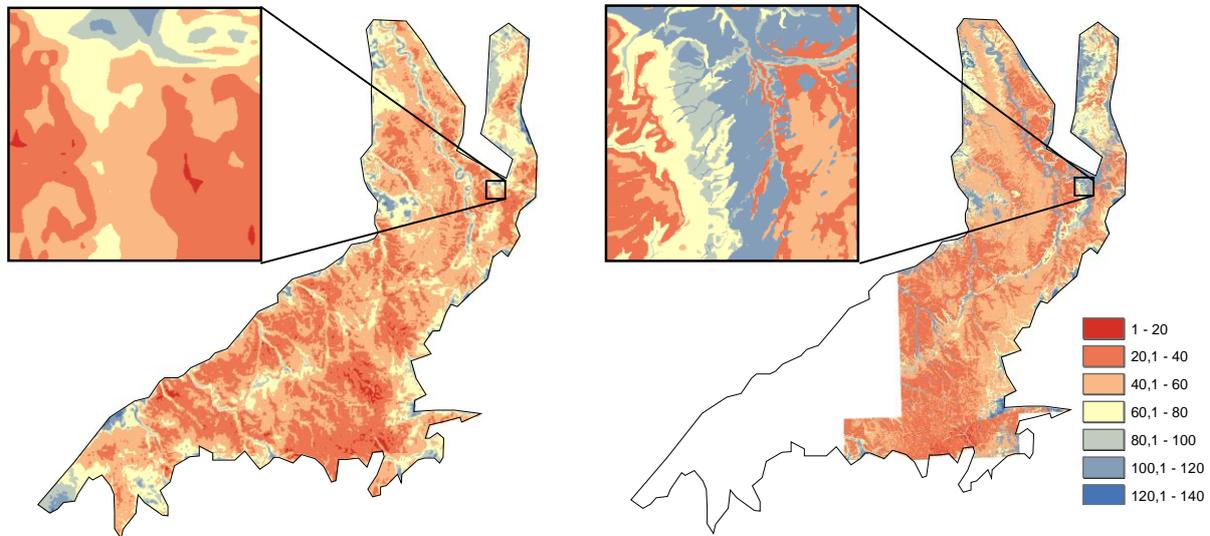


Figure 14 : Réserves utiles maximales des sols cartographiées à basse résolution (500 m, à gauche) et haute résolution (50 m, à droite) à l'échelle des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne Bourgogne et Lorraine (en mm)

2.3. METHODE DE VALIDATION ET COMPARAISON DES DIFFERENTS INDICES ECOLOGIQUES

2.3.1.1. *Validation statistique des données écologiques utilisées*

Cette méthode a été utilisée pour évaluer les données de base ayant servi au calcul des bilans hydriques édaphiques (indices écologiques définis au paragraphe 3.2.1) afin de pouvoir comparer les différents jeux de données concernant un même indice, ainsi que pour évaluer les indices hydriques issus des bilans hydriques édaphiques calculés.

Cette méthode de validation statistique des données consiste en la comparaison des données prédites par un modèle et des données mesurées sur un nombre déterminé de postes (postes Météo-France ou placettes de relevés pédologiques) indépendants du jeu de calibration (jeu de validation).

La comparaison des données mesurées et prédites est effectuée grâce à l'analyse d'indicateurs statistiques tels que le coefficient de détermination (R^2), qui caractérise le pourcentage de la variance observée expliqué par le modèle, le biais moyen, calculé comme la différence entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées, et l'erreur quadratique moyenne (*root mean square error*, RMSE), permettant d'évaluer en valeur absolue l'écart moyen entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [(y_j - \hat{y}_j)^2]}$$

Pour chaque donnée, cette étude a été menée à l'échelle de la France entière ainsi que des plateaux calcaires de Champagne et Lorraine.

2.3.1.2. Données disponibles pour la validation statistique des cartes numériques

- *Données Météo-France*

Ces données sont récoltées sur les différents postes répartis sur tout le territoire français. Elles ont été utilisées pour calibrer ou valider les cartes numériques de précipitations et de températures, les postes retenus pour la validation d'un modèle n'ayant jamais été utilisé pour sa calibration afin de garantir l'indépendance stricte des deux jeux.

Type de donnée	Nombre de postes utilisés pour calibrer le modèle	Nombre de postes utilisés pour valider le modèle
Températures moyennes mensuelles	493	493
Cumul mensuel de précipitations	419	471

Tableau 4 : nombre de postes Météo-France dont des données de températures ou de précipitations ont été utilisées pour calibrer ou valider les modèles climatiques spatialisés

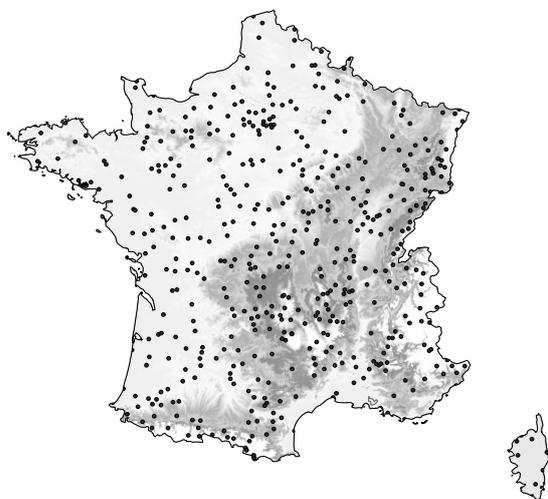


Figure 15 : Localisation des postes Météo France ayant fourni les données pour la validation du modèle LERFoB (493 postes indépendants du jeu de calibration du modèle)

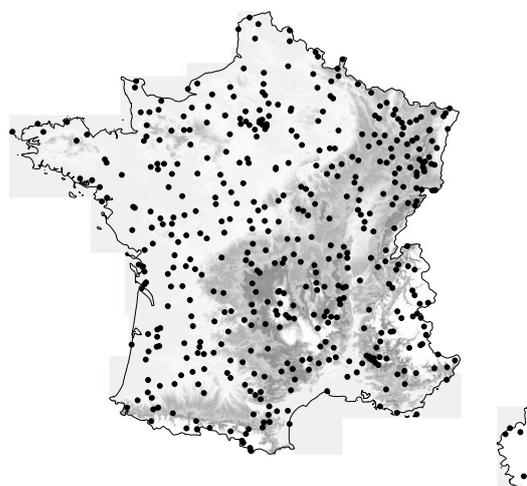
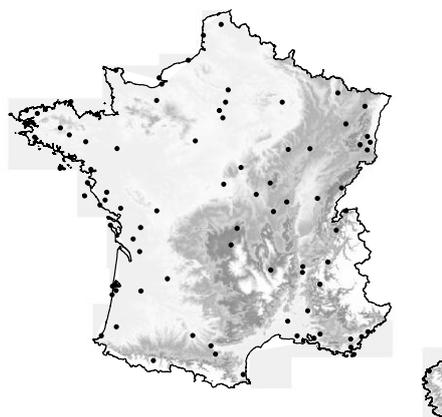


Figure 16 : Localisation des 471 postes Météo-France utilisés pour la validation du modèle de précipitations (jeu de poste indépendant du jeu de calibration du modèle)

Les données de 86 postes sur lesquelles les rayonnements solaires sont mesurés ont également servi à valider les différents modèles de rayonnements solaires (**Figure 17**). Aucun de ces postes n'a également servi à calibrer le modèle.

Figure 17 : Localisation des 86 postes Météo-France indépendants du jeu de calibration utilisé pour valider les modèles de rayonnements solaires Hélios 2007 et 2010



▪ *Base RENECOFOR*

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, seules placettes sur un total de 107 équipées d'un système de mesure de données climatiques. 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 relevées les données de rayonnement solaires. Ces données, indépendantes de celles ayant servi à la calibration des modèles SIG de bilans en eau des sols, permettent d'utiliser les mesures du réseau RENECOFOR pour recalculer ponctuellement ces bilans hydriques et de valider les cartes prédictives produites. 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.

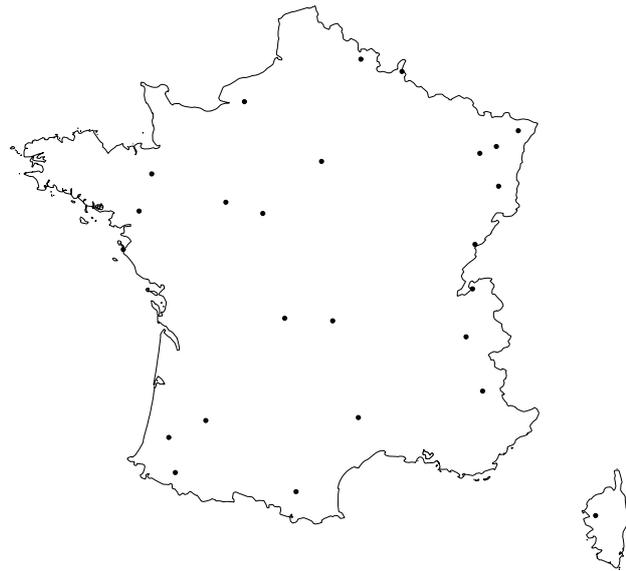


Figure 18 : localisation géographique des 25 placettes du réseau RENECOFOR utilisées pour cette étude

▪ *Base de données IFN*

La base de données IFN (nouvelle méthode) fournit un inventaire floristique, dendrométrique et une description des sols complets sur 32 544 placettes réparties de façon homogène sur la France entière. Le nombre très important de placettes permet d'utiliser cette base de données sur des zones relativement réduites. La zone des plateaux calcaires étudiée est en outre bien représentée (1124 relevés). Les données de description des sols ont permis un calcul des réserves utiles maximales (RUM) des sols forestiers afin de valider les modèles spatialisés. Nous avons de plus validé la carte numérique de l'indice hydrique retenu en le recalculant à partir des données de RUM mesurées sur les placettes et en y intégrant les données climatiques extraites des modèles spatialisés sur les points de relevés.

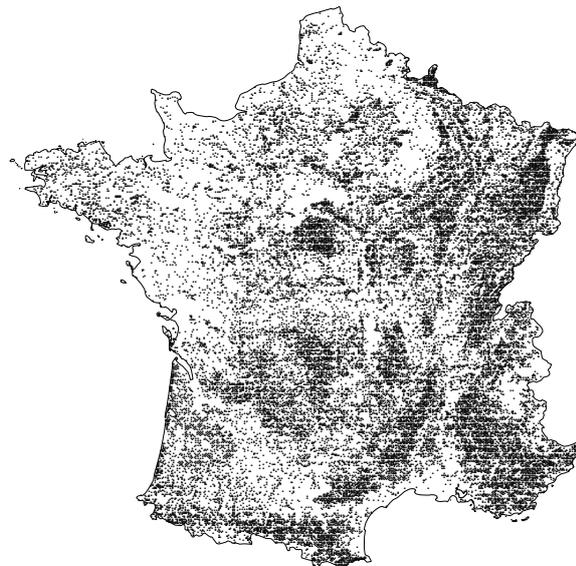


Figure 19: Distribution spatiale des 32 544 placettes de relevés de l'Inventaire Forestier National

- *Données Biosoil*

Biosoil est une étude à l'échelle européenne visant à produire un inventaire des sols pour le réseau européen de surveillance des forêts (Durant *et al.*, 2011). Cette étude couvre 543 sites en France, organisés selon un découpage systématique du territoire en un quadrillage de 16 km x 16 km. Sur chaque site, les sols sont analysés selon divers paramètres (granulométrie, pH, carbone organique et azote total etc.).

Les mesures granulométriques fournies sur ces sites permettent d'estimer les capacités de rétention en eau de chaque horizon avec une grande précision, et de calculer une RUM en limitant les imprécisions qu'induit une estimation des textures au toucher (protocole IFN). Cette base de données, indépendante de celle utilisée pour calibrer les modèles spatialisés de RUM (base IFN, ancienne méthode, Piedallu *et al.*, 2010, Villiers, 2011) fournit alors un jeu de mesures de bonne qualité pour valider ces modèles.



Figure 20 : localisation des 543 relevés Biosoil utilisés pour valider les modèles de RUM à l'échelle de la France

- *Relevés de terrain*

Des campagnes de terrain auxquelles j'ai pu participer ont été conduites à des échelles locales sur différents territoires autour des communes de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec (Meurthe et Moselle). Sur ce site ont été effectués des descriptions de sols permettant de recalculer des réserves utiles maximales. Les relevés ont été effectués selon trois maillages imbriqués (250, 100 et 50 m), à trois échelles différentes (500 ha, 40 ha, et 10 ha) (**Tableau 5**). On a pu, à partir de ces données, discuter de la validité des modèles de RUM à différentes échelles. Une cartographie des différentes placettes réalisées sur chacun des sites est présentée **Annexe 6**.

La variabilité de l'étendue de ces relevés, ainsi que de la densité de l'échantillonnage a permis de valider la cartographie des RUM à plusieurs échelles ainsi que la carte des contraintes hydriques. Pour le site de Bois l'évêque nous avons effectué des relevés à des échelles emboîtées.

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

Tableau 5 : description du dispositif de relevés sur les forêts de Bois l'Evêque et Villey-le-sec (Meurthe et Moselle) selon trois maillages imbriqués

Cette variabilité de densité d'échantillonnage permettra de discuter de l'échelle à laquelle il est pertinent d'utiliser la carte de l'indice hydrique retenu.

J'ai de plus effectué une seconde campagne de terrain pour évaluer :

- l'efficacité de la carte numérique des contraintes hydriques à rendre compte de la variabilité spatiale
- la variabilité des RUM et contraintes hydriques au sein d'un même pixel de la carte, afin de discuter de la représentativité de la valeur indiquée sur le pixel par rapport aux différentes valeurs mesurées sur le terrain au sein du pixel.

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 (Annexe 7).

Afin de discuter de la capacité des cartes numériques à discriminer les variations des RUM le long de ce gradient, les valeurs extraites de celles-ci ont été comparées aux valeurs mesurées sur les points de relevés.

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 décrit le sol en cinq points de la placette à l'aide de sondages à la pioche ou 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. Nous avons alors pu estimer une RUM et les contraintes hydriques sur chaque sondage, et discuter des causes de la variabilité observée sur une même placette.

2.3.1.3. Etude de la capacité prédictive des données vis-à-vis de la distribution des essences

L'un des objectifs de cette étude est d'utiliser la carte des bilans en eau pour compléter les catalogues de stations et affiner les conseils de choix d'essences en fonction de la disponibilité en eau des sols. De plus, il est parfois impossible de valider des indices existants : c'est le cas du modèle AURELHY dont la liste des postes ayant servi à réaliser le modèle n'est pas connue. La méthode présentée ci-dessous a permis :

- de comparer différents modèles de la même variable (par exemple deux modèles de précipitations moyennes annuelles). Ce test a ici été utilisé pour discriminer les meilleurs modèles entre les modèles climatiques LERFoB et AURELHY (modèles de précipitations et de températures). Cette méthode a l'avantage de permettre la comparaison de modèles pour lesquels il est impossible d'identifier un jeu de mesures indépendant du jeu de calibration, ce qui rend impossible la validation statistique (voir paragraphe 2.3.1.1.), comme c'est le cas pour le modèle AURELHY.
- de comparer l'efficacité de différentes variables à prédire la distribution des essences. Nous avons eu recours à cette méthode pour identifier l'indice hydrique édaphique qui permet de mieux expliquer la distribution des essences forestières parmi un florilège d'indices présentés dans la littérature scientifique.

Nous avons modélisé, pour chaque essence, la distribution de 40 essences forestières grâce à une méthode de régression logistique, permettant de prédire en fonction d'une variable écologique une probabilité de présence comprise entre 0 et 1 à partir des relevés floristiques collectés par l'Inventaire Forestier National, et évalué la pertinence des différents indices disponibles (**Guisan et Zimmerman, 2000**).

La qualité de chaque modèle a été évaluée par la méthode de la courbe ROC (**Fielding et Bell, 1997**). Cette méthode permet de transformer une probabilité de présence continue en une prédiction de la distribution de l'espèce considérée en présence ou absence. Cette prédiction est alors comparée à la distribution réelle de l'essence. Cela permet de tracer une courbe du taux de présences bien prédites en fonction du taux d'absences bien prédites. L'aire en dessous de cette courbe (AUC, *area under the curve*) est un indice permettant d'évaluer la qualité globale du modèle (**Swets, 1988**) (**Tableau 6**). La comparaison des AUC de plusieurs modèles permet donc d'identifier le modèle basé sur la variable la plus explicative de la distribution d'une essence.

valeur d'AUC	qualité du modèle
entre 0,5 et 0,6	mauvais
entre 0,6 et 0,7	médiocre
entre 0,7 et 0,8	correct
entre 0,8 et 0,9	bon
entre 0,9 et 1	excellent

Tableau 6 : Evaluation de la qualité d'un modèle en fonction des valeurs d'AUC

La probabilité de présence modélisée en fonction d'un indice peut être biaisée par d'éventuelles interactions entre différentes variables. Ainsi, une essence peut être absente d'une zone où les conditions hydriques sont favorables mais où les conditions thermiques sont limitantes. La méthode de régression logistique étant basée sur l'observation de la présence ou absence des essences dans des conditions données, la probabilité de présence obtenue rend compte de ces interactions. Il est possible de les limiter en réalisant des modèles multivariés. Nous avons ainsi tenté de décorréler les effets de l'eau dans le sol des effets des températures dont l'effet sur les plantes est connu depuis longtemps. Pour chaque indice et chaque essence, nous avons donc réalisé deux modèles : l'un prenant en compte deux variables thermiques seules (le nombre de jours avec des températures inférieures à 5°C, et le minimum des températures moyennes mensuelles calculées sur la période 1961 – 1990, ces deux variables étant le plus communément utilisées dans la littérature), l'autre construit à partir des deux mêmes variables et d'un indice hydrique édaphique (successivement chacun des indices à évaluer). Le calcul de la différence d'AUC entre les deux modèles permet ainsi d'évaluer le gain d'AUC dû à l'indice hydrique seul.

L'une des limites de cette approche est que les résultats obtenus dépendent de la distribution observée des essences forestière, laquelle est soumise à des impacts anthropiques sur les communautés floristiques, dus aux différentes pratiques sylvicoles (plantations, travail au profit de certaines essences et au détriment d'autres etc.). La distribution modélisée n'est donc pas la distribution « naturelle » de l'essence, mais la distribution tenant compte des influences anthropiques.

40 essences forestières ont été utilisées pour ces tests à l'échelle de la France, et 16 à l'échelle des plateaux calcaires. Les essences considérées, ainsi que leurs exigences écologiques telles qu'elles sont décrites dans la Flore Forestière Française (Rameau *et al.*, 1989 ; Rameau *et al.*, 1993) et les abréviations utilisées par la suite sont présentées en **Annexe 8**.

2.3.1.4. Données disponibles pour l'étude de la capacité des indices à prédire la distribution des essences

- *Relevés floristiques de l'Inventaire Forestier National*

Nous avons calibré les modèles de distribution des essences à partir des observations de terrain consignées dans la base de données IFN (nouvelle méthode) présentée au paragraphe 2.3.1.2. Une

partie de la qualité des modèles obtenus repose sur l'abondance des relevés disponibles (32 544) et de leur répartition homogène sur la zone d'étude.

2.4. COMPARAISON DE L'HUMIDITE DES SOLS EVALUEE SELON LES GUIDES DE STATIONS ET LA CARTE NUMERIQUE DES BILANS HYDRIQUES REALISEE

2.4.1. Méthode

Une fois le modèle spatialisé des bilans hydriques réalisé, il s'agit d'identifier les apports de la carte numérique obtenue aux informations déjà disponibles dans les guides de stations. Nous avons pour cela comparé les valeurs de l'indice hydrique sélectionné observées sur les différentes unités stationnelles vis-à-vis avec les optima et amplitudes écologiques des principales essences forestières de la zone.

L'optimum écologique vis-à-vis d'une variable représente la valeur de cette variable pour laquelle on observe une probabilité de présence maximale de l'espèce. L'amplitude écologique représente la gamme de valeurs la plus favorable à la présence d'une essence ou d'une unité stationnelle. La probabilité de présence des espèces ou des stations a été calculée grâce à une régression logistique, décrite précédemment (Guisan et Zimmerman, 2000). Ce procédé permet de tracer une courbe représentant la probabilité de présence de l'entité considérée en fonction du facteur écologique étudié. L'amplitude écologique de l'entité est alors définie comme la gamme de valeurs centrées sur l'optimum écologique de l'entité et sur laquelle on calcule 80% de l'aire sous la courbe (**Figure 21**) (Gégout et Pierrat, 1998).

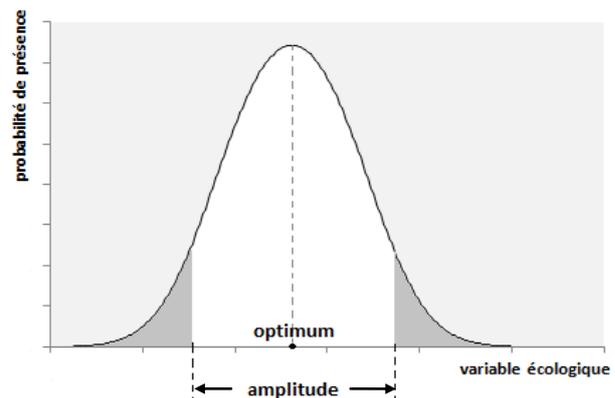


Figure 21 : principe de calcul de l'amplitude et de l'optimum écologique (exemple théorique). La zone blanche située sous la courbe et centrée sur l'optimum représente 80% de l'aire sous la courbe

2.4.2. Données disponibles

Les analyses présentées ci-dessus ont nécessité l'utilisation :

- de relevés floristiques en présence absence disponible avec la base IFN nouvelle méthode (1124 relevés, voir paragraphe 2.3.1.2)
- de cartes numériques des stations sur les forêts des plateaux calcaires

Les cartes numériques des stations proviennent des bases de données SIG de l'Office National des Forêts et du CRPF. On a ainsi compilé 13 460 relevés surfaciques sur 551 forêts, réparties sur toute l'aire de la zone d'étude. Chaque forêt est ainsi divisée en plusieurs polygones dont chacun correspond à une unité homogène en ce qui concerne le type de station. Ces polygones sont issus de l'interpolation de relevés ponctuels.

Cependant, la base de données obtenue est très hétérogène. Certains relevés de stations qui y sont consignés ont été réalisés à partir du catalogue des stations correspondant à la localisation du relevé, d'autres ont été faits à partir du guide des stations, et d'autres à partir de groupes stationnels divers (groupements stationnels des DILAM-ORLAM, par exemple, ou propres à un aménagement forestier). La transformation des données ponctuelles en cartes surfaciques peut en outre se faire de plusieurs manières, dont la précision varie et est parfois mal connue (Bazin et Gaudin, 2007). Il était donc difficile de comparer ces différentes unités entre elles, une même unité stationnelle pouvant être codifiée de plusieurs manières.

Nous avons tenté d'harmoniser ces données. 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 (cf. **Annexe 9**) (Milard, 2004). Ce choix a été basé sur le fait que ce guide décrit des unités stationnelles bien différenciables correspondant à des regroupements de types de stations. Il est ainsi plus aisé d'affecter un type de station à une unité stationnelle que l'inverse. Cela limite alors les biais liés aux difficultés rencontrées pour harmoniser les stations. Cependant, ce guide ne couvre pas la totalité de la zone d'étude. La pertinence de l'harmonisation de toutes les unités stationnelles à partir de ce guide sera donc discutée par la suite.

Un tableau synthétique des caractéristiques des unités stationnelles décrites dans le guide Milard des plateaux calcaires est présenté en **Annexe 10**.

3. Résultats

Cette section présente les résultats que nous avons obtenus à chaque étape de l'étude. Nous commencerons ainsi par étudier et valider les différentes données disponibles pour le calcul des bilans hydriques édaphiques. Puis nous choisirons parmi sept indices dérivés de ces bilans lequel permet d'expliquer au mieux la distribution des essences. Enfin, nous validerons la carte numérique de l'indice sélectionné.

3.1. IDENTIFICATION DES MEILLEURS BASES DE DONNEES DISPONIBLES POUR LE CALCUL DES BILANS EN EAU

Le calcul des bilans hydriques effectués dans le cadre de cette étude est fondé sur des données climatiques ou édaphiques elles-mêmes issues de modèles spatialisés. Nous allons dans un premier temps estimer la précision de ces données élémentaires et nous allons sélectionner les plus pertinentes parmi toutes celles disponibles. Les paragraphes suivants présentent donc l'étude de la validité des modèles de rayonnement solaire, de températures moyennes de précipitations et de réserve utile maximale des sols (RUM) utilisés dans notre étude.

3.1.1. Validations statistiques des modèles climatiques

3.1.1.1. Rayonnement solaire

L'objectif de cette étape est de choisir le jeu de données de rayonnement solaire à intégrer dans les calculs d'ETP afin d'effectuer un bilan hydrique édaphique. Les différents modèles à disposition sont les modèles Hélios 2007 et Hélios 2010, décrits au paragraphe 2.2.1. La méthode utilisée pour valider et comparer ces données est la méthode de validation statistique, présentée à la section 2.3.1.1.

a) A l'échelle nationale

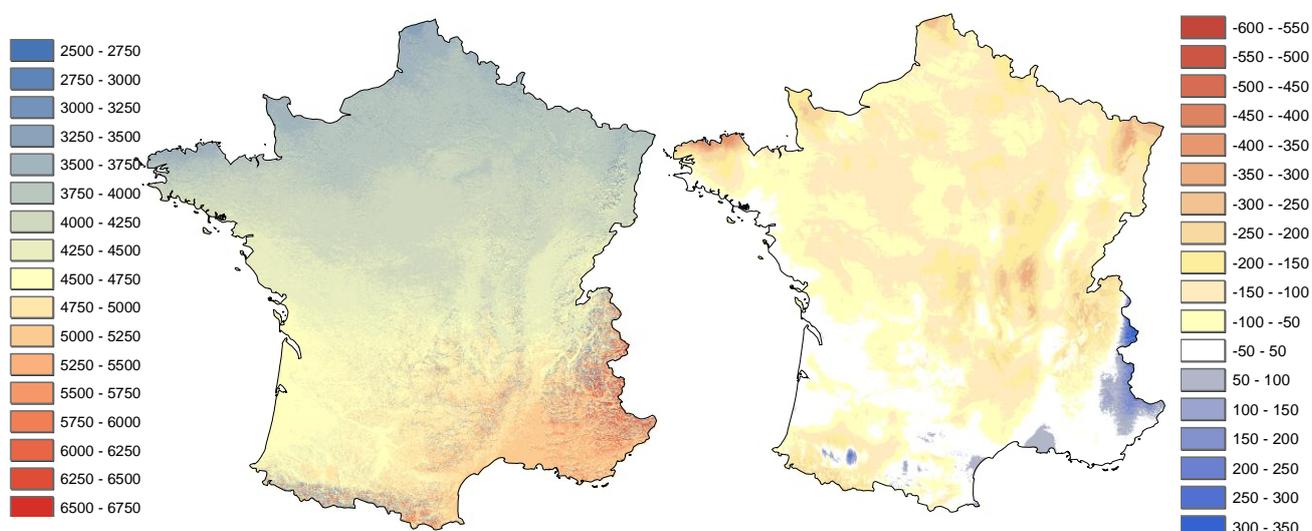


Figure 22 : Données de rayonnement solaire au pas de 50 m issues du modèle Hélios 2010 (à gauche) et écarts de rayonnements annuels prédits entre les données Hélios 2007 et Hélios 2010 (à droite) (MJ/m²). Une valeur positive indique ici qu'Hélios 2010 surprédit par rapport à Hélios 2007, tandis qu'une valeur négative indique une prédiction plus forte d'Hélios 2007 que 2010.

Pour les deux versions du modèle, les valeurs prédites sont fortement corrélées aux valeurs mesurées par Météo-France. Cependant, les valeurs issues de la seconde version du modèle conduisent à un R^2 plus élevé, notamment en ce qui concerne les moyennes annuelles ($R^2 = 0,82$ pour Hélios 2010, $R^2 = 0,78$ pour Hélios 2007). L'analyse des valeurs de R^2 mensuelles (**Tableau 7**) montre que le modèle de 2010 prédit le rayonnement solaire avec un biais légèrement moins fort que le précédent sur les mois d'été et que le R^2 au printemps, en hiver et en automne est globalement meilleur pour la version 2010. Ces résultats conduisent à considérer que les données du modèle Hélios 2010 sont plus performantes que celles qui avaient été publiées en 2007.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
MF	129,2	191,4	350,8	455,3	583,6	619,9	648,9	571,9	397,8	254,3	147,3	105,7	4456,1
Hélios 2007	112,1	174,4	337,4	468,0	606,6	661,5	681,7	580,8	402,1	240,1	129,3	91,8	4485,7
Hélios 2010	111,3	173,2	335,0	467,3	604,4	659,7	679,8	579,0	401,1	239,3	128,9	91,4	4396,8
R^2 2007	0,88	0,84	0,81	0,60	0,60	0,62	0,68	0,65	0,72	0,78	0,84	0,88	0,78
R^2 (2010)	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
Biais 2007	-17,1	-17,0	-13,5	12,6	23,0	41,5	32,9	9,0	4,3	-14,2	-18,0	-13,9	29,6
Biais 2010	-17,9	-18,2	-15,8	11,9	20,8	39,8	31,0	7,1	3,3	-14,9	-18,3	-14,3	-59,3
RMSE 2007	21,6	23,6	27,5	29,5	39,1	54,2	50,6	32,1	25,3	23,0	22,9	18,0	249,3
RMSE 2010	21,9	24,2	28,3	28,8	35,8	52,8	48,8	31,6	24,8	23,0	22,9	18,1	227,4

Tableau 7 : R^2 , biais et RMSE entre les valeurs de rayonnements moyens annuels et mensuels sur la période 1961-1990, issus des modèles Hélios 2007 et 2010, et les mesures de 88 stations de relevé Météo-France (MJ/m^2) à l'échelle de la France

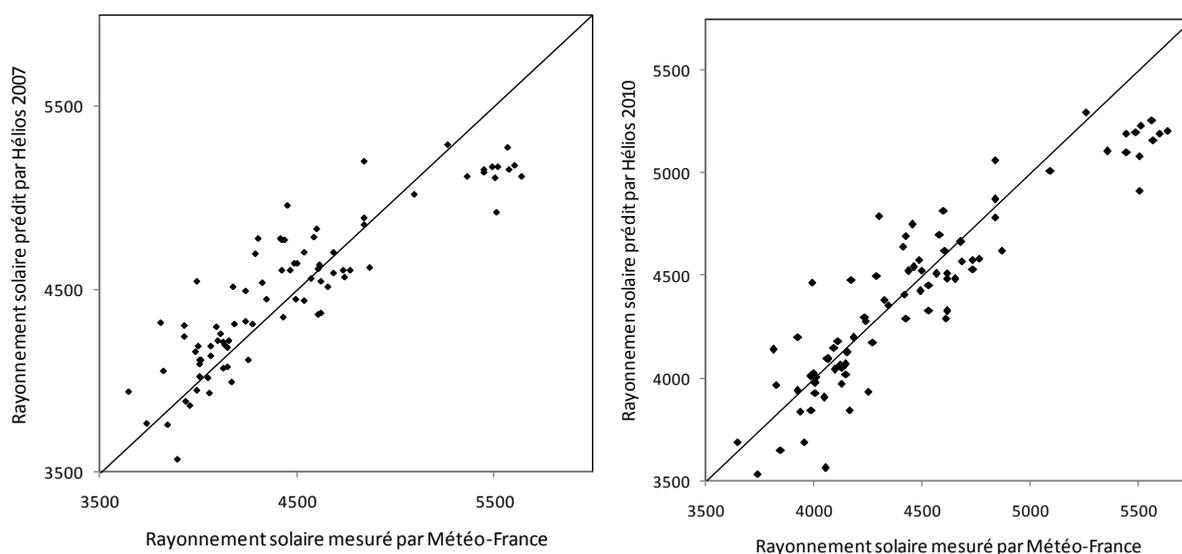


Figure 23 : Relation entre les valeurs de rayonnement solaire annuel moyen (MJ/m^2) sur la période 1961-1990 mesurées par Météo-France sur les 86 postes du jeu de validation et modélisées en 2007 (à gauche) et 2010 (à droite). Les diagrammes saisonniers pour chaque saison sont présentés Annexe 11.

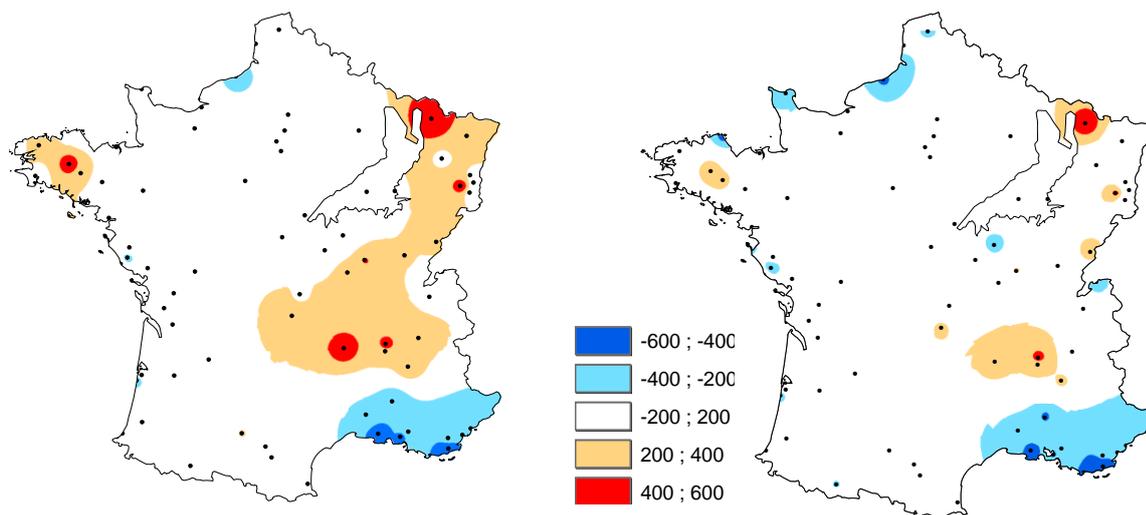


Figure 24 : Carte des erreurs de prédictions interpolées à partir des données du jeu de validation (MJ/m²) sur la France et les plateaux calcaires de Lorraine, Champagne et Bourgogne pour les modèles de 2007 (à gauche) et 2010 (à droite). Une erreur positive indique une sur-prédiction du modèle par rapport à une valeur mesurée, tandis qu'une valeur négative indique une prédiction trop faible. Les cartes des écarts pour chaque saison sont présentées en Annexe 12

Avec Hélios 2010, 78% stations présentent une différence entre la valeur prédite annuelle et la valeur mesurée inférieure à 5% par rapport à la valeur mesurée, et 93% montrent une différence inférieure à 10% pour le modèle 2010 (contre respectivement 71% et 92% pour l'ancienne version).

Il existe un biais annuel moyen légèrement plus important dans le cas de la version 2010. Ce biais pourrait être accentué par des valeurs prédites plus faibles sur dix postes dans le sud-est de la France, probablement dues à une surestimation de la couverture nuageuse de cette région en été. Néanmoins, malgré une légère sous-prédiction par rapport aux valeurs mesurées, la RMSE de la version 2010 du modèle est plus faible, et le biais moyen mensuel est moins prononcé que celui de la version précédente pour les mois d'été (**Tableau 7**). Or l'influence du rayonnement sur l'évapotranspiration des peuplements est plus forte à cette période, et est déterminante pour les bilans en eau des sols forestiers (Turc, 1961).

b) A l'échelle des plateaux calcaires

Il est difficile de valider efficacement la carte numérique des rayonnements solaires à l'échelle des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, Lorraine et Bourgogne, étant donné le nombre très restreint de postes météo France ayant des valeurs de rayonnement sur cette zone (2 inclus dans la zone, et 8 dans un périmètre de 50 km autour de la zone d'étude).

	Hélios 2007	Hélios 2010
rayonnement annuel minimum France	3568,9	3462,8
rayonnement annuel maximum France	5292,2	5295,6
moyenne annuelle France	4485,7	4393,8
rayonnement annuel minimum plateaux calcaires	3994,3	3847,8
rayonnement annuel maximum plateaux calcaires	4304,7	4198,8
moyenne annuelle plateaux calcaires	4176,5	4055,7

Tableau 8 : Caractérisation de la variabilité des rayonnements solaires annuels moyens (en MJ/m²) sur la France (86 postes) et les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (8 postes)

	Hélios 2007	Hélios 2010
erreur quadratique moyenne	261,7	231,7
biais moyen	142,9	-10,2
écart maximal entre valeurs prédites et mesurées (en valeur absolue)	631,3	540,8
écart minimal entre valeurs prédites et mesurées (en valeur absolue)	61,3	15,3

Tableau 9 : Caractérisation des erreurs de prédictions de rayonnements solaires moyens annuels (en MJ/m²) sur une zone de 50 km autour des plateaux calcaires

Les rayonnements solaires sur la zone des plateaux calcaires couvrent environ 18 % de la variabilité nationale en termes de rayonnement cumulé annuel. Les écarts de prédiction sur cette zone restent relativement faibles (moins de 200 MJ/m² en général pour Hélios 2010, soit 5% du total annuel) (**Tableau 9**).

Seul un poste en Moselle montre un écart plus important (631 et 540 MJ/m² respectivement pour Hélios 2007 et Hélios 2010, soit 15 % du cumul annuel). Etant donné le faible nombre de postes de mesures considéré, cela augmente la valeur de l'erreur moyenne de prédiction résultant du modèle Hélios 2010 sur les plateaux calcaires est de 232 MJ/m², soit 6% de la valeur moyenne annuelle.

Avec une erreur moyenne de prédiction de 262 MJ/m², le modèle 2007 semble légèrement moins performant que le modèle 2010 qui prédit les rayonnements solaires avec une erreur moyenne de 232 MJ/m² (erreur sur le total annuel) à l'échelle des plateaux calcaires. Le biais induit par ce dernier modèle est en outre bien moins important : Hélios 2007 prédit en moyenne des valeurs de rayonnement plus importantes de 142 MJ/m² que les valeurs mesurées, tandis qu'Hélios 2010 prédit des valeurs de rayonnement en moyenne de 10 MJ/m² plus faible que les valeurs mesurées, ce qui représente un biais moyen de 0,3% par rapport à la moyenne sur la zone d'étude.

D'après ces résultats, le modèle Hélios 2010 semble plus performant que la version 2007, et prédit des valeurs relativement fiables sur la zone des plateaux calcaires. Cependant, il aurait été intéressant de renforcer ces résultats en disposant de plus de mesures sur la zone.

3.1.1.2. Températures

a) *A l'échelle de la France*

A l'échelle de la France, les principales différences de prédiction des températures s'observent dans les zones de montagnes (Alpes, Pyrénées, Massif Central et Vosges). Ces différences s'expliquent essentiellement par la résolution du modèle numérique de terrain utilisé pour calibrer les modèles. Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé pour construire le modèle AURELHY est au pas de 5 km. Or à cette résolution, les variations d'altitude, de topographie et d'exposition dans ces zones très accidentées sont très lissées. Le modèle LERFoB étant construit à partir d'un MNT au pas de 50 m, ce lissage est beaucoup moins important (**Figure 25** et **Figure 26**).

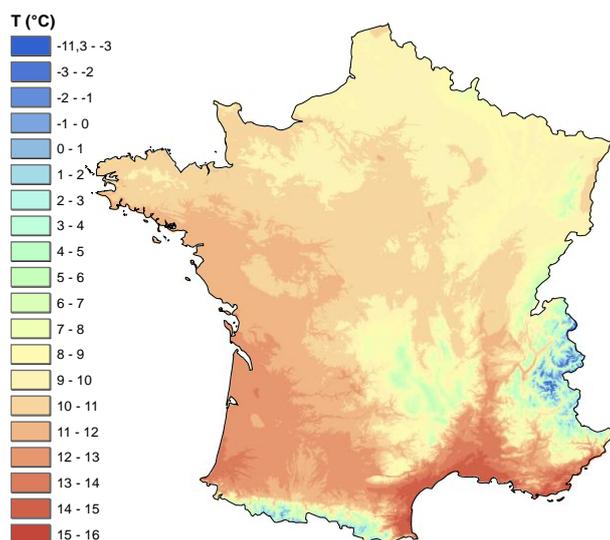


Figure 25 : Températures moyennes annuelles prédites au pas de 50 m par le modèle LERFoB (moyennes sur la période 1961 -1990, en °C)

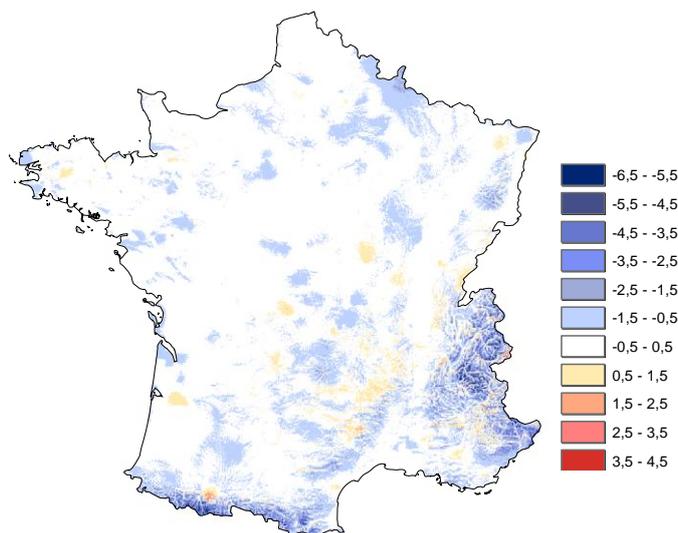


Figure 26 : Carte des différences entre les prédictions de températures moyennes annuelles des modèles LERFoB et AURELHY (moyenne sur la période 1961 - 1990). Une différence positive indique la prédiction de températures plus élevées pour le modèle LERFoB par rapport au modèle AURELHY.

