

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

Sommaire

Table des figures

Liste des tableaux

I. Introduction : Application à l'agriculture de la prévision saisonnière et évaluation à l'échelle de la France.	22
1. Contexte et enjeux de la thèse.....	22
2. Représentation des surfaces agricoles en France	24
2.1. La culture du blé tendre	24
2.1.1. Définition et chiffres clés	24
2.1.2. Ecophysiologie de la plante.....	25
2.2. Les variables biogéophysiques terrestres.....	26
2.2.1. La modélisation des surfaces continentales.....	26
2.2.2. Modélisation du stress hydrique	29
2.3. L'observation des surfaces continentales depuis l'espace.....	30
3. Etat de l'art de la prévision saisonnière du temps.....	32
3.1. Eléments de physique de l'atmosphère.....	32
3.1.1. Variabilité basse fréquence de l'atmosphère	32
3.1.2. Notions de prévisibilité.....	36
3.2. La prévision saisonnière du temps.....	39
3.2.1. Définition et concept	39
3.2.2. La prévision d'ensemble.....	39
3.3. Prévision numérique à l'échelle saisonnière.....	41
3.3.1. Historique	41
3.3.2. La prévision saisonnière aujourd'hui	43
3.3.3. Le système multi-modèles européen de prévision saisonnière : EUROSIP	45
3.3.4. La prévision saisonnière appliquée en agriculture.....	47
4. Objectifs et plan de travail de la thèse	49
4.1. Représentation et anticipation de la croissance des cultures en France.....	49
4.2. Deux stratégies	50

II. Etude de la variabilité interannuelle de la biomasse aérienne sèche avec un modèle générique des surfaces continentales.	53
1. Les variables biogéophysiques simulées avec un SVAT	53
1.1. Le modèle ISBA	53
1.2. Le modèle ISBA-A-gs	54
1.3. Le modèle ISBA-DF	55
1.4. La plateforme SURFEX	56
2. <i>Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France</i>	57
2.1. Résumé de l'article	57
2.2. Article	58
2.3. Synthèse des résultats	80
III. Mise en place d'indicateurs pour anticiper les rendements agricoles : données modélisées et issues de produits satellitaires.	82
1. Choix du modèle et des données issues des produits satellitaires	82
1.1. Utilisation de la configuration optimale du profil racinaire simulé	82
1.2. Les données de LAI satellitaire utilisées dans cette thèse	82
1.2.1. Le « Copernicus Global Land Service »	82
1.2.2. Traitement des séries de LAI satellitaire GEOV1	83
2. L'humidité du sol racinaire simulée : un indicateur d'état de la croissance future de la culture	85
2.1. Mise en place d'une méthode basée sur des relations statistiques	85
2.1.1. Protocole de mise en œuvre	86
2.1.2. Séries de wg_2 : indicateur précoce de l'indice foliaire	88
2.1.3. Lien entre le wg_2 simulé et le rendement final observé/simulé	91
2.2. Vers l'identification de l'étape clé où l'humidité du sol joue un rôle important sur l'état futur de la culture	96
2.2.1. Utilisation du LAI simulé instantané comme indicateur temporel	96
2.2.2. Résultats	97
2.3. Modèle statistique de prévision de la tendance des rendements	100
2.3.1. Présentation de la méthode	101
2.3.2. Résultats : quel potentiel d'anticipation du rendement final en cours d'année culturale ?	102
3. Utilisation des données de LAI issues de produits satellitaires GEOV1	107
3.1. Relation statistique entre les variables issues d'ISBA-A-gs et le LAI satellitaire	107
3.1.1. Lien entre les deux séries de LAI : simulé et mesuré	107
3.1.2. Le wg_2 décadaire peut-il anticiper le LAI satellitaire ?	108
3.2. Est-ce que les valeurs maximales du LAI satellitaire peuvent être utilisées comme indicateur spatial du rendement ?	111
3.2.1. Relation avec des dates de récolte mesurées	111
3.2.2. Relation entre les données de LAI GEOV1 et le rendement final issu d'Agreste	112
4. Conclusions	113

IV. Evaluation de l'apport de la prévision saisonnière du temps comme forçage météorologique d'un modèle de culture du blé tendre.	115
1. Le modèle de culture Panoramix	115
1.1. Présentation	115
1.1.1. Modèle de culture	115
1.1.2. Conception du modèle	116
1.1.3. Données météorologiques en entrée du modèle	117
1.2. Impact du climat sur la croissance du blé tendre	117
1.2.1. Calage de la date de semis ; stratégie d'évitement	117
1.2.2. Les principaux facteurs climatiques impactant la culture.....	118
1.3. Les variables simulées pour le blé tendre	119
1.3.1. Les stades phénologiques	120
1.3.2. Les variables hydriques	122
1.3.3. Les variables thermiques	123
2. Mise en place des différents jeux de simulations.....	124
2.1. Contexte de l'étude.....	124
2.1.1. Le calendrier type d'une année simulée	124
2.1.2. Paramétrisations du modèle de culture	126
2.1.3. La période d'étude	126
2.1.4. Les sites sélectionnés sur la grille Safran	127
2.2. Le jeu de simulations de référence	128
2.3. Le jeu de simulations avec utilisation du calcul fréquentiel	129
2.4. Le jeu de simulations avec les données de prévision saisonnière.....	130
2.5. Le jeu de simulations de contrôle avec une climatologie Safran.....	131
3. Différentes méthodes de descente d'échelle	132
3.1. Présentation générale	132
3.1.1. Intérêt de leur utilisation.....	132
3.1.2. Etat de l'art des différentes méthodes existantes	133
3.1.3. Avantages et inconvénients	135
3.2. Les méthodes choisies dans cette thèse	136
3.2.1. Une méthode basée sur le calcul d'anomalies standardisées.....	136
3.2.2. La méthode quantile-quantile	138
4. Présentation des simulations réalisées et outils de validation.....	140
4.1. Liste des simulations réalisées.....	140
4.1.1. Jeux de simulations obtenus avec des données de forçages météorologiques brutes	140
4.1.2. Jeux de simulations obtenus avec la descente d'échelle méthode « simple » ..	141
4.1.3. Jeux de simulations obtenus avec la descente d'échelle quantile-quantile.....	141
4.1.4. Jeux de simulations obtenus avec l'approche multi-modèles.....	142
4.2. Les différents scores du système d'évaluation	143
4.2.1. Les scores déterministes	143
4.2.2. Les scores probabilistes	146
5. Résultats.....	154
5.1. Analyse du comportement du jeu de simulations de référence.....	154
5.2. Scores obtenus pour les différents jeux de simulations	171
5.2.1. Le jeu de simulations « calcul fréquentiel »	171

5.2.2. Les jeux de simulations « PS »	178
5.3. Confrontation de simulations avec données de prévision saisonnière et avec calcul fréquentiel	202
5.3.1. Les prévisions déterministes	203
5.3.2. Les prévisions probabilistes	207
6. Conclusions	215
V. Conclusions et perspectives	218

Bibliographie

Table des figures

Figure 1: Cycle du blé tendre à travers les trois grandes étapes de la croissance, représentées avec la gestion des apports azotés (Arvalis - Institut du végétal, http://www.arvalis-infos.fr/).	25
Figure 2: Schéma de principe du modèle ISBA-standard (en haut) et ISBA-A-gs (en bas) (CNRM, www.cnrm.meteo.fr).	27
Figure 3: Exemple de production de carte de LAI obtenu à partir de données satellites (LSA-SAF, http://landsaf.meteo.pt/).	32
Figure 4: Le système climatique schématisé avec les interactions entre les différentes composantes (Réseau Action Climat France, http://www.rac-f.org/).	33
Figure 5: Principaux modes de variabilité ayant une influence directe ou indirecte sur l'Europe.	35
Figure 6: Cartes illustrant les téléconnexions majeures observées lors d'un événement El Niño (à gauche) et La Niña (à droite). L'hiver de l'hémisphère nord est représenté en haut, l'hiver de l'hémisphère sud en bas. Sont représentées sur la carte : les zones chaudes (en rouge), les zones sèches (en marron), les zones chaudes et sèches (en jaune), les zones froides (en bleu), les zones humides (en turquoise) et les zones froides et humides (en bleu foncé). (NOAA ; http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/impacts/warm.gif et http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/impacts/cold.gif).	37
Figure 7: Schéma de principe de la prévision d'ensemble. Sont représentés sur le schéma : la prévision déterministe (en bleu), les membres de la prévision d'ensemble (en noir) et l'observation (en vert)...	40
Figure 8: Corrélation de l'anomalie de T2m pour les mois mars-avril-mai (date d'initialisation au 1 ^{er} février) sur la période 1981-2010 avec un ensemble de 15 membres produits par le GCM de l'ECMWF. Les points noirs représentent des valeurs significatives (au seuil 5%) sur un échantillon aléatoire de 1000 valeurs.	44
Figure 9: Bulletin climatique publié par le consortium EUROSIP pour le trimestre décembre 2014 et janvier-février 2015 pour la France métropolitaine et l'outre-mer. Le tableau du haut montre la tendance pour des températures supérieures à la normale et une forte concordance des modèles quasiment sur tous les territoires ; le tableau du bas montre les précipitations totales. Les premières lignes expriment un scénario émis par un centre météorologique (cinq au total si l'on ajoute la « JMA »), les différents scénarios de synthèse sont représentés dans les dernières lignes (Météo-France, https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=137&id_rubrique=44).	47
Figure 10: Schéma résumant les différentes étapes abordées dans cette thèse. Une fois la problématique énoncée, différentes solutions sont dégagées. Chaque rectangle correspond à un chapitre de thèse, dont un est constitué d'un article.	50
Figure 11: Schéma de la modélisation des surfaces continentales au CNRM-GAME.....	55
Figure 12: Représentation schématisée du profil racinaire (à 8 couches) dans la version ISBA-FR (partie gauche) et dans ISBA-DF (partie droite) en fonction de la profondeur (notée z , indiquée à droite). Les variables pronostiquées dans chaque compartiment sont indiquées sur le schéma : les températures de surface et du sol (notées T_s et T_p ou T , respectivement), les différents contenus en eau liquide de surface et du sol (notés w_s et w_p ou w_L , respectivement) et en eau gelée de surface et du sol	

(notés w_{sf} et w_{pf} ou w_i , respectivement). Les flux sont également indiquées : le flux de chaleur (noté G) et le flux d'eau liquide (F) (Boone et al., 2000).	56
Figure 13: Schéma illustrant la réalisation des séries de données LAI satellitaire GEOV1.....	83
Figure 14: Représentation de l'étape d'interpolation temporelle sur les séries de LAI satellitaire. Exemple pris pour la série de LAI satellitaire obtenue pour le département des Ardennes (08).	84
Figure 15: Représentation de la méthode de correction appliquée sur les séries de LAI satellitaire après l'étape d'interpolation temporelle. Exemple pris pour la série de LAI satellitaire obtenue pour le département des Ardennes (08).	85
Figure 16: Schématisation du protocole utilisé pour la recherche de relation entre les séries de variables biogéophysiques issues du jeu de simulations DIF1-NRT. L'exemple pris ici se focalise sur la décade 10, mais le même protocole est utilisé pour les autres décades étudiées.....	87
Figure 17: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un R^2 significatif (p -value $< 0,01$) entre le wg_2 décadaire et le LAI décadaire simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT, pour les cultures de type C3 (à gauche) et pour les prairies naturelles (à droite).	88
Figure 18: A gauche, la carte illustrant le décalage entre le wg_2 de la décade 17 (mi-juin), et le LAI décadaire, simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT, pour lequel on obtient le meilleur coefficient de détermination significatif (p -value $< 0,01$) obtenu pour les cultures de type C3. A droite, la valeur du R^2 obtenu est représentée pour les mêmes sites.....	89
Figure 19: Comme sur la Figure 18, mais pour les prairies naturelles.....	90
Figure 20: Histogrammes représentant le nombre de sites par décades où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% (p -value $< 0,01$) est obtenu entre le wg_2 décadaire et le LAI décadaire, simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.....	90
Figure 21: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un R^2 significatif (p -value $< 0,01$) entre le wg_2 décadaire et le B_{agX} , simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	92
Figure 22: Cartes illustrant les meilleurs R^2 significatifs au seuil de 1% (p -value $< 0,01$) obtenus entre le wg_2 de la décade 17 (mi-juin) et le B_{agX} simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	93
Figure 23: Histogrammes représentant le nombre de sites par décade où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% (p -value $< 0,01$) est obtenu entre le wg_2 décadaire et le B_{agX} , simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.....	93
Figure 24: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un coefficient de détermination significatif (p -value $< 0,01$) entre le wg_2 décadaire, simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT, et le rendement final issu d'Agreste. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	94
Figure 25: Cartes illustrant les meilleurs R^2 significatifs (p -value $< 0,01$) obtenus entre le wg_2 simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT, et le rendement final issu d'Agreste. A gauche, les cultures de type C3 et pour la décade 11 (mi-avril), à droite les prairies naturelles et pour la décade 16 (début juin).	95
Figure 26: Histogrammes représentant le nombre de sites par décade où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% (p -value $< 0,01$) est obtenu entre le wg_2 décadaire, simulé avec le jeu de simulations	

DIF1-NRT, et le rendement final issu d'Agreste. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	95
Figure 27: R^2 calculés entre la série de B_{agX} et la série de wg_2 simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT sur la période 1994-2010. La valeur de wg_2 est obtenue lorsque différents seuils de LAI ont été atteints. Sont représentés en rouge les R^2 significatifs au seuil de 1% (p-value < 0,01). A gauche, le R^2 obtenu pour les cultures de type C3 simulées pour le département de l'Indre et Loire (37). A droite, le R^2 obtenu pour les prairies naturelles simulées pour le département du Puy-De-Dôme (63).	97
Figure 28: Moyenne sur l'ensemble des sites des R^2 calculés entre le B_{agX} et la valeur de wg_2 pour différents seuils de LAI atteints et en fonction du type de végétation étudié : en haut, les cultures de type C3 et en bas les prairies naturelles.	98
Figure 29: R^2 calculés entre le rendement final issu d'Agreste et la série de wg_2 simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT sur la période 1994-2010. La valeur de wg_2 est obtenue lorsque différents seuils de LAI ont été atteints. Sont représentés en rouge les R^2 significatifs au seuil de 1% (p-value > 0,01). A gauche, le R^2 obtenu pour le rendement de l'orge d'hiver pour le département du Puy-De-Dôme (63). A droite le R^2 obtenu pour le rendement des prairies naturelles pour le département du Maine-et-Loire (49).	99
Figure 30: Comme pour la Figure 28, mais pour le rendement final issu d'Agreste. Sur le graphe du haut, sont représentées les valeurs de R^2 obtenus pour les céréales suivantes : le blé tendre d'hiver (en noir), le seigle (en rouge), l'orge d'hiver (en vert), l'orge de printemps (en bleu), l'avoine (en bleu cyan) et le triticale (en orange). Sur le graphe du bas, sont représentées les valeurs de R^2 obtenus pour les prairies naturelles.	100
Figure 31: Graphe représentant les prévisions du B_{agX} des cultures de type C3 simulées pour le département du Puy-de-Dôme (63), obtenues d'une part avec la régression linéaire (en rouge) et d'autre part avec le modèle ISBA-A-gs (en bleu). L'intervalle d'incertitude associé à la prévision est représenté en rouge. Les lignes horizontales matérialisent l'intervalle des prévisions obtenu avec les seuils issus de l'équation (4) (Sect. 2.3.1.). Seuil de LAI fixé à $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$	103
Figure 32: Comme sur la Figure 31, mais pour la prévision du B_{agX} des prairies naturelles simulées pour le département de la Vendée (85). Seuil de LAI fixé à $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$	104
Figure 33: Histogrammes représentant le nombre moyen de bonnes prévisions du B_{agX} simulé obtenu avec la régression linéaire pour chaque seuil de LAI fixé. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	104
Figure 34: Comme sur la Figure 31, mais pour la prévision du rendement des céréales issu d'Agreste pour le département de l'Indre-et-Loire (37).	105
Figure 35: Comme dans la Figure 34, mais pour la prévision du rendement de prairies naturelles issues d'Agreste pour le département du Maine-et-Loire (49).	106
Figure 36: Comme dans la Figure 33, mais cette fois pour la prévision du rendement final issu d'Agreste.	106
Figure 37: Cartes illustrant les meilleurs R^2 significatifs au seuil de 1% (p-value < 0,01) obtenus entre le LAI de la décade 21 (fin juillet) simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT et le LAI GEOV1 à la même décade. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	107
Figure 38: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un R^2 significatif (p-value < 0,01) entre le wg_2 décadaire simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT et le LAI GEOV1. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	108

Figure 39: A gauche, la carte illustrant le décalage entre le wg_2 moyenné sur la décade 17 (mi-juin) et le LAI décadaire GEOV1, pour lequel on obtient le meilleur R^2 significatif (p -value < 0,01) obtenu pour les cultures de type C3. A droite, la valeur du R^2 obtenu est représentée pour les mêmes sites.	109
Figure 40: Comme sur la Figure 39, mais pour les prairies naturelles.	109
Figure 41: Histogrammes représentant le nombre de sites par décade où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% (p -value < 0,01) est obtenu entre le wg_2 décadaire, simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT et le LAI décadaire GEOV1. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.	110
Figure 42: Graphe illustrant les décades moyennes sur la période 1997-2010 pour lesquelles la date de récolte est observée par département (numéro en abscisse). En noir, les dates mesurées sur les stations expérimentales d'Arvalis - Institut du végétal et en rouge les décades correspondant au LAImax GEOV1. Le R^2 spatial calculé sur les deux séries de données est également indiqué.	111
Figure 43: Carte représentant le meilleur R^2 obtenu entre le LAI décadaire GEOV1 maximal et le rendement final issu d'Agreste sur la période 1994-2010. Sont représentées par un carré rouge les R^2 non significatif, en disque jaune les R^2 significatifs au seuil de 1% (p -value < 0,01) et en disque noir les R^2 significatifs au seuil de 0,1% (p -value < 0,001). A gauche, les céréales et à droite les prairies naturelles.	112
Figure 44: Les principaux stades phénologiques du blé tendre, situés dans le calendrier cultural. (La France Agricole, http://www.lafranceagricole.fr/).	120
Figure 45: Schéma d'une année culturale simulée avec Panoramix. Les différentes variables agro-météorologiques sont représentées. En vert les stades phénologiques, en bleu les variables hydriques et en orange les variables thermiques.	124
Figure 46: Exemple d'évolution des différentes variables liées à l'état du sol et des forçages atmosphériques tracés par le modèle de culture Panoramix. En haut, l'état de la réserve en eau du sol (en bleu), le drainage (en noir), le déficit hydrique (en orange) et la limite de la réserve de survie (en rouge). La réserve utile est fixée à 140 mm, le sol choisi est de type argileux-limoneux. Au milieu, l'évolution des précipitations totales. En bas, l'évolution des températures minimales (en bleu) et maximales (en rouge). La simulation est réalisée avec les données météorologiques de la station d'observation de Toulouse-Blagnac pour l'année culturale 2002/2003.	125
Figure 47: Carte des 199 sites et leur altitude où sont réalisés les différents jeux de simulations. La distinction entre les sites de la région nord et ceux de la région sud est représentée par un trait rouge situé à 46.8° N de latitude.	128
Figure 48: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations « réf » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale.	128
Figure 49: Schéma de principe de la méthode de calcul fréquentiel. Exemple pour la campagne 1999/2000.	129
Figure 50: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations « fréq » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale.	130
Figure 51: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations « PS » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale. Exemple pour les données de prévision saisonnière à 6 mois d'échéance.	131
Figure 52: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations de contrôle « clim » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale.	132

Figure 53: Illustration de la méthode de désagrégation dynamique (adaptée de D. Viner, Climatic Research Unit – University of East Anglia - Royaume-Uni, http://www.drias-climat.fr/public/shared/downscaling.png).	133
Figure 54: Les deux étapes de désagrégation spatiale de la méthode de descente d'échelle utilisée. A gauche, l'analyse du 1 ^{er} février 1960 à 00UTC de la prévision saisonnière issue du projet ENSEMBLES. Au milieu, la carte des zones « Symposium 2 » et à droite la carte des données interpolées sur la grille Safran.....	137
Figure 55: Diagramme de Talagrand plat illustrant une dispersion d'ensemble parfaite. Dans cet exemple, le nombre de membres de l'ensemble est de neuf. Ainsi, on observe dix classes ou « rang de la vérification ».....	147
Figure 56: Illustrations de diagrammes de Talagrand pour un ensemble sous-dispersif (à gauche) et sur-dispersif (à droite), toujours avec un ensemble de dix membres.	148
Figure 57: Illustrations de diagrammes de Talagrand pour un ensemble surestimant (à gauche) et sous-estimant (à droite), toujours avec un ensemble de dix membres.....	148
Figure 58: Illustration d'un diagramme de fiabilité pour quatre seuils, obtenu dans le cadre de l'évaluation des scores de la prévision saisonnière issue du modèle Arpège (Météo-France). Températures à 2 m prévues pour la période février-mars-avril sur l'Europe du nord. Les scores de BSS (référence : climatologie) sont également mentionnés pour les quatre seuils (Météo-France ; http://elaboration.seasonal.meteo.fr/fr/content/scores-arpège).....	151
Figure 59: Exemple de courbes ROC pour quatre seuils obtenus dans le cadre de l'évaluation des scores de la prévision saisonnière issue du modèle Arpège (Météo-France). Températures à 2 m prévues pour la période février-mars-avril sur l'Europe du nord. Dans certains cas, comme c'est représenté ici, la courbe ROC peut être tracée avec le taux de bonnes prévisions à la place du taux de réussite. L'aire sous la courbe est également mentionnée pour chacune des catégories de prévisions (en bas à droite du graphe) (Météo-France ; http://elaboration.seasonal.meteo.fr/fr/content/scores-arpège).	153
Figure 60: Cartes représentant les dates médianes des six stades phénologiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations « réf ». En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentés les stades : « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte ». En rose, violet et bleu marine sont représentés respectivement les mois de janvier, février et mars. Chacune des autres couleurs représentent une période de quinze jours, de la première quinzaine d'avril jusqu'à la première quinzaine d'août. Plus les couleurs sont « chaudes », plus les dates sont tardives.	155
Figure 61: Boîtes à moustaches des dates médianes de chacun des six stades phénologiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence et pour l'ensemble des sites. En ordonnées, les jours calendaires. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentés les stades : « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte ». Les extrémités des « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales de la distribution. .	157
Figure 62: Évolution temporelle des dates médianes des six stades phénologiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence pour l'ensemble des sites. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentés les stades : « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte ». La date médiane est en noir, la date minimale en rouge et la date maximale en bleu. La médiane de l'ensemble des sites est représentée en trait plein, celle de la région nord en tirets et celle de la région sud en pointillés.	158

Figure 63: Cartes illustrant les valeurs médianes des variables hydriques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épiaison », « état de la réserve utile au stade floraison », « état de la réserve utile au stade maturité », « somme des pluies entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ». Plus la couleur de la légende va vers les tons chauds, plus la quantité d'eau est faible. A noter que pour la variable « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison », l'ordre des couleurs de la légende est inversé en respect de l'orientation des valeurs de cette variable. 161

Figure 64: Boîtes à moustaches des valeurs médianes des prévisions des huit différentes variables hydriques sur la période 1981-2005, obtenus avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épiaison », « état de la réserve utile au stade floraison », « état de la réserve utile au stade maturité », « somme des pluies entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ». Les extrémités des « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales de la distribution. 163

Figure 65: Évolution temporelle des variables hydriques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épiaison », « état de la réserve utile au stade floraison », « état de la réserve utile au stade maturité », « somme des pluies entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ». La médiane de l'ensemble des sites est représentée en trait plein, celle de la région nord en tirets, en pointillés pour la région sud. La valeur médiane est en noir, la valeur minimale en rouge et la valeur maximale en bleu. 165

Figure 66: Cartes illustrant les valeurs médianes des variables thermiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations « réf ». En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison », « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C ». Plus le cumul de températures supérieures à un seuil est élevé, plus les couleurs de la légende vont vers des tons chauds (également pour le cumul de jours « échaudants »). A l'inverse, lorsque le cumul de températures inférieures à un seuil est élevé, les couleurs sont froides. Les sommes sont calculées à partir de températures absolues..... 167

Figure 67: Boîtes à moustaches des valeurs médianes des prévisions des six différentes variables thermiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison », « somme des températures

maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C ». Les extrémités des « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales de la distribution..... 169

Figure 68: Évolution temporelle des variables thermiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison », « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C ». La médiane de l'ensemble des sites est représentée en trait plein, celle de la région nord en tirets, en pointillés pour la région sud. La valeur médiane est en noir, la valeur minimale en rouge et la valeur maximale en bleu. 170

Figure 69: Biais (en haut) et RMSE (en bas) calculés sur les prévisions des stades phénologiques et pour les 199 sites étudiés. Chaque jeu de prévisions est obtenu avec différentes configurations du calcul fréquentiel réalisées par le modèle Panoramix. Pour mieux apprécier les RMSE de chacune des configurations évaluées, sont matérialisées en lignes pointillées les valeurs de RMSE égales à 6, 7 et 8 jours. 172

Figure 70: Prévisions des dates de stades « épi à 1 cm » (à gauche) et « maturité » (à droite) obtenues avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse) et sur : l'ensemble des sites (en haut), les sites au nord (au milieu) et les sites au sud (en bas). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité est le jour de l'année..... 179

Figure 71: Cartes du biais des prévisions des stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et maturité (à droite) obtenu pour chacun des sites avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » sur la période 1981-2005..... 180

Figure 72: Cartes du RMSE des prévisions des stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et maturité (à droite) obtenues pour chacun des sites avec la simulation « ARP3-AS4 » sur la période 1981-2005..... 181

Figure 73: Prévisions des dates de stades « épi à 1 cm » (à gauche) et « maturité » (à droite) obtenues avec le jeu de simulations de contrôle « clim » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse) et sur : l'ensemble des sites (en haut), les sites au nord (au milieu) et les sites au sud (en bas). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité est le jour de l'année..... 182

Figure 74: Prévisions des variables hydriques (intitulés indiqués sur les graphes) obtenues sur l'ensemble des sites avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité est le mm sur tous les graphes. 186

Figure 75: Prévisions des variables thermiques (intitulés indiqués sur les graphes) obtenues sur l'ensemble des sites avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la

droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité du graphe en bas à droite est en jour, les autres sont en °C.....	191
Figure 76: Diagrammes représentant l'EQM et la dispersion calculés par année pour les six stades phénologiques et par région pour le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». En noir est représenté le stade « épi à 1 cm », en bleu le stade « 2 nœuds », en violet le stade « épiaison », en vert le stade « floraison », en rouge le stade « maturité » et en orange le stade « récolte ».....	196
Figure 77: Diagrammes de Talagrand obtenus pour les différents ensembles de prévisions des stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et « floraison » (à droite), réalisés avec le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». A gauche, pour les sites au nord, à droite, pour ceux du sud.....	197
Figure 78: Diagramme de fiabilité et histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité (au nombre de 46) pour les prévisions du stade « épi à 1 cm » sur les sites de la région nord, obtenus avec le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». Les quatre catégories de prévisions sont représentées : les terciles inférieur (en bleu) et supérieur (en rouge), les extrêmes inférieur (en vert) et supérieur (en cyan).....	198
Figure 79: Comme sur la Figure 78, mais pour les sites de la région sud.....	199
Figure 80: Comme sur la Figure 78, mais pour le stade « floraison ».....	200
Figure 81: Comme sur la Figure 80, mais pour les sites de la région sud.....	201
Figure 82: Récapitulatif du SDD et du coefficient de corrélation obtenus pour la prévision des stades phénologiques entre le jeu de simulations « MM3-QQ6 » et « fréq-ens » présentés dans les Sect. 5.1. et 5.2. Pour chaque variable, les scores sont représentés comme l'indique les cellules de gauche. En vert, il est indiqué que le score obtenu avec le jeu de simulations « PS » est meilleur que celui avec « fréq-ens », en rouge le cas contraire et en orange les scores sont identiques. En haut, le graphe représente les scores de l'ensemble des 199 sites, au milieu ceux obtenus pour les sites de la région nord et en bas ceux obtenus pour les sites de la région sud.....	203
Figure 83: Anomalies standardisées annuelles calculées sur l'ensemble des prévisions des stades « épi à 1 cm » et « floraison » pour les jeux de simulations « MM3-QQ6 », « fréq-dét » et « réf » sur la période 1981-2005.....	205
Figure 84: Cartes des BSS calculés par site pour les stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et « floraison » (à droite), obtenus pour les différentes catégories de prévisions avec le jeu de simulations « MM3-QQ4 ». De haut en bas : la catégorie « tercile inférieur », « tercile supérieur », « extrême inférieur » et « extrême supérieur ».....	209
Figure 85: Courbes ROC des prévisions d'ensemble des stades « épi à 1 cm » (à gauche) et « floraison » (à droite) obtenues avec le jeu de simulations « MM3-QQ4 ». Sur les quatre premiers graphes est représentée la catégorie « tercile ». Sur les quatre derniers graphes est représentée la catégorie « extrême ». Dans les deux cas, sont représentés en haut les sites au nord et en bas les sites au sud. L'aire sous la courbe (AUC) est également indiquée dans la légende du graphe.....	212
Figure 86: Récapitulatif du BSS et des courbes ROC obtenus pour la prévision des stades phénologiques entre le jeu de simulations « MM3-QQ6 » et « fréq-ens ». Pour chaque variable, les scores sont représentés comme l'indique les cellules de gauche. En vert, il est indiqué que le score obtenu avec le jeu de simulations « PS » est meilleur que « fréq-ens », en rouge le cas contraire et en orange les scores sont identiques. En haut, le graphe représente les scores pour les sites de la région nord, en bas ceux obtenus pour les sites de la région sud.....	214

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des paramètres d'entrée requis pour le fonctionnement du modèle de surface continentale ISBA.	28
Tableau 2: Récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle Panoramix fixés dans cette thèse.	126
Tableau 3: Récapitulatif des différents jeux de simulations « PS » évalués. La date d'initialisation de chacun d'entre eux est fixée au 1 ^{ier} février. On rappelle que les variables tn, tx et rrtot sont respectivement la température minimale, la température maximale et les précipitations totales.....	142
Tableau 4: Récapitulatif des jeux de simulations : réalisés avec la méthode fréquentielle et celui de référence.	143
Tableau 5: Table de contingence réunissant les quatre termes nécessaires au calcul des scores probabiliste établie pour un pourcentage de membres minimum ayant prévu l'événement dans une catégorie de prévisions.	151
Tableau 6: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des différentes catégories de variables agro-météorologiques obtenues avec le jeu de simulation « fréq-dét ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud.	175
Tableau 7: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des stades phénologiques obtenues avec les différents jeux de simulations « PS ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud. Le meilleur score parmi tous les jeux de simulations est en gras.....	184
Tableau 8: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des variables hydriques obtenues avec les différents jeux de simulations « PS ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud. Le meilleur score parmi tous les jeux de simulations est en gras.....	189
Tableau 9: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des variables thermiques obtenues avec les différents jeux de simulations « PS ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud. Le meilleur score parmi tous les jeux de simulations est en gras. Les scores de la variable « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C entre les stades grain-laiteux et maturité » sont en jours.	194

CHAPITRE I

I. Introduction : Application à l'agriculture de la prévision saisonnière et évaluation à l'échelle de la France.

1. Contexte et enjeux de la thèse

L'agriculture est un secteur économique essentiel et reste aujourd'hui le premier secteur d'activité dans de nombreux pays. Avec une population mondiale passant d'un milliard au début du XIX^{ème} siècle, à plus de sept milliards aujourd'hui (Population Reference Bureau, www.statistiques-mondiales.com/croissance_population.htm), les besoins alimentaires n'ont cessé de croître. Une augmentation considérable de la production mondiale de denrées alimentaires est ainsi nécessaire chaque année dans un contexte climatique de plus en plus sévère (IPCC, 2014). En effet, les systèmes agricoles sont très vulnérables à la variabilité du climat et les agriculteurs doivent composer avec ce facteur pour rentabiliser leur activité (Hoogenboom, 2000). A cause de la limitation des surfaces cultivables, l'amélioration du rendement est un moyen de répondre à une demande croissante en denrées agricoles. Au cours du XX^{ème} siècle, les rendements agricoles ont été améliorés grâce à des techniques culturales toujours plus performantes et grâce aux progrès de la sélection variétale. En Europe, les capacités techniques et la génétique ne permettent plus une augmentation significative des rendements, qui stagnent depuis les années 90 (Brisson et al., 2010). La stagnation des rendements est concomitante à une hausse de la variabilité du climat (Gate et al., 2010). Dans un contexte de changement climatique, la probabilité d'occurrence d'événements extrêmes est jugée à la hausse (IPCC, 2014). Ces dernières années, la production agricole a été insuffisante dans plusieurs régions du monde (de 2007 à 2009 par exemple ; FAO, www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr/). Cela a déclenché une crise alimentaire majeure en 2009, qui est par ailleurs la première année où l'on a atteint le seuil du milliard d'individus jugés sous-alimentés dans le monde (FAO, <http://www.fao.org/news/story/en/item/20568/icode/>). Cette crise s'est traduite par une flambée du cours des céréales, avec +70% d'augmentation du cours du blé tendre entre 2009 et 2010 (INSEE, http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=21&ref_id=17634&page=rapports/bilan_2011/bilan_2011_agriculture.htm). C'est pourquoi il est indispensable de renforcer et d'améliorer les outils permettant d'éviter ou au moins de limiter les situations de pénurie de denrées alimentaires. Tout l'enjeu consiste donc à anticiper les anomalies de rendement et de proposer des solutions adaptées aux acteurs du monde agricole. Réduire le risque associé à la hausse de variabilité naturelle du climat présente un grand intérêt afin d'augmenter la productivité et la qualité des cultures, tout en protégeant l'environnement. Une alarme précoce d'occurrence d'un événement extrême pourrait fournir une information importante qui serait utilisée pour optimiser la production agricole (Ogallo et al., 2000). Cependant, il est possible que cette alarme précoce ait aussi pour conséquence d'alimenter la spéculation et déstabiliser les marchés financiers des denrées alimentaires. Par exemple, en

2014 le Bureau Météorologique Australien a prévu avec une forte probabilité l'occurrence d'un événement météorologique majeur dans les mois suivants, dont les conséquences pouvaient fortement impacter les récoltes mondiales. Cela a eu pour conséquence l'augmentation de l'inflation des prix alimentaires dans de nombreux pays vulnérables aux aléas climatiques (Le Monde, 14 juin 2014).

Les premières prévisions historiques à l'échelle de la saison sont nées avec l'élaboration des dictons et des proverbes, basés sur la répétition d'observations ponctuelles et locales, couplées à leurs conséquences sur les cultures. Ce lien empirique, souvent erroné et statistiquement peu fiable, fut la première forme de prévision. Elle demeure encore de près ou de loin la stratégie d'élaboration des prévisions contemporaines : à partir d'un jeu d'observations, un système basé sur la connaissance de ses interactions avec l'environnement (météorologie, agronomie) est utilisé afin de réaliser une prévision. Avec l'arrivée des systèmes informatiques et avec l'augmentation de la puissance de calcul, les météorologistes ont développé durant ces cinquante dernières années des modèles numériques permettant l'élaboration de prévisions à échéance saisonnière (Déqué, 2003). Ces systèmes intègrent les connaissances en météorologie et sur les interactions océan-atmosphère à la pointe de la recherche scientifique. Plus récemment, des moyens satellitaires ont été déployés pour l'observation de la Terre. L'observation des surfaces agricoles permet ainsi d'obtenir des indicateurs afin d'anticiper les anomalies de rendement à l'échelle du globe. Combiner prévisions et observations satellitaires offre la possibilité de délivrer une information utile pour le secteur agricole afin d'adapter le calendrier cultural face aux événements climatiques à venir.

La France est soumise à une variabilité climatique importante, gouvernée par les dépressions provenant de l'océan Atlantique. Les régions méditerranéennes sont marquées par des déficits hydriques importants l'été, mais également par des précipitations localement intenses. Malgré cela, la France est le premier producteur européen de céréales et notamment de blé (Agreste, agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Gaf13p121-126.pdf). Le blé tendre, première céréale cultivée en France, est très vulnérable aux facteurs climatiques. Pour que la plante ne soit pas pénalisée au cours de son cycle, il convient de positionner la date de semis de façon à réduire le plus possible les facteurs limitants (Gate, 1995). Le cycle cultural du blé tendre s'étalant sur une grande période de l'année, de nombreux événements peuvent être à l'origine de la variabilité des rendements. Les prairies interviennent pour une part importante dans l'alimentation des ruminants d'élevage en France. Destinés à être fauchés ou à être pâturés, les couverts prairiaux occupent une place majeure dans l'agriculture de nombreuses régions. Dans le monde, les deux tiers de la surface agricole correspondent à des prairies ou des pâturages permanents. Malgré un fort recul de la surface occupée par les prairies en France depuis les années 70, un cinquième de la surface agricole en France est encore aujourd'hui occupé par les prairies (Institut de l'élevage, http://www.agrireseau.qc.ca/bovinsboucherie/documents/hors_serie_PRAIRIE-v.pdf). Enfin, la croissance des prairies est fortement influencée par les aléas climatiques.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer dans quelle mesure des outils de modélisation des couverts agricoles peuvent être optimisés à l'échelle de la France. Pour cela, un modèle générique des surfaces continentales est employé pour représenter la croissance des céréales

d'hiver et de printemps ainsi que des prairies naturelles. Le potentiel prédictif de produits satellitaires est également examiné. Enfin, un modèle agronomique forcé par des prévisions saisonnières des variables atmosphériques permet de représenter la croissance future du blé tendre en France et d'évaluer quels facteurs limitants vont être à l'origine d'une perte de rendement.

2. Représentation des surfaces agricoles en France

2.1. La culture du blé tendre

2.1.1. Définition et chiffres clés

Les céréales sont des graminées annuelles aux grains comestibles. Les principales céréales sont : le blé, le riz, l'orge, l'avoine, le maïs, le mil, le sorgho et le millet. Or, seul le blé donne un produit panifiable grâce aux propriétés complémentaires de ses protéines et de son amidon (Université Pierre et Marie Curie, www.snv.jussieu.fr/bmedia/blepain/1ble/11plant/plante.htm). Le blé est une monocotylédone appartenant au genre *Triticum* de la famille des *Gramineae* (graminées), un groupe de végétaux qui signifie étymologiquement « producteur de grains ». C'est une céréale dont le grain est un « fruit sec indéhiscant blanc ou roux, ovoïde, appelé caryopse, constitué d'une graine et d'un tégument » (Gate, 1995). Le blé tendre (*Triticum aestivum vulgare*), comme le blé dur (*Triticum turgidum*), est cultivé pour l'alimentation animale et humaine. C'est la culture principale des régions de climat tempéré et notamment de la France.

Dans le monde, avec environ 225 millions d'hectares (Mha) en 2009, la superficie en blé devance largement celles du riz et du maïs (155 Mha chacune). La production mondiale est d'environ 704 millions de tonnes (Mt) en 2013 (niveau historique), dont 660 Mt pour le blé tendre, le reste pour le blé dur. Le rendement moyen mondial est d'environ 3 t/ha en 2009 (InfoCereales, <http://www.infocereales.fr/>). En France, premier producteur européen de blé avec 28% de la récolte européenne en 2012, la culture du blé tendre représente en 2012 près de 5 Mha, pour une production en 2012 de 35,5 Mt (Agreste, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Gaf13p121-126.pdf>). Cela représente un rendement de 7,3 t/ha. Il existe en France plus d'une centaine de variétés inscrites au catalogue officiel, qui permettent de répondre à des demandes très diverses. Chaque variété est notée en fonction de sa précocité, de sa résistance aux accidents abiotiques (froid, verse...) et aux maladies, ainsi que sur sa productivité. Les variétés les plus cultivées actuellement sont les variétés d'hiver ou semi-alternatives et qui sont classées « panifiable supérieur ».

2.1.2. Ecophysiologie de la plante

Le blé tendre d'hiver est semé à l'automne. En effet, les variétés de type « hiver » nécessitent une exposition de l'ordre de quelques semaines à des températures fraîches pour initier la transition florale et donc la montée en épi. Ce besoin, appelé « vernalisation », est contrôlé génétiquement. Les variétés ont été progressivement sélectionnées pour allonger la durée du cycle de croissance et donc accroître le potentiel de rendement. Au cours de son cycle, la culture franchit différents stades de développement, qui marquent des changements de métabolisme interne et donc de sensibilité aux stress abiotiques. Les stades sont séparés par une durée appelée phase. Chaque stade de développement permet l'identification des phases critiques lors de la croissance de la plante (Gate, 1995). Le cycle du blé tendre peut se décomposer en trois phases successives (Figure 1) :

- le tallage : période végétative au cours de laquelle les organes de la plante se différencient (tiges, feuilles, racines) et qui permet d'assurer la nutrition et le maintien des fonctions végétatives de la plante ;
- la montaison : période de formation des épis ;
- le gonflement : période de formation des grains.

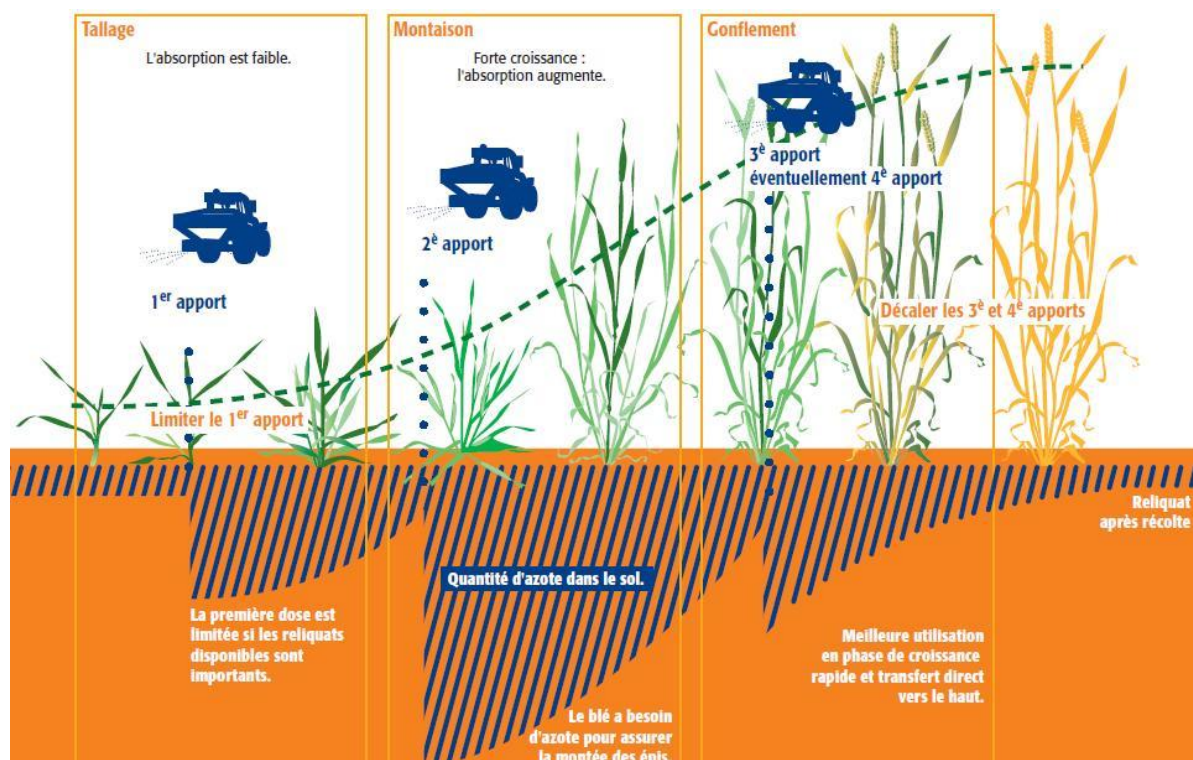


Figure 1: Cycle du blé tendre à travers les trois grandes étapes de la croissance, représentées avec la gestion des apports azotés (Arvalis - Institut du végétal, <http://www.arvalis-infos.fr/>).

Il existe près d'une dizaine de stades phénologiques propres au blé tendre. Pour chacune de ces phases, des accidents climatiques induisent des modifications importantes du développement de la culture. Il s'agit essentiellement des températures froides qui vont soit détruire les tissus dans le cas du gel hivernal, soit altérer des phases critiques (cas du froid à la méiose pollinique). Les températures chaudes peuvent provoquer un dépassement de l'optimum thermique de fonctionnement de la plante à la floraison ou lors du remplissage des grains. Enfin, le stress hydrique joue également un rôle néfaste durant toute la croissance de la culture. Durant certaines phases sensibles de la plante, le manque d'eau, la plupart du temps provoqué par des sécheresses en fin de cycle, est un facteur climatique agissant fortement sur les composantes du rendement et sur la biomasse de la plante (Debaeke et Bertrand, 2008).

Néanmoins, la plante est en mesure de s'adapter aux conditions climatiques. Le rendement est le résultat d'une interaction complexe entre facteurs climatiques et édaphiques¹. Par exemple, les interactions rayonnement/température agissent sur le nombre de grains, les interactions température/durée du jour sur le nombre d'épillets total et les interactions température/déficit en eau sur le « poids de mille grains » (PMG).

La variation d'un facteur climatique ne doit cependant pas être analysée de manière isolée, mais en rapport avec le développement effectif de la culture : par exemple, un faible niveau de rayonnement ne sera pas préjudiciable si les températures associées restent fraîches, ralentissant le développement phénologique de la culture. Le rapport des deux, appelé quotient photothermique ($J/cm^2/deg\acute{e}-jours$), est souvent utilisé pour évaluer l'effet combiné de ces deux facteurs (Gate, 1995). Ce quotient définit un niveau d'offre pour la croissance par unité de temps biologique. Il permet d'expliquer une part importante des variations du nombre de grains/m².

2.2. Les variables biogéophysiques terrestres

2.2.1. La modélisation des surfaces continentales

Les processus physiques se produisant entre la surface terrestre et l'atmosphère, décrits à travers des échanges d'eau et d'énergie, sont essentiels dans la connaissance du système climatique.

Les modèles des surfaces continentales permettent de comprendre et de représenter explicitement les variables de surface et les échanges à l'interface sol-plante-atmosphère. Ils simulent les flux d'eau et d'énergie à l'interface surface-atmosphère, ainsi que le stock d'eau dans le sol. Ils sont souvent appelés modèles SVAT (« Soil Vegetation Atmosphere Transfer »). Ce sont des modèles génériques dans le sens où tous les types de végétation sont simulés par le même modèle. Ils simulent les transferts d'eau et de chaleur du système sol-plante, possèdent une représentation du manteau neigeux et utilisent des cartes numériques des caractéristiques des surfaces (occupation des sols, albédo de surface, indice foliaire de la

¹ Facteurs édaphiques : facteurs externes liés au sol.

végétation, rugosité aérodynamique, propriétés des sols). Ils apportent les conditions aux limites essentielles au fonctionnement des modèles atmosphériques décrivant les processus météorologiques. A l'inverse, en utilisant les forçages météorologiques apportés par les modèles atmosphériques (température et humidité de l'air, rayonnement incident, précipitations, vitesse du vent), qu'il s'agisse de données prévues, mesurées ou issues de réanalyses², les modèles de surface peuvent simuler les flux et certaines variables biogéophysiques. La compréhension des processus de surface peut ainsi être améliorée et la généricité de ces modèles permet de simuler les échanges sur n'importe quel point de la surface de la Terre, en particulier la variabilité interannuelle des flux d'eau et d'énergie et de l'humidité du sol. Cela est hors de portée des réseaux de mesures in situ.

Dans les années 60, les modèles numériques des surfaces continentales étaient uniquement capables de représenter les échanges d'eau et d'énergie entre un réservoir de sol à une ou deux couches et l'atmosphère (à travers les flux de chaleur sensible et latente et le rayonnement net). La végétation n'était alors pas encore explicitement représentée mais seulement paramétrée. C'est ainsi qu'ont été mises au point l'approche « bucket » (Manabe, 1969) pour représenter le sol, puis la méthode « force-restore » (Deardroff, 1977, 1978). Plus tard, il est apparu indispensable de représenter la végétation afin d'avoir une description de son évolution au fil du temps et dans l'espace. Les modèles ont donc évolué afin de prendre en compte l'interaction entre le sol et la plante d'une part et la plante et l'atmosphère d'autre part. Les processus d'interception de l'eau par la végétation, la transpiration foliaire, ont été inclus dans cette nouvelle génération de modèles. Dans les modèles SVAT, le bilan hydrique et le bilan d'énergie sont résolus à un pas de temps horaire ou plus détaillé, en tenant compte de la végétation. Les versions modernes de ces modèles simulent également les flux de carbone (la photosynthèse est représentée). Ils simulent l'évolution spatiale et temporelle des variables biogéophysiques (par exemple l'humidité du sol ou indice foliaire de la végétation).

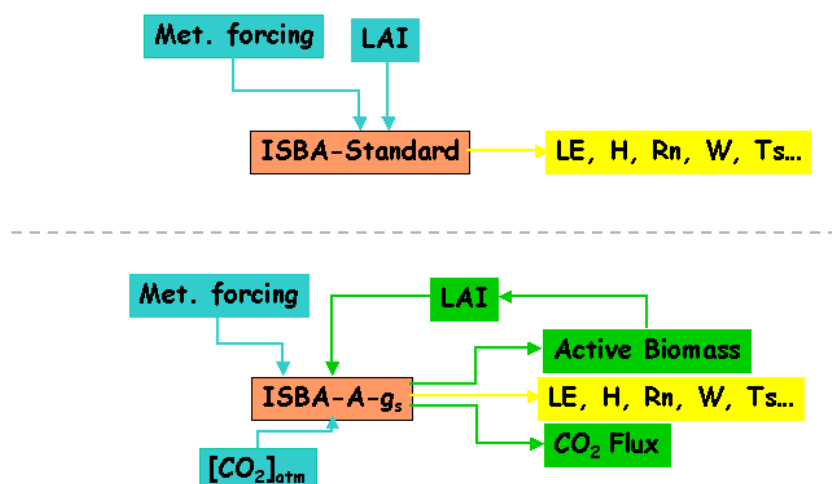


Figure 2: Schéma de principe du modèle ISBA-standard (en haut) et ISBA-A-gs (en bas) (CNRM, www.cnrm.meteo.fr).

² Réanalyses : données permettant d'obtenir un portrait exhaustif de l'état du système terrestre, combinant prévisions et observations. Elles sont produites sur une grille numérique.

Le modèle du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France, appelé « Interactions entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère » (ISBA ; Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996), a été créé dans les années 80/90 (Figure 2). Le modèle ISBA a été conçu de façon à ce que relativement peu de paramètres soient requis en entrée du modèle. Des paramètres primaires et secondaires sont utilisés (Tableau 1). Ce modèle SVAT est inclus dans le système de prévisions opérationnelles de Météo-France, comme « Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle » (ARPEGE) ou « Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational » (ALADIN), dans le but d'apporter les conditions aux limites nécessaires aux prévisions météorologiques (Giard et Bazile, 2000). Il est également inclus dans le modèle climatique du CNRM ARPEGE-Climat (Mahfouf et al., 1995) et dans le modèle hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (Habets, 1998 ; Habets et al., 2008).

Paramètres « primaires »	Paramètres « secondaires » (en fonction de la valeur des paramètres « primaires »)
Type de sol : proportion en argile (%) et en sable (%)	contenu en eau du sol à saturation w_{sat} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
	contenu en eau du sol à la capacité au champ w_{fc} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
	contenu en eau du sol au point de flétrissement w_{wilt} ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)
	fraction de végétation dans la maille veg ($0 \leq \text{veg} \leq 1$)
Type de végétation (12 disponibles)	indice foliaire « Leaf Area Index » ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)
	résistance stomatique minimale R_{smin}
	longueurs de rugosité dynamique $z_{0\text{m}}$ et thermique $z_{0\text{h}}$
	profondeurs des couches de sol d_i
	albédo α et émissivité ϵ de la surface

Tableau 1: Liste des paramètres d'entrée requis pour le fonctionnement du modèle de surface continentale ISBA.

La modélisation du cycle du carbone dans ISBA a été mise en œuvre dans les années 1990/2000 avec le modèle ISBA-A-gs (A-gs pour assimilation-conductance stomatique ; Calvet et al., 1998 ; Gibelin et al., 2006) (Figure 2). L'objectif de cette nouvelle version est de représenter la rétroaction de la végétation dans le système climatique et d'améliorer la représentation des processus liés à la végétation (notamment l'interception du rayonnement solaire par le couvert végétal, la transpiration foliaire et la réponse à l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique). A chaque type de végétation sont associés des paramètres de surface, notamment ceux liés à la photosynthèse (répertoriés dans

Gibelin et al., 2006) et sont disponibles dans la base de données ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013) pour chaque type de végétation. Les paramètres de photosynthèse ont été calibrés dans ISBA-A-gs grâce à une méta-analyse effectuée en recueillant des valeurs optimisées pour un grand nombre d'espèces issues de mesures écophysiologicals publiées (Calvet, 2000 ; Calvet et al., 2004).

Les modèles ISBA et ISBA-A-gs sont actuellement utilisés dans la plateforme de modélisation SURFEX (SURFace EXternalisée ; Le Moigne, 2009 ; Masson et al., 2013), développée par le CNRM. En France, un autre modèle des surfaces continentales permettant la modélisation du cycle du carbone a été développé par les laboratoires de l'Institut Pierre Simon Laplace : « ORganising Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms » (ORCHIDEE ; Krinner et al., 2005). Couplés à un modèle atmosphérique, ces modèles permettent de représenter le rôle de la biosphère terrestre dans le système climatique. Des applications d'ISBA-A-gs ont été explorées dans de nombreux domaines comme l'hydrologie de grande échelle (Szczypta et al., 2011), l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (Calvet et al., 2008 ; Queguiner et al., 2011) ou encore le suivi des sécheresses (Barbu et al. 2014 ; Szczypta et al., 2014).

Un autre domaine d'utilisation d'ISBA-A-gs concerne l'agriculture. En Europe, Brisson et al. (2010) et Gate et al. (2010) ont montré que les rendements des cultures stagnent depuis les années 90. Le facteur climatique apparaît comme la principale source de variabilité des rendements. Cette constatation fait suite à une tendance positive des rendements mise en évidence en Europe depuis le milieu du XXème siècle. Smith et al. (2010a, b) montrent que des statistiques agricoles peuvent être utilisées pour évaluer les simulations des cultures à l'échelle des pays. Ainsi, en France, des statistiques annuelles de rendements à l'échelle départementale ont permis d'évaluer la capacité du modèle ISBA-A-gs à représenter la variabilité interannuelle des rendements des céréales d'hiver et de printemps, ainsi que des prairies naturelles (Calvet et al., 2012). Cette étude a été réalisée en utilisant la représentation du sol classiquement utilisée dans le modèle ISBA, c'est-à-dire la version « force-restore » avec deux couches racinaires et un profil racinaire uniforme. Les résultats obtenus par Calvet et al. (2012) vis-à-vis de la variabilité des rendements des céréales sont de moins bonne qualité que ceux obtenus pour les prairies naturelles. La représentation d'un profil racinaire plus réaliste, rendue possible par l'utilisation de la version multi-couches du modèle (ISBA-DF (Boone et al., 2000 ; Decharme et al., 2011) reste à exploiter dans le but d'améliorer la variabilité des couverts agricoles simulée avec le modèle ISBA-A-gs.

2.2.2. Modélisation du stress hydrique

L'eau occupe une place essentielle dans la représentation des processus de surface. L'eau est un facteur limitant de la croissance des plantes qui nécessite d'être correctement représenté dans les modèles, notamment au travers de l'humidité du sol et de son impact sur la photosynthèse. La végétation joue un rôle clé dans le système climatique, car elle contrôle les flux de vapeur d'eau entre le sol et l'atmosphère au travers des processus de photosynthèse et de transpiration foliaire. A l'échelle de la feuille, les échanges en dioxyde de carbone avec

l'atmosphère ont lieu grâce aux stomates présents à sa surface. Leur ouverture est régulée par les conditions environnementales et par l'eau disponible dans le sol. Cette ouverture est étroitement liée à la photosynthèse (Jacobs, 1994 ; Jacobs et al., 1996). Elle conditionne par ailleurs la transpiration foliaire. L'indice foliaire de la végétation ou LAI (Leaf Area Index) désigne la surface d'échange du couvert végétal avec l'atmosphère et joue un rôle déterminant dans la transpiration à l'échelle du couvert. Le LAI est exprimé en $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$.

L'humidité du sol, simulée ou observée par télédétection, peut être utilisée dans le but d'anticiper les rendements agricoles (Champagne et al., 2012) ou de détecter les sécheresses agricoles (Crow et al., 2012 ; Szczypta et al., 2014 ; Kong et al., 2011). Selon le type de plante considéré, les conséquences de la sécheresse sont différentes. Dans ISBA-A-gs, l'impact du stress hydrique sur les paramètres de la photosynthèse est représenté pour divers types de végétation (Calvet, 2000 ; Calvet et al., 2004). Dans ce modèle, il est en particulier possible de différencier des stratégies d'évitement et de tolérance à la sécheresse. Calvet et al. (2012) ont utilisé des statistiques agricoles pour montrer que la variabilité interannuelle de la production de biomasse ne peut être simulée correctement avec ISBA-A-gs, pour les prairies et les céréales d'hiver et de printemps, qu'en utilisant les stratégies adoptées par la plante, de tolérance et d'évitement, respectivement. D'autre part, les simulations de Calvet et al. (2012) mettent en évidence une relation statistique entre l'humidité du sol racinaire simulée moyennée sur les mois de mai à juillet et la biomasse aérienne maximale des céréales et des prairies simulées. Cela montre que le contenu en eau du sol à une date donnée peut avoir un potentiel prédictif sur la biomasse. Il apparaît nécessaire d'affiner la période pour laquelle cet indicateur est pertinent et s'il permet d'anticiper l'état futur de la croissance des couverts agricoles telle qu'elle est caractérisée par les observations du LAI par télédétection (voir Sect. 2.3.). Des travaux de ce type ont été réalisés par Szczypta et al. (2014) avec la version trois couches du modèle ISBA-A-gs et à une résolution de $0,5^\circ$ sur l'Europe, avec des résultats peu concluants sur la France. Il est donc nécessaire d'approfondir cette approche à l'échelle de la France, à une meilleure résolution spatiale, en utilisant les observations de rendement en parallèle aux observations satellitaires de LAI et en utilisant diverses configurations du modèle ISBA-A-gs.

L'interaction entre le stress hydrique et la végétation, via les processus de la photosynthèse pilotant la croissance de la plante et plus particulièrement les couverts agricoles, sera particulièrement étudiée dans cette thèse.

2.3. L'observation des surfaces continentales depuis l'espace

Les simulations des surfaces continentales doivent être comparées à des observations, afin d'être calibrées et validées. La combinaison des données de la télédétection spatiale avec les modèles est susceptible d'améliorer la représentation des surfaces continentales.

Afin de valider les modèles, ou pour initialiser les variables pronostiques (l'humidité du sol par exemple), on peut utiliser des mesures in-situ produites par des campagnes expérimentales ou des réseaux de mesure sur quelques sites localisés. L'inconvénient de cette méthode est que ces données ne concernent qu'un nombre limité de sites, souvent sur des

périodes de temps courtes. Une autre méthode a été proposée au cours des années 80. Elle consiste à utiliser la télédétection spatiale. Ces données proviennent de mesures satellitaires obtenues à partir de capteurs embarqués. Plusieurs gammes de longueurs d'ondes du spectre électromagnétique peuvent être utilisées. La télédétection micro-ondes donne accès à l'humidité superficielle du sol, soit par radiométrie (systèmes passifs mesurant l'émission naturelle de la surface), soit par mesure d'un signal radar rétrodiffusé par la surface (systèmes actifs). Ces mesures peuvent être reliées à l'humidité superficielle du sol, à condition que la végétation ne soit pas trop dense (Schmugge, 1983). La télédétection dans la gamme des longueurs d'ondes du visible permet de suivre l'état de la végétation. L'absorption et la réflectance du rayonnement solaire par la végétation varie selon les longueurs d'ondes, en relation avec la portion du spectre solaire utilisé par la photosynthèse. La mesure de ces grandeurs physiques permet de produire des indices de végétation, comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ou le LAI. Le LAI exprime le rapport entre la surface des feuilles et la surface de terrain occupée par la végétation (Bonn et Rochon, 1992). L'obtention des grandeurs physiques des surfaces continentales est un domaine d'application de la télédétection. En Europe, des systèmes de production opérationnels permettent un accès libre à des produits à basse résolution spatiale (1 à 5 km pour les produits concernant la végétation, 1 à 25 km pour l'humidité superficielle du sol), en temps quasi-réel. On peut citer quelques exemples de produits disponibles, tels que le « Satellite Application Facilities » LSA-SAF et H-SAF d'EUMETSAT, et le « Global Land Service » de Copernicus (à partir de SPOT/VEGETATION et des capteurs assurant la continuité de SPOT/VEGETATION). Toutes ces séries ont été évaluées de manière à vérifier d'une part leur qualité vis-à-vis d'observations et d'autre part les unes par rapport aux autres (Garrigues et al., 2008). La Figure 3 montre un exemple de produit LAI fourni par le LSA-SAF.

Des exemples d'utilisation de ces produits pour la validation et l'intercomparaison des simulations des modèles ISBA-A-gs et ORCHIDEE sont donnés par Lafont et al. (2012) et Szczypta et al. (2014). En particulier, des indicateurs comme la durée du cycle annuel de croissance, la sénescence de la végétation, la variabilité interannuelle du LAI ou la variation temporelle de l'humidité superficielle du sol ont également pu être validés grâce à la télédétection (Szczypta et al., 2014).

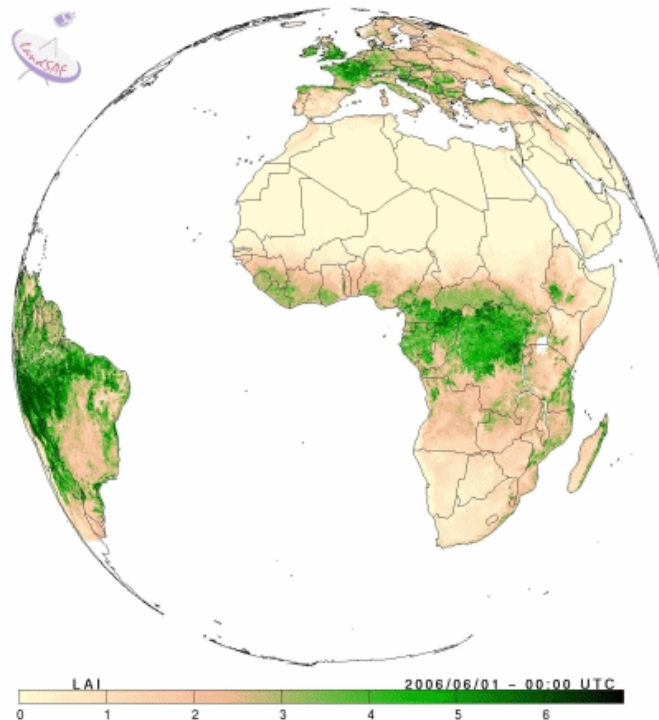


Figure 3: Exemple de production de carte de LAI obtenu à partir de données satellites (LSA-SAF, <http://landsaf.meteo.pt/>).

Ces produits sont cependant affectés par des incertitudes générées par les erreurs d'observation, par les facteurs perturbateurs de la mesure ou par les imperfections des algorithmes d'inversion qui produisent les variables biogéophysiques. L'utilisation de capteurs embarqués successifs différents rend également les séries temporelles discontinues et un travail d'homogénéisation est nécessaire pour obtenir une série sur une longue période. Ainsi, des précautions doivent être prises afin d'obtenir une mesure correcte et utilisable.

Néanmoins, la précision des produits satellitaires est de plus en plus grande. Des échelles spatiales décamétriques sont désormais accessibles à partir de missions récentes (par exemple FORMOSAT-2), ou à venir (Venus, Sentinel-2).

3. Etat de l'art de la prévision saisonnière du temps

3.1. Eléments de physique de l'atmosphère

3.1.1. Variabilité basse fréquence de l'atmosphère

Le système climatique est formé de l'atmosphère, des océans, de la biosphère continentale et de la cryosphère (Figure 4). Chacun de ces éléments interagit avec les autres à différentes échelles de temps et d'espace, principalement par des échanges d'eau, de carbone et

d'énergie. Aux latitudes tempérées (entre 30°N et 70°N), la circulation atmosphérique moyenne saisonnière est principalement gouvernée par les ondes quasi-stationnaires d'échelle planétaire (de l'ordre de 1000 à 10000 km) (Calas, 2014).