Le coefficient de corrélation (R^2), ainsi que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais entre les valeurs prédites et mesurées ont été calculés afin d'évaluer la validité du modèle de températures (**Tableau 10**). Globalement, on note que le modèle rend très bien compte de la variabilité des températures en France ($R^2 = 0,93$ sur les moyennes annuelles), avec un R^2 minimum de 0,91 pour les mois d'été. On observe de plus un biais quasiment nul (0,01°C sur l'année). Le modèle prédit les températures à 0,4°C près en moyenne, le plus gros écart de prédiction étant de 1,2°C en juillet. L'étude de la carte des résidus (**Figure 28**) montre de plus forts écarts des températures prédites dans les zones de fort relief (Massif Central, Alpes et Vosges), là où la variabilité spatiale des températures est la plus forte. Cependant, 78% des stations présentent une différence entre la valeur prédite annuelle et la valeur mesurée inférieure à 5% par rapport à la valeur mesurée, et 92% montrent une différence inférieure à 10%.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
MF	3,85	4,53	7,45	9,95	13,98	17,52	18,90	19,06	15,64	12,18	6,62	3,98	11,09
modèle	3,71	4,38	7,38	9,93	14,00	17,59	19,02	19,09	15,60	12,06	6,56	3,91	11,10
R^2	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
biais	-0,14	-0,16	-0,07	-0,02	0,02	0,08	0,12	0,03	-0,04	-0,12	-0,06	-0,07	0,01
RMSE	0,58	0,52	0,54	0,53	0,52	0,57	0,59	0,57	0,56	0,52	0,52	0,56	0,54

Tableau 10 : Comparaison des températures moyennes mensuelles et annuelles sous couvert forestier (°C) mesurées par 493 postes Météo France (MF) indépendants du jeu de calibration du modèle, et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle de la France.

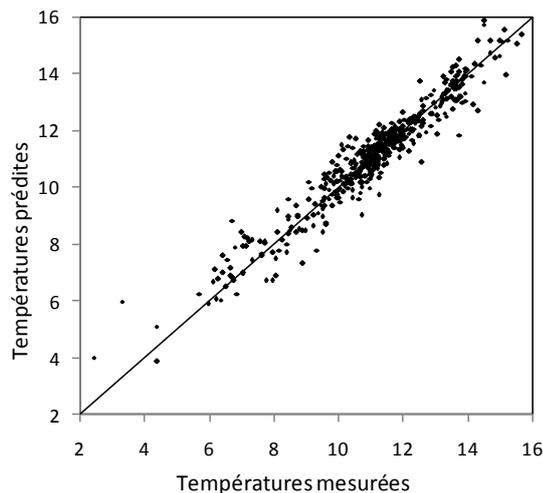


Figure 27 : Corrélation entre les températures moyennes annuelle (°C) sous couvert forestier sur la période 1996-2007 mesurées par Météo France et issues du modèle LERFoB. Les diagrammes par saison sont présentés en Annexe 13.

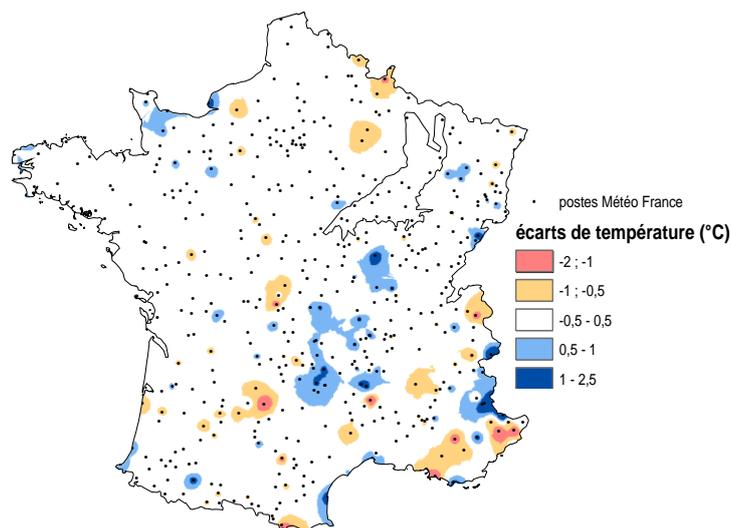


Figure 28 : Carte des résidus du modèle LERFoB par rapport aux données mesurées sur les postes Météo France (°C). Des résidus négatifs indiquent une valeur modélisée trop faible par rapport à la valeur mesurée, un résidu positif montre une valeur trop forte. Le périmètre de 50 km autour de la zone d'étude, à l'intérieur duquel les postes ont été considérés pour la validation à l'échelle des plateaux calcaires, a été matérialisé sur cette carte. Les cartes par saison sont présentées Annexe 15.

b) A l'échelle des plateaux calcaires

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
MF	2,83	3,91	6,98	9,93	14,14	17,57	18,95	19,07	15,35	11,62	5,92	3,18	10,79
R ²	0,85	0,81	0,66	0,45	0,56	0,57	0,61	0,55	0,52	0,72	0,75	0,83	0,66
modèle	2,78	3,84	7,03	10,02	14,28	17,77	19,19	19,21	15,37	11,56	5,89	3,17	10,83
biais	-0,05	-0,07	0,05	0,08	0,14	0,20	0,24	0,14	0,02	-0,06	-0,03	-0,01	0,04
RMSE	0,34	0,32	0,44	0,52	0,48	0,55	0,53	0,50	0,46	0,38	0,31	0,28	0,39

Tableau 11 : Comparaison des températures moyennes mensuelles et annuelles sous couvert forestier (°C) mesurées par 58 postes Météo France (MF) indépendants du jeu de calibration du modèle, et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle des plateaux calcaires

Les coefficients de détermination, erreurs quadratiques moyennes et biais ont été calculés à partir de 58 postes situés dans un rayon de 50 km autour de la zone d'étude. A l'échelle des plateaux calcaires de Bourgogne, Champagne-Ardenne et Lorraine, les valeurs de R² sont plus faibles qu'à l'échelle nationale (R² = 0,66 sur la moyenne annuelle et R² = 0,45 en avril). Ces valeurs sont dues à l'échelle restreinte et aux faibles amplitudes de températures sur la zone d'étude. Elles sont donc peu comparables aux valeurs issues de la validation à l'échelle nationale.

Cependant, les graphiques de corrélation entre les données annuelles et saisonnières

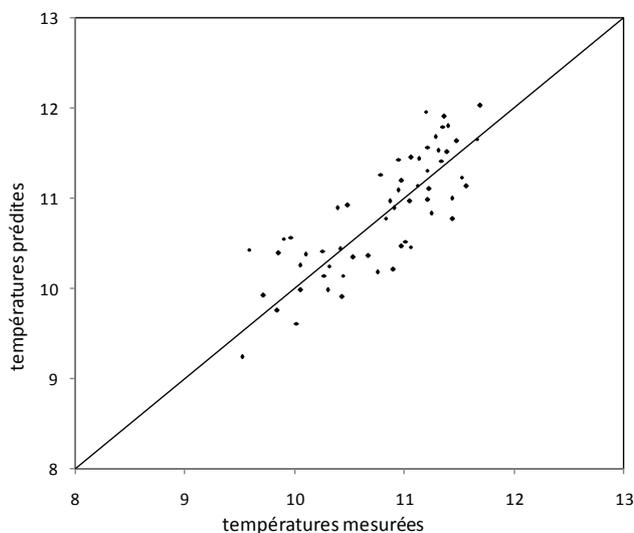


Figure 29 : Corrélation entre les données de températures annuelles prédites par le modèle et mesurées sur les 15 postes Météo France compris dans un rayon de 50 km autour de la zone d'étude. Les 58 postes considérés sont indépendants du jeu de calibration du modèle. Les diagrammes saisonniers sont présentés en Annexe 14.

prédites et mesurées (**Figure 29** et **Annexe 14**) montrent une bonne cohérence entre les données mesurées et prédites. Malgré une faible amplitude des valeurs de températures sur la zone d'étude, le modèle semble bien rendre compte de l'hétérogénéité spatiale sur les plateaux calcaires. Les RMSE et les biais calculés à l'échelle des plateaux calcaires sont plus faibles que les valeurs nationales (**Tableau 10**). Les données de températures issues du modèle sont donc de bonne qualité et sont exploitables à l'échelle des plateaux calcaires pour les calculs des indices de contraintes hydriques des sols.

3.1.1.3. Précipitations

a) *À l'échelle de la France*

De même que pour les températures, on observe les plus grosses différences entre le modèle AURELHY et le modèle LERFoB sur les zones montagneuses (Vosges, Alpes et Pyrénées). Ces erreurs sont encore une fois dues à la résolution kilométrique du MNT utilisé pour construire le modèle AURELHY. Sur le reste du territoire Français, les différences entre les deux modèles sont cependant beaucoup plus ténues.

La comparaison des précipitations mesurées par les postes du jeu de validation avec les données issues du modèle sur ces postes montrent une bonne corrélation entre les données mesurées et prédites, avec un coefficient de détermination de 0,78. On note cependant un R^2 plus faible pour les mois d'hiver ($R^2 = 0,66$ en décembre), mais bien plus élevé pour les mois d'été, où les pluies utiles seront mobilisées par la végétation ($R^2 = 0,85$ en juillet).

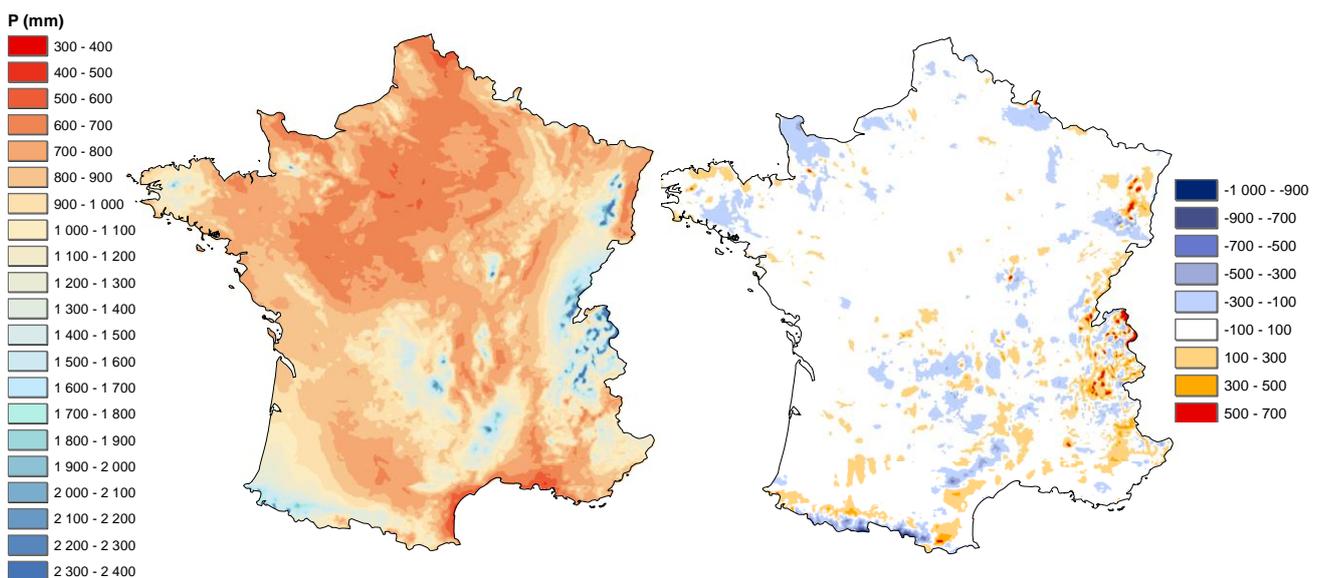


Figure 30 : Carte du cumul annuel moyen des précipitations modélisé par le modèle LERFoB (moyennes sur la période 1961 – 1990, en mm)

Figure 31 : Carte des différences entre les cumuls annuels moyens des précipitations prédits par les modèles LERFoB et AURELHY (moyennes sur la période 1961 – 1990, en mm). Une différence positive montre une prédiction plus forte du modèle LERFoB

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
MF	76,83	66,39	65,00	74,18	80,94	61,36	69,02	74,69	73,06	95,19	100,81	88,18	925,64
modèle	79,08	68,82	66,76	75,31	82,67	62,22	70,40	75,80	73,83	96,19	101,98	90,42	943,47
R ²	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
biais	2,25	2,43	1,76	1,13	1,74	0,86	1,38	1,10	0,76	1,00	1,17	2,24	17,83
RMSE	17,71	17,11	12,81	12,15	11,04	8,44	9,49	10,60	10,70	16,93	17,36	20,46	136,45

Tableau 12 : Comparaison des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) mesurées par 471 postes Météo France (MF) et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle de la France

La comparaison des données mesurées et prédites montre un léger biais positif du modèle, qui représente moins de 2% des cumuls moyens de précipitations sur l'année.

Le modèle prédit les précipitations annuelles à 136 mm près sur l'année et à 11 mm près en moyenne par mois, avec une plus faible précision du modèle en hiver (RMSE = 20,46 en décembre).

La carte des résidus (écart entre les valeurs prédites et mesurées) annuels moyens montre une prédiction moins bonne sur les zones de plus haute altitude (Vosges, Alpes et Massif Central). 42% des stations présentent une différence entre la valeur prédite annuelle et la valeur mesurée inférieure à 5% par rapport à la valeur mesurée, et 66% montrent une différence inférieure à 10%.

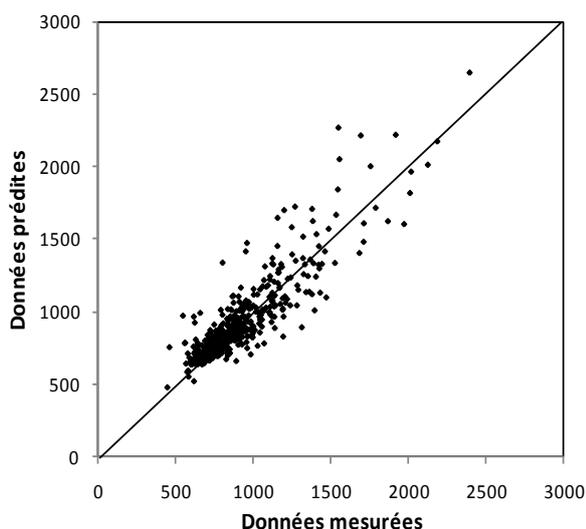


Figure 32 : Corrélation entre les cumuls annuels moyens de précipitations (mm) sur la période 1996-2007 mesurés par Météo France et issus du modèle LERFoB. Les diagrammes par saison sont présentés en Annexe 16.

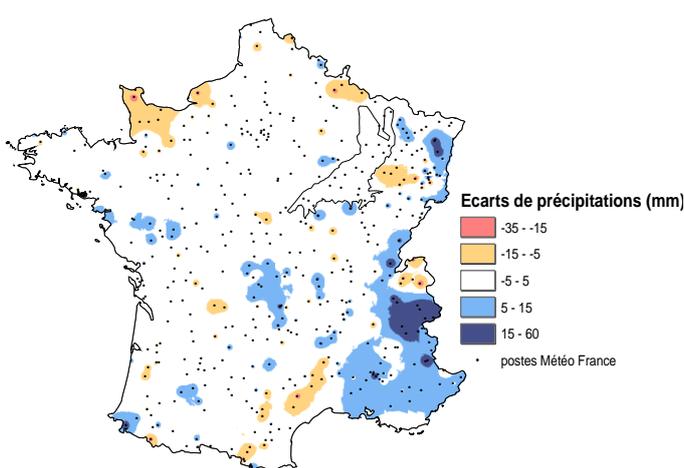


Figure 33 : Carte des résidus de cumul annuel moyen de précipitations entre les valeurs mesurées et prédites sur le jeu de postes météo France ayant servi à la validation du modèle LERFoB. Des résidus négatifs indiquent une valeur modélisée trop faible par rapport à la valeur mesurée, un résidu positif montre une valeur trop forte. Les cartes par saisons sont présentées en Annexe 18

b) À l'échelle des plateaux calcaires

L'étude de la validité des modèles de précipitations à l'échelle de la zone d'étude a été menée en utilisant 59 postes indépendants de Météo France dans un rayon de 50 km autour de la zone d'étude.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	annuel
MF	66,54	69,50	64,28	61,58	76,11	59,81	78,09	77,48	63,02	87,19	90,09	78,64	857,90
modèle	69,88	72,24	64,72	62,12	78,15	61,36	78,66	77,10	62,07	87,61	89,85	81,13	884,89
R ²	0,40	0,47	0,36	0,59	0,73	0,49	0,37	0,37	0,53	0,57	0,64	0,38	0,50
biais	-6,94	5,85	-0,28	-12,06	-2,78	0,00	9,64	2,41	-10,99	-7,58	-10,96	-7,05	-40,75
RMSE	11,67	11,42	9,31	7,93	6,33	5,99	6,76	8,11	7,06	8,72	9,32	12,80	90,24

Figure 34 : Comparaison des précipitations moyennes mensuelles et annuelles (mm) mesurées par 59 postes Météo France (MF) et prédites par le modèle sur ces postes à l'échelle des plateaux calcaires

Les coefficients de détermination obtenus sur cette zone sont logiquement plus bas que ceux obtenus sur la France entière ($R^2 = 0,50$ sur l'année). Ces valeurs plus faibles s'expliquent, comme pour les températures, par le fait que cette étude est effectuée sur une zone restreinte, peu contrastée d'un point de vue climatique. La faible amplitude des valeurs de précipitations sur cette zone ne permet pas d'obtenir un R^2 élevé. Cependant, l'analyse des graphiques comparant les données mesurées et prédites (**Figure 35** et **Annexe 17**) montrent une bonne corrélation entre ces deux types de données. Le modèle semble bien rendre compte de la variabilité spatiale des précipitations sur la zone d'étude. Les faibles valeurs de R^2 sont dues à quelques postes où les prédictions sont moins bonnes. Le poids de ces postes dans le calcul de R^2 est très élevé, étant donné leur position extrême sur le gradient de précipitations observé et le faible nombre de postes considérés.

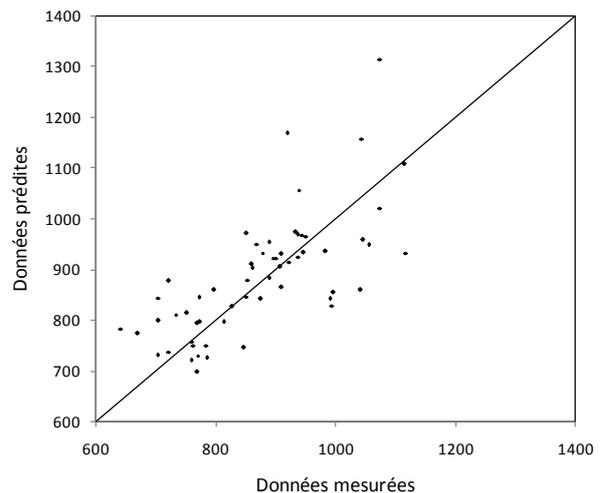


Figure 35 : Corrélation entre les données de précipitations annuelles prédites par le modèle LERFoB et mesurées sur les 59 postes Météo France compris dans un rayon de 50 km autour de la zone d'étude (en mm). Les 59 postes considérés sont indépendants du jeu de calibration du modèle.

Les RMSE mensuelles et annuelle moyennes calculées sur la zone d'étude sont légèrement plus faibles (relativement au gradient de valeurs mesurées à cette échelle) que ceux calculés sur la France entière : la RMSE annuelle à l'échelle de la France représente 14% de l'amplitude des valeurs mesurées, tandis qu'à l'échelle des plateaux calcaires, elle en représente 10%. Le biais annuel moyen sur la France représente quant à lui 2% de l'amplitude des valeurs mesurées, tandis que celui des plateaux calcaires en représente 5%. Ces résultats indiquent que le modèle permet en moyenne de mieux appréhender la variabilité spatiale des précipitations à l'échelle nationale qu'à l'échelle des plateaux calcaires, mais les erreurs de prédictions sont moins importantes sur la zone d'étude que sur l'ensemble du territoire français (malgré un biais légèrement plus important). Ces différences ne sont cependant pas tellement prononcées au regard de l'amplitude des valeurs mesurées à chaque échelle. Cela confirme donc que les données issues du modèle semblent utilisables sur la zone des plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne et Bourgogne.

3.1.2. Comparaison des capacités prédictives des modèles LERFoB et AURELHY

3.1.2.1. Températures

La comparaison des AUC des 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 (**Figure 36**). L'AUC du modèle LERFoB est en moyenne supérieure à celle du modèle AURELHY de 0,04 pour ces essences, ce qui est très peu. L'étude des aires de répartitions de ces essences et de leurs exigences vis-à-vis de la température montre que le modèle AURELHY semble plus efficace pour prédire la répartition potentielle des essences méditerranéennes thermophiles. Le modèle LERFoB semble au contraire plus approprié pour les essences de montagne et de climat plutôt froid. Nous en concluons que ces deux modèles sont quasiment similaires à l'échelle de la France.

	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	quill				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 36 : Comparaison de la capacité prédictive des modèles de températures (moyennes annuelles) LERFoB et Météo-France vis-à-vis de la distribution de 40 essences forestières. Le classement des essences a été effectué grâce au calcul des écarts d'AUC entre les deux modèles. La distribution des essences a été prédite par des modèles univariés.

3.1.2.2. Précipitations

La comparaison des AUC des modèles LERFoB et Météo-France montre une meilleure prédiction de distribution de 25 essences forestières sur les 40 considérées pour le modèle basé sur le cumul annuel moyen des précipitations issues du LERFoB. Le modèle AURELHY semble mieux prédire la distribution de seulement un quart des essences considérées, ces essences étant essentiellement à tendances méditerranéennes (Chêne pubescent, Chêne tauzin, Pin cembro, Frêne à fleurs). Cependant, pour celles-ci, si le modèle Météo-France est légèrement plus efficace, la différence d'AUC est assez faible.

	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			
								quill			
								qusu			
								rops			
								soau			
								tico			
								ulgl			
total	0	2	5	1	1	6	0	2	20	3	0
total			9			6			25		

Figure 37 : Comparaison de la capacité prédictive des modèles de précipitations (moyennes annuelles) LERFoB et Météo-France vis-à-vis de la distribution de 40 essences forestières. Le classement des essences a été effectué grâce au calcul des écarts d'AUC entre les deux modèles. La distribution des essences a été prédite par des modèles univariés.

3.1.3. Conclusions quant au choix des données climatiques

Les modèles de températures LERFoB et AURELHY semblent relativement équivalents. Cependant, le modèle LERFoB a été validé, et sera sûrement plus pertinent du fait de sa résolution spatiale. Il est en outre plus souple temporellement. De plus, le modèle LERFoB est plus performant pour les précipitations, qui sont un élément déterminant des bilans hydriques édaphiques. Au final, on retient donc le modèle LERFoB pour les températures et précipitations.

3.1.4. Réserve utile maximale des sols

3.1.4.1. Comparaison des données prédites et mesurées

a) À l'échelle de la France

La validation de ce modèle avait été effectuée en 2010 à partir d'un jeu de 543 placettes du réseau européen Biosoil, indépendantes du jeu de calibration (Piedallu *et al.*, 2010).

Afin de réaliser le modèle le plus précis et fiable possible, plusieurs résolutions spatiales avaient été testées et la résolution de 1 km avait été sélectionnée.

La qualité des prédictions au regard de ce jeu de données donnait R^2 de 0,24 et une RMSE de 37,9.

Ce modèle avait été par la suite amélioré en y intégrant la géologie et la topographie en tant que covariables (Piedallu, 2011, non publié). Le modèle obtenu n'est plus une simple interpolation par krigeage des données ponctuelles, mais pondère les RUM en fonction de ces covariables (on prédit par exemple une RUM plus importante sur un substrat géologique tendre que sur une roche dure). On obtient alors un R^2 de 0,29, soit 20% plus élevé que le modèle précédent. La RMSE diminue de 37,9 à 36,3 (C. Piedallu, communication personnelle).

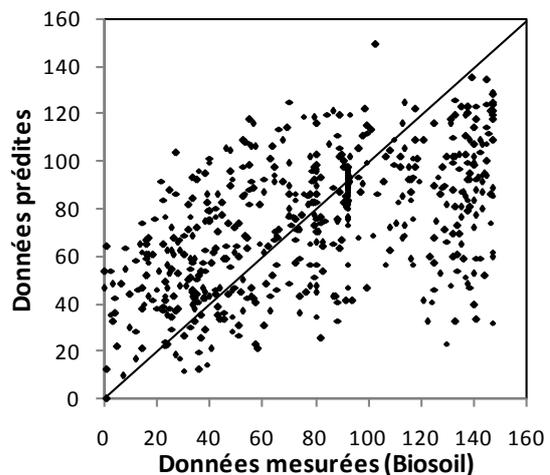


Figure 38 : Corrélation entre les données de RUM (en mm) prédites par le modèle intégrant les covariables et mesurées sur 542 placettes du réseau européen Biosoil, indépendantes des placettes IFN ayant servi à la calibration du modèle

La deuxième version du modèle intégrant des covariables permet une cartographie de la RUM à une résolution plus fine de 500 m.

	Modèle sans covariables	Modèle avec covariables
Résolution optimale	1 km	500 m
R^2	0,24	0,29
RMSE	37,9	36,3

Figure 39 : Comparaison des modèles de RUM avec ou sans covariables (n = 542 placettes) (Source : Piedallu, 2011, non publié)

Malgré un gain de qualité grâce à l'intégration de covariables, le coefficient de détermination reste relativement faible (0,29). Ces résultats témoignent de la difficulté rencontrée pour estimer et modéliser une réserve utile maximale. Il est en effet malaisé d'estimer avec précision la capacité de stockage en eau, probablement parce qu'il est difficile de rendre compte de la variabilité spatiale de la profondeur des sols. En effet, la valeur d'une réserve utile estimée sur le terrain dépend en grande

partie de la profondeur du sol décrite, laquelle dépend probablement fortement de l'emplacement du sondage. La profondeur de description peut être limitée par exemple par la présence locale d'éléments grossiers qui bloquent le passage de la pioche ou tarière (**Figure 43**). On peut alors décrire un profil de sol non représentatif de la placette. L'évaluation au toucher des textures et l'estimation visuelle de la charge en cailloux pour le jeu de calibration du modèle ajoute encore une imprécision du fait de la subjectivité de la méthode d'estimation et le nombre important d'opérateurs impliqués sur les différents relevés utilisés.

b) À l'échelle des plateaux calcaires

Une validation du modèle a ensuite été tentée à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne. Une validation à partir des données Biosoil n'est pas possible à cette échelle, en raison du trop faible nombre de points de mesures sur la zone d'étude (30 mesures seulement).

Cette validation a donc été effectuée strictement sur la zone d'étude, à partir d'estimation de RUM sur 1123 placettes IFN nouvelle méthode, formant un jeu de données indépendant du jeu de calibration des données (les données IFN ancienne méthode ayant été utilisées) (**Figure 40**).

On obtient à partir de ce jeu de validation local un R^2 de 0,16 et une erreur quadratique moyenne de 26 mm. La corrélation entre la RUM modélisée et la RUM estimée sur le terrain semble donc moins bonne qu'à l'échelle nationale. La faible valeur de R^2 montre qu'il est très difficile de rendre compte de la variabilité de la RUM dans cette zone. Cependant, un calcul de R^2 sur 3223 postes (1123 sur la zone d'étude et 2100 dans un rayon de 50km autour de la zone d'étude) donne un R^2 de 0,45 et une RMSE de 30 mm. Or les RUM sont en moyenne bien plus élevées autour de la zone d'étude, cette dernière étant bien contrastée vis-à-vis de son environnement immédiat (**Figure 13**). Ces résultats montrent donc que s'il semble difficile de rendre compte de l'hétérogénéité de la valeur de RUM dans la zone des plateaux calcaires, le modèle permet tout de même de bien individualiser ceux-ci en termes de réserve utile des sols par rapport au reste de la France.

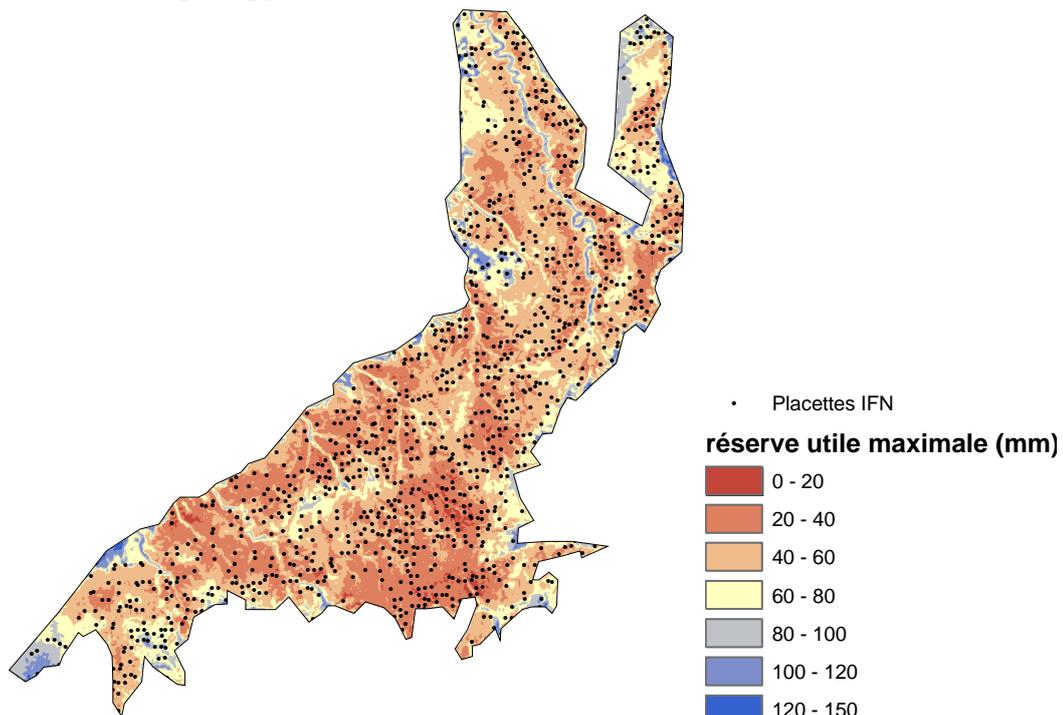


Figure 40 : Carte des réserves utiles maximales au pas de 500 m sur la zone des plateaux calcaires (en mm) et localisation des 1123 placettes IFN ayant servi à la validation du modèle (jeu de placettes indépendant du jeu de calibration)

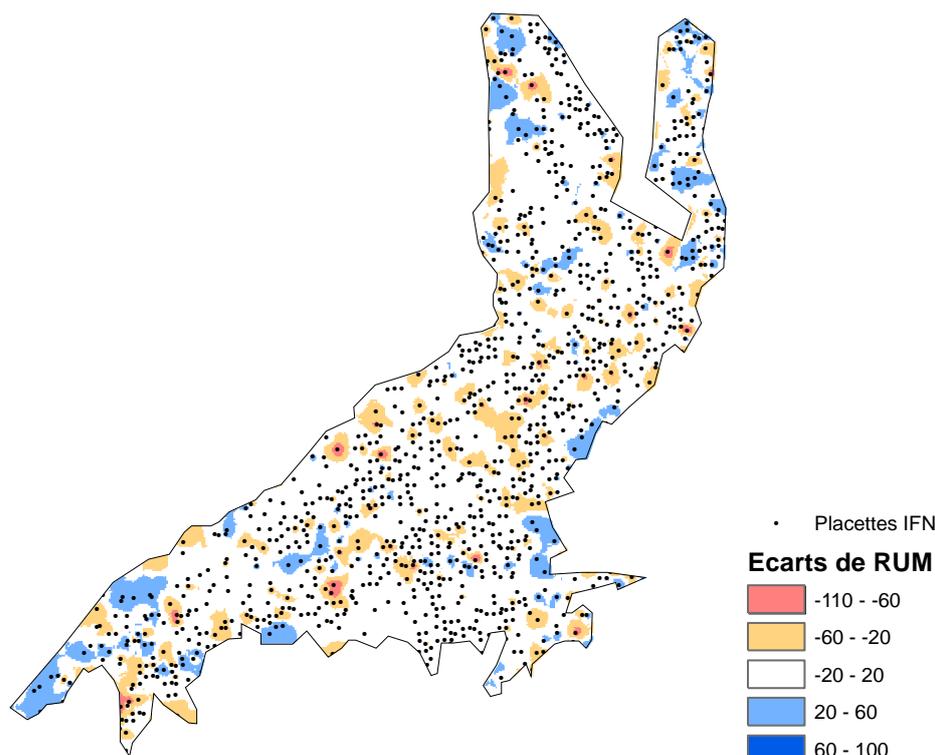


Figure 41 : Carte des écarts entre la RUM estimée sur les placettes IFN nouvelle méthode et la RUM cartographiée au pas de 500 m sur la zone des plateaux calcaires (en mm)

Sur la zone d'étude, 38% des postes présentent une différence entre valeur prédite et valeur mesurée de moins de 10 mm, 64% présentent une différence de moins de 20 mm, et 12% présentent une différence de plus de 100 mm.

3.1.4.2. Capacité prédictive vis-à-vis de la distribution des essences forestières

Dans son article, Piedallu (2010) avait comparé la capacité prédictive des RUM mesurées sur les placettes IFN et extraites de la carte au pas du kilomètre pour prédire la fertilité de trois essences, *Picea abies*, *Fagus sylvatica*, et *Quercus petraea* (Seynave *et al.*, 2005 ; 2008). La carte des RUM ayant déjà été améliorée depuis grâce à l'apport de covariables, nous avons cherché à estimer si la capacité prédictive de la nouvelle carte au pas de 500 m était changée. Alors que le coefficient de corrélation entre l'indice de fertilité prédit à partir du modèle de RUM est identique dans le cas du hêtre pour les modèles au pas de 1 km et de 500 m, le modèle au pas de 500 m permet une amélioration de R^2 de 8% pour l'épicéa, et de 5% pour le chêne (Figure 42).

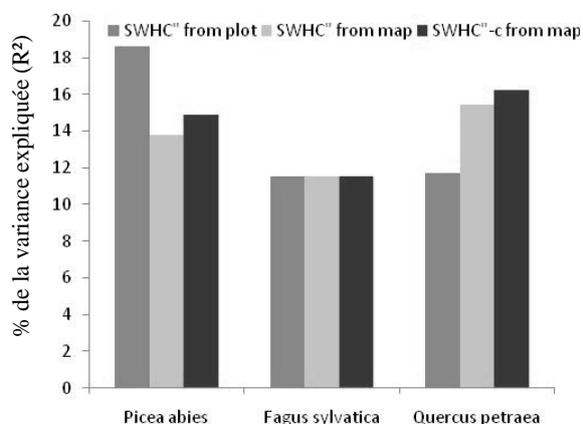


Figure 42 : Comparaison de la capacité prédictive des valeurs de RUM extraites des modèles avec ou sans covariables (SWHC'' et SWHC''-c respectivement) et estimées sur les placettes IFN (SWHC'' from plot) vis-à-vis de l'indice de fertilité de trois essences forestières (Piedallu *et al.*, 2010)

3.1.4.3. Apports de la réserve utile maximale à haute résolution

Les travaux réalisés par T. Villiers (2011) en parallèle de mon stage ont permis la création d'une carte des RUM au pas de 50 m sur les 2/3 de ma zone d'étude. Nous avons comparé la pertinence de la RUM au pas de 500 m et celle calculée au pas de 50 m à différentes échelles. Plusieurs échelles ont été considérées afin de discuter de l'échelle d'utilisation possible des cartes, c'est-à-dire jusqu'à quel niveau de zoom on peut potentiellement l'exploiter.

A l'échelle de la couverture du modèle de RUM haute résolution (région lorraine et une partie de la Champagne-Ardenne), la validation a été effectuée à partir de 1455 relevés IFN (Villiers, 2011). Le modèle au pas de 50 m permet alors d'augmenter le R^2 de 0,07 par rapport au modèle au pas de 500 m (on a un R^2 de 0,47 au pas de 500m, et de 0,54 au pas de 50 m). Les deux modèles conduisent par contre à une RMSE équivalente (26 et 27 mm respectivement pour le modèle haute et basse résolution) et présentent un biais moyen similaire et relativement faible (-1 et -1,9 mm respectivement). Une validation à des échelles plus fines a été réalisée à partir de trois campagnes de relevés de terrain distinctes (**Tableau 13**).

site	Nord-est de la France (T. Villiers, 2011)	Bois l'Evêque Villey-le-Sec	Bois l'Evêque	Bois l'Evêque
Echelle de validation	région	forêt	quelques parcelles	1 parcelle
Surface échantillonnée	4 000 000 ha	500 ha	40 ha	10 ha
Maillage	non régulier	250 m	100 m	50 m
R^2 RUM 500 m (RMSE)	0,47 (27,0)	0,06 (35,8)	0,01 (45,3)	0,00 (37,5)
R^2 RUM 50 m RMSE	0,54 (26,0)	0,26 (36,2)	0,07 (39,6)	0,03 (26,2)

Tableau 13 : Comparaison des cartes de RUM à basse résolution (500 m) et haute résolution (50 m) via les coefficients de corrélation (R^2) avec les RUM calculées à partir des relevés de terrain, et l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La comparaison des R^2 et RMSE montre que la carte des RUM à fine résolution (50 m) est meilleure que la carte au pas de 500 m. On observe en effet jusqu'à une augmentation de R^2 de 0,20 à l'échelle d'une forêt (500 ha, maillage 250 m).

Pour la carte au pas de 500m, les valeurs de R^2 sont globalement très faibles pour les validations sur des petites échelles (500 ha à 10 ha). Cette carte semble inutilisable à de telles échelles. La carte à fine résolution paraît bien meilleure à l'échelle du Nord-est de la France (4 000 000 ha) et à l'échelle d'une forêt (500 ha), où les valeurs prédites sont les mieux corrélées aux valeurs mesurées ($R^2 = 0,26$). Le pourcentage de la variance observée expliquée par ce modèle à l'échelle d'une forêt (maillage de 250 m) est quatre fois plus élevé que celui obtenu avec le modèle au pas de 500 m. Cependant, le coefficient de détermination reste relativement faible à cette échelle, ce qui montre que, malgré l'utilisation de données plus fines, la modélisation spatiale des réserves maximales en eau des sols reste très délicate.

Il semblerait donc que le modèle au pas de 50 m soit plus efficace pour prédire les réserves utiles maximales des sols à une échelle assez fine. Cependant, on note que l'utilisation du modèle à haute résolution n'est plus pertinente à des échelles plus fines (40 ha et 10 ha). Le R^2 obtenu à cette échelle est en effet très bas (0,07 à l'échelle de quelques parcelles, sur un maillage de 100 m), et cela malgré un gradient de RUM rencontré assez large (on a estimé des RUM de 6 mm à 141 mm sur 47 placettes sur une surface de 40 hectares environ. Ce modèle au pas de 50 m permettrait donc d'affiner l'échelle d'utilisation de la carte des RUM. Cependant, le modèle réalisé à ce jour ne couvre pas la totalité des plateaux calcaires. Aussi, nous allons principalement travailler avec la carte au pas de 500 m pour les

analyses suivantes. Les intérêts et limites de la réalisation d'une carte des bilans en eau à partir de données au pas de 50 m seront discutés un peu plus loin.

3.1.4.4. Estimation de la variabilité intra-pixel de la réserve utile maximale des sols

Devant les difficultés à estimer la réserve utile maximale de façon précise sur un sondage ponctuel, nous avons décidé d'évaluer quelle pouvait être la part de variabilité des réserves utiles issues de la mesure pour caractériser un même pixel de la carte. Cette variabilité peut venir soit des imprécisions de mesure, soit des conditions locales caractérisant le point de sondage. Pour cela, nous avons mesuré les réserves utiles maximales de sols en cinq points sur dix placettes selon le protocole défini au paragraphe 2.3.1.2. (**Tableau 14**).

placette	A5	B11	B5	C1	A3	A10	A8	C3	A1	A9
profondeur de sol moyenne	78 cm	40 cm	51 cm	33 cm	37 cm	32 cm	38 cm	50 cm	42 cm	40 cm
profondeur de sol minimum	49 cm	20 cm	40 cm	28 cm	31 cm	25 cm	26 cm	44 cm	35 cm	26 cm
profondeur de sol maximum	100 cm	48 cm	70 cm	38 cm	55 cm	40 cm	52 cm	60 cm	50 cm	58 cm
écart-type	19 cm	11 cm	11 cm	5 cm	10 cm	6 cm	9 cm	6 cm	6 cm	13 cm
coefficient de variation	24%	28%	22%	15%	27%	19%	24%	12%	14%	33%
charge en cailloux	0%	0 à 40%	0 à 20%	40 à 70 %	30 à 40 %	40 à 60%	20 à 40%	30 à 50%	20 à 30%	20 à 50%
épaisseur de limons	10 à 30 cm	11 à 23 cm	20 à 50 cm	0 cm	0 cm	0 à 9 cm	0 cm	0 cm	0 cm	0 cm
situation topographique	plateau	plateau	plateau	plateau	rupture de pente	versant	versant	versant	bas de pente	bas de pente
RUM moyenne	92 mm	49 mm	40 mm	25 mm	43 mm	28 mm	42 mm	48 mm	49 mm	42 mm
RUM minimum	62 mm	30 mm	19 mm	20 mm	37 mm	20 mm	27 mm	38 mm	39 mm	27 mm
RUM maximum	113 mm	67 mm	59 mm	30 mm	58 mm	36 mm	64 mm	66 mm	64 mm	53 mm
écart-type	19 mm	15 mm	17 mm	5 mm	9 mm	6 mm	14 mm	12 mm	9 mm	11 mm
coefficient de variation	21%	31%	43%	20%	21%	21%	33%	25%	18%	26%

Tableau 14 : Variabilité des réserves utiles maximales de sols et des différents paramètres entrant dans son calcul à partir de mesures sur 10 placettes. Pour chacune des 10 placettes présentées, les résultats de 5 mesures sont comparés.

Les résultats montrent que sur les placettes réalisées, l'amplitude des RUM mesurées sur les cinq profils de chaque placette peut varier de 10 à 50 mm. La profondeur du sondage au sein d'un même carré de 50 m de côté peut varier du simple au double en fonction du point de creusement. La charge en cailloux peut elle aussi grandement varier, ainsi que les épaisseurs de limons sur les sols où ces derniers se différencient des argiles en surface. Il en résulte une grande difficulté à estimer une réserve utile qui refléterait avec précision la RUM moyenne sur le pixel (**Figure 43**). Si ces résultats ne reflètent pas forcément la variabilité réelle de la réserve utile maximale des sols sur un pixel (du fait du nombre limité de sondages et des imprécisions de mesures sur chacun de ceux effectués), ils montrent cependant le caractère aléatoire de la RUM estimée en fonction du point de sondage. La variabilité observée est alors peut-être plus liée aux erreurs de mesures entre les différents sondages qu'à une variabilité spatiale réelle de la RUM sur la placette.

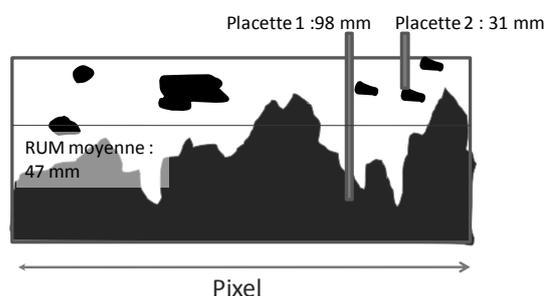


Figure 43 : Un exemple théorique expliquant les difficultés à rendre compte de la variabilité spatiales de la RUM avec précision

3.1.4.5. Conclusion

Parmi tous les paramètres entrant dans les calculs des bilans hydriques édaphiques, la RUM est clairement le plus difficile à estimer. La simplification et les fortes imprécisions de mesure, ainsi que la difficulté à appréhender la variabilité des RUM à très fine échelle rendent ce paramètre difficile à estimer, spatialiser et valider.

Les sources d'erreurs pour estimer la RUM ponctuellement sont multiples :

- la profondeur du sondage peut être limitée très localement par les éléments grossiers ;
- les textures sont estimées subjectivement, au toucher, par des opérateurs multiples ;
- les mesures sont simplifiées pour alléger le coût des opérations, réduire le temps de mesure et limiter les besoins matériels (estimation de classes de textures, estimation à vue d'un pourcentage de cailloux sur le profil) ;
- la RUM peut varier fortement sur une zone très réduite (sur une placette de 50 m par 50 m, par exemple), et il est très difficile d'estimer la représentativité de la description d'un profil de sol sur toute la placette

La combinaison de ces erreurs explique la difficulté d'estimation avec précision des RUM.

La carte numérique est de plus calibrée à partir de mesures de ce type. Elle est validée à partir du même type de données. L'erreur moyenne de prédiction de la carte calculée au paragraphe 3.1.4.1 à été estimée à 30 mm. Les relevés de terrain présentés au paragraphe précédent mettent en évidence un écart-type des RUM sur une placette de 6 à 20 mm. Une part des erreurs observées provient donc de la carte et une autre des points de validation, sans qu'il soit possible de différencier les deux.

Nous pourrions tenter de réduire les imprécisions de mesures de terrain en décrivant les sols sur de plus larges profils, réalisés à la mini-pelle. Cette technique permettrait de réduire les risques d'erreurs dus à un blocage du sondage par des éléments grossiers avant d'atteindre la dalle calcaire. Une mesure des textures en laboratoire plutôt qu'une estimation au toucher permettrait de limiter les imprécisions de mesures et les biais liés à la multiplicité des opérateurs. Ces mesures sont cependant très lourdes à mettre en place, et demandent beaucoup de moyens humains, financiers et matériels. Nous avons enfin vu que l'intégration de données géologiques fines (issues des cartes au 1/50 000^e) permettait d'obtenir une carte plus fiable.

La carte des RUM développée au LERFoB permet donc d'obtenir des données sur de vastes zones qui, bien qu'il soit difficile à en évaluer la fiabilité, sont les plus fines à ce jour.

3.1.5. Récapitulatif des données retenues pour les calculs de bilans en eau

La validation statistique des différents modèles a tout d'abord permis d'identifier les modèles les mieux corrélés aux mesures de terrain :

- le modèle hélios 2010 pour les rayonnements solaire
- le modèle de RUM au pas de 500 m, qui est cependant en cours d'amélioration en y intégrant des données géologiques plus fines spatialement.

La validation à l'échelle des plateaux calcaires est plus difficile qu'à l'échelle nationale du fait du faible nombre de postes de mesures disponibles, de l'homogénéité de la zone d'étude ainsi que du gradient de valeurs réduit pour tous les paramètres. Ainsi, les résultats obtenus sont peu comparables avec les données obtenues à l'échelle nationale. Cependant, les cartes de résidus élaborées pour chaque paramètre sur la France montrent que les estimations sur la zone des plateaux calcaires sont relativement bonnes.

Il aurait été intéressant de confronter les modèles LERFoB et AURELHY quant à la comparaison des écarts entre les valeurs prédites par chacun des modèles et des valeurs mesurées. Cependant, ces tests exigent de sélectionner des jeux de postes de mesures totalement indépendants de celui ayant servi à calibrer les modèles. Or il n'est pas possible de connaître les postes ayant servi à calibrer le modèle AURELHY. L'utilisation du réseau de placettes RENECOFOR a été envisagée afin d'obtenir

des données climatiques mesurées indépendantes des jeux de calibration des modèles. Cependant, RENECOFOR ne fournit des données qu'à partir de 1995, tandis qu'AURELHY n'en fournit pas en dehors de la période 1961-1990.

La comparaison de la capacité de ces modèles à prédire la distribution des principales essences forestières a néanmoins permis de discriminer les meilleures données : les modèles LERFoB ont alors été retenus pour les précipitations et températures. De plus, ces modèles ont pu être validés statistiquement et présentent une résolution meilleure que les modèles AURELHY.

Cette validation des données d'un point de vue « biologique » ne concerne que la répartition des essences. L'étude de la prédiction de la croissance ou de la productivité de ces espèces pourrait conduire à des résultats sensiblement différents. Or des indices de productivité permettant de mener cette analyse sont des données rares et ne concernent que très peu d'essences (Seynave, 2008 et 2005).

La même méthode appliquée aux modèles de RUM a en outre conforté le choix du modèle au pas de 500 m.

Au final ont été retenus pour calculer les bilans hydriques édaphiques sur la France :

- les rayonnements solaires Hélios 2010 au pas de 50 m
- les températures LERFoB au pas de 50 m
- les précipitations LERFoB au pas de 1 km
- les RUM LERFoB au pas de 500 m

A l'échelle du Nord-est de la France, on peut néanmoins envisager de calculer un modèle intégrant des données de RUM plus fines, calculées au pas de 50 m.

3.2. CHOIX D'UN INDICE SYNTHETIQUE DU BILAN HYDRIQUE DES SOLS

Ce chapitre a pour objectif de sélectionner un indice synthétique caractérisant dans l'espace les contraintes hydriques du sol. Plusieurs indices ont alors été dérivés des bilans hydriques calculés selon Thornthwaite et Palmer (deux méthodes présentées au paragraphe 1.4.3). Nous avons tout d'abord présenté ces différents indices dans une première partie, puis nous avons identifié l'indice le plus pertinent pour expliquer la distribution de 36 essences forestières. La carte numérique de l'indice retenue, calculée avec une résolution de 50m, est enfin présentée.

3.2.1. Présentation de différents indices de l'eau dans le sol

Le calcul du bilan hydrique des sols forestiers permet d'estimer de nombreux indices renseignant sur la situation hydrique des sols pour un mois donné. Ces indices ont été classés en deux catégories : les valeurs absolues, qui indiquent des quantités d'eau en millimètres, et les valeurs relatives, qui comparent l'eau disponible dans le sol à une valeur de référence (ces derniers indices sont donc sans unité).

3.2.1.1. Indices en valeurs absolues

La **réserve utile RU** donne une estimation directe de l'eau disponible pour les plantes à un temps t , en millimètres. Il est déduit du calcul de bilan hydrique à partir de la réserve utile du mois précédent, des précipitations, de l'évapotranspiration du couvert.

L'**évapotranspiration réelle ETR** représente la perte d'eau par évaporation 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). Si l'eau disponible n'est pas en déficit par rapport à la demande évaporative, alors le déficit d'évaporation vaut 0. Sinon, il est positif et caractérise le fait que les précipitations sont insuffisantes pour reconstituer au moins partiellement le stock d'eau dans le sol.

Granier *et al.* (1999) utilisent un indice similaire indiquant pour caractériser un déficit hydrique édaphique (**soil water deficit, SWD**). Cet indice 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.

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

$$SWD = 0 \text{ sinon}$$

Cet indice reflète donc un niveau de stress hydrique de la végétation, grâce à la prise en compte d'une réserve utile de survie.

Les indices précédents ont le grand avantage d'être des indices absolus (en mm d'eau par unité de temps), et non relatif, ce qui permet de comparer des valeurs entre différentes zones d'étude et de les utiliser à large échelle (Dyer, 2009). La réserve utile (RU) caractérise directement la quantité d'eau dans le sol, tandis que le déficit d'évaporation (DE) et de déficit hydrique édaphiques (SDW) sont des indices de stress hydriques de la végétation.

3.2.1.2. Indices relatifs

Le premier est un **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 et Fitzpatrick, 1969 ; Doorenbos, 1979 ; Zierl, 2001 ; Brisson *et al.*, 2003 ; Schwarzel *et al.*, 2009). Cet indice est défini par :

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

Il oscille entre 0 et 1 (1 caractérisant l'absence de stress hydrique). Cependant, il ne quantifie pas l'eau disponible restant dans le sol. L'eau du sol extractible par les plantes peut être caractérisée par l'indice suivant (**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 ; Dyer, 2009 ; Schwarzel *et al.*, 2009). Cet indice permet de quantifier l'eau disponible pour les plantes à un temps t en pourcentage par rapport à la RUM. Il est souvent utilisé pour quantifier

l'eau du sol pour des études de flux hydriques entre le sol et l'atmosphère (Granier *et al.*, 2000), puisqu'il permet de repérer le seuil à partir duquel se met en place une régulation stomatique de la transpiration (seuil généralement défini par $0,4 \times RUM$) (Granier, 1985 ; Breda *et al.*, 1995).

L'étude du rapport entre la transpiration réelle du couvert végétal T et l'évapotranspiration potentielle ETP montre que le rapport T/ETP peut indiquer un niveau de stress hydrique. Il est constant tant que la réserve utile est supérieure à 40% de la RUM , et diminue linéairement lorsque la quantité d'eau disponible dans le sol est inférieure ce seuil. Cependant, la transpiration maximale du couvert dépend de la surface foliaire de ce dernier, et varie donc selon les peuplements (Granier *et al.*, 1999). Il est donc difficile d'utiliser l'indice T/ETP pour un modèle spatialisé à grande échelle, la surface foliaire n'étant pas constante sur tout le territoire. De plus, T représente la transpiration seule de la strate arborée, contrairement à l'évapotranspiration réelle ETR , qui rend compte également de l'évaporation de l'eau du sol et de la transpiration du sous-étage.

Un dernier indice identifié dans la littérature est un indice de stress hydrique (**stress index, SI**) (Nix et Fitzpatrick, 1969). Il est défini par le rapport RU/ETP . Il caractérise ainsi l'eau disponible dans le sol par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère. Il met en évidence un stress hydrique lorsque l'eau disponible dans le sol n'est plus suffisante pour satisfaire la demande évaporative de l'atmosphère ($SI < 1$).

3.2.2. Identification d'un indice synthétique de l'eau disponible dans le sol

3.2.2.1. Indices calculés et spatialisés pour l'étude

La valeur de sept indices décrits précédemment (RU , ETP , IA , DE , SDW , REW et SI) a été calculée sur toute la France au pas de 50m à partir des modèles spatialisés de précipitations, températures, rayonnement solaires et réserve utile des sols. Les indices DE , IA et RU étaient calculés avant mon arrivée au LERFoB (réalisation : C. Piedallu). J'ai ajouté les indices REW , SDW et SI à partir de méthodes trouvées dans la bibliographie. Chacun de ces indices a été calculé à partir des bilans hydriques estimés selon les méthodes de Thornthwaite et Palmer. L'objectif de ce double calcul est d'évaluer quelle méthode est la plus pertinente entre l'une considérant le sol comme un compartiment homogène, et l'autre, comme divisée en réserve utile facilement utilisable et réserve utile de survie (voir paragraphe 1.4.3).

Une représentation cartographique de ces indices à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne est présentée en **Annexe 20**. Considérant les objectifs de l'étude, il est nécessaire de ne retenir qu'un indice synthétique, si possible le plus performant, afin de caractériser la disponibilité en eau des stations.

3.2.2.2. Résultats

Il a été créé un modèle de distribution de chaque essence basé sur chacun des sept indices décrits précédemment, calculé en moyenne sur chaque saison, sur une saison de végétation (d'avril à octobre) et sur l'année, à partir des bilans hydriques de Thornthwaite et Palmer. Cela représente donc un total de 3108 modèles, dont l'efficacité a été évaluée grâce à leur AUC (méthode décrite au paragraphe 2.3.1.3). Ces modèles sont basés sur 32 544 relevés floristiques en présence/absence de l'Inventaire Forestier National (nouvelle méthode).

Les gains d'AUC par rapport à un modèle thermique sont présentés dans le tableau suivant :

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

Tableau 15 : Gain moyen d'AUC pour les modèles de distribution de 37 essences forestières pour sept indices hydriques édaphiques, par rapport à des modèles basés uniquement sur des variables climatiques (minimum des températures mensuelles moyennes calculées sur la période 1961 – 1990 et nombre de jours en janvier où l'on mesure des températures supérieures à 5°C). Les indices hydriques édaphiques sont calculés à partir des bilans hydriques de Palmer et Thornthwaite pour chaque saison, sur une saison de végétation (d'avril à octobre inclus) et sur l'année entière.

Ces résultats montrent que les indices permettant de mieux caractériser les contraintes hydriques des sols sont les indices estivaux. Les indices les plus discriminants vis-à-vis de la distribution des essences forestières sont le déficit d'évaporation et l'indice d'aridité de Thornthwaite, ainsi que le déficit d'évaporation de Palmer (indices estivaux, annuels et calculés sur la période de végétation). Le déficit d'évaporation estival de Thornthwaite semble être légèrement plus efficace que les autres, avec un gain d'AUC par rapport à un modèle purement thermique de 0,044. Les écarts de gains d'AUC entre ces différents indices (estivaux ou annuels) sont cependant relativement faibles, du fait des corrélations entre eux. Cependant, cette analyse ne donne que des tendances moyennes et nous avons cherché à voir si elles ne cachaient pas des résultats différents. C'est pourquoi nous avons compté pour chaque indice le nombre d'essences pour lesquelles il est le plus performant (**Tableau 16**). Ces calculs apportent plusieurs informations :

- Les indices estivaux semblent être plus efficaces pour expliquer la distribution des essences que les moyennes annuelles ou sur une période de végétation (**Tableau 16 a**).
- Le déficit d'évaporation de Thornthwaite explique la distribution d'un plus grand nombre d'essences (**Tableau 16 a et b**).

	Palmer							Total	Thornthwaite							Total	Total
	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD	Palmer	RU	DE	ETR	IA	REW	SI	SWD	Thornthwaite	général
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

	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

Tableau 16 : Nombre 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).

Cette analyse conduit à retenir pour le reste de l'étude le déficit d'évaporation estival (somme des déficits de juin, juillet et août) calculé selon Thornthwaite. Nous avons utilisé les données sélectionnées lors du chapitre précédent pour le calculer sur la zone d'étude (**Figure 44**, page suivante

et **carte séparée**). Nous avons choisi de conserver une résolution de 50 m afin de ne pas perdre d'information, bien que les pluies soient au pas de 1 km et les RUM utilisées au pas de 500 m. Pour plus de détails concernant la capacité prédictive des indices, se reporter à l'**Annexe 21**.

La carte numérique obtenue met en évidence une certaine hétérogénéité 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 30 mm et un écart-type de 16 mm). Elle permet de mieux distinguer les différences entre les différentes situations topographiques : la finesse spatiale du modèle permet de bien distinguer les situations de versant frais, exposés au nord, présentant des déficits faibles, des versants ensoleillés plus secs.

Cette première carte est basée sur la carte des RUM modélisée au pas de 500 m). Une seconde carte a été élaborée à partir de la carte des RUM au pas de 50 m (Villiers, 2011). Les deux cartes sont comparées en **Annexe 22**.

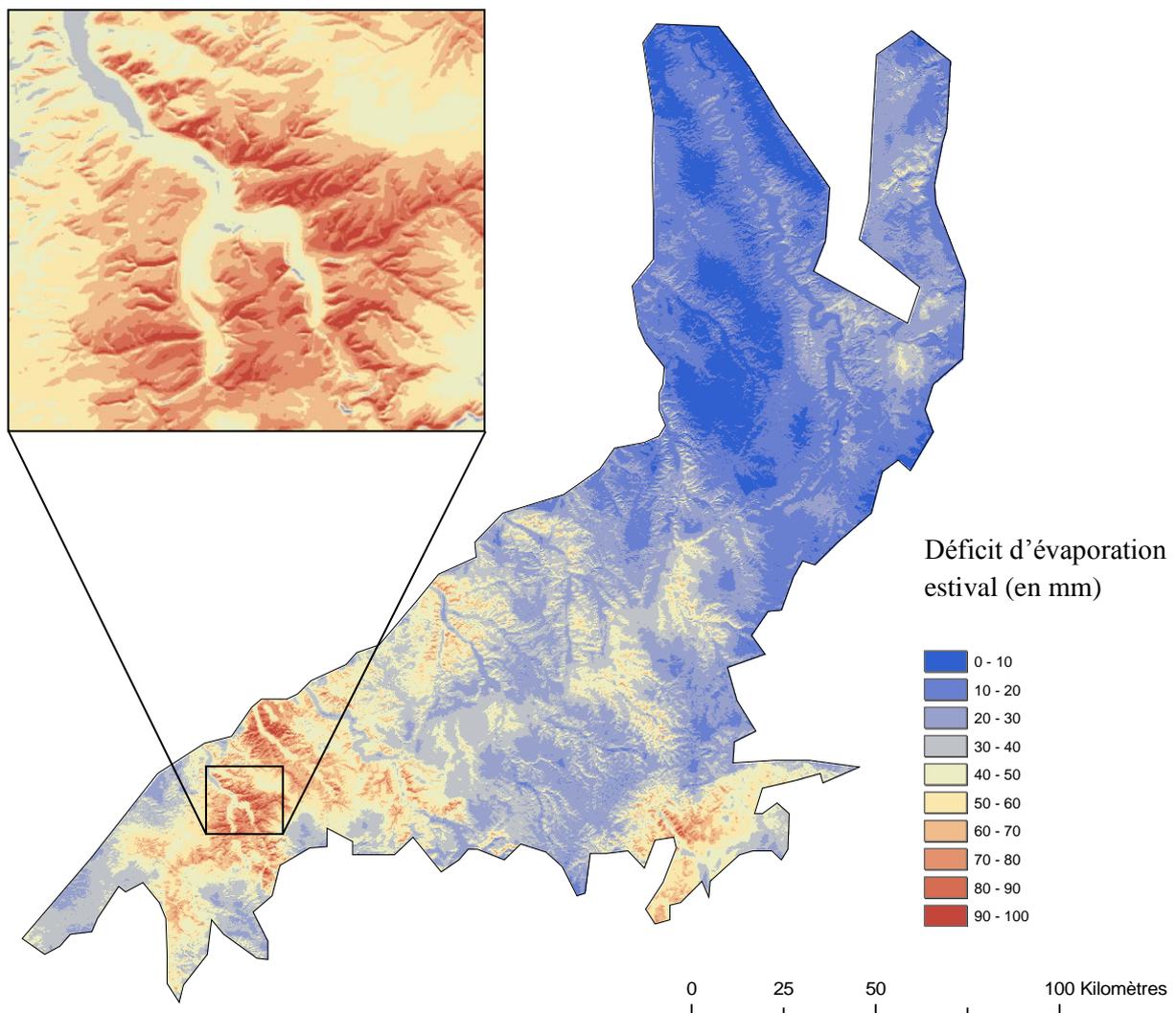


Figure 44 : Cartographie au pas de 50m du déficit d'évaporation estival (en mm) calculé selon Thornthwaite à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne

3.2.2.3. *Analyse critique*

Les sept indices calculés précédemment ont tous été calculés à partir des mêmes données. Cela explique le faible écart d'AUC obtenu entre les modèles de distribution (l'écart l'AUC moyen entre les modèles estivaux basés sur le déficit d'évaporation et l'indice d'aridité Thornthwaite n'est par exemple que de 0,002). Il a néanmoins été possible d'identifier un indice permettant de mieux expliquer la distribution des essences que les autres en comparant le nombre d'essences dont chaque indice est le plus discriminant vis-à-vis de la distribution.

Cette analyse dépend cependant fortement du nombre et des exigences écologiques des essences considérées. Néanmoins, un échantillon d'espèces relativement conséquent par rapport au nombre d'essences forestières « productives » en France permet de limiter un biais dû au choix des essences considérées.

Une seconde limite découlant de la méthode utilisée peut être identifiée. La présence ou l'absence des essences considérées sur les placettes de relevés peut être fortement influencée par les objectifs et les pratiques sylvicoles locales, l'histoire des peuplements ou les sols. On peut, par exemple, imaginer certaines zones où une essence serait absente bien qu'elle soit potentiellement en station, parce que le gestionnaire forestier choisit de limiter son développement pour favoriser celui d'une autre essence. De plus, le fait de considérer la distribution des essences plutôt que sa productivité ne permet pas de traiter du potentiel de production d'une essence. Une essence peut être présente sur une zone donnée mais sans aucun intérêt vis-à-vis de la production de bois.

Il serait possible de conduire de même type de raisonnement vis-à-vis de la productivité des essences, en testant par exemple la capacité des indices hydriques édaphiques à prédire la valeur d'un indice de productivité (par exemple une hauteur dominante à un âge de référence). Cependant, ces indices sont disponibles pour un nombre très limité d'essences.

Nous avons voulu ensuite vérifier qu'aucun biais important n'était lié à la méthode de modélisation utilisée (GLM) en refaisant l'analyse une seconde méthode (méthode de GAM, ou *generalized additive models*). Or les résultats obtenus par cette seconde méthode sont sensiblement les mêmes. L'indice le plus explicatif de la distribution des essences reste le déficit d'évaporation estival de Thornthwaite, confortant la validité de nos résultats.

3.3. VALIDATION DE LA CARTE NUMERIQUE DES DEFICITS D'EVAPORATION

Une fois l'indice sélectionné calculé sous SIG, il reste à le valider. Nous allons le faire de deux manières différentes :

- en confrontant les données de déficit d'évaporation extraites de la carte à des données indépendantes mesurées sur le terrain, ou extraites de bases de données indépendantes (IFN, RENECOFOR) ;
- en comparant la distribution des essences forestières prédite à partir des données de déficit d'évaporation extraites de la carte numérique et recalculées à partir des placettes IFN.

Ces comparaisons permettent de vérifier si l'utilisation des données numériques spatialisées conduit à des résultats cohérents par rapport aux calculs réalisés sur les placettes.

3.3.1. Comparaison statistique des données calculées et extraites du SIG

Plusieurs échelles ont été considérées pour valider statistiquement la carte numérique des déficits d'évaporation (France, plateaux calcaires, région forestière, forêt, parcelles). Le fait de valider la carte numérique des déficits d'évaporation à plusieurs échelles remplit deux objectifs. Cela permet de discuter :

- de l'échelle à laquelle on peut utiliser la carte numérique : à quel niveau de zoom peut-on utiliser la carte ?
- des améliorations apportées par l'intégration de la réserve utile au pas de 50 m à la carte numérique du déficit d'évaporation

3.3.1.1. A l'échelle de la France et des plateaux calcaires

a) Jeu de donnée RENECOFOR

Nous avons comparé les déficits d'évaporation mensuels issus du SIG sur les mois de juin, juillet et août avec ceux estimés à partir des 25 placettes RENECOFOR à l'échelle de la France. On obtient ainsi 75 couples de déficit d'évaporation SIG - RENECOFOR. On obtient un R^2 de 0,79 et une erreur quadratique moyenne de 7,5 mm. Le déficit d'évaporation modélisé est ainsi cohérent avec des valeurs calculées sur les placettes.

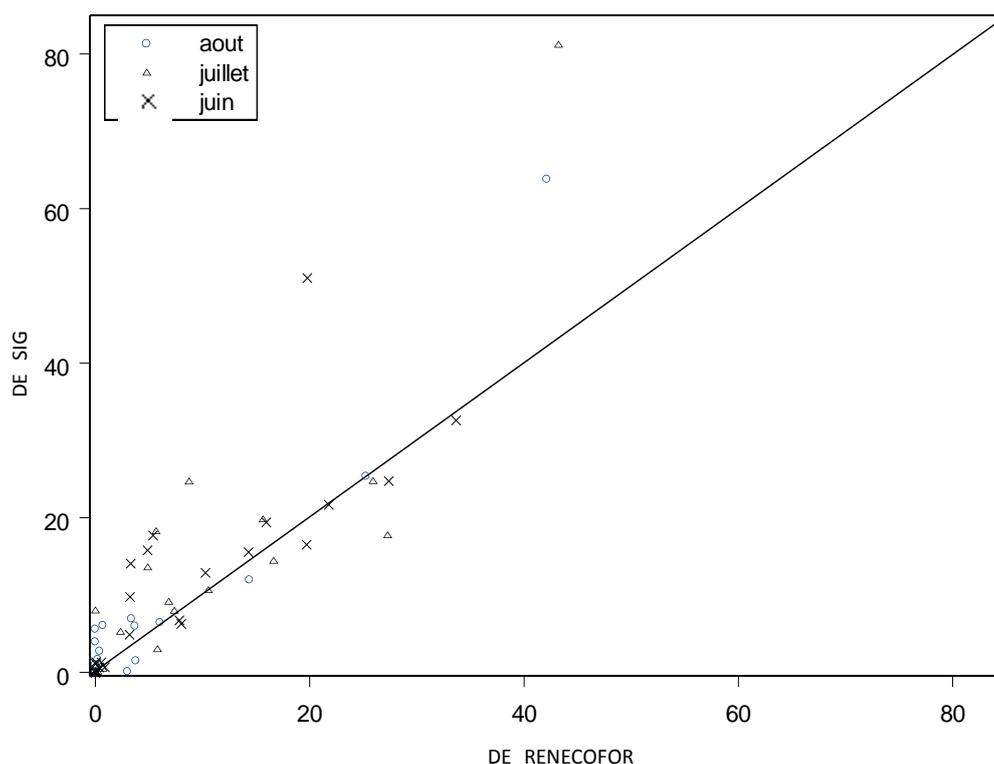


Figure 45 : Comparaison des déficits d'évaporation calculées à partir des données de 25 placettes RENECOFOR pour les mois de juin, juillet et août et extraites du SIG sur ces mêmes placettes (N = 75).

La **Figure 45** montre trois valeurs pour lesquelles le déficit d'évaporation extrait du SIG est largement surestimé par rapport aux valeurs calculées. Ces trois valeurs, issues de la même placette située en Corse pour chacun des trois mois considérés, sont de plus situées à l'extrême du gradient de valeurs observé, et risquent donc d'avoir un poids très élevé sur le coefficient de corrélation calculé. Cependant, le R^2 et la RMSE n'en sont pas fortement modifiés (on obtient 0,78 de R^2 et 4 mm de RMSE en l'enlevant).

37 % des valeurs prédites le sont avec un écart de moins de 5% par rapport aux valeurs mesurées, et 45 % le sont avec un écart de moins de 10 %

Le faible nombre de placettes est une limite à cette validation (d'autant plus que sur 75 couples de mesures/prédictions de déficits d'évaporation, 21 sont des couples de valeurs nulles). Cependant, le jeu de données utilisées pour la validation est le seul existant, il est mesuré en forêt, et il est totalement indépendant, puisque même les données climatiques utilisées pour recalculer les bilans hydriques sont mesurées *in situ*.

Nous avons cherché à voir si les résultats pouvaient être biaisés du fait du faible nombre de postes RENECOFOR disponibles en utilisant un autre jeu de données pour la validation.

b) Jeu de données IFN

Nous avons reconduit cette validation à partir des 32 544 placettes IFN. Dans ce cas, le nombre très important de placettes permettent une validation plus solide de la carte des déficits d'évaporation. Cependant, les données climatiques nécessaires au calcul des déficits d'évaporation IFN ne sont pas mesurées sur les placettes et ont donc dû être extraites du SIG. Seules les données de RUM proviennent donc de la placette. Nous avons cependant vu que c'était la RUM qui était le paramètre le plus difficile à estimer.

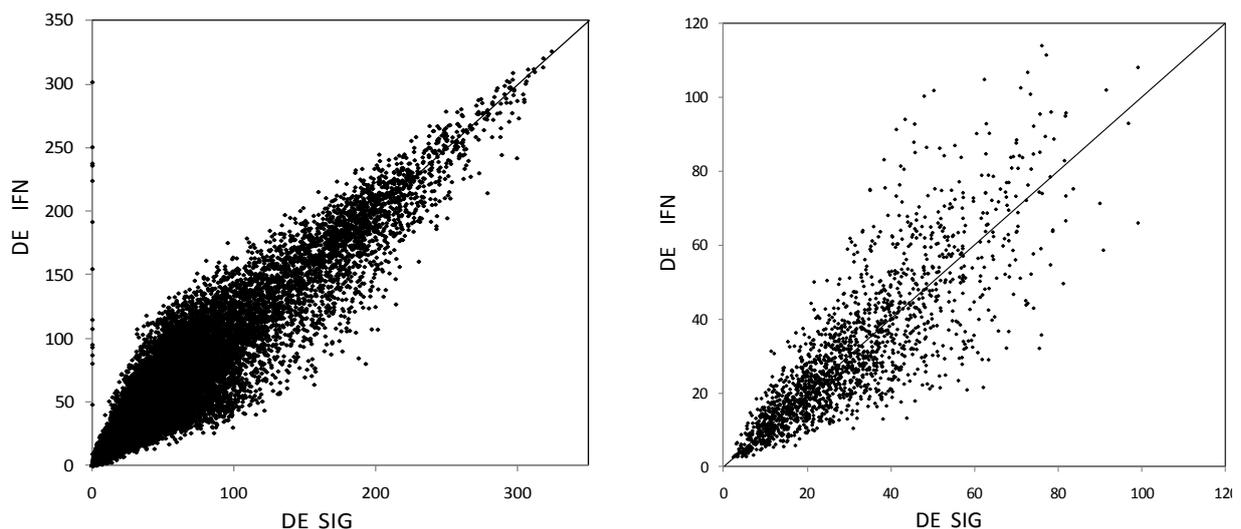


Figure 46 : Comparaison des déficits d'évaporation estivaux (somme des déficits de juin, juillet et aout) calculés à partir de données relevées sur les placettes IFN (DE IFN) et extraits du SIG sur ces mêmes placettes sur toute la France (à gauche, 32544 placettes) et sur les plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne (à droite, 1767 placettes)

	France	Plateaux calcaires
DE moy	47,21 mm	30 mm
DE min	0 mm	0,34 mm
DE max	337 mm	122 mm
R ²	0,88	0,68
RMSE	16,44 mm	11,1 mm

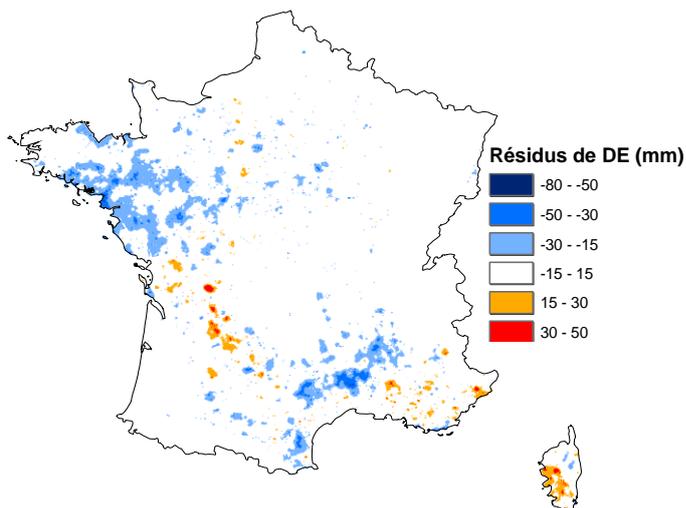


Figure 47 : Validation statistique de la carte des déficits d'évaporation estivaux Thornthwaite sur la France (validation sur 32544 placettes IFN) et la zone des plateaux calcaires (validation sur 1767 placettes)

Figure 48 : Cartographie des écarts de prédiction des déficits d'évaporation estivaux de Thornthwaite par rapport aux estimations sur les 32544 placettes IFN (en mm). Un écart positif indique une surestimation du déficit d'évaporation, tandis qu'un écart négatif montre une prédiction du déficit hydrique trop faible.

Sur toute la France, les déficits d'évaporation estivaux (somme des DE de juin, juillet et août) calculés à partir des données IFN et extraites du SIG montrent une bonne corrélation, puisqu'on calcule un R² de 0,88 et une erreur quadratique moyenne de 16,44 mm. Le biais moyen entre les données IFN et SIG est relativement faible (2,6 mm).

A l'échelle des plateaux calcaires, le plus faible gradient de valeurs explique un R² moins bon comparé au R² calculé sur la France entière (0,68). La RMSE est plus faible (11,1 mm), et le biais légèrement moins prononcé (0,4 mm). Ces chiffres montrent néanmoins une cohérence entre les déficits d'évaporation estimés sous SIG et estimés sur les placettes IFN avec des valeurs de RUM différentes. On note une dispersion des points plus forte là où les déficits d'évaporation sont les plus forts. Ces déficits élevés sont observés sur des sols de faible profondeur, ou à forte charge en cailloux, c'est-à-dire sur des sols où il est difficile d'estimer une valeur de RUM (par rapport à un sol limoneux profond à capacité de stockage en eau plus élevée, par exemple). Cette imprécision d'estimation des RUM entraîne alors une imprécision dans l'estimation des déficits d'évaporation.

3.3.1.2. A des échelles plus locales

Les relevés de terrain de trois maillages imbriqués sur les sites de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec ont permis de recalculer des réserves utiles maximales pour chaque placette, puis, à partir des données climatiques extraites du SIG, de recalculer des déficits d'évaporation estivaux. On peut alors comparer les déficits d'évaporation extraits du SIG et calculés sur les placettes. Les caractéristiques de chacun des sites sont décrites dans le **Tableau 17** et l'**Annexe 6**.

Nous avons de plus comparé les deux cartes disponibles : la première construite à partir du modèle de RUM au pas de 50 m (Villiers, 2011), et la seconde à partir du modèle au pas de 500 m (Piedallu *et al*, 2010).

site	Nord-est de la France (placettes IFN)	Bois l'Evêque Villey-le-Sec maillage 250 m	Bois l'Evêque maillage 100 m	Bois l'Evêque maillage 50 m
Surface échantillonnée	3 424 000 ha	500 ha	40 ha	10 ha
nombre de placettes	1455	92	46	37
Moyenne des DE placettes	6,8	29,1	6,6	7,7
Moyenne des DE carte (RUM 500m)	2,4	23,9	19,7	20,9
Moyenne des DE carte (RUM 50m)	7,5	29,7	25,5	34,0
Amplitude des DE placettes	75,4	64,7	66,2	67,0
Amplitude des DE (RUM 500m)	65,6	30,9	30,5	31,1
Amplitude des DE (RUM 50m)	61,1	64,2	51,9	60,8
R ² (RUM 500m)	0,31	0,45	0,12	0,46
R ² (RUM 50m)	0,77	0,60	0,21	0,65
RMSE (RUM 500m)	8,73	12,2	11,5	11,6
RMSE (RUM 50m)	4,24	9,3	14,4	15,4
Biais (RUM 500m)	-4,5	-5,2	0,1	-2,3
Biais (RUM 50m)	0,6	0,6	5,8	10,7

Tableau 17 : Comparaison des déficits d'évaporation (en mm) issus des cartes numériques calculées à partir des RUM 500 m et 50 m et des données estimées avec la RUM mesurée sur le terrain à plusieurs échelles. L'échelle du Nord-est de la France correspond à la zone couverte par la carte des RUM au pas de 50 m (Villiers, 2011)

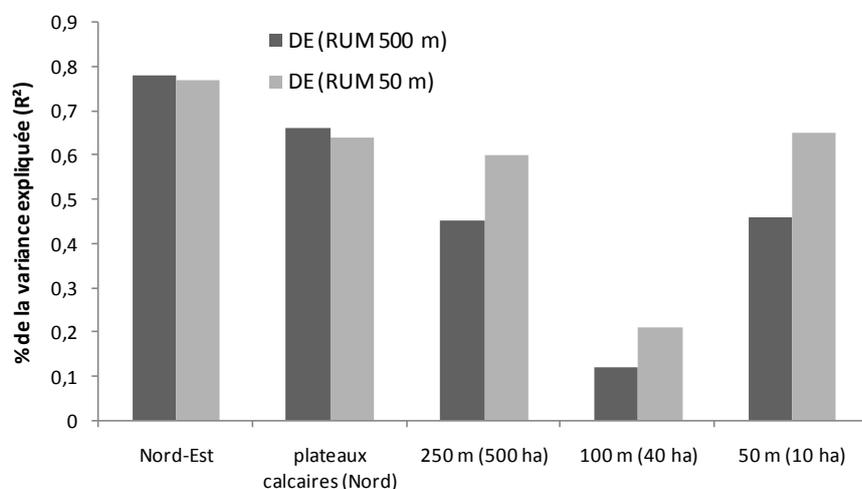


Figure 49 : Pourcentage de la variance des déficits d'évaporation (DE) observé expliqué par les cartes numériques construites à partir des RUM au pas de 500 m et 50 m à l'échelle du nord-est de la France (zone couverte par le modèle de RUM à 50 m), le nord des plateaux calcaires (zone couverte par le modèle de RUM à 50 m) et sur les différents maillages de Bois-l'Evêque et Villey-le-Sec

D'après ces résultats, les cartes numériques construites à partir des modèles de RUM à 50 et 500 m mènent à des R² très proches à grande échelle, ainsi qu'à des RMSE très semblables (6 mm à l'échelle du Nord-est et 8 mm à l'échelle des plateaux calcaires). Le modèle intégrant les RUM au pas de 50 m permet cependant de mieux retranscrire les valeurs observées sur le terrain que la carte construite à partir des RUM au pas de 500 m sur des zones plus réduites (à partir de 500 ha). Le R² calculé entre les déficits d'évaporation mesurés sur les placettes et extraits de la carte numérique intégrant la RUM au pas de 50 m est en effet meilleur pour tous les maillages de Bois-l'Evêque (Figure 49). Cette dernière carte permet une augmentation moyenne du pourcentage de la variance observée expliquée par le modèle de 14 % à petite échelle (moyenne sur tous les maillages des sites de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec).