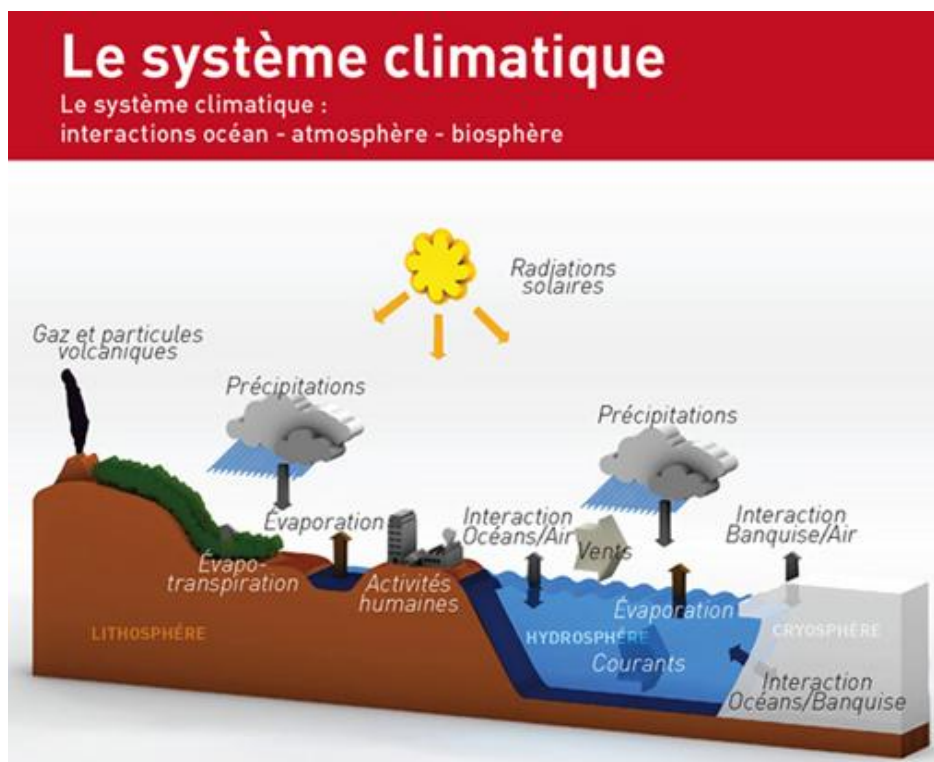


Figure 4: Le système climatique schématisé avec les interactions entre les différentes composantes (Réseau Action Climat France, <http://www.rac-f.org/>).

Cette circulation est constamment modifiée au fil du temps, ce qui constitue la variabilité du climat (Figure 5). Cette variabilité est majoritairement liée à des phénomènes se produisant à des échelles de temps inférieures à celles du climat (échelle synoptique). Au-delà des changements du temps sensible que nous percevons localement, tels que les alternances de jours de pluie et de beau temps, se produisent des variations climatiques à grande échelle. Par exemple, l'hiver 2013/2014 très doux en France, a été marqué par une circulation atmosphérique générale provenant principalement de l'océan Atlantique. Avec une anomalie sur la saison de +1,8°C, cet hiver se place au 2^{ème} rang ex-aequo des hivers les plus doux depuis le début des mesures en 1900 (Météo-France, www.meteofrance.fr). Enfin, à une échelle temporelle annuelle, des processus planétaires interviennent, pilotés à la fois par l'atmosphère et l'océan. L'un des principaux modes de variabilité à cette échelle de temps est l'Oscillation Australe - El Niño, ou « El Niño Southern Oscillation » (ENSO ; Neelin et al., 1998).

Ce phénomène est composé de deux phases. La phase El Niño : une anomalie océanique observée dans le Pacifique, au large des côtes d'Amérique du Sud (de l'Equateur au Chili) et durant la période de Noël (d'où l'origine de son nom en espagnol : l'enfant) (Trenberth, 1997). Sa fréquence d'occurrence est irrégulière, entre 2 et 7 ans. Sa durée est également

variable, de quatre à douze mois. El Niño est caractérisé par un courant d'eau chaude provenant de l'ouest du bassin Pacifique et qui migre à l'est vers les côtes du Pérou (NOAA, www.pmel.noaa.gov/tao/el-nino/el-nino-story.html). Son origine provient d'un affaiblissement des alizés (vents d'est) qui ralentit les courants de surface de l'océan jusqu'à en inverser le sens. Il engendre une modification de la thermocline³ (rééquilibrage horizontal de celle-ci) et réduit ainsi le phénomène d'upwellings⁴ près des côtes d'Amérique du Sud (avec des conséquences négatives pour la pêche locale). L'autre phase, appelée La Niña, est le phénomène opposé, d'intensité moins marquée. Ce phénomène n'a pas nécessairement lieu après El Niño.

Outre l'influence majeure du phénomène ENSO sur le climat global, il existe d'autres modes de variabilité à grande échelle. Dans l'hémisphère nord, l'Oscillation Arctique (ou AO : « Arctic Oscillation ») est le principal mode de variabilité de la circulation à grande échelle de l'atmosphère aux moyennes latitudes. Elle est définie dans l'hémisphère nord sur des échelles de temps allant de plusieurs semaines à plusieurs décennies (Thompson et Wallace, 1998). Il s'agit d'une oscillation de pression atmosphérique au niveau de la mer entre les régions arctiques et les moyennes latitudes. Elle est reliée à l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO : « North Atlantic Oscillation »), qui représente les changements de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande (Hurrell, 2003). La NAO est le principal mode de variabilité climatique dans la région constituée de l'Atlantique Nord et de l'Europe. Il contribue d'ailleurs à la moitié des régimes de temps sur l'Europe occidentale (Cassou et al., 2005).

Les régimes de temps permettent de caractériser les situations météorologiques en Europe. A une échelle temporelle intramensuelle, ils sont notamment liés à une variation rapide des champs de pression à grande échelle et des centres d'actions associés (Calas, 2014). Leur origine provient des ondes stationnaires. Chaque régime de temps est caractérisé par une grande cohérence géographique des champs de pression, majoritairement due à la répartition entre les continents et les océans. Dès l'installation d'un régime de temps spécifique, les conditions météorologiques restent proches de certains états préférentiels durant une période de l'ordre de cinq à quinze jours. Les changements de temps qui se produisent à nos latitudes peuvent en fait correspondre au passage d'un régime de temps à un autre. La succession des régimes de temps n'est cependant pas entièrement comprise par la communauté scientifique. Quatre régimes de temps récurrents sur la partie extratropicale de l'Atlantique nord et sur l'Europe ont été identifiés (Vautard, 1990). La phase positive de l'Oscillation Nord-Atlantique est définie par un renforcement de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande. Ce régime est appelé régime NAO+ et a une fréquence d'occurrence de 30%. Quant à la phase négative, elle se caractérise par un affaiblissement de ces deux centres d'anomalies de pression, on parle alors du régime NAO-, avec une fréquence

³ Thermocline : limite entre les eaux chaudes de surface et les eaux froides plus profondes où les gradients thermiques verticaux sont les plus forts.

⁴ Upwellings : terme anglais désignant les remontées d'eau profonde le long des côtes. Ces courants ascendants (opposés aux « downwellings », courants descendants) apportent de l'eau fraîche et des nutriments en profondeur, favorisant ainsi la pêche dans ces régions en bénéficiant.

de 20%. Ces deux régimes d'orientation zonale semblent être spatialement symétriques. Deux autres régimes indépendants de la phase NAO ont été identifiés. La répartition spatiale de leurs anomalies de pression est cette fois méridienne. Le gonflement de l'anticyclone des Açores sur le bassin atlantique donne le régime de dorsale atlantique, avec une fréquence de 23%. Enfin, l'anticyclone persistant sur le nord de l'Europe et la Scandinavie est appelé régime de blocage et s'observe avec une fréquence de 27%. Les régimes de temps présentent plusieurs échelles de variabilité (Calas, 2014) :

- une variabilité à l'échelle d'une ou plusieurs décennies (prédominance du régime NAO- entre 1960 et 1980 puis du régime NAO+ de 1980 à 2000).
- une variabilité interannuelle (exemple : l'hiver 1995 a été marqué par un régime NAO fortement positif et l'hiver 1996 par un régime NAO fortement négatif).
- une variabilité intra-saisonnière (exemple : décembre 1989 a été marqué par un régime NAO négatif et janvier 1990 par un régime NAO fortement positif).
- une variabilité haute-fréquence (de quelques jours à une ou deux semaines) qui représente l'alternance entre régimes d'une semaine à l'autre.

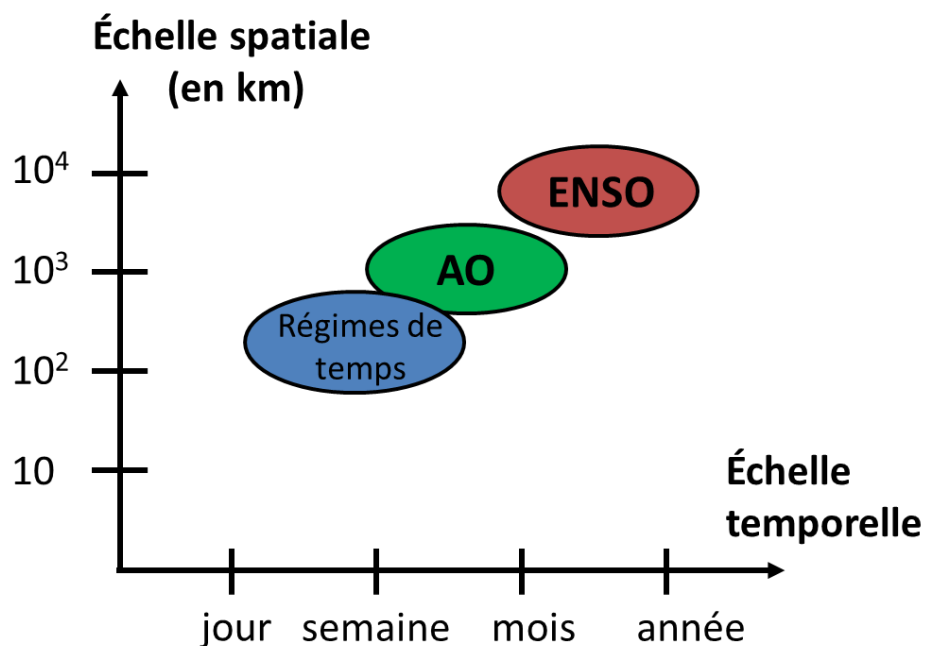


Figure 5: Principaux modes de variabilité ayant une influence directe ou indirecte sur l'Europe.

La prévision de ces régimes constitue un élément clé pour connaître le temps sensible des prochaines semaines, voire du prochain mois. Les précurseurs de ces régimes concourent à la prévisibilité au temps qu'il fera. De manière générale, les éléments qui constituent le système climatique peuvent apporter de la prévisibilité avec des échelles de temps qui leurs sont propres.

3.1.2. Notions de prévisibilité

Il existe une limite temporelle à la prévision déterministe du temps, qui se situe entre dix et vingt jours, durée correspondant à la mémoire de l'atmosphère (Lorenz, 1969). Cette durée est expliquée par l'introduction d'erreurs de petites échelles de temps, c'est-à-dire dans les conditions initiales de l'atmosphère et qui peuvent avoir un taux d'accroissement rapide. Dans ce cas, les incertitudes sur les conditions initiales ont un impact considérable sur l'état futur de l'atmosphère, affectant ainsi des échelles de temps plus grandes. C'est ce qui est appelé « l'effet papillon » (Lorenz, 1969). Celui-ci est d'autant plus important que l'état initial d'une prévision est incertain, notamment en raison de l'imprécision des systèmes d'observation. La prévisibilité déterministe de systèmes chaotiques (tel que l'atmosphère peut l'être) est restreinte.

Concernant les prévisions à l'échelle de la saison, les conditions initiales atmosphériques occupent une place moins importante que dans les prévisions à court ou moyen terme (Déqué, 2003). Au-delà d'une prévision à quatre semaines, les conditions aux limites, c'est à dire la valeur des variables d'état à évolution lente de l'océan et des surfaces continentales, prennent alors toute leur importance (Reichler et Roads, 2003, 2005). La prévisibilité à l'échelle de la saison est en effet liée aux variables à évolution lente, comme par exemple la température de surface de l'océan (TSO) ou l'humidité des sols. On note toutefois que l'état moyen de l'atmosphère est très sensible aux modifications et aux variations des conditions initiales. L'état initial atmosphérique contribue donc à la prévisibilité, dans le sens où un état initial pris au hasard conduira à une dégradation des scores de prévision par rapport à une autre qui serait issue d'un état initial réel (CNRS, www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb17/11_previsions.htm).

- Conditions aux limites : éléments de prévisibilité du système climatique

L'impact que peuvent avoir les conditions aux limites de l'atmosphère sur la prévisibilité à l'échelle de la saison varie en fonction de la période de l'année, de la région et du paramètre (Reichler et Roads, 2003). La prévisibilité a pour origine les variables à évolution lente : la TSO (Colman et Davey, 1999 ; Wilby et al., 2004), l'humidité des sols (Koster et Suarez, 2001 ; Koster et al., 2004 ; Conil et al., 2009 ; Douville, 2010), la couverture neigeuse (Peings et Douville, 2010), l'étendue de la banquise Arctique (Chevallier et Salas-Mélias, 2012), la biomasse de la végétation (Alessandri et Navarra, 2008) ou certains éléments du système hydrologique (Bierkens et Van den Hurk, 2007). Chaque composante du système climatique peut ainsi apporter de la prévisibilité sur la variabilité interannuelle. Etant donné que la mémoire de certaines composantes du système climatique est plus grande que celle de l'atmosphère, l'état moyen de celle-ci est susceptible d'être influencé à plusieurs mois d'échéance par les variables à évolution lente. Cela fournit la prévisibilité nécessaire à la prévision saisonnière de l'état de l'atmosphère.

La prévisibilité atmosphérique saisonnière est plus grande dans certaines régions du globe et à certaines périodes de l'année. Dans les régions tropicales, la température de surface de l'océan pilote fortement la circulation atmosphérique, alors que la variabilité naturelle du climat n'y est pas très grande. La prévisibilité est donc accrue dans ces régions. A nos latitudes et en hiver, les téléconnexions avec les tropiques sont plus fortes qu'en été, ce qui augmente la prévisibilité dans l'hémisphère nord et en Europe (Wilby, 1993 ; Palmer et Anderson, 1994). De façon générale, la prévisibilité de la température de l'air est plus grande que celle d'autres variables, comme par exemple les précipitations (Déqué, 2003).

- Les téléconnexions : migration de prévisibilité vers les latitudes moyennes

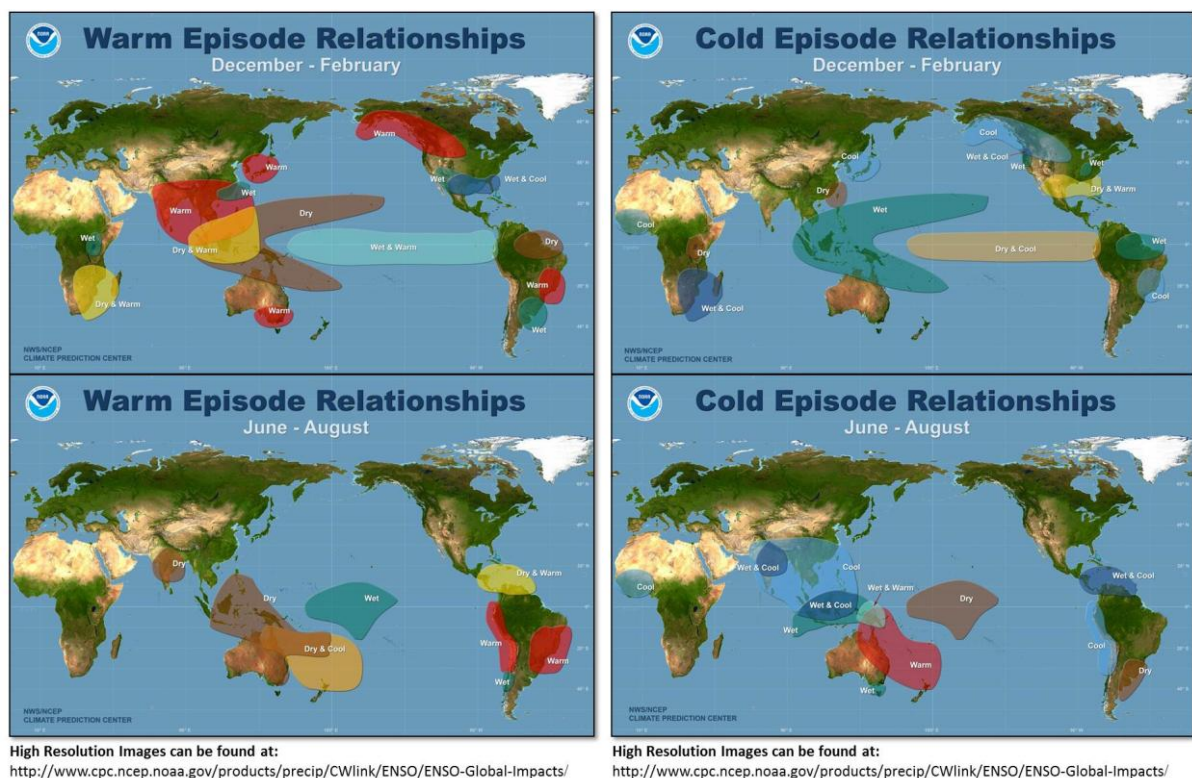


Figure 6: Cartes illustrant les téléconnexions majeures observées lors d'un événement El Niño (à gauche) et La Niña (à droite). L'hiver de l'hémisphère nord est représenté en haut, l'hiver de l'hémisphère sud en bas. Sont représentées sur la carte : les zones chaudes (en rouge), les zones sèches (en marron), les zones chaudes et sèches (en jaune), les zones froides (en bleu), les zones humides (en turquoise) et les zones froides et humides (en bleu foncé). (NOAA ; http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/impacts/warm.gif et http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/impacts/cold.gif).

Les phénomènes de grande échelle ont un impact plus ou moins fort sur les conditions météorologiques des régions situées à des milliers de kilomètres de là où ils se produisent. Il suffit de regarder les conséquences de l'événement ENSO sur de nombreux points du globe pour le comprendre (Figure 6). Les phases El Niño ou La Niña n'engendrent pas des conséquences strictement opposées. Selon la saison durant laquelle les phénomènes se

produisent, les impacts seront différents et ne seront pas localisés dans les mêmes régions. Ainsi, durant l'été boréal, El Niño a par exemple tendance à occasionner d'importantes sécheresses au nord de l'Australie ainsi qu'en Indonésie, accompagnées de fortes chaleurs. Tandis que lors de l'été austral, le temps est plus sec et froid. On peut également souligner que des téléconnexions sont observées jusqu'en Afrique ou à des latitudes élevées de l'hémisphère nord. A noter que dans ces régions, les téléconnexions ne sont pas forcément observées à chaque événement El Niño ou La Niña.

L'ENSO est le principal marqueur de la variabilité climatique (Palmer et Anderson, 1994) et constitue la principale source de prévisibilité à l'échelle du globe. En effet, la manifestation principale de ce phénomène est une modification de la surface océanique (Sect. 3.1.1.), qui est durable à cause de l'inertie thermique des océans. L'atmosphère est ainsi durablement impactée par ces anomalies de TSO. Cet événement fut prévu en 1986 avec 12 mois d'avance (Cane et al., 1986). La prévisibilité climatique dans les régions touchées par ce phénomène est alors à son maximum (Brankovic et al., 1994). Evidemment, plus les régions sont éloignées du phénomène, plus la prévisibilité est faible. Néanmoins, des téléconnexions sont observées en Europe, faibles mais statistiquement significatives (Fraedrich, 1994 ; Lloyd-Hughes et Saunders, 2002 ; Pozo-Vazquez et al., 2005 ; Frias et al., 2010). D'autres phénomènes de grande échelle apportent de la prévisibilité à nos latitudes, notamment sur les régimes de temps en Europe évoqués précédemment (Sect. 3.1.1.). Cassou (2008) a mis en évidence un lien entre les structures océaniques du Pacifique tropical et certaines phases de l'oscillation de Madden-Julian (MJO) avec un délai de quelques semaines. Partie intégrante du système tropical couplé océan-atmosphère, l'oscillation de Madden-Julian est caractérisée par une alternance à l'échelle planétaire de périodes sèches et humides associées à plusieurs changements dans la dynamique tropicales et sub-tropicale de l'atmosphère (Cassou, 2008). Sa période varie entre 40 et 60 jours. Les phases de la MJO ont un lien avec certains régimes de temps en Europe. Un autre phénomène, les anomalies positives ou négatives de températures de surface à la fin de l'été dans l'Atlantique tropical, favorise la prédominance de certains régimes de temps lors de l'hiver suivant (Cassou, 2004). Ainsi, une anomalie froide sur l'Atlantique tropical favorise le régime NAO+ l'hiver suivant, tandis qu'une anomalie chaude favorise le régime NAO-. Enfin, il a été montré que le régime des vents de la stratosphère tropicale, caractérisé par l'oscillation quasi-biennale (QBO : « Quasi Biennial oscillation »), a des conséquences sur les températures extrêmes en Europe (Thompson et al., 2002). Sa fréquence est d'environ 28 mois. Récemment, il a été démontré que les variations de l'épaisseur de la banquise Arctique aurait un impact indirect sur la fréquence d'occurrence des vagues de froid sur l'Europe (Petoukhov et Semenov, 2010). D'autres études récentes viennent alimenter cette liste non exhaustive de phénomènes à l'origine de téléconnexions apportant chacune leur once de prévisibilité en Europe.

Les interactions du système climatique apportent de la prévisibilité aux longues échéances, notamment à l'échelle saisonnière. C'est cette échéance de prévision qui va nous intéresser par la suite.

3.2. La prévision saisonnière du temps

3.2.1. Définition et concept

La prévision saisonnière est fondée sur la connaissance de la variabilité interne du climat et n'est possible que grâce aux sources de prévisibilité décrites précédemment (Sect. 3.1.2.). Elle est principalement basée sur l'évolution des composantes lentes du système climatique sur plusieurs mois. C'est une prévision d'ensemble qui vise à représenter l'état moyen futur de l'atmosphère ainsi que sa variabilité temporelle future, de façon probabiliste. En effet, sur une longue période de temps, la distribution des états successifs de l'atmosphère est plus prévisible que leur chronologie. Les échéances de la prévision saisonnière étant lointaines, elle ne permet pas de déterminer le temps qu'il fera un jour donné, mais d'estimer le scénario le plus probable de l'évolution moyenne de la variable météorologique considérée (au-dessus, au-dessous ou proche de la moyenne climatologique) et à une faible résolution spatiale. Seules des caractéristiques moyennes du climat (temporelles et spatiales) sont prévisibles à longue échéance (Troccoli, 2010). La prévision saisonnière n'est donc pas une prévision météorologique, mais plutôt une prévision climatique.

La prévision saisonnière ne consiste pas seulement à élaborer un ensemble de prévisions à quelques mois d'échéance. Un processus indissociable d'étapes imbriquées permet d'aboutir à une information qui sera exploitable par l'utilisateur, depuis l'observation du système climatique jusqu'à l'utilisation des prévisions. Entre ces deux étapes, la prévision est élaborée à partir d'un modèle numérique ou d'une méthode statistique. Une étape associée à la prévision consiste à utiliser des outils de descente d'échelle, afin d'adapter l'information à l'échelle locale. Cette manipulation présente l'avantage de corriger le biais du modèle. Cette partie sera plus longuement étudiée par la suite (Chapitre 4 Sect. 3.). Puis, viennent les étapes d'étalonnage des prévisions par rapport à la climatologie du modèle (nécessitant souvent une adaptation statistique). Elles sont suivies de l'évaluation de ces prévisions qui sont étalonnées à l'aide d'outils adéquats. Enfin, les données issues de la prévision et de l'évaluation doivent être adaptées à destination des utilisateurs. Cette dernière étape nécessite de connaître parfaitement l'utilisation qui sera faite de cette information, avant de l'adapter à l'application et d'évaluer l'impact (souvent économique) de l'incertitude qui y est associée. Cette étape n'est possible qu'en ayant une parfaite connaissance du système de prévision utilisé, avec ses forces et ses faiblesses. L'ensemble du processus est détaillé dans Troccoli (2010).

3.2.2. La prévision d'ensemble

A l'échéance saisonnière, la prévision déterministe ne peut plus être utilisée (Sect. 3.1.2.). L'approche devient alors nécessairement probabiliste et requiert l'utilisation de techniques ensemblistes. Cela consiste à réaliser plusieurs jeux de prévisions, appelées membres, en représentant les différentes sources d'incertitude du système. Au final, on obtient non pas une prévision unique (appelée prévision déterministe), mais un ensemble de prévisions qui va être

caractérisé par une fonction de probabilité et qui permettra de décrire succinctement la distribution des variables d'intérêt pour une échéance donnée (Figure 7).

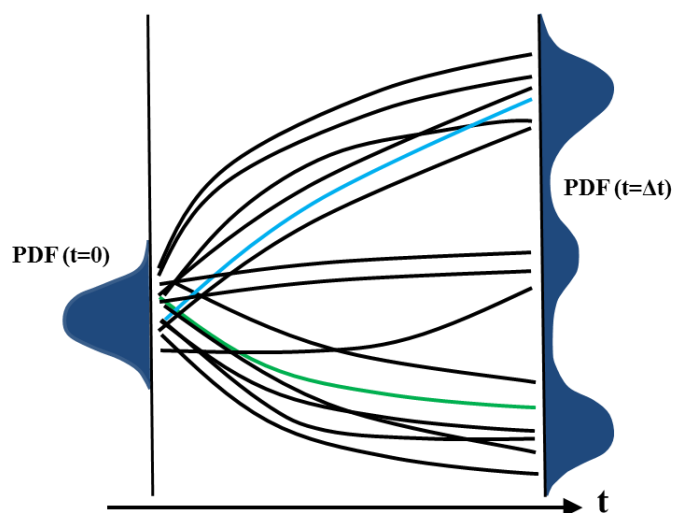


Figure 7: Schéma de principe de la prévision d'ensemble. Sont représentés sur le schéma : la prévision déterministe (en bleu), les membres de la prévision d'ensemble (en noir) et l'observation (en vert).

Plusieurs prévisions sont produites, variant de la dizaine à la cinquantaine selon les moyens numériques disponibles. Ce nombre doit être adapté afin d'apporter un intervalle d'incertitude stable et correctement associé au système étudié. La taille de l'ensemble et le choix des perturbations des conditions initiales sont des facteurs importants pour étudier la dispersion de l'ensemble et obtenir une mesure de la prévisibilité. Dans ce cas, il s'agit de représenter l'ensemble des incertitudes associées aux erreurs de représentation du champ des variables initiales.

A cause du comportement chaotique de l'atmosphère, une erreur sur les conditions initiales peut se propager dans les prévisions jusqu'à devenir prédominante et réduire nettement la qualité des prévisions (Sect. 3.1.2.). Afin de représenter cette incertitude, on introduit des perturbations dans le champ des conditions initiales. Les perturbations sont réalisées sur les conditions atmosphériques et/ou océaniques. Plusieurs méthodes existent : la plus simple consiste à réaliser plusieurs prévisions déterministes, démarrées à des dates successives (la prévision de la veille ou des jours à venir par exemple) et constituer ensuite différents champs de conditions initiales du système. C'est la méthode de « lagged-average » (Hoffman et Kalnay, 1983). D'autres méthodes sont basées sur une approche utilisant des petites perturbations aléatoires (dite de Monte-Carlo ; Kalnay, 2003b). Elles visent à perturber un champ initial en tenant compte des observations incomplètes de l'atmosphère (il n'est pas

possible d'observer toutes les variables, à tous les endroits et à tous les moments) et en cherchant le meilleur compromis entre cette observation et l'ébauche⁵.

La prévision d'ensemble peut également porter sur la représentation des incertitudes de modélisation. En effet, les équations traduisant les lois physiques qui régissent les modèles climatiques ne sont pas parfaites (soit simplifiées, soit paramétrisées), car elles dépendent à la fois de la résolution du modèle lié aux moyens de calcul à disposition et à la représentation théorique d'un phénomène réel par un jeu d'équations. Ces différentes approximations utilisées dans la simulation de l'atmosphère introduisent une autre source d'incertitude dans la prévision. Pour la représenter, la prévision d'ensemble peut par exemple consister à utiliser plusieurs modèles. On parle alors de prévision multi-modèles (Krishnamurti et al., 1999, 2000). D'autres méthodes existent, comme perturber la physique du modèle (Vié, 2013) ou encore introduire des perturbations stochastiques⁶ (Saunier-Batté, 2013).

La prévision d'ensemble permet ainsi d'établir un intervalle de prévisions du climat possible, sous forme de probabilité d'occurrence de tel ou tel scénario à différentes échéances.

3.3. Prévision numérique à l'échelle saisonnière

3.3.1. Historique

Au cours des années 70, les modèles de circulation générale (MCG) sont apparus. C'est seulement dans les années 80 qu'ils furent réellement utilisés pour élaborer des prévisions à l'échéance de plusieurs mois. Or, les analyses océaniques n'étaient pas encore disponibles, ces modèles (appelés « Atmosphere-Only General Circulation Model » : AOGCM) ne simulaient que la composante atmosphérique du système climatique. Il faut attendre les années 90 pour voir émerger les premiers modèles de circulation générale couplés océan/atmosphère (« Coupled General Circulation Model » : CGCM). A Météo-France, c'est en 2007 que les modèles forcés (conditions océaniques climatiques et non réelles) sont remplacés par les modèles couplés dans la production de prévisions saisonnières opérationnelles. A l'origine, la première version d'Arpege couplée à un modèle d'océan date de 1994 et les premières prévisions saisonnières couplées ont été produites en 1999 (projet européen « Development of a European Multi-model Ensemble system for seasonal to inter-annual prediction » : DEMETER). Mais ce n'est que plus tard que des états initiaux océaniques de bonne qualité furent disponibles en temps réel (analyses Glorys par Mercator-océan). La limite de prévisibilité de quatre mois put alors être dépassée. Malgré ces progrès, l'incertitude liée aux erreurs des modèles et celle liée aux conditions initiales constituent une limitation de la qualité des prévisions saisonnières (Peng et al., 2011). Divers projets ont eu pour objectif de réduire ces incertitudes.

⁵ Ebauche : lorsque l'on cherche à construire l'état initial $t=0$ d'une prévision, il s'agit de la plus récente prévision du modèle qui est utilisée.

⁶ Perturbations stochastiques : consiste à introduire des perturbations additives dans les équations du modèle afin de corriger des estimations d'erreur de tendance initiale. Différentes méthodes sont utilisées, comme par exemple celle qui consiste « rappeler » le modèle vers des données de référence (souvent une climatologie).

- Le projet PROVOST (1996-1999)

PROVOST (« PRediction Of climate Variations On Seasonal to interannual Timescale ») est un projet européen qui a démarré en 1994 grâce à la collaboration du CNRM (Météo-France), du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyenne Terme (CEPMMT), d'EDF et du Met Office de Grande-Bretagne (UKMO) (Brankovic et Palmer, 2000 ; Palmer et al., 2000). Soixante séries de neuf « hindcasts⁷ » sur la période 1979-1983 ont été réalisées par chaque partenaire. Des prévisions saisonnières à quatre mois d'échéance ont été simulées avec trois modèles différents, utilisant les données ERA15 (réanalyses du CEPMMT sur 15 ans) comme conditions initiales atmosphériques et conditions aux limites océaniques (par exemple les TSO). Cette étude a permis de montrer que l'utilisation de TSO observées permet d'améliorer les prévisions saisonnières (notamment lors des grands épisodes ENSO). Lors de ce projet, l'utilisation de la prévision multi-modèles a également permis de montrer que les scores issus de l'ensemble des modèles étaient généralement meilleurs que les scores obtenus avec chaque modèle utilisé séparément (Doblas-Reyes et al., 2000).

- Le projet DEMETER (2000-2003)

Suite à l'intérêt scientifique des résultats du projet PROVOST, le projet DEMETER lui a succédé (Palmer et al., 2004 ; Demeter, 2005). Ce projet était innovant dans son utilisation de plusieurs modèles couplés océan-atmosphère sur une longue période continue de 1958 à 2001. Le premier atout était donc de posséder une très longue série de prévisions homogènes. Sept modèles européens ont effectué pour chaque année quatre prévisions à six mois d'échéance, avec à chaque fois une prévision d'ensemble de neuf membres. Les états initiaux de ces prévisions se basaient sur les réanalyses ERA40 (réanalyses du CEPMMT sur 40 ans). La résolution horizontale était de 2.5° (environ 250 km). Les « hindcasts » obtenus ont été initialisés à plusieurs moments de l'année pour évaluer la dépendance du score à la saison étudiée : 1^{ier} février pour le printemps (mars-avril-mai), 1^{ier} mai pour l'été (juin-juillet-août), 1^{ier} août pour l'automne (septembre-octobre-novembre) et enfin 1^{ier} novembre pour l'hiver (décembre-janvier-février).

Une des principales conclusions qui émane de cette étude est l'intérêt majeur de l'approche couplée, en particulier sur le domaine Europe-Atlantique, par rapport à l'approche utilisant une climatologie statistique des températures de la mer. DEMETER a permis de constituer la première base de données continue de prévisions saisonnières et d'étudier en particulier deux domaines d'applications : les maladies tropicales et la production agricole en Europe.

⁷ Hindcasts : prévisions numériques rejouées sur une période passée. Ils constituent la climatologie du modèle de prévision.

- Le projet ENSEMBLES (2004-2009)

Dans la continuité du projet DEMETER, le projet ENSEMBLES (Weisheimer et al., 2009) était basé sur l'utilisation de cinq modèles globaux climatiques couplés atmosphère-océan, avec une résolution de 2.5°, fournissant chacun neuf membres. Des prévisions saisonnières initialisées pour les quatre différentes saisons à une échéance de sept mois (à l'exception de celle débutant le 1^{er} novembre qui est produite sur une échéance étendue de quatorze mois) ont été réalisées. La période d'étude allait de 1960 à 2005, soit 46 ans. ENSEMBLES a été évalué par rapport à DEMETER, montrant de meilleurs résultats sur les tropiques (Alessandri et al., 2011). La principale nouveauté par rapport à DEMETER était l'apparition de méthodes améliorées pour initialiser l'océan et la glace de mer.

- Le projet SPECS (2012 - 2016)

SPECS (« Seasonal-to-decadal climate Prediction for the improvement of European Climate Services ») est un projet européen en cours, qui a démarré en novembre 2012 (SPECS, <http://specs-fp7.eu>). Le projet a pour objectif « d'identifier les problèmes majeurs des prévisions climatiques et de rechercher une batterie de solutions en utilisant toutes les approches existantes ». Il s'agit d'améliorer la prévisibilité des modèles couplés océan-atmosphère globaux en y introduisant les avancées récentes dans la représentation de la stratosphère, des ondes de gravité non orographiques et dans l'initialisation de l'ozone. La résolution horizontale est améliorée, à la fois pour l'océan et pour l'atmosphère. Une technique de perturbation aléatoire issue de la dynamique stochastique est appliquée sur les équations du modèle. L'objectif final est de pouvoir fournir des services contribuant à l'adaptation au changement climatique.

3.3.2. La prévision saisonnière aujourd'hui

A l'heure actuelle, la prévision saisonnière est réalisée grâce à des modèles couplés océan-atmosphère-surfaces continentales. A l'origine, il s'agit de modèles de climat, eux-mêmes peu différents des modèles de prévision déterministe à courte échéance. La résolution horizontale est plus lâche, de l'ordre de quelques dizaines à plusieurs centaines de kilomètres. La physique du modèle tient compte des améliorations successives du modèle opérationnel de prévision à courte échéance, même si à cause de la moindre résolution spatiale, davantage de processus restent paramétrés. Les conditions initiales sont perturbées avec des méthodes sophistiquées qui tiennent principalement compte de la TSO dans les régions tropicales. La taille de l'ensemble est de 51 pour la plupart des modèles globaux des différents centres météorologiques. C'est la présence des différentes sources de prévisibilité évoquées précédemment (Sect. 3.1.2.) qui conditionne ensuite la qualité de la prévision. Des avancées dans la représentation des processus physiques, des systèmes d'assimilation et des méthodes

de perturbation des équations du modèle permettent d'améliorer constamment les systèmes de prévision.

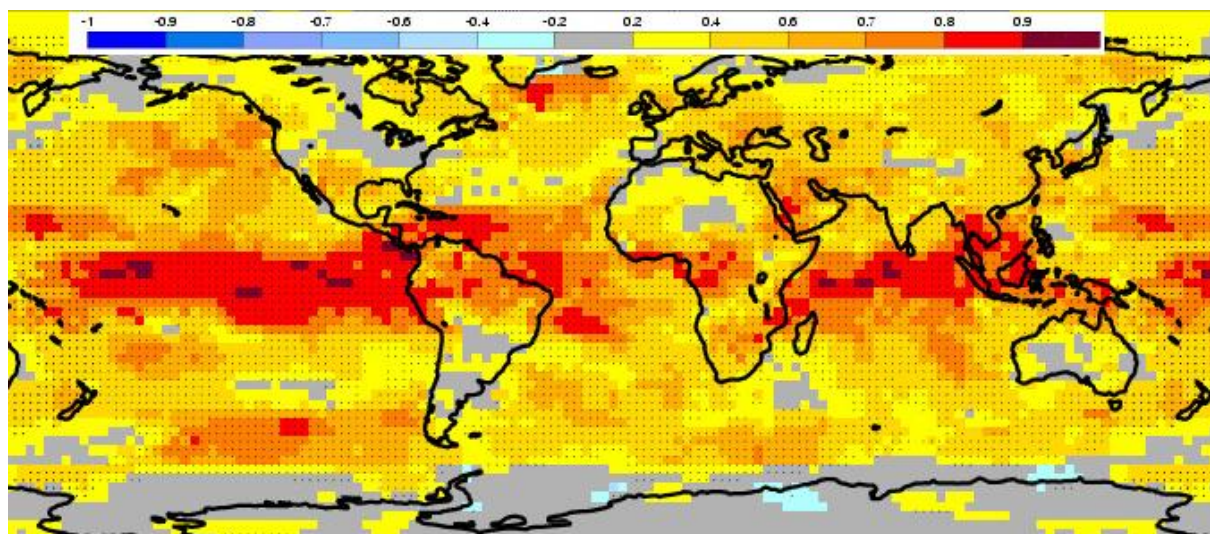


Figure 8: Corrélation de l'anomalie de T2m pour les mois mars-avril-mai (date d'initialisation au 1^{er} février) sur la période 1981-2010 avec un ensemble de 15 membres produits par le GCM de l'ECMWF. Les points noirs représentent des valeurs significatives (au seuil 5%) sur un échantillon aléatoire de 1000 valeurs.

La Figure 8 montre que la prévision saisonnière du temps est de manière générale de meilleure qualité dans les tropiques, avec un coefficient de corrélation de l'anomalie de T2m autour de 0,8. Cette propriété provient de l'impact prédominant de la TSO à ces latitudes. Aux moyennes latitudes et plus spécifiquement en Europe, la prévisibilité n'est pas nulle. Même si les scores sont plus faibles que ceux observés sur les tropiques (coefficient de corrélation compris entre 0,2 et 0,4), ils montrent que la prévision saisonnière du temps présente un intérêt sur la France. Concernant la variable « précipitations », le score est globalement plus faible que celui obtenu avec la T2m (non montré ici).

Les prévisions brutes sont étalonnées en utilisant la climatologie du modèle. Elles conduisent à des anomalies saisonnières de température ou de précipitations pour la région considérée. Les probabilités d'écart par rapport à la normale sont produites à l'échelle du mois ou du trimestre. Par exemple, à Météo-France, un scénario est considéré comme étant le plus probable lorsque 45% des membres fournissent une prévision située dans le même tercile de la fonction de distribution de la variable considérée. Si ce n'est pas le cas, la prévision est alors classée comme « sans signal significatif ». Les principales variables considérées sont la température de l'air à 2 mètres et les précipitations totales (solides ou liquides). D'autres variables sont simulées comme l'humidité relative, la température du point de rosée, etc...

L'étape indispensable après la réalisation de prévisions est d'en faire l'analyse afin d'en extraire une information utile. En effet, la pertinence de la prévision dépend dans une grande mesure de la manière dont elle est interprétée au sens de son contexte d'utilisation. La prévision probabiliste rend possible une estimation de l'impact d'une décision basée sur la

prévision, par la définition de seuils. Par exemple, le « coût économique » permet de représenter quantitativement le bénéfice de la prévision pour une application donnée (Murphy, 1977).

3.3.3. Le système multi-modèles européen de prévision saisonnière : EUROSIP

Le système multi-modèles EUROSIP (« EUROpean Seasonal to Interannual Prediction ») a été construit à partir des AOGCM de plusieurs centres opérationnels fournissant des prévisions saisonnières. Le but de ce consortium est de combiner des jeux de prévisions saisonnières pour augmenter leur robustesse. Chaque centre météorologique suit un protocole similaire pour produire ses prévisions, afin de garder une homogénéité entre chaque jeu. Les recommandations sont de fournir une prévision saisonnière avant le 10 de chaque mois, avec un ensemble d'au moins 30 membres. La période des « hindcasts » doit couvrir au moins 20 ans. Le but est de constituer la climatologie du modèle afin de calibrer les prévisions brutes. Les "hindcasts" nécessitent un nombre plus restreint de membres (5 au minimum). Actuellement, Météo-France et le CEPMMT en sont à la 4^{ème} version de leur modèle, appelée « System 4 ». Les différents centres météorologiques de prévisions atmosphériques participant au consortium sont :

- Le **CEPMMT** : il joue un rôle très important dans le développement des prévisions saisonnières en temps réel. Le modèle IFS réalise depuis 2012 un jeu de prévisions constitué de 51 membres (Molteni et al., 2011). La résolution horizontale du modèle est de 80 km et la résolution verticale est de 91 niveaux. Ce modèle est couplé avec le modèle océanique NEMO (« Nucleus for European Modelling of the Ocean »).

- **Météo-France** (France) : le modèle utilisé est Arpege Climat V5.2, modèle atmosphérique du « système Terre⁸ » CNRM-CM5.1 (Voldoire et al., 2013). Il fournit un ensemble de 51 prévisions résultant d'analyses atmosphériques (fournies par le CEPMMT) et d'analyses océaniques (fournies par Mercator-Océan). Un décalage temporel des analyses océaniques permet de générer des conditions initiales différentes. La résolution horizontale des prévisions atmosphériques est de 160 km, avec 31 niveaux verticaux. Il est couplé avec le modèle océanique NEMO.

- **Met Office** (Royaume-Uni) : depuis Septembre 2009, la version 4 de GloSea (équivalent du « System 4 » ; Arribas et al., 2011) fournit 42 membres grâce au modèle atmosphérique HadGEM3, d'une résolution horizontale de 50 km et composé de 85 niveaux verticaux. Ce modèle atmosphérique est couplé avec le modèle océanique NEMO à résolution 1/4°. Contrairement au CEPMMT et à Météo-France, de nouvelles versions ont été ajoutées (allant jusqu'au « System 9 »).

Depuis 2012, un 4^{ème} centre météorologique est rattaché au projet : le **NCEP** (« National Centers for Environmental Prediction », Etats-Unis). Le modèle atmosphérique utilisé est le

⁸ Système Terre : modèle de prévision qui couple les différentes composantes du système climatique (atmosphère, océan, végétation, cryosphère).

CFSv2 (actuellement sa version est équivalente au « System 2 » européen). Il possède une résolution horizontale d'environ 100 km et se compose de 64 niveaux verticaux (Saha et al., 2014). Ce modèle est couplé avec le modèle océanique MOM3 (« Modular Ocean Model 3 »).

Le consortium EUROSIP établit un bulletin météorologique chaque début de mois (Figure 9). Il tient compte des résultats des prévisions de chacun des centres météorologiques. La confrontation des différents scénarios obtenus permet de quantifier la fiabilité des prévisions concernant la température à 2 mètres et les précipitations totales.

D'autres centres météorologiques contribuent à des systèmes multi-modèles. On peut citer : le « Bureau Of Meteorology » (BOM, Australie), le « National Aeronautics and Space Administration » (NASA, Etats-Unis), la « Korean Meteorological Administration » (KMA, Corée du Sud) ou la « Japan Meteorological Agency » (JMA, Japon).

MODELES	France Métropole	Antilles	Guyane	Réunion	Mayotte	Nouvelle Calédonie	Wallis et Futuna	Polynésie	St Pierre et Miquelon
MF									
CEP									
Met Office									
NCEP									
JMA									
Synthèse									
EuroSIP									
LC-MME									
Scénario privilégié par Météo-France	chaud	chaud	chaud	chaud	chaud	pas de scénario privilégié	chaud	chaud	chaud

T inférieure à la normale (froid)
 T proche de la normale
 T supérieure à la normale (chaud)
 Pas de scénario privilégié

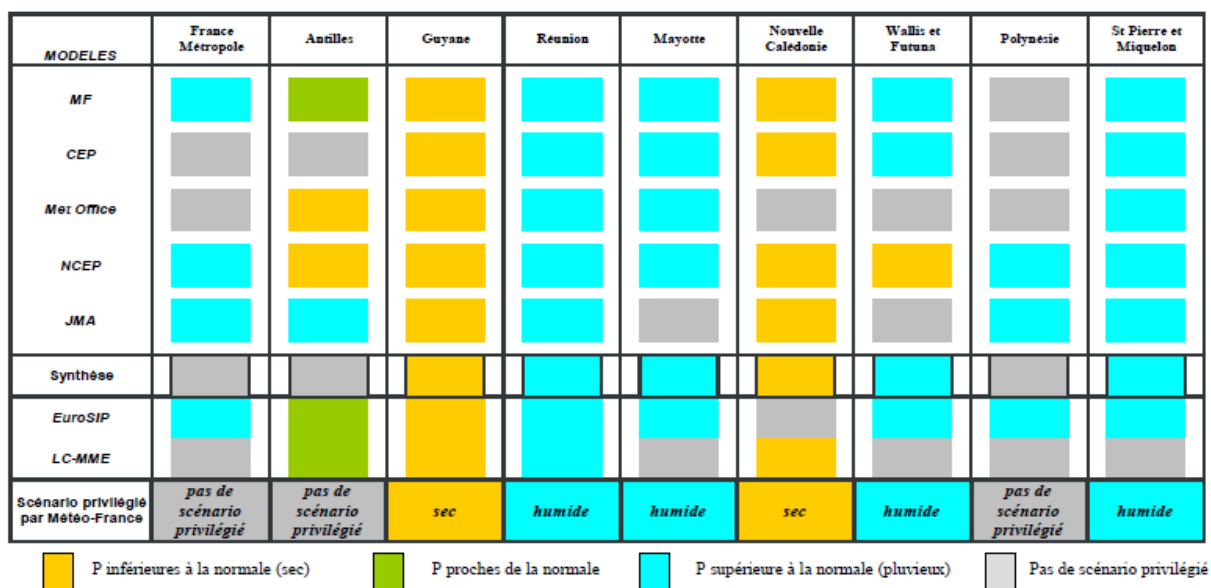


Figure 9: Bulletin climatique publié par le consortium EUROSIP pour le trimestre décembre 2014 et janvier-février 2015 pour la France métropolitaine et l'outre-mer. Le tableau du haut montre la tendance pour des températures supérieures à la normale et une forte concordance des modèles quasiment sur tous les territoires ; le tableau du bas montre les précipitations totales. Les premières lignes expriment un scénario émis par un centre météorologique (cinq au total si l'on ajoute la « JMA »), les différents scénarios de synthèse sont représentés dans les dernières lignes (Météo-France, https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=137&id_rubrique=44).

3.3.4. La prévision saisonnière appliquée en agriculture

Avec l'utilisation de la prévision saisonnière, il est donc possible de connaître une éventuelle anomalie en température et en précipitations des mois à venir. Ces deux variables ont une influence majeure sur l'évolution des cultures et cette information est précieuse pour une utilisation en agriculture. Une adaptation des pratiques agricoles en réponse à la prévision de conditions climatiques particulières peut être envisagée. Ces dernières années, de nombreuses études se sont intéressées au lien entre la variabilité du climat et l'agriculture (Hoogenboom, 2000 ; Hansen, 2002 ; Cantelaube et al., 2004). Les prévisions saisonnières offrent la possibilité d'anticiper les rendements agricoles (Hansen et al., 2004 ; Challinor et al., 2005b ; Hansen, 2005 ; Hansen et Sivakumar, 2006) et d'améliorer la gestion des cultures, en tirant profit des conditions favorables ou en réduisant les effets des conditions défavorables (Mjelde et al., 1997 ; Hammer et al., 2001 ; Doblas-Reyes et al., 2006 ; Sivakumar, 2006 ; Thornton, 2006 ; Coelho et Costa, 2010). Cependant, la prévision opérationnelle des composantes du rendement ou du rendement final est jusqu'à présent réalisée avec des méthodes statistiques. Ces méthodes n'utilisent pas encore de prévisions issues de modèles atmosphériques, mais plutôt des prévisions basées sur des données climatiques (Chipanshi et al., 1997 ; Supit, 1997) associées à des observations de variables météorologiques et à des observations satellitaires de l'état de la végétation.

Les recherches publiées sur la prévision des rendements utilisent principalement les différentes phases de l'ENSO. Deux méthodes basées sur les phases de l'ENSO sont présentes dans la littérature :

- utilisation de prévisions saisonnières atmosphériques : on peut trouver quelques exemples sur l'Australie (Hansen et al., 2004), l'Afrique (Hansen et Indeje, 2004 ; Hansen et al., 2009) ou les Philippines (Koide et al., 2013).
- utilisation de relations statistiques : au Brésil (de Oliveira Cardoso et al., 2010) et en Argentine (Podestá et al., 2002).

Dans certaines régions, l'information apportée par les phases de l'ENSO suffit pour faire de la prévision fiable de rendement, sous certaines conditions : cela dépend de l'existence de téléconnexions apportées par l'ENSO. Les prévisions saisonnières de qualité sont surtout possibles aux latitudes tropicales, en relation avec une variabilité atmosphérique et océanique plus faible qu'aux latitudes moyennes. L'utilisation des données de prévision saisonnière aux moyennes latitudes nécessite plus de rigueur et doit réunir des conditions favorables et la présence de prévisibilité. Des recherches supplémentaires doivent être faites sur la détermination des échelles spatiales et temporelles pour lesquelles les prévisions saisonnières sont applicables en agriculture et en environnement (Ogallo et al., 2000).

A l'échelle de l'Europe, le Joint Research Centre (JRC) réalise en temps réel des prévisions saisonnières de rendement des céréales (et autres) sur l'Europe, sous forme de bulletins issus de « l'Action AGRI4CAST ». Le « Monitoring Agricultural ResourceS » (MARS) « Crop Yield Forecasting System » (MCYFS) utilise pour cela des observations satellitaires de l'état des surfaces continentales, des observations météorologiques et la modélisation de variables agro-météorologiques⁹ et biophysiques¹⁰. Ces données sont complétées par des prévisions numériques du temps et par des analyses statistiques (JRC, <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/About-us/AGRI4CAST>). Or, parmi les prévisions numériques du temps, celles à l'échelle saisonnière n'occupent pas une part importante de l'ensemble du système de prévision, basé sur les observations et des relations statistiques historiques. De cette manière, il n'est pas possible de directement connaître l'apport de l'utilisation des données issues de la prévision saisonnière du temps. Enfin, la résolution spatiale des bulletins de prévision émis, comme ceux concernant le rendement, est à l'échelle nationale. Ces informations ne peuvent donc pas être délivrées plus localement.

Des études visant à prévoir les rendements agricoles dans différentes régions de l'Europe à partir de prévisions saisonnières issues du projet DEMETER ont été réalisées (Cantelaube et Terres, 2005 ; Marletto et al., 2005, 2007 ; Semenov et Doblas-Reyes, 2007). Dans certains cas, cette évaluation montre qu'à grande échelle, la prévision saisonnière n'apporte pas plus d'informations concernant la prévision des rendements agricoles que les méthodes basées sur des données climatiques (Semenov et Doblas-Reyes, 2007). Cantelaube et Terres (2005) ont

⁹ Variables agro-météorologiques : concernent tous les indicateurs liés à la croissance de la culture et qui sont pilotés par les paramètres météorologiques. Elles sont notamment simulées par un modèle agronomique.

¹⁰ Variables biophysiques, ou biogéophysiques : concernent les variables d'état du sol ou de la végétation. Elles sont notamment simulées par un modèle de surface continentale.

évalué ce couplage en utilisant le modèle de culture du JRC (WOFOST). Cette méthode de prévision a été comparée à la méthode utilisée en opérationnel par le JRC. Les résultats sont convaincants et montrent la capacité du système de prévision multi-modèles à détecter la tendance de l'anomalie de rendement annuelle sur quelques années d'étude. Les prévisions de rendement du blé obtenues dès le mois de février sont dans certaines régions de meilleure qualité que celles obtenues avec le système opérationnel. De manière générale, l'information probabiliste apportée par ces prévisions est très utile car elle fournit une indication sur l'incertitude associée. Cela permet de modérer les actions qui seront prises en réponse aux informations apportées par ces prévisions. Des décisions à l'échelle de la politique européenne de gestion agricole peuvent ainsi être prises afin de limiter les pertes de production. Il apparaît donc pertinent d'utiliser l'information apportée par la prévision saisonnière du temps produite aux moyennes latitudes, qui, couplée avec un modèle de croissance des céréales, permettrait d'améliorer les systèmes de prévisions actuellement employés sur la France.

4. Objectifs et plan de travail de la thèse

4.1. Représentation et anticipation de la croissance des cultures en France

L'objectif de cette thèse est d'appliquer la prévision saisonnière à l'agriculture sur la France et d'évaluer dans quelle mesure il est possible d'améliorer la connaissance de l'état futur des cultures de céréales d'hiver et de printemps (par exemple le blé) et des prairies. Des indicateurs sont produits par un modèle générique des surfaces continentales, ce dernier pouvant être utilisé aussi bien pour les céréales d'hiver/printemps que pour les prairies. La représentation de la variabilité interannuelle des rendements agricoles en France par un modèle générique de surface continentale est évaluée dans différentes configurations. L'utilisation de la télédétection est également évaluée. D'autre part, des prévisions saisonnières sont uniquement utilisées pour piloter un modèle agronomique de croissance du blé tendre. Cette thèse s'inscrit dans un partenariat entre la recherche et l'industrie à travers un contrat Cifre entre Météo-France et Arvalis - Institut du végétal.

La question posée dans cette thèse est : « comment peut-on valoriser les outils numériques et les données satellitaires à notre disposition afin d'améliorer la prévisibilité des variables agro-climatiques liées aux cultures en France et à l'échelle de la saison de culture ? ».

Deux réponses sont apportées pour répondre à cette problématique. Elles sont fondées sur la modélisation agronomique et sur l'analyse de variables biogéophysiques, avec pour cette dernière une étude préalable qui a donné lieu à un article (Figure 10).

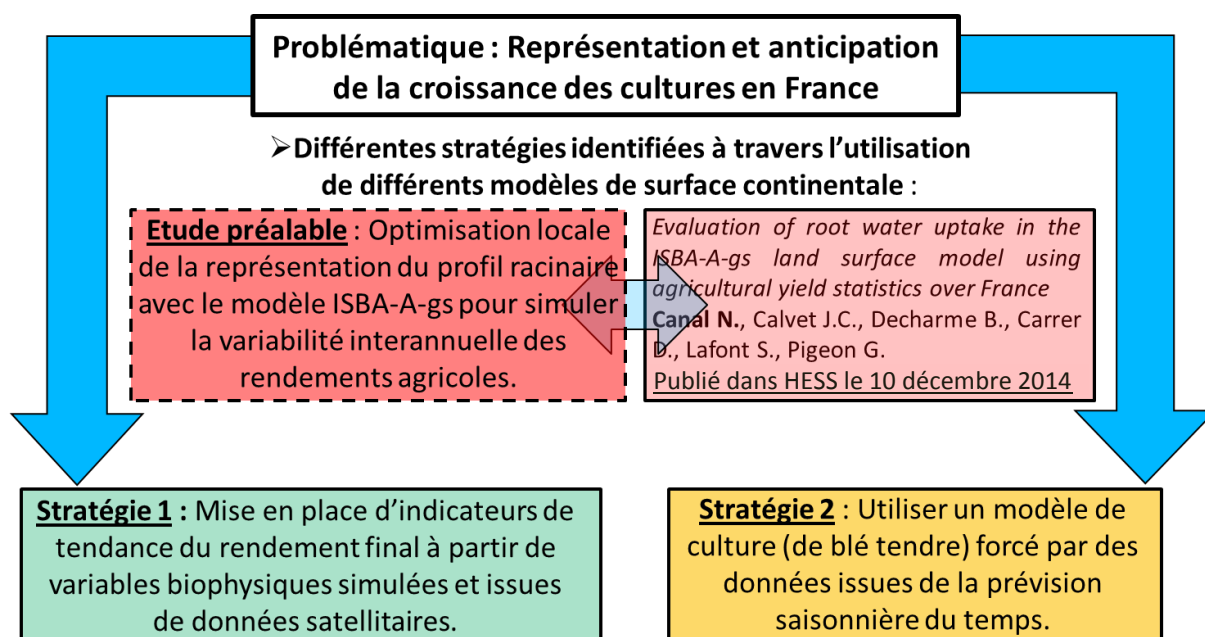


Figure 10: Schéma résumant les différentes étapes abordées dans cette thèse. Une fois la problématique énoncée, différentes solutions sont dégagées. Chaque rectangle correspond à un chapitre de thèse, dont un est constitué d'un article.

4.2. Deux stratégies

La première stratégie consiste à utiliser un modèle générique des surfaces continentales ainsi que des données issues de la télédétection, capables de fournir des indicateurs apportant une information précoce sur l'état futur des couverts végétaux en France.

Cet objectif nécessite une étude intermédiaire d'étalonnage du modèle générique ISBA-A-gs, afin qu'il puisse représenter le plus fidèlement possible la variabilité interannuelle de la production des céréales à paille et des prairies naturelles (non irriguées) en France sur la période 1994-2010. L'étude de ces deux types de végétation permet en particulier de distinguer des réponses contrastées au stress hydrique. En effet, le modèle ISBA-A-gs distingue tolérance au stress hydrique (cas des prairies) et évitement du stress hydrique (cas des céréales à paille de type blé). L'utilisation des statistiques agricoles par Calvet et al. (2012) a permis de confirmer que cette distinction entre tolérance et évitement est pertinente.

Une étude précédente (Calvet et al., 2012) a montré la faisabilité de l'utilisation du modèle ISBA-A-gs dans ce but, avec une représentation simplifiée des transferts d'eau dans le sol. L'étalonnage repose sur deux paramètres clés qui gouvernent la variabilité interannuelle de la production de biomasse par la végétation annuelle : le contenu maximal en eau disponible dans la zone racinaire ainsi que la conductance du mésophylle. Leur optimisation permet de maximiser la corrélation des simulations de la biomasse aérienne maximale avec les statistiques agricoles annuelles fournies par Agreste (Agreste, 2014) pour chacun des deux types de végétation étudiés. En utilisant ce protocole, un jeu de simulations est réalisé afin de

définir une configuration locale optimale sur plusieurs sites représentatifs des deux types de végétation étudiés (45 sites pour les cultures et 48 pour les prairies naturelles). Les cultures étudiées ici ne sont pas irriguées et les conditions climatiques ont un impact sur la variabilité interannuelle de la production de biomasse. Plusieurs profils de densité des racines dans le sol sont comparés grâce à la discrétisation multicouches du modèle ISBA-DF (Boone et al., 2000, Decharme et al., 2011). L'utilisation d'un nouveau schéma de transfert radiatif récemment mis au point pour le modèle ISBA-A-gs (Carrer et al., 2013) est également examinée. Cette étape constitue le chapitre II intitulé « Etude de la variabilité interannuelle de la biomasse aérienne sèche avec un modèle générique des surfaces continentales ». Elle permet de déterminer la configuration optimale du modèle permettant de représenter la production de biomasse des céréales à paille et des prairies. Ce travail a fait l'objet d'un article publié en 2014 dans la revue « *Hydrology and Earth System Sciences* ».

Une fois le modèle ISBA-A-gs étalonné, il fournit des simulations des variables biogéophysiques et des indicateurs associés à ces variables. Par exemple, on peut rechercher le moment critique où l'humidité racinaire totale influence fortement la végétation, à partir d'un jeu de simulations optimisé localement grâce à l'étude précédente. On analyse ensuite comment l'humidité du sol dans la zone racinaire peut apporter une information sur la tendance finale du rendement, en se situant à différents seuils de LAI simulé. Ainsi, il est possible de déterminer la phase de la croissance de la plante la plus vulnérable à une anomalie d'humidité racinaire, mais également d'anticiper les valeurs de LAI futures et donc de connaître le délai avant que cet état de sécheresse impacte la végétation. Les données issues de produits satellitaires viennent apporter une information visant à renforcer le diagnostic émis ou à le compléter grâce aux valeurs de LAI observées à des périodes qui ont été jugées critiques pour la végétation d'un point de vue de la réserve en eau de la zone racinaire. Cette partie constitue le chapitre III de cette thèse, intitulé « Mise en place d'indicateurs pour anticiper les rendements agricoles : données modélisées et issues de produits satellitaires ».

La modélisation agronomique n'utilise actuellement pas la prévision saisonnière sur la France. **Une deuxième stratégie consiste à évaluer dans quelle mesure les données de prévision saisonnière** peuvent apporter une information pertinente sur la croissance future de la culture du blé tendre en France simulée avec le modèle Panoramix, développé par Arvalis - Institut du végétal (Gate, 1995).

Les modèles agronomiques permettent de simuler les variables agro-météorologiques (en particulier les stades phénologiques, les variables hydriques et les variables thermiques) qui composent la croissance du blé tendre. Ces variables cumulatives correspondent à des périodes relativement longues (un à plusieurs mois) et leur estimation est susceptible de bénéficier d'une prévision saisonnière de l'état moyen de l'atmosphère.

Les données de prévision saisonnière utilisées sont issues du projet européen ENSEMBLES (Sect. 3.3.1.) et ont été exploitées sur la période 1981-2005. Plusieurs jeux de simulations ont été réalisés sur 199 sites répartis de façon homogène sur la France métropolitaine. Ces jeux de simulations permettent d'évaluer directement les différentes méthodes de descente d'échelle utilisées pour exploiter les données de prévision saisonnière ainsi que la taille de l'ensemble des prévisions et enfin de tester plusieurs échéances de

prévision. Les différents facteurs influant sur la qualité des prévisions peuvent ainsi être analysés au cas par cas. Un jeu de simulations de référence est utilisé afin d'évaluer la qualité des simulations forcées par les prévisions saisonnières en regard de la méthode développée et actuellement utilisée opérationnellement par Arvalis - Institut du végétal. Cette évaluation est faite en utilisant des scores déterministes et probabilistes permettant d'identifier de quelle manière on peut établir un couplage entre les données de prévision saisonnière et un modèle agronomique. L'objectif final est d'identifier la chaîne de traitement fournissant le meilleur jeu de prévisions possible. Cette partie constitue le chapitre IV de cette thèse qui est intitulé « Evaluation de l'apport de la prévision saisonnière du temps comme forçage météorologique d'un modèle de culture du blé tendre ».

Un dernier chapitre de conclusions et de perspectives résume les principaux résultats obtenus à l'issue de cette thèse. En particulier, les deux stratégies précédemment décrites sont comparées. Les perspectives de recherche apportées par ce travail sont également discutées dans ce dernier volet.

CHAPITRE II

II. Etude de la variabilité interannuelle de la biomasse aérienne sèche avec un modèle générique des surfaces continentales.

1. Les variables biogéophysiques simulées avec un SVAT

ISBA-A-gs est un modèle générique de surfaces continentales capable de représenter l'évolution de la biomasse et donc du LAI (Calvet et al., 1998 ; Gibelin et al., 2006). Il s'agit de la version « LAI interactif » du modèle ISBA développé au CNRM (Noilhan et Planton, 1989). Cette partie vise à décrire de façon générale ces deux modèles, puis la version multicouche d'ISBA, nommée ISBA-DF, et enfin la plateforme de modélisation SURFEX permettant d'utiliser ces modèles.

1.1. Le modèle ISBA

Le modèle ISBA-standard (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) a été créé dans les années 80/90 au CNRM (Noilhan et Planton, 1989 ; Mahfouf et Noilhan, 1996). Il permet de représenter l'évolution quotidienne des variables d'état de surface des sols, à travers des bilans d'eau, d'énergie et de carbone. Ces variables sont ensuite utilisées dans les modèles climatiques et atmosphériques, ainsi que dans les modèles hydrologiques. Le profil de sol est représenté par une couche racinaire unique et les échanges à l'interface sol/atmosphère ont lieu via une couche de surface d'un centimètre d'épaisseur incluse dans la couche racinaire. Le modèle utilise la méthode « force-restore » (Deardorff, 1977, 1978) issue de l'approche « bucket » (Manabe, 1969). Par la suite, on appelle cette version ISBA-FR. Pour fonctionner, le modèle nécessite huit paramètres d'entrée. Trois paramètres constants au cours de l'année sont requis, comme la profondeur de la zone racinaire (notée d_2 , pouvant varier de quelques centimètres jusqu'à plus d'un mètre selon la végétation étudiée), la résistance stomatique minimale (notée rs_{min}) et la contribution de la végétation au coefficient thermique (noté C_T). A cela viennent s'ajouter cinq autres variables évoluant au fil de l'année selon un cycle saisonnier : la proportion de végétation (veg), l'indice foliaire (LAI), la longueur de rugosité (z_0), l'albédo (α) et l'émissivité de la surface dans le domaine infrarouge (e). Les caractéristiques de surface sont également requises, comme par exemple les propriétés hydrologiques du sol ou la texture (en pourcentage d'argile et de sable). ISBA représente les processus de photosynthèse issus de l'approche simple développée par Jarvis (1976), qui tient compte notamment de la « Photosynthetically Active Radiation » (PAR), du stress hydrique, du déficit en vapeur d'eau et de la température de l'air. A partir de cette version originale est venue s'ajouter la version « LAI interactif », donnant lieu au modèle ISBA-A-gs.

1.2. Le modèle ISBA-A-gs

Le modèle ISBA-A-gs (Calvet et al., 1998 ; Gibelin et al., 2006) permet de modéliser les phénomènes de photosynthèse à travers la conductance stomatique des feuilles. Cette version permet ainsi d'étudier le système climatique et les rétroactions de la végétation sur le climat (Calvet et al., 2008; Queguiner et al., 2011). La formulation A-gs est basée sur le modèle développé par Jacobs et al. (1996) sous des conditions hydriques favorables. Elle repose sur le taux d'assimilation nette de CO_2 par la végétation en fonction de différents facteurs environnementaux limitants (rayonnement solaire, déficit de saturation de l'air en vapeur d'eau, température de surface, humidité du sol, concentration atmosphérique en CO_2 , etc...). La conductance du mésophylle est le paramètre principal pilotant la photosynthèse. Le modèle est également capable de représenter différentes réponses des couverts végétaux à la sécheresse. L'une est appelée « stratégie tolérante » et l'autre « stratégie évitante ». Deux modèles ont été réalisés, l'un représentant le comportement des herbacées (Calvet, 2000), l'autre celui des forêts (Calvet et al., 2004). Ainsi, en présence d'un stress hydrique, les processus de photosynthèse sont limités (Galle et al., 2009).

ISBA-A-gs est doté d'un module de pilotage de la photosynthèse capable de simuler le LAI et la biomasse de la végétation, au pas de temps quotidien. Pour les herbacées, la biomasse aérienne sèche (B_{ag}) est représentée. Elle se compose de la biomasse structurale et active. C'est la paramétrisation de la dilution de l'azote qui gouverne l'évolution de la biomasse (Calvet et Soussana, 2001). Pour simuler différents types de végétation, un jeu de paramètres propre à chaque type est nécessaire, comme par exemple les végétations de type C3 ou C4 (Farquhar et al., 1980 ; Collatz et al., 1992). Pour représenter les processus microscopiques (au niveau des stomates de la feuille) à l'échelle du couvert, le modèle fonctionne selon une méthode « big leaf ». Pour cela, un modèle de transfert radiatif est utilisé, permettant de décrire l'atténuation du PAR dans la végétation, à l'origine basé sur une approche « self-shading » (Calvet et al., 1998), puis amélioré par Carrer et al. (2013). Ce nouveau schéma de transfert radiatif est notamment dotée d'un profil de canopée plus affiné (dix couches, au lieu de trois dans la version d'origine) et d'une paramétrisation de la canopée au sommet et à la base de celle-ci. Les effets anthropiques, comme par exemple les pratiques agricoles (semis, récoltes, irrigation), ne sont pas représentés dans le modèle.

Le modèle ISBA-A-gs a été évalué à plusieurs reprises grâce à des données in-situ et issues de produits satellitaires, à l'échelle de la France (Rivalland et al., 2005 ; de Rosnay et al., 2006 ; Sabater et al., 2007 ; Lafont et al., 2012) et du globe (Gibelin et al., 2006).

L'imbrication des différents modèles qui viennent d'être présentés est schématisée par la Figure 11.

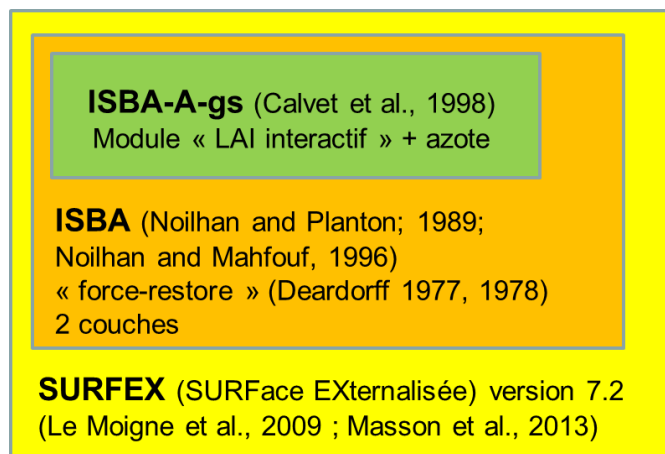


Figure 11: Schéma de la modélisation des surfaces continentales au CNRM-GAME.

1.3. Le modèle ISBA-DF

Le sol peut être discrétisé en plusieurs couches, afin de représenter plus finement la distribution verticale de la température et du contenu en eau du sol. C'est possible grâce à la version ISBA-DF. ISBA-DF est une version multicouches du profil de sol, incluant des processus liés au gel du sol et à la diffusion (Boone et al., 2000 ; Decharme et al., 2011). Cette version permet de résoudre l'équation de Richards. Dans chaque couche, la température et l'humidité sont pronostiquées grâce aux caractéristiques hydrologiques et de texture de chacune des couches. C'est grâce à ce profil multicouche que la profondeur de la couche racinaire pourra être modifiée dans cette étude, en faisant varier le nombre de couches de deux à vingt.

Les différents profils racinaires représentés par les modèles ISBA et ISBA-DF et utilisés dans l'article qui suit sont schématisés par la Figure 12.

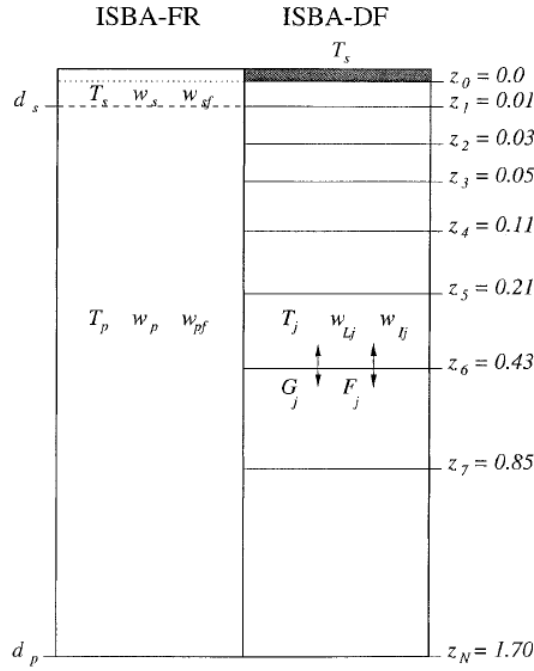


Figure 12: Représentation schématique du profil racinaire (à 8 couches) dans la version ISBA-FR (partie gauche) et dans ISBA-DF (partie droite) en fonction de la profondeur (notée z , indiquée à droite). Les variables pronostiquées dans chaque compartiment sont indiquées sur le schéma : les températures de surface et du sol (notées T_s et T_p ou T , respectivement), les différents contenus en eau liquide de surface et du sol (notés w_s et w_p ou w_L , respectivement) et en eau gelée de surface et du sol (notés w_{sf} et w_{pf} ou w_I , respectivement). Les flux sont également indiqués : le flux de chaleur (noté G) et le flux d'eau liquide (F) (Boone et al., 2000).

1.4. La plateforme SURFEX

Le modèle ISBA constitue l'un des quatre modèles de surface disponible dans la plateforme de modélisation SURFEX (SURFace EXternalisée ; Le Moigne, 2009 ; Masson et al., 2013) développée par Météo-France. Les trois autres modèles décrivant les processus physiques de surface sont : FLAKE pour les lacs (Salgado et Le Moigne, 2010), TEB pour les villes (Masson, 2000) et un modèle de mer et d'océan (Gaspar et al., 1990). SURFEX est utilisé aussi bien en recherche que pour des applications opérationnelles. SURFEX peut être utilisé en mode « offline » ou en mode « online ». Le mode « offline » signifie qu'il fonctionne de manière découplée de l'atmosphère et il est alors forcé par des analyses atmosphériques ou des observations météorologiques, comme par exemple ce qui est fait dans cette étude avec les données Safran (Quintana-Seguí et al., 2008). Le mode « online » signifie qu'il est couplé avec un modèle atmosphérique (Sarrat et al., 2009).

2. *Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France*

J'ai réalisé plusieurs simulations dans le but d'évaluer différentes configurations du profil racinaire de sol avec le modèle ISBA-A-gs à travers la modélisation des couverts agricoles en France. Ce travail a fait l'objet d'un article publié en 2014 dans la revue *Hydrology and Earth System Sciences* (HESS). Cet article est présenté dans la section qui suit.

2.1. Résumé de l'article

Le modèle ISBA-A-gs est utilisé afin d'évaluer différentes représentations du profil racinaire du sol. On évalue notamment l'influence des remontées capillaires d'eau issues d'une couche profonde située sous la zone racinaire. Même si le modèle ISBA-A-gs n'est pas un modèle agronomique, il est utilisé de manière à simuler la variabilité de la biomasse aérienne des couverts agricoles lorsqu'ils sont pilotés par les conditions climatiques. Les pratiques agricoles, comme le recours à l'irrigation, ou encore l'utilisation d'intrants, n'entrent pas en compte dans cette étude. L'utilisation de la version ISBA-FR avec deux couches de sol (jeu de simulations « FR-2L ») et de la version ISBA-DF (jeu de simulations « DIF ») a permis de mettre en place les différents jeux de simulations nécessaires. Cette évaluation est faite au travers de la représentation de la variabilité interannuelle des rendements de céréales de type C3 (de printemps et d'hiver) et des prairies naturelles en France, sur la période 1994-2010. Pour cela, les données statistiques agricoles issues d'Agreste (Agreste, 2014) à l'échelle départementale ont été utilisées.

Le premier volet de ce travail consiste à analyser les différents résultats issus de chaque jeu de simulations. Pour cela, le protocole mis en place dans Calvet et al. (2012) est utilisé. Sur la période 1994-2010, on évalue pour chaque site étudié la corrélation entre la biomasse aérienne sèche maximale simulée (B_{agX}) et les rendements annuels départementaux issus d'Agreste. On utilise pour cela un coefficient de détermination (R^2). La principale variabilité de cette relation provient de la conductance du mésophylle (g_m) et du contenu maximal en eau disponible dans le sol (MaxAWC) (Calvet et al., 2012). Ainsi, on explore une large gamme de chacun des deux paramètres et pour chaque couple g_m /MaxAWC, la relation entre les séries de B_{agX} et de rendements Agreste est de nouveau calculée. La simulation FR-2L fournissant le couple optimal est conservée pour chacun des 45 (48) sites étudiés pour les céréales de type C3 (prairies naturelles). Pour chacun des deux types de végétation étudiés, la valeur du g_m optimal ainsi obtenue est réutilisée pour produire le jeu de simulations DIF. Seul le MaxAWC optimal est alors de nouveau recherché. En ce qui concerne l'utilisation des statistiques annuelles issues d'Agreste, six céréales sont choisies (le blé tendre d'hiver, l'orge de printemps, l'orge d'hiver, le triticale, l'avoine et le seigle). On compare ensuite le nombre de sites avec un R^2 significatif au seuil de 1% (p -value < 0,01) parmi tous les jeux de simulations. Le premier est le jeu FR-2L, le second est obtenu avec la version ISBA-DF sans couche profonde (DIF1), un troisième avec cette même version mais cette fois la couche profonde atteignant 2 m de profondeur (DIF2) et une quatrième version intermédiaire

composée d'une couche profonde d'épaisseur constante, fixée à 20 cm (DIF3). Enfin, un cinquième jeu de simulations permet d'évaluer l'impact du nouveau schéma de transfert radiatif récemment implanté dans ISBA-A-gs (Carrer et al., 2013). Ce jeu de simulations, utilisant la même configuration du profil racinaire de sol que DIF1, est appelé DIF1-NRT. L'optimisation du couple g_m/MaxAWC est de nouveau opérée pour ce jeu de simulations.

Il apparaît que les prairies naturelles sont bien mieux représentées par les différents jeux de simulations et que l'apport de la couche profonde modélisée par DIF2 détériore les résultats.

Le second volet présenté dans cet article consiste à comprendre les différences de résultats obtenus entre la version FR-2L et les versions DIF afin de caractériser l'apport de l'eau de la couche profonde. Pour cela, on évalue l'impact du contenu en eau du sol et de la fonction stress qui lui est associée (SWI ou Soil Wetness Index) sur l'évolution du B_{ag} au cours de la croissance de la céréale. Il est montré que l'eau apportée depuis la couche profonde par capillarité empêche le SWI de la couche racinaire d'atteindre le point de flétrissement. De cette manière, la plante ne peut atteindre la phase de sénescence, surestimant ainsi les valeurs de B_{agX} . On montre également que le profil racinaire utilisé a un impact sur la variabilité interannuelle. L'impact du nouveau schéma de transfert radiatif est également analysé en comparant l'évolution du B_{ag} issu des jeux de simulations DIF1 et DIF1-NRT. Les valeurs de B_{agX} issues de DIF1-NRT sont plus faibles à cause d'un raccourcissement de la période de croissance de la plante. Néanmoins, le nombre de sites ayant un R^2 significatif au seuil de 1% (p-value < 0,01) n'est pas très différent avec ce jeu de simulations.

Enfin, un dernier volet consiste à analyser la variabilité interannuelle des rendements Agreste par rapport à celle du B_{agX} simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT, tous deux moyennés sur les sites dont le R^2 est significatif au seuil de 1% (p-value < 0,01). La variabilité interannuelle est mieux simulée pour les prairies naturelles et la version FR-2L présente les meilleurs R^2 . On évalue également dans cette partie comment les jeux de simulations FR-2L et DIF1-NRT sont capables d'observer les années où une anomalie de rendement (positive ou négative) est mise en évidence avec les données Agreste. Les plus mauvaises détections sont observées pour le jeu de simulations DIF1-NRT pour les cultures de type C3, alors que c'est le jeu de simulations le plus performant pour les prairies naturelles. Cependant, les années atypiques comme 1996 pour les prairies naturelles, ou 2007 pour les cultures, ne sont observées par aucune des deux versions du modèle.

2.2. Article

Canal, N., Calvet, J.-C., Decharme, B., Carrer, D., Lafont, S., and Pigeon, G.: Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France, Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 4979-4999, doi:10.5194/hess-18-4979-2014, 2014.



Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France

N. Canal^{1,2}, J.-C. Calvet¹, B. Decharme¹, D. Carrer¹, S. Lafont^{1,*}, and G. Pigeon³

¹CNRM-GAME – UMR3589, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

²ARVALIS Institut du végétal, Service Systèmes d'Information et Méthodologies, Boigneville, France

³Météo-France, Division Agrométéorologie, Toulouse, France

* now at: ISPA – UMR1391, INRA, Villenave d'Ornon, France

Correspondence to: J.-C. Calvet (jean-christophe.calvet@meteo.fr)

Received: 5 May 2014 – Published in Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.: 23 May 2014

Revised: 2 November 2014 – Accepted: 12 November 2014 – Published: 10 December 2014

Abstract. The simulation of root water uptake in land surface models is affected by large uncertainties. The difficulty in mapping soil depth and in describing the capacity of plants to develop a rooting system is a major obstacle to the simulation of the terrestrial water cycle and to the representation of the impacts of drought. In this study, long time series of agricultural statistics are used to evaluate and constrain root water uptake models. The inter-annual variability of cereal grain yield and permanent grassland dry matter yield is simulated over France by the Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere, CO₂-reactive (ISBA-A-gs) generic land surface model (LSM). The two soil profile schemes available in the model are used to simulate the above-ground biomass (B_{ag}) of cereals and grasslands: a two-layer force–restore (FR-2L) bulk reservoir model and a multi-layer diffusion (DIF) model. The DIF model is implemented with or without deep soil layers below the root zone. The evaluation of the various root water uptake models is achieved by using the French agricultural statistics of Agreste over the 1994–2010 period at 45 cropland and 48 grassland départements, for a range of rooting depths. The number of départements where the simulated annual maximum B_{ag} presents a significant correlation with the yield observations is used as a metric to benchmark the root water uptake models. Significant correlations (p value < 0.01) are found for up to 29 and 77 % of the départements for cereals and grasslands, respectively. A rather neutral impact of the most refined versions of the model is found with respect to the simplified soil hydrology scheme. This shows that efforts should be made in future studies to reduce other sources of uncertainty, e.g. by using a more de-

tailed soil and root density profile description together with satellite vegetation products. It is found that modelling additional subroot-zone base flow soil layers does not improve (and may even degrade) the representation of the inter-annual variability of the vegetation above-ground biomass. These results are particularly robust for grasslands, as calibrated simulations are able to represent the extreme 2003 and 2007 years corresponding to unfavourable and favourable fodder production, respectively.

1 Introduction

Modelling the land surface processes and the surface energy, water and carbon fluxes is an important field of research in the climate community, as soil moisture and vegetation play an essential role in the climatic Earth system (Seneviratne et al., 2010). Regular improvement and assessment of generic land surface models (LSMs) are also required. In particular, the seasonal and inter-annual variability of the vegetation interacts with hydrological processes, and must be represented well (Szczypka et al., 2012). Modern LSMs such as Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere, CO₂-reactive (ISBA-A-gs) (Calvet et al., 1998; Gibelin et al., 2006) or ORganizing Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms (ORCHIDEE) (Krinner et al., 2005) are able to simulate the diurnal cycle of water and carbon fluxes and, on a daily basis, plant growth and key vegetation variables such as the above-ground biomass (B_{ag}) and the leaf area index (LAI). In areas affected by droughts, soil moisture has

a marked impact on plant growth, and the way root water uptake is represented in such LSMs may influence the simulated B_{ag} and LAI values, in particular the maximum values reached every year. Therefore, long time series of observations related to the latter quantities, such as agricultural yields, have potential in the evaluation of the simulation of the available soil water content (AWC) and root water uptake in LSMs, provided their inter-annual variability is governed by climate and not by trends or changes in agricultural practices.

In Europe, a marked positive trend in crop yields has been observed in the last 45 years, due to the agricultural intensification and evolution of farming practices (Smith et al., 2010a, b). However, Brisson et al. (2010) and Gate et al. (2010) have shown that yields have been stagnating in Europe since the beginning of the 1990s, and particularly since 1996 in France. Therefore, it can be assumed that in the last two decades, the year-to-year change in the large-scale yield of a given rain-fed crop type is mainly driven by the climate variability. In Europe, Smith et al. (2010a, b) showed that the agricultural statistics can be used to assess crop simulations on a country level. On a finer spatial scale over France, Calvet et al. (2012), hereafter referred to as Ca12, have used agricultural statistics (Agreste, 2014) to benchmark several configurations of the ISBA-A-gs LSM through the correlation between yield time series and B_{ag} simulations for the 1994–2008 period. The Agreste data are provided for administrative units (hereafter referred to as “départements”). In ISBA-A-gs, the plant phenology is driven by photosynthesis: on a daily basis, plant growth is governed by the accumulation of the hourly net assimilation of CO_2 through the photosynthesis process, and plant mortality is related to a deficit in photosynthesis. The simulated annual maximum B_{ag} and maximum LAI may differ from one year to another in relation to the impact of the weather and climate variability on photosynthesis. In regions where a deficit in precipitation may occur, soil moisture is a key driver of the photosynthesis and plant growth of rain-fed crops and grasslands. Although ISBA-A-gs is not a crop model and agricultural practices are not explicitly represented, Ca12 achieved a good representation of the inter-annual variability of the dry matter yield (DMY) for grasslands over many départements in France. On the other hand, representing the year-to-year variability of the grain yield (GY) of winter/spring cereals was more difficult. By performing a sensitivity study on different parameters of the model, they concluded that the maximum available soil water content (MaxAWC) and the mesophyll conductance under well-watered conditions (g_m) were the two key parameters driving the inter-annual variability of the simulated B_{ag} . In particular, they showed that the model was markedly sensitive to MaxAWC (especially at low MaxAWC values).

In Ca12, an effort was made to benchmark two options of the vegetation model (drought-avoiding vs. drought-tolerant). In this study, an effort is made to benchmark several options of the soil hydrology model. The main objective of

this study is to assess to what extent using more refined representations of the soil hydrology and the root water uptake can improve the representation of the inter-annual variability of GY (and, possibly, DMY). The ISBA-A-gs model and the method proposed by Ca12 are used to evaluate a new option of the ISBA-A-gs model using a multi-layer soil model permitting a more detailed representation of soil moisture and soil temperature profiles, and of root water uptake. Since several options can be envisaged to implement the multi-layer soil hydrology simulations, a side objective of this study is to benchmark these options and learn about the representation of root water uptake.

The various versions of ISBA-A-gs are presented in Sect. 2, together with the annual yield statistics of Agreste. The symbols used in this work are listed and defined in Table A1. The results obtained with the different set of simulations are shown in Sect. 3 and the differences in the inter-annual variability of the various simulations of B_{ag} are presented, together with the hydrological variables. The results are analyzed and discussed in Sect. 4 and the conclusions of this study are summed up in Sect. 5.

2 Data and methods

2.1 Agricultural statistics in France

Agreste is an annually updated set of agricultural data over France (Agreste, 2014). An inventory of the land use in agriculture and of the crop, forage and livestock production is made on a yearly basis. The data are provided for département administrative units. For crops and grasslands, annual grain yields and dry matter yields (GY and DMY, respectively) are supplied. A new version of Agreste with recalculation since 1989 has recently been published. In this study, the new Agreste data set is used over the 1994–2010 period to examine the inter-annual variability of winter/spring cereal crop GY in 45 départements and of natural grassland DMY in 48 départements (Fig. 1). For cereals, we consider the following six crops: winter wheat, rye, winter barley, spring barley, oat and triticale. For grasslands, the DMY values of permanent grasslands are used. They correspond to natural grasslands or grasslands planted at least 6 years before. Figure 2 shows the inter-annual variability of the average GY and DMY time series derived from Agreste over the considered départements. Over the 1994–2010 period, no significant (p value < 0.01) trend is observed for any of the time series. A few anomalous years affected by particular climate events can be noticed. For example, Fig. 2 shows that the severe summer drought of 2003 impacted both crop and grassland yields. In 2007, the grassland production was the highest of the whole period. Conversely, it was one of the worst in terms of crop yield. The 2007 year was marked by a warm spring (favourable to permanent grasslands), followed by a slightly cold summer (detrimental to cereals). Furthermore,

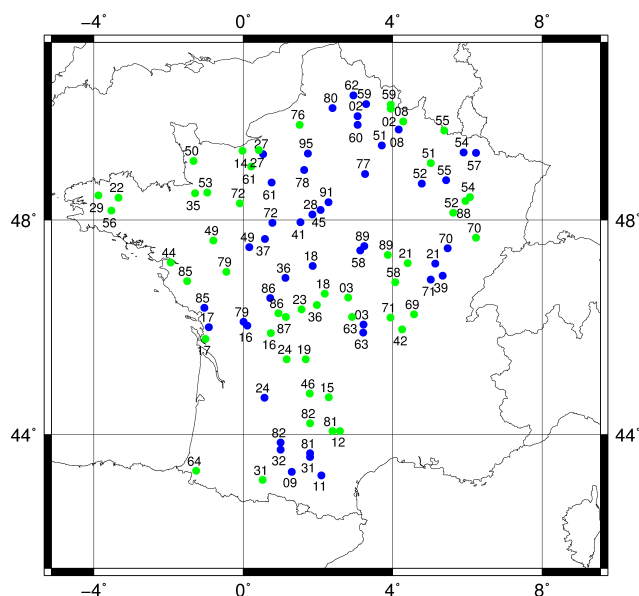


Figure 1. Location of the 45 cropland and 48 grassland 8 km $\times$ 8 km grid cells (blue and green dots, respectively) and the corresponding département number.

the rains were abundant over the grassland regions considered in this study, and have also contributed to the higher production (Agreste Bilans, 2007; Agreste Conjoncture, 2007; Agreste Infos Rapides, 2007).

2.2 The ISBA-A-gs land surface model

The Interactions between Soil, Biosphere, and Atmosphere (ISBA) model (Noilhan and Planton, 1989; Noilhan and Mahfouf, 1996) was designed to describe the daily course of land surface state variables into global and regional climate models, weather forecast models, and hydrological models. In the original version of ISBA, a single root-zone soil layer is considered. A thin top soil layer is represented using the Deardorff (1977, 1978) force–restore approach. Soil characteristics, such as soil water and heat coefficients, the wilting point and the field capacity, depend on soil texture (sand and clay fractions). The stomatal conductance calculation is based on the Jarvis (1976) approach, and accounts for photosynthetically active radiation (PAR), soil water stress, vapour pressure deficit and air temperature.

The representation of the soil physics of the initial version of ISBA was upgraded gradually. A multi-layer soil model including soil freezing processes was developed by Boone et al. (2000) and Decharme et al. (2011). The multi-layer soil model explicitly solves the one-dimensional Fourier law and the mixed form of the Richards equation. The multi-layer representation is used to discretise the total soil profile. In each layer, the temperature and the moisture are computed according to the hydrological and texture layer characteristics. The heat and water transfers are decoupled: heat trans-

fer is solely along the thermal gradient, while water transfer is induced by gradients in the total hydraulic potential. Hereafter, the two-layer force–restore model and the diffusion model are referred to as “FR-2L” and “DIF”, respectively.

In addition to the simple Jarvis parameterisation of stomatal conductance, Calvet et al. (1998) and Gibelin et al. (2006) have developed ISBA-A-gs. ISBA-A-gs (“A” stands for net assimilation of CO₂, and “gs” for stomatal conductance) is a CO₂-responsive version of ISBA able to simulate photosynthesis and its coupling to stomatal conductance. This option was used in studies on the impact of climate change (Calvet et al., 2008; Queguiner et al., 2011) and on the impact of drought on the vegetation in the Mediterranean basin (Szczypta, 2012).

Under well-watered conditions, the A-gs formulation is based on the model proposed by Jacobs et al. (1996) (Calvet et al., 1998, 2004; Gibelin et al., 2006). In this approach, the main parameter driving photosynthesis is g_m . Under water-limited conditions, a soil moisture stress function (F_S) is applied to key parameters of the photosynthesis model. For herbaceous vegetation, two parameters are assumed to respond to soil moisture stress (Calvet, 2000): the mesophyll conductance and the maximum leaf-to-air saturation deficit (D_{max}). Low (high) values of the latter correspond to high (low) sensitivity of the stomatal aperture to air humidity. These photosynthesis parameters are dependent on F_S . Two contrasting responses of the model parameters to soil moisture are represented: drought-avoiding and drought-tolerant (see Fig. S1 in the Supplement). When F_S is higher than the critical soil water stress F_{SC} ($F_{SC} = 0.3$ in our simulations), a drop in F_S triggers an increase (decrease) in g_m and a decrease (increase) in D_{max} for the drought-avoiding (drought-tolerant) parameterisation. The drought-avoiding parameterisation is used for cereal crops, and the drought-tolerant parameterisation is used for grasslands. This assumption was validated by Ca12. The drought response model is illustrated by Fig. S1. These parameters are then used to calculate the hourly leaf-level net assimilation of CO₂ and the stomatal conductance, in relation to sub-daily meteorological inputs such as the incoming solar radiation. A radiative transfer scheme is then used to upscale net assimilation of CO₂ and transpiration at the vegetation level. The plant transpiration flux is used to calculate the soil water budget through the root water uptake. The net assimilation of CO₂ serves as an input to the plant growth model, and LAI and B_{ag} are updated on a daily basis. Figure 3 illustrates these mechanisms. For moderate soil water stress, the drought-avoiding response results in an increase in the water use efficiency (WUE). In the drought-tolerant response, WUE does not change, or decreases. It must be noted that another representation of the response to drought is used for forests (Calvet et al., 2004).

ISBA-A-gs contains a photosynthesis-driven plant growth model able to simulate LAI and the vegetation biomass on a daily basis. For herbaceous vegetation, the model simulates

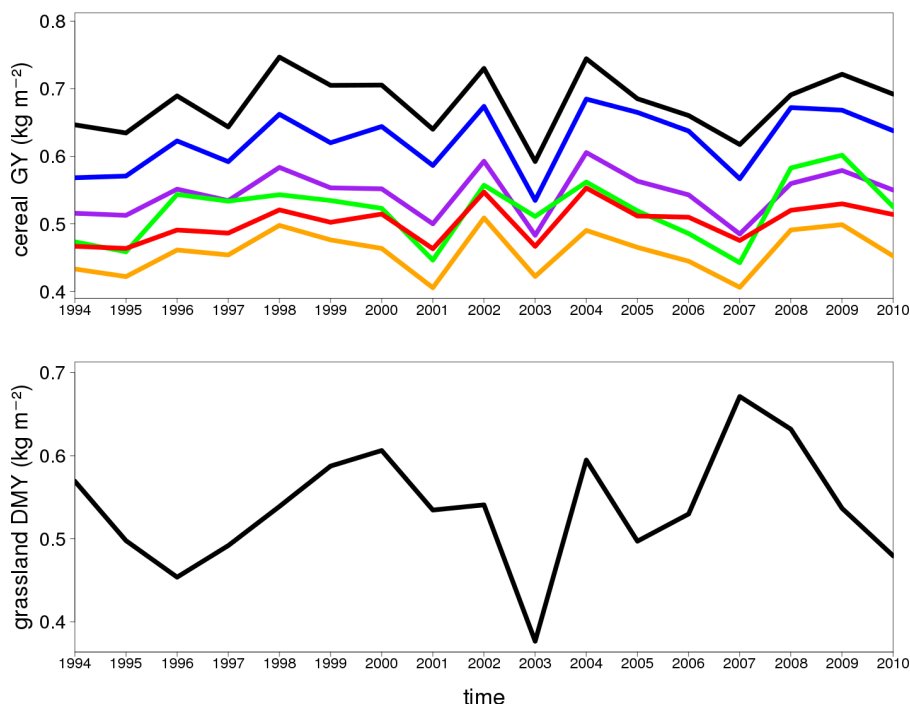


Figure 2. Averaged annual statistics of Agreste over the 1994–2010 period of (top panel) grain yields of six cereals (winter wheat in black, rye in red, winter barley in blue, spring barley in green, oat in orange and triticale in purple) over the 45 départements of Fig. 1 and (bottom panel) dry matter yields of permanent grasslands over the 48 départements of Fig. 1.

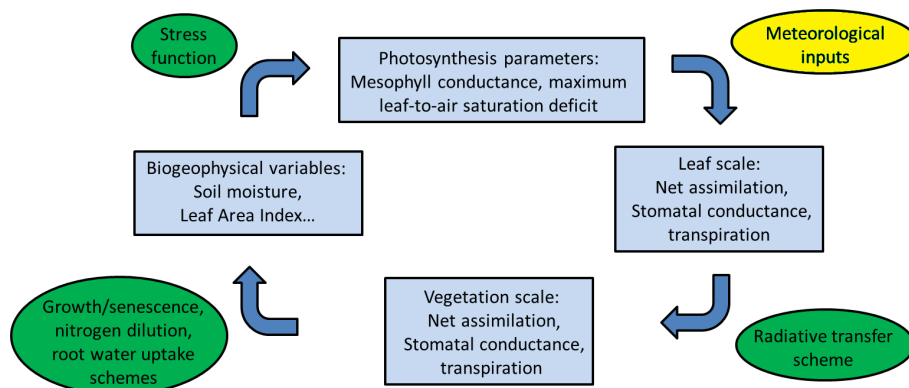


Figure 3. Relation of biogeophysical variables to leaf-scale and vegetation-scale fluxes in the ISBA-A-gs simulations.

the above-ground biomass. The B_{ag} variable has two components (active biomass and structural biomass) related by a nitrogen dilution parameterisation (Calvet and Soussana, 2001). The leaf nitrogen concentration N_L is a parameter of the model affecting the specific leaf area (SLA), the ratio of LAI to leaf biomass (in $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$). The SLA depends on N_L and on plasticity parameters (Gibelin et al., 2006). This version of ISBA-A-gs, called “NIT”, is used in this study.

An assessment of the quality of ISBA-A-gs output variables has been performed in previous local studies with in situ data over France (Rivalland et al., 2005; de Rosnay et al., 2006; Sabater et al., 2007; Brut et al., 2009; Lafont et

al., 2012). Gibelin et al. (2006) have shown that the LAI simulated by ISBA-A-gs on a global scale is consistent with satellite-derived LAI products.

Furthermore, a radiative transfer model within the vegetation canopy describes the attenuation of the PAR through a self-shading approach, and photosynthesis is calculated at three levels of the canopy using a three-point Gauss quadrature method (Jacobs, 1994). A new radiative transfer (hereafter referred to as “NRT”) scheme was recently implemented in ISBA-A-gs by Carrer et al. (2013). The NRT is more detailed than the original model, and a vertical profile of ten layers within the canopy is represented. Because of

the heterogeneity of the different vegetation canopies, distinct bottom and top canopy layer parameterisations are considered. Also, NRT has distinct representations of sunlit and shaded leaves, with two PAR calculations at each layer. Carer et al. (2013) showed that NRT represents better the gross primary production (GPP) on both local and global scales.

2.3 Root density and the soil water stress

In the DIF simulations, the root density profile (Y) is expressed by the following equation derived from Jackson et al. (1996):

$$Y(d_k) = \left(1 - R_e^{100 \times d_k}\right) / \left(1 - R_e^{100 \times d_R}\right), \quad (1)$$

where $Y(d_k)$ is the cumulative root fraction (a proportion between 0 and 1) from the soil surface to the bottom of a soil layer within the root zone, at a depth d_k (m), d_R is the root-zone depth (m) and R_e the root extinction coefficients equal to 0.961 and 0.943 for crops and for temperate grasslands, respectively (Jackson et al., 1996). For a given value of d_R , the lower value of R_e for temperate grasslands corresponds to a cumulative root fraction higher than for crops close to the top soil layer, 15 % higher at $d_k = 0.36$ m and more than 40 % higher at $d_k < 0.05$ m. The cumulative root density is equal to 1 at the bottom of the root-zone soil layer (d_R).

The soil wetness index (SWI) of a bulk top soil layer of thickness d_k , where k is the index of the deepest considered individual soil layer, and of a soil layer at depth d_i ($SWI_{TOP}(d_k)$ and SWI_i , respectively), are defined as

$$SWI_{TOP}(d_k) = \frac{1}{d_k} \sum_{i=1}^k \Delta d_i \times SWI_i \quad (2)$$

$$SWI_i = (\theta_i - \theta_{WILT_i}) / (\theta_{FC_i} - \theta_{WILT_i}), \quad (3)$$

where θ_i is the volumetric water content (in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) at depth d_i , Δd_i is the thickness of soil layer i , and the subscripts “FC” and “WILT” indicate soil moisture at field capacity and at wilting point, respectively. Equation (2) is used to assess the soil moisture stress in a single soil layer or in several soil layers forming a bulk layer from the surface to a depth d_k . Equation (3) is used to assess the soil moisture stress of an individual soil layer at depth d_i . Equations (2) and (3) are used to calculate the stress function in FR-2L and DIF simulations, respectively. In this study, the same soil type is used for all the simulations, and a homogeneous soil profile is assumed with sand and clay fractions of 32.0 and 22.8 %, respectively, and $\theta_{FC_i} = \theta_{FC} = 0.30 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ and $\theta_{WILT_i} = \theta_{WILT} = 0.17 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Since the agricultural statistics we use concern rather large administrative units, it would have been illusory to try to use local soil texture properties.

The value of MaxAWC is expressed in units of kg m^{-2} , and depends on soil and plant characteristics: soil moisture at

field capacity, soil moisture at wilting point (θ_{FC} and θ_{WILT} , respectively, in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), and rooting depth (d_R , in m):

$$\text{MaxAWC} = \rho (\theta_{FC} - \theta_{WILT}) d_R, \quad (4)$$

where $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ is the water density. The θ_{FC} and θ_{WILT} values are common to all the simulations, and the different MaxAWC values are obtained by varying the root-zone depth (d_R).

In the ISBA-A-gs simulations, the dimensionless stress function F_S is used to calculate photosynthesis and the plant transpiration flux (F_T , in $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). The F_S function varies between 0 (at wilting point or below) and 1 (at field capacity or above). Between these two limits, F_S equals $SWI_{TOP}(d_R)$ in FR-2L, and plant transpiration is driven by the total soil water content in the root zone. In the case of DIF simulations, F_S is the sum of the stress functions of each soil layer in the root zone F_{S_i} , i.e. SWI_i , balanced by the root fraction R_{d_i} at depth d_i :

$$F_{S_i} = SWI_i \times \frac{R_{d_i}}{\sum_{j=1}^N R_{d_j}}, \text{ and } F_S = \sum_{i=1}^N F_{S_i}, \quad (5)$$

where N is the number of soil layers in the root zone. Once the F_S stress index has been determined, the photosynthesis parameters can be updated, and the leaf-level and vegetation-level fluxes can be calculated (Fig. 3). The F_S value is used to calculate the photosynthesis parameters g_m and $D_{\max}$ under water-limited conditions (Fig. S1).

The root water uptake in layer i , S_{T_i} (in $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), is calculated as

$$S_{T_i} = F_T \times F_{S_i} / F_S. \quad (6)$$

2.4 Design of the simulations

In this study, the ISBA-A-gs LSM is used within version 7.2 of the SURFEX (SURFace EXternalisée) Earth surface modelling platform of Météo-France (Masson et al., 2013). For the first time, the NIT biomass option of the model and the NRT light absorption scheme are used together with the DIF multi-layer soil configuration. Two representations of the soil hydrology (FR-2L and DIF options) are considered, for both C3 crops and grasslands. The model simulations are offline (not coupled to the atmosphere) and driven by a meteorological reanalysis. We consider the vegetation cover fraction to be equal to 1 across seasons. We use the ISBA-A-gs default avoiding (tolerant) response to the drought for C3 crops (grasslands). Standard values of the model parameters used in this study are summarised in Table 1.

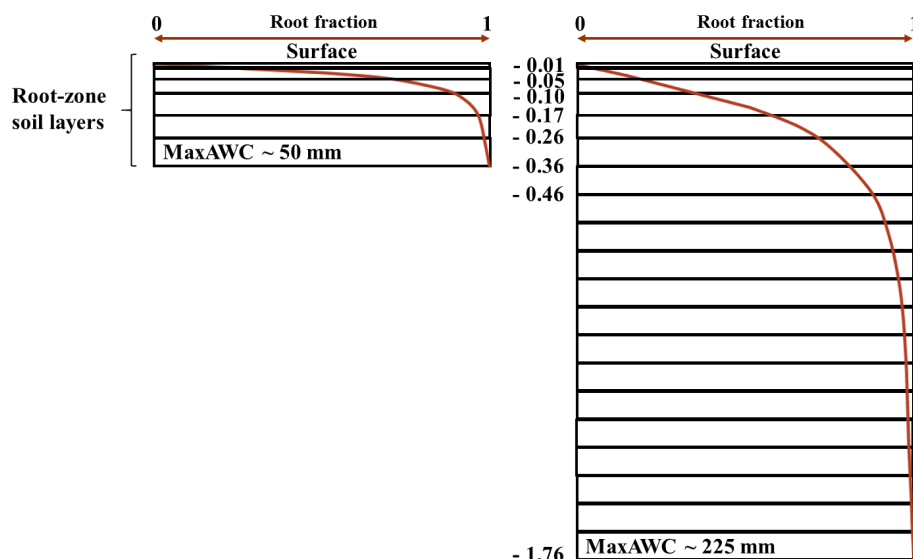
Six experiments are performed:

- FR-2L is based on the force–restore representation of the soil hydrology, and is similar to the model configuration used by Ca12. The root zone corresponds to the whole soil layer.

Table 1. Standard values of ISBA-A-gs parameters for C3 crops and grasslands (Gibelin et al., 2006).

Plant type	Cuticular conductance (g_c) (mm s^{-1})	Critical soil water stress (F_{SC})	Response to drought	Maximum leaf span time (τ_M) (days)	Minimum leaf area index ($LAI_{\min}$) ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)	Leaf nitrogen concentration (N_L) (% of dry mass)	SLA sensitivity to N_L (e) ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \%^{-1}$)	SLA at $N_L = 0\%$ (f) ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)	Fraction of vegetation coverage (%)
C3 crops	0.25	0.3	Avoiding	150	0.3	1.3	3.79	9.84	100
Grasslands	0.25	0.3	Tolerant	150	0.3	1.3	5.56	6.73	100

DIF1

**Figure 4.** Soil profile of the DIF1 experiment. The soil depth within the root zone is in metres. Only two configurations are represented: for the minimum (left panel) and maximum (right panel) values of MaxAWC (50 and 225 mm, respectively). The cumulative root density profile for crops (Eq. 1 with $R_e = 0.961$) is represented by a brown line. A top soil layer of 1 cm is represented.

- DIF1 uses the new DIF capability of SURFEX v7.2 (Fig. 4). As in FR-2L, the root zone corresponds to the whole soil layer. The root profile reaches the bottom of the soil layer, and the total soil depth corresponds to d_R .
- DIF2 includes additional subroot-zone base flow soil layers with respect to DIF1, and the deep soil layers contribute to plant transpiration through capillary rises. It is assumed that MaxAWC is governed by the limited capacity of the plants to develop a root system in a deep soil, and the number of subroot-zone layers decreases when the rooting depth increases. A constant total soil depth of 1.96 m is prescribed, and d_R is varied between 0.36 and 1.76 m (Fig. 5).
- DIF3 is similar to DIF1, as soil depth is the main limitation to root water extraction. However, two additional base flow soil layers contribute to transpiration through capillary rises. The total soil depth and d_R are varied

simultaneously, and two adjacent 0.1 m thick deep soil layers are represented (Fig. 6).

- DIF1-NRT permits assessment of the impact of a refined representation of the CO_2 uptake by the vegetation on the B_{ag} inter-annual variability, as the NRT light absorption option is used together with DIF1.
- DIF1-Uniform permits assessment of the sensitivity of the ISBA-A-gs simulations to the shape of the root density profile. It corresponds to DIF1 simulations using a uniform root density profile instead of Eq. (1). These simulations are performed over the 61-Orne département (see Sect. 4.1).

2.5 Atmospheric forcing

The atmospheric forcing data required for our simulations are provided by the SAFRAN (“Système d’Analyse Fournissant

DIF2

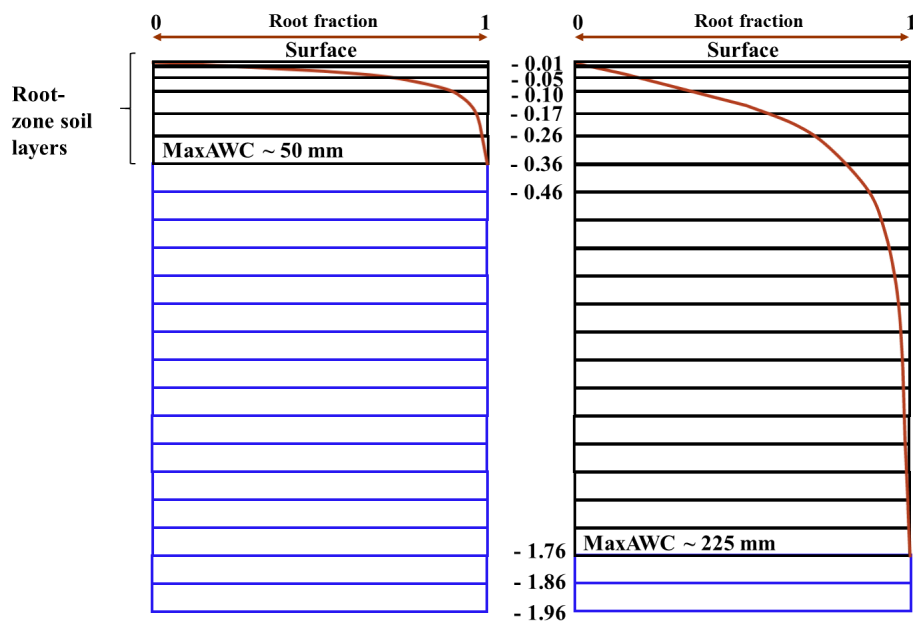


Figure 5. As in Fig. 4, except for the DIF2 experiment. Subroot soil layers are added (blue lines) down to a constant soil depth of 1.96 m.

DIF3

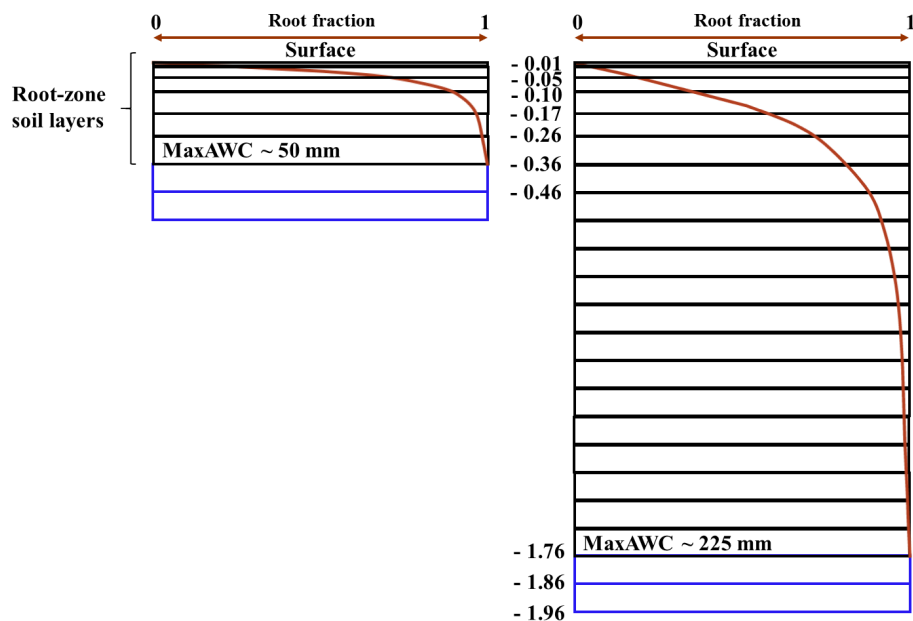


Figure 6. As in Fig. 4, except for the DIF3 experiment. Two subroot soil layers of 10 cm are added (blue lines).

des Renseignements Atmosphériques à la Neige”) mesoscale atmospheric analysis system (Durand et al., 1993, 1999). Precipitation, air temperature, air humidity, wind speed, incoming solar radiation and incoming infra-red radiation are provided over France at an $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ spatial resolution on an hourly basis. The SAFRAN product was evaluated by Quintana-Seguí et al. (2008) using independent in situ observations. One-dimensional model simulations are performed at the $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ spatial resolution of SAFRAN in grid cells corresponding to cereal and natural grassland départements (Fig. 1). These grid cells correspond to plots located within a département and with at least 45 % of their surface covered by either grasslands or crops, according to the average plant functional type coverage given by the $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ECOCLIMAP-II global database (Faroux et al., 2013).

2.6 Optimisation of two key parameters

In this study, the method proposed by Ca12 is used: the values of two key parameters of the ISBA-A-gs simulations, MaxAWC and g_m , are explored, and the parameter pair providing the best correlation coefficient (r) of the maximum annual value of B_{ag} (B_{ag_X}) and GY (DMY) is selected, for C3 crops (grasslands). For the FR-2L experiment, the optimisation of both MaxAWC and g_m is performed for all the départements of Fig. 1. For the DIF1, DIF2, and DIF3 experiments, only MaxAWC is optimised, and the g_m values derived from the FR-2L optimisation are used. In the case of crops, simulated B_{ag} values after 31 July are not considered, in order to be consistent with the theoretical averaged harvest dates in France. Attempts were made to use other dates in July (not shown) without affecting the results of the analysis. On the other hand, new optimal g_m values are obtained together with MaxAWC for the DIF1-NRT experiment, as the representation of photosynthesis at canopy level differs from that of the other experiments. Moreover, major differences with Ca12 are that (1) a longer period is considered (1994–2010 instead of 1994–2008 in Ca12), and that (2) a more detailed screening of MaxAWC values is performed (12 values are considered, against 8 values in Ca12).

For all the experiments, MaxAWC ranges from 50 to 225 mm, with a lower increment between the small values (50, 62.5, 75, 87.5, 100, 112.5, 125, 137.5, 150, 175, 200 and 225 mm; 12 in total).

For the g_m parameter, the same range of values as in Ca12 is used (from 0.50 to 1.75 mm s^{-1} , six in total). For the three simulations DIF1, DIF2 and DIF3, the same values of optimal g_m obtained for each département and vegetation type with the FR-2L version are used.

2.7 Metrics used to quantify the inter-annual variability

In Sect. 4, the following metrics are used: the annual coefficient of variation (ACV), computed as the ratio of the standard deviation (σ) of the simulated B_{ag_X} to the long-term

mean B_{ag_X} ,

$$\text{ACV} = \sigma(B_{ag_X}) / \overline{B_{ag_X}}, \quad (7)$$

and the scaled anomaly (A_S) of B_{ag_X} of a given year (yr)

$$A_{S,B_{ag_X}}(\text{yr}) = \frac{B_{ag_X}(\text{yr}) - \overline{B_{ag_X}}}{\sigma(B_{ag_X})}. \quad (8)$$

This metric is also called the z score, and can be applied to the Agreste cereal GY,

$$A_{S,GY}(\text{yr}) = \frac{GY(\text{yr}) - \overline{GY}}{\sigma(GY)}, \quad (9)$$

and to the Agreste grassland DMY,

$$A_{S,DMY}(\text{yr}) = \frac{DMY(\text{yr}) - \overline{DMY}}{\sigma(DMY)}. \quad (10)$$

3 Results

3.1 Inter-annual variability of B_{ag_X} values

3.1.1 DIF1 vs. FR-2L

Figures 7 and 8 show an example of the inter-annual variability of the simulated B_{ag} and AWC (in kg m^{-2}) as simulated by FR-2L and DIF1 for C3 crops and grasslands of the 61-Orne département. The optimal parameter values for C3 crops and grasslands are 1.75 and 0.5 mm s^{-1} for g_m , and 200 and 50 mm for MaxAWC, respectively.

For C3 crops (Fig. 7), B_{ag_X} values for FR-2L tend to reach slightly higher values than for DIF1. The largest difference is observed in 1996. Furthermore, some differences occur in the senescence period, especially in 2001 and 2009. Conversely, the simulated AWC values are higher for DIF1, especially in winter. For both simulations, the wintertime AWC is often higher than MaxAWC (set to 200 mm), in relation to water accumulation above field capacity, under wet conditions. This phenomenon is more pronounced for DIF1 than for FR-2L. Crop re-growth is simulated by both FR-2L and DIF1 during years with a marked summer drought, in 1995, 1996, 1998, 2006 and 2010. During wet years (i.e. in 1994, 2000 and 2007), the two experiments provide similar AWC values in summertime.

For grasslands (Fig. 8), the two B_{ag} simulations are also very close. However, contrary to C3 crops, the B_{ag} values of the FR-2L simulation tend to be slightly lower than the DIF1 ones (e.g., in 1997, 2002, 2007, and 2009). The other difference with C3 crops is the systematic occurrence of regrowths.

3.1.2 ISBA-A-gs simulations vs. Agreste observations

The départements where FR-2L B_{ag_X} simulations present significant (p value < 0.01) correlations with the Agreste GY

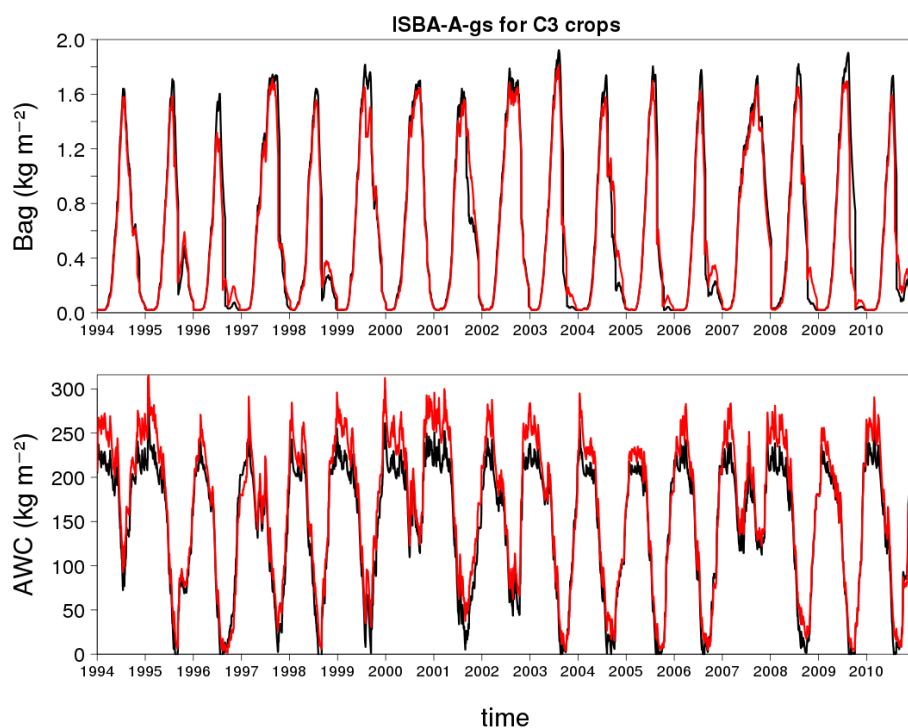


Figure 7. Simulations over the 1994–2010 period for C3 crops ($g_m = 1.75 \text{ mm s}^{-1}$, $\text{MaxAWC} = 200 \text{ mm}$) in the 61-Orne département of (top panel) the above-ground biomass and (bottom panel) the available water content in the root zone, using the FR-2L and DIF1 configurations (black and red lines, respectively).

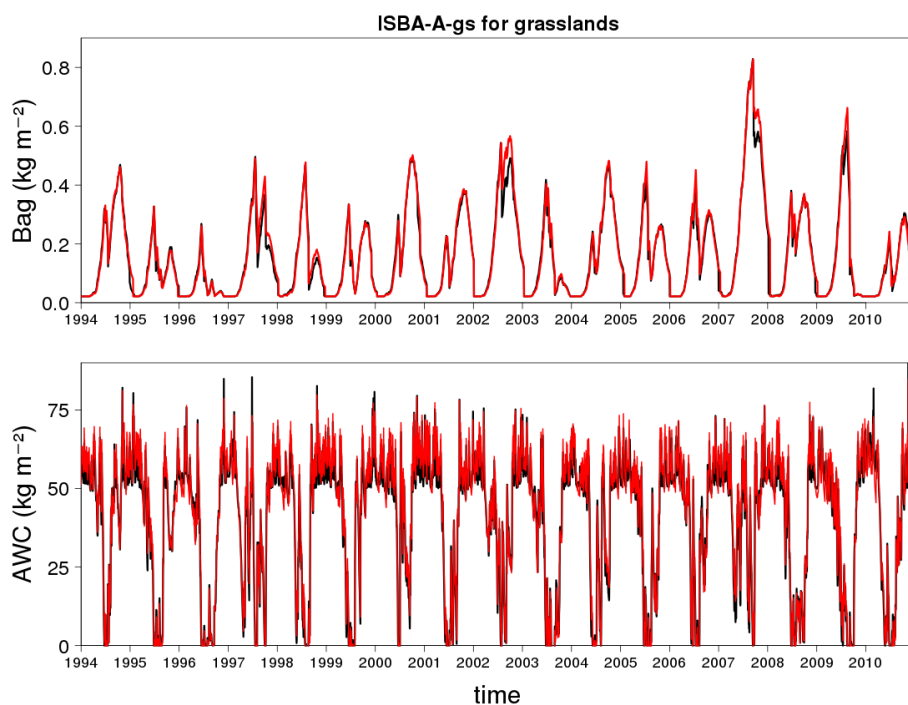


Figure 8. As in Fig. 7, except for grasslands ($g_m = 0.5 \text{ mm s}^{-1}$, $\text{MaxAWC} = 50 \text{ mm}$).

Table 2. Median MaxAWC value and median g_m value under well-watered conditions, derived for each experiment ⁽¹⁾ and number of départements where the simulated $B_{ag,x}$ presents significant correlations ⁽²⁾ with the annual yields of Agreste statistics for six cereals (winter wheat, rye, winter barley, spring barley, oat and triticale) and for permanent grasslands in France over the 1994–2010 period. Median values are in bold.

Plant type	C3 crops					Grasslands				
Experiment	FR-2L	DIF1	DIF2	DIF3	DIF1-NRT	FR-2L	DIF1	DIF2	DIF3	DIF1-NRT
Median and standard deviation of optimal g_m (mm s^{-1})	1.75 0.40	1.75 0.53	1.75 0.51	1.75 0.53	1.75 0.56	1.38 0.48	1.38 0.49	1.50 0.47	1.25 0.49	1.25 0.42
Median and standard deviation of optimal MaxAWC (mm)	125 54.0	112.5 61.3	81.3 84.0	93.8 63.0	100 64	81.3 55.0	68.8 54.0	75.0 55.0	75.0 58.0	75.0 58.0
Number of départements	45					48				
Number of départements presenting significant correlations (at 1 and 0.1 % levels)	12–5	10–3	6–2	10–3	13–4	34–22	36–20	27–10	33–16	37–19

¹ The optimisation of g_m is performed for FR-2L and DIF1-NRT only; DIF1, DIF2, and DIF3 use the same département-level g_m values as FR-2L. ² Significant correlations at the 1 and 0.1 % levels correspond to coefficient of determination (R^2) values higher than 0.366 and 0.525, respectively.

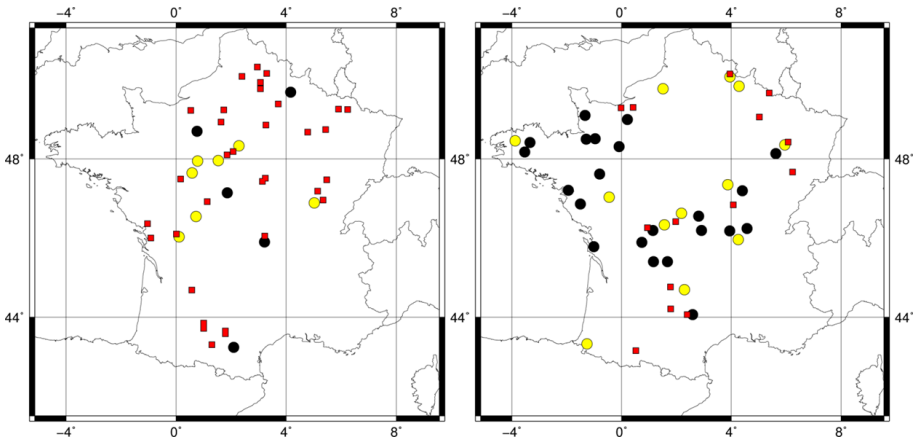


Figure 9. Best FR-2L simulation vs. Agreste statistical correlation levels obtained for (left panel) C3 crops and (right panel) grasslands. Non-significant, significant at the 1 % level, and significant at the 0.1 % level correlations are indicated in red squares, yellow dots and black dots, respectively.

and DMY time series are presented in Fig. 9, and the retrieved g_m and MaxAWC median values are presented in Table 2 for all the experiments, together with the number of départements presenting significant correlations with Agreste, for C3 crops and grasslands. With FR-2L, 12 (5) départements present significant positive correlations at the 1 % (0.1 %) level for C3 crops. For grasslands, 34 (22) départements present significant positive correlations at the 1 %

(0.1 %) level. Although the considered period is longer than in Ca12 (17 years instead of 15 years), these results are similar to those presented in Ca12, even if slight differences can be noticed, such as the number of départements with a significant correlation. In DIF simulations for C3 crops, DIF1 and DIF3 perform nearly as well as FR-2L, and they outperform DIF2: 10 (3) départements present significant positive correlations at the 1 % (0.1 %) level for both DIF1 and DIF3,

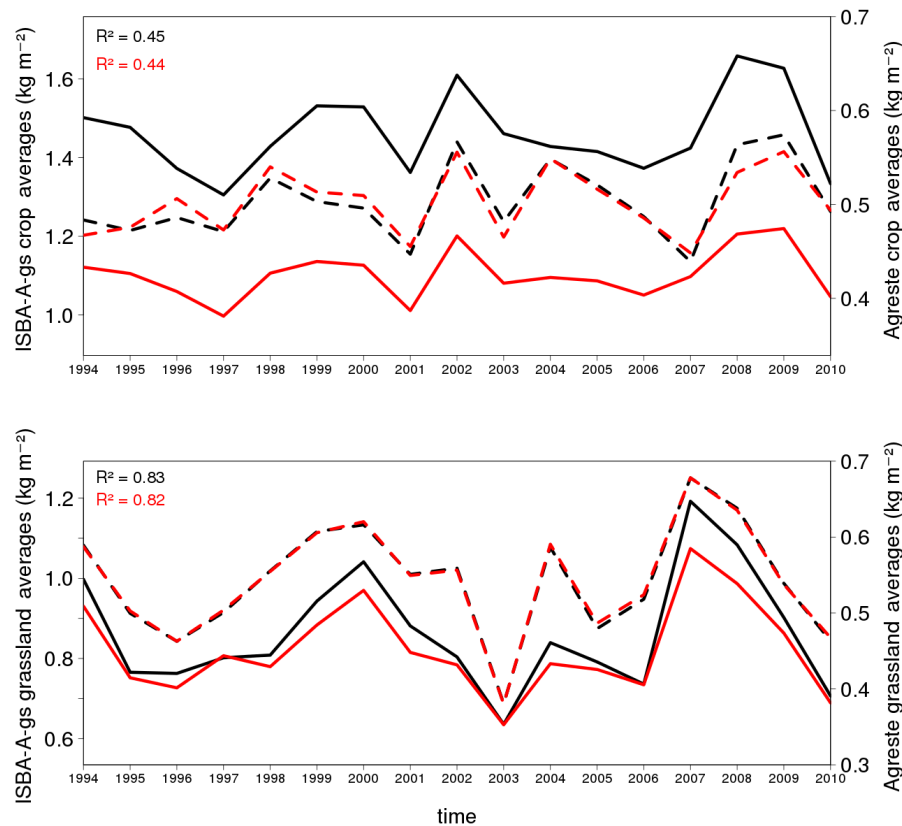


Figure 10. Averaged simulated yearly B_{ag_x} values (ISBA-A-gs, solid lines) and averaged observed agricultural yields (Agreste, dashed lines) for départements with significant correlations (R^2) at the 1 % level, with both FR-2L (black solid line) and DIF1-NRT (red solid line) simulations for (top panel) C3 crop GY and (bottom panel) grassland DMY.

against 6 (2) for DIF2. For the grasslands, a larger proportion of départements (among 48) presents significant correlations, from 27 (10) départements for DIF2 to 36 (20) for DIF1. The addition of deep soil layers below the root zone tends to degrade the results, especially in DIF2. Finally, the DIF1-NRT simulations perform as well as FR-2L or better, with 13 (4) and 37 (19) départements presenting significant positive correlations at the 1 % (0.1 %) level for C3 crops and grasslands, respectively.

Selecting the départements where the optimisation is successful, i.e. where the correlation between B_{ag_x} and GY or DMY is significant (p value < 0.01), the time series of the mean B_{ag_x} and mean GY and of the mean B_{ag_x} and mean DMY are compared in Fig. 10 for both the FR-2L and DIF1-NRT experiments. The inter-annual variability of the grassland DMY is better represented by B_{ag_x} than for the cereal GY, with $R^2 = 0.83$ and $R^2 = 0.45$, respectively. The FR-2L experiment presents slightly better R^2 values than DIF1-NRT. For C3 crops, it appears that the two experiments are not able to represent the lower GY in 2007, or the higher GY in 2004. For grasslands, the two experiments are not able to represent the lower DMY in 1996.

3.2 Impact of subroot-zone soil layers

3.2.1 Optimal MaxAWC values

Table 2 shows that, for C3 crops, the median MaxAWC value is higher for FR-2L than for DIF1 (125.0 and 112.5 mm, respectively). For DIF2 and DIF3, the median MaxAWC is even lower (81.3 and 93.8 mm, respectively). For grasslands, the median MaxAWC is less variable from one experiment to another (from 68.8 to 81.3 mm). In Table 2, the median MaxAWC values are calculated irrespective of which Agreste cereal GY values are used to derive MaxAWC. Among the 10 départements with DIF1 simulations presenting significant correlations at the 1 % level with Agreste, 8 départements share the same cereal Agreste yields as FR-2L.

These eight départements are listed in Table 3 together with squared correlation coefficient (R^2) values and the MaxAWC for FR-2L and DIF1. The FR-2L R^2 is higher than the DIF1 R^2 , except for 08-Ardenne and 63-Puy-de-Dôme. Again, the median MaxAWC is higher for FR-2L than for DIF1 (118.8 and 112.5 mm, respectively). The FR-2L MaxAWC value is lower than the DIF1 MaxAWC value only once, for the 61-Orne département. This indicates that the

Table 3. Optimal MaxAWC and squared correlation coefficient (R^2) between B_{ag_x} and Agreste for FR-2L and DIF1 simulations at départements where the same cereal Agreste data are used and where the correlation between B_{ag_x} values and the yields of Agreste statistics are significant at least at the 1 % level. The highest MaxAWC and R^2 values at a given département are in bold.