De plus, visuellement, la carte construite à partir des RUM 50 m montre une plus grande variabilité de contraintes hydriques sur les zones étudiées que celle intégrant les RUM à 500m. La résolution plus basse de ce dernier modèle ne permet pas de distinguer aussi bien ces contrastes, et la zone apparaît plus homogène vis-à-vis des sécheresses estivales.

L'amplitude des valeurs de déficits d'évaporation calculée sur les différents maillages avec la carte intégrant les RUM 500 m est donc plus faible que celle calculée à partir de la carte construite à partir des RUM 50m. Cependant, on observe sur de petites échelles (maillages de 100 m et 50 m) un biais du modèle au pas de 50 m ainsi qu'une erreur quadratique moyenne légèrement plus élevés.

La carte des RUM 50 m semble alors apporter une véritable amélioration à la carte des déficits d'évaporation. Il semble envisageable d'estimer les variations spatiales des déficits d'évaporation à l'échelle d'une forêt de 500 hectares environ à partir de la carte construite à partir des RUM 50 m, tandis que la même utilisation de la carte construite à partir des RUM 500 m paraît plus risquée. Même à l'échelle locale, les coefficients de corrélation restent relativement élevés pour le modèle intégrant les RUM au pas de 50 m (avec un R^2 de 0,65 sur le maillage de 50 m). Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle, construit à partir de données spatialisées plus fines, permet de mieux rendre compte d'une variabilité locale que le modèle au pas de 500 m qui, du fait de sa résolution plus basse, lisse beaucoup l'information spatialement.

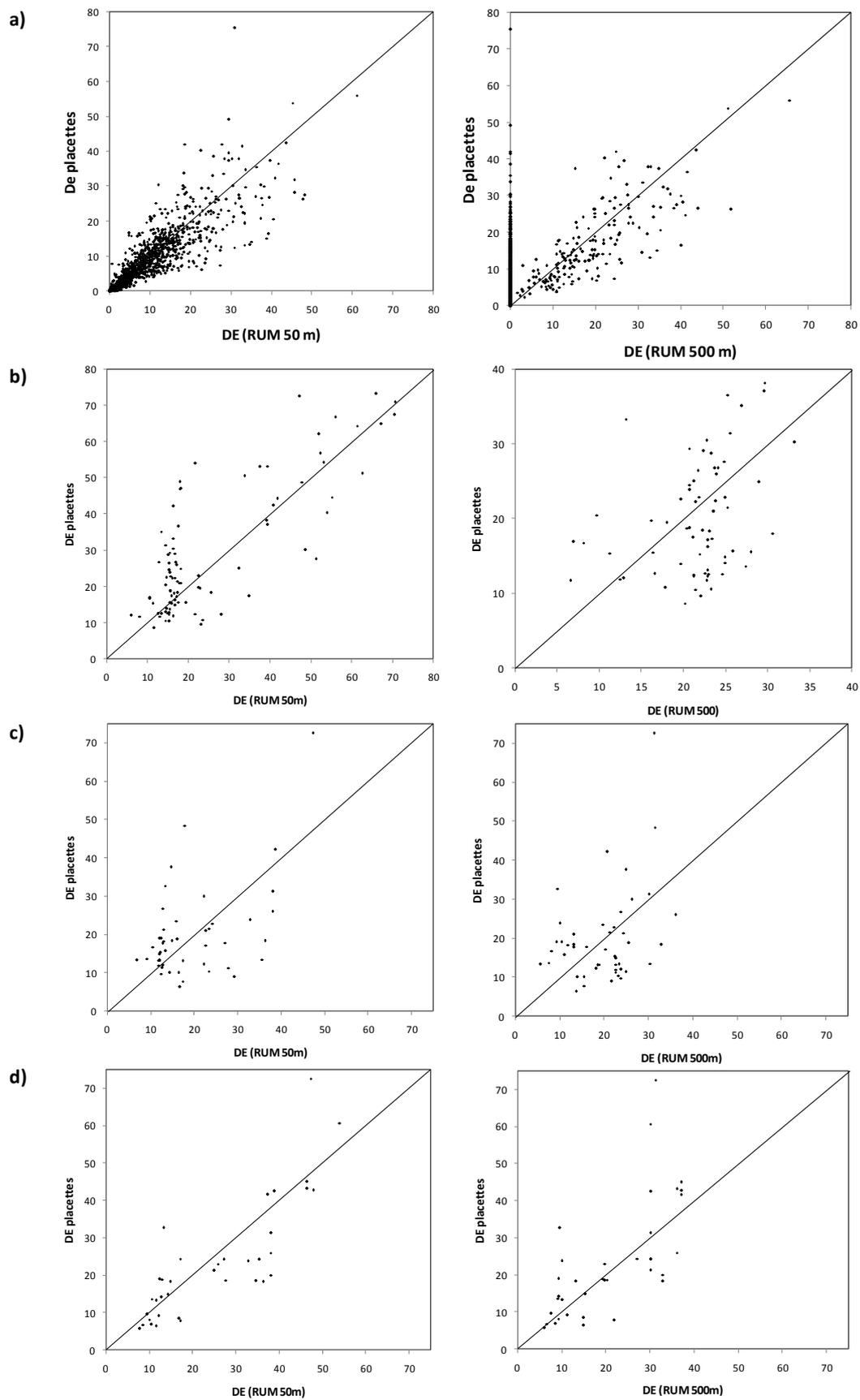


Figure 50 : Corrélations entre les déficits d'évaporation (DE) calculés sur les placettes de Villy-le-Sec et Bois l'Evêque et extraits des cartes numériques intégrant les RUM au pas de 500 m (RUM 500 m) et au pas de 50 m (RUM 50 m) à différentes échelles : a) à l'échelle du Nord-est de la France ; b) 500 ha (maillage 250 m) ; c) 40 ha (maillage 100 m) ; d) 10 ha (maillage 50m)

Nous observons cependant une diminution de R^2 sur le maillage à 100 m pour les cartes fondées sur les RUM aux deux résolutions. Visuellement, la carte montre des zones contractées en termes de sécheresse, mais la position du maillage à 100 m fait que cette variabilité est peu représentée. Les placettes positionnées sur le maillage à 50 m couvrent une plus grande variabilité, ce qui explique l'obtention d'un R^2 plus élevé.

On peut en effet expliquer la faible corrélation entre les valeurs prédites et mesurées sur le maillage à 100 m par la faible variabilité des déficits d'évaporation lus sur la carte pour ce maillage. En effet, 62 % des valeurs lues sur la carte sont comprises entre 10 et 25 mm de déficit d'évaporation, soit un tiers de l'amplitude de valeurs observées sur l'ensemble des placettes du maillage à 100 m. 80 % des valeurs lues sur la carte ont une valeur de déficit d'évaporation comprise entre 10 et 35 mm, ce qui représente seulement 50% du gradient observé sur les placettes de ce maillage. L'erreur moyenne d'estimation (RMSE) est alors élevée par rapport à ces valeurs (11,5 mm pour la carte construite à partir des RUM à 500m) (**Figure 50c**). Ces placettes correspondent aux situations de plateau. Les 20% restant (correspondant aux valeurs minimales et maximales de déficit d'évaporation lues sur la carte) correspondent aux placettes de versants et de fond de vallon.

Cela permet de conclure qu'utiliser la carte des déficits d'évaporation à fine échelle n'a de sens que si la zone considérée est contrastée. Il est peu pertinent d'estimer les variations spatiales de la sécheresse édaphique à partir de la carte sur une zone homogène. La carte rend cependant bien compte de la variabilité des conditions hydriques à petite échelle (jusqu'à 10 ha) si la zone est bien contrastée (topographie variée).

L'utilisation de la carte des déficits d'évaporation intégrant les RUM 500 m semble donc limitée comparativement à la carte construite à partir des RUM au pas de 50 m dès lors que l'on réduit l'aire considérée. Les résultats à l'échelle de la France et des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne montrent que la première semble fiable et discrimine relativement bien les grands gradients à cette échelle. A plus petite échelle (forêt ou parcelle), il semble plus avisé d'utiliser la seconde. La carte construite à partir des RUM 500 m semble en effet moins performante pour être utilisée à ces niveaux de zoom.

Il semble que les cartes numériques de déficits d'évaporation prédisent des valeurs cohérentes avec les mesures de terrain, même à des échelles réduites. Nous avons pourtant montré au paragraphe 3.1.4 que les cartes numériques des RUM, qu'elles soient calculées au pas de 50 m ou 500 m, ne fournissent des valeurs de RUM que très peu corrélées aux valeurs mesurées sur le terrain lorsque l'on considère des zones inférieures à 500 ha. L'intégration des données climatiques, dont les modèles sont de meilleure qualité, dans les calculs de bilans hydriques édaphiques semblent alors expliquer la forte corrélation entre les déficits d'évaporation mesurée et les valeurs prédites par le modèle. On pourrait cependant se demander l'intérêt de calculer des bilans hydriques édaphiques alors que les données climatiques sont à l'origine des résultats observés. Il a cependant été prouvé que l'intégration de ces données climatiques dans les calculs de bilans hydriques édaphiques est plus efficace pour expliquer la distribution des essences forestières que leur utilisation dans des calculs de bilans hydriques climatiques purs (sans intégrer de donnée de sol) (Piedallu *et al.*, en préparation).

3.3.2. Capacité prédictive du déficit d'évaporation estival vis-à-vis de la distribution des essences

Piedallu *et al.* (article en préparation) a comparé la capacité à prédire la distribution des essences forestières des indices édaphiques (RU, DE, REW) et climatiques (bilans hydriques ne tenant pas compte de la RUM). Il a alors été mis en évidence que les indices édaphiques sont plus efficaces que les indices climatiques. Nous avons aussi vu précédemment que le déficit d'évaporation estival de

Thornthwaite était, parmi tous les indices édaphiques étudiés, celui qui expliquait le mieux la distribution des mêmes essences. Nous avons voulu ici confronter la capacité de la carte numérique des déficits d'évaporation à prédire la distribution de 37 essences forestières à celle des déficits d'évaporation issus des mesures de terrain (placettes IFN, nouvelle méthode). Nous avons donc comparé des modèles de distribution de ces essences à partir des déficits d'évaporation calculés sur les placettes IFN et à partir des déficits d'évaporation extraits de la carte numérique.

Calibrer des modèles avec les données IFN ou les données SIG conduit à des modèles de qualité équivalente (on obtient un gain d'AUC dû au déficit d'évaporation estival seul de 0,048 par rapport à un modèle purement thermique dans les deux cas). Le déficit d'évaporation issu du SIG est cependant meilleur pour prédire la distribution de 51,3% des essences étudiées.

La prédiction de la distribution des essences forestières sur les plateaux calcaires lorrains et champenois montre que le déficit d'évaporation calculé sur les placettes IFN permet d'obtenir des modèles plus fiables que les modèles issus des données de la carte numérique (travail sur 18 essences présentes sur le site d'étude parmi les 37 utilisées à l'échelle de la France). Le gain d'AUC moyen des modèles obtenus à partir de ces données vaut 0,047 contre 0,041 pour les déficits d'évaporation extraits du SIG. Ces deux résultats restent tout de même assez proches. Le déficit d'évaporation extrait du SIG est par contre une meilleure variable à prendre en compte dans les modèles pour 55% des essences considérées sur les plateaux calcaires.

Nous pouvons alors conclure de ces résultats que les valeurs de déficits d'évaporation prédites par la carte numérique produite expliquent la distribution des essences forestières environ aussi bien que les valeurs mesurées sur les placettes IFN.

La carte des déficits d'évaporation retenue pour caractériser les contraintes hydriques dues à la sécheresse a donc été validée par deux méthodes (comparaison statistique des données prédites par la carte et mesurées sur le terrain et étude de la capacité de la carte à prédire la distribution des principales essences forestières). Il semble qu'elle soit utilisable à grande échelle (France), mais aussi à des échelles plus fines (jusqu'à l'échelle d'une forêt de 500 ha environ).

Cependant, une amélioration nette de la carte peut être apportée en la générant à partir des RUM modélisées au pas de 50 m. Cette amélioration permettrait d'utiliser la carte obtenue à une échelle beaucoup plus fine (jusqu'à l'échelle de quelques parcelles, soit une dizaine d'hectares). Elle demande cependant un travail important de compilation et de numérisation des données nécessaire au calcul des RUM à fine résolution (géologie au 1/50 000).

Il s'agit maintenant de discuter de l'intérêt de ce nouvel outil pour mieux comprendre la distribution des essences, de ses apports quant à l'identification ou la cartographie des stations, et des intérêts qu'elle présente pour appréhender les risques liés aux changements climatiques. L'objectif de cette partie est de discuter de l'intérêt de l'intégration de la carte des déficits d'évaporation dans les guides de stations.

4. Discussion : apports de la carte numérique des bilans hydriques aux informations stationnelles

Il s'agit ici de discuter des potentialités d'utilisation et des limites de la carte numérique des déficits d'évaporation par rapport aux informations disponibles dans les catalogues et guides de stations couvrant les plateaux calcaires. La comparaison des informations apportées par les deux documents permettra ainsi d'étudier :

- quels sont les intérêts et les limites d'un outil par rapport à l'autre ;
- si les informations apportées par les deux outils sont complémentaires ou alors redondantes ;
- s'il est possible d'affiner la cartographie des stations forestières en intégrant la carte numérique au diagnostic stationnel ;
- si la carte numérique permet de discuter d'une éventuelle refonte des unités stationnelles décrites dans le guide des Plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (Milard, 2004) ;
- comment la carte numérique permet d'anticiper les changements climatiques et de les prendre en compte dans le guide des stations.

Nous avons donc tout d'abord comparé les méthodes employées par chaque outil pour estimer les contraintes hydriques. Nous avons étudié la nature, les intérêts et les limites de l'estimation de l'intensité de la sécheresse estivale par chacun des deux outils. Nous avons ensuite confronté ces résultats aux exigences écologiques des essences afin d'étudier en quoi chacun des deux outils permet d'orienter les choix de gestion forestière. Enfin, nous avons discuté des intérêts et limites de la carte numérique des stations pour évaluer les risques induits par le changement climatique pour les essences et sur chaque unité stationnelle.

4.1. COMPARAISON DES METHODES D'ESTIMATION DES CONTRAINTES HYDRIQUES UTILISEES DANS LE GUIDE POUR L'IDENTIFICATION DES STATIONS ET LA CARTE DES DEFICITS D'EVAPORATION

Les guides et catalogues de stations donnent une description qualitative des bilans en eau, en qualifiant la ressource en eau de faible à très importante. Ces bilans sont évalués sur chaque unité stationnelle à partir :

- des précipitations moyennes sur la zone d'étude ;
- de 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 permet de plus d'évaluer qualitativement l'évapotranspiration (moyenne sur plateaux, faible sur les versants nord et les fonds de vallons confinés, forte sur les versants ensoleillés) ;
- d'un profil de sol fréquent qui permet d'évaluer une réserve en eau maximale des sols, grâce à l'estimation de la texture des différents horizons, de la profondeur et de la charge en cailloux ;
- des indications fournies par la flore indicatrice (c'est-à-dire la flore ayant une faible amplitude écologique vis-à-vis des disponibilités en eau) (Milard, 2004).

Les bilans hydriques qualitatifs réalisés sont construits à partir de données topographiques principalement.

La carte numérique des déficits d'évaporation est construite à partir de données similaires : les températures et les rayonnements solaires utilisés pour le calcul de l'ETP tiennent compte de la topographie et de l'exposition. Les précipitations et les RUM sont aussi intégrées au calcul. Cependant, le rôle de la topographie dans les bilans hydriques n'est que partiellement pris en compte, puisque les écoulements latéraux par ruissellement ne sont pas considérés dans le calcul. La part climatique a, par contre, un poids beaucoup plus grand, et rend compte de variations spatiales fines. Le guide ne permet pas de distinguer des variations climatiques à fine échelle, mais uniquement selon les grandes unités topographiques.

Il ne rend pas non plus compte du gradient de contrainte hydrique sur une même unité stationnelle sur toute la zone qu'il décrit : les conditions de milieu présentées dans le guide pour une unité stationnelle sont des conditions moyennes. Une fourchette qualitative exprimant la variabilité pour chaque unité stationnelle est donnée en début de guide (sous la forme « réserve en eau faible à moyenne », par exemple). Cependant, le guide ne donne aucune indication spatiale concernant cette variabilité (par exemple, «telle US présente une réserve en eau en moyenne, mais qui peut s'avérer plus faible sur telle zone »). La seule exception à cette affirmation concerne le hêtre, pour lequel le guide précise que les zones les moins arrosées et où l'humidité atmosphérique trop faible peut limiter son développement. La carte des déficits d'évaporation permet de mieux mettre en évidence le gradient spatial de sécheresse estivale sur une zone donnée.

Paramètre entrant dans les calculs de bilans hydriques	Guide des stations	Carte des déficits d'évaporation
Estimations des précipitations	Valeur moyenne sur la zone d'étude	Précipitations modélisées au pas de 50 m
Nature des bilans hydriques	qualitatifs	quantitatifs
Résolution spatiale des bilans en eau	une station	50 m
Estimation de l'évapotranspiration	Estimée qualitativement à partir de la topographie	Calculée à partir des rayonnements solaires et des températures au pas de 50 m
Estimation des déplacements latéraux d'eau	Estimés à partir de la topographie	Non pris en compte
Estimation de la RUM	Estimée à partir d'un profil-type de sol sur chaque unité stationnelle	Modélisée au pas de 500 m
Prise en compte du gradient climatique sur la zone couverte par l'outil	non	oui

Tableau 18 : synthèses des principales différences concernant l'estimation de la sécheresse édaphique entre le guide des stations et la carte des déficits d'évaporation.

4.2. LIEN ENTRE LES DEFICITS D'EVAPORATION ET LES LIMITES D'UNITES STATIONNELLES

Nous avons comparé les informations fournies par le guide de stations et la carte numérique des déficits d'évaporation concernant les unités stationnelles décrites dans le guide afin de répondre à plusieurs questions :

- Quelle amplitude de valeurs de déficits hydriques caractérise chaque unité stationnelle ?
- Cette amplitude est-elle cohérente avec la description des unités stationnelles faite dans le guide ?
- Est-il possible de cartographier les stations à partir de la carte des déficits d'évaporation ?
- Quels sont les apports de la RUM à 50 m sur les potentialités d'utilisation de la carte des déficits hydriques pour cartographier les stations ?

Dans les paragraphes suivants, et sauf mention contraire, nous avons travaillé à partir des données stationnelles sur l'ensemble des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne. Les types de stations décrits sur l'ensemble de cette aire ont été harmonisés autour des unités stationnelles décrites dans le guide des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne (guide Milard), selon la méthode présentée au paragraphe 2.4.2.

Les amplitudes de déficits hydriques couvertes par les différentes unités stationnelles ont été identifiées à partir de la méthode de calcul d'amplitude écologique décrite au paragraphe 2.4. Les amplitudes de déficits d'évaporation définies sur chaque unité stationnelle correspondent donc à la gamme de valeurs pour laquelle ont été relevées 80% des observations de cette US. Nous avons ensuite comparé cette amplitude à la description hydrique des unités stationnelles faite dans le guide des stations (Milard, 2004) (**Figure 51**).

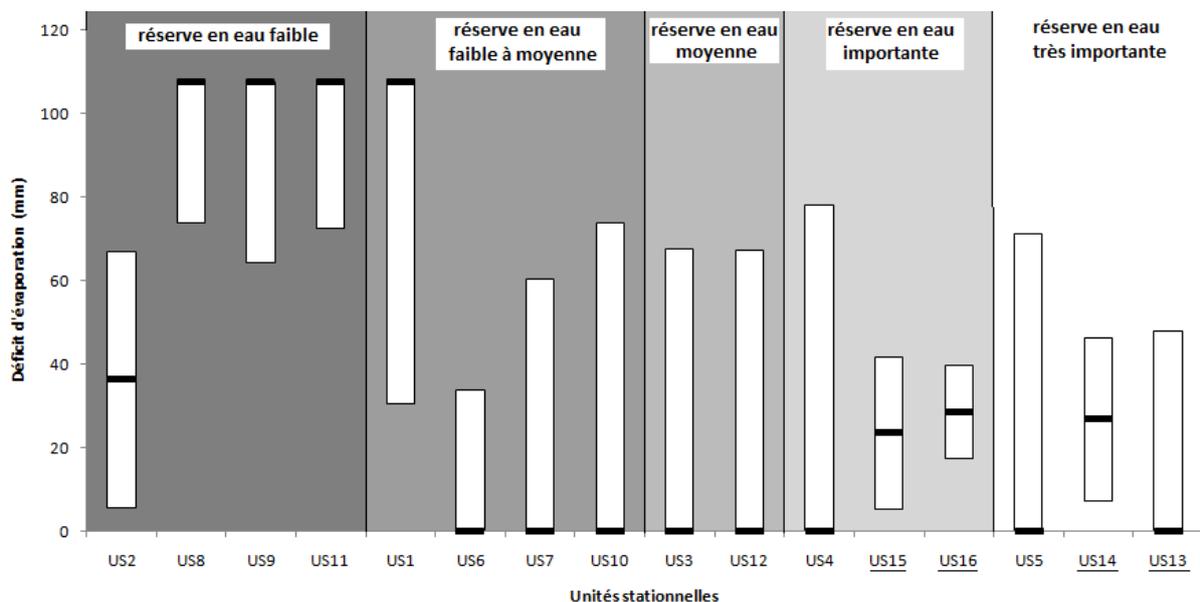


Figure 51 : Valeurs de déficits d'évaporation pour lesquelles se situent 80% des relevés des unités stationnelles définies dans le guide Milard (unités stationnelles harmonisées sur toute l'emprise de la zone d'étude). La valeur de déficit d'évaporation pour laquelle on observe le plus fréquemment chaque unité stationnelle a été matérialisée (trait noir épais). Les évaluations des réserves en eau édaphiques indiquées (texte au dessus de chaque groupe) sont celles décrites dans le guide Milard. Les unités stationnelles dont le nom est souligné peuvent présenter un engorgement temporaire hivernal (US 13 à 15) ou permanent (US16).

4.2.1. Comparaison des groupes d'unités stationnelles aux contraintes hydriques estivales similaires identifiées dans le guide et à partir de la carte des déficits hydriques

En ce qui concerne l'amplitude de déficits d'évaporation observée à partir de la carte numérique sur les unités stationnelles, on peut distinguer trois groupes d'unités stationnelles. Le premier groupe est majoritairement observé pour des valeurs de déficits hydriques de 0 mm. Ces stations peuvent être identifiées comme des stations à faibles contraintes dues à la sécheresse estivale. Elles sont caractérisées dans le guide par un sol profond (US 3, 4 et 5), ou par une situation topographique ombragée (US 6, 7 et dans une moindre mesure US10) ou de fond de vallon (US 12 et 13).

Le second groupe correspond aux stations observées sur des situations sèches (avec une fréquence maximale d'observation à l'extrême du gradient de déficit d'évaporation observé, soit 100 mm). Ce sont les stations de versants ensoleillés (US 8 et 9), ou sur sols superficiels (US 1 et US 11).

Le troisième groupe est observé sur des valeurs de déficits d'évaporation intermédiaires, et sur une amplitude de valeurs de déficit hydrique en général plutôt faible. Ces unités stationnelles peuvent alors être identifiées sur la carte comme plutôt mésophiles ; leur disponibilité en eau est moyenne et les contraintes estivales modérées (US 2, 14, 15 et 16). Cependant, ces résultats concernant les US 15 et 16 ne sont pas pertinents. En effet, ces stations de vallées sont alimentées en eau par une nappe souterraine que le modèle développé ici ne prend pas en compte.

Le guide fait état de cinq groupes d'unités stationnelles distincts vis-à-vis de la contrainte hydrique estivale : les unités stationnelles à réserve en eau faible, faible à moyenne, moyenne, importante, et très importante (**Figure 51**). Le découpage des unités stationnelles selon les disponibilités en eau proposé dans le guide semble plus donc être le plus fin. La carte des déficits d'évaporation ne permet pas d'identifier autant de groupes. On peut, à partir de ces observations, émettre plusieurs hypothèses :

- les estimations qualitatives des contraintes hydriques par la méthode des guides de station est plus fine que celle de la carte des déficits d'évaporation. On pourrait justifier cette hypothèse par le fait que cette méthode considère les mouvements latéraux d'eau par ruissellement, ce qui n'est pas le cas de la carte des déficits d'évaporation ;
- le classement des unités stationnelles en cinq classes de contraintes hydriques peut être artificiel. Ce classement a été effectué « à dire d'expert », afin de permettre au gestionnaire forestier de mieux discerner les caractéristiques de chaque unité stationnelle et de mieux les identifier sur le terrain (com. pers. L. Milard, rédactrice du guide). On peut par exemple citer les US4 et 5. Ces deux stations sont situées sur les mêmes profils topographiques. Les bilans des arrivées et départs latéraux d'eau sont théoriquement les mêmes. Le guide décrit l'US5 comme présentant des contraintes hydriques plus faibles que l'US4, du fait d'une profondeur de sol et d'une épaisseur de limons (et donc une capacité de stockage d'eau dans les sols) plus importantes. Or les valeurs de déficit d'évaporation observées sur ces stations sont très similaires, donc la carte actuelle ne distingue pas ces deux unités stationnelles d'un point de vue hydrique. Cependant, la difficulté rencontrée pour différencier ces unités stationnelles proviendrait en grande partie de la carte des RUM utilisée. La différence entre ces deux US quant aux disponibilités en eau tient essentiellement à l'épaisseur de limons. Or la précision de la carte des RUM actuelle ne permet pas de distinguer de telles subtilités (la carte des RUM à 50 m permet néanmoins d'améliorer ce point, bien que des incertitudes persistent).

- s bilans hydriques considérés dans le guide des stations est purement édaphique : il tient compte d'un profil de sol caractéristique ainsi que de la position topographique de chaque unité stationnelle. Les données climatiques considérées sont des moyennes sur la zone couverte par le guide. Les bilans hydriques à partir desquels nous avons construit la carte des déficits d'évaporation intègrent, en plus des données édaphiques, des données climatiques pour lesquelles on tint compte des variations locales. La nature des bilans hydriques considérés dans la carte numérique et le guide des stations sont donc différents. Cela expliquerait que les groupes d'unités stationnelles homogènes quant aux disponibilités en eau identifiés sont différents.

Les fourchettes de valeurs de déficits d'évaporation caractérisant les unités stationnelles ont été identifiées sur toute la zone d'étude. Elles reflètent donc une tendance générale pour chaque station à cette échelle globale.

La qualification des réserves en eau dans le guide des stations a été définie en comparant les différentes situations : les stations de haut et de milieu de versant sont en moyenne plus sèches que les stations de plateau, plutôt mésophiles. Les stations de bas versants et de fond de vallon sont des stations plus fraîches. Puis, pour chaque position topographique, les différentes unités stationnelles ont été distinguées en fonction de la profondeur de sol, de l'acidité etc. En fonction de toute ces comparaisons, on a indiqué de façon qualitative les disponibilités en eau (de faibles à fortes). La description de chaque unité stationnelle est alors faite pour un climat moyen sur la zone d'étude. On ne peut donc comparer les disponibilités en eau entre différentes unités stationnelles que sur une zone climatiquement homogène, hypothèse vérifiée uniquement sur des aires réduites.

Au final, les cinq groupes décrits dans le guide seraient identifiables à petite échelle, sur les unités stationnelles composant une forêt ou un massif. La variabilité climatique sur les plateaux calcaires dans leur ensemble rend impossible de distinguer de telles subtilités à cette échelle, la variabilité au sein d'une même unité stationnelle étant trop importante.

On peut identifier là une limite à chacun des deux outils comparés :

- le guide décrit les contraintes hydriques sur les différentes stations en considérant la zone d'étude comme climatiquement homogène, or elle ne l'est pas (voir section 1.1.1). Concrètement, à l'aide du guide, on peut comparer par exemple une US3 à une US4 au sein d'une même forêt, mais on ne peut pas comparer une US3 considérée au Nord de la Haute-Marne à une US4 située en Bourgogne. Le guide décrit l'US3 comme étant plus sèche que l'US4. Cependant, l'US4 située en Bourgogne, en raison des températures plus élevées ou des précipitations plus faibles, est soumise à une évapotranspiration plus intense, et peut s'avérer plus sèche que l'US3 de Haute-Marne. L'identification des valeurs de déficits d'évaporations sur la carte des stations pourra en revanche permettre de comparer ces deux stations, car la carte tient compte du gradient climatique sur la zone d'étude.
- à l'échelle globale, la redondance entre les valeurs de déficits d'évaporation observées pour chaque unité stationnelle rend difficile l'identification les unités stationnelles à partir de la carte seule (une valeur de déficit d'évaporation lue sur la carte peut correspondre à jusqu'à 12 unités stationnelles différentes).

4.2.2. Cohérence des informations fournies par le guide et par la carte des déficits hydriques

La comparaison des effectifs des groupes d'unités stationnelles homogènes vis-à-vis des disponibilités en eau identifiés à partir de la carte des déficits d'évaporation et du guide des stations montre de quelques incohérences entre les deux outils (**Tableau 19**). On remarque par exemple que certaines stations considérées dans le guide comme ayant une réserve hydrique moyenne à faible sont considérées comme peu contraignantes en termes de sécheresse à partir de la carte des déficits d'évaporation. A l'inverse, une station considérée comme très fraîche dans le guide présente des valeurs de déficits d'évaporation correspondant à des situations mésophiles.

		réserve édaphique en eau identifiée par le guide				
		faible	faible à moyenne	moyenne	importante	très importante
réserve en eau identifiée par la carte des DE	faible	3	1	0	0	0
	moyenne	1	1	0	2	1
	importante	0	2	2	1	2

Tableau 19 : Effectifs de chaque groupe d'unités stationnelles homogènes vis-à-vis des disponibilités en eau identifiés dans le guide Milard et à partir de la carte des déficits d'évaporation

Pour certaines unités stationnelles, les informations fournies par le guide des stations et par la carte des déficits hydriques sont très cohérentes. C'est le cas des US1 (stations sèches de plateaux) 8 et 9 (stations sèches de versant ensoleillé), 11 (fonds de vallon sec), 4 et 5 (stations de plateau sur sol limoneux profond) et 13 (fonds de vallon frais).

Pour d'autres unités stationnelles, on observe des incohérences entre les deux supports. Certaines stations pour lesquelles on observe des déficits d'évaporation faibles sont décrites comme des stations sèches dans le guide.

C'est le cas, par exemple, de l'US 2, caractérisant les situations de plateau sur sol argileux peu profond. On l'identifie sur la carte des déficits d'évaporation comme mésophile, tandis que le guide la décrit comme une station très sèche. Or c'est l'une des unités stationnelles les plus fréquentes. Outre le gradient climatique sur la zone d'étude, la profondeur de sol y est très variable (de moins de 20 cm de profondeur à une quarantaine de centimètres). Cette variabilité édaphique est soulignée dans le guide (la profondeur de sol prospectable par la végétation est décrite comme faible à moyenne). Cependant, la variabilité quant aux réserves en eau n'est pas évoquée (réserve en eau décrites comme faibles). Cette incohérence peut donc venir du fait que la grande variabilité de ces stations est mal appréhendée dans le guide.

On observe le même type d'incohérences sur les US 6 et 7, qui sont deux stations de versant ombragé (la première se distinguant de la seconde surtout par son sol, constitué d'éboulis mobiles). Dans ce cas, le guide des stations met plutôt l'accent sur le ruissellement de l'eau le long des pentes, qui provoque des départs importants et limite la disponibilité en eau pour les plantes. La carte des déficits d'évaporation décrit plutôt une contrainte hydrique faible due à la fraîcheur atmosphérique et à la forte humidité ambiante, qui limite l'évapotranspiration, et donc la mobilisation des ressources en eau du sol. Le même raisonnement peut être tenu pour l'US10, bien qu'on y observe des déficits d'évaporation plus élevés (jusqu'à 75 mm) dus à l'exposition plus ensoleillée (versant mésotherme). Les différences observées entre le guide et la carte proviendraient alors plutôt de la méthode d'estimation de la contrainte hydrique.

Enfin, certaines unités stationnelles sont décrites dans le guide comme très peu contraignantes en termes de sécheresse (US 14 à 16 en situation de fond de vallon et de vallée, parfois en bordure de

ruisseau), mais présentent parfois des déficits d'évaporation assez élevés. Ces unités stationnelles correspondent à des unités peu fréquentes (moins de 100 occurrences ont été trouvées dans la base de données numérique ONF). Il est alors difficile d'en modéliser significativement la probabilité de présence en fonction du déficit d'évaporation, et donc de calculer l'amplitude des valeurs de déficits d'évaporation sur ces stations. Ces unités stationnelles sont de plus linéaires et étroites (parfois quelques dizaines de mètres seulement). La résolution de la carte numérique étant de 50 mètres, il peut être difficile de lire sur la carte une valeur de déficit d'évaporation caractéristique de ces zones très locales. Cela semble alors l'une des limites de la carte par rapport au guide des stations : il est peu pertinent d'estimer la contrainte hydrique sur ces unités stationnelles à partir de cet outil. La description morphologique de ces unités stationnelles dans le guide des stations permettrait alors de mieux appréhender les disponibilités en eau sur ces situations très locales, dont les sols, la topographie et la végétation sont caractéristiques.

On peut donc supposer plusieurs origines aux incohérences observées entre les informations fournies par les deux documents :

- la principale hypothèse réside dans le fait que la nature des bilans hydriques considérés dans chacun des documents est différente. Les bilans hydriques du guide sont construits exclusivement sur des variables édaphiques et topographiques, le climat étant considéré comme homogène sur toute la zone d'étude. La carte numérique a été élaborée à partir de données édaphiques et climatiques (ces dernières tenant compte de variations à fine résolution spatiale). Ces différences rendent les groupes d'US issus de chaque outil difficilement comparables.
- la méthode de calcul des bilans hydriques utilisée pour chacun des deux documents diffère par la prise en compte ou non des écoulements latéraux liés à la topographie. Cette hypothèse expliquerait les incohérences observées pour les unités stationnelles de versant (US 6, 7 et 10). On peut alors identifier une incertitude quant aux déficits d'évaporation calculés : on sous-estime ou surestime les disponibilités en eau à un endroit donné en ne tenant pas compte des arrivées et départs latéraux de l'eau par ruissellement ;
- la variabilité intrinsèque de certaines unités stationnelles serait mal retranscrite dans le guide des stations (ce serait le cas en particulier de l'US2) ;
- la carte des déficits d'évaporation n'indique pas significativement les contraintes hydriques pour les unités stationnelles les moins fréquentes et les plus étroites ;
- le regroupement d'unités stationnelles en fonction de leur contrainte hydrique comme présenté dans le guide des stations est trop fin.

On pourrait de plus expliquer une partie des incohérences observées par des incertitudes dans l'identification des valeurs de déficits d'évaporation issus de la carte couvertes par les différentes unités stationnelles. Des incertitudes naissent des imprécisions dans les cartes de stations de la base de données utilisée pour calculer la fourchette de valeurs de déficit d'évaporation sur chaque unité stationnelle. En effet, les méthodes utilisées pour cartographier les stations à partir de relevés de terrain, ainsi que le grand nombre d'opérateurs impliqués, produit des grandes imprécisions quant à l'identification d'une unité stationnelle (notamment pour des US proches, où il y a un risque de confusion, comme les US3 et 4, où dans les cas où la station est peu représentative de l'US) ou des limites des différentes unités au sein d'une forêt (densité de relevés trop faible etc.). Or la calibration des modèles ayant servi à l'identification des valeurs de déficits d'évaporation sur les unités stationnelles est fondée sur ces relevés. Il existe en outre peu de données concernant l'évaluation de la

précision des résultats fournis par les différentes méthodes de cartographie des stations (Bazin et Gaudin, 2003). Une des limites de cette analyse réside néanmoins dans le manque de connaissance quant à la précision de la cartographie des stations à partir de l'interpolation de relevés ponctuels (cumul des incertitudes lors des relevés de terrain et des imprécisions lors de l'interpolation des données). Nous avons identifié dans le paragraphe 3.3. les incertitudes liées à la carte des déficits d'évaporation, mais il est difficile ici de comparer l'ordre de grandeur de ces imprécisions à celles des cartes de stations.

Nous avons ensuite utilisé des cartes faisant figurer les stations sous forme de polygones, déterminés manuellement à partir de relevés ponctuels, selon une ou plusieurs méthode qu'il n'est pas possible de connaître. Il est alors possible que cette interpolation soit subjective et peu précise, ce qui crée une incertitude quand aux valeurs de déficits d'évaporations identifiées sur chaque station. On pourrait alors peut-être améliorer les modèles en les calibrant à partir des relevés ponctuels effectués sur le terrain. Cela implique cependant de disposer d'une cartographie précise et numérisée de ces points de relevés sur toute la zone d'étude. Or l'obtention d'une telle donnée demande un travail de recherche dans les archives et de numérisation important, qui n'a pas été envisageable compte tenu des délais imposés pour ce stage.

De plus, il se peut que le modèle de probabilité de présence d'une unité stationnelle soit peu pertinent dans le cas où le facteur hydrique n'est pas l'élément le plus important pour sa détermination. C'est le cas de l'US1. Pour identifier cette unité stationnelle, il suffit qu'elle se trouve en situation de plateau, et que le sol soit carbonaté avant 15 cm de profondeur.

Les US3, 4 et 5 sont les stations les plus fraîches des plateaux. La carte permet, sur ces situations topographiques, d'affirmer que les zones sur plateaux où l'on observe des déficits d'évaporation très faibles ont de grandes chances de correspondre à ces stations.

Cependant, il semblerait que la distinction entre ces trois stations ne soit pas uniquement d'origine hydrique, mais aussi d'origine trophique (l'US5 pouvant présenter des sols plus acides) ou morphologique (les sols de l'US3 sont à dominante argileuse, tandis que ceux des US4 et 5 présentent un horizon limoneux en surface). L'AUC permettant d'évaluer la qualité des modèles de probabilité de présence des unités stationnelles en fonction des déficits d'évaporation montre la composante hydrique a un poids plus important pour certaines US, comme les US6, 8, 9, 11 ou 16 (**Tableau 20**). Pour les autres, bien qu'il soit possible de qualifier les valeurs des contraintes hydriques sur lesquelles on les trouve, d'autres facteurs peuvent s'avérer plus déterminant dans identification (topographie, richesse chimique des sols, engorgement).

	US1	US2	US3	US4	US5	US6	US7	US8	US9	US10	US11	US12	US13	US14	US15	US16
D ²	0.002	0.008	0.008	0.001	0.004	0.023	0.007	0.054	0.082	0.004	0.062	0.002	0.008	0.008	0.009	0.030
AUC	0.51	0.55	0.56	0.53	0.56	0.65	0.57	0.69	0.72	0.55	0.74	0.53	0.57	0.59	0.56	0.67
succès	92	50	64	22	52	50	45	83	58	70	64	26	38	29	17	30
sensitivité	12	76	39	88	61	72	67	48	78	35	70	81	74	83	100	100
spécificité	94	35	69	16	51	50	44	84	57	75	64	25	37	29	16	30
occurrences	1142	16307	7450	3660	2612	254	1164	216	2743	6054	501	1052	1288	144	65	40

Tableau 20 : qualité des modèles prédictifs des unités stationnelles en fonction des déficits d'évaporation ayant servi au calcul des amplitudes écologiques des US

Les faibles valeurs d'AUC sur certaines stations montrent une fois de plus qu'il est difficile de prédire la distribution des unités stationnelles à partir des déficits d'évaporation, et donc de mettre au point une cartographie prédictive de celle-ci sur de vastes zones à partir des déficits d'évaporation seuls. Les faibles AUC observées sont en majeure partie liées à la forte variabilité des contraintes hydriques au sein d'une même unité stationnelle.

Nous avons de plus mentionné précédemment la limite liée à la faible occurrence ou à la surface réduite de certaines stations.

4.2.3. Finesse des estimations des contraintes hydriques sur chaque unité stationnelle à partir des deux outils

L'estimation de l'amplitude des contraintes hydriques à partir du guide des stations étant qualitative, il est difficile d'en évaluer la finesse. On sait cependant que les estimations sont fondées uniquement sur des données édaphique (profondeur et morphologie des sols) et topographiques, le climat étant considéré comme homogène sur la zone d'étude (com. pers. Sylvain Gaudin et Laurence Carnnot-Milard). On estime donc qualitativement les contraintes hydriques sur chaque unité stationnelle, sans distinguer de variations au sein d'une même US. Dans le cas de cette étude, cet effet est cependant amplifié par le fait que nous avons harmonisé les stations sur une zone bien plus vaste que la zone couverte par le guide Milard. Les cartes de données climatiques mettent néanmoins en évidence un gradient climatique sur la zone couverte par le guide, dont ce dernier fait état en introduction.

A partir de la carte numérique des déficits d'évaporation, on remarque pour la majorité des unités stationnelles une grande amplitude de valeurs observées par rapport au gradient sur la zone d'étude. Les valeurs observées sur neuf unités stationnelles couvrent plus de 50% du gradient observé sur la zone d'étude, et 14 en couvrent plus de 40%. De nombreuses unités stationnelles présentent des amplitudes de valeurs de déficits d'évaporation qui coïncident ou se recoupent. Cette large amplitude rend la caractérisation d'une unité stationnelle à partir d'un déficit d'évaporation difficile : la variabilité au sein d'une même US étant grande, et une même valeur de déficit d'évaporation pouvant correspondre beaucoup d'unités stationnelles différentes. On peut néanmoins s'appuyer sur la valeur de déficit d'évaporation pour laquelle la fréquence d'observation d'une unité stationnelle est maximale pour tenter de caractériser celle-ci. Par exemple, les valeurs de déficit d'évaporation observées sur l'US2 semblent assez proches de celles observées sur l'US3. Cependant, on observe plus fréquemment une US2 pour des déficits d'évaporations moyens (36 mm), tandis que l'US3 est plutôt observée sur des zones où les déficits d'évaporation sont faibles, voire très faible (avec une fréquence d'observation maximale à 0 mm). L'US2 peut donc être caractérisée comme une station plutôt mésophile, mais qui peut être rencontrée dans des conditions relativement fraîches, tandis que l'US3 est une station où la sécheresse est limitée, bien qu'on puisse observer quelques variantes plus sèches.

La grande amplitude de valeurs de déficits d'évaporation observée sur les différentes unités stationnelles s'explique principalement par le fort gradient climatique observé sur la zone d'étude. Ainsi, une unité stationnelle donnée considérée au nord de la Lorraine ne présentera pas le même déficit d'évaporation que la même unité stationnelle identifiée en Bourgogne. Ces grandes fourchettes de valeurs traduisent alors la grande variabilité des contraintes hydriques pour chaque unité stationnelle sur l'ensemble de la zone d'étude. Une des limites du guide des stations par rapport à la carte de déficit d'évaporation réside alors dans le fait que le guide des stations décrit pour chaque unité stationnelle une contrainte hydrique moyenne. Il ne rend que très sommairement compte des différences qu'il peut y avoir sur l'ensemble de cette zone au sein d'une même unité stationnelle (voir **Annexe 10**). La carte numérique des déficits d'évaporation permet alors de mieux évaluer cette variabilité. On peut alors envisager d'adapter les choix sylvicoles au sein d'une même US si l'on se trouve sur une variante plutôt fraîche ou plus sèche. Un fois encore, cet effet a été amplifié par le fait que nous avons considéré une zone plus vaste que celle couverte par le guide.

Voici alors l'une des limites du guide par rapport à la carte : le guide, pour faciliter l'identification des stations, découpe un gradient de contraintes hydriques continu dans l'espace en classes de disponibilités en eau, une classe correspondant à une unité stationnelle. Les conseils pour chaque classe sont uniques, et donc plus ou moins adaptés suivant la variabilité au sein de chaque classe. La carte décrit les contraintes hydriques selon un gradient continu, qui permet d'adapter des conseils de gestions en fonction de la variabilité des contraintes hydriques observées avec une fine résolution sur une zone donnée. Cependant, malgré une finesse d'utilisation restreinte, le guide intègre beaucoup plus de données que la carte pour chaque unité stationnelle (richesse chimique des sols, stabilité des sols etc.). Il est en outre beaucoup plus facile pour un gestionnaire de mettre en place un plan d'actions sylvicoles à mener sur des grandes unités présentant une variabilité interne que d'adapter les actions à mener très localement pour tenir compte d'un gradient spatialement fin.

4.2.4. Potentialités de la carte des déficits d'évaporation pour aider à la cartographie les stations

La grande variabilité observée à partir de la carte des déficits hydriques, ainsi que la redondance des valeurs entre les différentes US limitent alors l'intérêt de la carte pour pré-cartographier les unités stationnelles à grande échelle. Une même valeur de déficit d'évaporation correspond à trop d'unités stationnelles différentes. Cependant, les contrastes observés sur des petites surfaces (quelques centaines d'hectares) permettent d'identifier les différences de contraintes hydriques entre les différentes zones de la forêt et de relativiser localement les choix d'essences. Couplée à une analyse topographique, on peut alors imaginer délimiter des zones homogènes sur une forêt. Une phase de relevés de terrain pourrait alors permettre d'attribuer un nom d'unité stationnelle à chaque ensemble homogène. On pourrait ainsi cartographier les stations grâce à une méthode de zonage préalable.

Une autre méthode consisterait à réaliser des relevés ponctuels de terrain, puis extrapoler les données ponctuelles relevées pour obtenir une carte surfacique à l'échelle de la forêt. Lors de cette deuxième étape, on pourrait s'appuyer sur les contrastes de déficit d'évaporation observés sur la carte, en plus d'autres supports d'information (topographie, carte pédologique, etc.). Les différents outils et les méthodes permettant d'aider à l'interpolation des données ponctuelles ou au pré-zonage des stations sont exposés en **Annexe 23** (Bazin et Gaudin, 2003).

4.2.5. Apports de la carte des RUM au pas de 50 m

Nous avons vu précédemment que la carte des RUM au pas de 50 m permet d'améliorer sensiblement la prédiction des déficits d'évaporation. Nous avons alors voulu savoir si elle permettait de mieux caractériser les contraintes hydriques sur les unités stationnelles. Calculer la probabilité de présence des US à partir de la carte des déficits d'évaporation construite à partir de la RUM à haute résolution permet un gain d'AUC moyen faible (0,005). Cependant, ce modèle permet d'augmenter significativement l'AUC des US de plateau (US 1 à 5, avec un gain moyen d'AUC de 0,04 par rapport au modèle intégrant les RUM à 500m), et de vallée (US 14 à 16, avec un gain moyen d'AUC de 0,04 également), mais n'apporte rien pour les US de versant (US 6, 8, 9 et 10) et de fond de vallon (US 11, 12 et 13), et en détériore même légèrement la qualité (on observe une baisse d'AUC de 0,02 sur l'ensemble des stations de versant).

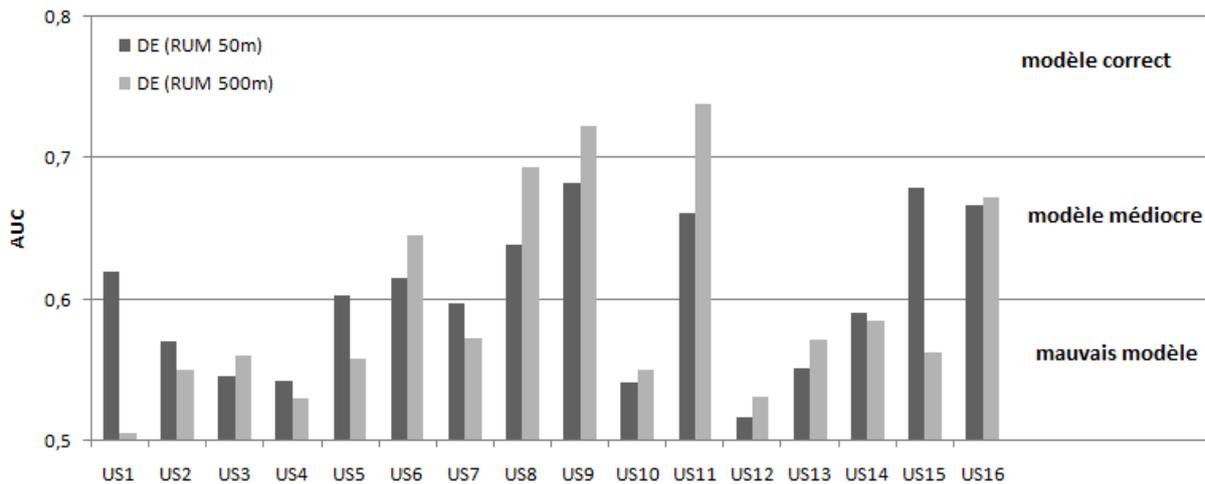


Figure 52 : Comparaison de la capacité à prédire la présence des différentes unités stationnelles des cartes numériques de déficits hydriques construites d'après les RUM au pas de 500 m et de 50 m (AUC calculées sur l'emprise de la carte des RUM au pas de 50 m sur la zone des plateaux calcaires).

La carte à haute résolution semble ainsi permettre de mieux identifier les variations de déficits d'évaporation sur les zones susceptibles de présenter des formations géologiques superficielles (plaquages limoneux, zones alluviales). Elle n'apporte cependant pas grand-chose par rapport à la carte à basse résolution sur les zones de versants où ces formations sont absentes. Elle présente donc surtout deux intérêts :

- Elle permet d'affiner les estimations de déficits d'évaporation sur la zone d'étude, et donc de mieux quantifier la variabilité des contraintes hydriques sur la zone d'étude, ainsi qu'au sein des unités stationnelles (surtout en situation de plateau ou de fond de vallon)
- Elle permet de mieux identifier les variations spatiales locales des contraintes hydriques. En ce sens, en tant qu'outil d'aide au traçage des limites des stations, elle permettrait d'apporter une finesse spatiale supplémentaire et d'augmenter la précision des cartes de stations.

4.3. COMPARAISON DES PREDICTIONS DE DISTRIBUTION D'ESSENCES PAR LA CARTE DES DEFICITS HYDRIQUES AVEC LES ESSENCES PRECONISEES PAR LE GUIDE DES STATIONS SUR CHAQUE UNITE STATIONNELLE

Nous avons souhaité comparer les indications fournies par le guide des stations et la carte des déficits d'évaporation quant à la présence potentielle de quatre essences à un endroit donné, afin de discuter de la complémentarité de ces deux outils, des apports et des limites de l'un par rapport à l'autre.

Afin d'illustrer nos propos, nous avons retenu quatre essences en fonctions de leur exigences différentes vis-à-vis des disponibilités en eau : le hêtre, le chêne sessile, le frêne et le pin sylvestre. Le hêtre préfère ainsi les situations bien alimentées en eau, tandis que le chêne sessile préfère des stations plus mésophiles. Le pin sylvestre, lui, tolère bien une sécheresse prononcée. Le frêne a été considéré en raison de sa grande amplitude vis-à-vis de la sécheresse édaphique (Rameau, 1985).

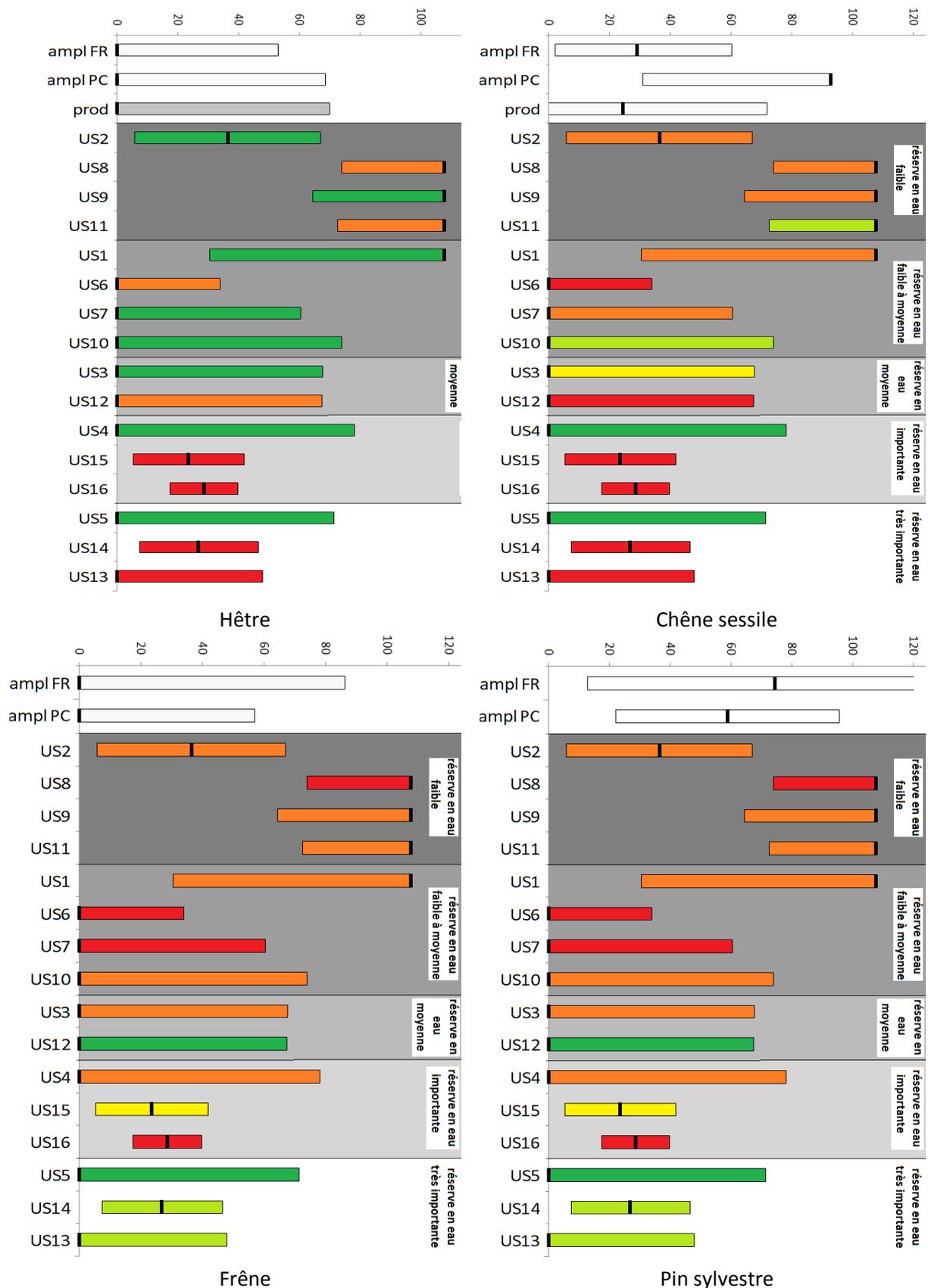


Figure 53 : Comparaison des amplitudes écologiques vis-à-vis du déficit d'évaporation de quatre essences forestières calculées à l'échelle de la France (ampl FR) et des plateaux calcaires (ampl PC) avec celles des différentes unités stationnelles (US harmonisées sur toute la zone des plateaux calcaires). Les préconisations de choix d'essence du Guide des Plateaux Calcaires sont indiquées par un code couleur pour chaque unité stationnelle (Milard, 2004). Légende des couleurs correspondant aux préconisations du guide : vert foncé : l'essence est conseillée en plein sur la station ; vert clair : l'essence est conseillée ponctuellement, à des fins productives ; jaune : l'essence peut être maintenue à but cultural et biologique, et son introduction peut être envisageable ; orange : l'essence peut être maintenue à but cultural et biologique, mais son introduction est déconseillée ; rouge : l'essence est déconseillée. Pour le chêne pédonculé et le hêtre ont été rajoutés les valeurs de déficits d'évaporation pour lesquelles on observe une bonne productivité (prod) (calculés sur toute la France à partir des indices de productivité d'I. Seynave, 2005 et 2008).

Rappelons cependant, que nous avons travaillé avec des relevés en présence absence. Nous aurions pu obtenir des résultats différents si nous avions travaillé avec des données de productivité. C'est notamment le cas avec le frêne, qui s'installe sur des valeurs de déficit d'évaporation très diverses (à condition que l'humus soit favorable), mais n'est productif que sur des zones bien alimentées en eau mais aussi bien drainées.

La distribution des essences forestières est dépendante de la gestion sylvicole et du comportement local des essences vis-à-vis des conditions de milieu. Nous avons donc voulu voir si des effets locaux pouvaient intervenir en comparant l'amplitude écologique des essences vis-à-vis des déficits d'évaporation calculées sur les plateaux calcaires de Champagne, Bourgogne et Lorraine et sur toute la France.

Enfin, nous avons essayé d'intégrer des données concernant la productivité des essences dans ces travaux, lorsque celles-ci étaient disponibles. En effet, nous n'avons travaillé jusqu'ici qu'avec des données concernant la distribution des essences. Or une essence peut être présente sur une station, mais être peu productive. Nous avons donc aussi analysé l'évolution d'un indice de productivité en fonction des contraintes hydriques (hauteur dominante à un âge de référence, Seynave, 2005 et 2008), en matérialisant sur les graphes de la **Figure 53** les valeurs de déficit d'évaporation pour lesquelles on observe une bonne productivité (données collectées sur l'ensemble de la France).

L'amplitude de la distribution de quatre essences (le hêtre, le chêne sessile, le frêne, et le pin sylvestre) a été calculée vis-à-vis des déficits d'évaporation estivaux et a été comparée aux valeurs de déficits d'évaporation observées sur les différentes unités stationnelles (**Figure 53**).

Cette comparaison a alors mis en évidence des similitudes et différences entre les amplitudes écologiques des essences et les préconisations de gestion du guide. Nous avons alors confronté les intérêts et limites de chaque outil selon les différents cas observés.

4.3.1. Comparaison des amplitudes de distribution des essences sur les plateaux calcaires et la France

Parmi les essences considérées, certaines ont des amplitudes écologiques différentes vis-à-vis des déficits d'évaporation à l'échelle de la France et à l'échelle des plateaux calcaires.

C'est par exemple le cas du chêne sessile, qui a une plus grande probabilité de présence sur des zones où le déficit d'évaporation est modéré à l'échelle de la France (environ 30 mm), mais dont l'optimum à l'échelle des plateaux calcaires correspond au maximum du gradient de déficit d'évaporation observé sur la zone. Le gradient de valeurs de déficits d'évaporation est certes différent aux deux échelles, celui des plateaux calcaires étant plus réduit. Mais ces résultats indiquent que le chêne sessile est présent sur des zones plus sèches sur la zone des plateaux calcaires que sur la France. Cette fréquence de présence plus basse du chêne sessile sur les zones plus humides et plus haute sur les zones plus sèches des plateaux calcaires peut être due à deux choses :

- Il se peut que, par choix du gestionnaire, d'autres essences de plus grande valeur ou produisant des bois de meilleure qualité (par exemple le frêne ou l'érable sycomore) soient privilégiées au détriment du chêne sessile sur les zones plus fraîches des plateaux calcaires.
- La dynamique de régénération et de croissance du hêtre, très importante en Lorraine et dans le Nord-est sur les zones bien approvisionnées en eau ou l'humidité atmosphérique est élevée a cantonné d'autres essences, parmi lesquelles le chêne sessile, à des zones moins favorables.

On peut observer des interactions similaires avec le chêne pédonculé, plus vigoureux sur les stations fraîches. L'aire de répartition du chêne pédonculé, décrite comme complémentaire de celle du chêne sessile, pourrait conforter cette hypothèse (Milard, 2004, Rameau, 1985). Il s'agirait plutôt ici d'un effet de concurrence entre espèces plus qu'un effet de la sylviculture.

Les différences de répartition du chêne sessile sur le gradient de sécheresse entre la France et les plateaux calcaires soulèvent alors une question : le chêne sessile est-il maintenu sur des zones trop sèches sur les plateaux calcaire, ou est-il en général maintenu sur des zones trop humides à l'échelle de la France ? Cela soulève le problème de la connaissance de l'autécologie de l'essence vis-à-vis des contraintes hydriques dues aux disponibilités en eau. La flore forestière française (Rameau, 1989) décrit le chêne sessile comme une espèce très plastique en ce qui concerne ses exigences en eau. Ce serait une essence plutôt mésoxérophile à mésophile, mais pouvant tolérer les sols à pseudogley. Ces affirmations laissent donc penser que l'amplitude calculée à l'échelle de la France entière serait plus appropriée.

Le guide ne conseille le chêne sessile que ponctuellement sur les unités stationnelles les plus sèches (US 1, 8, 9 et 11), et l'essence n'est conseillée en plein que sur des unités stationnelles présentant de meilleures disponibilités en eau (US 4, 5 et 10). Ces préconisations semblent donc être en accord avec les informations tirées de la **Figure 53**. Dans ce cas, on observe une bonne cohérence entre les informations que nous donne la carte des déficits d'évaporation concernant les exigences écologiques de l'essence et les conseils de gestion donnés dans le guide.

4.3.2. Comparaison entre la distribution et la productivité des essences vis-à-vis des contraintes hydriques

Nous avons ici voulu discuter des différences entre la présence ou l'absence d'une essence sur des valeurs de déficits d'évaporation et sa productivité. En effet, jusqu'ici, nous avons considéré uniquement la distribution des essences. Or les données concernant la productivité des essences pourrait peut-être conduire à des résultats différents.

Dans le cas du hêtre et du chêne, les résultats entre les données de productivité et de présence des essences semblent assez proches : les valeurs de déficits d'évaporation pour lesquelles on observe le plus fréquemment les essences (à l'échelle de la France) correspondent aux valeurs pour lesquelles on observe les meilleurs taux de production. Il existe cependant un léger décalage entre la valeur optimale de déficit d'évaporation pour la productivité du chêne sessile (25 mm) et la valeur pour lesquelles on observe le plus souvent sa présence (30 mm). L'effet de la disponibilité en eau sur la distribution du chêne sessile n'est donc pas exactement le même que sur sa productivité. On pourrait alors envisager de considérer la productivité des essences plutôt que leur distribution. Cependant, les données de productivité publiées pour la France entière dans la littérature scientifique sont rares : il n'en existe à ce jour que pour trois essences (hêtre, chêne sessile et épicéa), et elles ne concernent que des peuplements purs et équiennes. Il existe cependant d'autres études à d'autres échelles, liant la production aux types de stations, qui permettraient de mener de genre de comparaison plus localement. Selon l'essence, ces données peuvent varier si le peuplement est mélangé ou si les individus ne sont pas tous du même âge au sein du peuplement. Il est donc aujourd'hui délicat de conclure sur la productivité des essences en fonction des contraintes hydriques estivales.

4.3.3. Apports de la carte des déficits d'évaporation par rapport aux guides de stations

A partir des diagrammes présentés en **Figure 53**, quatre cas peuvent être envisagés pour chaque essence. L'essence peut avoir des exigences écologiques compatibles avec les unités stationnelles et ne pas y être conseillée (cas 1). Elle peut avoir une amplitude différente de celle de l'US mais y être conseillée (cas 2). L'unité stationnelle peut présenter une très grande amplitude de déficits d'évaporation, et celle des essences qui y sont conseillées ne couvrent pas la totalité de l'amplitude de l'US (cas 3). Enfin, on peut trouver des unités stationnelles dont l'amplitude de déficit d'évaporation est identique à celle de l'essence considérée (cas 4).

4.3.3.1. Cas 1 : L'essence a une amplitude identique à celle de l'US, mais n'y est pas conseillée

Prenons le cas du hêtre : l'amplitude écologique du hêtre est compatible avec celle des unités stationnelles 12 à 16. Or le guide des stations déconseille cette essence sur ces stations. Celles-ci sont décrites comme ayant un bon approvisionnement en eau l'été, mais où l'on peut observer un engorgement temporaire plus ou moins important. Cependant, la carte fait bien état d'un stress lié à la sécheresse, mais ne donne aucune indication sur l'engorgement des sols.

Le pin sylvestre (**Figure 53**) a une amplitude écologique vis-à-vis des déficits d'évaporation compatible avec celle de l'US 1, mais la carbonatation des sols à très faible profondeur sur cette station ne convient pas à cette essence calcifuge. Seul le catalogue des stations fait état de cette faible tolérance aux sols carbonatés. Ces deux exemples illustrent le fait que la détermination des unités stationnelles, et donc du choix des essences nécessitent d'autres facteurs que le facteur « sécheresse estivale » (engorgement, richesse chimique des sols etc.). Les différences observées entre la carte des déficits d'évaporation et les préconisations du guide sont donc tout à fait normales.

On peut cependant évoquer le cas d'une essence décrite dans le guide comme peu recommandable sur une unité stationnelle bien que son amplitude vis-à-vis de la sécheresse soit compatible avec celle de l'unité stationnelle. Prenons par exemple le cas du frêne, décrit comme peu adapté pour une US 3 (station de plateau sur argile de décarbonatation épaisse) en raison des disponibilités en eau parfois trop limitées. La **Figure 53** montre pourtant que l'optimum écologique du frêne (0 mm) correspond à la valeur de déficit d'évaporation la plus fréquente sur une US3. Cependant, les données exposées sur la Figure 53 concernant le frêne sont des données basées sur sa distribution, et non sur sa productivité (les données sur la productivité du frêne n'étant pas disponibles). Le frêne peut être observé sur cette US, mais ne pas avoir de valeur productive. On sait cependant que son optimum de croissance et de qualité est observé sur des stations toujours fraîches et bien drainées (Milard, 2004). Dans ce cas, on pourrait s'appuyer sur les résultats fournis par la carte des déficits d'évaporation pour adapter les conseils de choix d'essences (on pourrait par exemple conseiller le frêne sur les variantes les plus fraîches de l'US3, ponctuellement mais dans un but productif). Cependant, les résultats présentés dans ce paragraphe ne tiennent pas compte des changements climatiques, qui doivent être pris en compte dans un cas comme celui-ci, où l'on soupçonne l'essence d'être en limite de ses exigences écologiques. L'un des apports de la carte au guide serait cependant de pouvoir nuancer les préconisations de gestion en fonction de la variabilité au sein des unités stationnelles.

4.3.3.2. Cas 2 : L'essence a une amplitude différente de celle de l'US, mais y est conseillée

Dans certains cas, la carte des bilans hydriques permettrait de mieux définir les choix des essences préconisées dans le guide des stations. Prenons comme exemple l'unité stationnelle 1, qui regroupe des stations de plateau sur substrat carbonaté très sec à mésophile. La seule essence préconisée en plein par le guide sur ces stations est le hêtre. Or, d'après la **Figure 53**, les valeurs de déficit d'évaporation observées sur l'US1 ne recoupe que très partiellement celles comprises dans l'amplitude écologique du hêtre. Leurs optima de probabilité de présence sont de plus en plus à l'opposé l'un de l'autre sur le gradient de déficits d'évaporation observé sur la zone d'étude. Bien qu'en situation non optimale, le chêne sessile pourrait s'avérer plus résistant à la sécheresse sur ces sols que le hêtre. Cependant, l'US 1 est une station à très faible potentiel productif (sol carbonaté avant 15 cm et très faible réserve utile). Il se peut que le hêtre y soit conseillé par défaut, et non parce qu'il est en station.

Nous avons vu précédemment que le hêtre ne semble donc envisageable que sur les US1 les moins sèches. Cependant, même dans les variantes les plus fraîches de l'US1, il n'est pas dans des conditions de croissance optimales sur cette station. On pourrait alors apporter, à partir de la carte des déficits d'évaporation, quelques nuances concernant les préconisations de choix d'essences en fonction du gradient de sécheresse observé au sein d'une même unité stationnelle. Par exemple : « le hêtre pourra être maintenu à but productif sur les variantes les plus fraîches de l'US1 (présentant les sols les plus profonds) tandis que sa bonne productivité ne peut être garantie sur les variantes les plus sèches ». Le gestionnaire pourra alors se reporter à la carte des déficits d'évaporation pour identifier ces différentes zones. Dans le cas d'unités stationnelles évoluant défavorablement pour une essence à cause des changements de climat, ce type de conseils devra absolument tenir compte de ces risques (voir plus loin).

4.3.3.3. Cas 3 : l'amplitude des US est identique à celle d'une essence, qui y est conseillée

Prenons le cas du chêne sessile sur une US 2. L'amplitude et l'optimum écologique du chêne sessile calculés à partir de données sur toute la France correspondent presque exactement à ceux de l'unité stationnelle. C'est un exemple pour lequel la carte des déficits d'évaporation n'apporte aucune information supplémentaire à celles déjà consignées dans le guide des stations. L'essence est en station, les préconisations de gestions ne peuvent être discutées à partir de la carte numérique. L'intérêt principal d'un modèle spatialisé de déficits d'évaporation réside alors dans la possibilité de le faire évoluer dans le temps, grâce aux hypothèses climatiques émises pour le futur. On peut alors comparer l'amplitude des contraintes hydriques sur les unités stationnelles dans le futur aux exigences écologiques des essences. Cela permet de discuter des risques que présente le changement climatique pour ces essences sur ces stations. L'essence préconisée actuellement dans le guide des stations sera-t-elle toujours adaptée dans le futur ?

4.3.4. Apports potentiels de cette approche vis-à-vis du changement climatique

Au vu des différentes hypothèses sur le changement climatique, et grâce à la puissance de calcul de l'outil SIG, il est possible de quantifier l'évolution des déficits d'évaporation dans le futur. On peut ainsi prévoir une augmentation globale des températures, et une intensification des sécheresses estivales (voir paragraphe 1.2), puis générer à partir de ces données une carte numérique des déficits d'évaporation estivaux futurs. Dans le cadre de ce stage, et au vu des délais imposés, cette prédiction

des contraintes hydriques futures n'a pas été réalisée. Les exemples développés dans les paragraphes suivants sont donc purement hypothétiques.

On peut alors, à partir des cartes prédisant les déficits hydriques futurs et des cartes des stations actuelles, recalculer pour chaque unité stationnelle les valeurs de déficits d'évaporation que l'on pourrait observer. On peut alors identifier, par la même méthode que précédemment, la fourchette de valeurs pour lesquelles on observerait 80% des relevés d'une unité stationnelle donnée (amplitude des US vis-à-vis des déficits d'évaporation futurs). On peut supposer que les valeurs caractérisant cette amplitude (déficit d'évaporation minimum, maximum et déficit d'évaporation pour laquelle la fréquence d'observation serait maximum) augmenteront. On peut alors tenter d'identifier les stations à risque vis-à-vis de la disponibilité de l'eau dans le futur pour chaque essence à partir de deux hypothèses :

- Les exigences (amplitude) écologiques des essences vis-à-vis des déficits d'évaporation restent constantes dans le temps ;
- Les limites spatiales des unités stationnelles identifiées dans les cartes de stations actuelles ne varient pas. Si l'on part du fait que seule la composante climatique des stations évolue (Gaudin, 2008), cette dernière hypothèse semble alors très probable.

Trois cas se présenteraient alors pour les essences. La station peut évoluer défavorablement, et l'essence se trouver sur des gammes de déficits d'évaporation situées hors de leurs exigences écologiques (stations à risque). L'unité stationnelle peut évoluer favorablement pour une essence donnée, qui ne serait aujourd'hui pas adaptée aux conditions hydriques sur cette station, mais pour laquelle les déficits d'évaporation futurs sur la station seraient compris dans son amplitude écologique. L'essence peut avoir une amplitude écologique vis-à-vis de la sécheresse suffisamment vaste pour que l'accentuation de la sécheresse sur l'US ne pose pas de problème particulier (station à risque faible ou très faible). Enfin, il est possible qu'en raison de la variabilité des contraintes hydriques au sein d'une même unité stationnelle, on puisse distinguer des zones où le risque différerait au sein d'une même US.

4.3.4.1. Cas 1 : les stations à risques

Les essences dont l'amplitude écologique est en limite de celle des stations qui y sont aujourd'hui conseillées sont des essences présentant un risque potentiel fort sur ces stations. Prenons un exemple théorique :

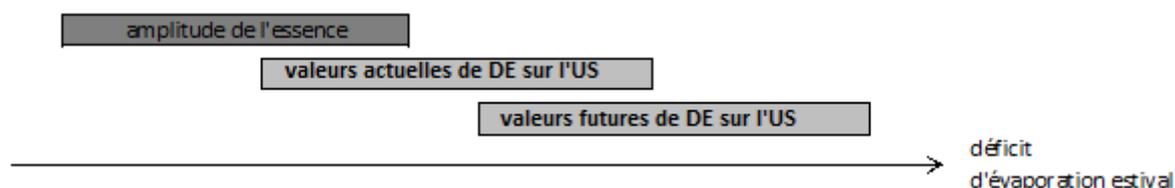


Figure 54 : Illustration théorique de la mise en évidence à partir de données issues des cartes numériques des déficits d'évaporation d'une station à risque vis-à-vis du changement climatique.

Dans ce cas, l'essence considérée est aujourd'hui en limite de son amplitude écologique sur cette unité stationnelle. Le changement climatique provoquant une augmentation de la sécheresse estivale, l'essence ne serait plus en station dans le futur. Continuer à investir dans cette essence sur cette station devient alors risqué. Prenons le cas du hêtre sur une US 1. Cette essence est aujourd'hui presque hors station : son optimum écologique est situé en dehors des valeurs de déficit hydrique observées sur l'unité stationnelle, et seulement 40% des valeurs favorables à cette essence sont observées sur l'US1.

Elle y est maintenue en tant qu'essence principale du fait du faible potentiel productif de la station, qui n'autorise que très peu d'essences. Cependant, le hêtre risque d'être une essence encore plus précaire sur cette station, les déficits d'évaporation s'accroissant dans ces milieux. L'US1 est donc aujourd'hui peu propice au développement du hêtre, et risquerait de devenir encore moins propice au développement de cette essence.

Dans ce cas, la carte numérique des stations permet de mettre en évidence ces stations à risque, et d'anticiper les effets du changement climatique en travaillant au profit d'essences plus adaptées aux conditions futures, ou en introduisant ces essences lorsque c'est possible.

4.3.4.2. Cas 2 : les stations évoluant favorablement

Prenons le cas d'une essence ayant une amplitude écologique située dans des gammes de déficits d'évaporation élevée, et d'une station dont les déficits d'évaporation favorables sont des valeurs faibles. L'exemple est illustré en **Figure 55**.

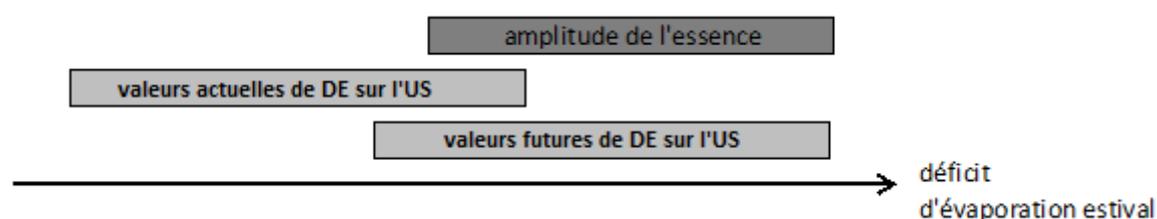


Figure 55 : Illustration théorique de la mise en évidence à partir de données issues des cartes numériques des déficits d'évaporation d'une station évoluant favorablement pour une essence à cause du changement climatique.

Dans ce cas, l'accentuation de la sécheresse peut avoir un effet bénéfique pour l'essence qui est actuellement en limite de son amplitude écologique quant à la sécheresse. Nous pourrions observer ce phénomène dans le cas du chêne pubescent, qui tolère les stations très sèches, sur les stations aujourd'hui mésophile, mais qui risquent de devenir plus sèches dans le futur, comme l'US2, par exemple.

Ici, la carte numérique des déficits d'évaporation permet donc d'identifier les stations sur lesquelles certaines essences pourraient s'avérer plus productives qu'actuellement.

4.3.4.3. Cas 3 : les stations à risque faible ou très faible

Ce sont les essences à large amplitude qui peuvent être concernées par ce cas. Un exemple théorique est illustré en **Figure 56**.

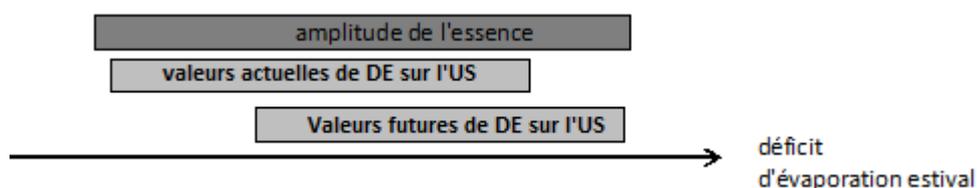


Figure 56 : Exemple théorique de l'identification à partir des cartes numériques de déficits d'évaporation estivaux d'une station pour laquelle le changement climatique induit peut de risque pour une essence donnée

Dans ce cas, la totalité des déficits d'évaporation futurs prédits sur l'unité stationnelle restent compris dans l'amplitude écologique de l'essence. Le changement climatique n'aurait alors sur ces stations et pour cette essence que peu d'impact.

Nous pourrions tout de même estimer la réaction de l'essence considérée en comparant son optimum de probabilité de présence à celle de la station. L'essence pourrait être potentiellement plus présente sur une station si le changement climatique réduit les écarts entre l'optimum de la station et celui de l'essence (cas 2a). A l'inverse, une baisse de la fréquence d'observation de l'essence sur la station pourrait être observée dans le cas où le changement climatique augmente les écarts entre l'optimum écologique de l'essence et la valeur de déficit d'évaporation pour laquelle l'unité stationnelle est la plus présente (cas 2b).

4.3.4.4. Cas 4 : seule une partie d'une unité stationnelle présente un risque important

On peut aussi imaginer des cas intermédiaires, où il y aurait un risque élevé pour une essence sur les variantes actuellement les plus sèches d'une unité stationnelle, mais où le risque sur les variantes plus fraîches serait moins grand.

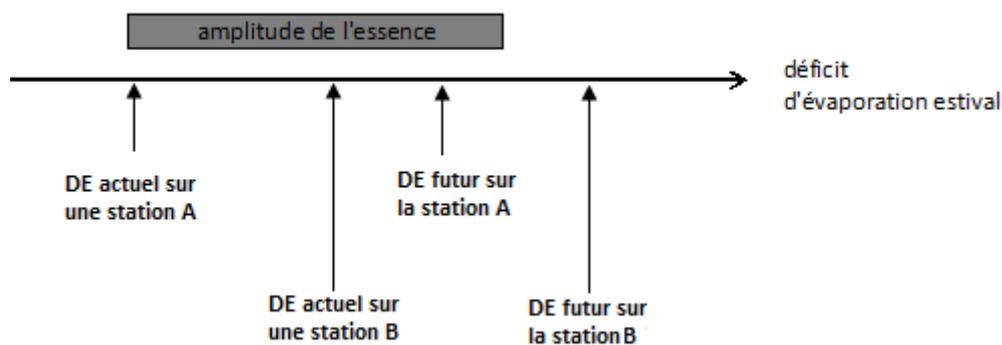


Figure 57 : Exemple théorique d'une unité stationnelle où seule une partie de l'US présente un risque vis-à-vis du changement climatique. Dans cet exemple, la station A et la station B font partie d'une même unité stationnelle. La station A est une variante assez fraîche de l'US tandis que la station B représente une variante plus sèche. Dans le futur, le déficit d'évaporation prédit sur la station A est compris dans l'amplitude écologique de l'essence, tandis que celui prédit sur la station B ne l'est plus. La station B présente ainsi un risque important pour l'essence considérée, tandis que ce risque est plus limité sur la station A.

Prenons le cas du hêtre sur une US2. L'amplitude du hêtre coïncide globalement avec les valeurs observées sur une US2, malgré un optimum écologique de l'essence à 0 mm de déficit d'évaporation. Les US2 où les sols ont une profondeur moyenne (environ 30 à 40 cm) représentent la variante la plus fraîche de l'US, où la réserve en eau est globalement meilleure que celle des variantes sur sols plus superficiels. Il se pourrait que sur ces variantes, le changement climatique provoque une accentuation des sécheresses estivales (et donc une augmentation des déficits d'évaporation), mais que les valeurs de déficit d'évaporation restent comprises dans l'amplitude écologique du hêtre. On peut alors peut-être s'attendre à une baisse de productivité ou de qualité du hêtre, mais avec des risques modérés. Une US2 sur sols superficiels (profond de moins de 20 cm), par exemple, présente une réserve en eau plus faible et une sécheresse estivale plus marquée. Les valeurs de déficits d'évaporation observées se trouveraient alors en limite maximum de l'amplitude écologique du hêtre. Il y a alors un plus fort risque que, dans le futur, les déficits d'évaporation observés sur cette station soit supérieurs au maximum toléré par le hêtre (les DE observés ne serait plus compris dans l'amplitude écologique du hêtre).