Experiment		FR-2L		DIF1	
Département	Cereal	R^2	Optimal MaxAWC (mm)	R^2	Optimal MaxAWC (mm)
08	Oat	0.60	87.5	0.63	75.0
63	Winter barley	0.60	112.5	0.63	112.5
18	Rye	0.57	225.0	0.54	225.0
86	Oat	0.52	87.5	0.51	87.5
11	Winter barley	0.53	125.0	0.49	112.5
16	Oat	0.46	100.0	0.41	62.5
91	Spring barley	0.42	137.5	0.40	112.5
61	Triticale	0.53	200.0	0.40	225.0

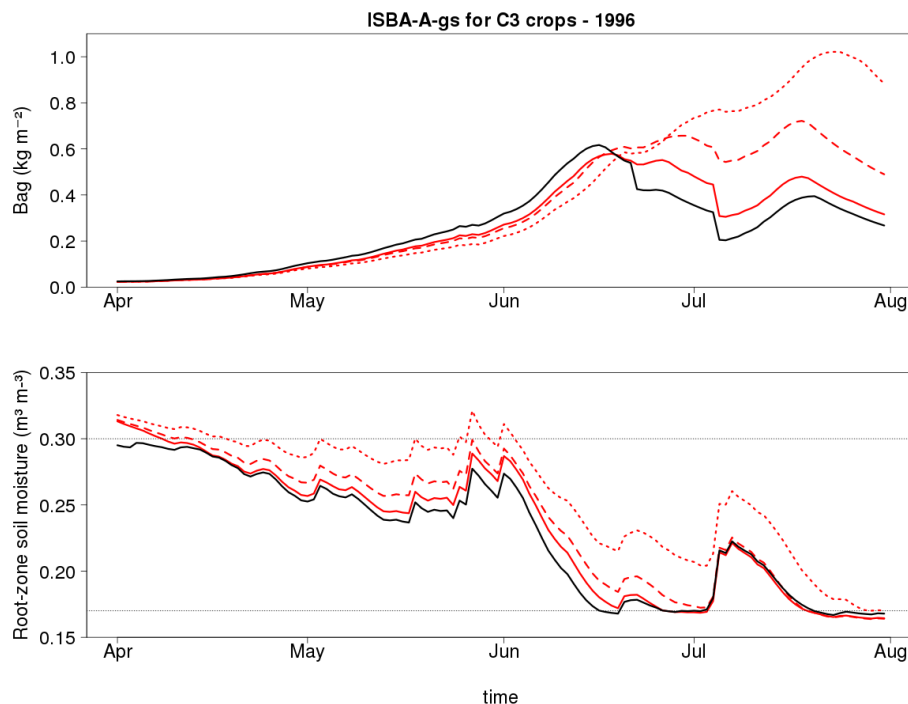


Figure 11. Simulations in 1996 for C3 crops ($g_m = 0.5 \text{ mm s}^{-1}$, MaxAWC = 75 mm) in the 08-Ardennes département of (top panel) above-ground biomass and (bottom panel) root-zone soil moisture in the DIF1, DIF2, DIF3 and FR-2L configurations (red solid, red dotted, red dashed, and black lines, respectively). The grey lines indicate the root-zone soil moisture values at field capacity and at wilting point.

DIF1 root density profile tends to increase the impact of drought on plant growth for this département. Also, the largest difference in R^2 between FR-2L and DIF1 is observed for this département.

3.2.2 Plant growth

Table 2 shows that in DIF2 simulations the number of départements with a significant correlation at the 1 % level is lower than in other experiments. The use of DIF2 has a detri-

mental impact on the representation of the inter-annual variability by the plant growth model. Figure 11 shows the impact of the root water uptake model on the simulated C3 crop B_{ag} and root-zone soil moisture for the 08-Ardennes département during the growing season, from April to July 1996. In the FR-2L, DIF1, DIF2, and DIF3 simulations shown in Fig. 11, the same $g_m = 0.5 \text{ mm s}^{-1}$ and MaxAWC = 75 mm values are used. The growth period is longer in the DIF2 simulation than in the other ones, with senescence only starting

during the second half of July. At the same time, the DIF2 root-zone soil moisture presents the highest values. It appears that in the DIF2 simulation, the additional water supplied by capillary rises from the subroot-zone soil layers has a marked impact on the phenology, with the date of maximum B_{ag} shifted to the end of July and a much higher B_{ag_X} value than in the other experiments (1.02 kg m^{-2} for DIF2, against 0.62, 0.58, and 0.72 kg m^{-2} for FR-2L, DIF1, and DIF3, respectively). The same phenomenon happens in the DIF3 simulation to a lesser extent. In particular, the DIF3 B_{ag_X} is not very different from the FR-2L one. The DIF1 simulation is closer to FR-2L. When the root-zone soil moisture reaches the wilting point (equal to $0.17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, as indicated in Fig. 11 by the dashed line), the senescence starts. A marked water stress occurs and impacts photosynthesis and biomass production. Since water is supplied by the subroot-zone soil layers of DIF2 and DIF3, the wilting point is reached later than for FR-2L and DIF1, and the senescence starts later.

In FR-2L, the growth of B_{ag} is faster than in the other simulations. This leads to a slightly higher value of B_{ag_X} than for DIF1. This is related to the lower FR-2L root-zone soil moisture in May. In the drought-avoiding C3 crop parameterisation of ISBA-A-gs, a moderate soil moisture stress triggers an increase in water use efficiency (Calvet, 2000) and enhances plant growth.

4 Discussion

4.1 Are the Jackson root profile model (Eq. 1) and the resulting water availability (Eq. 5) applicable on a regional scale?

In the DIF simulations, the stress function depends on the distribution of root density through Eqs. (5)–(6). This allows the lower layers to sustain the transpiration rate to some extent when the upper soil layers dry out. However, one may emphasise that the approach used in this study to simulate the root water uptake is relatively simple, and may not be relevant to representing what really happens on a regional scale. Higher-level models are able to simulate the root network architecture and the three-dimensional soil water flow (Schneider et al., 2010; Jarvis, 2011). Also, the hydraulic redistribution of water from wetter to drier soil layers by the root system (hydraulic lift) is not simulated in this study. Siquiera et al. (2008) have investigated the impact of hydraulic lift using a detailed numerical model, and showed that this effect could be significant.

Another difficulty in the implementation of DIF simulations is that the proposed R_e values in Eq. (1) are the result of a meta-analysis. A single R_e value is proposed for a given vegetation type, while large variability of R_e can be observed. This is particularly true for crops, and Fig. 1 in Jackson et al. (1996) shows that $Y(d_k)$ and R_e present much higher variability for crops than for temperate grasslands.

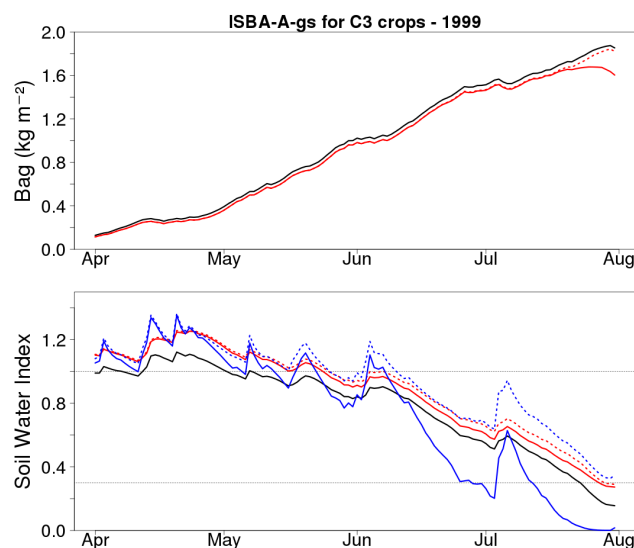


Figure 12. Simulations in 1999 for C3 crops ($g_m = 1.75 \text{ mm s}^{-1}$, $\text{MaxAWC} = 225 \text{ mm}$, $d_R = 1.76 \text{ m}$) in the 61-Orne department of (top panel) above-ground biomass, and (bottom panel) $\text{SWI}_{\text{TOP}}(d_R)$ for FR-2L (black line), DIF1 (red solid line), and DIF1-Uniform (red dotted line), and $\text{SWI}_{\text{TOP}}(0.46 \text{ m})$ for DIF1 (blue solid line) and DIF1-Uniform (blue dotted line).

This difficulty may explain the shortcomings of DIF1 simulations for the 61-Orne département described in Sect. 3.2.1 (Table 3). In particular, the root density in the top soil layers has a large impact on the water stress modelling.

This is demonstrated by performing an additional DIF1 simulation (DIF1-Uniform) using a uniform root density profile instead of Eq. (1). Figure 12 shows the evolution of B_{ag} , $\text{SWI}_{\text{TOP}}(d_R)$ and $\text{SWI}_{\text{TOP}}(0.46 \text{ m})$ for the FR-2L, DIF1 and DIF1-Uniform simulations for the 61-Orne département over the period from April to July 1999. For all the simulations, $g_m = 1.75 \text{ mm s}^{-1}$ and $\text{MaxAWC} = 225 \text{ mm}$. The B_{ag} evolution during the first 3 months is similar in the three simulations, with slightly faster growth for FR-2L. However, while senescence occurs in mid-July for DIF1, it occurs only at the end of July for FR-2L and DIF1-Uniform. Using the Jackson root density profile in Eq. (5) rather than a uniform profile has a marked impact on the simulated water balance. In situations where the top soil layers are drier (wetter) than deep soil layers (i.e. present lower (higher) F_{S_i} values), the total F_S value is lower (higher) in DIF1 simulations than in FR-2L or DIF1-Uniform simulations. This tends to trigger an earlier senescence in DIF1 simulations. The early senescence for DIF1 is related to values of SWI_{TOP} getting close to zero at the top fraction of the root zone: while $\text{SWI}_{\text{TOP}}(0.46 \text{ m})$ decreases below the 0.3 critical soil water stress value (Table 1) at the beginning of July, for DIF1, it never gets below 0.3 in July for DIF1-Uniform. It must be noted that Fig. 12 shows that root water uptake is reduced earlier with FR-2L than with DIF1, in relation to faster plant growth in the FR-2L simula-

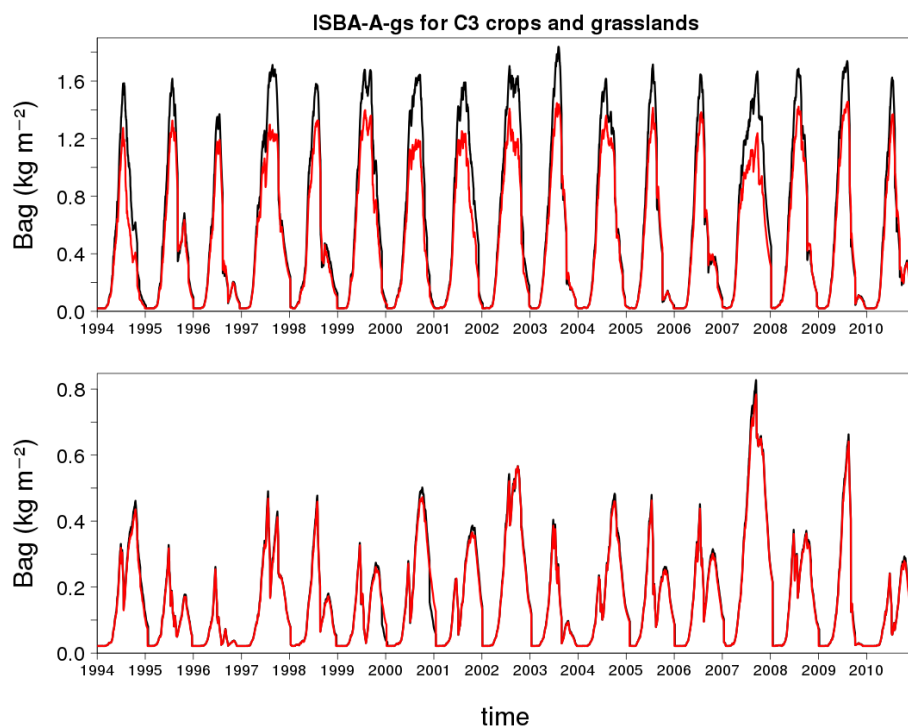


Figure 13. Simulations over the 1994–2010 period in the 61-Orne département of the above-ground biomass for (top panel) C3 crops ($g_m = 1.75 \text{ mm s}^{-1}$, $\text{MaxAWC} = 225 \text{ mm}$) and (bottom panel) grasslands ($g_m = 0.50 \text{ mm s}^{-1}$, $\text{MaxAWC} = 50 \text{ mm}$) for the DIF1 and DIF1-NRT configurations (black and red lines, respectively).

tion. For C3 crops, a drought-avoiding response to soil water stress is simulated, triggering an increase in WUE (and in the plant growth rate) as soon as θ is less than θ_{FC} . Since the DIF1 simulations tend to accumulate water above the field capacity (i.e. θ remains longer above θ_{FC} than for FR-2L), the increase in WUE tends to occur later than for FR-2L. Finally, the B_{ag_x} value for FR-2L and DIF1-Uniform is higher than for DIF1. This root profile effect also has an impact on the inter-annual variability and partly explains the lower R^2 value for DIF1 in Table 3 for this département.

Figure 12 shows that situations in which the top soil layers are drier than deep soil layers tend to be more frequent in DIF1 simulations than in DIF1-Uniform simulations, in relation to the enhanced root water uptake close to the soil surface. Therefore, for given MaxAWC and soil wetness conditions, the total F_S values tend to be lower in DIF1 simulations than in DIF1-Uniform (and FR-2L) simulations. This results in less evapotranspiration and less GPP. The lower GPP in DIF simulations results in lower B_{ag_x} values, especially for cereals as illustrated in Fig. 10. As noted by Feddes et al. (2001), the limitation of transpiration in DIF simulations when a great deal of water is still available at depth is probably too severe. In the real world, plants are able to transfer water uptake to compensate for water stress in the top layers, and DIF simulations cannot adequately account

for it. This fact probably explains part of why this model is not able to outperform the FR-2L simulations.

4.2 Do changes in the representation of photosynthesis have an impact on the model performance?

In this section, the impact of the revised vegetation radiative transfer scheme and the refreshed g_m parameter (DIF1-NRT experiment) is discussed. Table 2 shows that while the DIF1-NRT results are close to those of DIF1 for grasslands, DIF1-NRT tends to outperform DIF1 for C3 crops. Figure 13 presents the simulated B_{ag} of C3 crops and grasslands for the DIF1 and DIF1-NRT simulations in the 61-Orne département over the 1994–2010 period. The two grassland simulations are very similar. On the other hand, the two C3 crop simulations differ in B_{ag_x} values. The mean simulated B_{ag_x} values for C3 crops are 1.61 and 1.32 kg m^{-2} for DIF1 and DIF1-NRT, respectively. The lower B_{ag_x} values simulated by DIF1-NRT are related to the lowest gross primary production simulated by this version of the ISBA-A-gs model (Carrer et al., 2013). Also, DIF1-NRT simulates shorter growing periods and a slightly enhanced inter-annual variability: the ACV (see Sect. 2.7) is equal to 7.4 % for DIF1, and to 8.4 % for DIF1-NRT. For grasslands, the mean simulated B_{ag_x} values are 0.46 and 0.44 kg m^{-2} for DIF1 and DIF1-NRT, respec-

Table 4. Correspondence between simulated and observed extreme years for départements with significant correlations (R^2) at the 1 % level with both the FR-2L and DIF1-NRT simulations for C3 crops and grasslands as shown in Fig. 10. Favourable (unfavourable) years are defined as z scores $A_{S,B_{ag_x}}$ or $A_{S,DMY}$ higher (lower) than 1.0 (−1.0). Years with $A_{S,DMY}$ higher (lower) than 1.5 (−1.5) are in bold.

Plant type	Experiment	Favourable		Unfavourable		Normal (false)	
		True	False	True	False	While favourable	While unfavourable
C3 crops	FR-2L	2002, 2008, 2009			1997, 2010	2004	2001, 2007
	DIF1-NRT	2002, 2009	2008	2001	1997	1998, 2004	2003, 2007
Grasslands	FR-2L	2007, 2008	2000	2003, 2010			1996
	DIF1-NRT	2000, 2007, 2008		2003, 2010			1996

tively, and ACV values for DIF1 and DIF1-NRT are both equal to 30 %.

4.3 Can the ISBA-A-gs model predict the relative gain or loss of agricultural production during extreme years?

ISBA-A-gs is not a crop model, and does not predict yield per se. The background assumption of this work is that the regional-scale above-ground biomass simulated by a generic LSM can be used as a proxy for GY or DMY in terms of inter-annual variability. The quantitative consistency between the simulated biomass and the agricultural statistics was discussed extensively by Ca12 (Sect. 3.3 and Figs. 12 and 13 in Ca12). For cereals, they considered the ratio of crop yield to the maximum above-ground biomass, called the harvest index. The latter ranged from 20 to 50 %, and this was consistent with typical harvest index values given by Bondeau et al. (2007) for temperate cereals. The same result is obtained in this study (not shown). For grasslands, Ca12 simulated both managed and unmanaged grasslands. For managed grasslands, DMY was explicitly simulated, and ranged from 0.1 to 0.8 kg m^{−2}. The scatter of the simulated DMY was relatively small, with a standard deviation of differences with the Agreste DMY of 0.20 kg m^{−2}. ISBA-A-gs tended slightly to underestimate DMY values, with a mean bias of −0.08 kg m^{−2}. For unmanaged grasslands, the simulated B_{ag} was 0.17 kg m^{−2} higher than the Agreste DMY values, on average. In this study, unmanaged grasslands were considered, only, and results similar to those of Ca12 were found (not shown).

The ISBA-A-gs model is optimised to maximise the correlation coefficient between Agreste GY (or DMY) and modelled B_{ag_x} . The resulting scores are used to assess the capability of a given model configuration to represent the inter-annual variability of B_{ag_x} over the 1994–2010 period. In studies where the objective of the model calibration is to improve the model prediction for operational applications, the model quality needs to be confirmed in an independent run with data not used during the calibration. An example of a rigorous calibration and validation procedure in hydrology

can be found in Refsgaard (1997). In this study, a validation run was not performed, as the considered period was too short to apply a split-sample procedure and separate calibration and validation sub-periods. Moreover, the objective of this study is to benchmark DIF options, not to predict the agricultural yields. Therefore, using an independent data set to assess yield prediction is not needed.

While the main objective of this work is to evaluate contrasting root water uptake models using agricultural statistics, one can investigate how the resulting B_{ag_x} values react to extreme years (either favourable or unfavourable to agricultural production). The best simulations result from the optimisation of the MaxAWC parameter. Table 4 summarises the true and false detection of favourable and unfavourable years. The latter are defined as $A_{S,B_{ag_x}}$ or $A_{S,DMY}$ values higher (lower) than 1.0 (−1.0). The $A_{S,B_{ag_x}}$ or $A_{S,DMY}$ values are based on the mean time series of Fig. 10. The undetected favourable and unfavourable years are also listed in Table 4. The best detection performance is obtained by DIF1-NRT for grasslands, with only 1996 not detected as unfavourable. The worst detection performance is obtained by DIF1-NRT for C3 crops, with 2003 and 2007 not detected as unfavourable, 1998 and 2004 not detected as favourable, 1997 wrongly detected as unfavourable, and 2008 wrongly detected as favourable. For grasslands, the extreme years, defined as $A_{S,DMY}$ values higher (lower) than 1.5 (−1.5), are 2007 (favourable) and 2003 (unfavourable). These two cases are correctly identified in the two experiments. For C3 crops, the most favourable years are 2002 and 2009, and the most unfavourable year is 2007. While 2002 and 2009 are correctly identified in the two experiments, 2007 is not detected. The higher performance in the representation of extreme years for grasslands than for C3 crops is consistent with the results of Table 2 showing that significant correlations between B_{ag_x} and DMY are obtained more often than between B_{ag_x} and GY. This can be explained by the more pronounced inter-annual variability of the grassland DMY, with ACV = 30 % against ACV values less than 10 % for the cereal GY. The highest sensitivity of grasslands to climatic conditions is related to their growing cycle covering a longer period than cereals, and to their MaxAWC values, generally

lower than for cereals (Table 2). Finally, ISBA-A-gs has no direct representation of agricultural practices and the cereal GY, and the consistency between B_{ag_x} and GY relies on the hypothesis that the harvest index (the ratio of GY to B_{ag_x}) does not vary much from one year to another on the considered spatial scale. This issue is discussed in Ca12. For grasslands, the simulated B_{ag_x} is more directly representative of DMY. This explains why a better agreement of the simulations is found with the grassland DMY than with the cereal GY (Tables 2 and 4).

4.4 Prospects for better constraining MaxAWC

Ca12 have shown that MaxAWC is the main driver of the inter-annual variability of B_{ag} in the ISBA-A-gs model. Representing the year-to-year B_{ag} variability in a dynamic vegetation model is a prerequisite for correctly representing surface fluxes on all temporal scales (from hourly to decadal). Table 2 shows that significant differences in the representation of the B_{ag} inter-annual variability are triggered by switching from one model option to another. Also, for a given model option, the median g_m and MaxAWC values obtained for cereals contrast from those obtained for grasslands. This is very valuable information for guiding the mapping of the model parameters in future studies. It must be noted that using the inter-annual variability of plant growth to assess LSM parameters is a rather new idea. For example, Rosero et al. (2010) and Gayler et al. (2014) performed an assessment of key parameters of the Noah LSM, including a version with a dynamic vegetation module, using a set of experimental stations. However, they did not address the inter-annual variability of plant growth, as their simulations covered one vegetation cycle only. Such a short simulation period is not sufficient for constraining those model parameters which affect the inter-annual variability of plant growth (Kuppel et al., 2012).

In addition to the intrinsic limitations related to the use of a generic LSM unable to represent agricultural practices (see above), uncertainties are generated by the data sets used to force the LSM simulations. For example, the incoming radiation in the SAFRAN atmospheric analysis can be affected by seasonal biases (Szczypa et al., 2011; Carrer et al., 2012). Since phenology in ISBA-A-gs is driven by photosynthesis, biases in the incoming radiation can impact the date of the leaf onset. The impact of errors in the forcing data is probably more acute for cereals than for grasslands in relation to a shorter growing period. More research is needed to assess the impact of using enhanced atmospheric reanalyses (Weedon et al., 2011; Oubeidillah et al., 2014) and proxies for annual agricultural statistics such as gridded maximum LAI values at a spatial resolution of $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ derived from satellite products (Baret et al., 2013).

Another difficulty is that the coarse spatial resolution of agricultural statistics prevents the use of local soil properties (Sect. 2.3). Models need to be tested on a local scale using

data from instrumented sites. For example, the DIF version of ISBA was tested on a local scale by Decharme et al. (2011) over a grassland site in south-western France. However, the soil and vegetation characteristics at a given site may differ sharply from those at neighbouring sites. It is important to explore new ways of assessing and benchmarking model simulations on a regional scale. Remote-sensing products can be used to monitor terrestrial variables over large areas and to benchmark land surface models (Szczypa et al., 2014). At the same time, using in situ observations as much as possible is key, as remote-sensing products are affected by uncertainties. So far, the French annual agricultural yield data have been publicly available on a département scale only. In order to take advantage of the existing information on soil properties, an option could be to use satellite-derived LAI products at a spatial resolution of $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ in conjunction with soil maps at the same spatial resolution (e.g. derived from the Harmonized World Soil Database, Nachtergaele et al., 2012). Since these products are now available on a global scale, the methodology explored in this study over metropolitan France could be extended to other regions.

The ISBA-A-gs model is intended to bridge the gap between the terrestrial carbon cycle and the hydrological simulations (e.g. river discharge). In previous works, the ISBA-A-gs model was coupled to hydrological models able to simulate river discharge (e.g. Queguiner et al., 2011; Szczypa et al., 2012). While simulating vegetation requires a good description of the soil water stress, hydrological simulations are sensitive to changes in the representation of the surface water and energy fluxes. The latter are controlled to a large extent by vegetation. As suggested by Feddes et al. (2001) and Decharme et al. (2013), the obtained “effective root distribution function” could be validated using river discharge observations by coupling the LSM to a hydrological model. We will investigate this possibility in future work. Note however that the river discharge is often impacted by anthropogenic effects such as dams and irrigation. Such effects are not completely represented in large-scale hydrological models (Hanasaki et al., 2006).

5 Conclusions

The observed cereal GY and permanent grassland DMY production in France from 1994 to 2010 was used in this study to evaluate four contrasting representations of the root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model within SURFEX. A simple representation of the root-zone soil moisture based on a single bulk reservoir (FR-2L) was compared with multi-layer diffusion models describing the soil water uptake profile. The latter used the Jackson root vertical distribution equation, with and without additional subroot-zone base flow soil layers. In order to limit the uncertainty related to the lack of knowledge of local rooting depth conditions, the MaxAWC quantity was retrieved by matching the simulated B_{ag_x}

with the Agreste agricultural statistics, for given vegetation and photosynthesis parameters. The impact on the results of the representation of the vegetation was assessed using another representation of the light absorption by the canopy and using refreshed values of the g_m photosynthesis parameter. The B_{ag_x} time series based on the multi-layer model without additional subroot-zone base flow soil layers presented correlations with the agricultural statistics similar to those obtained with FR-2L. On the other hand, adding subroot-zone base flow soil layers tended to degrade the correlations. Overall, a better agreement of the simulations was found with the grassland DMY than with the cereal GY in relation to several factors, such as (1) the more pronounced inter-annual variability of the grassland DMY, (2) the more direct correspondence between B_{ag_x} and DMY, and (3) less variability in the parameters of the Jackson model than for crops. More research is needed to map the MaxAWC parameter. In particular, long time series of satellite-derived vegetation products (e.g. GEOV1, Baret et al., 2013) could be used in conjunction with soil parameter maps to constrain MaxAWC. The next steps are (1) to verify that the new model parameters have a positive impact on the water and carbon fluxes derived from in situ flux-tower observations and satellite products, on a regional scale and on various timescales (hourly to decadal), and (2) to use a hydrology model coupled to SURFEX (Szczypka et al., 2012) to assess the impact of the new MaxAWC maps on river discharge.

Appendix A

Table A1. Nomenclature.

List of symbols	
ACV	Annual coefficient of variation (%)
$A_{S,B_{ag_X}}$ (yr)	Scaled anomaly of B_{ag_X} of a given year (–)
$A_{S,DMY}$ (yr)	Scaled anomaly of DMY of a given year (z score) (–)
$A_{S,GY}$ (yr)	Scaled anomaly of GY of a given year (z score) (–)
AWC	Simulated available soil water content (kg m^{-2})
B_{ag}	Simulated above-ground biomass (kg m^{-2})
B_{ag_X}	Maximum of simulated above-ground biomass (kg m^{-2})
DIF	Multi-layer diffusion model
d_i	Depth of a soil layer within the root zone (m)
DMY	Dry matter yields of grasslands (kg m^{-2})
$D_{\max}$	Maximum leaf-to-air saturation deficit (kg kg^{-1})
d_R	Root-zone depth (m)
F_S	Soil water stress function (–)
F_{SC}	Critical soil water stress (0.3 in this study)
FR-2L	Two-layer force–restore model
F_T	Plant transpiration flux ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
g_m	Mesophyll conductance in well-watered conditions (mm s^{-1})
GY	Annual grain yields of crops (kg m^{-2})
LAI	Leaf area index ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
LSM	Land surface model
MaxAWC	Maximum available soil water content (kg m^{-2})
NIT	Photosynthesis-driven plant growth version of ISBA-A-gs
N_L	Leaf nitrogen concentration (% of leaf dry mass)
NRT	New radiative transfer scheme within the vegetation
PAR	Photosynthetically active radiation (W m^{-2})
R_e	Root extinction coefficient (–)
SLA	Specific leaf area ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$)
S_T	Root water uptake ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
SWI	Soil wetness index (–)
WUE	Leaf-level water use efficiency (ratio of net assimilation of CO_2 to leaf transpiration)
Y	Root density profile (–)
Greek symbols	
ρ	Water density (kg m^{-3})
θ	Volumetric soil water content ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{FC}	Volumetric soil water content at field capacity ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{WILT}	Volumetric soil water content at wilting point ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
θ_{TOP}	Soil moisture content of a top soil layer ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

The Supplement related to this article is available online at doi:10.5194/hess-11-4979-2014-supplement.

Acknowledgements. The doctoral scholarship of Nicolas Canal was funded by Agence Nationale de la Recherche Technique through a partnership between Météo-France and Arvalis-Institut du Végétal. S. Lafont was supported by the GEOLAND2 project, co-funded by the European Commission within the Copernicus initiative of FP7 under grant agreement no. 218795, and this study contributed to IMAGINES FP7 project no. 311766. The authors would like to thank Stéphanie Faroux for her help with the SURFEX simulations, as well as the three anonymous reviewers for their useful comments.

Edited by: N. Romano

References

- Agreste: <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/donnees-en-ligne>, last access: December 2014.
- Agreste Bilans: Agreste Chiffres et Données Agriculture No. 209, Bilans d'approvisionnements agroalimentaires 2007–2008, 5 pp., <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/file/aliments209.pdf> (last access: December 2014), 2007.
- Agreste Conjoncture: Bilan conjoncturel 2007, No: 10–11, 40 pp., <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/bilan2007note.pdf> (last access: December 2014), 2007.
- Agreste Infos Rapides: Grandes cultures et fourrages, No. 7, Prairies, <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/prairie0711note.pdf> (last access: December 2014), 2007.
- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., and Smets, B.: GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products, Part 1: Principles of development and production, *Remote Sens. Environ.*, 137, 299–309, 2013.
- Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., and Smith, B.: Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance, *Global Change Biol.*, 13, 679–706, 2007.
- Boone, A., Masson, V., Meyers, T., and Noilhan, J.: The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme, *J. Appl. Meteorol.*, 39, 1544–1569, 2000.
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., and Huard, F.: Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France, *Field Crops Res.*, 119, 201–212, doi:10.1016/j.fcr.2010.07.012, 2010.
- Brut, A., Rüdiger, C., Lafont, S., Roujean, J.-L., Calvet, J.-C., Jarlan, L., Gibelin, A.-L., Albergel, C., Le Moigne, P., Soussana, J.-F., Klumpp, K., Guyon, D., Wigneron, J.-P., and Ceschia, E.: Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France, *Biogeosciences*, 6, 1389–1404, doi:10.5194/bg-6-1389-2009, 2009.
- Calvet, J.-C.: Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data, *Agr. Forest Meteorol.*, 103, 229–247, 2000.
- Calvet, J.-C. and Soussana, J.-F.: Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme, *Agr. Forest Meteorol.*, 108, 129–152, 2001.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J., Bessemoulin, P., Cabbelguenne, M., Olioso, A., and Wigneron, J.: An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agr. Forest Meteorol.*, 92, 73–95, 1998.
- Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Roujean, J.-L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H., and Noilhan, J.: Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 397–406, doi:10.5194/acp-8-397-2008, 2008.
- Calvet, J.-C., Lafont, S., Cloppet, E., Souverain, F., Badeau, V., and Le Bas, C.: Use of agricultural statistics to verify the interannual variability in land surface models: a case study over France with ISBA-A-gs, *Geosci. Model Dev.*, 5, 37–54, doi:10.5194/gmd-5-37-2012, 2012.
- Calvet, J.-C., Rivaland, V., Picon-Cochard, C., and Guehl, J.-M.: Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes – response to soil moisture stress, *Agr. Forest Meteorol.*, 124, 143–156, doi:10.1016/j.agrformet.2004.01.007, 2004.
- Carrer, D., Lafont, S., Roujean, J. L., Calvet, J. C., Meurey, C., Le Moigne, P., and Trigo, I. F.: Incoming solar and infrared radiation derived from METEOSAT: Impact on the modelled land water and energy budget over France, *J. Hydrometeorol.*, 13, 504–520, doi:10.1175/JHM-D-11-059.1, 2012.
- Carrer, D., Roujean, J.-L., Lafont, S., Calvet, J.-C., Boone, A., Decharme, B., Delire, C., and Gastellu-Etchegorry, J.-P.: A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: impact on carbon fluxes, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 118, 1–16, doi:10.1002/jgrg.20070, 2013.
- Deardorff, J. W.: A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models, *J. Appl. Meteorol.*, 16, 1182–1185, 1977.
- Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, 20, 1889–1903, 1978.
- Decharme, B., Boone, A., Delire, C., and Noilhan, J.: Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions, *J. Geophys. Res.*, 116, D20126, doi:10.1029/2011JD016002, 2011.
- Decharme, B., Martin, E., and Faroux, S.: Reconciling soil thermal and hydrological lower boundary conditions in land surface models, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 118, 7819–7834, doi:10.1002/jgrd.50631, 2013.
- de Rosnay, P., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Wigneron, J.-P., Lemaître, F., Escorihuela, M. J., Sabater, J. M., Saleh, K., Barrié, J., Bouhours, G., Coret, L., Cherel, G., Dedieu, G., Durbe, R., Fritz, N. E. D., Froissard, F., Hoedjes, J., Kruszwski, A., Lavenu, F., Suquia, D., and Waldteufel, P.: SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 102, 377–389, doi:10.1016/j.rse.2006.02.021, 2006.
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., and Martin, E.: A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Ann. Geophys.*, 18, 65–71, 1993, <http://www.ann-geophys.net/18/65/1993/>.

- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Merindol, L., and Martin, E.: A computer-based system simulating snow-pack structures as a tool for regional avalanche forecasting, *Ann. Glaciol.*, 45, 469–484, 1999.
- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A. T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., and Le Moigne, P.: ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 563–582, doi:10.5194/gmd-6-563-2013, 2013.
- Feddes, R. A., Hoff, H., Bruen, M., Dawson, T., de Rosnay, P., Dirmeyer, P., Jackson, R. B., Kabat, P., Kleidon, A., Lilly, A., and Pitman, A. J.: Modeling root water uptake in hydrological and climate models, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 2797–2809, 2001.
- Gate, P., Brisson, N., and Gouache, D.: Les causes du plafonnement du rendement du blé en France: d'abord une origine climatique, *Evolution des rendements des plantes de grande culture*, Académie d'Agriculture de France, 5 May 2010, Paris, 9 pp., 2010.
- Gayler, S., Wöhling, T., Grzeschik, M., Ingwersen, J., Wize-mann, H.-D., Warrach-Sagi, K., Högy, P., Attinger, S., Streck, T., and Wulfmeyer, V.: Incorporating dynamic root growth enhances the performance of Noah-MP at two contrasting winter wheat field sites, *Water Resour. Res.*, 50, 1337–1356, doi:10.1002/2013wr014634, 2014.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., and Los, S. O.: Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, *J. Geophys. Res.*, 111, D18102, doi:10.1029/2005JD006691, 2006.
- Hanasaki, N., Kanae, S., and Oki, T.: A reservoir operation scheme for global river routing models, *J. Hydrol.*, 327, 22–41, 2006.
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., and Schulze, E. D.: A global analysis of root distributions for terrestrial biomes, *Oecologia*, 108, 389–411, doi:10.1007/BF00333714, 1996.
- Jacobs, C. M. J.: Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration, PhD thesis, Agricultural University, Wageningen, 179 pp., 1994.
- Jacobs, C. M. J., van den Hurk, B. J. J. M., and De Bruin, H. A. R.: Stomatal behaviour and photosynthetic rate of unstressed grapevines in semi-arid conditions, *Agr. Forest Meteorol.*, 80, 111–134, 1996.
- Jarvis, N. J.: Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: concepts and eco-hydrological consequences, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3431–3446, doi:10.5194/hess-15-3431-2011, 2011.
- Jarvis, P. G.: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopy in the field, *Philos. T. Roy. Soc. Lond. B*, 273, 593–610, doi:10.1098/rstb.1976.0035, 1976.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., and Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cy.*, 19, GB1015, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.
- Kuppel, S., Peylin, P., Chevallier, F., Bacour, C., Maignan, F., and Richardson, A. D.: Constraining a global ecosystem model with multi-site eddy-covariance data, *Biogeosciences*, 9, 3757–3776, doi:10.5194/bg-9-3757-2012, 2012.
- Lafont, S., Zhao, Y., Calvet, J.-C., Peylin, P., Ciais, P., Maignan, F., and Weiss, M.: Modelling LAI, surface water and carbon fluxes at high-resolution over France: comparison of ISBA-A-gs and ORCHIDEE, *Biogeosciences*, 9, 439–456, doi:10.5194/bg-9-439-2012, 2012.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouysse, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemoisu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013, 2013.
- Nachtergaele, F., van Velthuize, H., Verelst, L., Wiberg, D., Batjes, N., Dijkshoorn, K., van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., Prieler, S., Teixeira, E., and Shi, X.: Harmonized World Soil Database (version 1.2), 2012, available at: http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HWSD_Documentation.pdf (last access: December 2014), 2012.
- Noilhan, J. and Mahfouf, J.-F.: The ISBA land surface parameterisation scheme, *Global Planet. Change*, 13, 145–159, 1996.
- Noilhan, J. and Planton, S.: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Weather Rev.*, 117, 536–549, 1989.
- Oubeidillah, A. A., Kao, S.-C., Ashfaq, M., Naz, B. S., and Tootle, G.: A large-scale, high-resolution hydrological model parameter data set for climate change impact assessment for the conterminous US, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 67–84, doi:10.5194/hess-18-67-2014, 2014.
- Queguiner, S., Martin, E., Lafont, S., Calvet, J.-C., Faroux, S., and Quintana-Seguí, P.: Impact of the use of a CO₂ responsive land surface model in simulating the effect of climate change on the hydrology of French Mediterranean basins, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2803–2816, doi:10.5194/nhess-11-2803-2011, 2011.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., and Morel, S.: Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 47, 92–107, doi:10.1175/2007JAMC1636.1, 2008.
- Refsgaard, J. C.: Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *J. Hydrol.*, 198, 69–97, 1997.
- Rivalland, V., Calvet, J.-Ch., Berbigier, P., Brunet, Y., and Granier, A.: Transpiration and CO₂ fluxes of a pine forest: modelling the undergrowth effect, *Ann. Geophys.*, 23, 291–304, doi:10.5194/angeo-23-291-2005, 2005.
- Rosero, E., Yang, Z.-L., Wagener, T., Gulden, L. E., Yatheendradas, S., and Niu, G.-Y.: Quantifying parameter sensitivity, interaction, and transferability in hydrologically enhanced versions of the Noah land surface model over transition zones during the warm season, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 115, D03106, doi:10.1029/2009jd012035, 2010.

- Sabater, J. M., Jarlan, L., Calvet, J.-C., Bouyssel, F., and De Rosnay, P.: From near-surface to root-zone soil moisture using different assimilation techniques, *J. Hydrometeorol.*, 8, 194–206, doi:10.1175/JHM571.1, 2007.
- Schneider, C. L., Attinger, S., Delfs, J.-O., and Hildebrandt, A.: Implementing small scale processes at the soil-plant interface – the role of root architectures for calculating root water uptake profiles, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 279–289, doi:10.5194/hess-14-279-2010, 2010.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., and Teuling, A. J.: Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review, *Earth-Sci. Rev.*, 99, 125–161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004, 2010.
- Siqueira, M., Katul, G., and Porporato, A.: Onset of water stress, hysteresis in plant conductance, and hydraulic lift: Scaling soil water dynamics from millimeters to meters, *Water Resour. Res.*, 44, W01432, doi:10.1029/2007WR006094, 2008.
- Smith, P. C., De Noblet-Ducoudré, N., Ciais, P., Peylin, P., Viovy, N., Meurdesoif, Y., and Bondeau, A.: European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: Phenology and productivity, *J. Geophys. Res.*, 115, G01014, doi:10.1029/2008JG000800, 2010a.
- Smith, P. C., Ciais, P., Peylin, P., De Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Meurdesoif, Y., and Bondeau, A.: European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: 2. Interannual yields and anomalous CO₂ fluxes in 2003, *J. Geophys. Res.*, 115, G04028, doi:10.1029/2009JG001041, 2010b.
- Szczypta, C.: Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen, INP Toulouse, 181 pp., 2012.
- Szczypta, C., Calvet, J.-C., Albergel, C., Balsamo, G., Boussetta, S., Carrer, D., Lafont, S., and Meurey, C.: Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 647–666, doi:10.5194/hess-15-647-2011, 2011.
- Szczypta, C., Decharme, B., Carrer, D., Calvet, J.-C., Lafont, S., Somot, S., Faroux, S., and Martin, E.: Impact of precipitation and land biophysical variables on the simulated discharge of European and Mediterranean rivers, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3351–3370, doi:10.5194/hess-16-3351-2012, 2012.
- Szczypta, C., Calvet, J.-C., Maignan, F., Dorigo, W., Baret, F., and Ciais, P.: Suitability of modelled and remotely sensed essential climate variables for monitoring Euro-Mediterranean droughts, *Geosci. Model Dev.*, 7, 931–946, doi:10.5194/gmd-7-931-2014, 2014.
- Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Osterle, H., Adam, J. C., Bellocin, N., Bouvier, O., and Best, M.: Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century, *J. Hydrometeorol.*, 12, 823–848, doi:10.1175/2011JHM1369.1, 2011.

2.3. Synthèse des résultats

Différents profils racinaires du sol ont été évalués avec ISBA-A-gs afin de représenter la variabilité interannuelle des rendements agricoles sur la période 1994-2010. Quatre jeux de simulations ont été produits avec la version ISBA-DF permettant de représenter un sol multicouches, dans le but d'étudier l'impact de l'apport de couches profondes et l'impact d'un nouveau schéma de transfert radiatif dans la végétation. La version « deux couches » d'ISBA-FR vient compléter ce panel de jeux de simulations. Chacune de ces versions est utilisée afin de simuler l'évolution de la biomasse aérienne sèche de six céréales et des prairies naturelles en France. Concernant les cultures de type C3, la médiane des valeurs de g_m optimal est de $1,75 \text{ mm s}^{-1}$ et celle des valeurs de MaxAWC optimal varie de 81,3 mm à 112,5 mm selon la configuration du modèle qui est utilisée. Concernant les prairies naturelles, la médiane calculée parmi les valeurs du g_m optimal varie de $1,25$ à $1,50 \text{ mm s}^{-1}$ et celle calculée parmi les valeurs de MaxAWC optimal varie de 75 à 81,3 mm. On observe donc une variabilité du MaxAWC optimal inférieure pour les prairies naturelles, en lien avec une profondeur d'enracinement plus faible que pour les céréales. Celles-ci sont plus efficaces dans l'exploitation de la réserve utile du sol et la distribution spatiale des propriétés du sol à l'intérieur d'un département a un impact plus marqué sur la construction du rendement à l'échelle du département que pour les prairies. D'autre part, la variabilité interannuelle des rendements en France est plus importante pour les prairies (environ 30%) que pour les céréales à paille (moins de 10%). Ceci peut expliquer la grande différence entre les deux types de végétation étudiés en matière de pourcentage de sites où le R^2 obtenu est significatif au seuil de 1% (p-value < 0,01) (29% de sites pour les céréales de type C3 et 77% pour les prairies naturelles). Concernant les céréales de type C3, les différents jeux de simulations aboutissent à des résultats équivalents, proches de ceux obtenus dans Calvet et al. (2012). Seuls les résultats issus du jeu de simulations DIF2 sont de moins bonne qualité, traduisant l'incapacité du profil de sol avec une couche profonde atteignant 2 m à simuler correctement la variabilité interannuelle. En effet, la couche profonde apporte un excès d'eau empêchant le contenu en eau de la couche racinaire d'atteindre le point de flétrissement et donc la plante d'atteindre la sénescence. De cette manière, les valeurs de B_{agX} sont surestimées.

Une simulation issue de DIF1 est réalisée sur un département, cette fois en utilisant un profil racinaire linéaire, appelée DIF1-uniform. On a pu ainsi comparer l'évolution du B_{agX} et du SWI afin de mettre en évidence l'impact du profil racinaire utilisé. Le choix d'un profil linéaire plutôt que celui utilisé par défaut dans le modèle impacte directement le SWI des couches racinaires proches de la surface et donc l'occurrence de la sénescence. L'utilisation d'un nouveau schéma de transfert radiatif a été évaluée par rapport à DIF1. Il augmente sensiblement la variabilité interannuelle des cultures et réduit la période de croissance (avec des valeurs de B_{agX} plus faibles). Lorsque le modèle simule les prairies naturelles, peu de différences sont observées.

Enfin, un volet supplémentaire a été ajouté afin d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les années où une anomalie de rendements est observée. Pour chacun des deux

types de végétation étudiés, les valeurs moyennes de B_{agX} issues du jeu de simulations FR-2L sont calculées sur les sites où le R^2 obtenu est significatif au seuil de 1% (p-value < 0,01), tout comme les rendements moyens issus d'Agreste sur ces mêmes sites. A partir de ces valeurs, une méthode de détection a été utilisée afin de discerner parmi les 17 années celles présentant une anomalie de rendement observée. La méthode de détection est également appliquée sur la série de B_{agX} simulé avec chacun des jeux de simulations. Les années présentant une anomalie de rendement pour les prairies naturelles sont mieux représentées que pour les cultures, indépendamment du jeu de simulations utilisé. Le jeu de simulations DIF1-NRT a un taux de détection peu fiable pour les cultures de type C3.

Cette étude montre la nécessité de réaliser des cartes de MaxAWC à une échelle spatiale suffisamment fine afin d'améliorer la modélisation des couverts végétaux. Pour y parvenir, l'utilisation de la télédétection peut s'avérer nécessaire en remplacement des statistiques annuelles d'Agreste utilisées à l'échelle départementale.

CHAPITRE III

III. Mise en place d'indicateurs pour anticiper les rendements agricoles : données modélisées et issues de produits satellitaires.

1. Choix du modèle et des données issues des produits satellitaires

Cette partie présente les différents choix de données qui ont été fait dans cette étude concernant le jeu de données biogéophysiques simulées et le jeu de données LAI issues de produits satellitaires.

1.1. Utilisation de la configuration optimale du profil racinaire simulé

Grâce à l'étude présentée dans le chapitre II, on a montré que parmi toutes les configurations du modèle ISBA-A-gs évaluées, certaines étaient mieux capables que d'autres de représenter la variabilité interannuelle des rendements en France sur la période 1994-2010. On rappelle que cette évaluation a été réalisée en corrélant la série de B_{agX} simulée et les rendements annuels d'Agreste à l'échelle départementale. On a montré que l'utilisation d'un nouveau schéma de transfert radiatif, utilisé avec un profil de sol sans couche profonde, obtient pour les deux types de végétation étudiés le plus grand nombre de sites avec un R^2 significatif au seuil de 1% (p-value < 0,01). Concernant les cultures de type C3 (prairies naturelles), la significativité est retrouvée pour 13 (37) sites. Concernant la couche profonde simulée sous la couche racinaire, on a mis en évidence qu'en la paramétrant avec une profondeur à 2 m, le modèle n'était pas en mesure de reproduire correctement la variabilité interannuelle. Autrement, les résultats obtenus avec les autres configurations ne sont pas très différents les uns des autres. On choisit donc d'utiliser dans cette partie le jeu de simulations DIF1-NRT. De plus, ce jeu de simulations possède un couple g_m/MaxAWC optimisé, contrairement aux autres simulations DIF (qui n'utilisent pas le nouveau schéma de transfert radiatif) où la conductance du mésophylle optimale est issue du jeu de simulation FR-2L (voir Chapitre II Sect. 2.).

1.2. Les données de LAI satellitaire utilisées dans cette thèse

1.2.1. Le « Copernicus Global Land Service »

Copernicus Global Land Service est un programme européen (<http://land.copernicus.eu/>), co-fondé par la Commission Européenne et l'Agence Européenne de l'Environnement. Il comprend un volet dédié à l'observation par satellite de la Terre, un autre dédié à la fourniture

de données in-situ. L'objectif de ce programme est de fournir une information avec valeur ajoutée liée à l'utilisation des terres, caractériser la nature des surfaces terrestres, l'état de la végétation et le cycle de l'eau. Ces données ont des applications dans divers domaines, comme par exemple l'agriculture, à des échelles spatiales allant des données in-situ jusqu'aux données globales.

Ce programme inclut un projet appelé Geoland2. Ce projet fournit des séries continues de données LAI satellitaire en temps quasi-réel, appelées GEOV1 (Baret et al., 2013). Ces données sont disponibles au pas de temps décadaire et sur l'ensemble du globe. Elles présentent une précision maximale comprise entre $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ et 20% de la valeur pour un LAI supérieur à $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Depuis 1999, ces séries de LAI sont conçues grâce à un algorithme incorporant les meilleures performances du LAI satellitaire des produits CYCLOPES (Carbon cYcle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites), fourni par le capteur SPOT/VEGETATION, et MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer). Avant 1999, les réflectances issues du radiomètre AVHRR Long Term Data Record (LTDR) étaient utilisées à une résolution spatiale de 5 km (Vermote et al., 2009) (Figure 13).

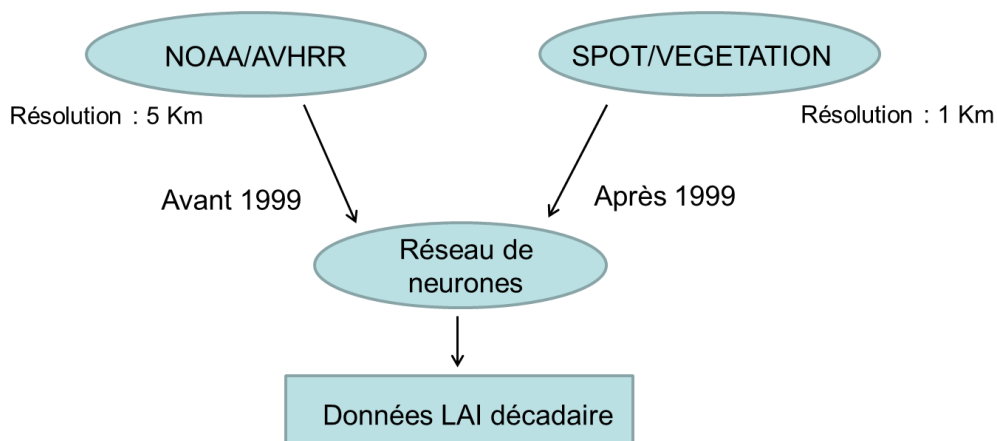


Figure 13: Schéma illustrant la réalisation des séries de données LAI satellitaire GEOV1.

Les données LAI satellitaire GEOV1 sont utilisées dans cette thèse. Il est important de souligner que d'autres produits satellitaires existent et auraient pu être également utilisés. Un critère de choix des données utilisées a été la caractérisation bien documentée de la qualité de ces données ainsi que leur disponibilité. Néanmoins, leur utilisation nécessite qu'une étape intermédiaire soit effectuée.

1.2.2. Traitement des séries de LAI satellitaire GEOV1

La première étape de traitement des séries de LAI GEOV1 consiste à agréger les données brutes sur la grille Safran avec une résolution de 8 km. Pour cela, les données à l'échelle kilométrique ayant été identifiées comme appartenant à l'un des deux types de végétation

étudiés sont agrégées sur la grille Safran. A l'échelle de la France, une série homogène de LAI satellitaire est donc disponible. Sur la période 1994-2010, les données de LAI sont récupérées pour les sites de chacun des deux types de végétation présentés dans le chapitre II et qui ont été utilisés pour l'évaluation du modèle ISBA-A-gs. Cependant, les appareils embarqués dans les satellites ne permettent pas toujours d'obtenir une mesure du LAI. A plusieurs reprises, des données de LAI sont manquantes. Afin de « combler » ces données, une méthode simple d'interpolation temporelle est utilisée (Figure 14). Cette méthode, basée sur une fonction polynômiale, calcule la valeur manquante à partir de deux valeurs situées au pas de temps qui précède et à celui qui succède à la donnée manquante.

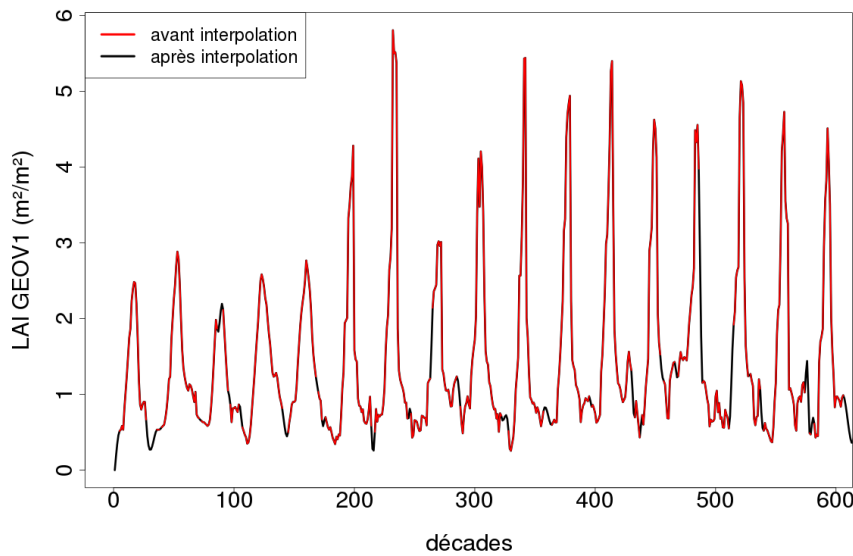


Figure 14: Représentation de l'étape d'interpolation temporelle sur les séries de LAI satellitaire. Exemple pris pour la série de LAI satellitaire obtenue pour le département des Ardennes (08).

Sur la période 1994-2010, la série de LAI satellitaire est issue de deux différents types de produits (Sect. 1.2.1.). Afin de s'assurer de la continuité des valeurs, une correction est appliquée sur la période 1994-1999. Pour cela, on calcule sur les périodes 1999-2010 la moyenne et l'écart-type de la série de LAI pour chacun des sites étudiés. Ensuite, on calcule l'anomalie standardisée du LAI pour chaque décade sur la période 1994-1998, selon la relation suivante :

$$\text{anoLAI}_{99-10,i} = \frac{\text{LAI}_{99-10,i} - \overline{\text{LAI}_{99-10,i}}}{\sigma \text{LAI}_{99-10,i}} \quad (1)$$

où i est une décade donnée comprise entre 1 et 36, $\overline{\text{LAI}_{99-10,i}}$ la moyenne de la série du LAI satellitaire sur la période 1999-2010 et $\sigma \text{LAI}_{99-10,i}$ l'écart-type de cette même série.

On calcule un nouveau LAI satellitaire sur la période 1994-1998 (noté $corrLAI_{94-98,i}$), en corrigeant chacune des valeurs avec la relation suivante :

$$corrLAI_{94-98,i} = anoLAI_{94-98,i} \cdot \sigma LAI_{99-10,i} + \overline{LAI_{99-10,i}} \quad (2)$$

De cette manière, la série de LAI satellitaire issue de GEOV1 sur la période 1994-2010 est homogène pour chacun des deux types de végétation étudiés (Figure 15). Il n'y a pas de tendance observée sur la période considérée.

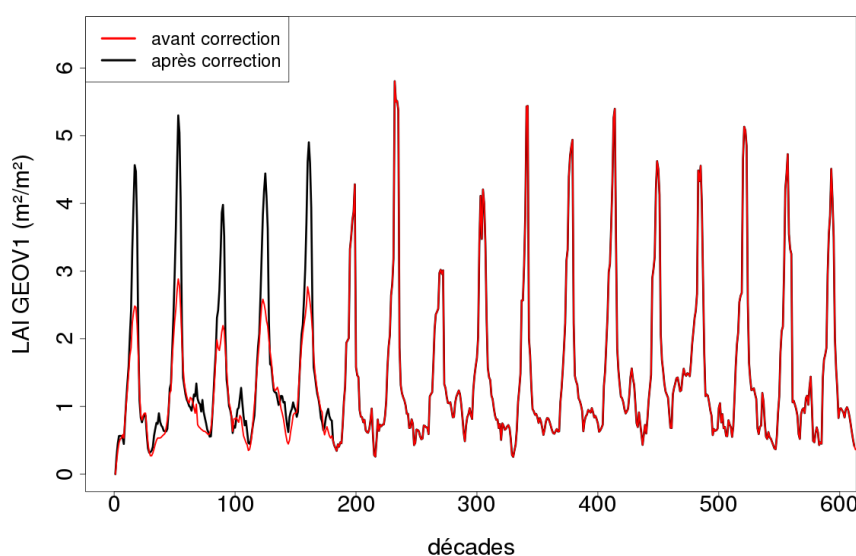


Figure 15: Représentation de la méthode de correction appliquée sur les séries de LAI satellitaire après l'étape d'interpolation temporelle. Exemple pris pour la série de LAI satellitaire obtenue pour le département des Ardennes (08).

2. L'humidité du sol racinaire simulée : un indicateur d'état de la croissance future de la culture

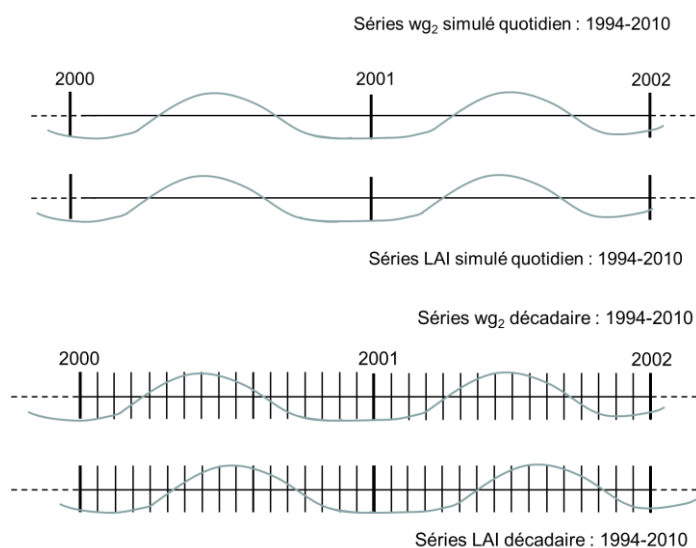
2.1. Mise en place d'une méthode basée sur des relations statistiques

Les couverts végétaux sont fortement contraints par la quantité d'eau disponible dans la couche racinaire. Un exemple simple concerne les conséquences du manque d'eau entraînant une sécheresse agricole et ses conséquences sur les rendements des cultures (Maybank, 1995). L'eau présente dans le sol est un indicateur de l'état futur de la culture. En excluant les besoins en nutriments et autres facteurs liés à l'environnement, une plante bien alimentée en eau va uniquement être pilotée par la photosynthèse. Ainsi, la plante peut produire une importante biomasse et un fort potentiel de rendement. A l'inverse, un déficit en eau va

rapidement amener la plante à une période de sénescence, entraînant la perte partielle ou totale de la culture et va fortement réduire le rendement. La relation existante entre l'humidité racinaire du sol (noté wg_2 par la suite) et le B_{agX} a été prospectée dans Calvet et al. (2012) sur un site en France, puis a été plus largement étudiée à l'échelle du bassin méditerranéen dans Szczypta et al. (2014). Compte-tenu de la qualité des résultats obtenus en utilisant l'humidité racinaire simulée, ce volet de la thèse ne concernera que l'exploitation de cette variable biophysique. Cette recherche d'indicateurs biophysiques sera fondée sur le calcul des coefficients de détermination (R^2) entre d'une part le wg_2 simulé et moyenné sur plusieurs jours et d'autre part le rendement final issu d'Agreste ou le B_{agX} . De cette façon, on cherche à voir de quelle manière le wg_2 simulé par le modèle ISBA-A-gs apporte une information précoce sur l'état futur de la plante (le LAI par exemple), ainsi que sur la tendance du rendement à l'échelle de la France.

2.1.1. Protocole de mise en œuvre

Une récente étude a eu pour objectif d'évaluer de quelle manière les outils de modélisation et de télédétection étaient en mesure de suivre les sécheresses (parmi lesquelles la sécheresse agricole) sur le bassin méditerranéen (Szczypta et al., 2014). Une partie de cette étude utilisait entre autres, le wg_2 simulé avec une version d'ISBA-A-gs afin d'obtenir une information précoce sur les variables liées à la végétation. Cette étude a également mis en évidence l'efficacité de cette approche. Notre étude étant placée dans un contexte équivalent (contexte géographique et modélisation de variables biogéophysiques en agriculture), on reprend ce protocole de mise en œuvre, que l'on détaille par la suite (Figure 16).



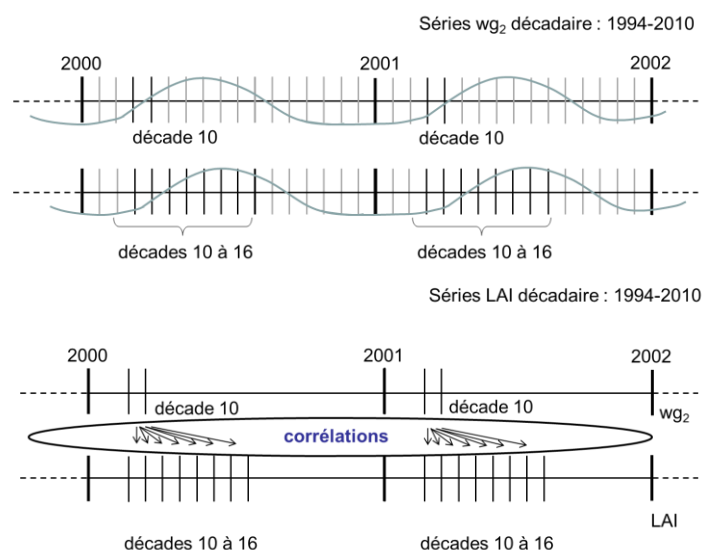


Figure 16: Schématisation du protocole utilisé pour la recherche de relation entre les séries de variables biogéophysiques issues du jeu de simulations DIF1-NRT. L'exemple pris ici se focalise sur la décade 10, mais le même protocole est utilisé pour les autres décades étudiées.

A l'aide des séries de wg_2 et des séries quotidiennes de LAI simulé issues du jeu de simulations DIF1-NRT sur la période 1994-2010 (Figure 16, 1^{ère} ligne), on produit plusieurs jeux de données décadaires. Pour chacun des sites étudiés et pour chaque type de végétation, le jeu de simulations utilisé a été optimisé tel que cela est décrit dans l'article présenté dans le chapitre II.

La méthode consiste à découper les séries de variables simulées au pas de temps décadaire sur toute la période pour en faire une valeur moyennée sur 10 jours (Figure 16, 2^{ème} ligne). En effet, la variabilité de wg_2 en sortie d'ISBA-A-gs rend impossible son utilisation au pas de temps quotidien. On regroupe ensuite les différentes valeurs décadaires pour obtenir des séries de dix-sept valeurs, soit une décade par an. Ensuite, on compare chacune des séries décadaires wg_2 à la série de LAI correspondant à la même décade, puis à la décade suivante, etc..., jusqu'à la septième décade (Figure 16, 3^{ème} ligne). Sur la Figure 16, l'illustration est faite pour la décade 10, mais l'étape est réalisée avec toutes les autres décades étudiées. On corrèle la série correspondant à la décade 10 du wg_2 avec la série correspondant à la décade 10 du LAI, puis la décade 10 de la série wg_2 avec la décade 11 du LAI, etc..., jusqu'à la décade 16 du LAI. Ce travail est réitéré sur toutes les séries de décades du wg_2 comprises entre la 1^{ière} (début janvier) et la 21^{ème} (fin juillet), même si l'on sait par avance que les résultats obtenus pour les décades appartenant aux mois de janvier et février n'apporteront pas de résultats intéressants. Au-delà de la décade 21 (à partir du mois d'août), on considère que la date moyenne de récolte théorique en France est passée et donc qu'il est inutile de poursuivre la recherche de relation statistique. On s'est également assuré qu'au-delà du mois d'août, le LAI décroît pour de nombreux sites (non montré ici).

Cette relation est obtenue en recherchant le plus grand coefficient de détermination significatif au seuil à 1% (p-value < 0,01) parmi les sept décades de LAI étudiées (Figure 16,

dernière ligne) et pour chacune des décades du wg_2 . On peut ainsi avoir une information sur combien de temps à l'avance l'humidité racinaire du sol joue un rôle important sur la croissance de la culture et à quel moment de l'année.

2.1.2. Séries de wg_2 : indicateur précoce de l'indice foliaire

On évalue en premier lieu les premières décades pour lesquelles un R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) est obtenu pour chacun des sites (Figure 17).

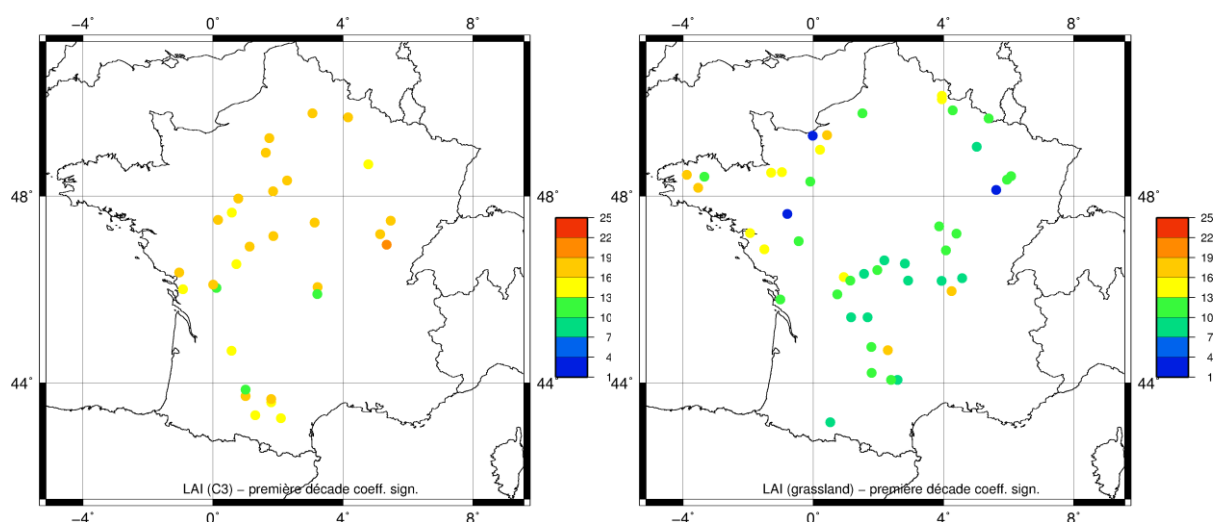


Figure 17: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un R^2 significatif ($p\text{-value} < 0,01$) entre le wg_2 décadaire et le LAI décadaire simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT, pour les cultures de type C3 (à gauche) et pour les prairies naturelles (à droite).

Sur la Figure 17, on remarque que sur une grande majorité de sites étudiés, un R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) est obtenu, que ce soit pour les variables simulées pour les cultures de type C3 (Figure 17, à gauche) ou pour les prairies naturelles (Figure 17, à droite). Pour les cultures de type C3, les premiers R^2 sont obtenus entre les décades 13 à 16, notamment pour les sites au sud, et les décades 16 à 19, notamment pour les sites au nord. Pour quelques sites dans le quart sud-ouest, ces R^2 sont observées avant la décade 13. Ainsi, pour certains sites et dès le mois d'avril, le wg_2 est corrélé avec le LAI. Cela montre qu'à partir de cette date, l'humidité du sol racinaire peut avoir une influence sur la biomasse et donc sur la croissance de la plante. Pour les prairies naturelles, cette date est plus précoce, puisqu'on peut observer un R^2 significatif entre les décades 7 à 10, soit dès le mois de mars. Pour la plupart des sites étudiés, la relation entre les deux variables est obtenue entre avril et mai, voire vers le mois de juin pour des sites autour de la Bretagne. On ne le montre pas ici, mais la relation entre les deux séries de décades se poursuit jusqu'à la date de récolte pour la plupart des sites présentés.

Pour les deux types de végétations étudiés, la relation entre les deux variables est plus précoce au sud qu'au nord. En admettant que la croissance de la végétation soit en avance

dans les régions au sud, il semble que le moment où la relation entre les deux séries de variables devient forte correspond à une étape spécifique de la végétation. Cette hypothèse sera vérifiée par la suite à l'aide de l'indice foliaire, qui donne une information précise sur l'état d'avancement de la culture. Il reste à voir si le wg_2 décadaire est également reliée avec le LAI des décades suivantes.

On recherche à présent le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) obtenu pour chaque type de végétation. Comme l'étude est réalisée pour toutes les décades comprises entre 1 et 21, on ne s'intéresse ici qu'à la décade 17 (Figures 18 et 19).

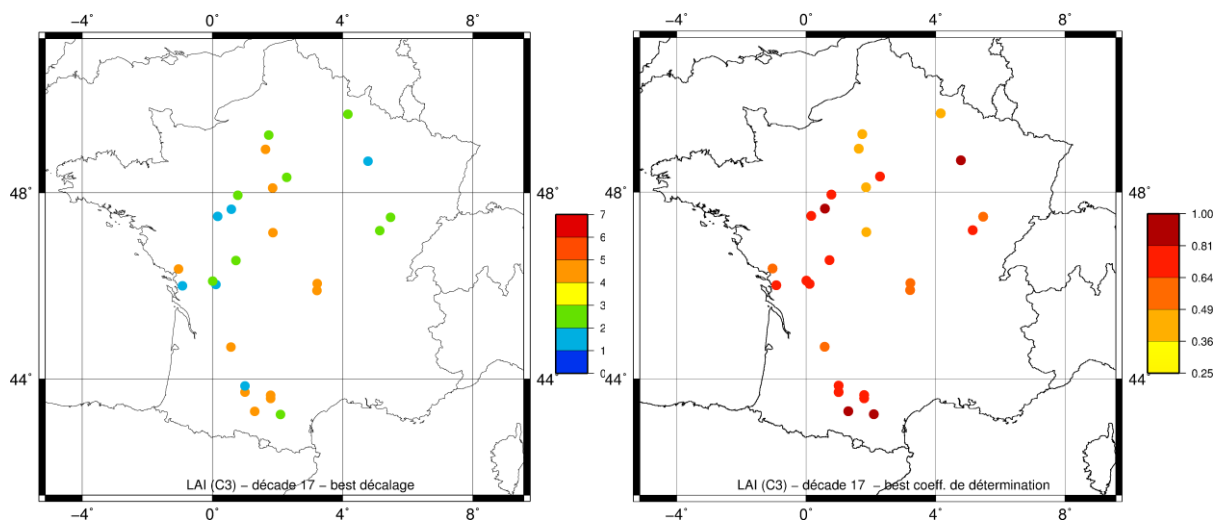


Figure 18: A gauche, la carte illustrant le décalage entre le wg_2 de la décade 17 (mi-juin), et le LAI décadaire, simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT, pour lequel on obtient le meilleur coefficient de détermination significatif ($p\text{-value} < 0,01$) obtenu pour les cultures de type C3. A droite, la valeur du R^2 obtenu est représentée pour les mêmes sites.

Sur la Figure 18, on remarque que pour de nombreux sites, le wg_2 moyenné sur la décade 17 est très bien corrélé avec le LAI des décades suivantes, notamment pour un décalage compris entre 2 à 4 décades (Figure 18, à gauche). C'est la durée pour laquelle le wg_2 est le mieux corrélé avec le LAI à venir. La durée de cette anticipation semble être plus longue pour les sites au sud, avec en moyenne un décalage de 4 décades, tandis qu'il est compris entre 1 et 3 pour de nombreux sites au nord.

Si l'on considère à présent les R^2 correspondants (Figure 18, à droite), on peut voir que les valeurs sont élevées, à l'exception de quelques sites au nord.

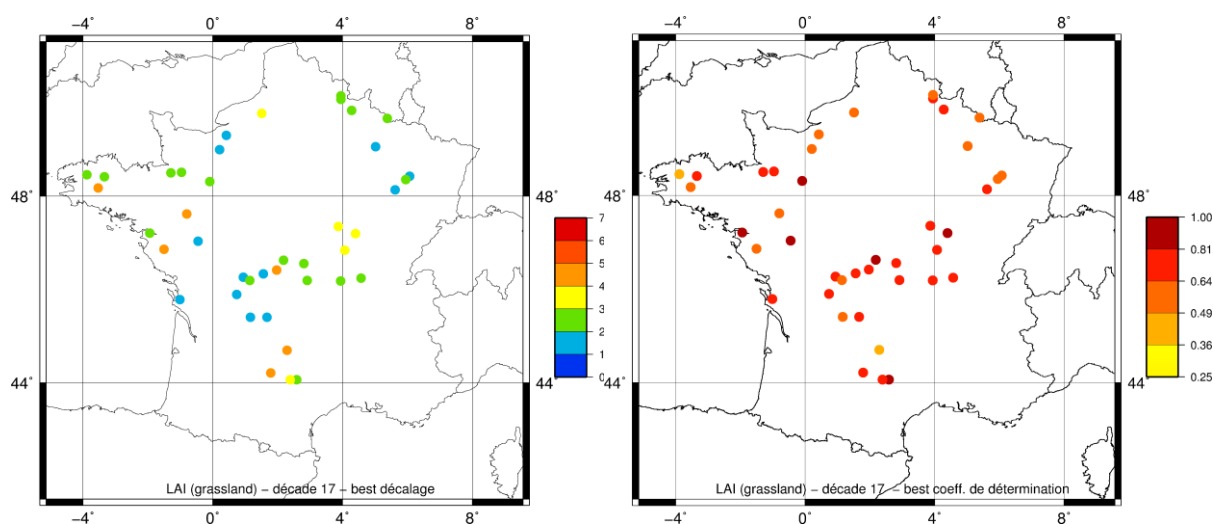


Figure 19: Comme sur la Figure 18, mais pour les prairies naturelles.

Pour les prairies naturelles, là encore de nombreux sites présentent une forte relation entre le wg_2 moyenné sur la décade 17 et le LAI moyenné sur les décades à venir (Figure 19, à gauche). Cette fois, le décalage permettant d’obtenir le meilleur R^2 significatif est compris entre 1 et 4 décades. Il n’y pas de tendance spatiale observée. Néanmoins, les R^2 obtenus couvrent la totalité du territoire. De nouveau, les relations obtenues sont très fortes lorsqu’on considère les valeurs de R^2 correspondants (Figure 19, à droite).

A présent, ces résultats sont synthétisés afin d’avoir un aperçu sur l’ensemble des décades (Figure 20).

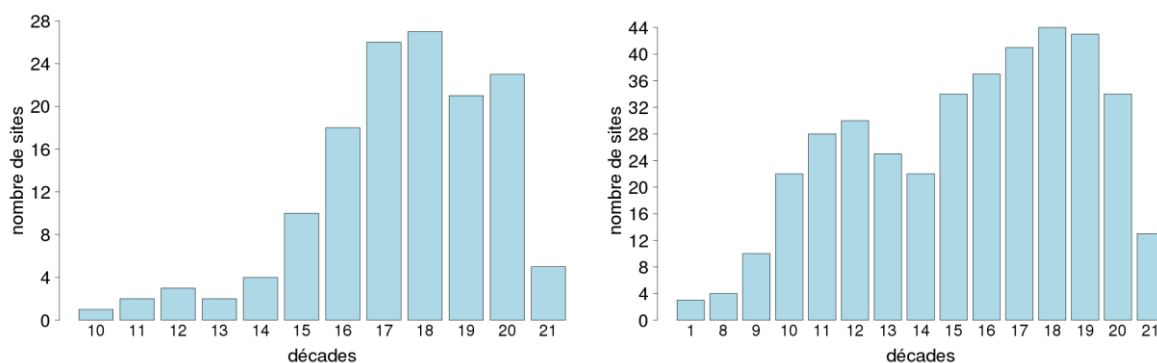


Figure 20: Histogrammes représentant le nombre de sites par décades où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% (p -value < 0,01) est obtenu entre le wg_2 décadaire et le LAI décadaire, simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Concernant les cultures de type C3, le nombre de sites présentant un R^2 significatif devient important à partir de la décade 16, soit début juin. C’est en accord avec ce qui a été montré sur la Figure 18. Avant cette décade, peu de sites (entre 1 et 9) montrent une relation significative entre les deux séries de variables étudiées. Après cette décade, on atteint jusqu’à

27 sites (décade 18). Puis, ce nombre décroît progressivement. Ainsi, sur plus de la moitié des sites étudiés pour cette végétation, le wg_2 décadaire apporte une information plusieurs décades à l'avance sur l'état futur de la végétation. Il semble donc que l'eau disponible dans le sol joue un rôle sur la croissance de la culture, de sorte que des répercussions sont observées quelques décades plus tard sur la biomasse aérienne de la plante. La décade 18 est identifiée ici comme étant le moment clé où cette relation est la plus observée.

Pour les prairies naturelles, les résultats sont encore plus intéressants puisque, comme il l'avait déjà été montré sur la Figure 18, le nombre de sites présentant un R^2 significatif devient important à partir de la décade 10 (début du mois d'avril), avec 21 sites. Il atteint même 30 sites à la décade 12, avant de légèrement décroître les deux décades suivantes. Puis, ce nombre croît de nouveau pour atteindre 44 à la décade 19, décade optimale dans ce cas de figure. Sur 48 sites étudiés, c'est la quasi-totalité. Ce nombre décroît ensuite jusqu'à la fin de la période étudiée.

2.1.3. Lien entre le wg_2 simulé et le rendement final observé/simulé

De la même manière, on produit également une série moyennée de B_{agX} , incluant dix-sept valeurs. Cette fois, on recherche la relation entre les différentes séries de wg_2 décadaire et cette nouvelle série. On peut ainsi estimer à l'échelle de la France et pour les deux types de végétation étudiés, à quel moment le wg_2 simulé a un potentiel prédictif maximal sur l'état final de la culture. On évalue également à partir de quelle période de l'année cette information est disponible. On pourra ainsi conclure sur l'importance de l'humidité du sol pour un état donné de la plante et construire un indicateur clé pour le rendement, ceci plusieurs décades à l'avance.

Dans un premier temps, on s'intéresse aux résultats obtenus avec la série de B_{agX} et on identifie pour chacun des deux types de végétation étudiés les premières décades pour lesquelles un R^2 significatif au seuil de 1% (p -value < 0,01) est obtenu (Figure 21).

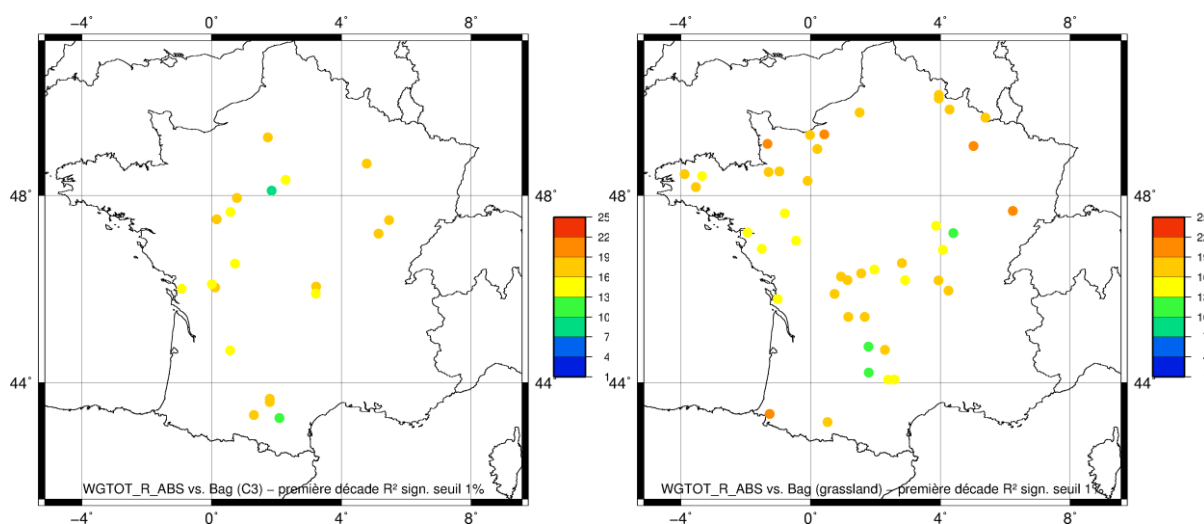


Figure 21: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un R^2 significatif (p -value < 0,01) entre le wg_2 décadaire et le B_{agX} , simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Concernant les cultures de type C3 (Figure 21, à gauche), on observe que les premières corrélations significatives entre le wg_2 et le B_{agX} simulés sont obtenus entre la décade 13 et 19. A ce moment de l'année, en plus d'être corrélé à la série du LAI décadaire à venir, le wg_2 est donc en mesure de nous donner une tendance sur le B_{agX} . Concernant les prairies naturelles (Figure 21, à droite), la même période est obtenue, sauf pour quelques sites au nord où c'est plus tardif, entre les décades 19 à 22. Pour d'autres sites, des décades plus précoces sont obtenues, entre 16 et 19. Globalement, on obtient un grand nombre de sites où le R^2 est significatif pour la même période que celle observée pour les cultures de type C3.

On considère ensuite les meilleurs R^2 significatifs au seuil de 1% (p -value < 0,01) obtenus pour les deux types de végétation étudiés. L'illustration est faite avec les résultats obtenus pour la décade 17 (Figure 22).

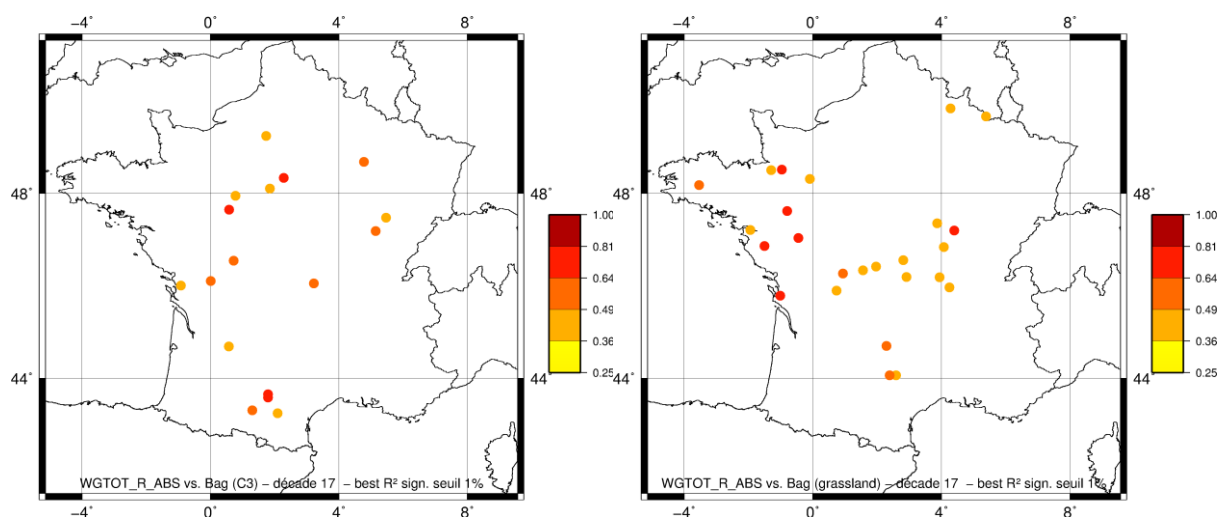


Figure 22: Cartes illustrant les meilleurs R^2 significatifs au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) obtenus entre le wg_2 de la décade 17 (mi-juin) et le B_{agX} simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Sur la Figure 22, on voit que sur un grand nombre de sites et pour chacun des deux types de végétation étudiés, le R^2 calculé est significatif, avec des valeurs globalement élevées, pouvant atteindre 0,64 sur certains sites.

A présent, on présente Figure 23 les résultats obtenus sur l'ensemble des décades.

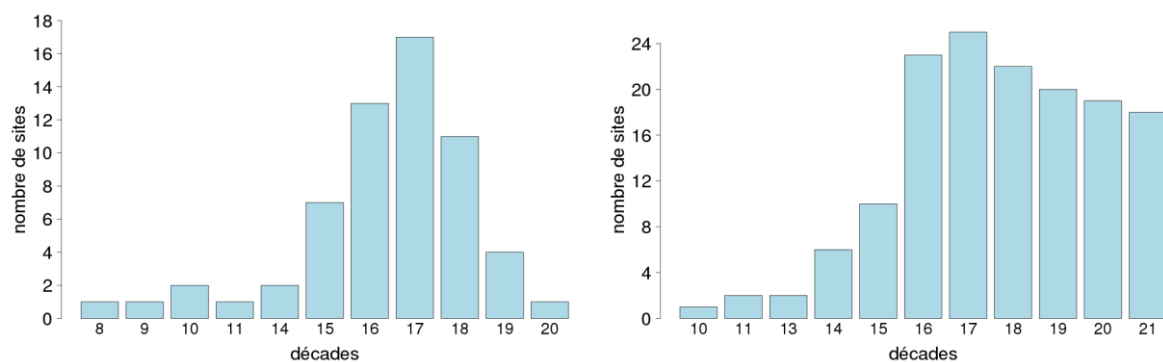


Figure 23: Histogrammes représentant le nombre de sites par décade où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) est obtenu entre le wg_2 décadaire et le B_{agX} , simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Si l'on s'intéresse à l'ensemble des résultats obtenus pour les différentes décades étudiées, on constate des comportements différents selon le type de végétation étudié. Pour les cultures de type C3 (Figure 23, à gauche), le nombre de sites croît seulement à compter de la décade 15 (fin mai). La décade 17 est optimale, tandis que peu de sites ont un R^2 significatif concernant les autres décades. Pour la décade 17, également illustrée Figure 22, on obtient un maximum de 17 sites.

A l'inverse, selon la décade, des résultats très contrastés sont observés pour les prairies naturelles (Figure 23, à droite). Dès la décade 16, 23 sites présentent un R^2 significatif. Avant, seuls 10 sites, voire moins, sont obtenus. On voit clairement ici que le wg_2 simulé décadaire apporte une information sur le B_{agX} qu'à partir d'un moment précis, identifié ici comme étant le début du mois de juin. Puis, le nombre de sites décroît au fil des décades, mais reste tout de même élevé. A peu près la moitié des sites étudiés ont un R^2 significatif, ce qui est mieux que ce qui est obtenu avec les cultures de type C3.

Enfin, toujours pour les deux types de végétation étudiés, on explore cette fois non pas la relation statistique du wg_2 simulé avec la série de B_{agX} , mais avec la série de rendements à l'échelle départementale issus d'Agreste. On considère en premier lieu les premières décades pour lesquelles un R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) est obtenu pour chacun des sites (Figure 24).

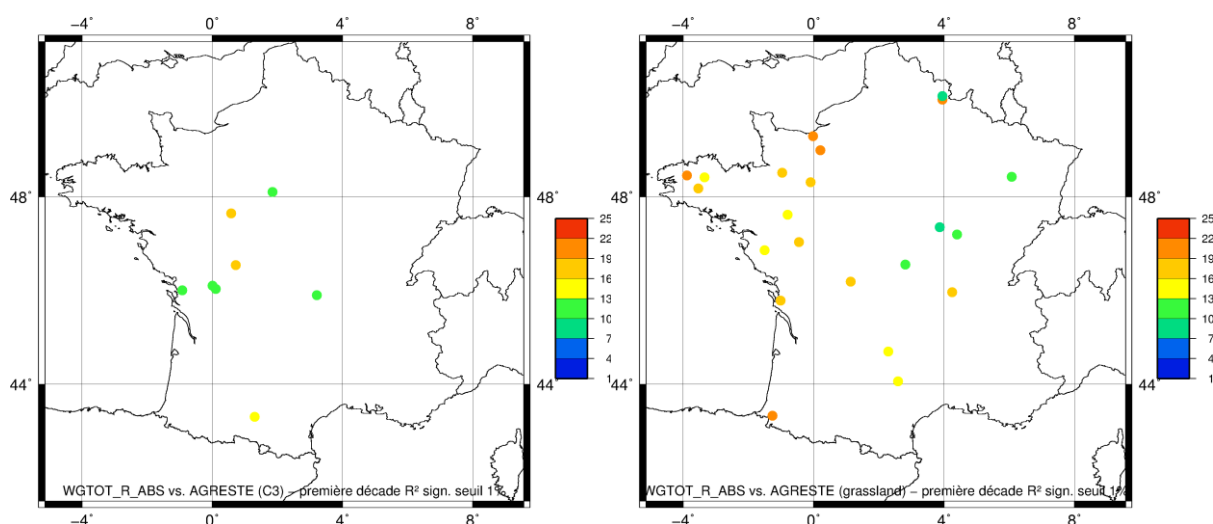


Figure 24: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un coefficient de détermination significatif ($p\text{-value} < 0,01$) entre le wg_2 décadaire, simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT, et le rendement final issu d'Agreste. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Si l'on s'intéresse tout d'abord aux premières décades pour lesquelles le R^2 est significatif entre le wg_2 simulé décadaire et le rendement final issu d'Agreste, on peut s'apercevoir que concernant les cultures de type C3 (Figure 24, à gauche), peu de R^2 significatifs sont obtenus. Seule sur une dizaine de sites un R^2 significatif est obtenu, entre les décades 10 à 13.

Pour les prairies naturelles, un nombre bien plus important de R^2 significatifs observé (Figure 24, à droite). Sur la partie ouest du pays, la significativité est même obtenue avant la décade 13. Globalement, elle est obtenue pour la première fois entre début mai et fin juin.

On regarde ensuite les meilleurs R^2 significatifs au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) obtenus pour les deux types de végétation. On s'intéresse cette fois aux décades pour lesquelles on obtient le plus grand nombre de sites pour chacun des types de végétation étudiés (Figure 25).

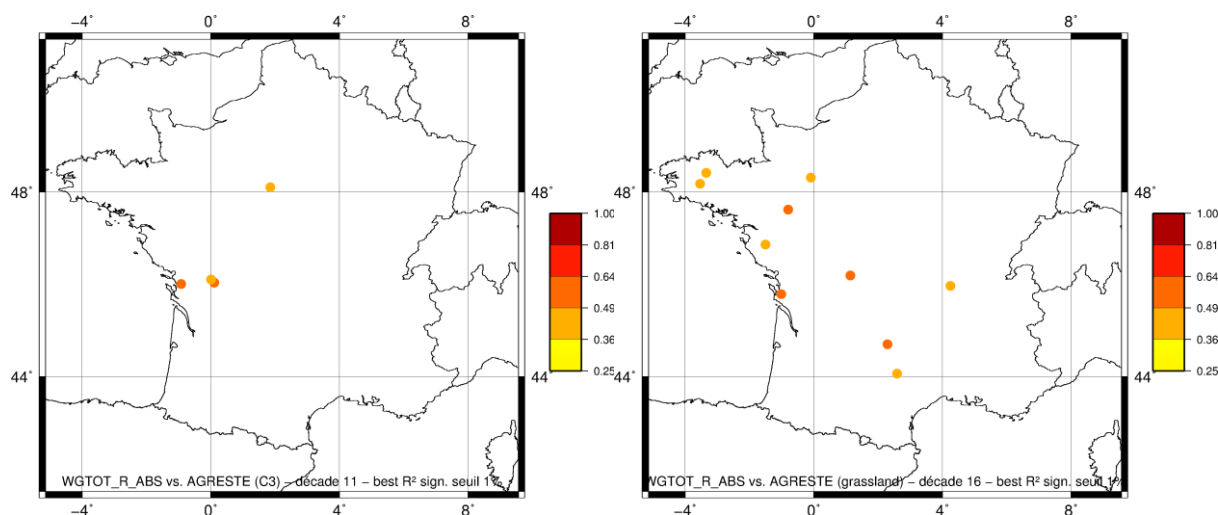


Figure 25: Cartes illustrant les meilleurs R^2 significatifs ($p\text{-value} < 0,01$) obtenus entre le wg_2 simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT, et le rendement final issu d'Agreste. A gauche, les cultures de type C3 et pour la décade 11 (mi-avril), à droite les prairies naturelles et pour la décade 16 (début juin).

Comme on l'a montré précédemment, peu de R^2 significatifs sont obtenus pour les cultures de type C3, sur seulement un maximum de 4 sites (Figure 25, à gauche). Pour les prairies naturelles, un plus grand nombre de R^2 significatif est obtenu, avec un maximum de 10 sites (Figure 25, à droite).

A présent, on illustre sur la Figure 26 les résultats obtenus sur l'ensemble des décades étudiées.

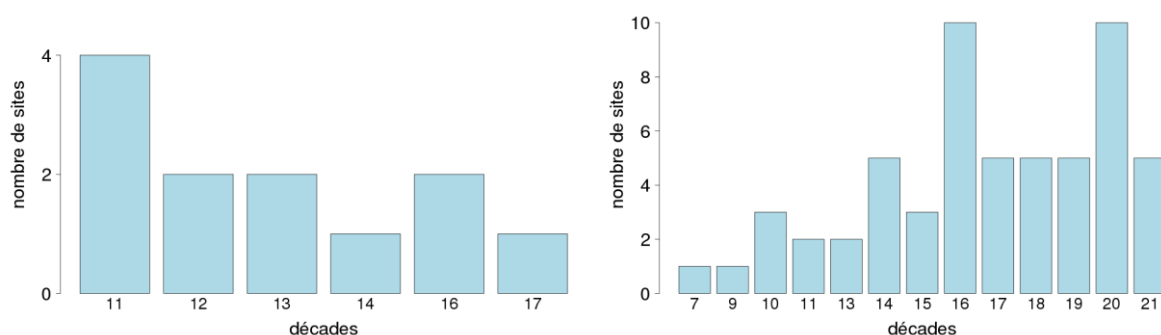


Figure 26: Histogrammes représentant le nombre de sites par décade où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) est obtenu entre le wg_2 décadaire, simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT, et le rendement final issu d'Agreste. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Sur l'ensemble des décades étudiées (Figure 26), on retrouve une absence de bons résultats pour les cultures de type C3, avec entre 1 et 4 sites seulement où un R^2 significatif est obtenu. On montre de cette manière l'incapacité du wg_2 simulé à anticiper le rendement final issu d'Agreste. On ne le montre pas ici, mais une relation significative est obtenue sur un plus grand nombre de sites étudiés avec les cultures de type C3 lorsque le wg_2 est moyenné à l'échelle du mois. L'état hydrique du sol simulé et moyenné à l'échelle décadaire permet difficilement d'avoir une information sur le rendement final de la culture.

Concernant les prairies naturelles, on retrouve pour les décades 16 et 20 un nombre plus important de sites avec un R^2 significatif. Même s'il ne s'agit que de 10 sites, ce résultat montre qu'il est possible, à partir du mois de juin, d'avoir une information sur le rendement final de la culture grâce à la connaissance du wg_2 simulé décadaire.

Ces résultats sont cependant moins bons que ceux obtenus avec le B_{agX} . Ce dernier étant une variable simulée par ISBA-A-gs, il est bien plus facile de le corrélérer avec une autre variable du modèle, en l'occurrence le wg_2 . Concernant les résultats obtenus avec le rendement final issu d'Agreste, ils sont néanmoins satisfaisants du fait qu'il s'agit de variables complètement indépendantes et du fait que le modèle ISBA-A-gs représente plus difficilement la variabilité interannuelle des rendements pour ce type de végétation, comme cela a été montré dans le chapitre II.

2.2. Vers l'identification de l'étape clé où l'humidité du sol joue un rôle important sur l'état futur de la culture

2.2.1. Utilisation du LAI simulé instantané comme indicateur temporel

Jusqu'à présent, on s'est intéressé à connaître le moment de l'année (mois, décade, période) où le wg_2 simulé donnait une information sur l'état futur de la croissance de la plante et du rendement final, qu'il soit simulé ou observé. Or, cela fournit peu d'information sur l'étape physiologique de la plante au moment où cette relation est obtenue (étape de développement de la plante, stade phénologique). Ainsi, dans cette partie, on ne se place plus à une décade au cours de la croissance de la plante, mais à un moment précis correspondant à la phénologie de la plante. L'indicateur choisi est le LAI simulé, en faisant l'hypothèse que les étapes phénologiques majeures de la plante sont observées pour des valeurs fixes de LAI. Les données permettant de fournir cette indication sont issues du jeu de simulations DIF1-NRT. On le rappelle, ce jeu de simulations présentait les caractéristiques optimales dans la représentation des couverts agricoles en France. La façon de rechercher une relation statistique entre les deux séries de variables biophysiques est la suivante : on fixe différentes valeurs du LAI pendant la période de croissance de la culture (c'est-à-dire lorsque le LAI est croissant) et on calcule à cet instant précis (date pour laquelle le LAI a atteint des valeurs fixées) le R^2 obtenu entre le wg_2 et le B_{agX} de l'année en cours. On pourra ainsi conclure sur l'importance de l'humidité du sol pour un état donné de la plante et construire un indicateur clé pour le rendement final, plusieurs mois à l'avance. Chacune des six cultures étudiées dans le

chapitre II sont étudiées séparément. Cette fois, la relation n'est pas recherchée avec une valeur décadaire du wg_2 simulé, mais avec une période instantanée du wg_2 moyenné sur plus ou moins cinq jours par rapport à la date où le LAI a atteint le seuil qui a été fixé. Les seuils de LAI fixés couvrent toute l'amplitude annuelle du LAI, soit entre 1 et 6 $m^2 m^{-2}$, avec un pas de 0,5 $m^2 m^{-2}$.

2.2.2. Résultats

Dans un premier temps, on s'intéresse aux résultats obtenus avec les séries de B_{agX} simulé (Figure 27).

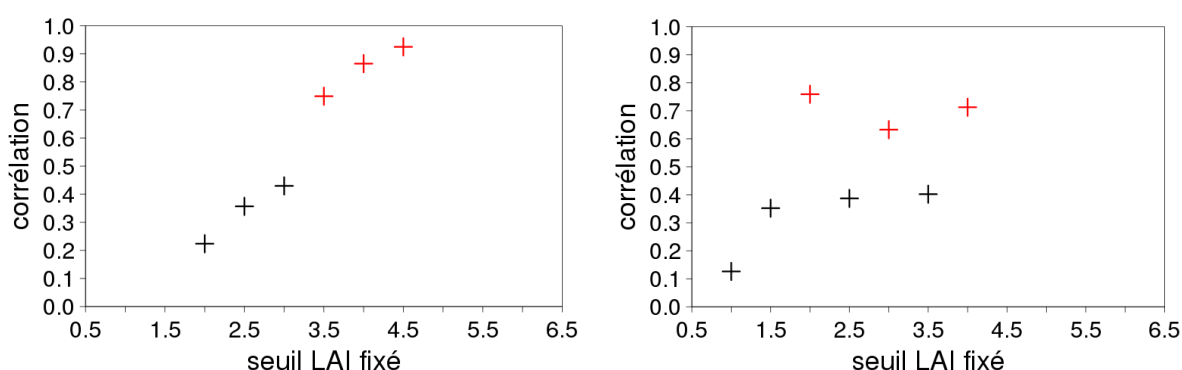


Figure 27: R^2 calculés entre la série de B_{agX} et la série de wg_2 simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT sur la période 1994-2010. La valeur de wg_2 est obtenue lorsque différents seuils de LAI ont été atteints. Sont représentés en rouge les R^2 significatifs au seuil de 1% (p-value < 0,01). A gauche, le R^2 obtenu pour les cultures de type C3 simulées pour le département de l'Indre et Loire (37). A droite, le R^2 obtenu pour les prairies naturelles simulées pour le département du Puy-De-Dôme (63).

La Figure 27 permet de mettre en évidence pour quelles valeurs de LAI fixé la relation entre le wg_2 et le B_{agX} est la plus forte. Sur le graphe de gauche, un exemple illustre les résultats obtenus pour les cultures de type C3. On observe que la corrélation est meilleure au fur et à mesure que le seuil de LAI est élevé. Le R^2 atteint plus de 0,9 pour un seuil de LAI fixé à 4,5 $m^2 m^{-2}$. En plus de croître, la corrélation, devient significative pour un LAI fixé à 3,5 $m^2 m^{-2}$. Comme cela a été montré dans la partie précédente (Sect. 2.1.3.), on remarque que la relation entre les deux variables en sortie du modèle devient réellement forte dès lors que la biomasse atteint un seuil précis, représentée ici par l'indice foliaire. Pour les prairies naturelles, ce n'est pas le cas. Un R^2 significatif est très rapidement atteint pour un LAI de seulement 2 $m^2 m^{-2}$, puis cette valeur fluctue au fil de la croissance de la plante, passant d'une valeur significative à non significative. Il n'y a pas de progression constante comme pour les cultures de type C3, ni un seuil spécifique où le R^2 devient significatif. Afin de voir le comportement global de ces résultats, on présente la moyenne des corrélations obtenues sur l'ensemble des sites (Figure 28).

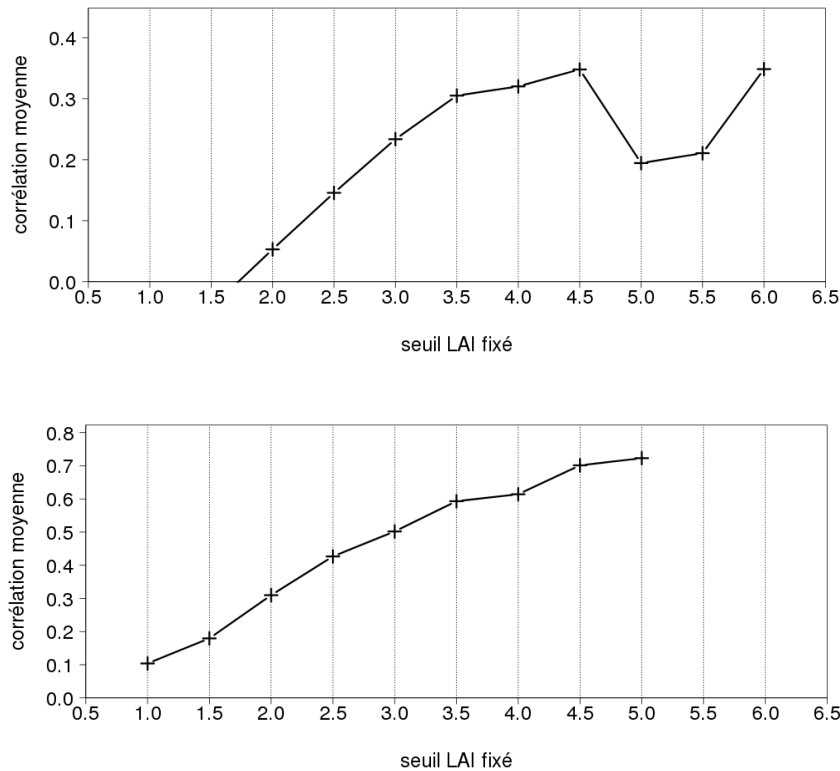


Figure 28: Moyenne sur l'ensemble des sites des R^2 calculés entre le B_{agX} et la valeur de wg_2 pour différents seuils de LAI atteints et en fonction du type de végétation étudié : en haut, les cultures de type C3 et en bas les prairies naturelles.

L'évolution du R^2 moyenné sur l'ensemble des sites est différente des exemples présentés sur la Figure 27. Cette fois, concernant les cultures de type C3 (Figure 28, en haut), le R^2 moyen atteint un R^2 proche de 0,3. Avant $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, la corrélation moyenne est négative, puis la croissance est importante jusqu'au seuil de LAI fixé à $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, jusqu'à atteindre un maximum à $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Finalement, le R^2 va décroître pour atteindre un second maximum au seuil de $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. En moyenne, la plus forte relation entre le wg_2 et le B_{agX} est obtenue autour d'un LAI de $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Néanmoins, dès $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, le R^2 moyen devient important. C'est également ce qui avait été montré sur la Figure 27.

Concernant les prairies naturelles (Figure 28, en bas), la croissance est constante sur toute la période de croissance. Le maximum est atteint à $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, avec une moyenne de 0,7 soit une valeur bien plus importante que celle obtenue pour les cultures de type C3.

On retrouve de manière générale un potentiel prédictif de wg_2 mis en évidence dans la partie précédente. L'intérêt ici est de montrer que le wg_2 a une relation statistique avec le B_{agX} qui devient intéressante au-delà d'un seuil de LAI fixé. Cela a été identifié seulement pour les cultures de type C3 avec un seuil de LAI fixé à $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Mais on retrouve une relation statistique moyenne entre le wg_2 et le B_{agX} plus forte en étudiant les prairies naturelles.

A présent, on s'intéresse aux relations statistiques obtenues avec le rendement final à l'échelle départementale issu d'Agreste.

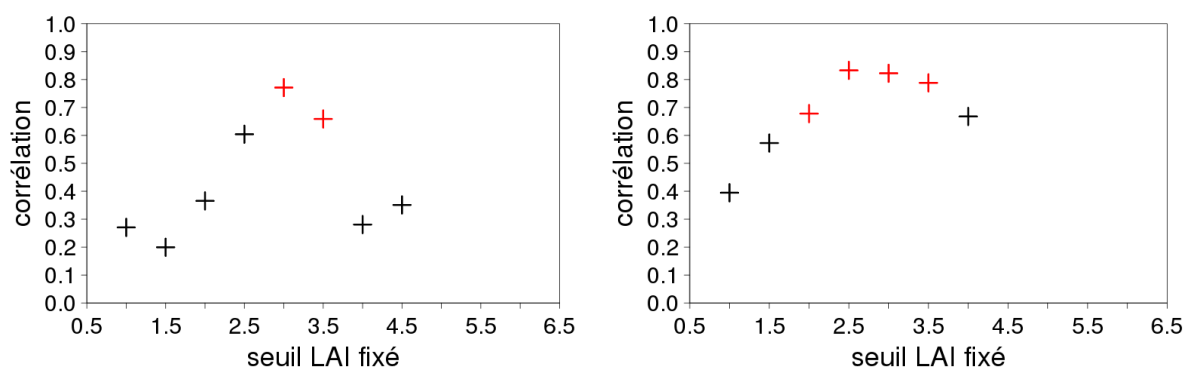


Figure 29: R^2 calculés entre le rendement final issu d'Agreste et la série de wg_2 simulés avec le jeu de simulations DIF1-NRT sur la période 1994-2010. La valeur de wg_2 est obtenue lorsque différents seuils de LAI ont été atteints. Sont représentés en rouge les R^2 significatifs au seuil de 1% (p -value > 0,01). A gauche, le R^2 obtenu pour le rendement de l'orge d'hiver pour le département du Puy-De-Dôme (63). A droite le R^2 obtenu pour le rendement des prairies naturelles pour le département du Maine-et-Loire (49).

Dans l'exemple présenté sur la Figure 29, on peut voir que la relation entre le wg_2 et le rendement final issu d'Agreste est forte à partir d'un certain seuil de LAI fixé. Pour l'orge d'hiver (Figure 29, à gauche), le seuil optimal du LAI fixé est de $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, tandis qu'il est de $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ pour les prairies naturelles (Figure 29, à droite). Dans les deux cas, la relation devient de plus en plus forte au fil de la croissance de la plante, jusqu'à atteindre un R^2 autour de 0,8 pour ensuite décroître (beaucoup plus rapidement pour l'orge d'hiver). De nouveau, on observe le comportement global de ces résultats en présentant la moyenne des corrélations obtenues sur l'ensemble des sites (Figure 30) et pour chacune des céréales étudiées.

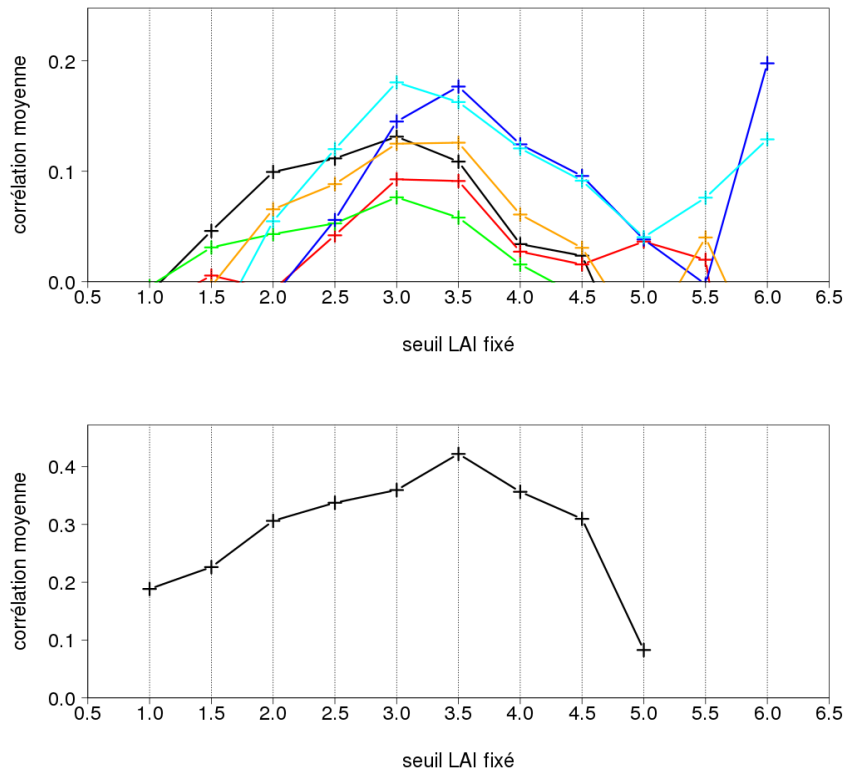


Figure 30: Comme pour la Figure 28, mais pour le rendement final issu d'Agreste. Sur le graphe du haut, sont représentées les valeurs de R^2 obtenus pour les céréales suivantes : le blé tendre d'hiver (en noir), le seigle (en rouge), l'orge d'hiver (en vert), l'orge de printemps (en bleu), l'avoine (en bleu cyan) et le triticale (en orange). Sur le graphe du bas, sont représentées les valeurs de R^2 obtenus pour les prairies naturelles.

Si l'on observe à présent les scores moyennés sur l'ensemble des sites, on retrouve un maximum de corrélation pour un seuil de LAI fixé entre 3 et 3,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ pour les céréales et de 3,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ pour les prairies naturelles (Figure 30). Pour certaines céréales (l'orge de printemps et l'avoine), un autre maximum est obtenu pour un LAI fixé à 6 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (Figure 30, en haut). Néanmoins, le R^2 moyen obtenu est faible pour toutes les céréales. Il est un peu plus élevé pour les prairies naturelles (Figure 30, en bas).

Le plus intéressant ici est de voir que pour les deux types de végétation étudiés, il existe bien un seuil de LAI fixé pour lequel le rendement final observé est lié au wg_2 décadaire. En se plaçant à cette étape, le modèle fournit un état hydrique du sol qui peut nous renseigner sur la tendance finale du rendement, ou du B_{agX} simulé, comme cela a été montré précédemment. C'est ce résultat qui est utilisé pour anticiper les rendements dans la partie suivante.

2.3. Modèle statistique de prévision de la tendance des rendements

Une méthode statistique est mise en place dans cette partie afin de vérifier si les résultats obtenus précédemment peuvent être exploités pour prévoir une tendance du rendement. Pour

cela, on exploite les relations statistiques (R^2) sur la période d'étude 1994-2010 entre le wg_2 simulé et le rendement final, ou le B_{agX} simulé, qui ont été mises en évidence dans la partie précédente (Sect. 2.2.2.).

2.3.1. Présentation de la méthode

Entre 1994 et 2010, on dispose de variables biogéophysiques simulées avec ISBA-A-gs sur dix-sept années. Jusqu'à présent, on a recherché la relation entre la série de wg_2 simulé décadaire obtenue pour différents seuils de LAI et la série de B_{agX} simulé ou le rendement final issu d'Agreste. A partir de ces séries, on peut donc établir une régression linéaire pour chaque seuil de LAI fixé. Dans chaque cas, les R^2 obtenus sur chacun des sites représentent la qualité de la relation de cette régression. Pour une année spécifique et au moment où le LAI atteint un certain seuil, on dispose d'une valeur de wg_2 issue d'ISBA-A-gs. Grâce à cette valeur de wg_2 simulé, on peut donc faire une prévision du B_{agX} ou du rendement observé en utilisant cette régression linéaire (l'année pour laquelle on cherche à réaliser la prévision est alors exclue du système de régression).

La valeur de la variable prévue est associée à un intervalle d'incertitude calculé à l'aide du R^2 propre à chaque régression linéaire et d'un intervalle de confiance (que l'on fixe ici à 0,9), selon la relation suivante :

$$\eta_{\text{année}} = (a + b \cdot wg_{2(\text{année})}) \pm t_{0.05} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(wg_{2(\text{année})} - \overline{wg_2})^2}{\sum wg_2^2} + 1} \quad (3)$$

où η est la variable que l'on cherche à anticiper pour une année donnée, a et b les paramètres de la droite de régression des 16 couples wg_2 simulé / variable anticipée. A droite du signe + ou – correspond l'incertitude associée à la valeur prévue : $t_{0.05}$ est la valeur critique de la distribution du t de student (et vaut ici 1,76) et s est la variance de la série des 16 couples wg_2 simulé / variable anticipée.

Il reste à définir les critères sur lesquels notre système de prévision va être évalué. Pour cela, on calcule la moyenne et l'écart-type des séries suivantes :

- Une série de dix-sept B_{agX} réellement simulés par ISBA-A-gs, que l'on appelle « B_{agX} réel ».
- Une série de dix-sept valeurs indépendantes de B_{agX} obtenues avec notre système de prévision, que l'on appelle « B_{agX} prévu ».

Ensuite, pour chaque série, on calcule les seuils « supérieur » et inférieur » selon la formule suivante :

$$seuil = \overline{B_{agX}} \pm \sigma B_{agX} \quad (4)$$

Le B_{agX} réel et le B_{agX} prévu seront soit au-dessus du seuil supérieur (intervalle « supérieur »), soit entre les deux seuils (intervalle « normal »), soit en-dessous du seuil inférieur (intervalle « inférieur »). Ensuite, deux critères sont établis afin de définir une prévision comme étant « bonne »:

- Le B_{agX} réel est inclus dans l'intervalle d'incertitude associé à la prévision.
- Le B_{agX} réel ainsi que le B_{agX} simulé se situent respectivement dans le même intervalle identifié précédemment.

Enfin, on compte sur les dix-sept années le nombre de prévisions correctes. On réitère cette étude pour chaque seuil de LAI fixé entre 1 et 6 m² m⁻². Il sera ainsi possible d'identifier la valeur de LAI pour laquelle on obtient le plus de bonnes prévisions et ainsi définir l'étape clé de la culture pour lequel le wg_2 joue un rôle déterminant sur le rendement.

Finalement, on vérifie si de bons résultats sont obtenus sur les départements pour lesquels on a mis en évidence un potentiel prédictif de l'humidité du sol sur l'anticipation des rendements.

2.3.2. Résultats : quel potentiel d'anticipation du rendement final en cours d'année culturale ?

Dans un premier temps, on s'intéresse aux prévisions réalisées pour le B_{agX} simulé (Figure 31).

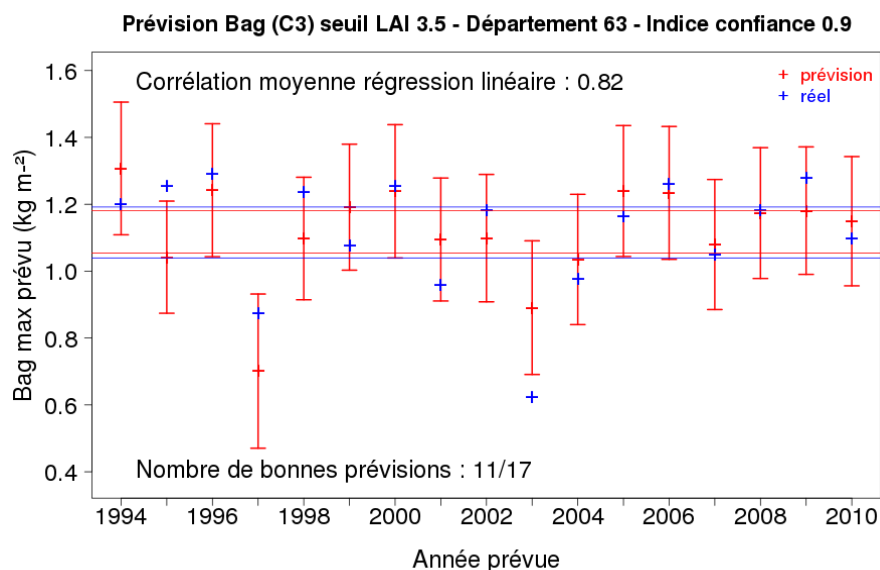


Figure 31: Graphe représentant les prévisions du B_{agX} des cultures de type C3 simulées pour le département du Puy-de-Dôme (63), obtenues d'une part avec la régression linéaire (en rouge) et d'autre part avec le modèle ISBA-A-gs (en bleu). L'intervalle d'incertitude associé à la prévision est représenté en rouge. Les lignes horizontales matérialisent l'intervalle des prévisions obtenu avec les seuils issus de l'équation (4) (Sect. 2.3.1.). Seuil de LAI fixé à $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

La Figure 31 illustre un cas où le système de régression linéaire mis en place dans cette étude est en mesure de détecter la tendance du B_{agX} à partir de la valeur de wg_2 simulé obtenue pour un seuil de LAI fixé. Dans cet exemple, on se place à un seuil de LAI fixé à $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ pour le département du Puy-de-Dôme (63). Le R^2 obtenu sur la série de seize couples de valeurs est très élevé, égal à 0,82 ce qui permet d'obtenir un intervalle d'incertitude associé à la prévision relativement faible. Il est ainsi possible de prévoir correctement le B_{agX} des cultures de type C3 sur dix années, selon les critères établis dans la section précédente. Les années bien prévues sont : 1994, 1996, 1997, 2000, 2002, 2004, 2006 à 2010. Pour les années 1995 et 2003, notre système ne prévoit pas correctement le B_{agX} au point que le cas « réel » n'est même pas inclus dans l'intervalle d'incertitude. Pour les années 1998 et 2001, notre prévision est classée « anormale » alors que ce n'est pas le cas pour la valeur réellement obtenue et inversement pour les années 1999 et 2005. On remarque que ce système est en mesure de détecter des années où les valeurs réellement obtenues sont extrêmes (comme l'année 1997), dès lors que la relation statistique entre wg_2 et le B_{agX} est forte. Néanmoins, cela semble insuffisant parfois, au regard de l'année 2003 (malgré une prévision négative pourtant émise).

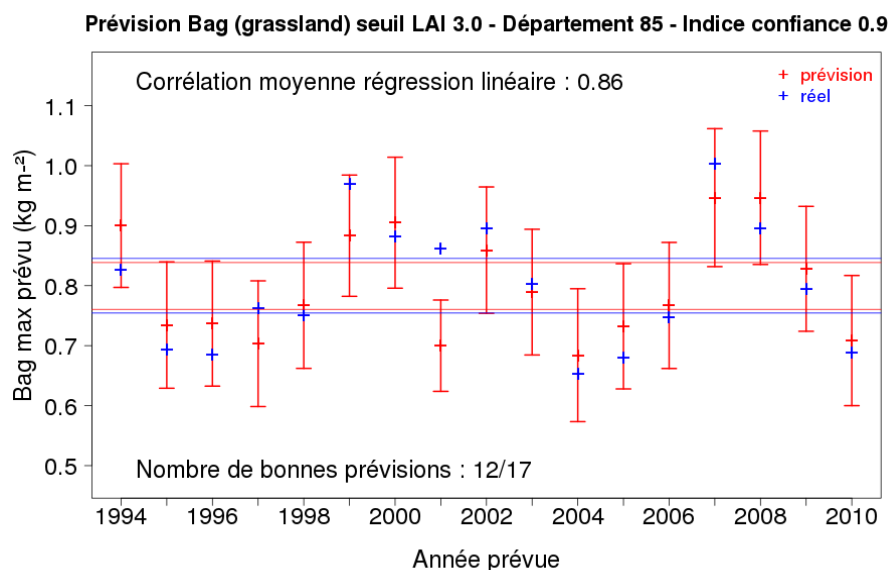


Figure 32: Comme sur la Figure 31, mais pour la prévision du B_{agX} des prairies naturelles simulées pour le département de la Vendée (85). Seuil de LAI fixé à $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

La Figure 32 illustre le système de prévision appliqué pour le B_{agX} des prairies naturelles. On remarque que le R^2 utilisé pour établir la régression linéaire est encore très élevé dans cet exemple, avec une valeur de 0,86. Hormis l'année 2001, où notre prévision est très éloignée du cas réel qui présente une anomalie positive, le système de prévision reproduit bien la variabilité interannuelle, en repérant correctement les anomalies positives et négatives. Il repère également les années « normales », qui sont obtenus grâce à un intervalle plus grand que celui observé précédemment. Au final, douze années sont correctement prévues dans cet exemple.

On considère à présent l'ensemble des résultats obtenus en analysant le nombre moyen de prévisions correctes obtenu sur l'ensemble des sites, pour chaque seuil de LAI fixé et pour les deux types de végétation (Figure 33).

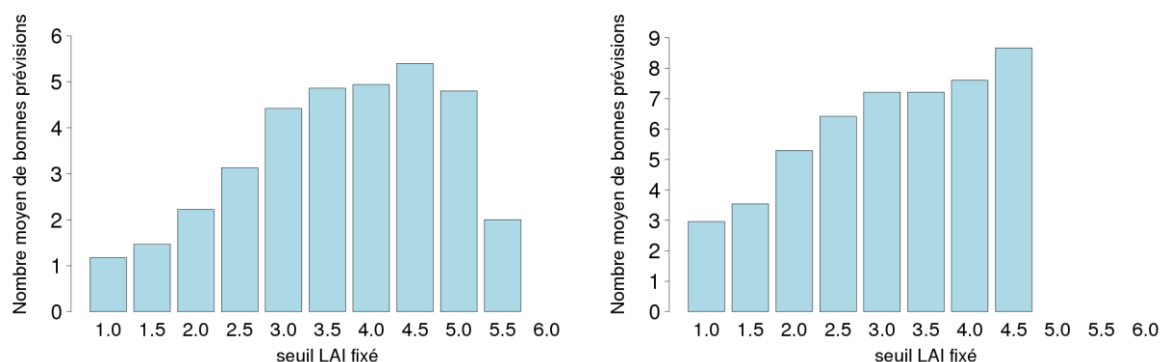


Figure 33: Histogrammes représentant le nombre moyen de bonnes prévisions du B_{agX} simulé obtenu avec la régression linéaire pour chaque seuil de LAI fixé. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

On remarque sur la Figure 33 que le nombre moyen de bonnes prévisions augmente avec le seuil de LAI fixé. Concernant les cultures de type C3, on retrouve un seuil optimal de LAI fixé égal à $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ avec en moyenne un nombre de bonnes prévisions obtenues égal à 5. Pour les prairies naturelles, ce seuil n'est pas observé. Le nombre moyen de bonnes prévisions est d'environ 8 pour le seuil de LAI fixé à $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. En moyenne, plus d'une année sur deux est correctement prévue par notre système de prévision, largement mieux que ce qui est réalisé avec les cultures de type C3. La raison provient principalement d'une qualité différente du R^2 utilisé d'un type de végétation à l'autre.

Compte-tenu de la capacité du système de régression linéaire à prévoir le B_{agX} , on reproduit cette étude en réalisant des prévisions du rendement final issu d'Agreste (Figures 34 et 35).

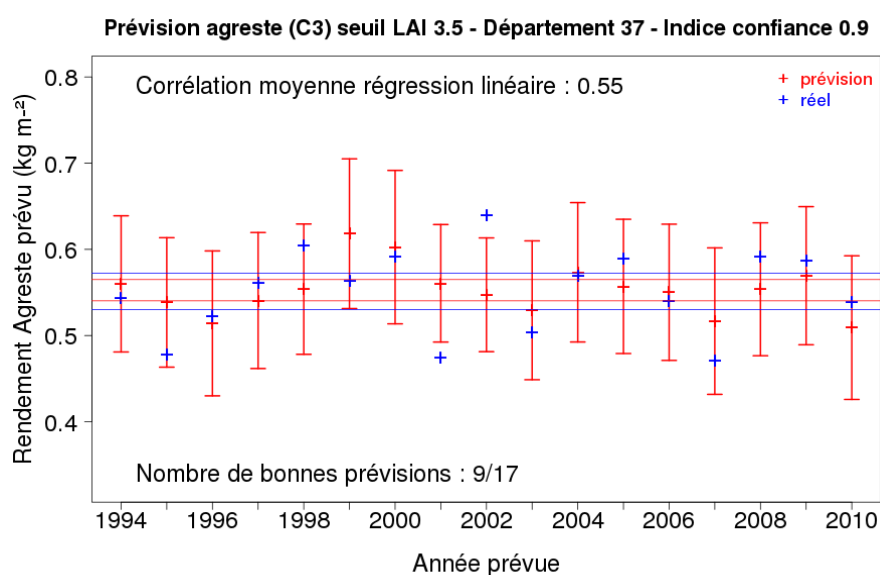


Figure 34: Comme sur la Figure 31, mais pour la prévision du rendement des céréales issu d'Agreste pour le département de l'Indre-et-Loire (37).

Avec un R^2 moyen égal à 0,55 pour la régression linéaire calculée sur les dix-sept années et pour un seuil de LAI fixé à $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, notre système de prévision est en mesure de prévoir correctement 9 années dans l'exemple montré Figure 34. Seules les années 2001 et 2002 sont mal prévues avec un rendement observé en dehors de l'intervalle de prévision. Sur le reste de la période, le système reproduit bien la variabilité interannuelle.

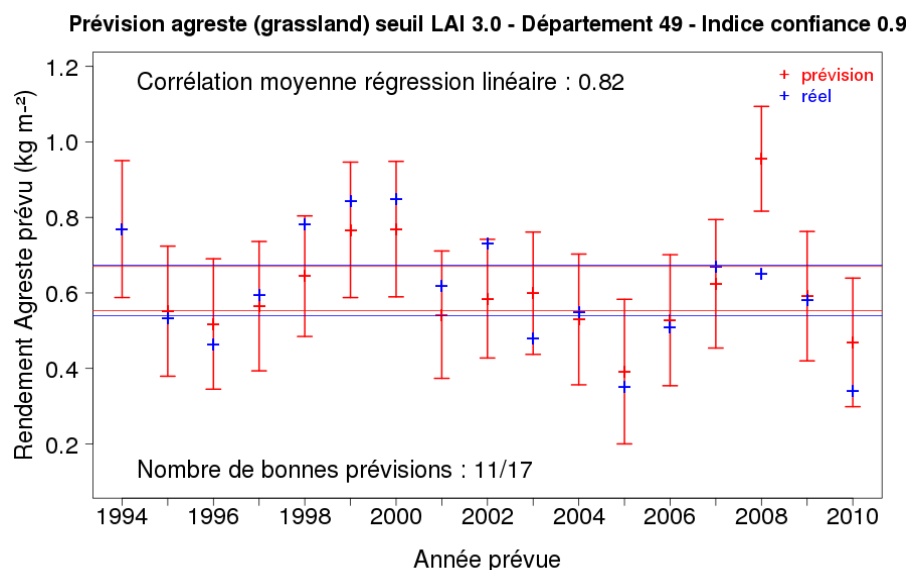


Figure 35: Comme dans la Figure 34, mais pour la prévision du rendement de prairies naturelles issues d'Agreste pour le département du Maine-et-Loire (49).

Si l'on s'intéresse à présent aux prévisions des rendements des prairies naturelles (Figure 35), on constate à nouveau que le système est performant sur cet exemple, grâce à un R^2 moyen élevé. Onze années sont bien prévues parmi les dix-sept et l'année 2008 est mal prévue. Dans l'ensemble, la variabilité est bien reproduite.

On analyse à présent les résultats obtenus sur l'ensemble des sites et pour chaque seuil de LAI fixé (Figure 36).

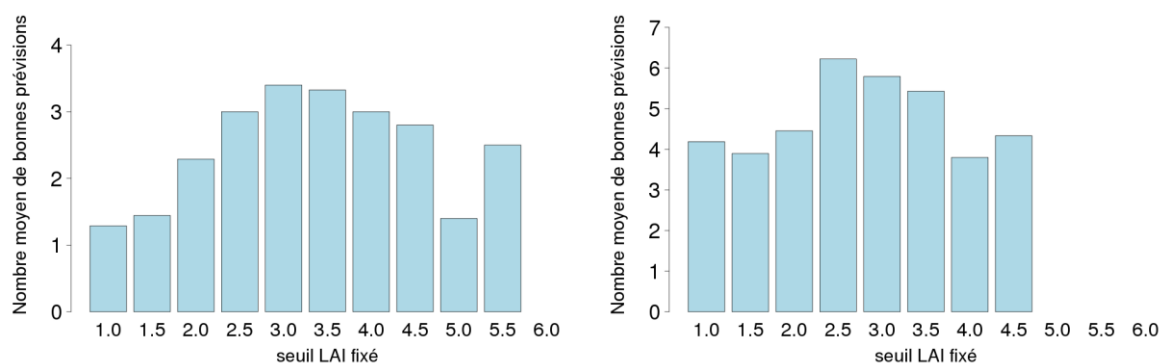


Figure 36: Comme dans la Figure 33, mais cette fois pour la prévision du rendement final issu d'Agreste.

De manière générale, le nombre moyen de prévisions obtenues pour le rendement final est inférieur à celui présenté pour le B_{agX} (Figure 36). Notamment pour les céréales, le maximum obtenu n'est que de trois années (Figure 36, à gauche). On retrouve un seuil de LAI optimal fixé à $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Or ce résultat moyenné inclut les départements où l'absence de

corrélation a été mise en évidence. Ce résultat serait donc meilleur en étudiant uniquement les départements où un R^2 significatif est obtenu.

Là encore, les résultats obtenus pour les prairies naturelles sont meilleurs (Figure 36, à droite), avec un total de bonnes prévisions de six années pour le seuil de LAI fixé à $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Ce n'est pourtant pas le seuil optimal mis en évidence dans l'étude précédente (et égal à $3,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Enfin, on peut remarquer que dès le seuil de LAI fixé à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, on obtient une moyenne de quatre années où le rendement final est bien prévu. On retrouve ici un résultat déjà mis en évidence précédemment : le wg_2 est relié au rendement final très tôt pour ce type de végétation. L'information peut donc être délivrée dès le début du calendrier cultural.

3. Utilisation des données de LAI issues de produits satellitaires GEOV1

L'étude réalisée précédemment visait à étudier la meilleure corrélation obtenue entre les séries décennales du wg_2 et du LAI simulé sur les décades suivantes. L'étude est ici reproduite, mais cette fois en utilisant les données de LAI satellitaires GEOV1. Avec le même protocole, on cherche dans un premier temps à retrouver une relation entre les deux séries de variables. Ainsi, il sera possible de vérifier si l'indicateur de tendance du rendement mis en évidence précédemment (Sect. 2.) peut également être relié à l'indice foliaire observé.

3.1. Relation statistique entre les variables issues d'ISBA-A-gs et le LAI satellitaire

3.1.1. Lien entre les deux séries de LAI : simulé et mesuré

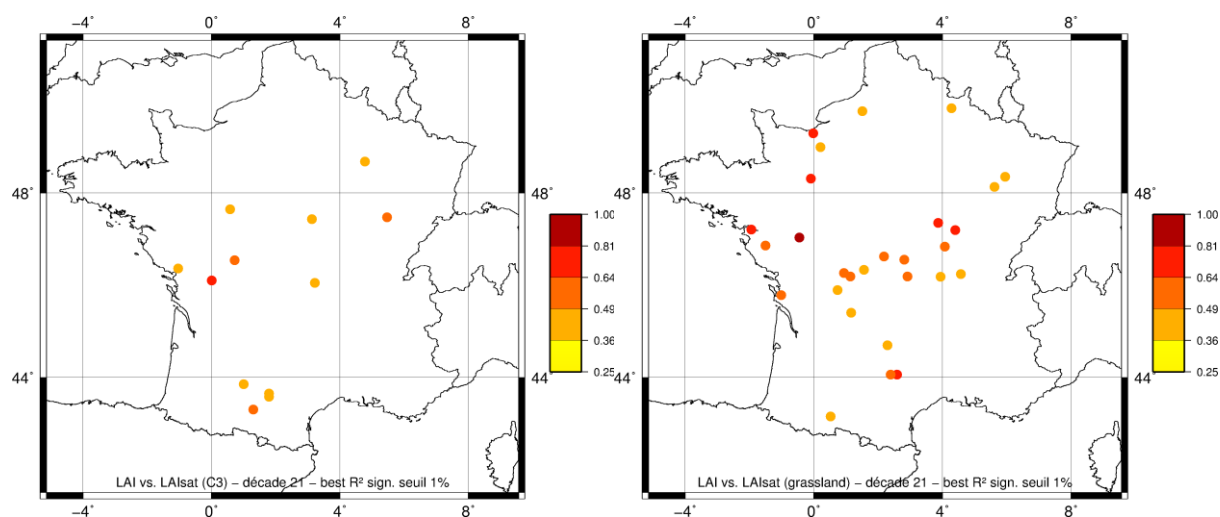


Figure 37: Cartes illustrant les meilleurs R^2 significatifs au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) obtenus entre le LAI de la décade 21 (fin juillet) simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT et le LAI GEOV1 à la même décade. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Pour les deux types de végétation étudiés, on observe de nombreux sites où un R^2 significatif a été obtenu pour la décade 21 entre le LAI simulé décennal et le LAI décennal

GEOV1 (Figure 37). Concernant les cultures de type C3, 12 sites avec un R^2 compris entre 0,36 et 0,64 sont mis en évidence (Figure 37, à gauche). Concernant les prairies naturelles, le nombre de sites est bien plus important, couvrant la quasi-totalité du territoire (Figure 37, à droite). De plus, les valeurs de R^2 obtenus sont élevées, avec un R^2 souvent supérieur à 0,64 voire même 0,81 sur un site.