4.4. SYNTHÈSE : POTENTIALITÉS D'UTILISATION DE LA CARTE

Nous avons vu que chacun des deux outils étudiés ici présentent des intérêts et des limites différentes : la carte permet une estimation des bilans hydriques avec une précision et une finesse spatiale (même à petite échelle) que ne permet pas le guide. Cependant, le guide semble plus simple d'utilisation et intègre à l'heure actuelle une multitude de paramètres (engorgement, richesse chimique des sols) que le gestionnaire peut évaluer à partir d'un seul et même outil. Nous pouvons alors pallier les limites de chaque outil en combinant leur utilisation, plutôt qu'en préconisant l'utilisation de l'un plutôt que l'autre.

A partir de l'analyse des données issues du guide des stations et de la carte du déficit d'évaporation développée lors de ce stage, nous pouvons mettre en évidence trois conclusions quant au potentiel d'utilisation de la carte produite parallèlement à celle du guide.

Tout d'abord, la grande variabilité pour une même unité stationnelle sur la totalité de la zone d'étude limite l'intérêt de la carte numérique des déficits d'évaporation pour cartographier de manière automatique les stations. Cependant, la finesse spatiale de la carte (et *a fortiori* de la carte construite à partir des RUM au pas de 50 m) permet de visualiser des zones contrastées en termes de sécheresse estivale sur des aires réduites (jusqu'à 500 ha environ). On peut alors utiliser ces contrastes pour identifier des grandes zones homogènes vis-à-vis des contraintes hydriques et s'y appuyer pour cartographier les stations sur la zone, soit en effectuant un pré-zonage des stations à partir de la carte des DE (ce pré-zonage sera ensuite validé par des mesures de terrain), soit en s'appuyant sur la carte des déficits d'évaporation pour interpoler des relevés ponctuels de stations après la phase de terrain. Dans le premier cas, la carte numérique des contraintes hydriques permettrait de réduire le nombre de relevés de terrain à effectuer pour cartographier les stations.

Mais le principal intérêt de la carte réside dans sa capacité à mettre en évidence les stations présentant un risque vis-à-vis des essences en place dans le cadre des changements du climat. Néanmoins, l'avancement actuel des travaux concernant cette thématique n'est pas suffisant pour pouvoir apporter plus d'éléments de discussion. Cette problématique pourra constituer une suite à donner aux travaux présentés dans ce rapport.

Les potentialités d'intégration de la carte et de son analyse directement dans le guide sont détaillées dans la section suivante.

5. Propositions d'intégration des analyses issus de la carte des déficits d'évaporation dans le guide des stations

Afin d'illustrer l'aspect pratique de l'outil développé pendant ce stage, nous avons essayé d'intégrer la carte numérique des contraintes hydriques et les informations que nous en avons tiré dans le guide des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne.

5.1. DANS LES FICHES DESCRIPTIVES DES UNITES STATIONNELLES

Un exemple d'une fiche descriptive d'unité stationnelle intégrant ces indicateurs est présenté en **Annexe 24**.

5.1.1. Aide à la détermination des stations

Nous avons tout d'abord envisagé d'intégrer à la clé de détermination des unités stationnelles un critère utilisant les fourchettes de déficits d'évaporation observés sur chacune. Nous avons cependant vu dans les paragraphes précédents qu'il n'était pas envisageable de discriminer les différentes unités stationnelles à partir de la carte numérique produite. Cependant, plutôt que d'intégrer ces données directement dans la clé, nous avons envisagé d'ajouter un commentaire dans les fiches descriptives des US, à la rubrique attirant l'attention du gestionnaire sur les confusions possibles avec d'autres US proches. Cette approche présente l'inconvénient de nécessiter une carte des déficits d'évaporation de l'aire considérée en plus du guide des stations lors de la prospection de terrain.

5.1.2. Prise en compte de la variabilité spatiale au sein d'une unité stationnelle

Nous avons vu précédemment que la prise en compte du gradient climatique sur la zone d'étude par la carte des déficits d'évaporation permettait de caractériser la variabilité des contraintes de sécheresse au sein d'une unité stationnelle. Nous pourrions alors intégrer ces résultats en ajoutant sur la fiche descriptive des unités stationnelle une carte illustrant cette variabilité par un zonage géographique des contraintes. Les conseils de gestion donnés par le guide pourraient alors être nuancés géographiquement selon cette variabilité, en faisant référence à cette carte.

5.1.3. Prise en compte du risque climatique

5.1.3.1. Sur l'unité stationnelle dans son ensemble

Un pictogramme a été créé sous la forme d'une pastille de couleur, représentant le niveau de risque d'une essence sur une station donnée. Ce type d'indicateur a déjà été mis en place sur le guide pour l'identification des stations et le choix des essences en Argonne (Perrier *et al.*, 2007). Il aurait pour but d'indiquer clairement et simplement le niveau de risque pour chaque essence selon cinq modalités, identifiées et décrite en fonction des cas présentés au paragraphe 4.3.4 :

- Rouge : risque élevé (cas n°1) ;
- Orange : risque modéré (cas n°3b) ;
- Blanc : risque nul, mais pas d'amélioration des conditions pour l'essence considérée (cas n°3c) ;

- Vert clair : faible amélioration des potentialités de la station pour l'essence considérée (cas n°3a) ;
- Vert foncé : amélioration significative des potentialités pour l'essence considérée (cas n°2) ;

Dans le cadre de ce stage, seule la composante hydrique a été considérée. Ce pictogramme ne reflèterait donc, en l'état actuel, que cette composante. On pourrait cependant envisager l'utiliser pour indiquer le niveau de risque tous paramètres confondus (thermique, hydrique et nutritionnel, adaptabilité des essences aux changements etc.) en fonction de l'état d'avancement des connaissances dans chaque domaine. Cela présenterait plusieurs avantages :

- le nombre d'indicateurs serait limité à un seul pictogramme, ce qui simplifie son interprétation pour le gestionnaire (par rapport à un pictogramme par paramètre)
- en cas de réédition du document pour intégrer de nouvelles connaissances, le pictogramme est adaptable (il suffit d'en changer les indications).

5.1.3.2. En fonction de la variabilité des impacts du changement climatique au sein d'une même unité stationnelle

Une nouvelle rubrique pourrait être créée, qui résumerait les précautions à prendre vis-à-vis du changement climatique en fonction de la variabilité au sein de d'unité stationnelle. Par exemple, sur une US1, on y écrirait :

« L'intensification de la sécheresse estivale dans le futur peut menacer la pérennité du hêtre sur les variantes sur sols superficiels, tandis qu'il resterait envisageable sur les stations présentant des sols plus profonds ». On pourrait ici faire référence à une carte présentant la variabilité au sein de chaque US (voir paragraphe 5.1.2).

Cette rubrique présenterait un plus grand intérêt sur les unités stationnelles pour lesquelles on observe une grande amplitude de valeurs de déficits d'évaporation, et sur certaines desquelles une essence peut se trouver en limite de répartition (comme le hêtre sur les US 2 à 5 les plus sèches, par exemple). On pourrait illustrer son propos par une carte présentant un zonage des risques au sein d'une même unité stationnelle sur la zone couverte par le guide.

En outre, l'identification de la variabilité spatiale et temporelle des risques sur les unités stationnelles pourraient éventuellement servir à un redécoupage des US en unités plus homogènes.

5.2. DANS LES FICHES DE DESCRIPTION DES ESSENCES

Les dernières pages du guide sont consacrées à la description du comportement des principales essences sur les plateaux calcaires. Pour chaque essence sont résumés leurs exigences écologiques et leur comportement sur les différentes unités stationnelles. On pourrait alors intégrer à cette rubrique un paragraphe résumant les risques liés au changement climatique pour l'essence sur les différentes unités stationnelles (Perrier *et al.*, 2007). Le guide attire déjà l'attention du gestionnaire sur les risques potentiels pour le hêtre (uniquement) sur les stations les plus sèches (US1, 2 et 9). La carte des déficits d'évaporation pourrait ainsi permettre d'affiner cette affirmation et de la généraliser aux autres essences.

5.3. EN DEPLIANT ANNEXE

Une carte des déficits d'évaporation sur la zone couverte par le guide des stations pourra être mise en annexe du document. Afin d'y représenter une carte de grande taille et pouvoir en distinguer le maximum de nuances, l'annexe pourra se présenter sous la forme d'un dépliant. On pourra l'accompagner d'un diagramme comparant l'amplitude écologique des essences. Le gestionnaire pourrait alors par lui-même adapter le choix des essences aux contraintes hydriques. L'inconvénient de cette méthode est la résolution limitée de la carte, du fait de l'ampleur de la zone couverte par le guide comparée à l'aire moyenne d'une station. Le gestionnaire pourrait cependant générer une carte des déficits d'évaporation sur la zone qui le concerne uniquement (c'est là l'un des avantages de la carte numérique). Il serait alors contraint à emmener sur le terrain deux documents au lieu d'un seul, ce qui rend l'utilisation du guide moins pratique.

Si la carte des déficits d'évaporation peut être distribuée, sa mise à disposition, accompagnée d'une notice d'utilisation, pourrait permettre au gestionnaire son utilisation directe sur une zone très réduite. L'utilisateur pourra ainsi zoomer sur le secteur qui l'intéresse et mettre à profit avec efficacité les possibilités qu'offre la finesse spatiale de la carte. Nous avons cependant identifié des incertitudes et des imprécisions dans la carte numérique. Ces incertitudes devront être soulignées dans une notice technique précisant qu'il s'agit d'un modèle, et non de mesures. Les valeurs lues sur la carte donnent une idée de la contrainte liée à la sécheresse, et non une valeur sûre.

Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible de modéliser spatialement, avec une résolution fine (50 m) les contraintes hydriques pour les principales essences forestières *via* un indice synthétique : le déficit d'évaporation estival.

La validation de toutes les données ayant servi à son élaboration, ainsi que de la carte obtenue elle-même a montré que ce nouvel outil permet d'estimer une contrainte de sécheresse sur une zone donnée avec une relativement bonne précision (à 10 mm près en moyenne sur une zone de 500 ha, avec un R^2 de 0,45). Cette précision peut être encore augmentée en améliorant les modèles de réserve utile maximale. Les travaux en cours concernant ce sujet (T. Villiers, 2011) ont montré qu'il était actuellement possible d'améliorer le R^2 de 0,20 de la carte des déficits d'évaporation à l'échelle de 500 hectares en la construisant à partir d'un modèle de RUM au pas de 50 m.

L'intégration de ce nouvel outil aux catalogues et guides de stations présenterait alors trois intérêts majeurs :

- couplé à une indispensable campagne de relevés sur le terrain, la carte numérique des déficits d'évaporation permettrait d'aider le gestionnaire à différencier et cartographier les stations sur une forêt ;
- la finesse spatiale de la carte des déficits d'évaporation et l'intégration de données climatiques à haute résolution permet de mieux appréhender la variabilité des contraintes hydriques au sein d'une même station, ce qui représente aujourd'hui l'une des principales limites des catalogues et guides de stations ;
- à partir de la méthode de calcul de cette carte, de la puissance de calcul des outils informatiques et des hypothèses concernant les changements du climat dans le futur, nous pouvons identifier les risques concernant ces essences sur chaque station et au sein d'une même station.

Nous pouvons donc, grâce à ce nouvel outil, affiner les informations dispensées dans les guides et catalogues de stations, affiner les méthodes de cartographie des stations et appréhender les risques liés aux changements climatiques.

L'outil présenté ici n'en est qu'à sa phase de construction et de test. Il reste des améliorations à apporter quant à la modélisation des bilans en eau des sols forestiers. Cependant, les bons résultats obtenus avec ce premier prototype sont très encourageant vis-à-vis de ceux que l'on pourrait obtenir en améliorant certains paramètres permettant la construction de la carte.

Cette étude tend de plus à montrer que si les résultats qu'ils produisent sont des approximations plus ou moins bonnes de la réalité, les outils de modélisation et de cartographie prédictive présentent un réel intérêt pour le gestionnaire forestier. Couplés aux outils déjà développés et aux méthodes utilisées actuellement, ils permettent un gain de temps et de précision non négligeable, et permettent de concrétiser et vulgariser les hypothèses concernant les conditions climatiques futures, auxquelles le gestionnaire devra faire face. Il s'agit maintenant de se rapprocher des gestionnaires qui éprouvent parfois quelques difficultés à suivre les avancées techniques et technologiques, et de vulgariser l'utilisation de tels outils.

Références bibliographiques

- (2009). CORINE Land Cover France, guide d'utilisation, Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques.
- Albert, M. et Schmidt, M. (2010). "Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.)." Forest Ecology and Management **259**(4): 739-749.
- Alemaw, B. F. et Chaoka, T. R. (2003). "A continental scale water balance model: a GIS-approach for Southern Africa." Physics and Chemistry of the Earth **28**(20-27): 957-966.
- Al Majou, H. (2008). "The use of in situ volumetric water content at field capacity to improve the prediction of soil water retention properties" Canadian Journal of Soil Science **88** (533-541)
- Andrew, R. et Dymond, J. (2007). "A distributed model of water balance in the Mokueka catchment, New Zealand." Environmental Modelling & Software **22**: 1519 - 1528.
- Aussenac, G. et Guelh, J.-M. (2005). "Variations climatiques et physiologie des arbres." Forêt Entreprise **162**: 21-24.
- Badeau, V. et Bréda, N. (2008). "Modélisation du bilan hydrique : l'étape clé de la détermination des paramètres et des variables d'entrée." Rendez-vous techniques - ONF Hors-série n°4.
- Badeau, V., *et al.* (2005). "Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100." Forêt-Entreprise **162**(avril): 25-29.
- Badeau, V., *et al.* (2004). Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières Françaises, ECOFOR, INRA: 49.
- Battisti, A., *et al.* (2005). "Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures." Ecological Applications **15**(6): 2084-2096.
- Bazin, N., Gaudin, S., Tests d'une méthode de cartographie rapide des stations forestières, synthèse générale, CRPF Champagne-Ardenne, 47 p.
- Becker, M., Le Tacon, F., Timbal, J. (1980), "Les plateaux calcaires de Lorraine – Types de stations et potentialités forestières", INRA/CNRF
- Becker, M., *et al.* (1994). "Tendances à long terme observées dans la croissance de divers feuillus et résineux du nord-est de la France depuis le milieu du XIXe siècle." Revue Forestière Française **XLVI**(4): 335 - 341.
- Benichou, P. et 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.
- Bontemps, J.-D. (2008). Calcul d'une réserve utile mensualisée. Présentation de l'algorithme de Lebourgeois mensualisé., Laboratoire d'Etude de la Ressource Forêt Bois (LERFoB).
- Bontemps, J.-D., *et al.* (2009). "Long-term changes in forest productivity : a consistent assesment in even-aged stands." Forest Science **55**(6): 549-564.
- Breda, N., *et al.* (1995). "Soil-water dynamics in an oak stand .1. soil-moisture, water potentials and water-uptake by roots." Plant and Soil **172**(1): 17-27.

- Breda, N., *et al.* (2006). "Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences." Annals of Forest Science **63**(6): 625-644.
- Brisson, N., *et al.* (2003). "An overview of the crop model STICS." European Journal of Agronomy **18**(3-4): 309-332.
- Cantat, O., *et al.* (2010). Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. 23e colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Rennes.
- Charnet, F. (2005). "Diagnostic stationnel et besoins en eau des principales essences forestières." Forêt Entreprise **162**: 42-47.
- Charnet, F. (2006). "Le sol et l'eau : une clé de la productivité et de la santé des arbres." Forêt Entreprise **171**.
- Chouffot E., Rameau, J.C. (1985). "Catalogue des types de stations forestière des Plateaux Bourguignons", CRPF et ONF Bourgogne
- Desprez-Loustau, M. L., *et al.* (2007). "Simulating the effects of a climate-change scenario on the geographical range and activity of forest-pathogenic fungi." Canadian Journal of Plant Pathology- Revue Canadienne De Phytopathologie **29**(2): 101-120.
- Dirnböck, T. et Grabherr, G. (2000). "GIS assessment of vegetation and hydrological change in a high mountain catchment of the northern limestone Alps." Mountain Research and Development **20**(2): 172-179.
- Doorenbos, J. (1979). Yield response to water / J. Doorenbos and A.H. Kassam ; with C.L.M. Bentvelsen ... [et al.]. Rome :, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dore, M. H. I. (2005). "Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know?" Environment International **31**(8): 1167-1181.
- Ducousso, A. et Déqué, M. (2005). "Augmentation de l'effet de serre : constatations et prévisions." Forêt Entreprise **162**: 15 - 19.
- Durrant, T. *et al.* (2011). "Evaluation of BioSoil Demonstration Project: FOREST BIODIVERSITY" Institute for Environment and Sustainability, 10 pp
- Dyer, J. M. (2009). "Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach." Landscape Ecology **24**(3): 391-403.
- Eggers, J., *et al.* (2008). "Impact of changing wood demand, climate and land use on European forest resources and carbon stocks during the 21st century." Global Change Biology **14**(10): 2288-2303.
- Fielding, A.H. et Bell, J.F. (1997). "A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models" Environmental Conservation, **24** (1): 38-49
- Gaudin, S. (2008). "La prise en compte des changements climatiques dans les guides de stations : première approche." Forêt entreprise **180**: 34-39.
- Gégout, J.C., Pierrat, J.C. (1998). "L'autécologie des espèces végétales : une approche par régression non paramétrique." Ecologie, **29** (3) : 473 - 482
- Granier, A. (1985). "Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements." Tree Physiology **3**(4): 309 - 320.

Granier, A., *et al.* (1995). "Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers." Revue Forestière Française **XLVII**: 59-68.

Granier, A., *et al.* (1999). "A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands." Ecological Modelling **116**(2-3): 269-283.

Granier, A., *et al.* (2000). "A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index." Ann. For. Sci. **57**(8): 755-765.

Guisan, A. et Zimmermann, N. E. (2000). "Predictive habitat distribution models in ecology." Ecological Modelling **135**(2-3): 147-186.

Hanninen, H. (2006). "Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits." Tree Physiology **26**(7): 889-898.

IPCC (2007). AR4 - Climate change 2007 : synthesis report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jump, A. S., *et al.* (2006). "Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*." Global Change Biology **12**: 2163-2174.

Inventaire Forestier National (2008) "Description générale des données cartographiques produites de 1986 à 2006 (version 1)", <http://www.ifn.fr/spip/spip.php?article202>, consulté le 26/08/2011

Karolewski, P., *et al.* (2007). "Effects of temperature on larval survival rate and duration of development in *Lymantria monacha* (L.) on needles of *Pinus sylvestris* (L.) and in *L. dispar* (L.) on leaves of *Quercus robur* (L.)." Polish Journal of Ecology **55**(3): 595-600.

Kerkhoff, A. J., *et al.* (2004). "Contingent effects of water balance variation on tree cover density in semiarid woodlands." Global Ecology & Biogeography **13**(3): 237-246.

Landmann, G., *et al.* (2008). "le hêtre face aux changements climatiques : le hêtre en France en 2100 : la portion congrue ?" Forêt entreprise **180**: 28-33.

Lebourgeois, F. (2005). "Augmentation de la productivité des forêts françaises : bilan actuel et conséquences prévisibles." Forêt Entreprise **162**: 30 - 34.

Lebourgeois, F. (2005). "Le hêtre face aux changements climatiques." Forêt Entreprise **182**: 30-34.

Lebourgeois, F., *et al.* (2005). "Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR)." Trees Structure and Function **19**: 385-401.

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

Legay, M. et Mortier, F. (2006). "Le changement climatique : impact de la forêt, adaptation de la gestion forestière et prise en compte dans les documents de planification." Bulletin de la société forestière de Franche-Comté **2**(3): 137-156.

Lexer, M. J., *et al.* (2002). "The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data." Forest Ecology and Management **162**(1): 53-72.

- Li, C. S., *et al.* (1992). "A model of nitrous-oxyde evolution from soil driven by rainfall event .1. Model structure and sensitivity." Journal of Geophysical Research-Atmospheres **97**(D9): 9759-9776.
- Lindner, M., *et al.* (2010). "Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems." Forest Ecology and Management **259**(4): 698-709.
- Lookingbill, T. et Urban, D. (2004). "An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis." Landscape ecology **19**(4): 417-433.
- Lu, J.B., Sun, G., McNulty, S.G., Amatya, D.M. (2005). "A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States." Journal of the American water resources association **41**, 621-633.
- Maracchi, G., *et al.* (2005). "Impacts of Present and Future Climate Variability on Agriculture and Forestry in the Temperate Regions: Europe." Climatic Change **70**(1): 117-135.
- 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.
- Mitchell, T. D., *et al.* (2004). "A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100)." Tyndall center working paper n°55: 1-25.
- Moisselin, J. M., *et al.* (2002). "Les changements climatiques en France au XXème siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations." La Météorologie(38): 45-56.
- Montoya, D., *et al.* (2009). "Do species distribution models explain spatial structure within tree species ranges?" Global Ecology and Biogeography **18**(6): 662-673.
- Moriondo, M., *et al.* (2006). "Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area." Climate Research **31**(1): 85-95.
- Nix, H. A. et Fitzpatrick, E. A. (1969). "An index of crop water stress related to wheat and grain sorghum yields." Agricultural Meteorology **6**(5): 321-337.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. Office of Climatology,. Washington D.C., Weather Bureau.
- Penman, H. L. (1978). "Vegetation and the Atmosphere. Ed. J. L. Monteith. London: Academic Press (1975) Vol. 1; principes pp. 298, £10: Vol. 2; Case Studies pp. 459, £15." Experimental Agriculture **14**(02): 178p.
- Piedallu *et al.* (2011). "Soil water balance improve the determination of hydrophyllous and xerophyllous tree species distribution pattern.", en préparation
- Piedallu, C. *et al.* (2010). "Assurer une récolte raisonnée des rémanents en forêt" Projet 8 de la politique de qualité de PEFC Lorraine 2007-2012, rapport final, 46p.
- Piedallu, C., *et al.* (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., *et al.* (2009). "Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France." Revue Forestière Française **LXI**(6): 567-593.

- Piedallu, C. et Gegout, J. (2008). "Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models." Agricultural and Forest Meteorology **148**(11): 1696-1706.
- Piedallu, C. et Gegout, J. C. (2007). "Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling." Annals of Forest Science **64**(8): 899-909.
- Pinto, P. E. et Gegout, J. C. (2005). "Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains." Annals of Forest Science **62**(7): 761-770.
- Piovesan, G., *et al.* (2008). "Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy." Global Change Biology **14**: 1-17.
- Planton, S. (2004). "Changements climatiques futurs en France." Changements climatiques, quels impacts en France ? Retrieved 06/02/2011, from www.greenpeace.org/raw/content/france/press/reports/impactsclimatiquesenfrance.pdf.
- Quintana-Segui, P., *et al.* (2008). "Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France." Journal of Applied Meteorology and Climatology **47**(1): 92-107.
- Rabu, D. et Chanteraine, J. (2004). Carte géologique de la France au millionième, 6e édition révisée.
- Rameau, J. C., *et al.* (1989). Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 1 : plaines et collines. Paris, Institut pour le Développement.
- Rameau, J. C., *et al.* (1993). Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 2 : montagnes. Paris, Institut pour le Développement.
- Rameau, J.C., Didier, B. (1985). "Typologie des stations forestières de Haute-Marne tome 1 : Plateaux Calcaires, Vallée Oxfordienne." ONF et CRPF Champagne-Ardenne, DDAF Haute-Marne
- Riou-Nivert, P. (2005). "Changements climatiques et sylviculture." Forêt Entreprise **162**: 49-53.
- Roman-amat, B. (2007). Préparer les forêts françaises au changement climatique : Rapport à MM les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables: 124.
- Rousselet, J., *et al.* (2005). "La chenille processionnaire du pin progresse avec le climat." Forêt Entreprise **162**: 38-41.
- Schwarzl, K., *et al.* (2009). "A novel approach in model-based mapping of soil water conditions at forest sites." Forest Ecology and Management **258**(10): 2163-2174.
- Skrøppa, T. & Kohmann (1997). "Adaptation to local conditions after one generation in Norway spruce". Forest Genetics **4**: 165-171
- Seynave, I., *et al.* (2008). "Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth?" Journal of Biogeography **35**(10): 1851-1862.
- Seynave, I., *et al.* (2005). "Picea abies site index prediction by environmental factors and understorey vegetation: a two-scale approach based on survey databases." Canadian Journal of Forest Research **35**(7): 1669-1678.
- Stephenson, N. L. (1998). "Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales." Journal of Biogeography **25**: 855-870.

- Swets, J.A. (1988) "Measuring the Accuracy of Diagnostic systems" Science **240** (4857): 1285-1293
- Thornthwaite, C. W. et Mather, J. R. (1955). "The water balance." Laboratory of Climatology, Publication in Climatology. n°8.
- Turc, L. (1961). "Evaluation des besoins en eau d'irrigation et évaporation potentielle." Annales agronomiques **12**: 13-49.
- Ulrich E (1995), "Le réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation", Revue Forestière Française, **2**
- Vitasse, Y., *et al.* (2010). "Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species." Functional Ecology **24**: 1211-1218.
- Vitasse, Y., *et al.* (2009). "Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses?" Agricultural and Forest Meteorology **149**(5): 735-744.
- Wargo, P. A. et Harrington, T. C. (1991). "Host stress and susceptibility, *In* Armillaria root disease." Agriculture Handbook **691**.
- Wells, N., *et al.* (2004). A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. Boston, MA, ETATS-UNIS, American Meteorological Society.
- Zhang, L., *et al.* (2002). Water balance modelling : concepts and applications. Canberra, Australia: 31-47.
- 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**(1/2): 115-136.

Liste des contacts

Christian Piedallu

Ingénieur de recherche, co-responsable du stage et correspondant ENGREF
Centre AgroParisTech ENGREF
Laboratoire d'Etude de la Ressource Forêt-Bois
14 rue Girardet
54 000 Nancy
03 83
christian.piedallu@agroparistech.fr

Sylvain Gaudin

Ingénieur, co-responsable du stage
Centre Régionale de la Propriété Forestière
Maison Régionale de la Forêt et du Bois
Complexe Agricole du Mont Bernard
Route de Suippes
51 000 Châlons-en-Champagne
03 26 65 18 25
sylvain.gaudin@crpf.fr

Laurence Carnnot-Milard

Ingénieur environnement,
Rédactrice du guide des stations des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du nord et de l'est de la Bourgogne
Centre Régionale de la Propriété Forestière
Maison Régionale de la Forêt et du Bois
Complexe Agricole du Mont Bernard
Route de Suippes
51 000 Châlons-en-Champagne
03 26 65 18 25
Laurence.carnnot@crpf.fr

ANNEXES

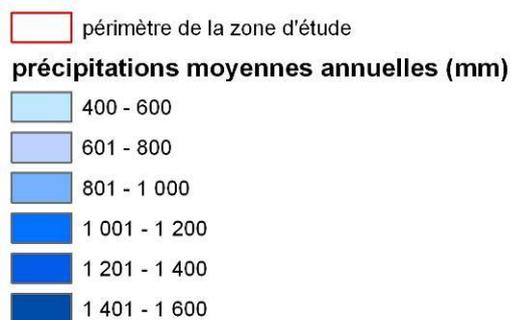
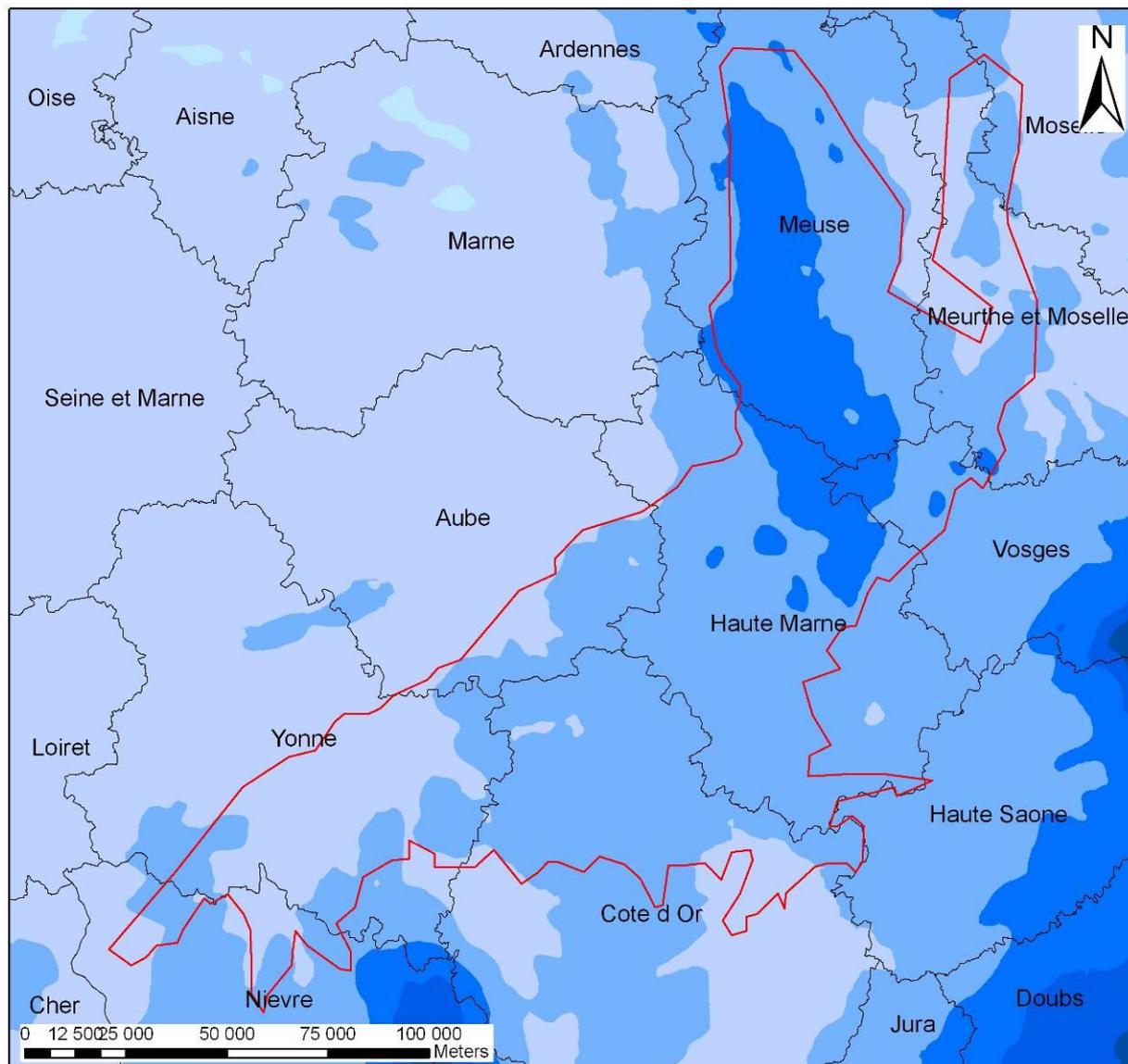
Annexe 1 : Caractérisation des contraintes hydriques du sol pour prendre en compte le changement climatique dans les catalogues de station : calendrier des tâches.....	111
Annexe 2 : répartition moyenne annuelle des précipitations sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (données Météo-France sur la période 1960-1990).....	112
Annexe 3 : répartition moyenne annuelle des températures sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (données Météo-France sur la période 1960-1990).....	113
Annexe 4 : revue des différents impacts potentiels des changements du climat sur les essences et les peuplements forestiers pour les différentes grandes régions bioclimatiques françaises	114
Annexe 5 : les principales méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle	115
Annexe 6 : Localisation des relevés effectués selon trois maillages imbriqués (250m, 100 m et 50 m) sur les sites de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec	117
Annexe 7 : Localisation des trois transects réalisées lors de la deuxième phase de terrain.....	118
Annexe 8 : 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.....	120
Annexe 9 : 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)	121
Annexe 10 : 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)	122
Annexe 11 : Diagrammes de corrélation entre les données de rayonnement solaire moyen prédit par les modèles Hélios 2007 et 2010, et mesuré sur la période 1961-1990 par Météo France (86 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de al France (86 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison	123
Annexe 12 : Cartes des écarts saisonniers entre les rayonnements solaires (MJ/m ²) prédits par le modèle Hélios 2010 et mesurés sur 86 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison (écarts interpolés sur toute la France)	124
Annexe 13 : Diagrammes de corrélation entre les données de températures moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (493 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison	125

Annexe 14 : Diagrammes de corrélation entre les données de températures moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (493 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle des plateaux calcaires pour chaque saison	126
Annexe 15 : Cartes des écarts saisonniers entre les températures (°C) prédites par le modèle Hélios 2010 et mesurées sur 235 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison	127
Annexe 16 : Diagrammes de corrélation entre les données de précipitations moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (471 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison	128
Annexe 17 : Diagrammes de corrélation entre les données de précipitations moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (471 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle des plateaux calcaires pour chaque saison	129
Annexe 18 : Cartes des écarts saisonniers entre les précipitations (mm) prédites par le modèle et mesurées sur 471 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison	130
Annexe 19 : Diagrammes de corrélation entre les valeurs de RUM extraites de la carte au pas de 50 m et 500 m et les valeurs calculées sur les placettes de relevés du site de Bois l'Evêque selon trois maillages imbriqués : 250 m sur 500 ha (a), 100 m sur 40 ha (b) et 50 m sur 10 ha (c)	131
Annexe 20 : cartes comparatives des différents indices de l'eau dans le sol, calculés au pas de 50m par la méthode de Palmer, à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne.....	133
Annexe 21 : Choix d'un indice hydrique édaphique synthétique : étude de la capacité des différents indices à prédire la répartition de 37 essences forestières.....	135
Annexe 22 : Comparaison cartographique des déficits d'évaporations calculés à partir des RUM basse résolution (en haut) et haute résolution (en bas).....	137
Annexe 23 : Quelques règles aidant au pré-zonage des stations et à l'interpolation de données ponctuelles pour réaliser une carte des stations (Bazin et Gaudin, 2003)	138
Annexe 24 : Un exemple d'intégration des données issues de la carte numérique des déficits d'évaporation dans une fiche descriptive d'unité stationnelle.....	139
Annexe détachée : carte des déficits d'évaporation modélisés au pas de 50 m à l'échelle des plateaux calcaire de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne	

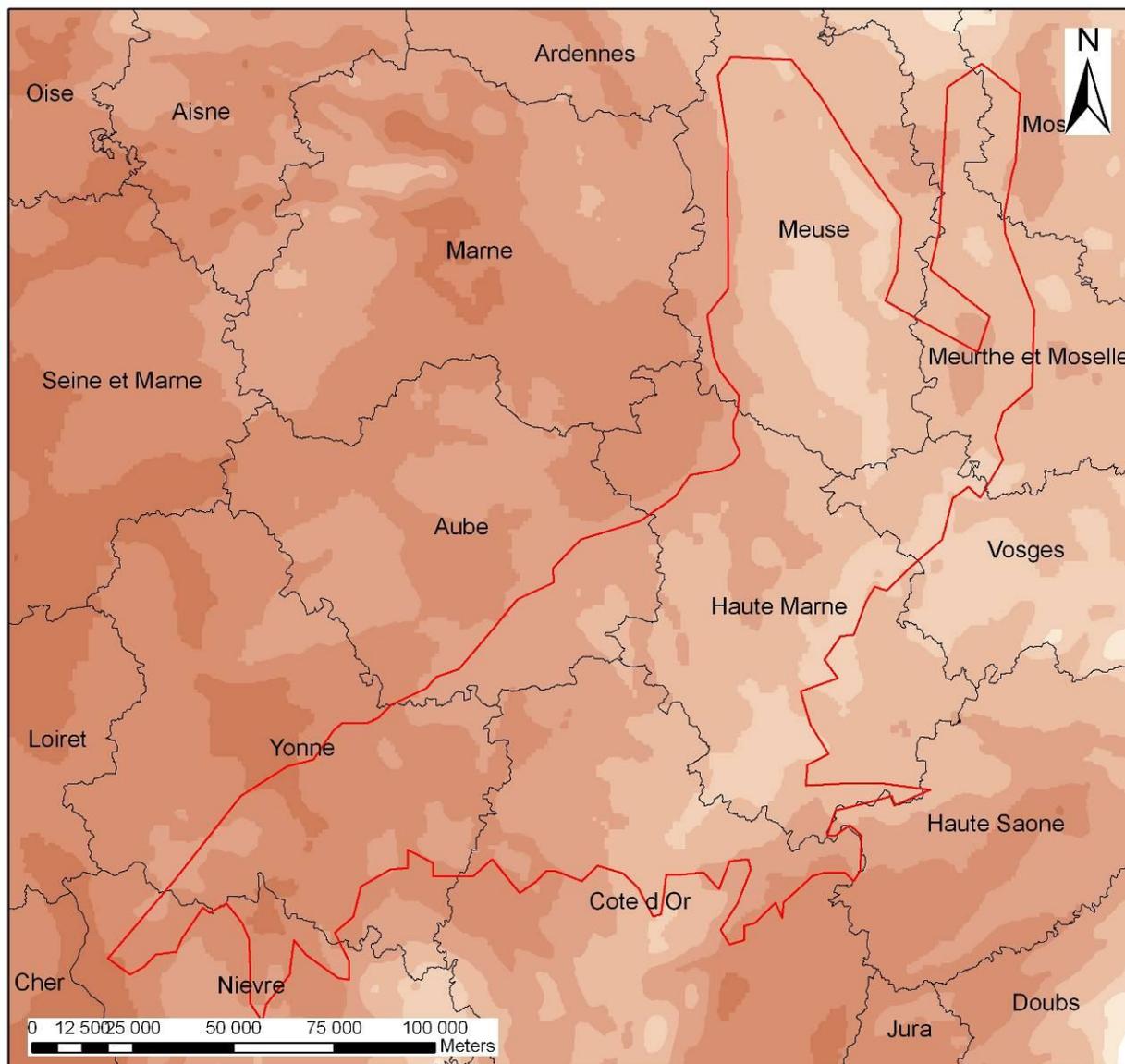
Annexe 1 : Caractérisation des contraintes hydriques du sol pour prendre en compte le changement climatique dans les catalogues de station : calendrier des tâches

date	lieu	tâches
Janvier 1 mois	Nancy	<ul style="list-style-type: none"> • Recherches bibliographiques : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Changement climatique et sa prise en compte dans les documents de gestion ➢ Bilans hydriques édaphiques ➢ discussion sur la précision des données, sur l'intérêt de la finesse spatiale • Rédaction de la synthèse bibliographique
Février 1 mois	Nancy	<ul style="list-style-type: none"> • Validation des modèles de précipitations, températures, réserve utile maximum et rayonnement solaire (LERFoB) à l'échelle nationale et locale • Comparaison des modèles LERFoB et Météo France au regard de la distribution et de la productivité des essences • Participation au calcul de bilans hydriques édaphiques selon 3 méthodes de calcul • Rédaction
Mars 1 mois		<ul style="list-style-type: none"> • Sélection d'un indice représentant l'eau disponible pour différentes périodes, selon la méthode de calcul de bilan hydrique utilisée. Sélection basée sur l'étude biblio et la capacité de l'indice à prédire la répartition des essences (base de donnée Ecoplant Sophy) • Rédaction
Avril – mai 1,5 mois	Nancy + Châlons-en-Champagne	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la pertinence de l'indice sélectionné à l'aide des données disponibles : relevés IFN, codages stationnels et exemples types des catalogues de station et données de peuplement ONF – CRPF
Mi Mai - mi juin 1 mois	Nancy	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de l'indice sélectionné à l'aide des relevés de terrain réalisés sur les plateaux calcaires de Lorraine à l'échelle de la forêt : forêt de Bois l'Evêque (54)
Mi juin – juillet 1,5 mois	Châlons-en-Champagne	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de l'indice sélectionné à partir des relevés de terrain réalisés sur les plateaux calcaires de Champagne-Ardenne et Bourgogne à différentes échelles. • Analyse des apports et limites du modèle
Août 1 mois	Châlons-en-Champagne	<ul style="list-style-type: none"> • Bilan de l'étude, fin de rédaction • Rédaction d'un article technique (guide d'utilisation des cartes) – étude des résultats en lien avec les documents de gestion

Annexe 2 : répartition moyenne annuelle des précipitations sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (données Météo-France sur la période 1960-1990)

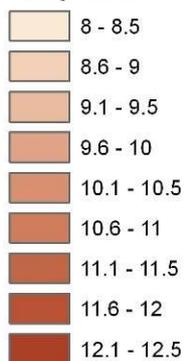


Annexe 3 : répartition moyenne annuelle des températures sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne (données Météo-France sur la période 1960-1990)



 périmètre de la zone d'étude

températures moyennes (°C)



Annexe 4 : revue des différents impacts potentiels des changements du climat sur les essences et les peuplements forestiers pour les différentes grandes régions bioclimatiques françaises

Zone	continentale	océanique	méditerranéenne	montagnes
Risque liés à la production	Baisse de production primaire de bois résineux due aux déficits hydriques plus importants (Lexer <i>et al.</i> , 2002)	Croissance meilleure au nord, moins bonne au sud où la ressource en eau est limitée, avec un gradient est-ouest (plus forte productivité à l'ouest) (Eggers <i>et al.</i> , 2008)	La baisse de la photosynthèse due au stress hydrique induit une baisse globale de productivité. Perte de la valeur des bois après incendies. Perte de valeur non marchande des forêts (Jump <i>et al.</i> , 2006 ; Lindner <i>et al.</i> , 2010)	Gain de productivité sur les zones les plus froides Diminution de la productivité dans zones les plus sèches (Lexer <i>et al.</i> , 2002)
Impacts phénologiques	Hiver doux : sensibilité au gel (débourrement précoce, moins de bois d'hiver) (Hanninen, 2006), durcissement au froid induit par une baisse progressive des températures en hiver moins fort (Aussenac et Guelh, 2005)	Hiver doux : sensibilité au gel (débourrement précoce, moins de bois d'hiver) (Hanninen, 2006), durcissement au froid induit par une baisse progressive des températures en hiver moins fort (Aussenac et Guelh, 2005)	Hiver doux : sensibilité au gel (débourrement précoce, moins de bois d'hiver) (Hanninen, 2006), durcissement au froid induit par une baisse progressive des températures en hiver moins fort (Aussenac et Guelh, 2005)	Difficile à dire : impact très varié due aux fortes variations de milieu
Risques liés au changement des aires de distribution des espèces	Réduction probable de l'aire de répartition de certaines essences, notamment du Hêtre d'ici 2100 (Badeau <i>et al.</i> , 2005 ; Landmann <i>et al.</i> , 2008)	Réduction globale du nombre d'espèces, conifères remplacés par feuillus (Lindner, Maroschek <i>et al.</i> 2010). Déclin des espèces tolérant le froid au profit d'espèces plus thermophiles (Maracchi <i>et al.</i> , 2005).	Recul de certaines espèces (<i>Fagus sylvatica</i>) et avancée d'autres (<i>Quercus ilex</i>), désertification des zones plus sèches. Remontée vers le nord d'autres espèces (Aussenac et Guelh, 2005)	Montée du front forestier en altitude, augmentation du nombre d'espèces feuillues (Lindner <i>et al.</i> , 2010)
Risques sanitaires	Nombre de génération d' <i>I. Typographique</i> accru, attaques de chalcographes plus virulentes. Perturbations favorisent le développement des pathogènes (Armillaire, phytophthora) (Wargo et Harrington, 1991 ; Lindner <i>et al.</i> , 2010)	Plus d'insectes xylophages et ravageurs (<i>Lymantria dispar</i> , <i>Thaumetopoea pityocampa</i>), (Battisti <i>et al.</i> , 2005 ; Rousselet <i>et al.</i> , 2005 ; Karolewski <i>et al.</i> , 2007) et d'attaques fongiques (<i>Biscognioiaxia mediterranea</i>) (Desprez-Loustau <i>et al.</i> , 2007)	Plus grande virulence des pathogènes thermophiles, virulence de la microflore endophyte (Lindner, Maroschek <i>et al.</i> 2010).	Installation et pullulation du typographe et chalcographe dans certaines zones, avancée de pathogènes actuellement limités par les précipitations neigeuses (Lindner, Maroschek <i>et al.</i> 2010).
Risques incendies, tempête, érosion.	Risque tempête, plus grande sensibilité à l'incendie	Risque tempête, avec augmentation du nombre de coupes exceptionnelles liée aux dégâts tempête, aux coupes sanitaires etc.(Riou-Nivert, 2005 ; Lindner <i>et al.</i> , 2010)	Risque tempête plus important. Risque d'incendie plus élevé, avec détérioration des sols ; érosion (Maracchi <i>et al.</i> , 2005 ; Moriondo <i>et al.</i> , 2006)	Plus grand risque d'incendie dans les Pyrénées (avec difficulté d'intervention) (Moriondo <i>et al.</i> , 2006)
Stock de carbone	Stockage plus important (meilleure croissance) à court et moyen terme, mais pas en cas de perturbations (tempêtes, épidémies etc.). (Lindner, Maroschek <i>et al.</i> 2010).	Stockage plus important (meilleure croissance) à court et moyen terme, mais pas en cas de perturbations (tempêtes, épidémies etc.). (Lindner, Maroschek <i>et al.</i> 2010).	Pas ou peu de stockage due à la baisse de productivité et à la fréquence ou l'intensité des perturbations (incendies) (Lindner, Maroschek <i>et al.</i> 2010).	