Le modèle semble bien reproduire la variabilité temporelle du LAI décadaire GEOV1 en fin de cycle de la culture. Il est plus performant pour les prairies naturelles.

3.1.2. Le wg_2 décadaire peut-il anticiper le LAI satellitaire ?

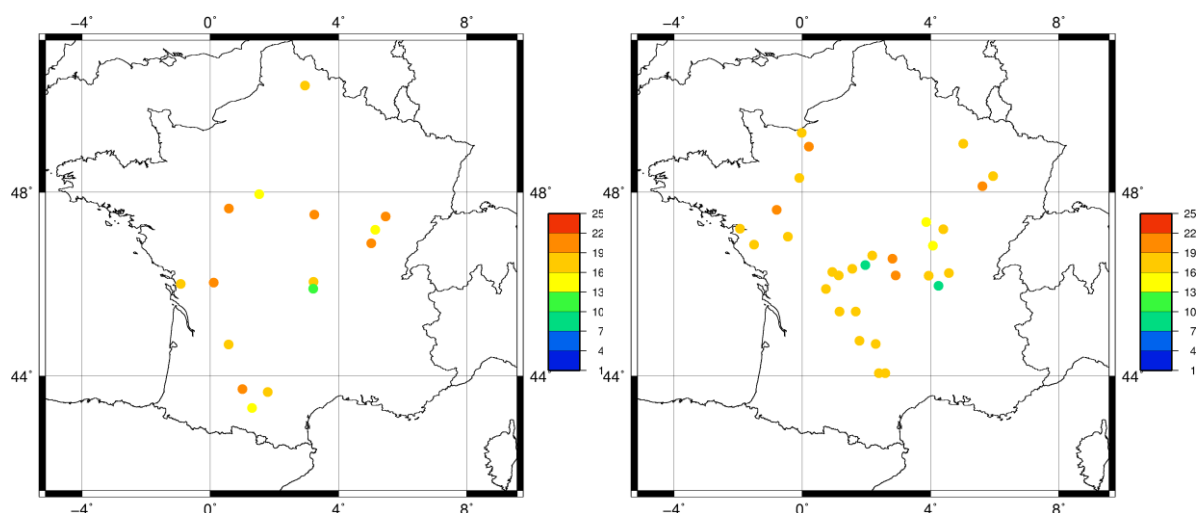


Figure 38: Cartes illustrant les premières décades pour lesquelles on obtient un R^2 significatif (p -value < 0,01) entre le wg_2 décadaire simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT et le LAI GEOV1. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

Sur la Figure 38, on observe que de nombreux sites présentent un R^2 significatif pour les deux types de végétation étudiés. Concernant les cultures de type C3 (Figure 38, à gauche), sur plus d'une dizaine de sites un R^2 significatif est obtenu. En moyenne, la première fois où l'on obtient un R^2 significatif a lieu entre les décades 16 à 22, soit entre juin et juillet. C'est la période où la culture atteint sa biomasse maximale. C'est même plus précoce sur d'autres sites.

Concernant les prairies naturelles, on observe un nombre de sites encore plus important avec un R^2 significatif obtenu (Figure 38, à droite). Globalement, on trouve les premiers R^2 significatifs entre les décades 16 à 19, soit en juin, parfois un peu plus tard (en juillet), parfois un peu plus tôt (en mai).

En conclusion, le wg_2 simulé décadaire se corrèle bien avec le LAI GEOV1, plutôt en fin de cycle de croissance de la végétation.

A présent, on s'intéresse à la relation entre le wg_2 décadaire issu du modèle et le LAI décadaire GEOV1, toujours en explorant les relations avec un décalage du LAI décadaire (Figure 39).

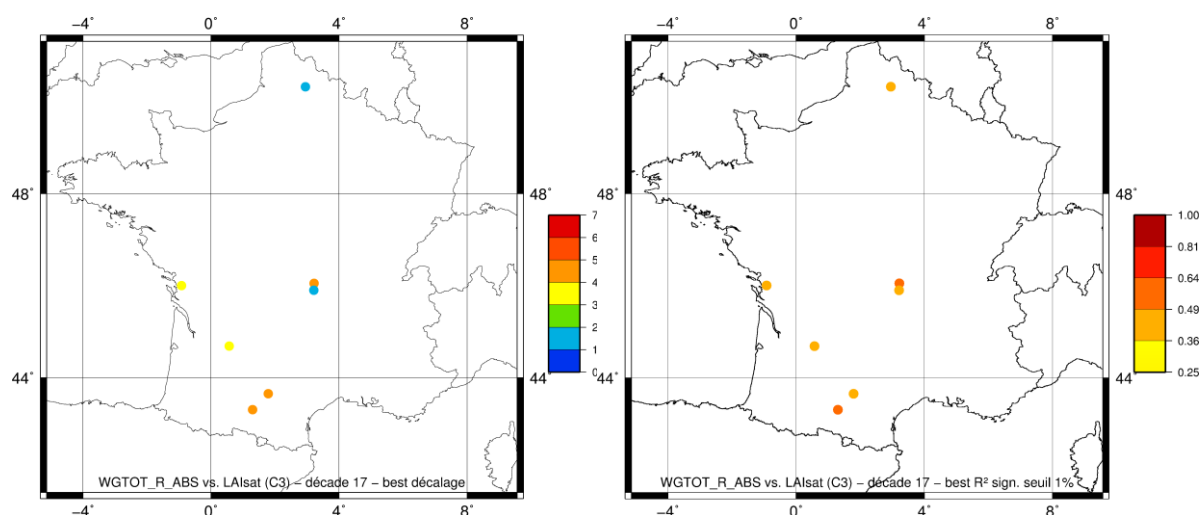


Figure 39: A gauche, la carte illustrant le décalage entre le wg_2 moyenné sur la décade 17 (mi-juin) et le LAI décadaire GEOV1, pour lequel on obtient le meilleur R^2 significatif (p -value < 0,01) obtenu pour les cultures de type C3. A droite, la valeur du R^2 obtenu est représentée pour les mêmes sites.

On remarque que très peu de sites avec un R^2 significatif sont obtenus pour les cultures de type C3 et pour la décade 17 (Figure 39, à gauche). Le wg_2 décadaire ne se corrèle pas bien avec le LAI décadaire GEOV1, même en explorant les corrélations avec un décalage de plusieurs décades. Seuls pour quelques sites dans le sud-ouest, une relation significative est obtenue pour un décalage compris entre 3 et 4 décades. Les valeurs des R^2 correspondants ne sont pas très élevés (Figure 39, à droite).

On considère à présent les résultats obtenus pour les prairies naturelles (Figure 40).

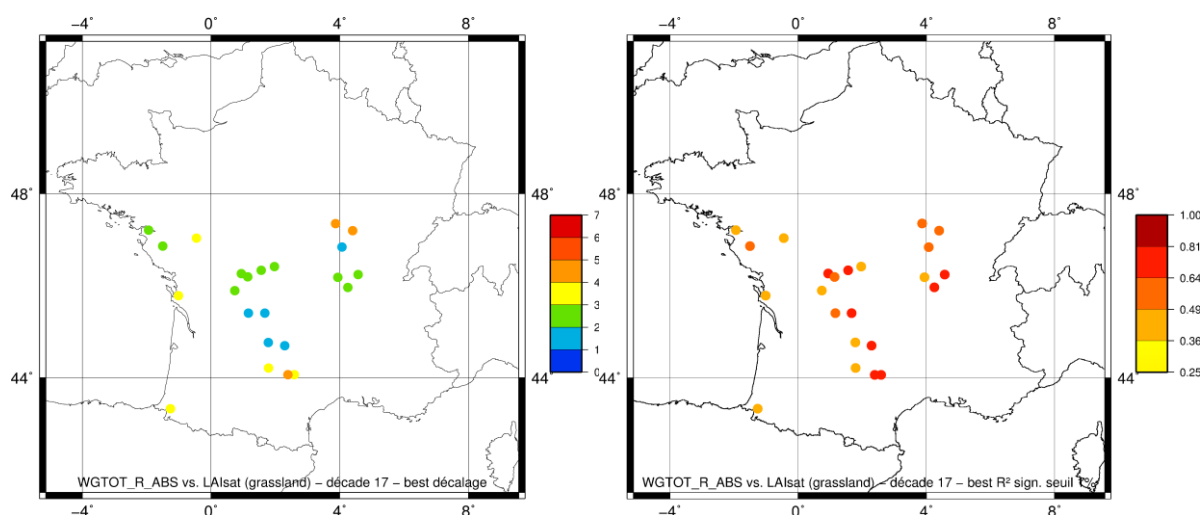


Figure 40: Comme sur la Figure 39, mais pour les prairies naturelles.

Pour la décade 17, de nombreux sites avec un R^2 significatif sont obtenus avec les prairies naturelles (Figure 40). Ils sont majoritairement regroupés dans le centre de la France. Les

décalages où l'on observe les meilleurs R^2 sont compris entre 1 et 3 décades (Figure 40, à gauche). Dans un intervalle d'un mois, le wg_2 simulé décadaire est donc bien corrélé avec le LAI décadaire GEOV1 sur plusieurs départements. Les valeurs des R^2 correspondants sont parfois élevées comme le montre la carte de la Figure 40, à droite : le R^2 est supérieur à 0,64 sur la plupart des sites.

On considère à présent les résultats obtenus sur l'ensemble des décades étudiées et pour les deux types de végétation (Figure 41).

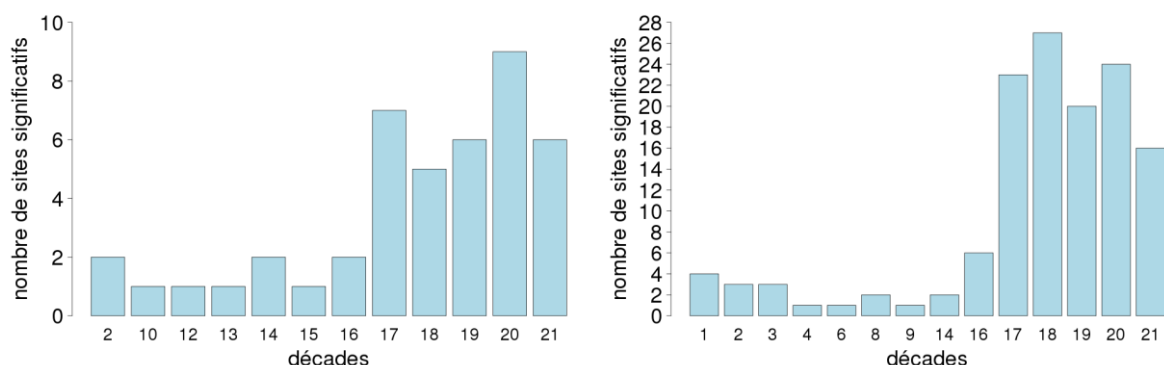


Figure 41: Histogrammes représentant le nombre de sites par décade où le meilleur R^2 significatif au seuil de 1% ($p\text{-value} < 0,01$) est obtenu entre le wg_2 décadaire, simulé avec le jeu de simulations DIF1-NRT et le LAI décadaire GEOV1. A gauche, les cultures de type C3 et à droite les prairies naturelles.

En analysant les résultats obtenus pour les cultures de type C3 (Figure 41, à gauche), on constate qu'un R^2 significatif n'est obtenu sur plusieurs sites qu'à partir de la décade 17. Le nombre maximal de R^2 significatif est obtenu pour la décade 20, avec seulement neuf sites. Pour les prairies naturelles (Figure 41, à droite), c'est également à partir de la décade 17 qu'un nombre conséquent de sites avec un R^2 significatif est obtenu. Le nombre maximal de sites obtenu est de 27 à la décade 18. Pour ce type de végétation, le wg_2 simulé décadaire est corrélé avec le LAI décadaire GEOV1 sur un plus grand nombre de sites en France. Peu de sites présentent une relation statistique entre le wg_2 et le LAI satellitaire avant la décade 17.

Il reste maintenant à voir si le LAI satellitaire est lui-même capable de fournir une information pertinente sur le rendement observé et sur la date d'occurrence de la récolte. C'est le point abordé dans la prochaine partie.

3.2. Est-ce que les valeurs maximales du LAI satellitaire peuvent être utilisées comme indicateur spatial du rendement ?

3.2.1. Relation avec des dates de récolte mesurées

Dans cette thèse, nous avons à notre disposition un jeu de données de mesures issues de plusieurs stations expérimentales de blé tendre. Ce jeu de données regroupe diverses informations concernant l'évolution de la croissance de la céréale avec, à terme, la date de récolte. Ces données, issues d'Arvalis - Institut du végétal, couvrent différents départements français.

Dans un premier temps, un recouplement des données est fait afin de ne conserver que celles des sites inclus dans les départements étudiés dans cette thèse et pour chacun des deux types de végétation. Ainsi, plusieurs dates ont pu être extraites sur 32 départements et sur la période 1997-2010. Comme le nombre de dates de récolte n'est pas homogène, on calcule pour chacun des départements une date de récolte moyenne.

Puis, on refait cette même sélection de données avec cette fois la série de LAI satellitaire GEOV1. On recherche la valeur maximale du LAI satellitaire dans chacune des séries et on extrait la décade d'occurrence de cette valeur. Par soucis de simplicité, on émet l'hypothèse forte que la série des dates pour lesquelles la valeur maximale du LAI observé et la série des dates de récolte sont parfaitement corrélées.

On dispose ainsi de deux séries de dates mesurées : l'une par télédétection, l'autre issue de données in-situ. Il est ainsi possible de vérifier s'il existe une relation entre ces deux. On pourra alors évaluer la possibilité d'utiliser des données spatialisées de LAI afin de connaître les dates de récolte des céréales en France.

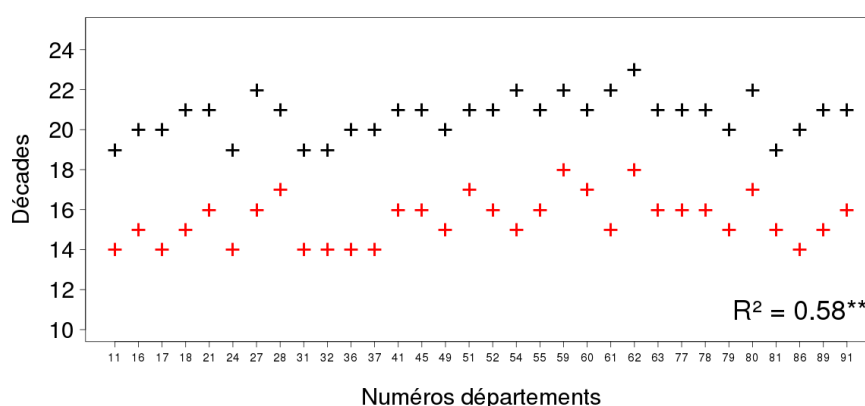


Figure 42: Graphe illustrant les décades moyennes sur la période 1997-2010 pour lesquelles la date de récolte est observée par département (numéro en abscisse). En noir, les dates mesurées sur les stations expérimentales d'Arvalis - Institut du végétal et en rouge les décades correspondant au LAImax GEOV1. Le R^2 spatial calculé sur les deux séries de données est également indiqué.

Sur la Figure 42, on peut observer la forte relation spatiale entre la date de récolte moyenne observée par département (données Arvalis - Institut du végétal) et la décade pour laquelle la valeur maximale du LAI décadaire est observée. Compte-tenu des données dont on dispose, seules les céréales sont étudiées ici. Malgré un décalage temporel d'environ 3 à 4 décades, on peut néanmoins voir que sur les départements présentés ici, la variabilité spatiale de la date de rendement est correctement reproduite avec le LAI satellitaire. Le R^2 calculé sur les deux séries est de 0,58 (significatif au seuil de 0,1% ; p -value < 0,001). Compte-tenu de l'avance qu'ont les données satellitaires, il est certainement possible de les utiliser comme indicateur de la date d'occurrence des récoltes en France.

Il reste à voir si le LAI décadaire GEOV1 est également en mesure de fournir une valeur correcte du rendement observé.

3.2.2. Relation entre les données de LAI GEOV1 et le rendement final issu d'Agreste

Sur la période 1994-2010 et pour les deux types de végétation étudiés, on extrait la valeur annuelle maximale de chacune des séries de LAI satellitaire GEOV1 pour chaque département. De cette manière, il est possible de vérifier s'il existe une relation entre ce jeu de données et le rendement final à l'échelle départementale issu d'Agreste. Si tel est le cas, on possèdera un jeu de valeurs mesurées capable de nous donner une information précoce sur l'anomalie de LAI observé et par interpolation du rendement final.

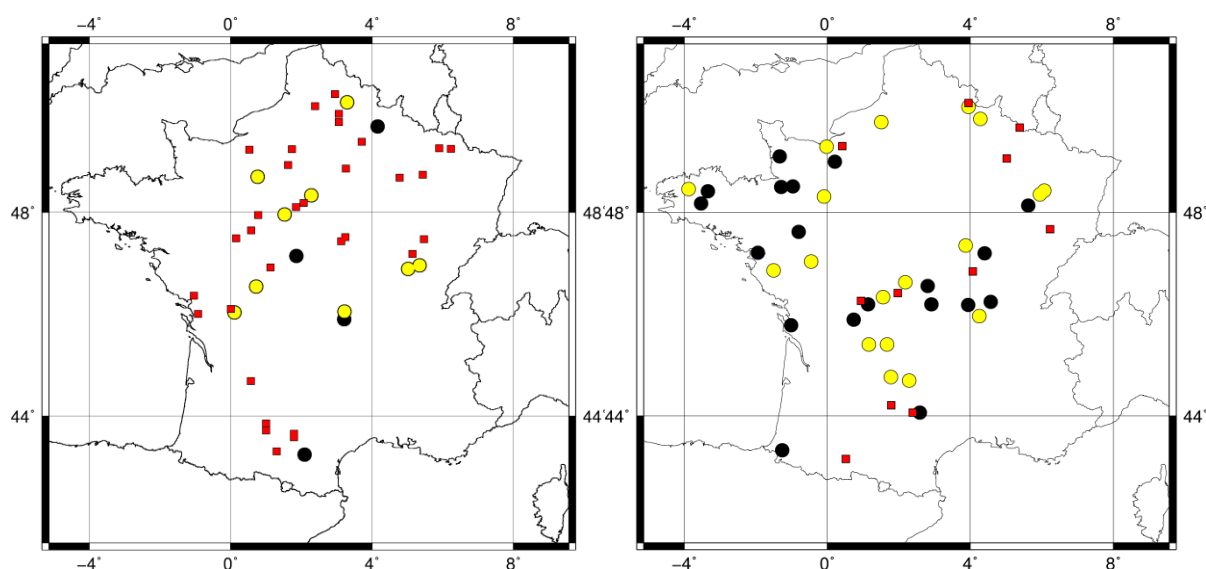


Figure 43: Carte représentant le meilleur R^2 obtenu entre le LAI décadaire GEOV1 maximal et le rendement final issu d'Agreste sur la période 1994-2010. Sont représentées par un carré rouge les R^2 non significatif, en disque jaune les R^2 significatifs au seuil de 1% (p -value < 0,01) et en disque noir les R^2 significatifs au seuil de 0,1% (p -value < 0,001). A gauche, les céréales et à droite les prairies naturelles.

Le nombre de sites présentant un R^2 obtenu entre la valeur maximale de LAI décadaire GEOV1 et le rendement final issu d'Agreste est différent d'un type de végétation à l'autre (Figure 43). Concernant les céréales (Figure 43, à gauche), 13 sites présentent un R^2 significatif (la meilleure valeur parmi les 6 céréales est retenue), dont 4 au seuil de 0,1% (p -value $< 0,001$). Pour les autres sites, la relation n'est pas suffisamment forte. On ne relève pas de tendance régionale où des R^2 significatifs sont plus particulièrement retrouvés.

Concernant les prairies naturelles (Figure 43, à droite), la quasi-totalité des sites présentent un R^2 significatif, avec 37 sites, dont 19 ont un R^2 significatif au seuil de 0,1% (p -value $< 0,001$). On illustre de cette manière la capacité du LAI satellitaire à très bien reproduire la variabilité interannuelle du rendement observé.

On démontre une nouvelle fois qu'il est plus aisé de représenter les rendements observés avec les prairies naturelles. Néanmoins, quelques sites étudiés avec les céréales sont également bien observés avec la télédétection.

En conclusion, le produit satellite GEOV1 est en mesure de reproduire la variabilité spatiale et temporelle du rendement final issu d'Agreste, surtout celui des prairies naturelles.

4. Conclusions

Ce chapitre traite de la recherche de relations statistiques entre l'humidité du sol racinaire simulée en phase de croissance des plantes et le rendement final issu d'Agreste ou le B_{agX} simulé ou même encore le LAI satellitaire observé. Les valeurs simulées sont issues du jeu de simulations optimisé DIF1-NRT, qui comprend les avancées les plus récentes dans le modèle ISBA. Ces relations statistiques ont permis de mettre en place un système d'anticipation de la tendance du rendement.

Concernant les céréales à paille, les résultats obtenus vis-à-vis des rendements finaux issus d'Agreste sont peu concluants. Il est montré cependant que l'eau disponible dans le sol à un instant donné joue un rôle sur la croissance ultérieure de la culture, jusqu'à quelques décades plus tard. Cette information est obtenue vers la fin du cycle cultural, en conditions de stress hydrique. Pour les prairies naturelles, les résultats sont plus intéressants puisqu'une relation statistique significative est obtenue très tôt dans l'année.

En se plaçant du point de la physiologie de la plante en utilisant le LAI simulé par le modèle, il est mis en évidence que le wg_2 simulé décadaire est un indicateur précoce du B_{agX} simulé. Cependant, on retrouve de nouveau une qualité supérieure des relations entre le wg_2 et le B_{agX} simulés pour les prairies naturelles.

Pour les deux types de végétation étudiés, on observe un seuil de LAI donnant la décade pour laquelle le rendement final issu d'Agreste est lié au wg_2 simulé décadaire. En se plaçant à cette étape de croissance de la plante, le modèle est en mesure de fournir un état hydrique du sol permettant d'estimer le rendement final.

Un modèle statistique a ensuite été mis en place à partir d'une régression linéaire établie entre la série de wg_2 simulé décadaire obtenue pour différents seuils de LAI et la série de B_{agX}

simulé ou le rendement final issu d'Agreste sur la période 1994-2010. En moyenne, le rendement des prairies est correctement prévu plus d'une année sur deux par ce système de prévision très simple. On obtient de bons résultats dès le seuil de LAI fixé à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, montrant une nouvelle fois la forte capacité prédictive de l'humidité du sol pour les prairies. Ce n'est malheureusement pas le cas pour les céréales à paille.

Enfin, les données de LAI satellitaires GEOV1, agrégées sur la grille Safran avec une résolution de 8 km et interpolées temporellement sont utilisées. On peut ainsi montrer que le wg_2 simulé décadaire est bien corrélé avec le LAI GEOV1, plutôt en fin de cycle de croissance de la végétation et avec de meilleurs résultats pour les prairies naturelles.

CHAPITRE IV

IV. Evaluation de l'apport de la prévision saisonnière du temps comme forçage météorologique d'un modèle de culture du blé tendre.

Ce chapitre est consacré à l'évaluation à l'échelle de la France de l'apport de la prévision saisonnière comme forçage atmosphérique en entrée du modèle de culture Panoramix. Afin d'adapter les données de prévision saisonnière issues du projet ENSEMBLES depuis leur résolution d'origine (2.5°) à la résolution de la grille Safran (8 km, voir Sect. 2.1.4.), différentes méthodes de descente d'échelle sont utilisées et évaluées. D'autres facteurs connus pour influencer la qualité des prévisions sont également regardés, comme l'échéance ou l'approche multi-modèles. Pour mener cette évaluation, différents scores, déterministes mais aussi probabilistes, sont détaillés et utilisés dans ce chapitre. On commence par présenter le modèle de culture utilisé dans cette thèse, le modèle Panoramix.

1. Le modèle de culture Panoramix

1.1. Présentation

1.1.1. Modèle de culture

Afin de modéliser la croissance des céréales en France, Arvalis - Institut du végétal a conçu un modèle de culture nommé « Panoramix » qui effectue des prévisions d'indicateurs agronomiques à l'échelle de la parcelle (Gate, 1995 ; Meynard, 1997 ; Chatelin et al., 2005). Depuis 1993, ce modèle est en constant développement. Les cultures modélisées sont le blé tendre, le blé dur, l'orge d'hiver et de printemps et le maïs. Il regroupe plusieurs modèles mécanistes de prévisions : des modèles de stades phénologiques, de composantes du rendement et du rendement final. Il est également composé de modèles de maladies sur blé (comme la septoriose¹¹), de modèles de qualité (comme la teneur en protéine) et d'un modèle de bilan hydrique.

Les prévisions sont faites à l'échelle de la parcelle, avant ou pendant l'année culturale. Pour cela, le modèle est forcé par les données météorologiques de la station la plus proche, ou par des données spatialisées. Les prévisions avant campagne sont utilisées pour réaliser des études de stratégie, afin d'aiguiller sur le choix variétal, la date ou la densité de semis. Pendant la campagne, il est possible d'établir des prévisions basées sur l'état actuel de la

¹¹ Septoriose : maladie des organes aériens des plantes cultivées, notamment les céréales, due à des champignons, provoquant soit des fontes de semis, soit l'apparition de taches plus ou moins nombreuses sur les parties aériennes.

plante et des ressources en eau. Ces prévisions, destinées aux professionnels du secteur agricole, permettent d'adapter la conduite de la culture (gestion des intrants...) afin d'optimiser le potentiel de rendement. Pour les données météorologiques à venir, le modèle utilise une méthode innovante basée sur la climatologie de la parcelle. On y reviendra plus longuement par la suite.

La localisation de la parcelle et de la culture étudiée sont des renseignements indispensables à la réalisation d'une prévision. Le type de sol, la réserve utile ou la densité de semis sont également des informations à fournir au modèle. Une réserve facilement utilisable est calculée et correspond aux deux tiers de la réserve utile. Des données biologiques sont ensuite ajoutées au fil de la campagne afin de prévoir les composantes du rendement. Il s'agit d'observations au champ, tels que le nombre de pieds/m², le nombre de talles¹² à plus de 3 feuilles/m² ou le nombre d'épis/m². Sans ces indications, le modèle effectue uniquement des prévisions pilotées par les forçages météorologiques. La donnée observée fournie en cours de campagne est automatiquement prise en compte afin d'affiner les prévisions. Plus les informations agronomiques et météorologiques sont nombreuses et de qualité, meilleure sera la précision des prévisions sur la parcelle étudiée.

Le modèle peut alors fournir un jeu de prévisions défini par l'utilisateur. En plus des principaux stades phénologiques et des composantes du rendement, le modèle simule un ensemble de variables agro-météorologiques. Ces variables sont liées à des dépassements de seuils, à des sommes ou à des moyennes de variables agro-climatiques.

Dans cette étude, le modèle est utilisé sans aucun paramètre mesuré en cours de campagne. Il est uniquement forcé par des données météorologiques. L'étude des composantes du rendement ainsi que du rendement final n'est donc pas abordée dans ce chapitre de thèse.

1.1.2. Conception du modèle

Les modèles inclus dans Panoramix reposent principalement sur la description complète de l'écophysiologie des céréales à paille réalisée dans Gate (1995). Les équations permettant de représenter l'évolution de la plante sont notamment décrites. Ces modèles ont constamment été améliorés, grâce notamment à plusieurs décennies de collecte de données issues d'expérimentations menées par l'Institut. La calibration des modèles a été réalisée à l'échelle de la France et diverses évaluations ont été menées à une échelle plus locale. Les principes de base utilisés par le modèle sont également inspirés d'un autre modèle, DéciBlé, créé pour simuler la gestion des cultures du blé (Meynard, 1997 ; Chatelin et al., 2005).

A plusieurs reprises, Panoramix a été utilisé pour mener des études sur l'évolution des rendements des céréales, comme notamment sa contribution au projet Climator (Brisson et Levraut, 2010) ou encore pour apporter des éléments de réponses afin d'expliquer la stagnation des rendements du blé en Europe (Brisson et al., 2010 ; Gate et al., 2010).

¹² Talle : pousse caractéristique des graminées qui, après le développement de la tige principale, sort du collet des racines de la plante.

Ce modèle appartient à la famille des modèles dits à « élaboration des composantes du rendement ». Contrairement à d'autres modèles pouvant être utilisés pour la simulation de la croissance des cultures, ce modèle ne possède pas de module d'azote. De cette manière, la plante au cours de sa croissance ne rencontre pas d'effet de stress vis-à-vis de la teneur en azote. De plus, le modèle réinitialisant la réserve utile du sol entre chaque campagne, les effets liés au stress hydrique peuvent être importants dans le cas où les saisons automnale et hivernale sont relativement sèches.

1.1.3. Données météorologiques en entrée du modèle

Les données météorologiques en entrée du modèle sont issues d'une base de données créée par Arvalis - Institut du végétal. Ces données quotidiennes proviennent de stations météorologiques réparties sur le territoire français et sont réactualisées au pas de temps journalier. L'historique des données peut remonter jusqu'aux années 50. Les structures de recherche agricole publiques ou privées, mais surtout Météo-France, en sont les principaux fournisseurs. Arvalis - Institut du végétal dispose également de ses propres stations météorologiques, permettant ainsi d'avoir un réseau de données dense et équitablement réparti sur la France. Le modèle est forcé par des variables météorologiques au pas de temps quotidien : la température minimale, la température maximale, la moyenne de ces deux températures, les précipitations totales cumulées, le rayonnement solaire global (direct et diffus) et l'évapotranspiration potentielle (ETP par la suite ; Brochet et Gerbier, 1968). Ainsi, pour chaque simulation réalisée sur une parcelle, un fichier de données météorologiques est nécessaire, composé des variables météorologiques et couvrant l'année culturale étudiée.

1.2. Impact du climat sur la croissance du blé tendre

1.2.1. Calage de la date de semis ; stratégie d'évitement

Selon les particularités climatiques, les différents accidents auront en fréquence une probabilité d'occurrence plus ou moins forte. Les producteurs ont donc intérêt à « manipuler » la phénologie de la culture pour la positionner au mieux par rapport à ces accidents climatiques. Pour cela, ils peuvent orienter leur choix variétal et décaler les dates de semis.

La date de semis est un élément de l'itinéraire technique de la culture et dépend principalement de deux facteurs : la précocité de la variété et le contexte pédoclimatique. Pour chacune des combinaisons de ces deux facteurs, une date de semis optimale est définie de manière à minimiser l'exposition à quelques accidents climatiques généralement considérés préjudiciables pour la culture :

- les gelées précoces ($T_{min} < -8^{\circ}\text{C}$ en début d'hiver), qui détruisent les plantules n'ayant pas encore acquis un niveau de résistance suffisant (surtout pour les variétés très sensibles au froid).

- les gelées tardives ($T_{min} < -4^{\circ}\text{C}$ au printemps), qui détruisent les épis après le stade « épi à 1 cm » (voir Sect. 1.3.1.).
- les excès thermiques ($T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$), associés ou non à un déficit hydrique lors des phases terminales du cycle (Gate, 1995), qui ont des conséquences sur le PMG.

La période idéale de semis est donc établie selon une stratégie dite « d'évitement ». Un semis précoce permet d'éviter les gelées précoces de début d'hiver, mais peut exposer la culture à des gelées tardives alors qu'elle a débuté sa montaison. Cependant, une montaison précoce permet de limiter le risque d'un déficit hydrique en phase sensible et limite l'exposition à des températures élevées en fin de cycle. A l'inverse, un semis tardif est davantage exposé aux accidents de fin de cycle.

A noter que d'autres risques spécifiques ou caractéristiques de la région peuvent également altérer le développement de la plante et ainsi pénaliser le rendement et/ou la qualité.

1.2.2. Les principaux facteurs climatiques impactant la culture

Les événements climatiques responsables de la dégradation de la plante et par conséquent ayant un impact plus ou moins marqué sur les composantes du rendement (et donc sur le rendement final), sont répertoriés dans Gate (1995). On en présente ici les principaux afin de justifier les variables agro-météorologiques sélectionnées pour réaliser cette étude. Cette présentation est donc nécessairement réalisée en premier, même si le vocabulaire relatif à la plante n'a pas encore été abordé. On propose ainsi de se référer à la partie suivante (Sect. 1.3.) pour les définitions des principaux stades phénologiques qui vont être cités.

Le stress hydrique est le premier des facteurs climatiques dont les conséquences sont observées tout au long de la phase de croissance. Tout d'abord, cela retarde la date de levée lorsque cela a lieu dès la date de semis, avec des conséquences possibles sur le nombre de plantes/m² levées. Le stress hydrique est susceptible d'entraîner de nombreuses pertes dès lors que la graine a été imbibée d'eau. Les stades « montaison » et « méiose pollinique » constituent les étapes les plus critiques lors du stress hydrique. De la période « mi-tallage » jusqu'au stade « 1-2 nœuds », le nombre d'épillets peut être affecté. Les composantes du rendement, comme le PMG, le nombre d'épis/m² ou le nombre de grains par épi, sont directement impactées entre le stade « épi à 1 cm » et « floraison ». C'est également une période majeure pour la constitution de la biomasse (feuilles, tiges) qui peut donc être affectée.

L'eau est également néfaste lorsqu'elle se trouve en excès. On remarque notamment les conséquences d'un sol gorgé d'eau l'hiver à l'origine de l'hypoxie au niveau des racines, avec des conséquences sur le nombre d'épis/m². Cette période sensible est située autour du stade « tallage », mais aussi lors de phases plus tardives où une anoxie temporaire ralentit ou bloque le métabolisme de la plante.

La plante est sensible au gel principalement lors de deux phases critiques, même si les variétés du blé tendre ont chacune leur propre réponse au gel. La première a lieu durant la phase «germination-levée » où des températures de l'ordre de -8°C entraînent la destruction directe du matériel végétatif. Il est à noter que les dégâts sur la plante seront d'autant plus importants que l'arrivée du froid sera brutale. Le statut hydrique de la plante peut également renforcer l'action du froid. La seconde a lieu entre les stades « épi à 1 cm » et « méiose mâle¹³ » où des températures de -4°C ont un impact sur l'épi en formation et donc ont des conséquences sur le nombre d'épis et le nombre de grains par épi.

Les températures positives sont également une source majeure de détérioration de la plante. Deux stades apparaissent particulièrement sensibles : la méiose et la floraison. Des températures trop élevées durant la phase de montaison vont jouer sur la croissance des tiges, principalement à partir du stade « épi à 1 cm ». Au-delà de 11 à 12°C dans les trois semaines qui suivent ce stade, une élévation de 1°C se traduit par une perte supplémentaire d'environ 10% d'épis/m².

Des températures supérieures à 25°C (observées durant les jours « échaudants ») pendant la croissance de l'épi (entre le stade « méiose » et « floraison ») vont provoquer l'avortement des fleurs. Des températures excessives (supérieures à 30°C), notamment au moment de la « méiose » et entre les stades « floraison » et « maturité physiologique », vont être à l'origine d'une série de conséquences graves sur la fécondation et donc sur les composantes du rendement.

Enfin, le manque de rayonnement constitue l'un des derniers facteurs climatiques agissant sur la culture. La période s'étalant de la méiose pollinique à la fécondation est particulièrement sensible au défaut de rayonnement. Des conséquences ont lieu sur la matière sèche et sur le nombre de grains par épi.

C'est à partir de la connaissance des principaux facteurs climatiques impactant la croissance de la plante que l'on pourra établir une liste des variables agro-météorologiques d'intérêt à étudier dans cette thèse. L'ensemble des facteurs climatiques venant d'être présenté est susceptible d'affecter durablement la plante.

1.3. Les variables simulées pour le blé tendre

Concernant le blé tendre, le modèle permet la représentation de plusieurs variables agro-météorologiques. Elles sont classées en plusieurs catégories. On présente ici les trois catégories retenues dans cette étude : les dates de stades phénologiques, les variables liées au bilan hydrique et les variables liées aux sommes de températures.

¹³ Méiose mâle : assimilée à un stade phénologique, elle correspond au moment où se forment les gamètes mâles de la plante dans les sacs polliniques.

1.3.1. Les stades phénologiques

Les stades phénologiques sont des repères clés dans la période de croissance du blé tendre (et autres cultures). Simuler les dates d'occurrence de ces stades permet de les positionner par rapport aux dates théoriques. La détermination de ces moments clés repose principalement sur les sommes de températures. Chaque jour, la plante reçoit une quantité de chaleur, exprimée en degré-jours, selon la relation suivante :

$$\text{Degré jours} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{2} + \text{Tréf} \quad (5)$$

où Tréf dépend de la culture et vaut 0°C pour le blé (appelé aussi « base »). Les degrés-jours sont toujours positifs : l'écart « Tmax – Tmin » est borné à 0°C. Ainsi, la somme des températures quotidiennes du blé tendre correspond à la contribution positive de la température moyenne journalière.

On peut donc calculer la somme de températures obtenue entre deux périodes et ainsi directement caractériser le développement de la plante (Figure 44). L'occurrence d'un stade phénologique est obtenue dès que la somme de températures que nécessite ce stade est atteinte (souvent depuis la date de semis, mais pour certains stades, depuis l'occurrence d'un précédent stade). Pour cela, il est donc indispensable de connaître la quantité de chaleur à fournir à la plante pour atteindre les principales étapes clés de sa croissance. Celles-ci sont basées sur la physiologie de la plante. On s'intéresse particulièrement à celles du blé tendre.

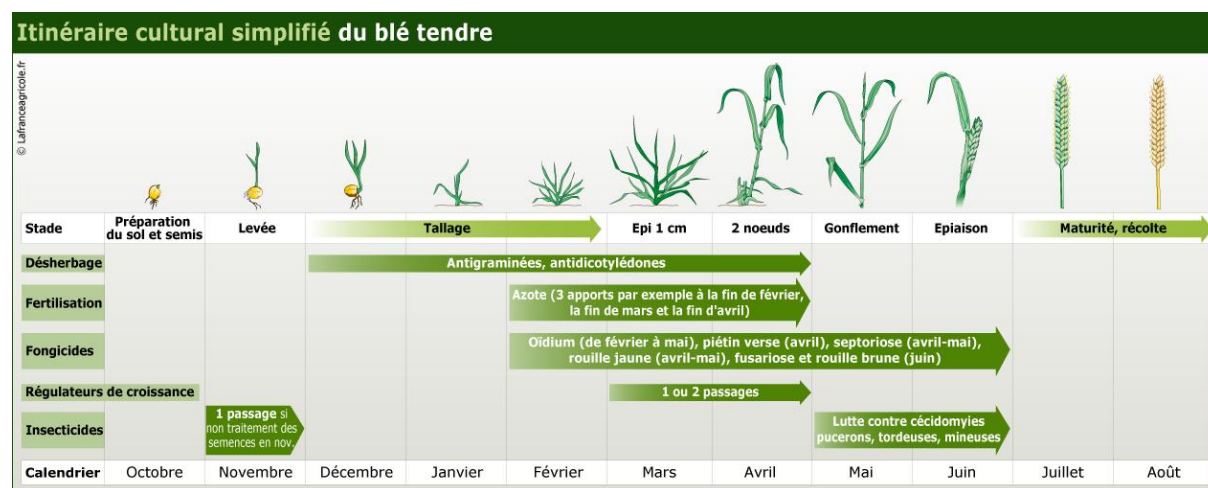


Figure 44: Les principaux stades phénologiques du blé tendre, situés dans le calendrier cultural. (La France Agricole, <http://www.lafranceagricole.fr/>).

Le stade phénologique « épi à 1 cm » constitue l'une des étapes les plus importantes du cycle de la plante. Il constitue un repère agronomique déterminant pour sa croissance : un bilan des facteurs limitants (bilan hivernal) est réalisé à cet instant. De plus, les besoins en azote étant importants, c'est en général au stade « épi à 1 cm » que le premier apport azoté a

lieu. On peut également diagnostiquer à ce stade la quantité d'azote minéral du sol ainsi que l'état de la réserve hydrique, indispensables pour la croissance de la plante. La modélisation de ce stade tient compte des températures journalières, de la photopériode et de la vernalisation, selon le formalisme de Weir (Weir et al., 1984). Ce stade permet également l'anticipation des stades futurs. Il est cependant soumis à une forte sensibilité à certains risques climatiques, notamment le gel prolongé, auquel l'épi est sensible. D'après Gate (1995), la date d'apparition de ce stade dépend des besoins en vernalisation, en durée du jour et en somme de températures. A l'échelle de la France, les besoins varient de 650°C à 1250°C selon les variétés et les dates de semis. Les dates d'apparition de ce stade s'observent en moyenne dans le nord de la France autour du 20 mars pour les variétés précoces, le 1^{er} avril pour les demi-précoces et le 10 avril pour les tardives. Dans le sud de la France, les dates oscillent entre le 5 et le 10 mars, le 15 mars et entre le 20 et le 25 mars, respectivement pour chacune des trois classes de variétés.

Le stade « 2 nœuds » est l'étape clé venant directement après le stade « épi à 1 cm ». Il est atteint lorsque la plante a reçu environ 250°C depuis le stade précédent. Sa période d'apparition se situe entre fin avril et début mai dans les régions du nord et autour de la 1^{ière} quinzaine d'avril dans celles du sud.

Puis vient le stade « épiaison », qui constitue un repère majeur à différents niveaux. Durant la phase de développement, il définit la fin de la période de montaison et permet de prévoir les dates d'occurrence des principaux stades à venir, comme la « floraison », les stades « grain-laiteux » et « grain-pâteux », ainsi que la « maturité physiologique ». Dans l'élaboration du rendement, prévoir ce stade avant la campagne permet de définir des dates de semis permettant de limiter les effets des facteurs climatiques ayant lieu à cet instant, comme les excès de températures et le manque d'eau, qui pénalisent le remplissage des grains. Dans la conduite de la culture, le stade « épiaison » marque le début de sensibilité de la plante aux maladies. Il est donc déterminant pour la protection à mettre en œuvre. La somme de température nécessaire pour que la plante atteigne ce stade dépend de la précocité du semis : elle est maximale pour des semis très précoces et diminue progressivement selon la tardiveté du semis. Elle atteint un minimum pour un semis en janvier. Globalement, cette durée varie de 1200°C à 1900°C. Les facteurs déterminants sont le nombre de feuilles (fonction des besoins en vernalisation) et leur vitesse d'émission. Les dates d'apparition du stade s'observent en moyenne entre le 20 et le 25 mai dans les régions du nord et pour les variétés précoces, entre le 25 mai et le 1^{er} juin pour les variétés demi-précoces et entre le 1^{er} et le 15 juin pour les variétés tardives. Dans le sud, elles sont observées du 1^{er} au 10 mai, du 10 mai au 20 mai et du 20 mai au 1^{er} juin, pour respectivement chacune des trois variétés.

Seulement quelques jours plus tard (entre 4 et 15 jours), le stade « floraison » est atteint. Le facteur climatique le plus déterminant pour mener la plante à ce stade depuis l'épiaison est la température. En moyenne, elle équivaut à 145°C et se raccourcit en présence de fortes températures ou d'une demande climatique importante.

La « maturité physiologique » a lieu quand il n'y a plus de migration de matière sèche vers le grain. Cette période conclut l'élaboration de la dernière composante de rendement : le PMG, déterminant pour le rendement final. Ainsi, le poids sec du grain a atteint sa valeur

maximum et définitive. Le stade « maturité physiologique » correspond à peu près au stade « grain-mûr ». Il faut entre 700°C et 800°C depuis le stade « épiaison » pour l'atteindre. Ce stade a lieu approximativement à la fin du mois de juillet dans les régions du nord et à mi-juillet dans les régions du sud.

Après ce stade, une phase rapide de dessiccation se met en place et le grain devient de plus en plus dur et peut être récolté à la machine : c'est la « maturité récolte ».

Dans cette étude, on s'intéresse donc à prévoir les dates d'occurrence des six principaux stades phénologiques suivants :

- « épi à 1 cm »,
- « 2 nœuds »,
- « épiaison »,
- « floraison »,
- « maturité »,
- « récolte ».

Même si l'anticipation de son occurrence présente un intérêt fort en matière d'organisation du travail, la date de récolte ne constitue pas un stade phénologique à proprement parler.

1.3.2. Les variables hydriques

Panoramix est également constitué d'un modèle hydrique calculant au pas de temps quotidien l'état de la réserve utile en fonction des données météorologiques fournies. Une liste importante de variables liées au contenu en eau du sol existe. Ces variables sont ensuite réutilisées et permettent de calculer d'autres indicateurs. Comme on l'a vu, elles sont calculées sur des périodes liées à l'occurrence des stades phénologiques. On peut par exemple connaître l'état de la réserve au stade « floraison » (un indicateur clé dans la croissance de la culture) ou encore le cumul de précipitations entre les stades « épiaison » et « maturité » (la connaissance de la quantité de pluie tombée entre deux stades s'avère d'autant plus utile que les intrants ont lieu de manière efficace peu avant un épisode pluvieux, ce qui favorise l'assimilation de l'azote).

Nous nous intéressons ici aux variables hydriques correspondant aux principales causes climatiques responsables des dommages portés aux cultures et identifiées dans l'introduction. Ces variables, au nombre de huit, sont étudiées aux périodes parmi lesquelles le rôle de l'eau est fondamental dans le développement de la culture :

- la somme du drainage entre la date de semis et le stade « épi à 1 cm »,
- l'état de la réserve utile au stade « épi à 1 cm »,
- l'état de la réserve utile au stade « épiaison »,
- l'état de la réserve utile au stade « floraison »,
- l'état de la réserve utile au stade « maturité »,
- la somme des pluies entre les stades « épi à 1 cm » et « 2 nœuds »,
- la somme du déficit hydrique entre les stades « 2 nœuds » et « floraison » (le déficit hydrique est ici égal à la différence entre l'évapotranspiration maximale (ETM) et l'évapotranspiration réelle (ETR)),
- la somme des pluies entre les stades « grain-laiteux » et « maturité ».

1.3.3. Les variables thermiques

Le modèle Panoramix permet d'obtenir des variables liées aux températures, directement calculées à partir des forçages météorologiques. Il calcule notamment les sommes de températures dépassant un seuil entre deux stades phénologiques afin de vérifier si la plante a été exposée à des températures extrêmes, comme d'importants gels, ou des températures excessives. Comme cela a été décrit dans l'introduction, la culture est très sensible aux températures autour des stades clés « méiose » et « floraison ». Il est important de connaître l'impact attribué aux températures extrêmes (gel et excès thermique) sur la croissance de la plante et sur les composantes du rendement. L'anticipation de ces températures permet de situer de manière optimale la date de semis afin d'éviter ces risques climatiques.

Un grand nombre de variables nécessite d'être étudié afin d'avoir une compréhension globale des impacts climatiques sur la plante. Nous nous limiterons à l'étude des principaux facteurs, représentés à travers les six variables suivantes :

- la somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade « épi à 1 cm »,
- la somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades « épi à 1 cm » et « 2 nœuds »,
- la somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades « épi à 1 cm » et « épiaison »,
- la somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades « méiose » et « floraison »,
- la somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades « épiaison » et « maturité »,
- le nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C.

2. Mise en place des différents jeux de simulations

2.1. Contexte de l'étude

2.1.1. Le calendrier type d'une année simulée

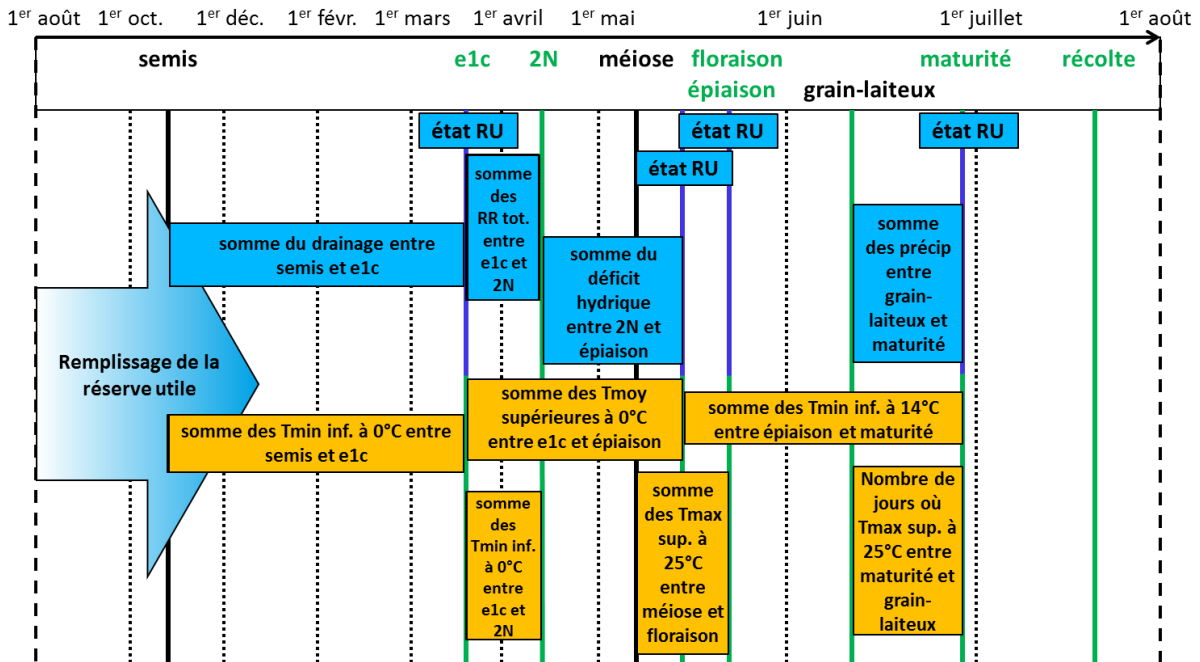


Figure 45: Schéma d'une année culturale simulée avec Panoramix. Les différentes variables agro-météorologiques sont représentées. En vert les stades phénologiques, en bleu les variables hydriques et en orange les variables thermiques.

Le modèle de culture Panoramix est utilisé afin de produire plusieurs jeux de simulations. Chacune des simulations est réalisée sur une période couvrant une année « culturale ». Du fait qu'une campagne agricole ait lieu sur deux années (l'année où a lieu le semis et l'année où a lieu la récolte), on définit l'année culturale comme étant l'année où a lieu la récolte (et donc la majorité de la croissance de la culture qui nous intéresse), que l'on note « année n ». Chaque simulation est réalisée du 1^{er} août de l'année n-1 au 31 août de l'année n. Comme on peut le voir illustré sur la Figure 45, dès le début de la simulation au 1^{er} août, la réserve d'eau du sol initialement vide se remplit. C'est la phase de remplissage. A compter de la date de semis, le modèle pilote la croissance de la culture jusqu'à la date de récolte. Durant cette phase, le modèle va simuler les différentes étapes clés de la culture décrites dans la section précédente, mais aussi l'ensemble des variables agro-climatiques. A partir des forçages météorologiques et de l'état de la réserve utile, où son évolution est illustrée sur la Figure 46, le modèle produit au pas de temps quotidien l'état des variables agro-météorologiques afin de suivre leur évolution temporelle. C'est la phase de croissance.

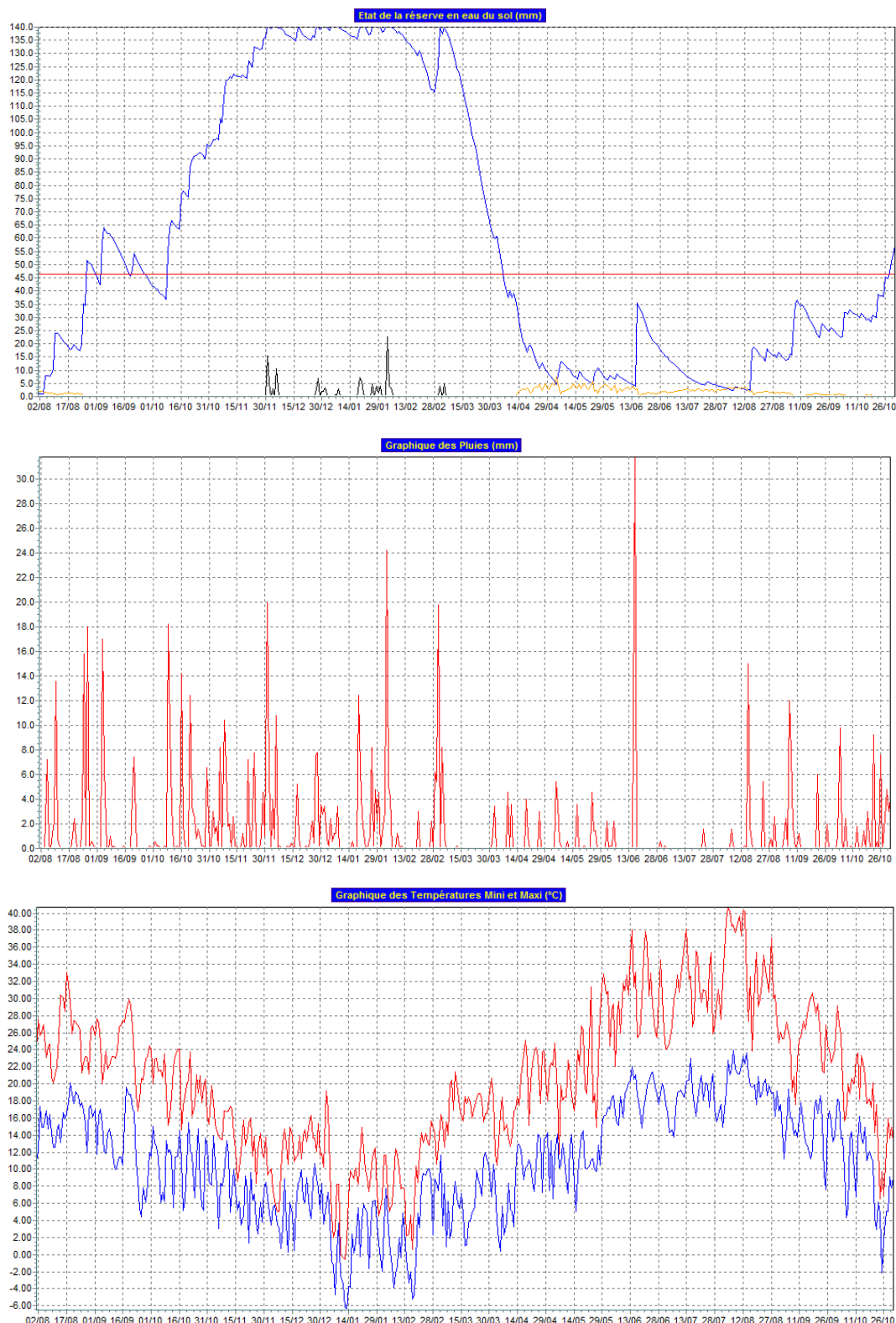


Figure 46: Exemple d'évolution des différentes variables liées à l'état du sol et des forçages atmosphériques tracés par le modèle de culture Panoramix. En haut, l'état de la réserve en eau du sol (en bleu), le drainage (en noir), le déficit hydrique (en orange) et la limite de la réserve de survie (en rouge). La réserve utile est fixée à 140 mm, le sol choisi est de type argileux-limoneux. Au milieu, l'évolution des précipitations totales. En bas, l'évolution des températures minimales (en bleu) et maximales (en rouge). La simulation est réalisée avec les données météorologiques de la station d'observation de Toulouse-Blagnac pour l'année culturale 2002/2003.

2.1.2. Paramétrisations du modèle de culture

En se basant sur les différents critères de recherche d'une date optimale de semis (voir Sect. 1.2.1.), on définit pour toute la période et tous les sites étudiés une date théorique optimale : le 20 octobre. A cette date, on montre en France qu'en moyenne les principaux aléas climatiques (gel à la montaison, températures excessives au remplissage des grains...) peuvent être évités. En tentant de rechercher une date de semis optimale pour chacun des sites étudiés et pour chaque année, on aurait introduit une variabilité des résultats nous empêchant de directement analyser ceux propres aux forçages atmosphériques utilisés. La variété choisie doit présenter des caractéristiques situées dans la moyenne (par rapport aux autres variétés), en veillant à ce que son utilisation soit répandue en France. Ainsi, la variété « Soissons » a été retenue. Cette variété est dite précoce, c'est-à-dire qu'elle atteint rapidement le stade « épi à 1 cm ». Ses besoins en vernalisation et en durée du jour sont relativement faibles, ce qui rend sa croissance rapide jusqu'à ce stade. La densité choisie correspond également à une situation optimale pour cette variété : 300 grains/m². Cette thèse ayant pour but d'évaluer uniquement l'impact climatique sur la croissance de la plante, on cherche donc à éviter que d'autres facteurs environnementaux n'influencent la croissance de la culture. Pour cela, une réserve utile de 140 mm est paramétrée de manière à ce que le stress hydrique ne soit pas trop contraignant. Une réserve utile choisie trop petite ou trop grande aurait entraîné des simulations très fortement dépendantes de l'état de la réserve en eau du sol (un stress hydrique ou de l'eau toujours disponible). Le sol choisi est de type limon-argileux. Un récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle est présenté dans le Tableau 2.

Variété du blé tendre	Date de semis	Type de sol	Réserve utile (mm)	Densité (grains/m ²)
Soissons	20 octobre	Limon-argileux	140	300

Tableau 2: Récapitulatif des paramètres d'entrée du modèle Panoramix fixés dans cette thèse.

2.1.3. La période d'étude

On utilise les forçages météorologiques issus des données de la prévision saisonnière pour réaliser des simulations selon le calendrier cultural qui vient d'être présenté. Pour cela, on a choisi les données disponibles sur la période 1960-2005 issues du projet européen ENSEMBLES (voir Introduction). Or, cette période est trop longue pour être entièrement étudiée. De plus, la tendance climatique observée ces dernières dizaines d'années (IPCC, 2014) met en évidence une hétérogénéité climatique entre la période 1960-1980 et la période 1980 à aujourd'hui. Ainsi, il a été décidé de n'utiliser que les 25 dernières années du jeu de données, soit la période 1981-2005. Cet échantillon est suffisamment grand pour réaliser des statistiques significatives.

2.1.4. Les sites sélectionnés sur la grille Safran

Afin de réaliser les simulations, il est possible d'utiliser deux jeux de données :

- le premier issu des stations météorologiques dont Arvalis dispose des données (soit un total de 216 sites),
- le second issu de réanalyses sur la grille régulière Safran de Météo-France.

Durant cette étude, on est amené à utiliser des variables telles que le rayonnement ou l'ETP, qui ne sont pas toujours mesurées au sein des stations météorologiques. Or, la profondeur historique n'est pas homogène parmi toutes les stations du premier jeu de données. Afin de conserver l'homogénéité des forçages météorologiques, le jeu de données issues de réanalyses sur la grille Safran est donc sélectionné.

Météo-France dispose d'une base de données composée de réanalyses météorologiques en France et sur une grille régulière de 8 km appelée Safran (« Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige »). Comme son nom l'indique, ce système a été initialement développé dans le but de fournir des données météorologiques (température de l'air, vent à 10 m, précipitations solides et liquides...) utiles à la prévision des avalanches sur le massif Alpin (Durand et al., 1993 ; Durand et al., 1999). Puis, le système a été étendu sur la France et sur une partie des pays limitrophes où les Alpes s'étendent (Etchevers, 2000 ; Le Moigne, 2002). Le système Safran tient notamment compte du relief en travaillant sur des zones climatiquement homogènes appelés zones « Symposium 2 » prenant en compte les massifs. Il est fabriqué à partir de réanalyses issues de modèles atmosphériques ainsi que d'observations. Les données sont aujourd'hui disponibles au pas de temps horaire ou quotidien sur chacun des points de la grille, avec des données historiques remontant à 1958 (Vidal et al., 2010). Ce jeu de données a été validé grâce à un autre jeu de données indépendant (Quintana-Seguí et al., 2008).

Il a été décidé de sélectionner parmi les 9892 points de la grille Safran les points les plus proches des stations météorologiques utilisées par l'Institut. Compte-tenu de la résolution des données de prévision saisonnière utilisées, il est inutile de mener cette étude sur des sites trop proches. Ainsi, parmi les 216 stations, on retire celles qui sont proches les unes des autres, pour arriver à un total de 199 stations répartis de façon la plus homogène possible (Figure 47).

Ce sont ainsi 199 sites qui sont étudiés dans cette thèse. Afin d'évaluer spatialement l'apport de la prévision saisonnière, ces 199 sites seront répartis équitablement en deux régions, nord et sud, selon un axe horizontal de 46.8° N de latitude, soit 100 et 99 sites dans chacune, respectivement (Figure 47). Ainsi, les résultats seront également présentés pour chacune de ces deux régions.

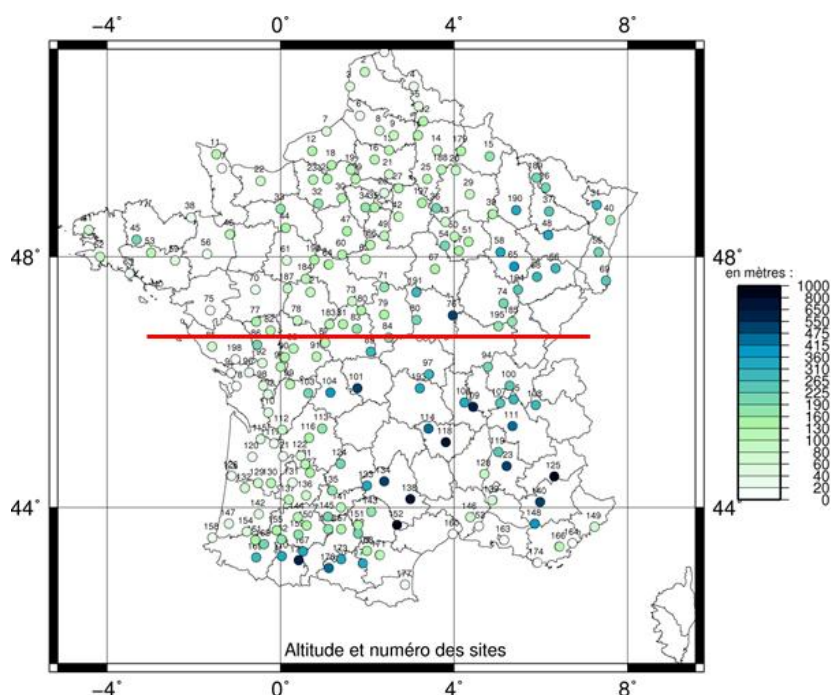


Figure 47: Carte des 199 sites et leur altitude où sont réalisés les différents jeux de simulations. La distinction entre les sites de la région nord et ceux de la région sud est représentée par un trait rouge situé à 46.8° N de latitude.

2.2. Le jeu de simulations de référence

Afin d'évaluer les différents jeux de simulations réalisés, on met en place un jeu de simulations de référence constitué uniquement de réanalyses Safran. De cette manière, la référence permet directement d'évaluer l'apport de la prévision saisonnière ou de la méthode fréquentielle. L'illustration de ce jeu de simulations est présenté sur la Figure 48, noté « **réf** » par la suite. Les vingt variables agro-météorologiques sont générées avec ce jeu de simulations de référence.

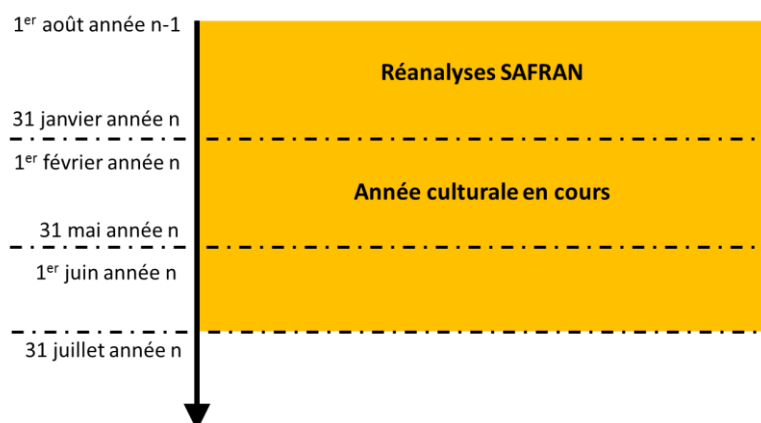


Figure 48: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations « **réf** » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale.