Annexe 5 : les principales méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle

- **Méthode de Thornthwaite**

Thornthwaite définit l'ETP comme étant une fonction de la température et de la durée d'insolation :

$$ETP(mm/mois) = 16 \times \left[\frac{10T}{I} \right]^{0,018T+0,492} \times F$$

T : température mensuelle en °C

F : terme correctif en fonction de la durée théorique d'insolation, variant avec la latitude et la saison

I : indice thermique annuel (somme des 12 indices mensuels), calculé comme suit :

$$I = \sum_{j=\text{janvier}}^{\text{décembre}} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1,514}$$

Cette formule, obtenue à partir de nuages de points expérimentaux, a l'avantage de nécessiter des données peu nombreuses et relativement faciles à obtenir. Elle ne prend pas compte de l'intensité du rayonnement solaire, contrairement à la formule de Turc ou de Penman-Monteith.

- **Méthode de Turc**

$$ETP(mm/mois) = 0,40 \times (Rg + 50) \times \frac{T}{T + 15} \quad (0,37 \text{ pour février})$$

Rg : rayonnement global en **cal.cm⁻².jour⁻¹**

T : température mensuelle en °C

Cette formule permet de calculer des ETP mensuelles ou décadaires, et rend bien compte du bilan hydrique à l'échelle du bassin versant et pour des régions subhumides.

- **Méthode de Penman-Monteith :**

$$ETP(mm/jour) = \frac{\Delta Rn + \gamma \times L \times Ea}{(\Delta + \gamma) \frac{ra + rc}{ra} \times L}$$

Et :

$$Rn = Iga(1-a)(0,18 + 0,62 \frac{h}{H}) - \sigma T^4 (0,56 - 0,08\sqrt{e}) \left(0,10 + 0,90 \times \frac{h}{H} \right)$$

Iga : rayonnement global en absence d'atmosphère

a : albédo

h/H : fraction d'insolation (rapport entre durée réelle et durée théorique d'insolation)
 σ : constante de Stephan-Bolzman = $5,6698 \cdot 10^{-6} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
 T : température de l'air en K
 e : tension de vapeur d'eau
 Δ : pente de la courbe de tension de vapeur saturante à la température de l'air
 E_a : pouvoir évaporant de l'air, en fonction du déficit de saturation de l'air et de la vitesse du vent
 L : chaleur latente de vaporisation
 γ : constante psychométrique de Bowen ($0,665 \text{ mb.}^\circ\text{C}^{-1}$)
 R_a : résistance aérodynamique dans la couche limite au dessus du couvert
 R_c : résistance aérodynamique interne du couvert

L'ETP de Penman-Monteith prend en compte un grand nombre de données sur un pas de temps court (journalier). Elle fournit des valeurs d'ETP proches de la réalité, mais est peu accessible au forestier de terrain. Elle tient néanmoins compte de la source d'énergie à disposition et de la résistance aérodynamique de la canopée.

Certains modèles simplifient l'estimation de l'ETP des couverts denses par l'approximation de McNaughton et Black (Breda *et al.*, 2006), qui, permet de calculer la transpiration de la végétation à partir de la densité de l'air ρ , de la capacité thermique de l'air C_p , du déficit de vapeur vpd , de la chaleur latente de l'eau λ , de la conductance de la canopée g_c pour la vapeur d'eau, et d'une constante psychométrique γ :

$$E = \frac{\rho \times C_p \times vpd \times g_c}{\lambda \times \gamma}$$

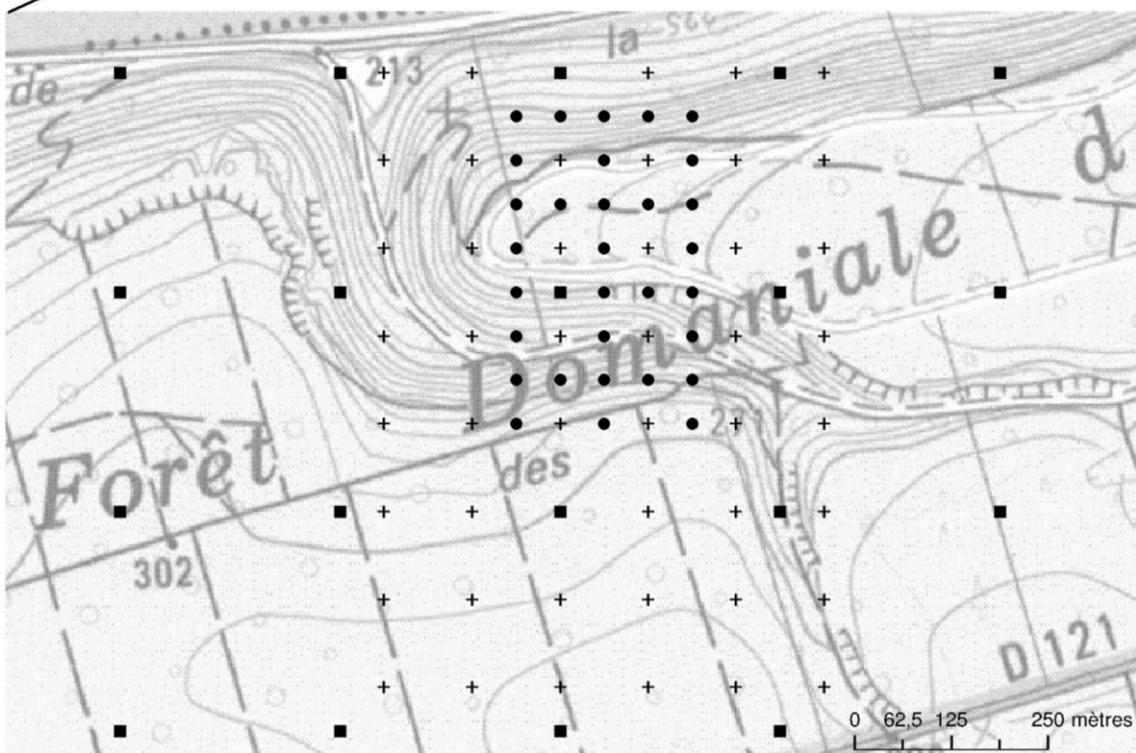
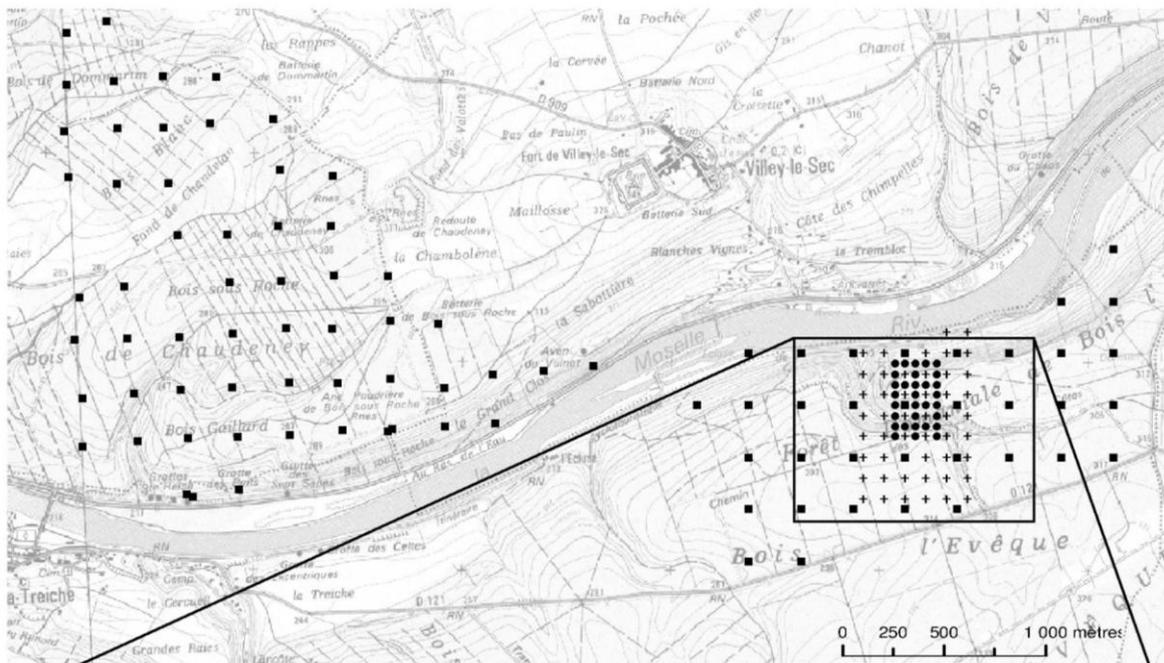
- **Comparaison des différentes méthodes**

Sur des moyennes trentenaires, les ETP de Turc et de Thornthwaite tendent à surestimer l'ETP en automne et hiver. La formule de Thornthwaite tend plutôt à sous-estimer de 5 à 20% l'ETP en été. En été, Turc sous estime aussi l'ETP de 10 à 20%. La formule de Penman reste ainsi la meilleure pour calculer l'ETP, mais les deux précédentes sont les plus accessibles au forestier.

Sur des moyennes trentenaires, les ETP de Turc et de Thornthwaite tendent à surestimer l'ETP en automne et hiver. La formule de Thornthwaite tend plutôt à sous-estimer de 5 à 20% l'ETP en été. En été, Turc sous estime aussi l'ETP de 10 à 20%.

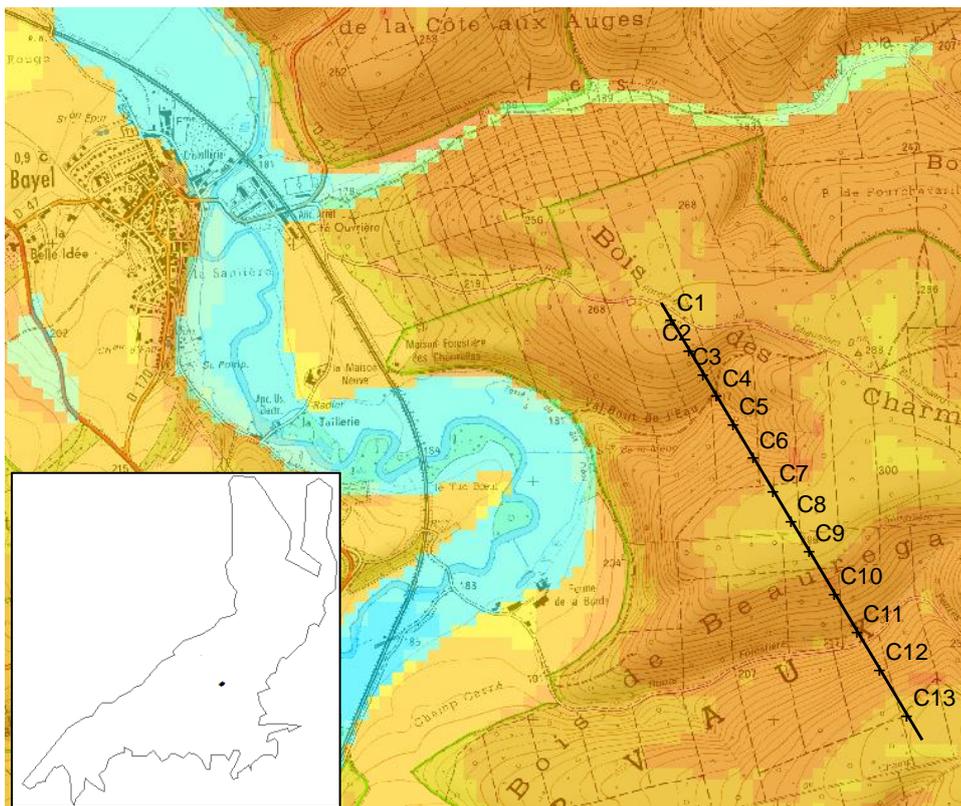
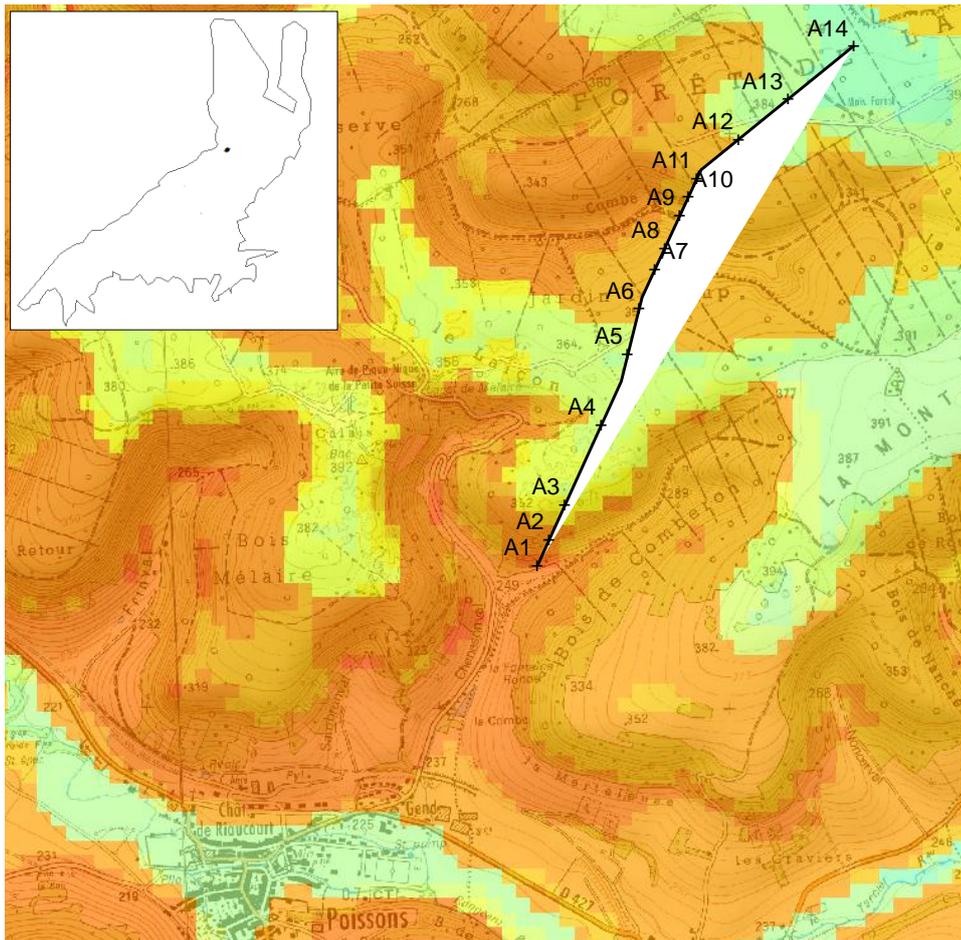
La formule de Penman reste ainsi la meilleure pour calculer l'ETP, mais les deux précédentes sont les plus accessibles au forestier.

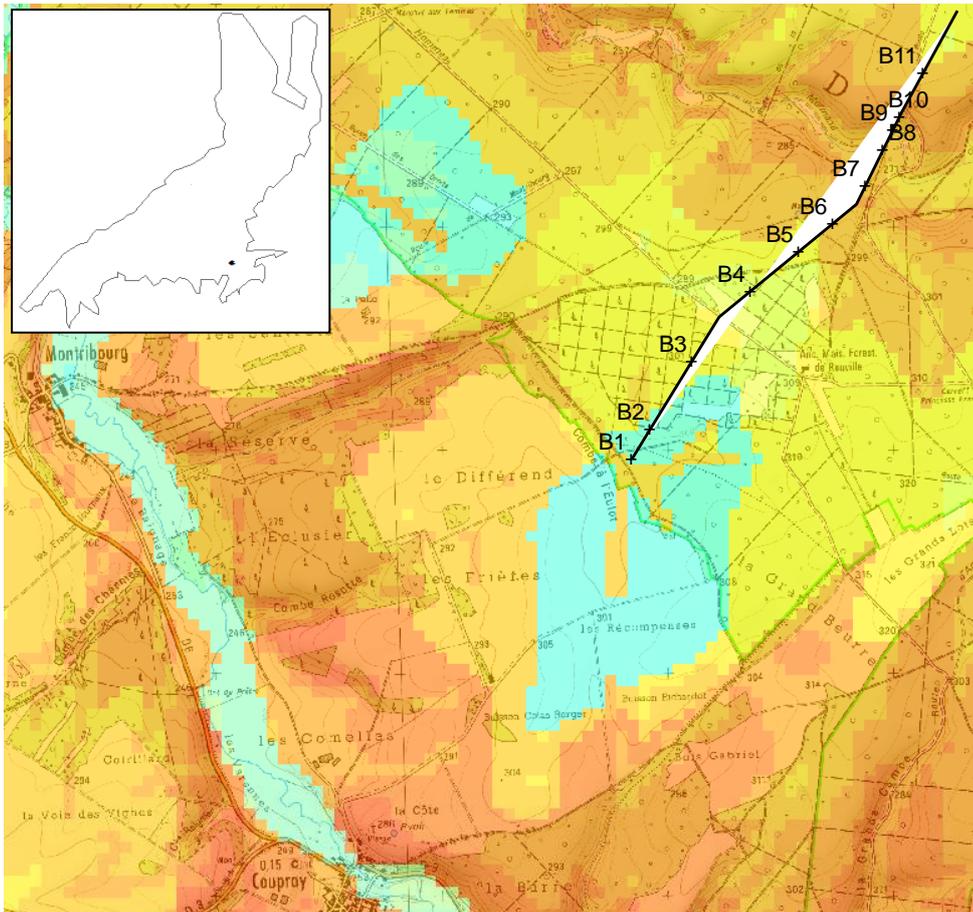
Annexe 6 : Localisation des relevés effectués selon trois maillages imbriqués (250m, 100 m et 50 m) sur les sites de Bois l'Evêque et Villey-le-Sec



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

Annexe 7 : Localisation des trois transects réalisés lors de la deuxième phase de terrain





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 8 : 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 9 : 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)

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

Annexe 10 : 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)

		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
	ensoleillé	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

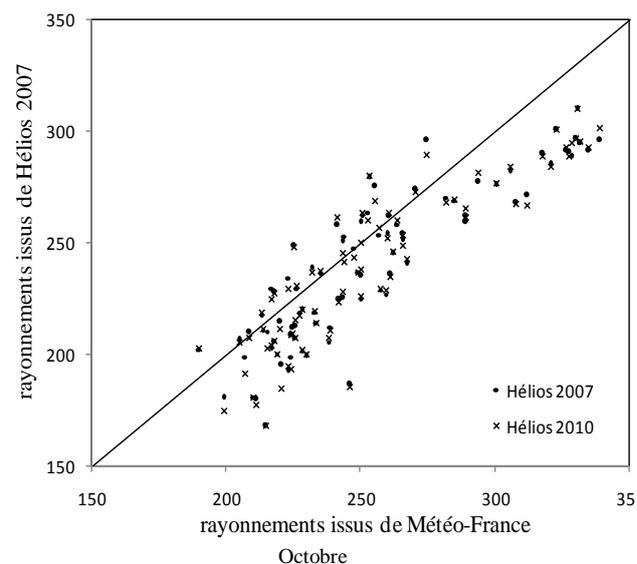
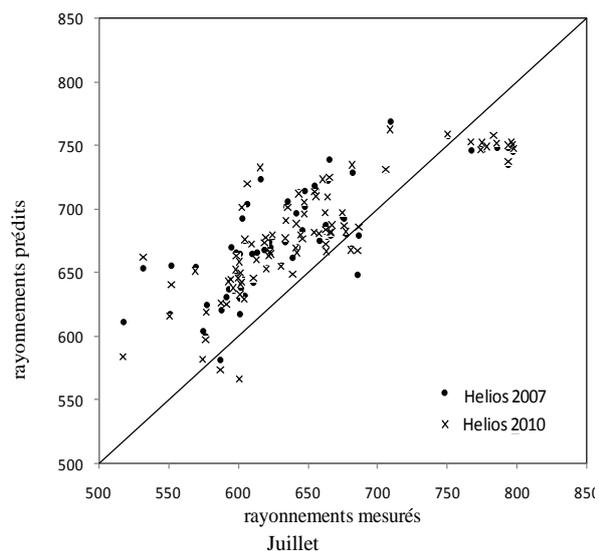
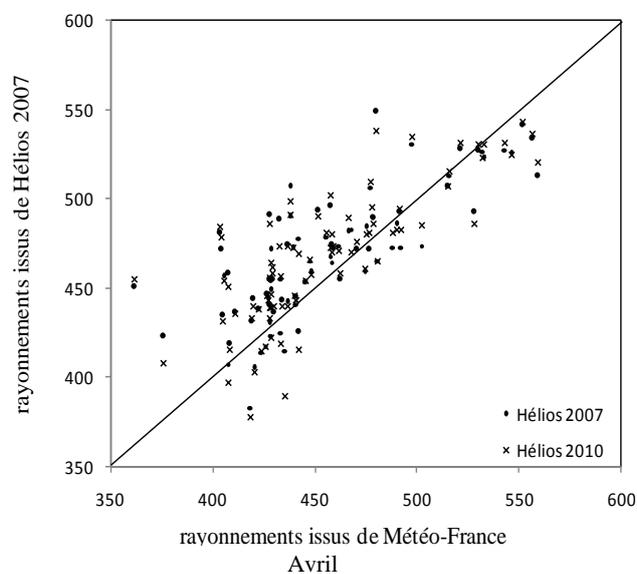
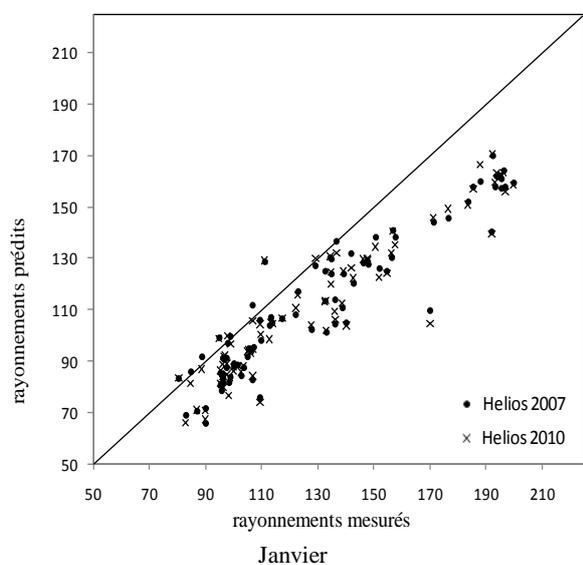
+ + = moyennes

+ + + = importante

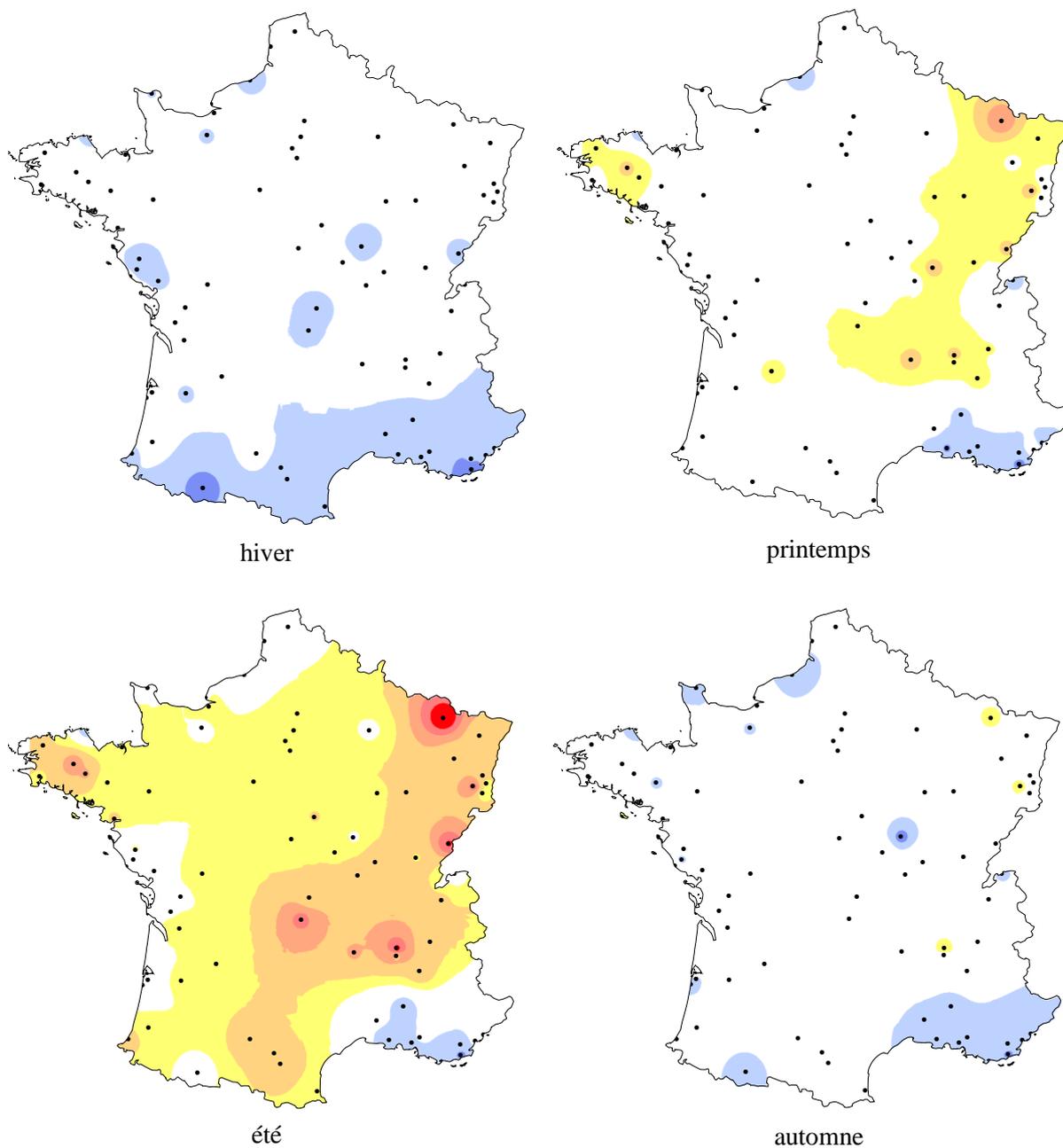
+ + + + = très importantes

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.

Annexe 11 : Diagrammes de corrélation entre les données de rayonnement solaire moyen prédit par les modèles Hélios 2007 et 2010, et mesuré sur la période 1961-1990 par Météo France (86 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison

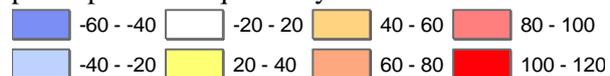


Annexe 12 : Cartes des écarts saisonniers entre les rayonnements solaires (MJ/m²) prédits par le modèle Hélios 2010 et mesurés sur 86 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison (écarts interpolés sur toute la France)

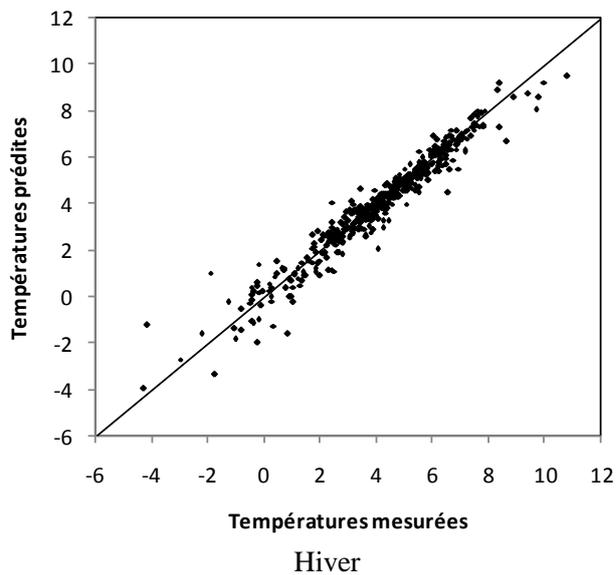
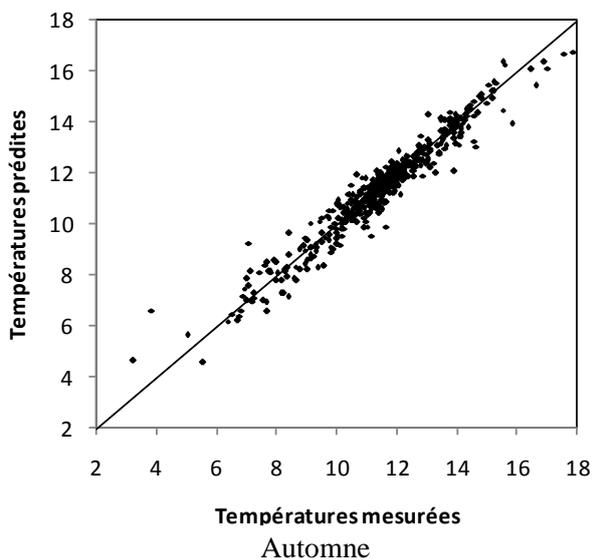
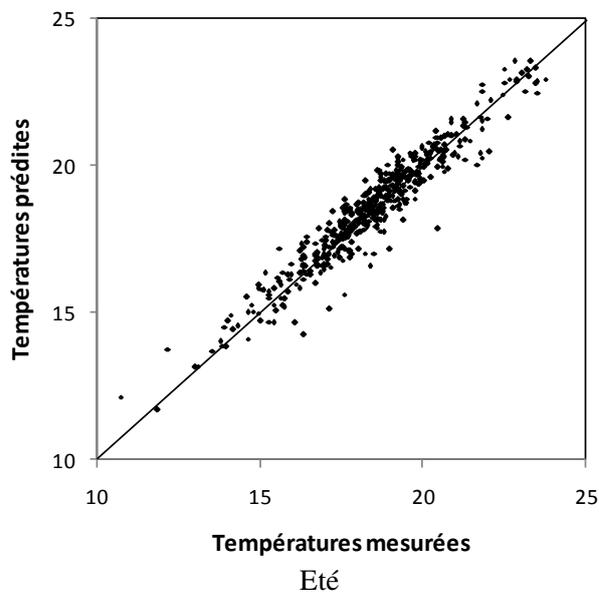
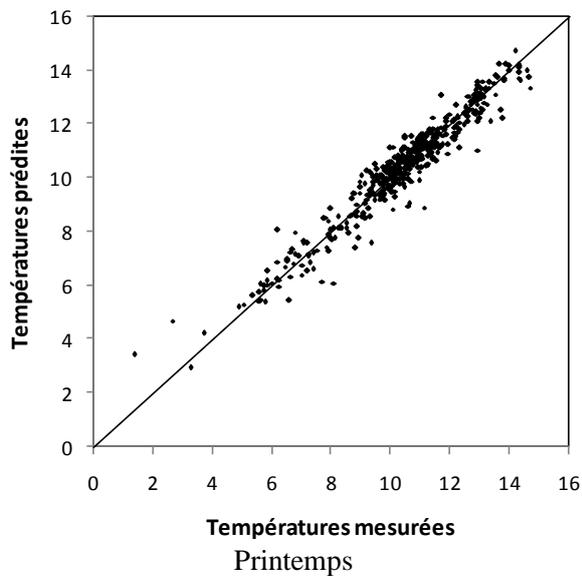


• postes Météo-France utilisés pour la validation du modèle

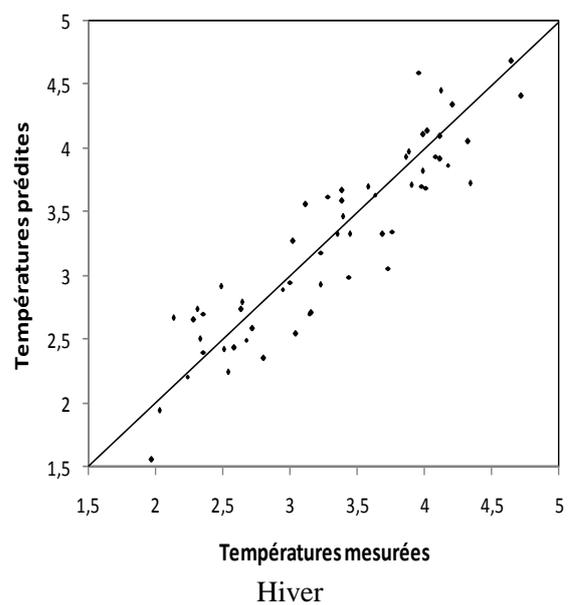
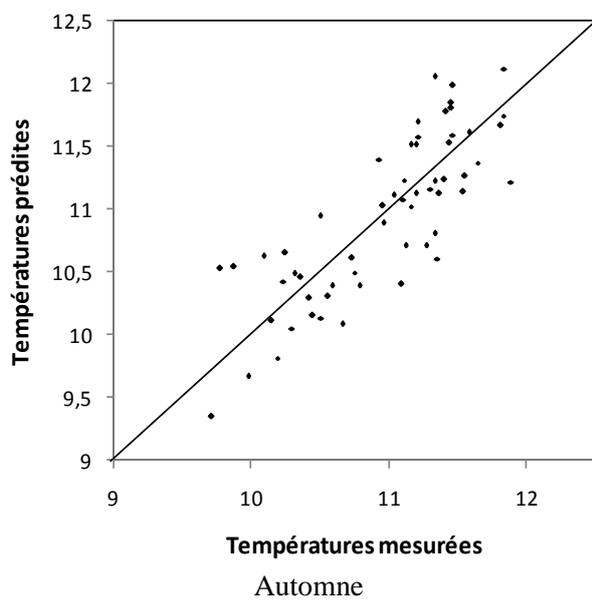
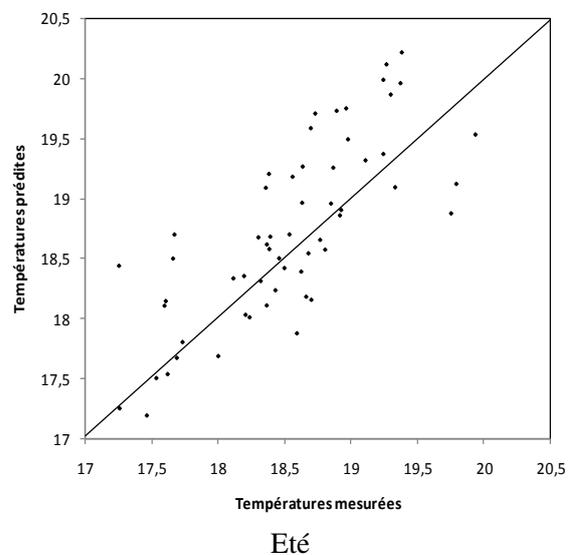
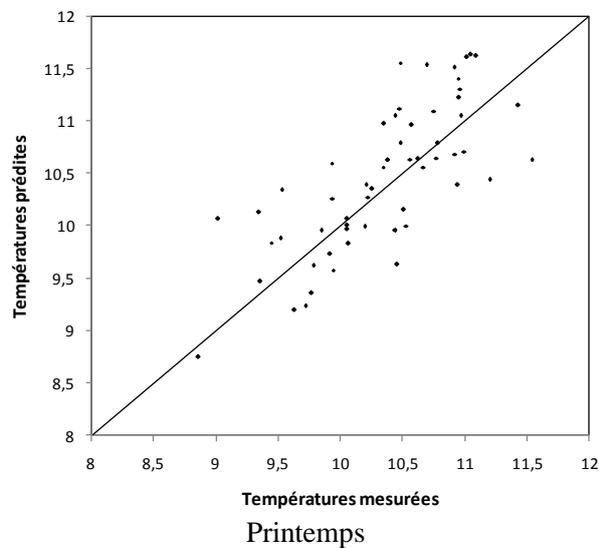
Valeur des écarts entre les rayonnements prédits et mesurés. Un écart positif montre un rayonnement prédit plus élevé que le rayonnement mesuré



Annexe 13 : Diagrammes de corrélation entre les données de températures moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (493 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle de la France pour chaque saison

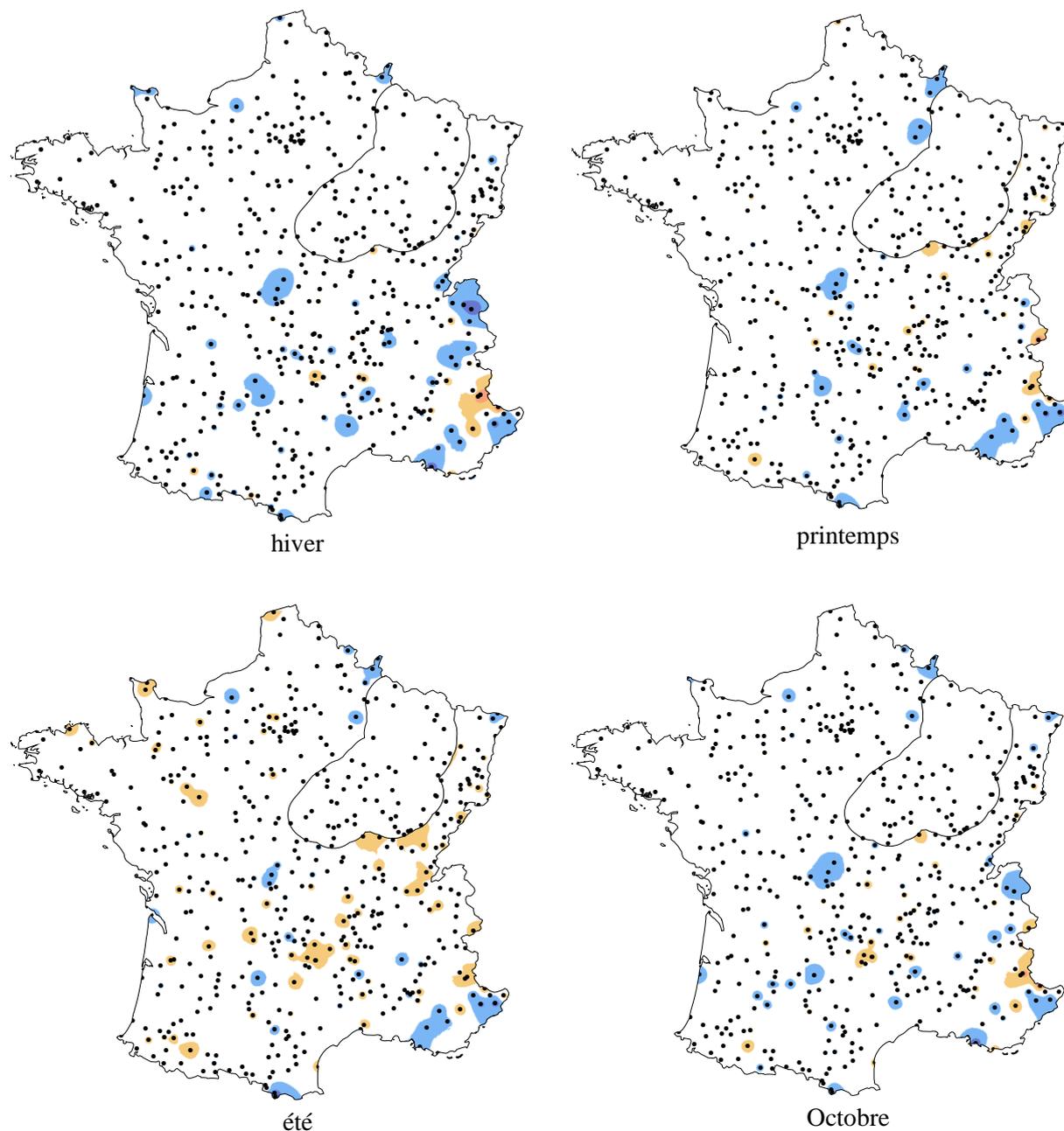


Annexe 14 : Diagrammes de corrélation entre les données de températures moyennes prédites par le modèle et mesurées sur la période 1961-1990 par Météo France (58 postes indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle des plateaux calcaires pour chaque saison



Annexe 15 : Cartes des écarts saisonniers entre les températures (°C) prédites par le modèle Hélios 2010 et mesurées sur 235 postes Météo France indépendants du jeu de calibration du modèle pour chaque saison

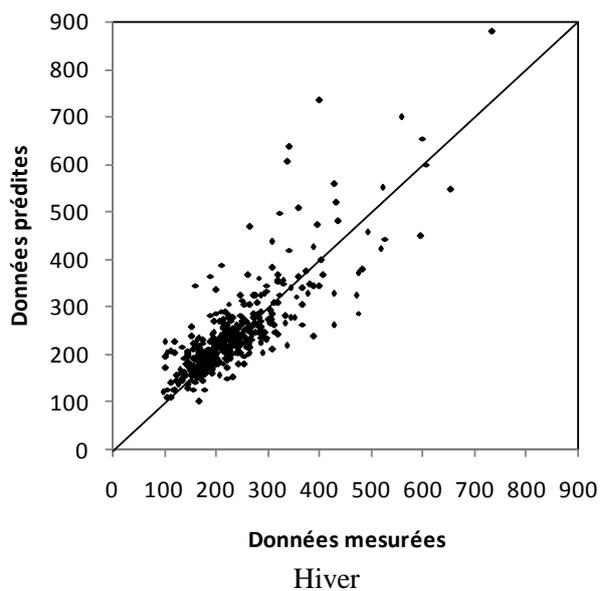
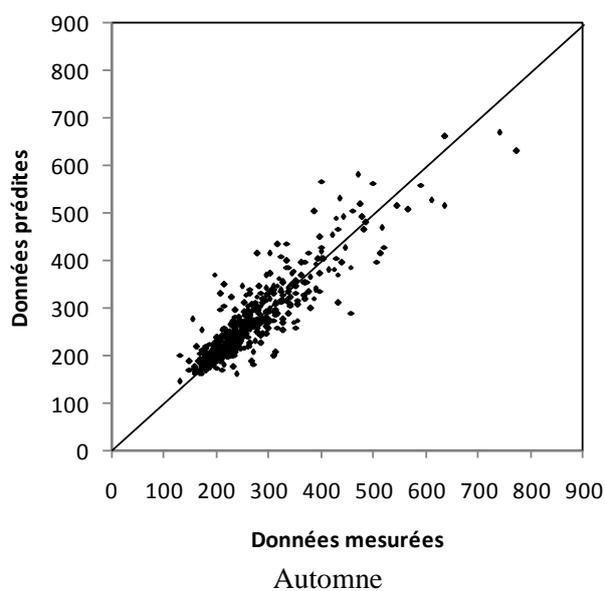
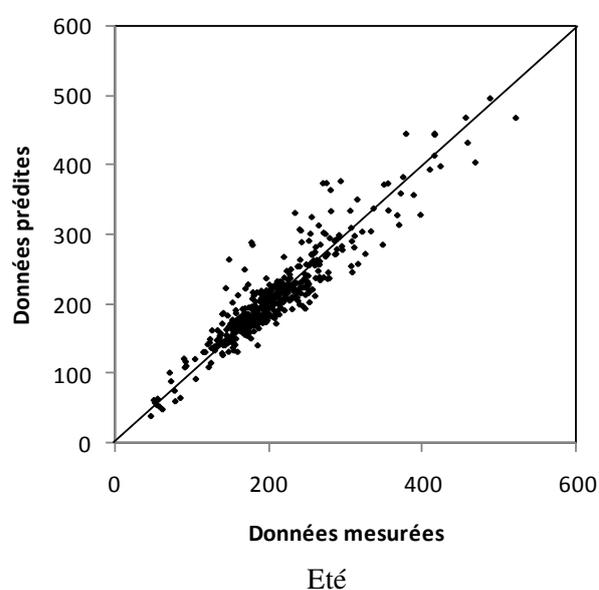
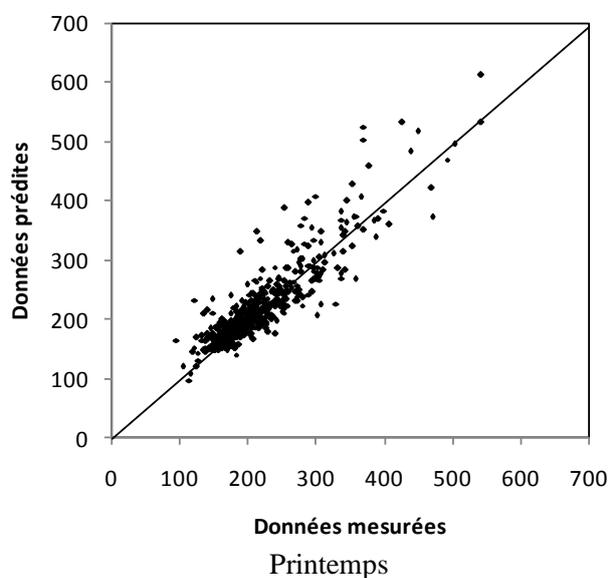
Le périmètre à l'intérieur duquel les postes ont été considérés pour la validation du modèle à l'échelle des plateaux calcaires a été matérialisé sur ces cartes



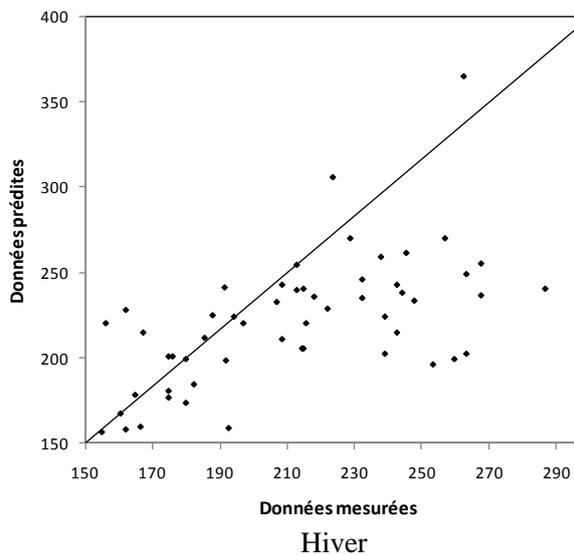
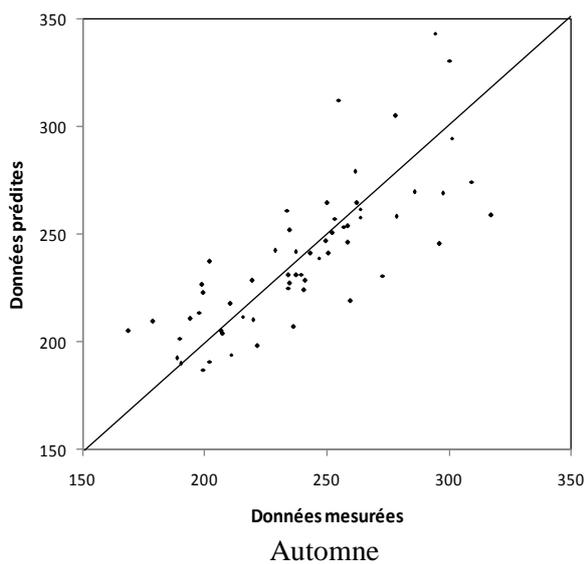
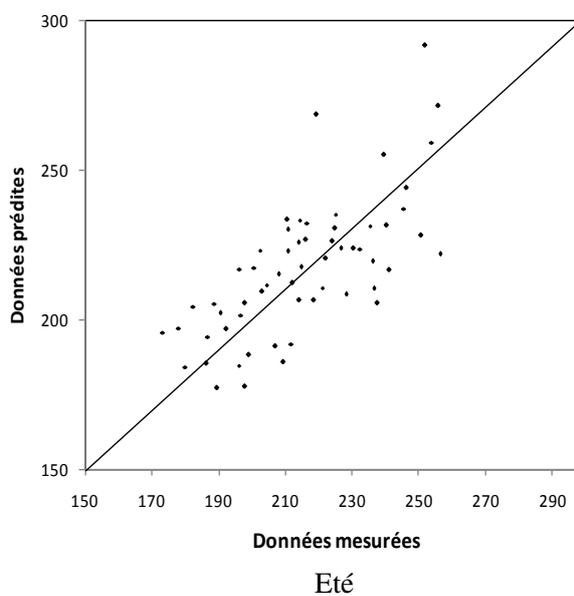
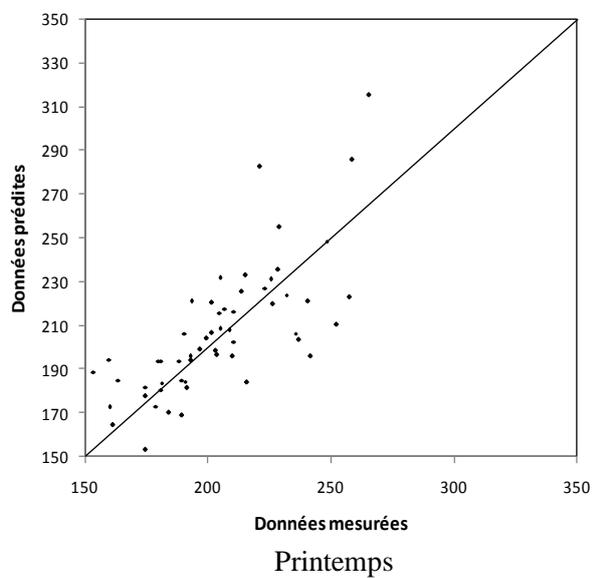
Écarts de températures entre les mesures Météo-France et les prédictions du modèle (°C) : un écart positif indique une prédiction de température plus élevée que les mesures.



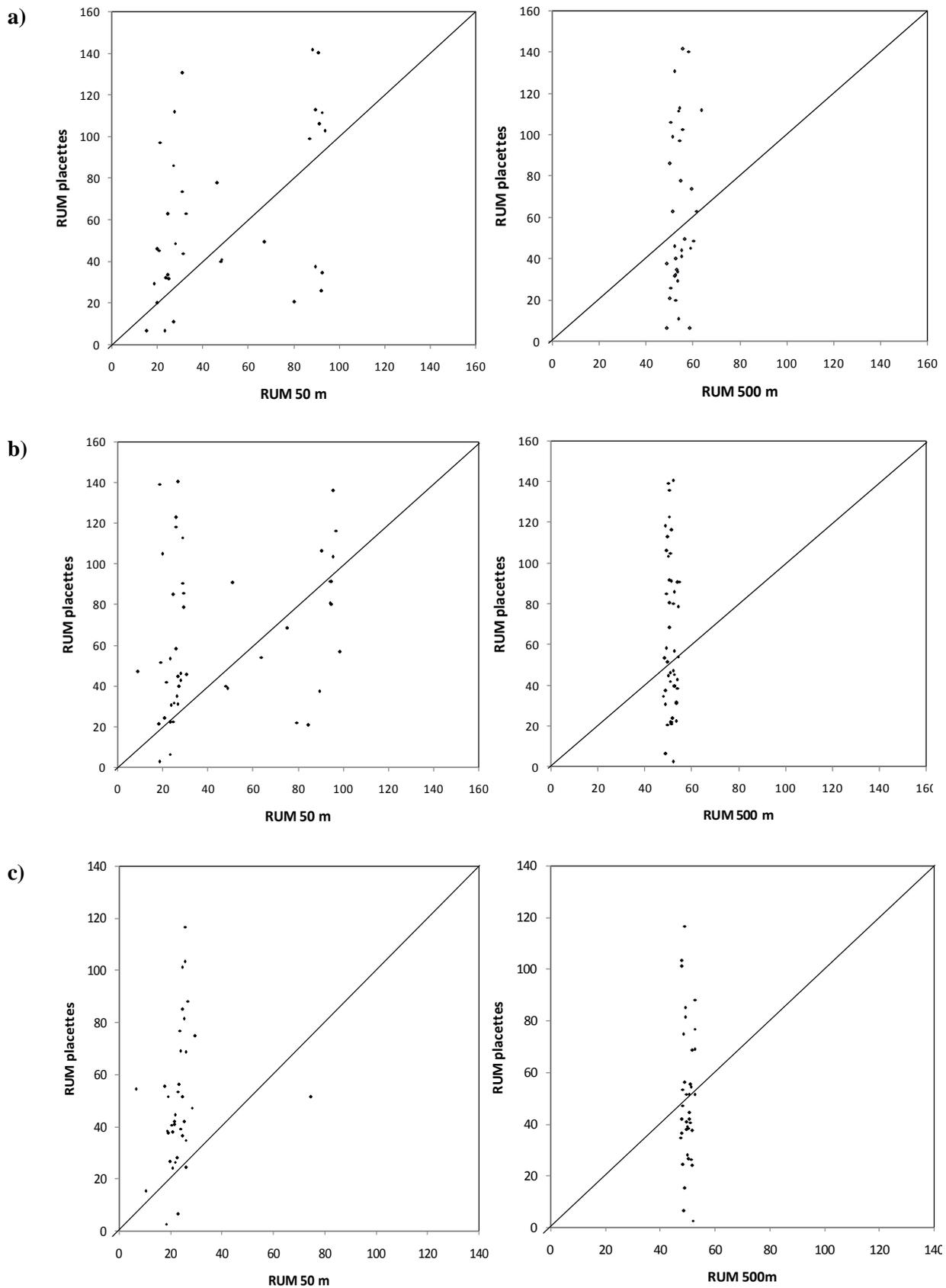
Annexe 16 : Diagrammes de corrélation entre les cumuls saisonniers de précipitations (moyennes sur la période 19661 – 1990, en mm) prédits à l'échelle de la France par le modèle LERFoB et mesurés sur 471 postes Météo-France indépendants du jeu de calibration des modèles.



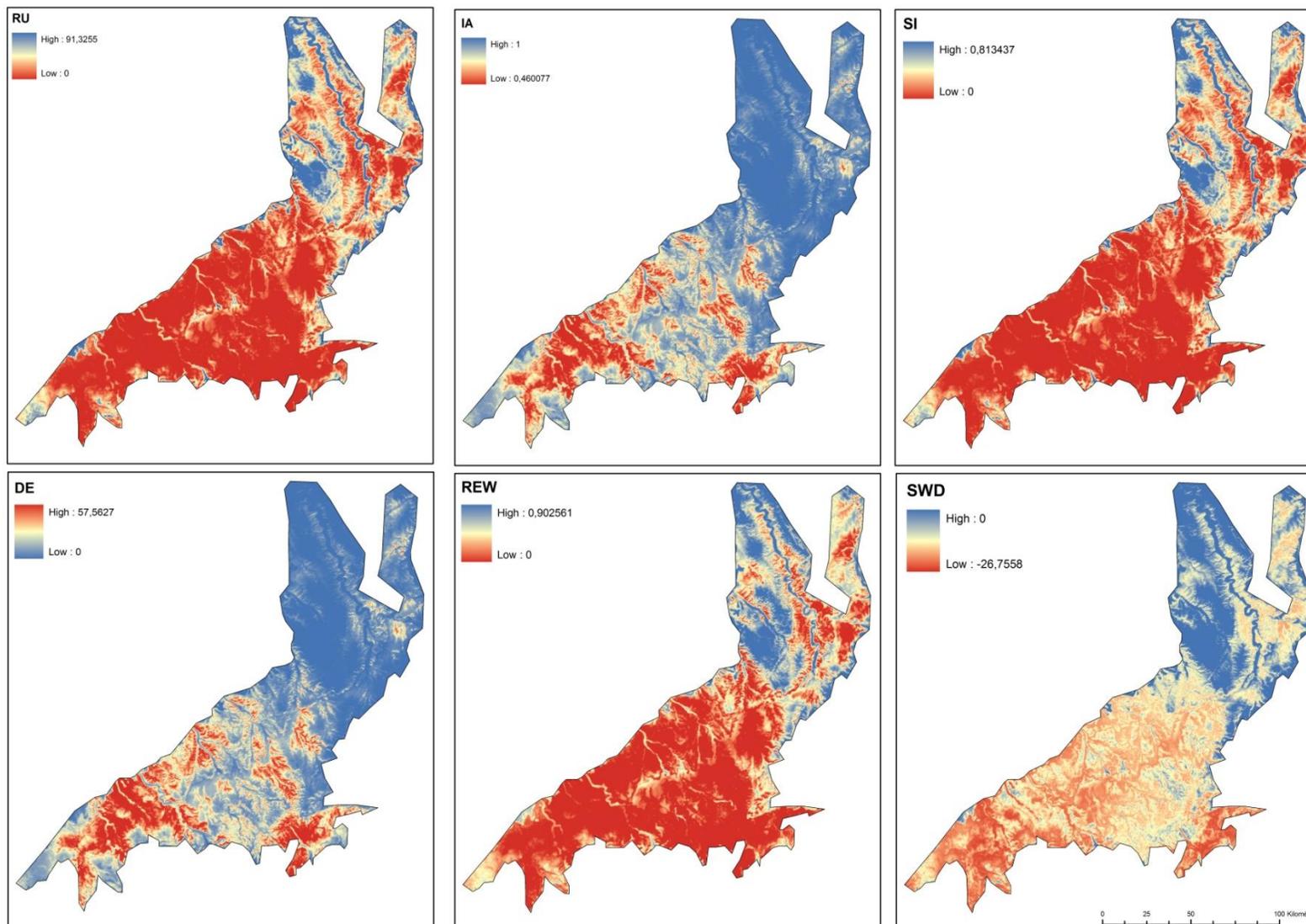
Annexe 17 : Diagrammes de corrélation entre les cumuls saisonniers de précipitations moyennes prédits par le modèle et mesurés par 59 postes Météo-France indépendants du jeu de calibration des modèles) à l'échelle des plateaux calcaires



Annexe 19 : Diagrammes de corrélation entre les valeurs de RUM extraites de la carte au pas de 50 m et 500 m et les valeurs calculées sur les placettes de relevés du site de Bois l'Evêque selon trois maillages imbriqués : 250 m sur 500 ha (a), 100 m sur 40 ha (b) et 50 m sur 10 ha (c)



Annexe 20 : cartes comparatives des différents indices de l'eau dans le sol, calculés au pas de 50m par la méthode de Palmer, à l'échelle des plateaux calcaires de Lorraine, Champagne-Ardenne



Annexe 21 : Choix d'un indice hydrique édaphique synthétique : étude de la capacité des différents indices à prédire la répartition de 37 essences forestières

Les résultats suivants sont basés sur 32 579 relevés en présence - absence (relevés IFN nouvelle méthode) des essences forestières suivantes :

<i>Acer campestre</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Pinus uncinata</i>	<i>Salix alba</i>
<i>Acer monspessulanum</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Populus tremula</i>	<i>Salix cinerea</i>
<i>Acer opalus</i>	<i>Fraxinus ornus</i>	<i>Prunus padus</i>	<i>Salix caprea</i>
<i>Acer platanoides</i>	<i>Larix decidua</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Sorbus aria</i>
<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Mespilus germanica</i>	<i>Quercus petraea</i>	<i>Sorbus aucuparia</i>
<i>Alnus glutinosa</i>	<i>Picea abies</i>	<i>Quercus pubescens</i>	<i>Sorbus torminalis</i>
<i>Alnus incana</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Quercus pyrenaicum</i>	<i>Tilia cordata</i>
<i>Betula pubescens</i>	<i>Pinus nigra</i>	<i>Quercus robur</i>	<i>Ulmus glabra</i>
<i>Carpinus betulus</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Ulmus laevis</i>
<i>Castanea sativa</i>			

Calcul du gain moyen d'AUC pour les modèles de distribution de 37 essences forestières dû à six indices hydriques édaphiques calculés à partir des bilans hydriques de Palmer et Thornthwaite pour chaque saison et sur l'année

période	Palmer						total Palmer	Thornthwaite						Total Thornthwaite	
	RU	DE	IA	REW	SI	SWD		RU	DE	IA	REW	SI	SWD		
hiver	0,035				0,001		0,018	0,035					0,001		0,018
printemps	0,035	0,001	0,001	0,010	-0,012	0,002	0,006	0,035		0,009	0,010	-0,012	0,000		0,008
été	0,038	0,041	0,040	0,040	0,039	0,022	0,037	0,036	0,044	0,042	0,025	0,036	0,018		0,034
automne	0,031	0,010	0,009	0,013		0,013	0,015	0,031	0,009	0,009	0,013		0,013		0,015
annuel	0,036	0,041	0,039	0,024	0,001	0,021	0,027	0,036	0,043	0,041	0,017	0,002	0,019		0,026
période de végétation	0,036	0,041	0,039	0,025		0,021	0,032	0,035	0,043	0,041	0,018		0,018		0,031

Les variables estivales et annuels sont ceux qui apportent les meilleurs résultats, quelque soit la méthode ou l'indice. Ce sont ceux qui caractérisent le mieux la contrainte de sécheresse. Si le déficit hydrique édaphique (SDW) semble moins bon que les autres indices, il est difficile en revanche de distinguer un indice meilleur que les autres, les écarts entre leurs gains d'AUC respectifs étant très faibles. On regarde donc, pour chaque variable, le nombre d'essences pour lesquelles la distribution est mieux prédite.

Nombre d'essences pour lesquelles chaque indice est celui permettant d'obtenir une AUC maximale (en % du nombre total d'essences considéré) pour chaque saison et sur l'année

	Palmer						Total Palmer	Thornthwaite						Total Thornthwaite	
	RU	DE	IA	REW	SI	SWD		RU	DE	IA	REW	SI	SWD		
hiver	6,98					0,00	6,98	6,98					0,00		6,98
printemps	4,73	0,00	0,00	1,35	0,68	0,00	6,76	2,93		0,00	1,35	0,68	0,00		4,95
été	4,73	4,95	3,60	7,66	6,76	0,54	28,24	0,68	24,32	8,11	2,70	0,00	2,70		38,51
automne	1,35	0,54	0,54	0,00		0,00	2,43	4,05	0,54	0,54	0,00		0,00		5,14
Total	17,79	5,50	4,14	9,01	7,43	0,54	44,41	14,64	24,86	8,65	4,05	0,68	2,70		55,59

période de végétation	Palmer						Total Palmer	Thornthwaite						Total Thornthwaite	
	RU	DE	IA	REW	SI	SWD		RU	DE	IA	REW	SI	SWD		
période de végétation	18,92	13,51	4,05	4,05	0,00	2,70	43,24	9,46	33,78	5,41	5,41	0,00	2,70		56,76

	Palmer							Total	Thornthwaite							Total
	RU	DE	IA	REW	SI	SWD	Palmer	RU	DE	IA	REW	SI	SWD	Thornthwaite		
annuel	27,03	12,16	6,76	4,05	0,00	2,70	52,70	8,11	28,38	5,41	2,70	0,00	2,70	47,30		

D'après ces résultats, le déficit d'évaporation estival se distingue clairement pour Thornthwaite. Il n'y a cependant toujours pas d'indice qui se distingue clairement pour la méthode de Palmer. Cependant, l'indice d'aridité IA et le déficit hydrique édaphique SDW semblent moins performants que les autres indices. On génère à nouveau le tableau précédent sans ces deux variables, en considérant, pour les modèles dont la meilleure variable n'a pas été retenue, la seconde variable la plus performante.

Nombre d'essences pour lesquelles chaque indice est celui permettant d'obtenir une AUC maximale (en % du nombre total d'essences considéré) pour chaque saison et sur l'année (parmi RU, REW, DE et SI uniquement)

	Palmer				Total	Thornthwaite				Total
	RU	DE	REW	SI		RU	DE	REW	SI	
hiver	6,98			0,00	6,98	6,98			0,00	6,98
printemps	4,73	0,00	1,35	0,68	6,76	2,93		1,35	0,68	4,95
été	4,73	9,46	9,46	6,76	30,41	0,68	31,08	4,05	0,00	35,81
automne	1,35	1,35	0,00		2,70	4,05	1,35	0,00		5,41
Total	17,79	10,81	10,81	7,43	46,85	14,64	32,43	5,41	0,68	53,15

période	Palmer				Total	Thornthwaite				Total
	RU	DE	REW	SI		RU	DE	REW	SI	
période de végétation	18,92	17,57	5,41	0,00	41,89	9,46	37,84	10,81	0,00	58,11

période	Palmer				Total	Thornthwaite				Total
	RU	DE	REW	SI		RU	DE	REW	SI	
annuel	28,38	17,57	6,76	0,00	52,70	8,11	33,78	5,41	0,00	47,30

A partir du même raisonnement précédemment, on ne retient que les variables REW et DE. RU permet d'obtenir une AUC plus faible que ces deux variables, et SI n'est la meilleure variable à prendre en compte que pour très peu de modèles.

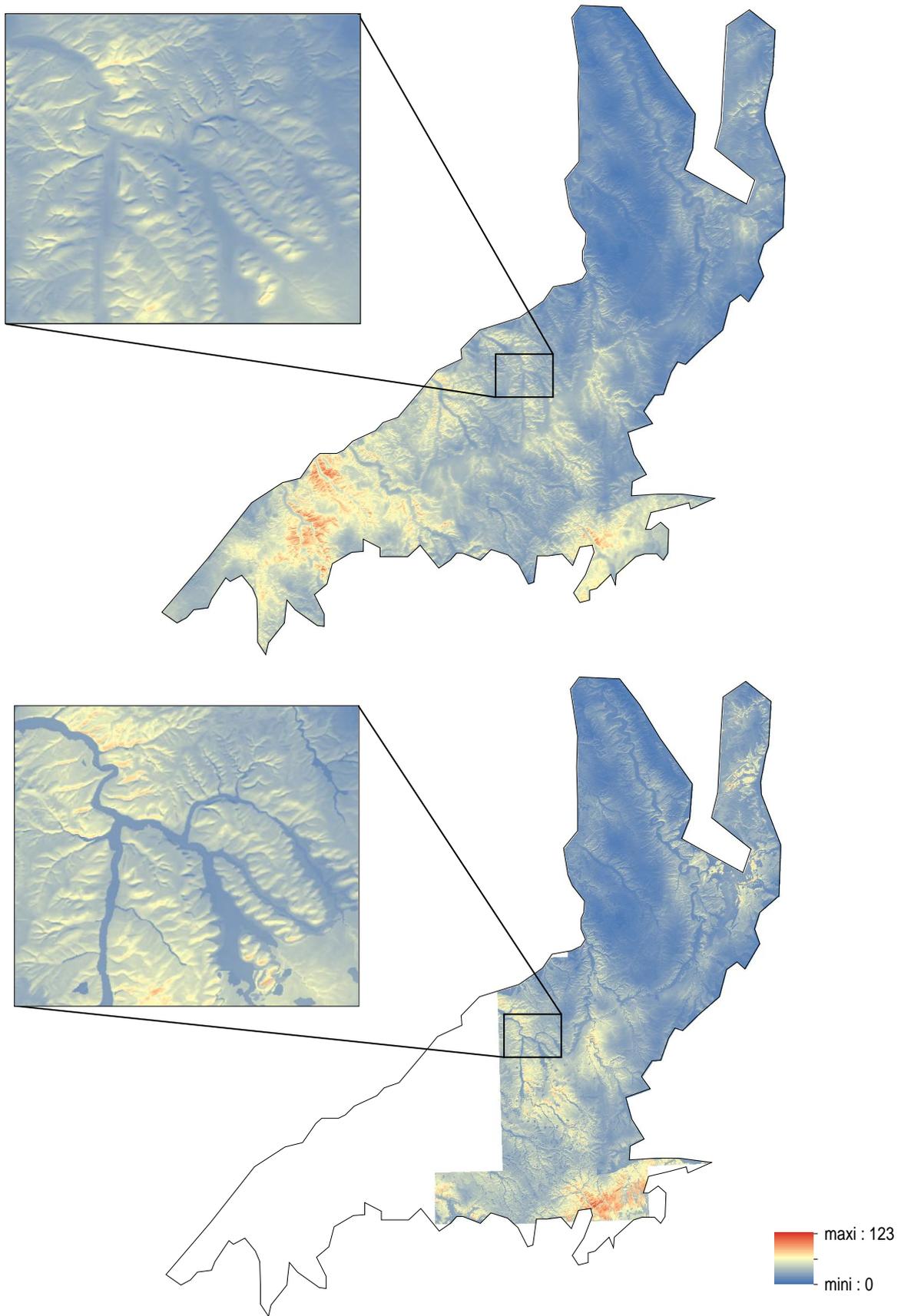
Nombre d'essences pour lesquelles DE ou REW est l'indice permettant d'obtenir une AUC maximale (en % du nombre total d'essences considéré) pour chaque saison et sur l'année

	Palmer		Total	Thornthwaite		Total
	DE	REW		DE	REW	
printemps	1,35	1,35	2,70		1,35	1,35
été	9,46	31,08	40,54	41,89	6,76	48,65
automne	1,35	0,00	1,35	2,70	2,70	5,41
Total général	12,16	32,43	44,59	44,59	10,81	55,41

période	Palmer		Total	Thornthwaite		Total
	DE	REW		DE	REW	
période	27,70	8,78	36,4865	49,3243	14,1892	63,51
annuel	27,70	8,78	36,4865	50,6757	12,8378	63,51

La meilleure variable est ici différente selon la méthode (REW pour Palmer, DE pour Thornthwaite). Cependant, le DE d'été est la meilleure variable saisonnière pour 57% des essences. Le DE total annuel est meilleur pour 78% des essences. Les écarts entre les gains d'AUC étant très faibles, on se base sur le nombre de modèles pour lesquels DE ou REW est la variable la plus pertinente, et l'on retient de déficit d'évaporation. Il s'agit maintenant de choisir le DE le plus approprié entre les différentes saisons et méthodes pour lesquels il est calculé.

Annexe 22 : Comparaison cartographique des déficits d'évaporations modélisés au pas de 50 m à partir des RUM au pas de 500 m (en haut) et de 50 m (en bas)



Annexe 23 : Quelques règles aidant au pré-zonage des stations et à l'interpolation de données ponctuelles pour réaliser une carte des stations (Bazin et Gaudin, 2003)

L'identification de zones homogènes repose sur des critères de stratification, parmi lesquels on peut citer la topographie, la géologie, l'exposition et les résultats de la photo-interprétation. Un certain nombre de lois s'ajoutent à ces critères pour aider à la délimitation de zones homogènes.

Loi des compartiments

La porosité d'un ensemble lithologique donné est un facteur déterminant une fourchette de pédogénèse possible. On distingue ainsi les systèmes drainants, permettant l'infiltration verticale de l'eau, des systèmes étanches, permettant l'apparition de nappes. On peut ainsi présumer des propriétés hydriques d'une zone à partir d'une carte géologique.

Loi des buttes

Cette loi repose sur la topographie pour estimer la limite entre deux zones différentes. Le ruissellement des eaux modèle les paysages en formant des dépressions et des zones convexes. Or les eaux de ruissellement ont tendances à progresser le long des discontinuités et des zones de partage entre les matériaux. Il y a alors 75 à 90% de chances de deux buttes voisines aient des sols différents pour au moins un caractère.

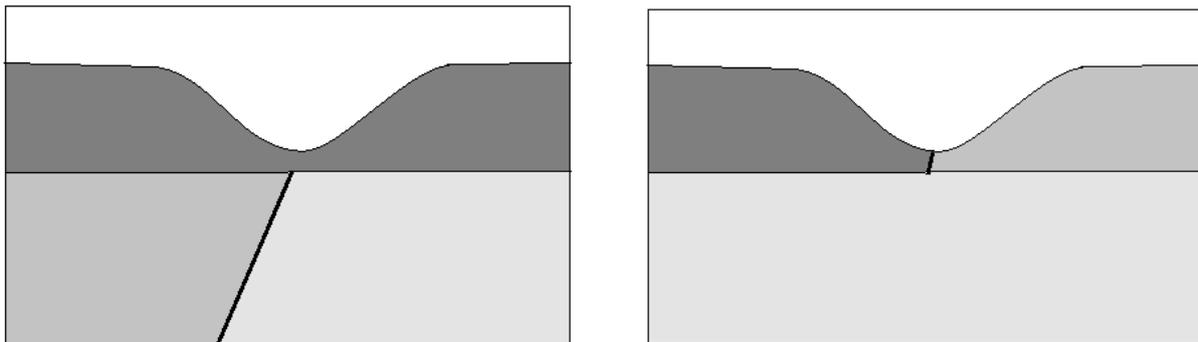


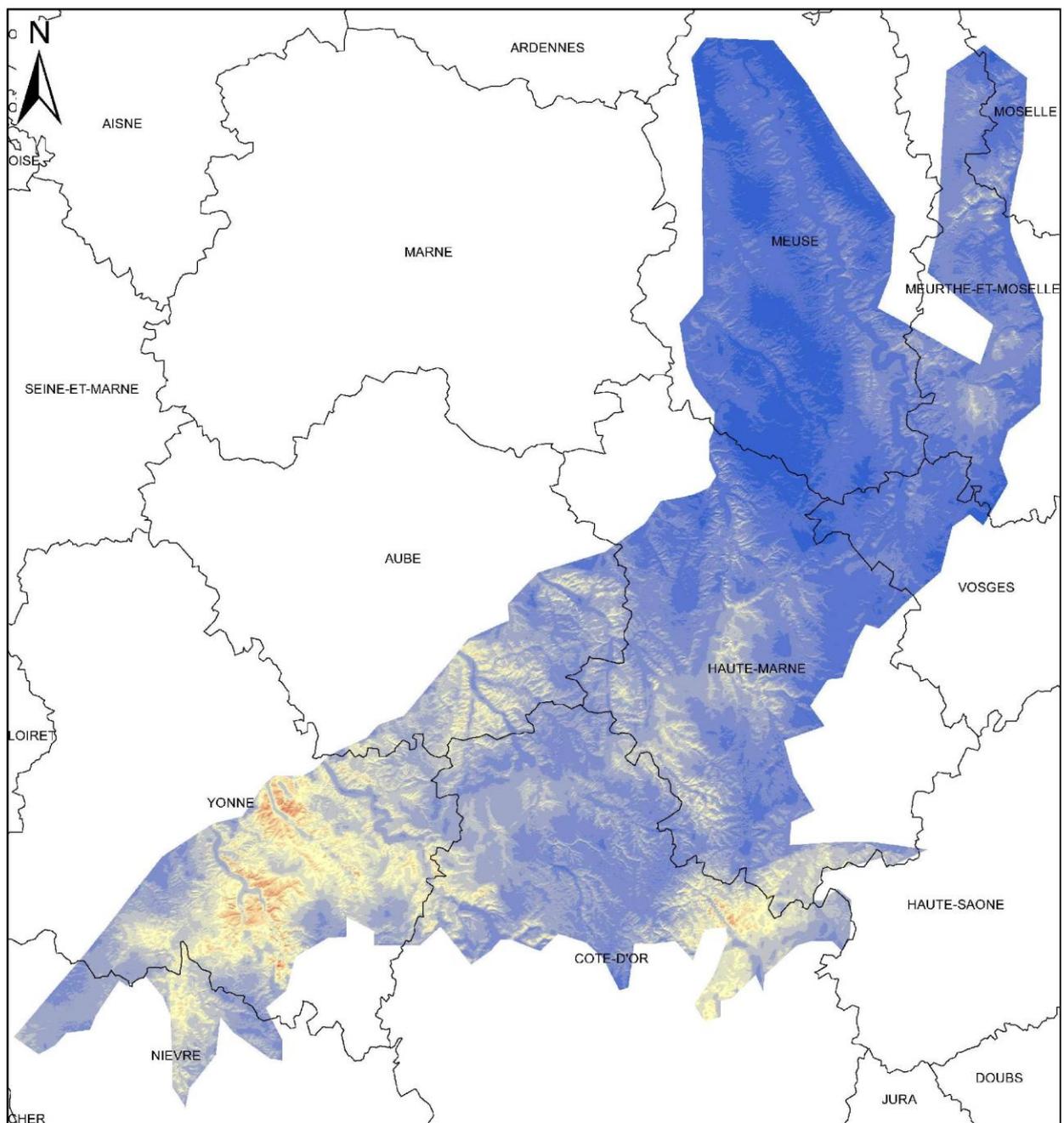
Illustration de la loi des buttes : l'eau a creusé au niveau de zones moins solides. Cas d'un changement géologique (à gauche) ou d'un changement de couverture pédologique (à droite).

Loi de chaîne des sols

Le ruissellement des eaux le long des pentes crée un transfert de matières des zones hautes vers les zones en contrebas. Les zones convexes sont alors soumises à des pertes de matière (érosion, ruissellement, lessivage), tandis que les zones de dépression subissent des apports en matériaux.

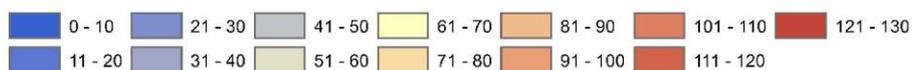
On arrive ainsi à la notion de chaîne des sols : il existe des variations plus ou moins continues entre les points hauts et les points bas. Les sols colluviaux des positions basses ne présentent qu'une faible variabilité dans un contexte donné. On peut alors y limiter les relevés lors de la phase de terrain.

Déficits d'évaporation estivaux calculés à partir des bilans hydriques de Thornthwaite sur les plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne, Champagne-Ardenne (résolution : 50 m)



0 12,5 25 50
Kilomètres

Valeurs de déficits d'évaporation (mm)



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 sept 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.