2.3. Le jeu de simulations avec utilisation du calcul fréquentiel

En cours de campagne, le modèle simule l'évolution future de la culture avec des données observées (données météorologiques de la station la plus proche de la parcelle étudiée ou forçages atmosphériques Safran par exemple). Or, tant que la date de récolte n'est pas atteinte, on ne dispose pas de toutes les données de forçages météorologiques. Il s'agit donc de compléter la série temporelle de données atmosphériques quotidiennes. Le modèle utilise pour cela une méthode innovante de prévision, appelée « calcul fréquentiel » (Figure 49). Pour Arvalis - Institut du végétal, la définition est la suivante : le calcul fréquentiel consiste à « faire des prévisions sur une parcelle donnée au cours de la campagne en intégrant les données climatiques de l'année en cours et l'historique climatique des quelques dizaines dernières années ». Afin d'être plus représentatif du climat passé, le nombre d'années sélectionnées doit être assez important, compris par exemple entre vingt et trente ans. Cependant, à cause de la tendance climatique induisant une hausse des températures, la climatologie utilisée devient moins représentative des conditions actuelles. Le modèle simule la fin de la croissance de la culture en utilisant un forçage issu de l'un des jeux de données atmosphériques historiques. Ce procédé est réitéré autant de fois que le nombre d'années historiques utilisé, de manière à obtenir autant de simulations. Afin d'obtenir une prévision déterministe de la fin du cycle de croissance de la culture, on émet l'hypothèse que ces variables météorologiques ont la plus grande probabilité d'être « proches » d'une valeur statistique représentative des dernières dizaines d'années (médiane, décile 4 ou 6 de l'ensemble des simulations réalisées, ...).

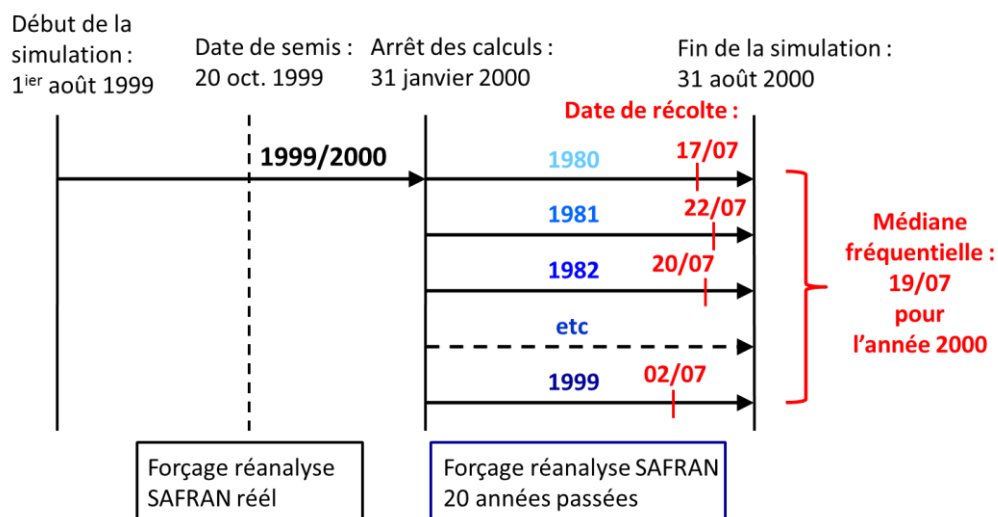


Figure 49: Schéma de principe de la méthode de calcul fréquentiel. Exemple pour la campagne 1999/2000.

Comme on peut le voir sur la Figure 49, le calcul fréquentiel est donc réalisé à partir d'un historique climatique de vingt années, c'est-à-dire que pour une année d'étude donnée (par exemple 2000), vingt simulations sont réalisées et forcées chacune avec l'un des vingt

derniers jeux de données climatiques les plus récents (de 1980 à 1999 dans notre exemple). Parmi ces vingt prévisions, on calcule la valeur statistique correspondant à la prévision que l'on veut obtenir. Pour une prévision statistiquement la plus proche du climat passé, on calcule la médiane. On peut également s'intéresser à un décile afin d'être plus proche de l'année en cours (si celle-ci s'annonce atypique). Afin d'avoir une cohérence parmi tous les jeux de simulations, cette méthode est démarrée à la date d'initialisation de la prévision saisonnière (le 1^{er} février de l'année culturale). Les forçages météorologiques utilisés pour ce jeu de simulations sont présentés sur la Figure 50, noté « **fréq** » par la suite. Le jeu de simulations avec les données issues de la prévision saisonnière (voir Sect. 2.4.) est à comparer directement avec cette méthode.

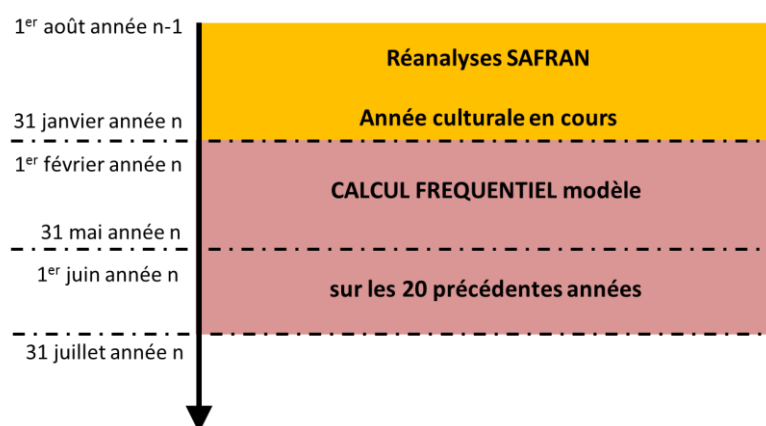


Figure 50: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations « fréq » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale.

2.4. Le jeu de simulations avec les données de prévision saisonnière

Sur une période de plusieurs mois, les variables météorologiques des forçages météorologiques sont partiellement ou totalement remplacées par des données de prévision saisonnière. On réalise de cette manière un jeu de simulations visant à évaluer l'apport de la prévision saisonnière, noté « **PS** » par la suite. Les prévisions sont adaptées de manière à avoir la même résolution spatiale que les réanalyses Safran, en utilisant pour cela différentes méthodes de descente d'échelle (voir Sect. 3.). Les prévisions saisonnières sont réalisées avec un ou plusieurs modèles utilisé(s) dans le cadre du projet ENSEMBLES, appelées « hindcasts », car elles couvrent une période passée (voir Introduction). Deux échéances sont utilisées : 4 et 6 mois. Sur les quatre dates d'initialisation disponibles, on choisit pour cette thèse d'utiliser une initialisation au 1^{er} février afin d'étudier la période correspondant à la croissance de la plante. Jusqu'à cette date, la simulation est pilotée par les réanalyses Safran de l'année en cours. Ainsi, quel que soit le jeu de simulations (de référence, basée sur le calcul fréquentiel ou composée de données issues de la prévision saisonnière), la simulation présente au 31 janvier le même état de culture (Figure 51).

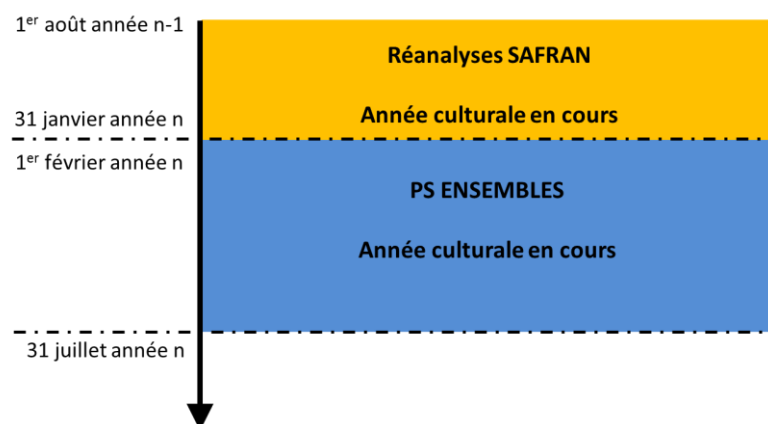


Figure 51: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations « PS » jusqu'au 31 juillet de l'année culturelle. Exemple pour les données de prévision saisonnière à 6 mois d'échéance.

Si l'on choisit une date d'initialisation de la prévision saisonnière au 1^{er} février et une échéance de quatre mois, les forçages atmosphériques sont insuffisants pour atteindre la date de récolte. A partir du 1^{er} juin, les forçages météorologiques doivent donc provenir d'un autre jeu de données. Dans cette thèse, il a été décidé de choisir ceux issus de la climatologie Safran (non montrés sur la Figure 51). De la même façon qu'avec le calcul fréquentiel, la climatologie est calculée sur les vingt années les plus récentes depuis l'année culturelle étudiée. La climatologie Safran insérée en fin de simulation est donc différente d'une année à l'autre. Afin de supprimer les fluctuations de petite échelle de temps, elle est calculée au pas de temps quotidien sur une période glissante de dix jours. Lorsque l'on n'utilise pas toutes les variables en entrée du modèle avec de la prévision saisonnière, la climatologie Safran est aussi utilisée pour les variables restantes (rayonnement global et ETP).

2.5. Le jeu de simulations de contrôle avec une climatologie Safran

Dans le but d'évaluer la prévisibilité apportée par la climatologie Safran, qui n'est utilisée que dans l'optique de remplacer les données de forçages atmosphériques manquantes dans le jeu de simulations « PS », on réalise un jeu de simulations uniquement composé de la climatologie Safran pour toutes les variables climatiques et sur toute la période entre le 1^{er} février et la date de fin de la simulation. Cette climatologie est calculée de la même manière que pour le jeu de simulations « PS » (Sect. 2.4.). Ce jeu de prévisions n'a pas pour but d'être comparé au jeu « PS » ni « fréq », mais a pour unique objectif de quantifier l'apport de la climatologie vis-à-vis de l'information fournie par la prévision saisonnière dans le jeu « PS ». La Figure 52 présente les forçages météorologiques utilisés pour ce jeu de simulations de contrôle, noté « **clim** » par la suite.

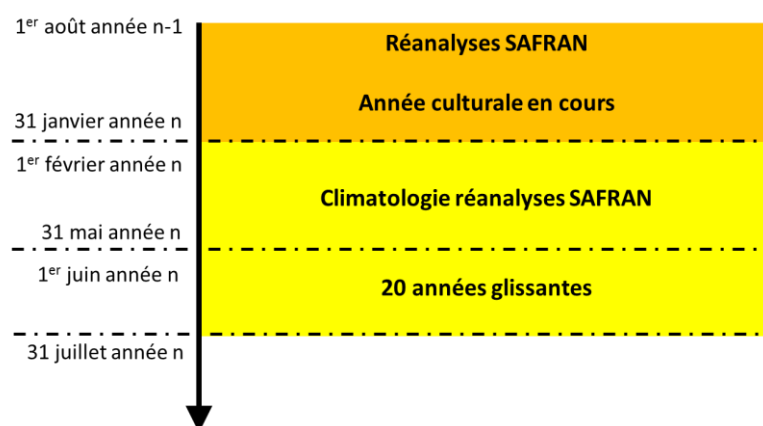


Figure 52: Forçages météorologiques utilisés pour le jeu de simulations de contrôle « clim » jusqu'au 31 juillet de l'année culturale.

3. Différentes méthodes de descente d'échelle

3.1. Présentation générale

3.1.1. Intérêt de leur utilisation

Dans le but d'évaluer l'impact à l'échelle locale ou régionale des prévisions à longues échéances, on utilise des données issues de modèles de climat tels que les GCM, qui possèdent une faible résolution (environ 250 km dans notre étude). Pour mener ces études locales, dès lors que l'on utilise un modèle hydrologique, agronomique, ou climatique régional (appelés « Regional Circulation Model » : RCM), il est nécessaire de posséder des données de forçages avec une résolution bien supérieure à celle fournie par les GCM. Il est donc indispensable de procéder à une étape intermédiaire visant à transposer l'information météorologique de sa résolution d'origine à celle adaptée au modèle d'étude. Ces méthodes tiennent compte des propriétés locales du point considéré (principalement l'orographie) qui sont mal représentées dans les GCM. De plus, leur utilisation présente l'avantage de « corriger » les données d'origine, car les données brutes issues d'un modèle à basse résolution ont un biais. En effet, ces modèles sont imparfaits (paramétrisations physiques...). En plus d'affiner la résolution des données météorologiques, ces méthodes de désagrégation comportent donc une étape importante de débiaisage.

Plusieurs méthodes de descente d'échelle existent et se classent en deux grandes catégories : la désagrégation dynamique et la désagrégation statistique. Chacune permet de réaliser les objectifs évoqués précédemment, à la différence que la première y parvient en deux étapes distinctes, alors que la seconde les réalise en une seule étape. On présente un aperçu succinct de ces deux catégories de descente d'échelle, avec leurs avantages et inconvénients.

3.1.2. Etat de l'art des différentes méthodes existantes

- Méthodes dynamiques de descente d'échelle

La méthode dynamique utilise un RCM, qui possède une résolution plus fine qu'un GCM (tout du moins sur la région d'intérêt, voir Figure 53). Plusieurs types de RCM existent. Premièrement, il peut s'agir d'un modèle atmosphérique à aire limitée. En effet, compte tenu de leur résolution pouvant aller jusqu'à la dizaine de kilomètres, il n'est pas envisageable de réaliser des simulations à l'échelle du globe, à cause du coût de calcul que cela engendre. Il faut donc forcer le modèle avec des conditions aux limites issues de GCM. On peut néanmoins utiliser un RCM global. Cependant, le coût de calcul est tellement élevé que deux configurations sont possibles : la première consiste à affiner la résolution uniquement sur la région étudiée et donc la laisser plus « lâche » ailleurs. On utilise pour cela un modèle atmosphérique global à résolution variable (c'est la méthode utilisée dans Déqué, 2007) ; la seconde consiste, si l'on souhaite garder une résolution fine à l'échelle du globe, à réduire la période simulée (ce qui est réalisé dans Chauvin et al., 2006). Dans les deux cas, pour un coût limité, le RCM n'est plus couplé avec d'autres modèles, mais il est forcé par des données issues de modèles d'océan, de banquise, et/ou de surfaces continentales.

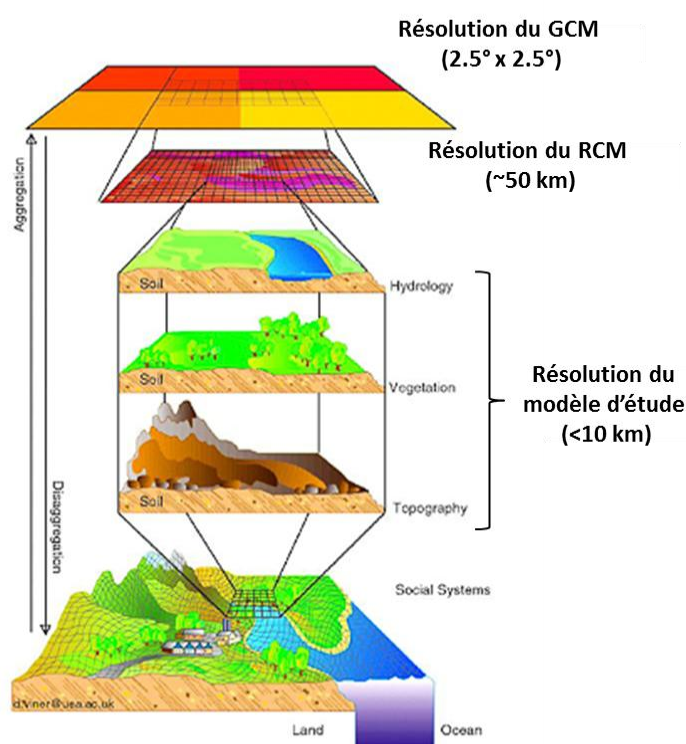


Figure 53: Illustration de la méthode de désagrégation dynamique (adaptée de D. Viner, Climatic Research Unit – University of East Anglia - Royaume-Uni, <http://www.drias-climat.fr/public/shared/downscaling.png>).

Une fois les simulations réalisées, une méthode de correction du biais peut alors être appliquée. Différentes solutions existent, de la méthode simple, qui consiste simplement à faire confiance au RCM (appelée « méthode de la confiance ») et ne pas corriger les données de sortie ; jusqu'à des méthodes complexes, comme les méthodes de correction fonctionnelle, incluant les méthodes statistiques de régression. Elles consistent à mettre en place une fonction de correction basée sur les observations et appliquée aux prévisions climatiques issues des GCM. Dans cette catégorie, une méthode spécifique est appelée « correction quantile-quantile » (d'après Panofsky et Brier, 1968). La distribution statistique des prévisions à grande échelle est séparée en centiles, puis chacun d'entre eux est corrigé individuellement. Plusieurs études ont appliqué cette méthode (Wood et al., 2004 ; Déqué, 2007), que l'on détaille plus loin (Sect. 3.2.2.). Une revue des méthodes existantes est faite dans Déqué (2007). A noter également que toutes ces méthodes de correction du biais ne sont pas spécifiquement conçues pour être appliquées aux sorties de RCM.

- Méthodes statistiques de descente d'échelle

Dans le cas où l'on ne dispose pas d'un RCM, ni même d'importants moyens de calculs, d'autres méthodes existent et utilisent la statistique. Ces méthodes, aussi nombreuses soient elles, reposent sur un même principe : relier les phénomènes atmosphériques de grande échelle à des phénomènes locaux de plus petite échelle. Ainsi, la donnée interpolée tiendra compte de deux types de variables : les variables atmosphériques de grande échelle issues des GCM, appelés « variables prédictives », et les variables climatiques liées aux propriétés locales, appelés « variables prédites ». Un modèle statistique est ainsi établi entre les variables « prédictives » et les variables « prédites » à partir d'un jeu d'observations historiques sur une période appelée « période d'apprentissage ». Concernant les variables « prédictives », le jeu d'observations et la période d'apprentissage doivent être choisis de façon judicieuse. Une fois cette étape réalisée, différentes méthodes de correction peuvent ainsi être appliquées.

Les méthodes de régression sont couramment utilisées. Il s'agit de relier statistiquement la série de variables « prédictives » à la série de variables « prédites ». Il existe de multiples façons d'obtenir cette relation : à l'aide d'une approche linéaire, comme l'utilisation de régressions multiples, ou d'une approche non linéaire, comme l'utilisation de réseaux de neurones. Une autre méthode de débiaisage existe : la classification par types de temps (appelée aussi méthode des « analogues »). Le champ de variables de grande échelle fourni par le GCM (les « prédicteurs ») est classé selon différents types de temps identifiés sur la région étudiée (voir Introduction). Ainsi, en connaissant la situation météorologique d'échelle synoptique à un jour donné, il est possible de la relier à un type de temps dont les propriétés du climat local sont connues et de retrouver le champ de variables locales (les « prédicteurs ») dans l'historique climatique du couple de variables « prédicteurs » / « prédites » observé. On suppose ainsi que l'observation des « prédictants » repose toujours sur la même observation des « prédicteurs » (Zorita et von Storch, 1999), ce qui est une hypothèse forte. De nombreuses études climatiques ont utilisé cette méthode (Boé et al., 2006 ; Boé, 2007 ; Singla, 2012).

A noter que le couplage entre une méthode de désagrégation régionale, suivie d'une correction statistique, est parfois intitulé dans la littérature : « approche statistico-dynamique » (par exemple dans Boé et al., 2006).

3.1.3. Avantages et inconvénients

Les méthodes présentées précédemment disposent chacune de leurs propres forces et faiblesses. Pour pouvoir les utiliser à bon escient, il est important de les connaître.

- Inconvénients

Comme il l'a été dit, les méthodes statistiques reposent sur la connaissance du couple de variables « prédicteurs » / « prédites » sur une période d'assimilation. Or, ces méthodes nécessitent une série temporelle d'observations suffisamment grande et de bonne qualité, ce qui peut s'avérer souvent difficile à obtenir. La relation mise en place entre ces deux séries de variables est complexe et nécessite un travail de compréhension des mécanismes relativement conséquent. Si l'observation est manquante, cette méthode ne peut donc évidemment pas être choisie (on ne dispose pas de séries de données observées aux échelles spatiale et temporelle). La nécessité de corriger le biais dans les méthodes de descente d'échelle dynamiques (qui utilisent également des séries d'observations) en fait un inconvénient pour les deux catégories. Si les séries d'observations présentent les critères requis pour utiliser ces méthodes, un autre inconvénient subsiste concernant la méthode statistique. Cette dernière est basée sur un postulat de départ : la relation statistique entre les variables « prédictantes » / « prédites » ne détecte pas les tendances climatiques futures qui n'ont pas été observées lors de la période d'apprentissage. En clair, la relation entre les deux séries de variables étant susceptible d'évoluer dans le futur, le champ de variables locales ne sera plus forcément couplé à celui des variables de grande échelle. Pour une même circulation synoptique, les variables locales sont susceptibles d'évoluer avec d'autres facteurs, comme par exemple la concentration de gaz à effet de serre (GES). Pour pallier ce problème, il faut bien choisir les variables « prédicteurs » utilisées et connaître parfaitement le mécanisme physique les reliant aux variables « prédites ». Ce problème est retrouvé dans les modèles statistiques de correction du biais utilisés pour la désagrégation dynamique. Enfin, les relations statistiques mises en place pour la désagrégation statistique n'existent pas pour toutes les variables météorologiques (les variables « prédicteurs » sont principalement des variables de pression et les « prédites » sont la température ou les précipitations totales), ce qui limite l'application de la méthode à d'autres jeux de variables.

Concernant la désagrégation dynamique, si les variables de grande échelle ne sont pas bien reproduites par le GCM, la projection climatique sera faussée. Le choix du GCM doit être adapté au domaine d'étude. La résolution des données traitées est limitée à celle du RCM utilisé, ce qui rend l'utilisation de cette méthode contrainte par le choix du modèle (même si des méthodes de descente d'échelle sous-mailles existent, elles restent « lourdes » à appliquer). De plus, ces méthodes à haute résolution sont très coûteuses, ce qui en fait leur

principale limite. Ce coût de calcul augmente considérablement dès lors que l'on cherche à évaluer les incertitudes associées aux scénarios climatiques utilisés (multi-modèles, multi-scénarios...).

- Avantages

L'utilisation de la désagrégation statistique présente l'avantage de fournir des données sans aucune limite de résolution spatiale, tant que leur résolution est supérieure à celle des observations utilisées. Opérer des calculs statistiques n'est pas très coûteux, sauf lorsque la relation statistique entre les variables « prédicteurs » et « prédites » est à construire.

Un RCM est en mesure de prendre en compte l'évolution du système climatique et ainsi proposer des scénarios futurs non observés dans le climat actuel ou passé, même si la construction de la physique du modèle est paramétrée selon le climat actuel. C'est un avantage que n'a pas la méthode statistique. La méthode de désagrégation dynamique présente également l'avantage de simuler l'ensemble des variables météorologiques existantes.

3.2. Les méthodes choisies dans cette thèse

Compte-tenu des avantages et inconvénients qui viennent d'être présentés, il a été décidé d'utiliser les deux méthodes de descente d'échelle suivantes : une méthode basée sur le calcul d'anomalies standardisées utilisée à Météo-France et la méthode statistique quantile-quantile. On présente plus en détail ces deux méthodes.

3.2.1. Une méthode basée sur le calcul d'anomalies standardisées

Les données de prévision saisonnière fournies par le projet ENSEMBLES sont à une résolution de 2.5°. Or, le forçage atmosphérique utilisé en entrée du modèle Panoramix est projeté sur la grille Safran de résolution de 8 km. Comme on l'a vu, ce problème d'échelle est résolu grâce à l'existence de plusieurs méthodes de désagrégation allant de la plus simple, l'interpolation, à une descente d'échelle statistique (Déqué, 2007) ou dynamique (Boé et al., 2006 ; Boé, 2007). Comme cela a été évoqué dans la Section 3.1.2., le profil orographique des GCM à une telle résolution est très lissé, filtrant ainsi les phénomènes qui ont lieu autour des régions montagneuses (et qui occupent une surface non négligeable en France).

La première méthode utilisée dans cette thèse est une méthode simple à mettre en œuvre avec un faible coût de calcul. L'interpolation utilisée par Rousset-Regimbeau (2007) pour la prévision d'ensemble des débits a été choisie dans ce but. Elle tient compte du relief sur la grille Safran. Cette méthode a été reprise dans d'autres études, montrant des qualités tant sur la simplicité de sa mise en œuvre que sur les résultats obtenus (Singla et al., 2012).

- Interpolation

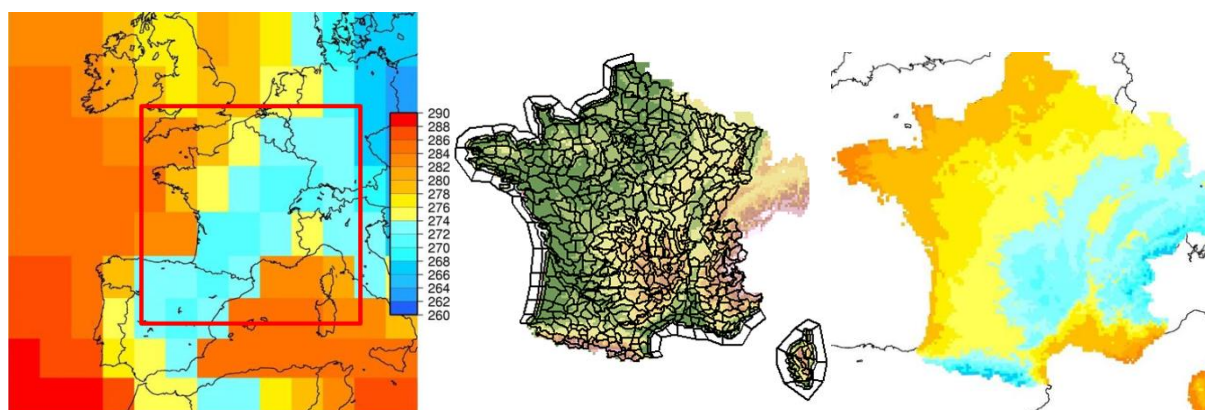


Figure 54: Les deux étapes de désagrégation spatiale de la méthode de descente d'échelle utilisée. A gauche, l'analyse du 1^{er} février 1960 à 00UTC de la prévision saisonnière issue du projet ENSEMBLES. Au milieu, la carte des zones « Symposium 2 » et à droite la carte des données interpolées sur la grille Safran.

Cette méthode de désagrégation se décompose en deux principales étapes. La première consiste à interpoler les données de prévision saisonnière sur les 615 zones climatiquement homogènes, appelées zones « Symposium 2 » (Figure 54, au milieu). D'après Rousset-Regimbeau (2007), « ces zones ont été définies pour les besoins de la prévision atmosphérique de Météo-France à l'échelle régionale et départementale, et sont aussi les zones sur lesquelles le modèle Safran réalise son analyse ». Les données de la prévision saisonnière sont interpolées en fonction de l'inverse du carré de la distance entre les points de grille 2.5° (Figure 54, à gauche) autour de la zone « Symposium 2 » et le centre de cette même zone (ce qui correspond à environ cinq points de grille). L'interpolation n'est pas seulement opérée sur les paramètres météorologiques, mais également sur l'altitude des points de grille de la prévision saisonnière. De cette manière, on tient compte de l'altitude issue de la grille d'origine de manière à conserver une certaine homogénéité avec la grille sur laquelle l'interpolation est réalisée. Un premier champ d'altitude est ainsi obtenu sur les zones « Symposium 2 ».

La seconde étape est similaire, mais elle est cette fois réalisée entre les zones « Symposium 2 » et la grille Safran (Figure 54, à droite). Les effets du relief sont représentés par l'utilisation d'un gradient vertical uniforme, spatialement et temporellement, appliqué sur chaque point de grille Safran entre les deux altitudes (celle de la grille Safran et celle des zones « Symposium 2 », issue de l'interpolation réalisée à l'étape précédente). Dans l'étude de la prévision d'ensemble des débits à moyenne échéance du CEPMMT (Rousset-Regimbeau, 2007), deux gradients ont été optimisés pour les précipitations totales : en dessous de 800 mètres, il vaut 2 mm/an/m ; et au-dessus, il faut 0,7 mm/an/m. Le gradient adiabatique sec correspondant à -6,5°C/1000m est quant à lui utilisé pour corriger la température.

- Calcul d'anomalies standardisées

La désagrégation spatiale de chacun des forçages météorologiques est associée à une étape indispensable : la correction du biais modèle (voir Sect. 3.1.1.). La méthode choisie ici a été utilisée dans Singla (2012). Cette méthode consiste à calculer l'anomalie standardisée du modèle (notée A_m) et ensuite corriger chacune des variables en sortie du modèle (notée V_m) à l'aide de ces anomalies. La première étape consiste à calculer les anomalies standardisées du modèle et de la variable, selon la relation suivante :

$$A_m = \frac{v_m - \overline{V_m}}{\sigma_m} \quad (6)$$

avec $\overline{V_m}$ la moyenne des variables V_m et σ_{V_m} l'écart-type, calculés sur la période 1960-2005.

La seconde étape consiste à corriger la variable, nommée V_{mc} , à l'aide des anomalies précédemment calculées. En effet, les anomalies obtenues précédemment (A_m) n'ont pas une dimension physique et ne sont donc pas exploitables dans le modèle de culture. Pour cela, on utilise la climatologie Safran (notée V_s) avec la relation suivante :

$$V_{mc} = A_m \overline{V_s} + \sigma_{V_s} \quad (7)$$

avec $\overline{V_s}$ la moyenne des variables V_s et σ_{V_s} l'écart-type, calculés sur la période 1995-2003.

La variabilité interannuelle de chaque point de grille Safran étudié est ainsi retranscrite pour chacun des paramètres et le biais du modèle est retranché. Les hétérogénéités dues au relief sont également prises en compte.

3.2.2. La méthode quantile-quantile

Même si la méthode quantile-quantile peut être classée parmi les méthodes de désagrégation dynamique, c'est une méthode de correction statistique directement comparable aux méthodes de régression (Déqué, 2007). La méthode est utilisée dans Cavarero et al. (2012) pour mener une étude climatique sur la Nouvelle-Calédonie et celle-ci est présentée comme une méthode de désagrégation statistique.

- Correspondance entre les points de grille ENSEMBLES et les points de la grille Safran

Avant de réaliser la correction quantile-quantile, il faut établir la correspondance entre les points de grille sur lesquels les prévisions saisonnières sont réalisées (117 au total) et les points de la grille Safran étudiés (199 au total). On choisit la méthode « au point le plus

proche » étant donnée la faible résolution spatiale de la grille ENSEMBLES. Afin de conserver une utilisation relativement simple de la méthode, il n'a pas été décidé ici d'utiliser les autres points les plus proches. Sur la France, seulement vingt points de la grille d'origine sont ainsi utilisés.

- Elaboration des quantiles de la prévision de chacune des cinq variables de sortie

L'étape suivante consiste à calculer les centiles des variables de sortie de chacun des neuf membres de la prévision d'ensemble et pour chacun des six mois de prévision (de février à juillet). On calcule les centiles pour chacun des vingt points de la grille ENSEMBLES. Parmi ces centiles, on inclut les valeurs minimales et maximales de chacune des variables afin de borner la distribution des prévisions et des réanalyses Safran. Ces centiles sont calculés sur la période 1960-2005.

- Calcul de l'ETP à partir des variables de sortie du modèle ARPEGE

Afin de calculer la variable ETP, on a utilisé les autres variables disponibles en sortie du GCM ainsi que la formule de Penman-Monteith quotidienne (Allen et al., 1998). On récupère ainsi les deux composantes horizontales de la vitesse du vent, le rayonnement global, le rayonnement thermique, la température du point de rosée (tous au pas de temps quotidien) et enfin la T2m (au pas de temps 6-horaire). Ne disposant pas de prévision de l'humidité relative, celle-ci est recalculée à l'aide de la température du point de rosée et de la température de surface.

On obtient ainsi 6 (mois) x 9 (membres) séries de prévisions d'ETP recalculées sur la période 1960-2005, au pas de temps quotidien, pour chacun des neuf membres. Même si cette méthode de calcul est très simplifiée, l'évolution de l'ETP est corrélée à celle de la température de surface prévue et permet d'obtenir un jeu de variables homogène. Le calcul des centiles est ensuite réalisé de la même manière que pour les autres variables.

- Elaboration des centiles des réanalyses Safran pour chacune des variables de sortie

De la même manière que pour la prévision saisonnière, on calcule les centiles des réanalyses Safran sur chacun des 199 points de la grille, pour les six mois de prévision et pour la période 1960-2005. L'ETP étant disponible sur cette grille (production Météo-France), les centiles de cette variable sont directement calculés.

- Réalisation de la correction quantile-quantile

Pour chacun des 199 sites, on effectue la correction quantile-quantile au pas de temps quotidien sur les cinq variables en sortie du modèle, d'après la formule suivante :

$$\text{var}^{corr} = \text{quantile}^{safran}(i) + (\text{var}^{ps} - \text{quantile}^{ps}(i)) \times \frac{\text{quantile}^{safran}(i+1) - \text{quantile}^{safran}(i)}{\text{quantile}^{ps}(i+1) - \text{quantile}^{ps}(i)} \quad (8)$$

avec i l'intervalle du centile, compris entre 0 et 100.

On obtient ainsi un nouveau jeu de données de prévision saisonnière descendu d'échelle (var^{corr}) et corrigé avec une méthode adaptée au point local étudié.

4. Présentation des simulations réalisées et outils de validation

4.1. Liste des simulations réalisées

Pour chacune des études qui sont présentées dans ce chapitre, deux nouveaux jeux de simulations sont produits : les jeux « PS » et « fréq ». Les jeux « réf » et « clim » restent quant à eux inchangés (présentés Sect. 2.2. et 2.5.).

4.1.1. Jeux de simulations obtenus avec des données de forçages météorologiques brutes

Le premier jeu de simulations réalisé dans ce volet de thèse consiste à intégrer les données de prévision saisonnière issues directement du projet ENSEMBLES. Aucun traitement n'est fait sur ces données (ni de méthode de descente d'échelle employées, ni de corrections statistiques du biais). Les 199 points de la grille Safran étudiés sont projetés sur la grille des GCM utilisés dans le projet et on attribue ainsi les mêmes prévisions à chacun des sites inclus dans la maille. Les données issues de la prévision saisonnière proviennent du modèle Arpege de Météo-France. Suite aux résultats obtenus dans différentes études menées dans le domaine de l'hydrologie et utilisant les prévisions à moyen terme (Rousset-Regimbeau, 2007) et à long terme (Singla, 2012), on n'utilise dans un premier temps que la prévision saisonnière des variables température à 2 m et précipitations totales. En effet, ces variables fournissent une très grande part de la prévisibilité dans le système étudié. Même si cette thèse ne concerne que le domaine de l'agronomie, on se limite dans cette première évaluation à reprendre ce protocole. Les autres variables (rayonnement global et ETP) sont issues de la climatologie Safran (décrit Sect. 2.5.). En supposant que la prévisibilité du

système décroît au fil des échéances, on n'utilise que quatre mois d'échéance fournis par la prévision saisonnière. Ainsi, les données de prévision saisonnière des mois de juin et juillet ne sont pas utilisées dans ce jeu de simulations. La climatologie Safran est utilisée pour l'ensemble des variables météorologiques nécessaires en entrée du modèle Panoramix à compter du 1^{ier} juin et jusqu'à la fin de l'année culturale. Ce jeu de simulations est ainsi appelé « **ARP3** » du fait que l'on utilise les données de prévision saisonnière pour seulement trois variables issues du modèle Arpege (températures minimale et maximale, précipitations totales) en entrée du modèle Panoramix.

4.1.2. Jeux de simulations obtenus avec la descente d'échelle méthode « simple »

Un autre jeu de simulations est réalisé de manière à évaluer l'apport de la descente d'échelle basée sur le calcul d'anomalie standardisée utilisée dans cette thèse. Elle est composée d'un système d'interpolation et d'une méthode de correction du biais faite à partir d'anomalies standardisées (Sect. 3.2.1.). Les données sont également issues du modèle Arpege. Ce second jeu de simulations « PS » est appelé « **ARP3-AS4** » par la suite (« AS4 » pour « Anomalies Standardisées » calculées sur quatre mois de données de prévision saisonnière). D'un point de vue déterministe, ce dernier sera comparé à celui réalisé avec la méthode de calcul fréquentiel (Sect. 2.3.), que l'on note « **fréq-dét** ». D'un point de vue probabiliste, le jeu de simulations « **fréq-dét** » nécessite d'être remplacée par une simulation d'ensemble. Au lieu de calculer la médiane des vingt prévisions fournies par le modèle de culture, ces dernières sont conservées comme s'il s'agissait de vingt membres issus d'une prévision d'ensemble. Ce jeu ensembliste de simulations est appelé « **fréq-ens** ».

4.1.3. Jeux de simulations obtenus avec la descente d'échelle quantile-quantile

L'évaluation suivante est portée sur un jeu de simulations utilisant la méthode de descente d'échelle quantile-quantile (Sect. 3.2.2.). Les autres éléments choisis dans le jeu de simulations précédent (modèle Arpege, échéance de quatre mois...) restent inchangés. Le but est de comparer les scores de ce jeu de simulations avec les deux précédents et ainsi évaluer la pertinence des deux méthodes de descente d'échelle. A noter que comme les sorties brutes des températures sont au pas de temps 6-horaire, la recherche des températures minimales (TN) et températures maximales (TX) quotidiennes sont recherchées selon les normes météorologiques prescrites par l'OMM, à savoir : entre 18UTC J-1 et 18UTC J pour les TN et 06UTC J et 06UTC J+1 pour les TX. Ce jeu de simulations « PS » est appelé « **ARP3-QQ4** » (« QQ » étant l'acronyme de « Quantile-Quantile »).

Afin d'évaluer l'apport de prévisibilité apportée par la prévision saisonnière aux échéances à 5 et 6 mois, la climatologie Safran, utilisée comme forçages météorologiques pendant les mois de juin et juillet, est remplacée par les données issues du modèle Arpege. La

climatologie Safran n'est utilisée ici que pour forcer nos simulations pour le mois d'août. Ce jeu de simulations « PS » est appelée « **ARP3-QQ6** ».

4.1.4. Jeux de simulations obtenus avec l'approche multi-modèles

Comme cela a été évoqué dans la partie Introduction, la prévision d'ensemble permet de représenter les différentes sources d'incertitudes du système de prévision. En n'utilisant qu'un seul modèle, seules les incertitudes associées aux conditions initiales sont considérées. L'approche multi-modèles est évaluée grâce à des nouveaux jeux de simulations « PS », permettant ainsi de tenir compte des incertitudes associées à la physique du modèle. Ils sont réalisés avec les membres des différents modèles ayant contribué au projet ENSEMBLES.

Pour évaluer uniquement l'approche multi-modèles, le premier jeu de simulations est réalisé avec la même configuration que la simulation « **ARP3-QQ6** ». La seule différence entre les deux jeux réside dans le nombre de membres : 45 membres ici (5 modèles x 9 membres chacun) contre 9. Ce jeu de simulations « PS » est appelé « **MM3-QQ6** » (MM étant l'acronyme de « Multi-Modèles »).

De la même manière que pour les simulations « modèle unique », on évalue l'apport de six mois d'échéance par rapport à quatre. Ce dernier est appelé « **MM3-QQ4** ».

On présente dans le Tableau 3 le récapitulatif de l'ensemble des jeux de simulations « PS » étudiés dans cette thèse.

Nom du jeu de simulations « PS »	GCM utilisé(s)	Descente d'échelle	Variables descendues d'échelle	Echéance
ARP3	Arpege	aucune	aucune	4 mois
ARP3-AS4	Arpege	anomalies standardisées	tn, tx, rrtot	4 mois
ARP3-QQ4	Arpege	quantile-quantile	tn, tx, rrtot	4 mois
ARP3-QQ6	Arpege	quantile-quantile	tn, tx, rrtot	6 mois
MM3-QQ4	Les 5	quantile-quantile	tn, tx, rrtot	4 mois
MM3-QQ6	Les 5	quantile-quantile	tn, tx, rrtot	6 mois

Tableau 3: Récapitulatif des différents jeux de simulations « PS » évalués. La date d'initialisation de chacun d'entre eux est fixée au 1^{er} février. On rappelle que les variables tn, tx et rrtot sont respectivement la température minimale, la température maximale et les précipitations totales.

Les jeux de simulations utilisées afin de comparer l'apport de données issues de la prévision saisonnière du temps sont récapitulés dans le Tableau 4.

Nom du jeu de simulations	Taille de l'ensemble	Forçages météorologiques	Echéance
fréq-dét	1 membre	20 précédentes années	fin de la campagne
fréq-ens	20 membres	20 précédentes années	fin de la campagne
référence	1 membre	réel année en cours	fin de la campagne

Tableau 4: Récapitulatif des jeux de simulations : réalisés avec la méthode fréquentielle et celui de référence.

4.2. Les différents scores du système d'évaluation

Les différents jeux de simulations « PS » et « fréq » venant d'être présentés sont évalués et comparés l'un par rapport à l'autre. Le jeu de simulations « PS » est également évalué en regard de celui de contrôle (jeu de simulations « clim »), afin d'estimer la part de prévisibilité apportée par la climatologie dans les simulations (voir Sect. 2.5). Pour y parvenir, différents scores statistiques sont utilisés. Ils peuvent être classés en deux catégories : les scores évaluant la part déterministe des simulations (c'est-à-dire leur médiane) et les scores évaluant le caractère ensembliste (c'est-à-dire l'ensemble des membres). En effet, pour le premier la nature déterministe de la prévision permet de la comparer directement à une référence. Dans le cas d'une prévision ensembliste, la notion de probabilité intervient et des seuils nécessitent d'être instaurés. La référence fréquemment utilisée pour élaborer ces scores est issue du jeu de simulations « réf ». Le système que l'on cherche à évaluer comporte un couple de prévisions/référence assez important, permettant de valider l'utilisation de scores statistiques. On présente ainsi les scores « déterministes » et les scores « probabilistes » utilisés pour mener l'évaluation. Dans chaque cas, l'analyse des scores obtenus pour une simulation relativement à ceux obtenus pour une autre permet d'identifier quel système de prévision est de meilleure qualité. Aucun objectif n'est donc établi concernant les scores à atteindre pour chaque simulation.

4.2.1. Les scores déterministes

Une gamme de scores déterministes est classiquement utilisée pour effectuer une première évaluation d'un système de prévisions. Il s'agit des scores de biais, de RMSE, de SDD et le coefficient de corrélation. Ici, ces scores sont calculés sur la période 1981-2005 pour trois ensembles de sites : nord, sud et l'ensemble des 199 sites (dénommé « total » par la suite).

- Le score de biais

Le premier score à regarder dans un système de prévision est celui visant à vérifier comment en moyenne les prévisions s'écartent de la référence (l'erreur moyenne), d'après la formule suivante :

$$\text{biais} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i) \quad (9)$$

où N est le nombre de cas, p_i la prévision i et o_i l'événement observé i.

Un biais parfait vaut 0. Le signe du biais permet de nous donner une information sur l'erreur de notre système de prévision : un biais positif à tendance à surestimer la variable prévue, tandis qu'un biais négatif à la sous-estimer. Ainsi, ce score permet de caractériser l'erreur systématique du modèle.

- Le « Root Mean Square Error » (ou erreur quadratique moyenne de l'erreur, noté RMSE)

Afin de déterminer quel modèle est le plus précis, on considère la variance des prévisions. Or, cela suppose que ces modèles sont non biaisés. Comme ce n'est souvent pas le cas, il faut un score capable de prendre en compte la variance et le biais. Il s'agit du RMSE, exprimé selon la formule suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2} \quad (10)$$

où N est le nombre de cas, p_i la prévision i et o_i l'événement observé i.

Il s'agit de la racine du carré moyen des erreurs ($\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}$).

En utilisant la même formule mais en remplaçant la prévision i (notée p_i dans l'éq. (10)) par la moyenne des membres, on obtient l'erreur quadratique moyenne de l'ensemble, notée EQM par la suite.

- L'écart-type des différences (« Standard Deviation of Differences », noté SDD)

L'écart-type des différences, noté SDD par la suite, est une représentation du RMSE sans la contribution du biais. Comme le biais peut être retranché au système de prévision, il est important de ne prendre en compte que la part de l'erreur du modèle dès que l'on cherche à comparer la qualité de deux systèmes de prévision. Il donne une indication sur la dispersion du modèle.

Plus le SDD est proche de 0, meilleure est la prévision du modèle. Ce score est calculé selon la formule suivante :

$$SDD = \sqrt{RMSE^2 - \text{biais}^2} \quad (11)$$

- Le coefficient de corrélation (noté r)

Afin de vérifier la relation entre les prévisions que l'on évalue et la référence, afin notamment de voir si la variabilité est conservée, on utilise le coefficient de corrélation, selon la formule suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p}) \cdot (o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2}} \quad (12)$$

où p_i est la prévision i , o_i l'événement observé i , $\bar{p}$ la moyenne de nos prévisions et $\bar{o}$ la moyenne de la référence.

De manière générale, r varie entre -1 (les deux jeux de données sont anti-corrélés) et 1 (les deux jeux de données sont parfaitement corrélés). Lorsque $r = 0$, il n'y a aucun lien entre les deux jeux de données.

On calcule ensuite la p-value afin de déterminer la significativité de la corrélation obtenue et ainsi de caractériser la relation entre nos prévisions et la référence.

Ensuite, on souhaite caractériser l'ensemble des prévisions avec des scores adaptés. On considère de façon généraliste le comportement de l'ensemble avec le score de dispersion, noté S .

- La dispersion de l'ensemble (notée S)

La dispersion de l'ensemble permet de caractériser les membres de la prévision dans leur intégralité. Le but est de calculer l'état moyen des membres de l'ensemble par rapport à leur moyenne, selon la formule suivante :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (13)$$

où n est le nombre de membres de l'ensemble, $\bar{x}$ la moyenne et x_k la prévision du membre k.

Ce score est à comparer avec l'EQM. La comparaison des ordres de grandeurs de chacun des scores permet de caractériser la taille de l'ensemble de notre système de prévision. Ainsi, s'ils sont identiques, l'ensemble a une dispersion moyenne calibrée par rapport à l'écart moyen entre la moyenne de l'ensemble et la référence. Si l'ordre de grandeur de la dispersion est très supérieur à celui de l'EQM, alors l'ensemble est sur-dispersif et on perd alors l'information apportée par la moyenne de l'ensemble. Dans un tel cas, la prévision n'est plus pertinente. Dans le cas inverse (ordre de grandeur de la dispersion nettement plus faible que celui de l'EQM), on minimise le champ des possibles (toute l'incertitude représentée n'est pas prise en compte) et donc la probabilité que l'observation soit incluse dans la prévision sera trop faible.

4.2.2. Les scores probabilistes

Afin d'évaluer la qualité de l'ensemble du système de prévision (multi-membres), il est indispensable d'utiliser une autre catégorie de scores, rattachée à un pourcentage de membres ayant prévu le même événement. Ce pourcentage peut alors être exprimé en probabilité d'occurrence de l'événement prévu. Ainsi, des scores probabilistes sont employés pour évaluer la qualité du système de prévision d'ensemble. Pour définir si un événement a lieu ou non, ces scores reposent sur la mise en place d'une valeur seuil, de façon à analyser l'occurrence d'un événement binaire : soit il a lieu en franchissant le seuil, soit non. Ce seuil permet ensuite de classer les prévisions en catégories définies selon leur position dans la distribution des prévisions. Cette répartition des prévisions en classe est illustrée sur la Figure 55. Dans ce volet, deux seuils sont étudiés : le premier correspond au seuil permettant de classer la distribution des prévisions en trois classes équitables, appelées « terciles ». Le second permet d'identifier deux classes d'événements appelées « extrêmes ». La capacité du système de prévisions à représenter les événements classés dans la catégorie « normale » ne nécessite pas d'être évaluée. En effet, en agriculture, ce sont surtout les événements « atypiques » (températures excessives, températures négatives, précipitations intenses, sécheresses...) qui doivent être correctement prévus.

Les scores probabilistes permettent d'évaluer la qualité du système d'ensemble, mais peuvent également être utilisés pour comparer la capacité de deux systèmes de prévisions à anticiper l'occurrence d'une catégorie d'événement. Les scores probabilistes utilisés dans cette thèse sont les suivants : le diagramme de Talagrand, le Brier Score (aussi appelé « BS » par la suite) et son « Skill Score » associé (« BSS » par la suite), la fiabilité (extraite de la décomposition du BS) et enfin les courbes « Receiver Operating Characteristic » (ROC par la suite). Chacun de ces scores sera utilisé pour évaluer la capacité du système à prévoir une catégorie de prévisions parmi les suivantes : tercile inférieur, tercile supérieur, extrême inférieur et extrême supérieur.

- Diagramme de Talagrand (ou histogramme de rang)

Le diagramme de Talagrand est un histogramme qui a pour but d'évaluer les caractéristiques de l'ensemble des membres de la prévision (Hamill, 2001). Ce diagramme permet de représenter graphiquement la capacité de l'ensemble à prévoir un événement classé dans une catégorie de prévisions. Par exemple, on peut mettre en évidence un défaut de dispersion (sous-dispersif, sur-dispersif) ou de biais (surestimant, sous-estimant). La réalisation d'un diagramme de Talagrand s'opère de la façon suivante : pour chaque couple prévision/observation, on range l'observation parmi les classes formées par les membres de l'ensemble triés par ordre croissant (une classe est appelée « rang de la vérification »). Si l'on note n le nombre de membres dans l'ensemble, on considère $n+1$ classes. Ce procédé est répété pour tous les couples prévision/observation.

Un diagramme plat, représenté ici sur la Figure 55, correspond à une distribution homogène des prévisions dans chaque rang : l'ensemble est parfaitement réparti. C'est ce que l'on souhaite obtenir pour un système de prévision d'ensemble : il n'y a ni biais, ni de défaut de dispersion de l'ensemble.

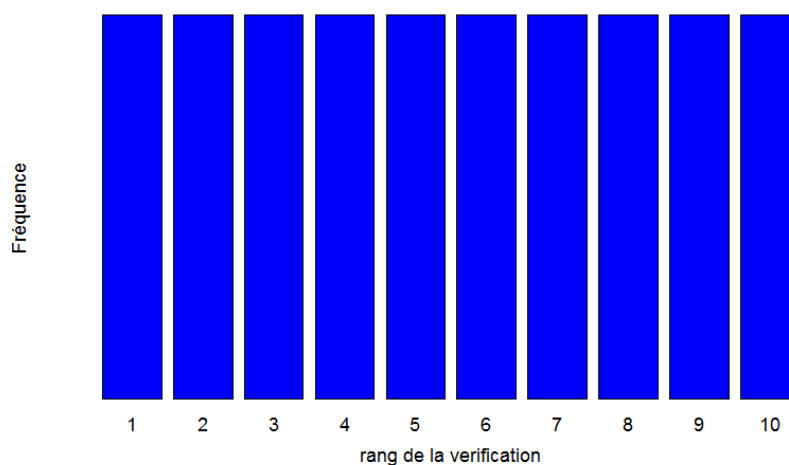


Figure 55: Diagramme de Talagrand plat illustrant une dispersion d'ensemble parfaite. Dans cet exemple, le nombre de membres de l'ensemble est de neuf. Ainsi, on observe dix classes ou « rang de la vérification ».

Pour un diagramme en U, les observations occupent les rangs extrêmes de la vérification : l'ensemble manque alors de dispersion, il est sous-dispersif (Figure 56, à gauche). A l'inverse, un diagramme en « U inversé » verra une surpopulation des rangs médians : les rangs extrêmes ayant une fréquence d'observation quasi nulle, l'ensemble est trop dispersif ou sur-dispersif (Figure 56, à droite).

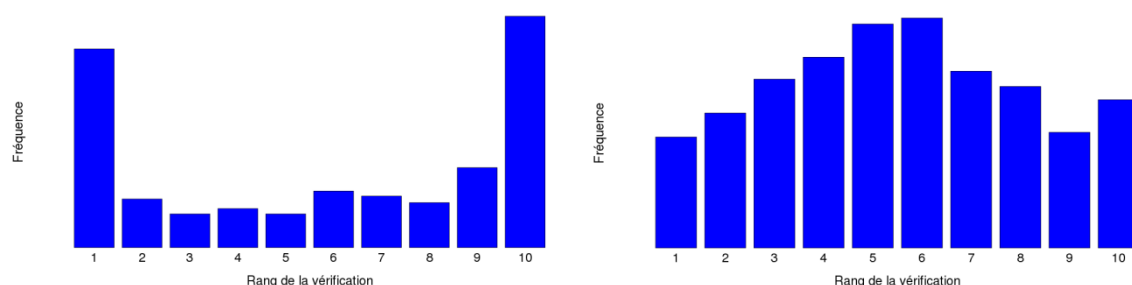


Figure 56: Illustrations de diagrammes de Talagrand pour un ensemble sous-dispersif (à gauche) et sur-dispersif (à droite), toujours avec un ensemble de dix membres.

Un biais positif (négatif) conduit à une surpopulation des rangs extrêmes à gauche (droite) du diagramme (forme en L (J)). Une illustration de ces deux diagrammes est proposée Figure 57.

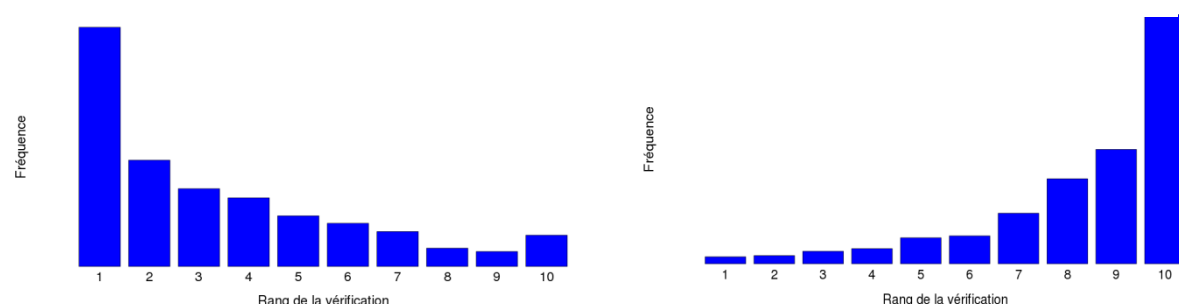


Figure 57: Illustrations de diagrammes de Talagrand pour un ensemble surestimant (à gauche) et sous-estimant (à droite), toujours avec un ensemble de dix membres.

- Brier Score et son « Skill Score » associé

Le Brier Score (noté BS), ou score de Brier, permet de « qualifier le comportement d'un système de prévision face à un événement binaire de type dépassement (ou non) de seuil » (Brier, 1950). Ce score représente l'erreur quadratique moyenne entre la prévision de probabilité d'un événement y et les observations binaires correspondantes, notées o . On utilise pour cela l'observation :

- $o = 1$ si l'événement a eu lieu ;
- $o = 0$ sinon.

Pour calculer ce score, on utilise n paires de prévision/observation, selon la formule suivante :

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad (14)$$

où y_k est la probabilité avec laquelle l'événement k a été prévu. Par exemple, si 6 membres sur 10 prévoient un événement supérieur à la normale (normale définie selon un seuil de température et calculée sur l'ensemble des prévisions obtenues), alors on aura une probabilité de 60% que l'événement « supérieure à la normale » se réalise. Le coefficient y_k vaudra donc 0,6.

Le score de Brier est compris entre 0 et 1, 0 étant le meilleur score et 1 le moins bon. En effet, pour chaque événement prévu, on souhaite que 100% des membres prévoient l'événement lorsqu'il est réellement observé, donc y_k et o_k prennent la valeur 1. Inversement, on souhaite que 0% des membres prévoit l'événement lorsqu'il n'est pas observé, donc y_k et o_k prennent la valeur 0. Dans ces deux cas de figure, la différence entre y_k et o_k est nulle et le BS l'est également. Ce score est calculé pour l'ensemble des n couples prévision/observation dont on dispose. Dans cette thèse, ce score sera également décliné par site ou regroupé par région (nord et sud). Le score de Brier peut se décomposer en trois termes : la fiabilité, la résolution et l'incertitude, selon la formule suivante (Murphy, 1973) :

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (y_i - \bar{o}_i)^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^I N_i (\bar{o}_i - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o}) \quad (15)$$

avec I le nombre de catégories des probabilités prévues (égal à n+1 membres), N_i le nombre de fois où la probabilité d'occurrence y_i pour l'événement considéré est utilisée parmi ces n paires prévision/observation sélectionnées pour la vérification. Enfin, $\bar{o}$ est la fréquence globale d'occurrence. Le premier terme est la fiabilité, le second la résolution et le dernier l'incertitude.

Afin de comparer directement nos deux systèmes de prévision d'ensemble « PS » et « fréq », on utilise le BSS, qui tient compte de chacun des BS calculés pour un système de prévision, obtenu selon la formule suivante :

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{réf}} \quad (16)$$

où $BS_{réf}$ est le score de Brier pour une expérience de référence. Dans cette thèse, BS est celui calculé pour le système « PS » et $BS_{réf}$ est celui calculé pour le système « fréq ».

Le BSS est compris entre $-\infty$ et 1. Cette fois, plus le score est élevé, meilleur est notre système de prévision par rapport à celui de référence. Ce score est très utile dans notre système d'évaluation car il permet de comparer directement les deux jeux de prévisions d'ensemble de notre étude (« PS » et « fréq »). Un BSS positif signifie dans notre cas que le BS issu de la prévision saisonnière (au numérateur dans l'équation (16)) est meilleur (plus proche de 0) que celui issu de la méthode fréquentielle (au dénominateur dans l'équation (16)).

- Fiabilité de l'ensemble

La fiabilité est définie comme étant la moyenne pondérée des différences au carré entre les probabilités prévues et les fréquences observées dans les différentes catégories. Ce terme indique la capacité du système à prévoir des probabilités justes. La fiabilité parfaite vaut zéro. C'est ce terme qui nous intéresse par la suite. Les autres termes de la décomposition du score de Brier présentés dans l'équation (15) (résolution, incertitude) ne sont pas étudiés, on ne les détaille pas.

De cette manière, on peut constituer le diagramme de fiabilité (Wilks, 1995) avec en abscisse les probabilités prévues (y_i) et en ordonnée les fréquences relatives observées de l'événement (o_i), pour chacune des catégories I (Figure 58). I étant la probabilité d'occurrence de l'événement définie par le ratio de membres prévoyant l'événement dans la catégorie de prévisions que l'on cherche à évaluer sur le nombre total de membres. Une fiabilité parfaite est illustrée par une courbe située sur l'axe $y=x$. Par exemple, si notre système de prévision définit une probabilité d'occurrence de 60% pour un événement qui a lieu environ 60% des cas ($I=0,6$), alors le point sur la courbe de fiabilité sera sur la diagonale. Si pour chaque valeur I la fréquence de l'événement observé est identique, notre système de prévision est fiable et la courbe est alors confondue avec la diagonale. On complète ce graphe par un histogramme des fréquences d'utilisation de chaque valeur de probabilité y_i dans l'échantillon global de vérification. Une absence de fiabilité pour certaines valeurs de I peut être expliquée par un manque de prévisions dans certains cas. De cette façon, il est possible de vérifier si un problème d'échantillonnage (nombre insuffisant de prévisions pour la probabilité I donnée) peut expliquer le manque de fiabilité observée à cette probabilité I .

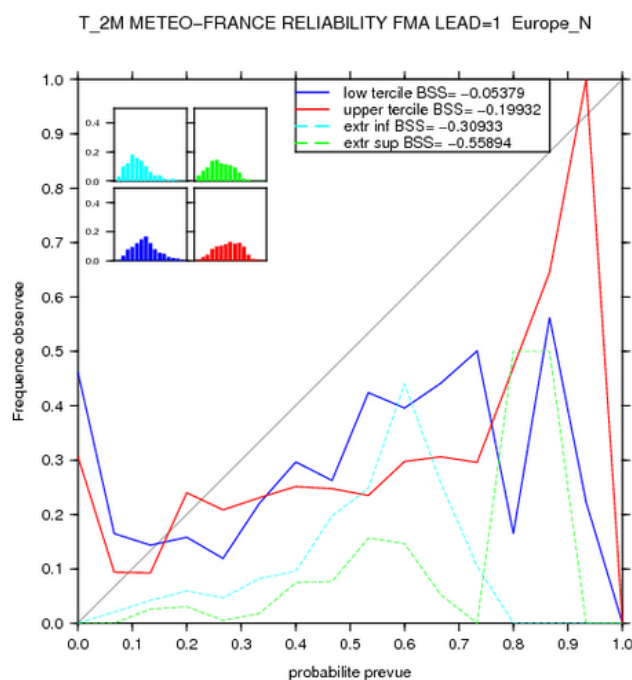


Figure 58: Illustration d'un diagramme de fiabilité pour quatre seuils, obtenu dans le cadre de l'évaluation des scores de la prévision saisonnière issue du modèle Arpège (Météo-France). Températures à 2 m prévues pour la période février-mars-avril sur l'Europe du nord. Les scores de BSS (référence : climatologie) sont également mentionnés pour les quatre seuils (Météo-France ; <http://elaboration.seasonal.meteo.fr/fr/content/scores-arpège>).

- Courbe ROC (« Receiver Operating Characteristic »)

La courbe ROC synthétise l'évolution simultanée de deux scores : le taux de fausses alarmes en fonction du taux de réussite. Ces scores sont obtenus à partir d'une table de contingence décrite dans le Tableau 5 pour chacun des pourcentages minimum de membres (noté P) prévoyant l'événement dans une catégorie de prévisions :

Événement	Observé	Non observé
Prévu	a	b
Non prévu	c	d

Tableau 5: Table de contingence réunissant les quatre termes nécessaires au calcul des scores probabiliste établie pour un pourcentage de membres minimum ayant prévu l'événement dans une catégorie de prévisions.

Cette table de contingence récapitule l'ensemble des cas possibles lors d'une prévision d'un événement et permet de vérifier la véracité de son occurrence ou non. Dans le cas d'une étude en prévision d'ensemble, on considère qu'une bonne prévision consiste à atteindre un taux P, pourcentage minimum de membres devant prévoir cet événement. On calcule de cette

façon chacun des termes de la table de contingence pour l'ensemble des taux possibles P. A partir de ces quatre termes (a, b, c et d) exprimant chacun un cas de figure dans le Tableau 5, on définit ainsi quatre scores :

- le taux de bonnes prévisions est le nombre de fois parmi tous les événements où apparaissent à la fois les événements observés et prévus et les événements non observés et non prévus :

$$\frac{a + d}{a + b + c + d}$$

- le taux de réussite est le nombre de fois où apparaissent parmi les événements observés, ceux qui ont été prévus :

$$\frac{a}{a + c}$$

- le taux de non prévision consiste à compter parmi les événements observés ceux qui n'ont pas été prévus :

$$\frac{c}{a + c}$$

Le taux de fausses alarmes, qui est, sur tous les cas non observé, le nombre de fois où ils ont été prévus à tort :

$$\frac{b}{b + d}$$

Afin d'obtenir les courbes ROC, on trace les couples « taux de réussite » en fonction du « taux de fausses alarmes » obtenus pour différentes valeurs de P. On obtient de cette manière les courbes illustrées sur la Figure 59.

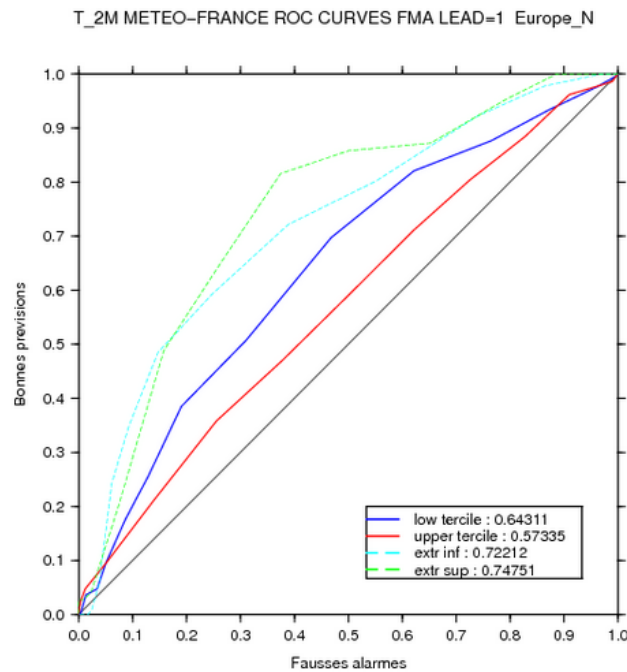


Figure 59: Exemple de courbes ROC pour quatre seuils obtenus dans le cadre de l'évaluation des scores de la prévision saisonnière issue du modèle Arpège (Météo-France). Températures à 2 m prévues pour la période février-mars-avril sur l'Europe du nord. Dans certains cas, comme c'est représenté ici, la courbe ROC peut être tracée avec le taux de bonnes prévisions à la place du taux de réussite. L'aire sous la courbe est également mentionnée pour chacune des catégories de prévisions (en bas à droite du graphe) (Météo-France ; <http://elaboration.seasonal.meteo.fr/fr/content/scores-arpège>).

Pour réaliser la courbe ROC, dix pourcentages de membres P ont été utilisés (de 0% à 100% par pas d'environ 11%), formant chacun un point sur le graphe et qui ont ensuite été reliés pour former la courbe. Par exemple, sur la Figure 59, pour la catégorie de prévisions tercile inférieur (en bleu), l'événement prévu avec un pourcentage de membres minimum égal à 44% a un taux de bonnes prévisions de 0,38 pour un taux de fausses alarmes de 0,2. Ainsi, plus la courbe est proche de l'angle haut gauche (c'est-à-dire un taux de bonnes prévisions égal à 1 et taux de fausses alarmes égal à 0), plus l'ensemble est de bonne qualité, jusqu'à la diagonale en deçà de laquelle l'ensemble est jugé moins performant que ce que l'on pourrait obtenir avec une prévision aléatoire. L'aire sous la courbe (en bas à droite du graphe) est également un indicateur de qualité qui permet de comparer directement l'information issue de la courbe ROC. Avec ce graphe, il est possible de comparer notre ensemble à une prévision de référence. Dans cette thèse, on n'utilisera que le taux de succès tel qu'il est défini plus haut, mais cela ne change en rien l'interprétation des graphes.

5. Résultats

5.1. Analyse du comportement du jeu de simulations de référence

Avant d'évaluer les différents jeux de simulations, il est important de regarder le comportement des différentes variables agro-météorologiques que l'on cherche à prévoir. On examine dans un premier temps les prévisions obtenues avec le jeu de simulation « réf ». L'hypothèse forte faite dans cette thèse est que le modèle Panoramix reproduit correctement les observations, dans le sens où le jeu de simulations de référence n'est pas confronté à des données observées. L'évaluation de la capacité du modèle à correctement reproduire les variables agro-météorologiques, d'un point de vue physique du modèle, n'est pas faite. La confrontation des résultats avec des données observées n'aurait pas permis de distinguer directement l'apport de la prévision saisonnière. En effet, la capacité du modèle à simuler la croissance du blé tendre aurait également été un facteur de variabilité des résultats obtenus. Le but étant de connaître les caractéristiques spatiales des prévisions réalisées, comme la distribution des valeurs sur l'ensemble des 199 sites étudiés, ainsi que leur variabilité interannuelle sur la période 1981-2005. L'interprétation des scores obtenus avec les différents jeux de simulations « PS » et « fréq » sera ainsi faite au regard des graphes qui vont être présentés dans cette partie.

- Les stades phénologiques

Pour chacun des sites étudiés, on détermine la période pour laquelle la date médiane (calculée sur l'ensemble des prévisions des 25 années) est observée pour chacun des six stades phénologiques de cette étude : les stades « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte » (Figure 60).

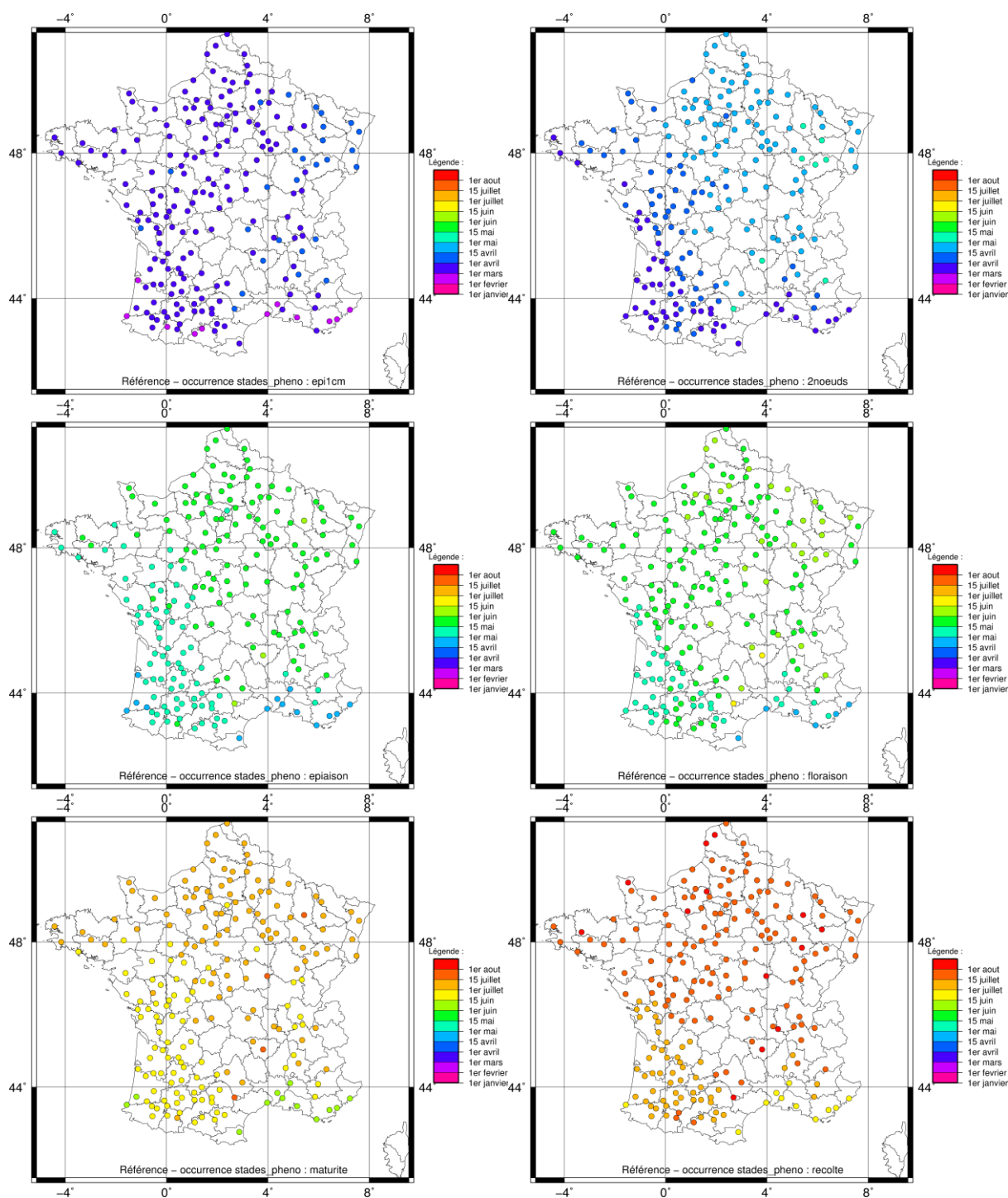


Figure 60: Cartes représentant les dates médianes des six stades phénologiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations « réf ». En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentés les stades : « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte ». En rose, violet et bleu marine sont représentés respectivement les mois de janvier, février et mars. Chacune des autres couleurs représentent une période de quinze jours, de la première quinzaine d'avril jusqu'à la première quinzaine d'août. Plus les couleurs sont « chaudes », plus les dates sont tardives.

De manière générale, les dates médianes les plus précoces sont observées dans le sud, indépendamment du stade phénologique étudié. Les premières sont aperçues sur le pourtour méditerranéen, puis dans le sud-ouest et enfin dans le nord de la France. L'écart moyen entre les dates médianes observées entre les sites du nord et ceux du sud est d'environ un mois à un mois et demi. Par exemple, dans le sud, le stade « épi à 1 cm » a lieu durant les mois de février et mars, alors que dans le nord celui-ci est observé entre les mois de mars et avril. La date médiane du stade « récolte » est située dans le sud entre fin juin et début juillet, alors que dans le nord, entre juillet et août. A cause de ce retard observé, les forçages météorologiques issus des données de prévision saisonnière auront une influence plus longue lorsqu'il s'agira de simuler un site au nord plutôt qu'au sud, les scores pouvant différer en conséquence.

Pour avoir une information sur la distribution des dates médianes observées avec le jeu de simulations de référence, on présente ici les boîtes à moustaches pour les dates médianes de chacun des stades phénologiques étudiés (Figure 61).

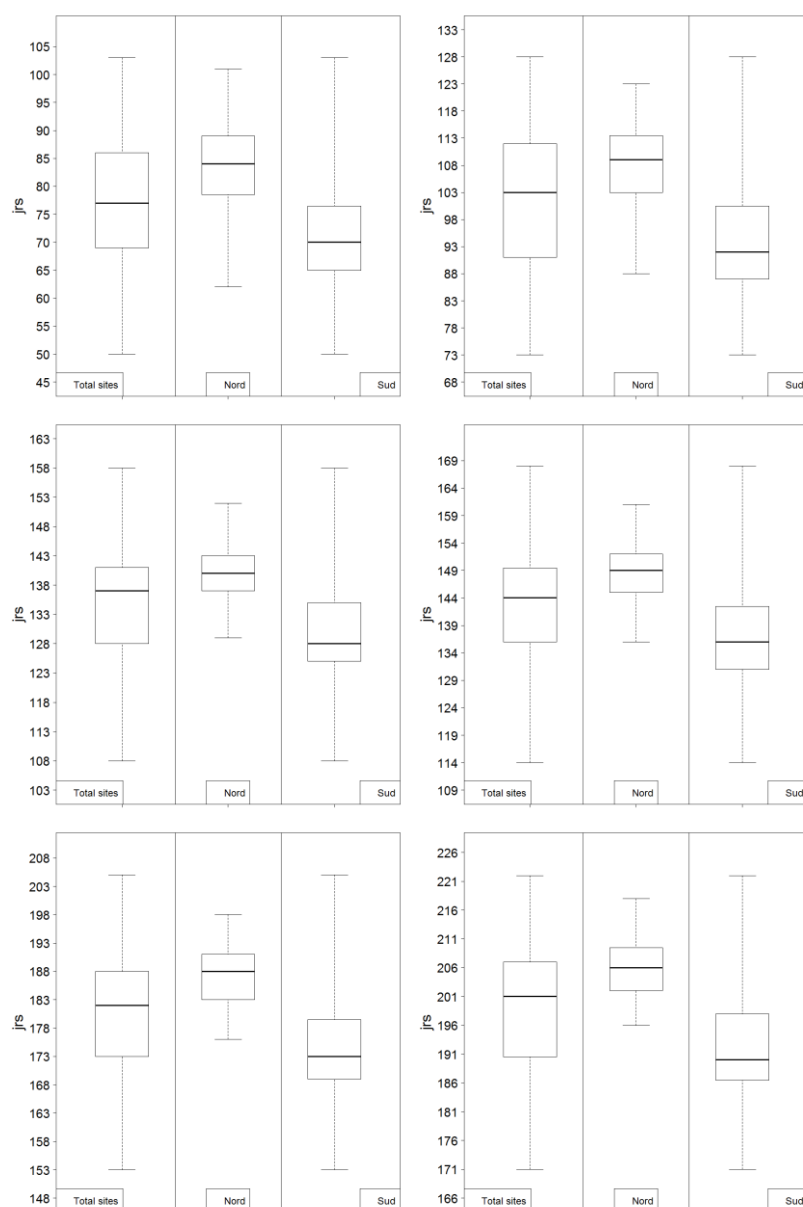


Figure 61: Boîtes à moustaches des dates médianes de chacun des six stades phénologiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence et pour l'ensemble des sites. En ordonnées, les jours calendaires. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentés les stades : « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte ». Les extrémités des « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales de la distribution.

Concernant l'occurrence des stades phénologiques, on retrouve de manière générale sur la Figure 61 les dates théoriques présentées Sect. 1.3.1. Les dates médianes sont plus précoces dans le sud que dans le nord, en respect du gradient thermique zonal en France. L'écart entre les dates médianes minimales et maximales est d'environ deux mois, ce qui traduit une forte variabilité de l'occurrence d'un stade phénologique. Cet écart est bien plus important dans la région sud que dans la région nord. Les sites en altitude présents dans la région sud peuvent expliquer cet important écart. Sur l'ensemble des stades phénologiques, l'écart moyen entre le

Q25 et le Q75 de la date de stade considérée est d'environ 15 jours. Il est en moyenne plus court dans le nord, d'environ 5 à 10 jours.

On examine à présent la variabilité temporelle sur la période 1981-2005. On peut ainsi voir les années où l'occurrence d'un stade phénologique est en avance et celles où elle est en retard (Figure 62).

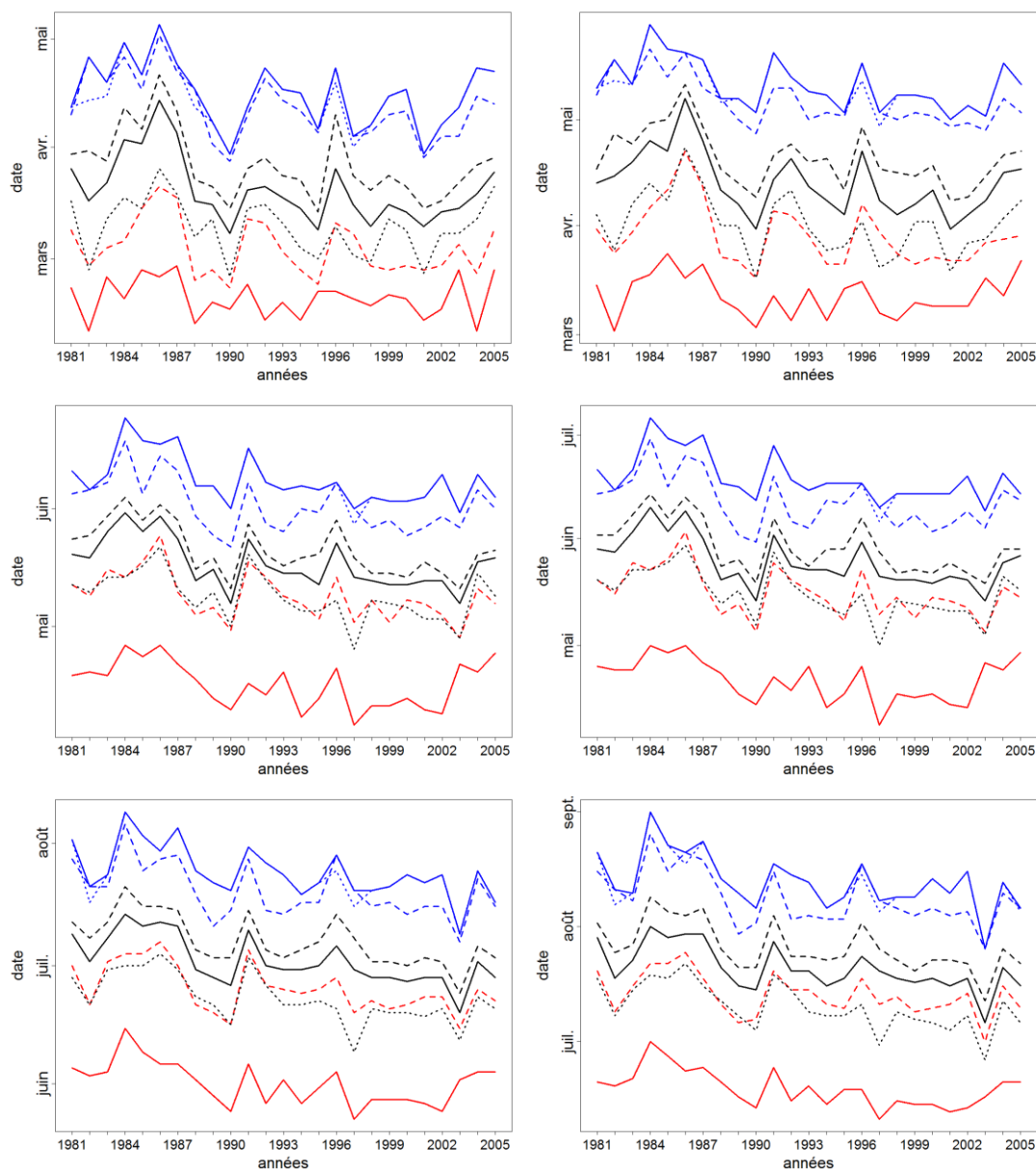


Figure 62: Évolution temporelle des dates médianes des six stades phénologiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence pour l'ensemble des sites. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentés les stades : « épi à 1 cm », « 2 nœuds », « épiaison », « floraison », « maturité » et « récolte ». La date médiane est en noir, la date minimale en rouge et la date maximale en bleu. La médiane de l'ensemble des sites est représentée en trait plein, celle de la région nord en tirets et celle de la région sud en pointillés.

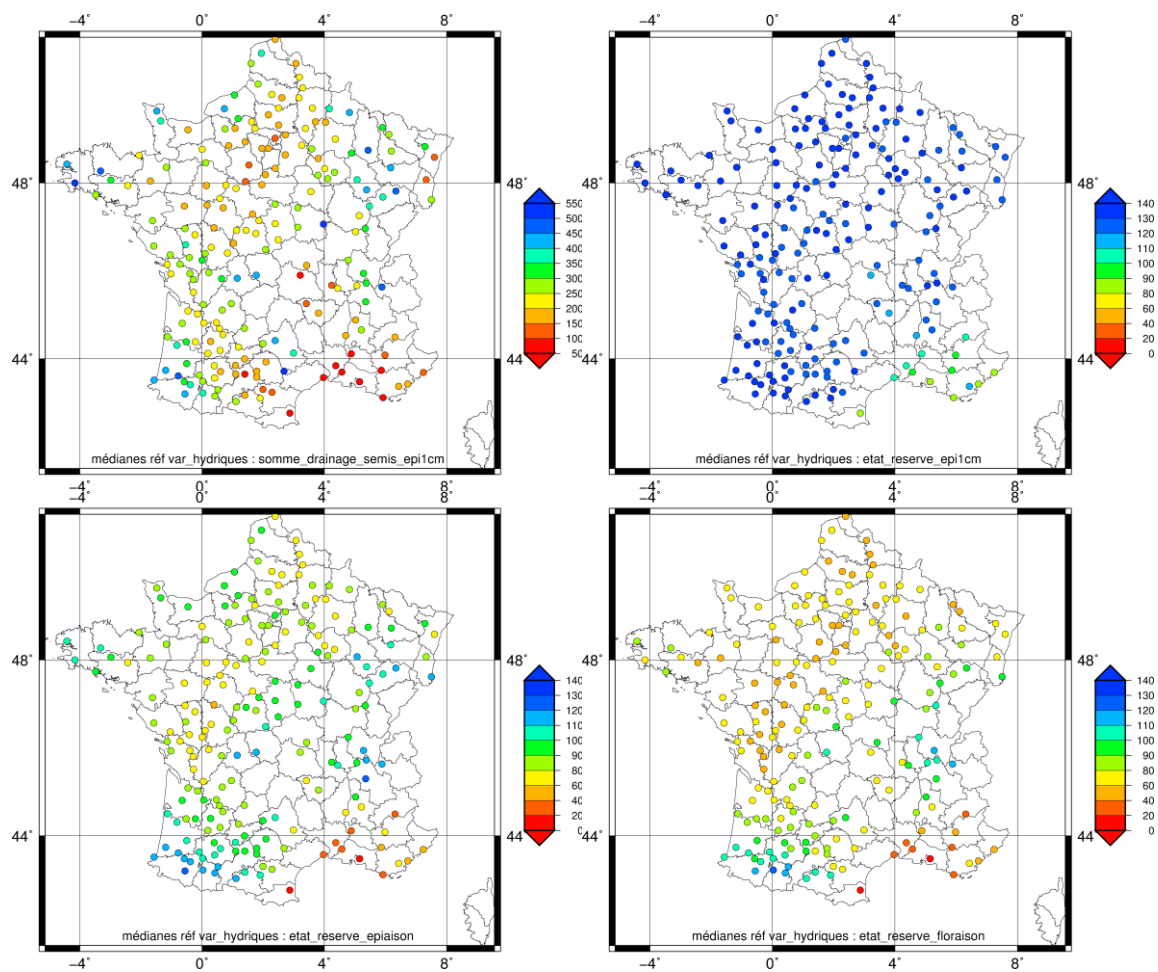
On peut observer sur la Figure 62 que la variabilité interannuelle des dates médianes est élevée. Sur l'ensemble des stades phénologiques, une tendance négative est observée sur la période 1981-2005. Les dates médianes sont obtenues de plus en plus tôt dans l'année, traduisant une augmentation de la température moyenne quotidienne au fil des campagnes. On peut également noter que la date médiane des sites au nord est chaque année plus tardive que celle calculée sur l'ensemble des sites, de la même façon que cette dernière l'est pour les sites au sud. On observe de nouveau le gradient nord-sud sur l'ensemble de la période 1981-2005. Un écart de deux mois environ est observé entre les occurrences minimales et maximales des différents stades phénologiques. Cet écart tend à se réduire légèrement vers la fin de la période. Enfin, on peut observer les années pour lesquelles une importante anomalie climatique a pu être observée :

- un retard des dates médianes est relevé pour les années 1984, 1987, 1991 et 1996 (déficit en degré-jours).
- une avance pour les années 1990, 1997 et 2003 (excès en degré-jours, bien plus marquée pour les derniers stades phénologiques).

En conclusion, on peut retenir que la variabilité des dates médianes obtenues pour chacun des stades phénologiques est élevée, notamment dans le sud. Elle reste plus limitée dans le nord. La variabilité spatiale décroît au fil du temps. Le jeu de simulations de référence met en évidence les années atypiques observées sur les vingt-cinq années étudiées.

- Les variables hydriques

A présent, on s'intéresse à la distribution des valeurs obtenues pour les différentes variables hydriques étudiées (Figure 63).



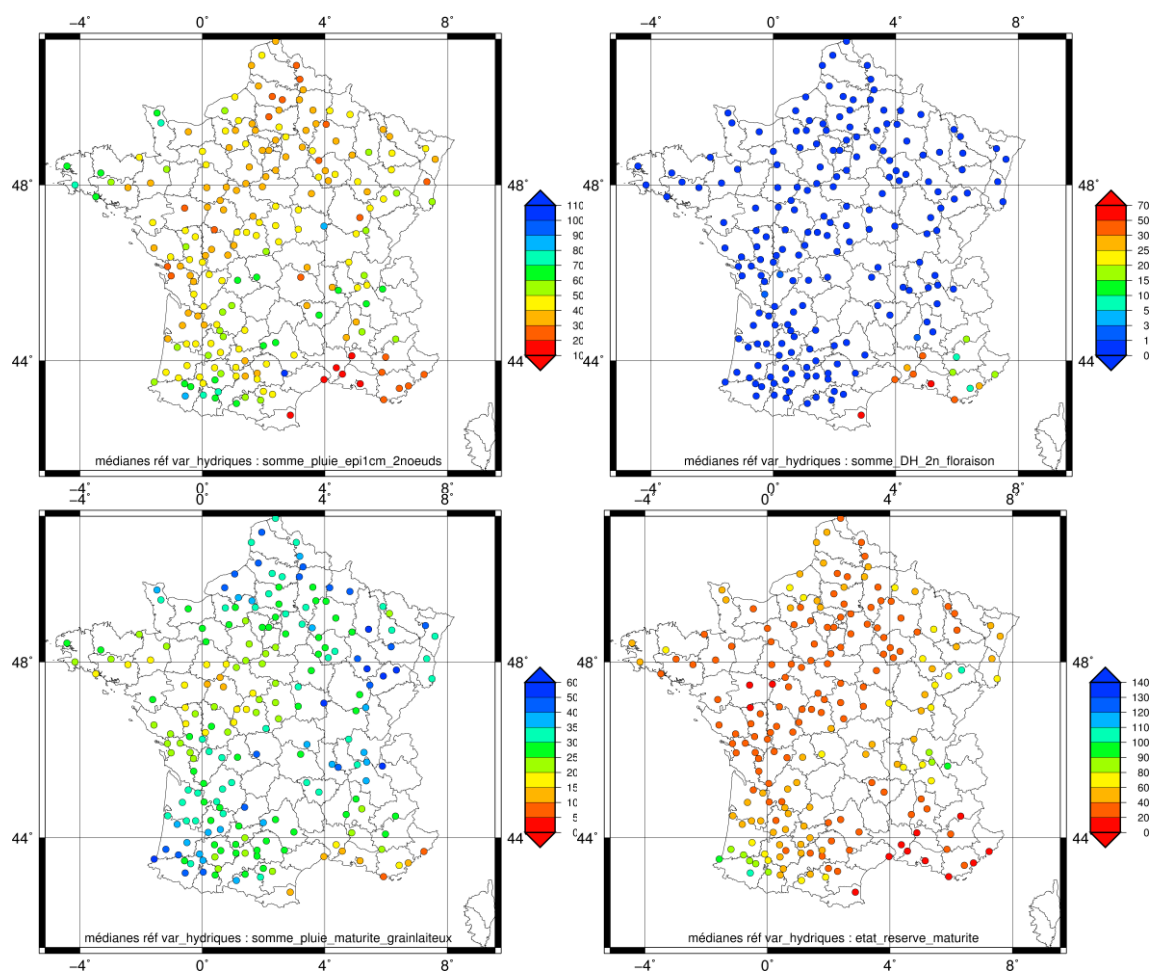


Figure 63: Cartes illustrant les valeurs médianes des variables hydriques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épiaison », « état de la réserve utile au stade floraison », « état de la réserve utile au stade maturité », « somme des pluies entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ». Plus la couleur de la légende va vers les tons chauds, plus la quantité d'eau est faible. A noter que pour la variable « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison », l'ordre des couleurs de la légende est inversé en respect de l'orientation des valeurs de cette variable.

La distribution des valeurs obtenues avec le jeu de simulations « réf » est différente d'une variable hydrique à l'autre (Figure 63). Par exemple, la gamme de valeurs est très différente entre les variables « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », qui est de 0 à 70 mm pour la première et de 50 à 550 mm pour la seconde. Cela s'explique par le fait que les périodes entre les deux stades phénologiques des deux variables étudiées sont différentes. Ainsi, le cumul sera plus important sur une période de quelques mois par rapport à celui observé sur seulement quelques jours. De manière générale, les valeurs obtenues sont différentes selon les sites, notamment ceux situés autour de la Méditerranée (plus sèches). Par exemple, la médiane

de la variable « état de la réserve hydrique au stade épiaison » atteint un niveau très bas dans cette région. Cela signifie que dès ce stade, la réserve hydrique est nulle au moins une année sur deux. Par la suite, il faudra analyser les résultats en tenant compte des caractéristiques qui viennent d'être décrites.

On examine à présent la distribution des valeurs médianes obtenues pour les variables hydriques (Figure 64).

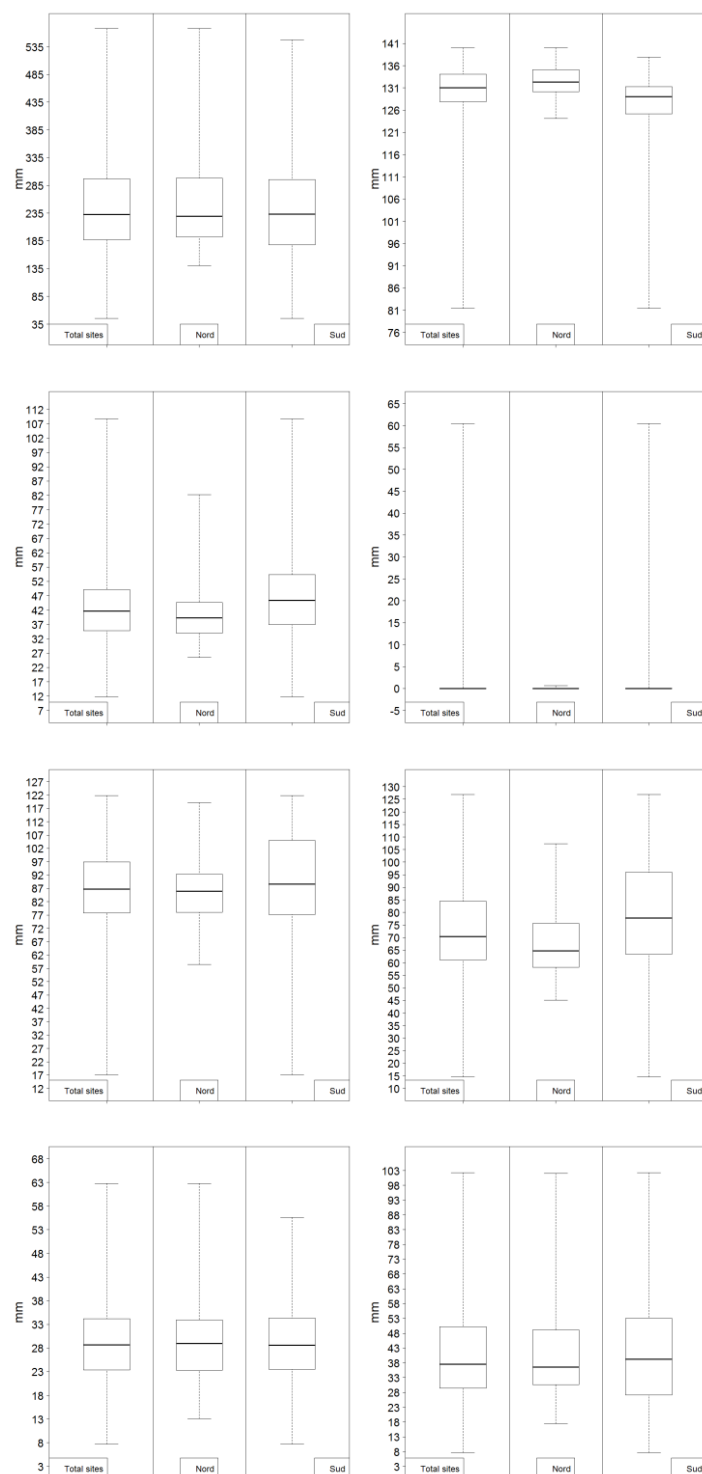


Figure 64: Boîtes à moustaches des valeurs médianes des prévisions des huit différentes variables hydriques sur la période 1981-2005, obtenus avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épiaison », « état de la réserve utile au stade floraison », « état de la réserve utile au stade maturité », « somme des pluies entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ». Les extrémités des « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales de la distribution.

On retrouve dans les graphes présentés sur la Figure 64 une distribution des valeurs médianes différente d'une variable à l'autre. De manière générale, la variabilité spatiale est moins marquée pour les sites au nord, comme cela a été montré pour les stades phénologiques. La médiane de la variable « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison » est quasiment nulle sur l'ensemble des sites. L'étude de cette variable est également intéressante d'un point de vue distribution spatiale (sur certains sites du sud, les valeurs peuvent atteindre 60 mm). D'autre part, les écarts entre les valeurs minimales et maximales sont très importants. Nous allons maintenant vérifier si la variabilité temporelle est également marquée (Figure 65).

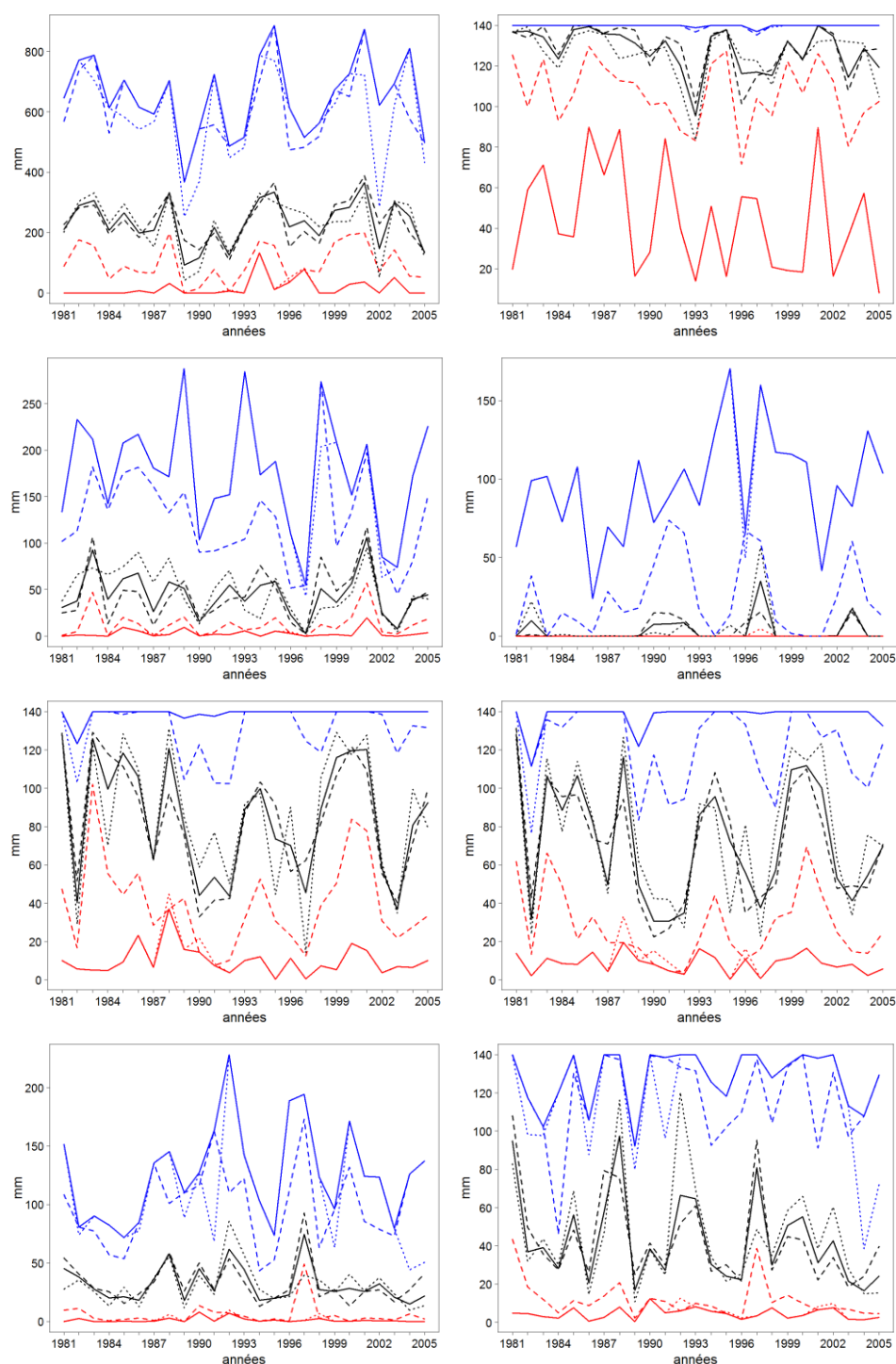


Figure 65: Évolution temporelle des variables hydriques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm », « état de la réserve utile au stade épiaison », « état de la réserve utile au stade floraison », « état de la réserve utile au stade maturité », « somme des pluies entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des pluies entre les stades maturité et grain-laiteux » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ». La médiane de l'ensemble des sites est représentée en trait plein, celle de la région nord en tirets, en pointillés pour la région sud. La valeur médiane est en noir, la valeur minimale en rouge et la valeur maximale en bleu.

On observe sur la Figure 65 que les variables hydriques présentent aussi une variabilité temporelle très marquée. Les écarts d'une année sur l'autre sont très grands, pouvant parfois passer du simple au double. Concernant l'état de la réserve hydrique pour les trois premiers stades phénologiques, les valeurs maximales sont constantes et proches de la réserve utile (soit 140 mm). Or, la variabilité est également très grande pour les valeurs médianes et minimales. Il n'y a cependant pas de tendance marquée sur la période 1981-2005 pour aucune des variables hydriques étudiées. Sur certains graphes de la Figure 65, les années 1982, 1990 à 1992, 1997 et 2003 présentent des signes d'anomalie climatique marquée.

- Variables thermiques

On analyse maintenant la distribution des valeurs obtenues pour les variables thermiques (Figure 66).

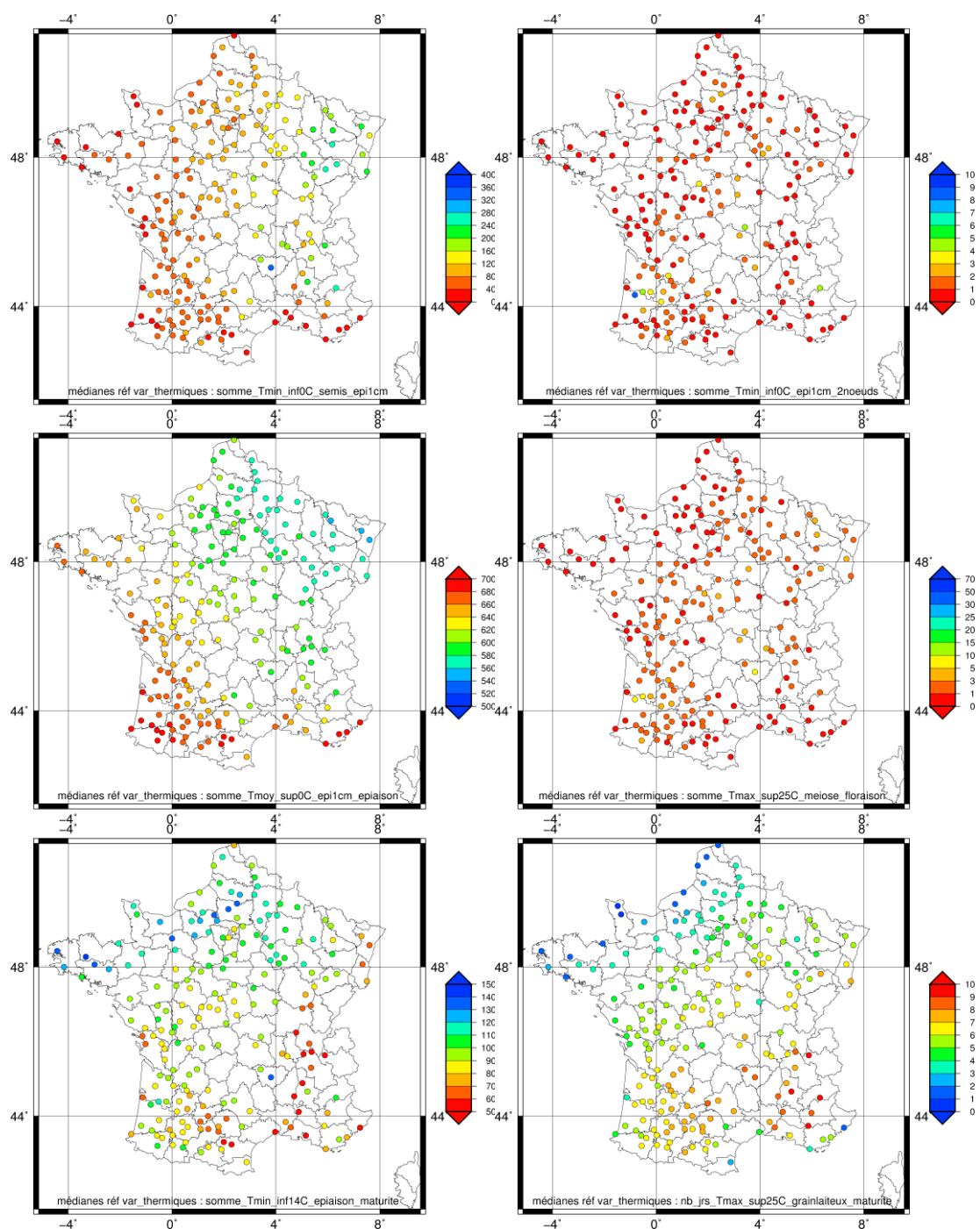


Figure 66: Cartes illustrant les valeurs médianes des variables thermiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations « réf ». En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison », « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C ». Plus le cumul de températures supérieures à un seuil est élevé, plus les couleurs de la légende vont vers des tons chauds (également pour le cumul de jours « échaudants »). A l'inverse, lorsque le cumul de températures inférieures à un seuil est élevé, les couleurs sont froides. Les sommes sont calculées à partir de températures absolues.

Selon la variable étudiée, on retrouve un gradient thermique orienté différemment (Figure 66). Il présente un axe est-ouest pour les variables « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm » et « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison ». Les valeurs les plus élevées sont retrouvées à l'ouest de la France et sur le pourtour méditerranéen. Un gradient sud-ouest/nord-est est observé pour la variable « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C entre les stades grain-laiteux et maturité ». Les sites accumulant le plus de degré-jours supérieurs à un seuil sont naturellement retrouvés dans le sud et inversement. Cependant, cette variabilité spatiale ne se retrouve pas sur tous les sites. En particulier, ceux en altitude semblent présenter des comportements similaires à ceux du nord.

On examine à présent la distribution des valeurs médianes observées parmi les 199 sites à travers les boîtes à moustaches présentées sur la Figure 67.

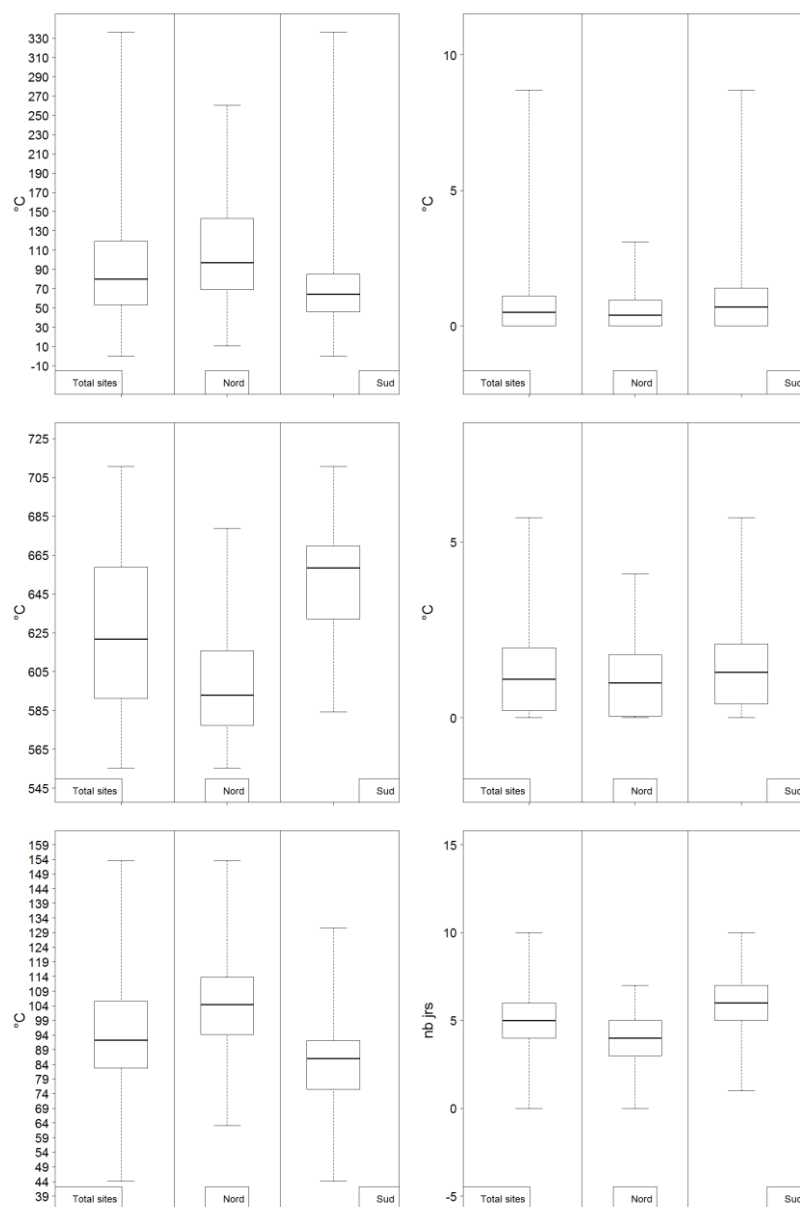


Figure 67: Boîtes à moustaches des valeurs médianes des prévisions des six différentes variables thermiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison », « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C ». Les extrémités des « moustaches » représentent les valeurs minimales et maximales de la distribution.

La variabilité spatiale observée sur la Figure 67 est, cette fois encore, très différente d'une variable à l'autre. Parfois, l'écart entre le Q25 et le Q75 est d'environ 2 à 3°C, comme pour la variable « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades

méiose et floraison » ; parfois il vaut plus de 140°C, comme pour la variable « somme des températures maximales supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison ».

Lors de l'évaluation des différents jeux de simulations réalisés, il sera également important de garder en mémoire ces caractéristiques relatives à la gamme de valeurs proposées par ces variables.

A présent, on examine la variabilité temporelle des variables thermiques (Figure 68).

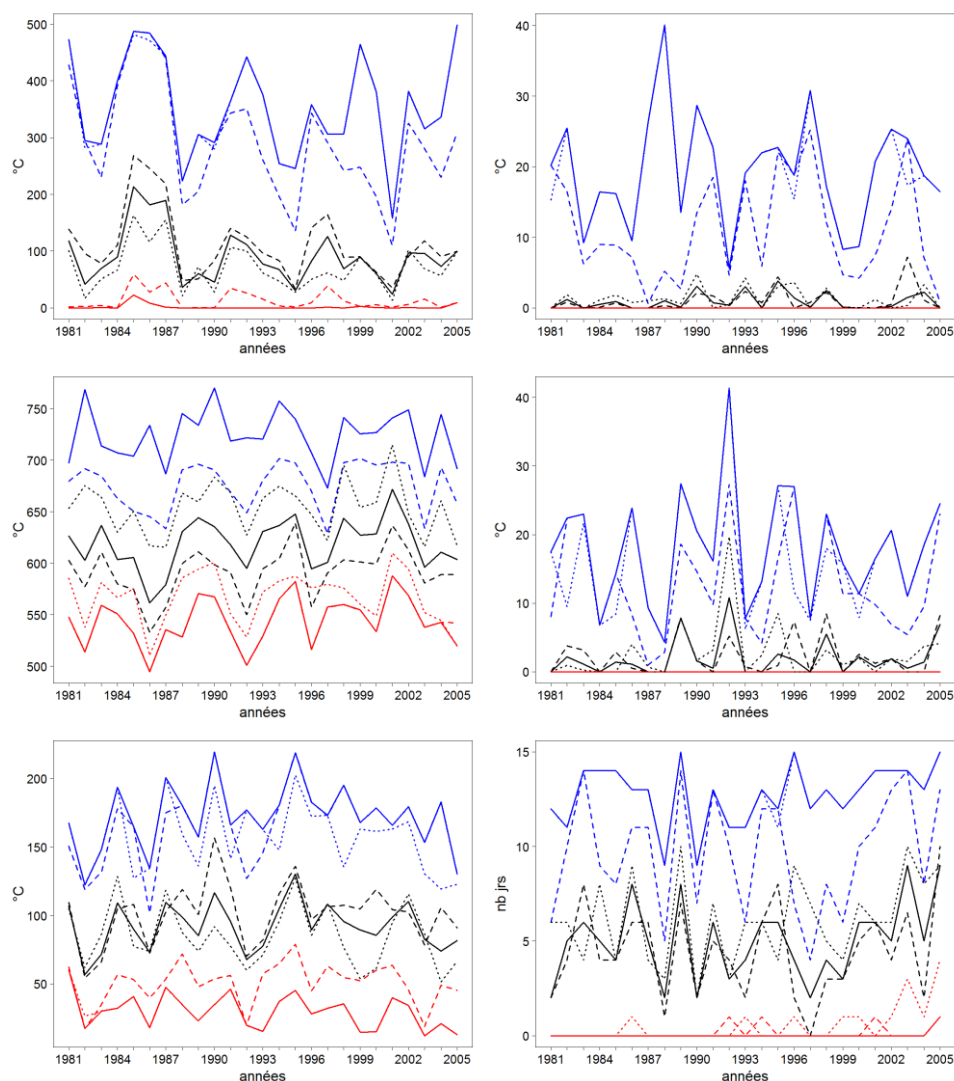


Figure 68: Évolution temporelle des variables thermiques sur la période 1981-2005, obtenues avec le jeu de simulations de référence. En partant de haut à gauche jusqu'en bas à droite, sont représentées les variables : « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison », « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C ». La médiane de l'ensemble des sites est représentée en trait plein, celle de la région nord en tirets, en pointillés pour la région sud. La valeur médiane est en noir, la valeur minimale en rouge et la valeur maximale en bleu.

Chacune des variables agro-météorologiques présentées sur la Figure 68 possède une variabilité temporelle très forte, proportionnellement à la gamme des valeurs. Ainsi, la variable « somme des températures maximales supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison » possède une gamme de valeurs et une amplitude importantes, de l'ordre de 50°C. Pour la variable « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », la variabilité interannuelle observée est plus limitée, de l'ordre de 10 à 20°C seulement. On peut également noter que pour les sites au sud, la plupart des variables présentent des valeurs médianes égales à 0°C d'une année sur l'autre.

En conclusion, l'analyse faite sur le jeu de simulations de référence montre la difficulté éventuelle de prévoir ces variables agro-météorologiques présentées ici, compte-tenu de la forte variabilité spatiale et temporelle qui vient d'être mise en évidence. Seules les dates des stades phénologiques semblent moins « volatiles » au regard des deux autres catégories. Les variables thermiques et hydriques étant calculées sur des stades phénologiques prévus par le modèle, la qualité de la prévision de ces catégories de variables dépend à la fois de la capacité du modèle à prévoir les dates de stades phénologiques, mais également à prévoir la somme de la variable entre deux stades. L'erreur du modèle à prévoir un stade est donc prise en compte deux fois pour cette catégorie de prévisions.

5.2. Scores obtenus pour les différents jeux de simulations

5.2.1. Le jeu de simulations « calcul fréquentiel »

- Étude de sensibilité

Une étude de sensibilité est menée sur la méthode de calcul fréquentiel afin d'évaluer les scores de biais et de RMSE pour différentes configurations choisies. En effet, le choix de la période historique et de la statistique utilisée peut influencer la qualité des prévisions obtenues. Ainsi, quatre périodes fixes de vingt ans chacune sont testées : 1961-1980, 1971-1990, 1981-2000 et 1986-2005 ; une autre de vingt-cinq ans couvrant toute la période de cette étude (1981-2005) et une dernière de quarante-cinq ans (1961-2005). Pour chacune d'entre elles, on calcule ensuite la médiane des prévisions. On calcule également différents déciles (de 2 à 6) à partir d'une seule période historique glissante de vingt ans (1961-1980 pour l'année 1981, 1962-1981 pour l'année 1982, etc...). Dans cette thèse, la configuration choisie correspond à l'utilisation de la médiane (décile 5) sur une période historique glissante de vingt ans. Les différents scores sont présentés sur la Figure 69.

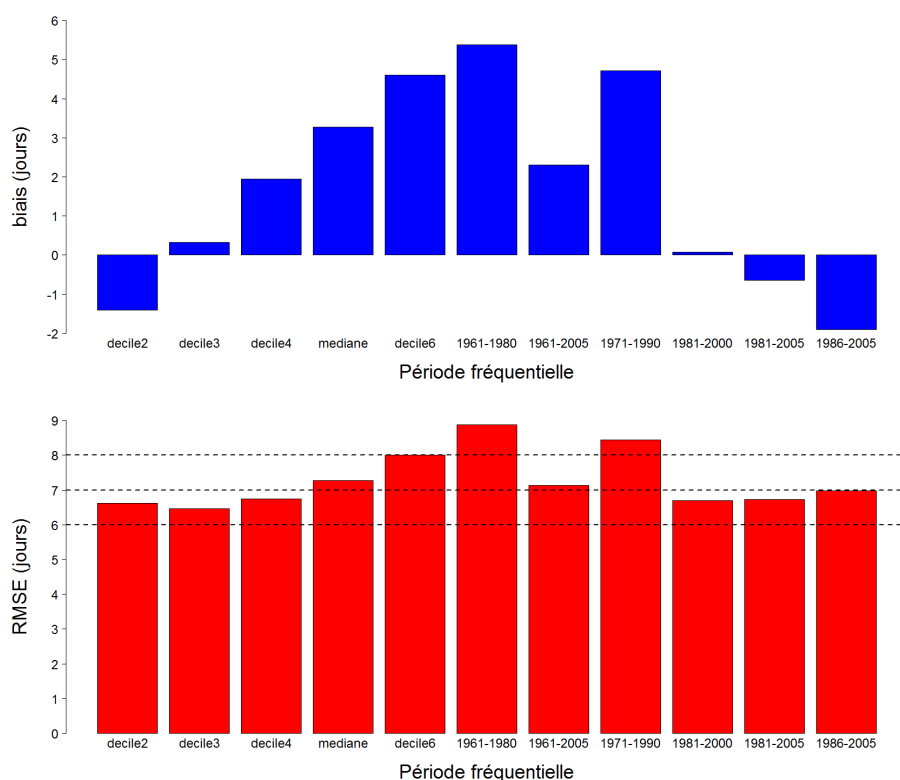


Figure 69: Biais (en haut) et RMSE (en bas) calculés sur les prévisions des stades phénologiques et pour les 199 sites étudiés. Chaque jeu de prévisions est obtenu avec différentes configurations du calcul fréquentiel réalisées par le modèle Panoramix. Pour mieux apprécier les RMSE de chacune des configurations évaluées, sont matérialisées en lignes pointillées les valeurs de RMSE égales à 6, 7 et 8 jours.

Parmi ces onze configurations, on analyse les différents scores obtenus (Figure 69). Le biais obtenu avec la méthode sélectionnée dans cette thèse est d'environ 3 jours. Pour les périodes 1981-2005 et 1986-2005, les biais sont négatifs. Le biais est positif pour les périodes 1961-1980 et 1971-1990. Celui-ci est d'autant plus grand que la période historique est anciennes. Le biais reste positif sur la plus grande période choisie (1961-2005), néanmoins il est plus faible que les autres. Enfin, le biais est proche de zéro pour la période 1981-2000. Cette période intermédiaire est la plus proche de la période utilisée comme référence (1981-2005). Si l'on observe à présent les biais obtenus pour la période glissante, on s'aperçoit que plus le décile utilisé est grand, plus le biais est important et ce de façon linéaire. Le biais le plus faible est obtenu pour le décile 3, qui est donc la configuration se rapprochant le plus du jeu de simulations de référence. Compte-tenu de la forte variabilité du biais, on peut conclure que ce dernier dépend fortement de la période historique choisie.

Le RMSE présente les mêmes caractéristiques : les valeurs les plus fortes sont obtenues avec les périodes les plus anciennes (supérieures à 8 jours pour les périodes avant 1980, inférieures à 7 jours pour les périodes après) et sont intermédiaires pour la période de 45 ans (environ 7 jours). La plus petite valeur de RMSE est obtenue pour le décile 3 (avec 6,5 jours). Cependant, pour le décile 2, le RMSE est légèrement plus grand. On reste autour de 6,5 jours, équivalent aux valeurs de RMSE obtenus avec les périodes historiques fixes les plus récentes.

Par définition, le calcul fréquentiel est obtenu à l'aide des vingt années précédant l'année de la campagne en cours pour laquelle on souhaite obtenir des prévisions. La médiane obtenue est donc la prévision d'une année forcée par les données météorologiques d'une période qui a eu lieu entre un et vingt ans auparavant. Par conséquent, l'écart entre cette médiane et la référence (qui elle est forcée par des données de l'année en cours) est souvent positif. Cette hypothèse permet d'expliquer les scores de biais positif et de RMSE plutôt élevé obtenu avec la configuration choisie.

- Evaluation des prévisions des stades phénologiques obtenues avec le jeu de simulations « fréq-dét »

A présent, on examine le comportement du jeu de simulations « fréq-dét », basé sur l'utilisation de la valeur médiane des vingt dernières années. On s'intéresse uniquement dans cette partie aux scores déterministes (Sect. 4.2.1.), à travers la représentation des prévisions de ce jeu de simulations par rapport à celui obtenu avec le jeu de simulation « réf ». L'ensemble des scores déterministes calculés sont regroupés dans le tableau suivant (Tableau 6) :

score	variable	fréq-dét	variable	fréq-dét	variable	fréq-dét
biais	épi à 1 cm	1.35	somme du drainage entre la date de semis et le stade "épi à 1 cm"	11.83	somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade "épi à 1 cm"	-1.06
		2.11		10.73		-0.22
		0.59		12.94		-1.91
SDD		7.44		39.84		33.91
		8.00		41.66		41.42
		6.75		37.88		24.04
RMSE		7.57		41.56		33.93
		8.27		43.02		41.42
		6.78		40.03		24.12
r		0.87		0.96		0.91
		0.77		0.95		0.87
		0.88		0.96		0.94
biais	2 nœuds	2.76	état de la réserve hydrique au stade "épi à 1 cm"	3.29	somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades "épi à 1 cm" et "2 nœuds"	0.26
		3.41		2.21		0.22
		2.10		4.38		0.30
SDD		7.20		15.25		3.50
		7.08		13.40		3.24
		7.25		16.84		3.74
RMSE		7.71		15.60		3.51
		7.86		13.59		3.25
		7.55		17.40		3.75
r		0.88		0.59		0.35
		0.79		0.14		0.27
		0.87		0.67		0.37

biais	épiaison	3.22 3.12 3.31	somme des précipitations totales entre les stades "épi à 1 cm" et "2 nœuds"	3.17 -0.22 6.58	somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades "épi à 1 cm" et "épiaison"	-0.22 -3.46 3.05
SDD		6.07 6.23 5.90		38.33 35.76 40.49		24.12 22.13 25.56
RMSE		6.87 6.97 6.76		38.46 35.76 41.02		24.12 22.40 25.75
r		0.85 0.65 0.87		0.26 0.21 0.28		0.87 0.80 0.79
biais	floraison	3.71 3.62 3.80	somme du déficit hydrique entre les stades "2 nœuds" et "floraison"	-1.76 -0.45 -3.09	somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades "méoïse" et "floraison"	-1.01 -0.92 -1.10
SDD		6.62 6.80 6.42		14.51 9.67 18.04		5.05 4.53 5.53
RMSE		7.59 7.71 7.46		14.62 9.68 18.31		5.15 4.62 5.64
r		0.85 0.65 0.86		0.53 0.20 0.56		0.21 0.17 0.23
biais	maturité	4.16 3.86 4.46	état de la réserve hydrique au stade "épiaison"	3.51 2.14 4.90	somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades "épiaison" et "maturité"	6.18 4.43 7.95
SDD		5.42 5.54 5.28		35.73 33.61 37.69		29.88 29.02 30.62
RMSE		6.83 6.75 6.91		35.90 33.70 38.01		30.51 29.35 31.64
r		0.89 0.74 0.89		0.32 0.14 0.40		0.46 0.43 0.40
biais	récolte	4.43 4.16 4.70	état de la réserve hydrique au stade "floraison"	4.29 2.62 5.96	nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C entre les stades "grain-laiteux" et "maturité"	-0.67 -0.36 -0.98
SDD		5.51 5.78 5.22		36.97 35.07 38.73		3.07 2.97 3.13
RMSE		7.07 7.12 7.02		37.22 35.17 39.18		3.14 2.99 3.28
r		0.90 0.74 0.90		0.31 0.18 0.37		0.45 0.42 0.38

biais			1.75 1.29 2.22	
SDD		somme des précipitations totales entre les stades "grain-laiteux" et "maturité"	28.22 25.96 30.32	
RMSE			28.27 25.99 30.40	
r			0.20 0.23 0.18	
biais			5.95 5.41 6.49	
SDD		état de la réserve hydrique au stade "maturité"	32.46 30.42 34.38	
RMSE			33.00 30.90 34.99	
r			0.40 0.36 0.42	

Tableau 6: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des différentes catégories de variables agro-météorologiques obtenues avec le jeu de simulation « fréq-dét ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud.

On observe dans le Tableau 6 que les prévisions des stades phénologiques obtenues avec le jeu de simulations « fréq-dét » concordent bien avec celles issues de la référence, compte-tenu des bons scores de qualité obtenus. Sur l'ensemble des prévisions réalisées, le biais est relativement faible, de seulement un peu plus d'un jour pour le stade « épi à 1 cm », jusqu'à atteindre un peu plus de 4 jours pour le stade « récolte ». De manière générale, plus on considère un stade phénologique avancé dans la saison, plus le biais a tendance à croître, du fait qu'il se cumule d'un stade à l'autre. Le calcul fréquentiel fournit donc des prévisions globalement de plus en plus « en retard » par rapport à la référence. Ce n'est pas le cas du RMSE et du SDD, tous deux décroissants au fil des stades phénologiques (sauf lors du stade « floraison »). Le coefficient de corrélation est élevé dans l'ensemble, avec des valeurs supérieures à 0,7 et atteignant même 0,9.

Les scores obtenus dépendent de la région pour laquelle ils sont calculés. Notamment, ceux obtenus pour les sites de la région nord sont moins bons que ceux de la région sud. Le biais est supérieur dans la région nord de plus d'un jour. Le RMSE l'est également mais de façon moins marquée. Enfin, le coefficient de corrélation calculé pour les sites du sud est

également plus fort. Plus on s'approche de la fin du cycle, plus cette constatation a tendance à s'inverser.

Globalement, le calcul fréquentiel réalise d'un point de vue déterministe des prévisions des stades phénologiques de bonne qualité. L'objectif d'utiliser la prévision saisonnière est, on le rappelle, de chercher à obtenir des scores de meilleure qualité que ceux qui viennent d'être présentés.

Si l'on s'intéresse à présent aux prévisions des différentes variables hydriques, il n'est pas possible de généraliser le comportement des scores obtenus.

La variable « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm » présente les meilleurs scores. En effet, le biais n'est que d'environ 12 mm et le RMSE de 42 mm, ce qui est relativement faible par rapport à la gamme des prévisions obtenues (de 0 à environ 800 mm, non montré ici). Le coefficient de corrélation est très élevé (0,96 et $p\text{-value} < 0,001$). A l'opposé, les scores obtenus pour l'état de la réserve utile aux différents stades phénologiques sont de mauvaise qualité. Même lors du stade « épi à 1 cm », stade phénologique observé en début de cycle, la prévision issue du calcul fréquentiel est déjà très différente de la référence. Ceci est expliqué par une forte variabilité de l'état de la réserve utile à un instant donné (voir Sect. 5.1.). De manière générale concernant cette catégorie de variables, la médiane des valeurs obtenues les vingt dernières années n'est généralement pas représentative de l'année où la prévision est réalisée, à cause de la forte variabilité interannuelle de ces variables.

Comme on l'a vu dans la section précédente, les prévisions pour la variable « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison » sont assez particulières, étant donné que beaucoup de valeurs de référence sont nulles, notamment dans la région nord. Cela traduit la difficulté de rendre compte de cette variable uniquement avec la médiane des valeurs des précédentes années. Malgré un biais et un RMSE relativement faibles (-1,75 mm et presque 15 mm, respectivement), compte tenu du grand nombre de prévisions proches ou égales à zéro, ces scores perdent de leur sens.

Enfin, les prévisions de la variable « somme des précipitations totales entre les stades grain-laiteux et maturité » présentent des scores médiocres. Le biais est faible (environ 2 mm), alors que le RMSE est élevé (environ 28 mm) et le coefficient de corrélation est de seulement 0,2. Les mêmes scores sont observés concernant l'autre variable liée à la somme des précipitations entre les stades « épi à 1 cm » et « 2 nœuds », avec pour celle-ci un coefficient de corrélation légèrement supérieur ($r=0,26$).

Concernant la distinction entre les régions nord et sud, des différences sont notables mais ne changent pas beaucoup l'analyse qui vient d'être faite. A l'exception de la variable « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », le biais et le RMSE sont toujours plus élevés pour les sites du sud.

Concernant à présent les variables thermiques, les scores diffèrent également d'une variable à l'autre.

La variable « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm » est très bien simulée par le calcul fréquentiel. En effet, le biais est de seulement -1°C pour des valeurs présentant une forte variabilité (de 0°C à plus de 300°C, non montré ici) et un coefficient de corrélation très élevé ($r=0,91$, $p\text{-value} < 0,001$).

Concernant la variable « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds », les scores de biais et RMSE sont faibles (0.3°C et 3.5°C, respectivement) et le coefficient de corrélation n'est pas très élevé ($r=0,35$). Les mêmes caractéristiques sont retrouvées pour la variable « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison », avec des scores également moins bons. Une autre variable bien simulée par le jeu de simulations « fréq-dét » est la « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison ». Les biais et RMSE sont de bonne qualité : le biais est quasiment nul et le RMSE est de seulement 24°C, par rapport à une gamme de prévisions comprise entre 500 et 750°C (non montrés ici), tandis que le coefficient de corrélation est très élevé ($r=0,87$ et $p\text{-value} < 0,001$). Un biais très différent est obtenu pour chacune des deux régions (inférieur à -3°C dans la région nord et supérieur à 3°C dans la région sud). Cela explique le biais moyen proche de zéro calculé sur l'ensemble des sites.

Enfin, si l'on considère les variables « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et le « nombre de jours entre les stades grain-laiteux et maturité », les résultats sont plus mitigés. Le biais est assez important pour la première variable, avec beaucoup de prévisions surestimées par rapport à la référence (surtout dans la région sud). Il est faible pour la seconde (également plus important dans la région sud), surestimant les faibles valeurs et sous-estimant les fortes. Un RMSE important est obtenu, valant 30°C et 3 jours, respectivement. Dans les deux cas, le coefficient de corrélation est correct ($r=0,45$).

Là encore, les scores sont généralement moins bons dans la région sud, à l'exception de la variable « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm ».

En conclusion de l'analyse faite sur ces trois séries de variables simulées avec la méthode de calcul fréquentiel, on peut retenir une bonne représentation de quelques-unes d'entre elles. La méthode de calcul fréquentiel sous-estime fortement la variabilité des prévisions par rapport au jeu de simulations de référence. Les scores de biais et de RMSE sont globalement bons et des coefficients de corrélation élevés sont souvent observés entre les variables simulées et celles obtenues avec la référence. Seuls les états de la réserve utile aux différents stades sont mal simulés, tout comme quelques variables thermiques.

On a également remarqué que de grandes différences peuvent être observées par région. Nous avons vu que les scores se dégradent au fil du temps dans la région sud, alors qu'ils sont plus constants dans la région nord. On a même mis en évidence un signe de biais opposé dans un cas, traduisant une grande différence de comportement entre les deux régions. Mais globalement, à l'exception des premiers stades phénologiques, les scores présentés sont très souvent meilleurs dans la région nord, certainement à l'origine d'une variabilité moins

marquée (illustrée dans la section 5.1.) et donc des sites ayant des caractéristiques plus stables et plus prévisibles.

L'évaluation des prévisions obtenues avec le calcul fréquentiel venant d'être faite en tenant compte du jeu de simulations de référence, on passe maintenant à l'évaluation des différents jeux de simulations utilisant les données issues de la prévision saisonnière.

5.2.2. Les jeux de simulations « PS »

a. Les scores déterministes

On commence par faire une évaluation détaillée du jeu de simulations « ARP3-AS4 » à l'aide des scores déterministes. Il s'agit du jeu de simulations utilisant la méthode basée sur le calcul d'anomalies standardisées afin d'effectuer la descente d'échelle des variables température à 2 m et précipitations totales à quatre mois d'échéance. On synthétise ensuite l'ensemble des résultats obtenus pour l'ensemble des jeux de simulations « PS ». Il s'agit donc de regarder les scores obtenus avec la médiane des 9 (45) membres des jeux de prévisions « modèle unique » (« multi-modèles »). On détaille les résultats par catégorie de variables.

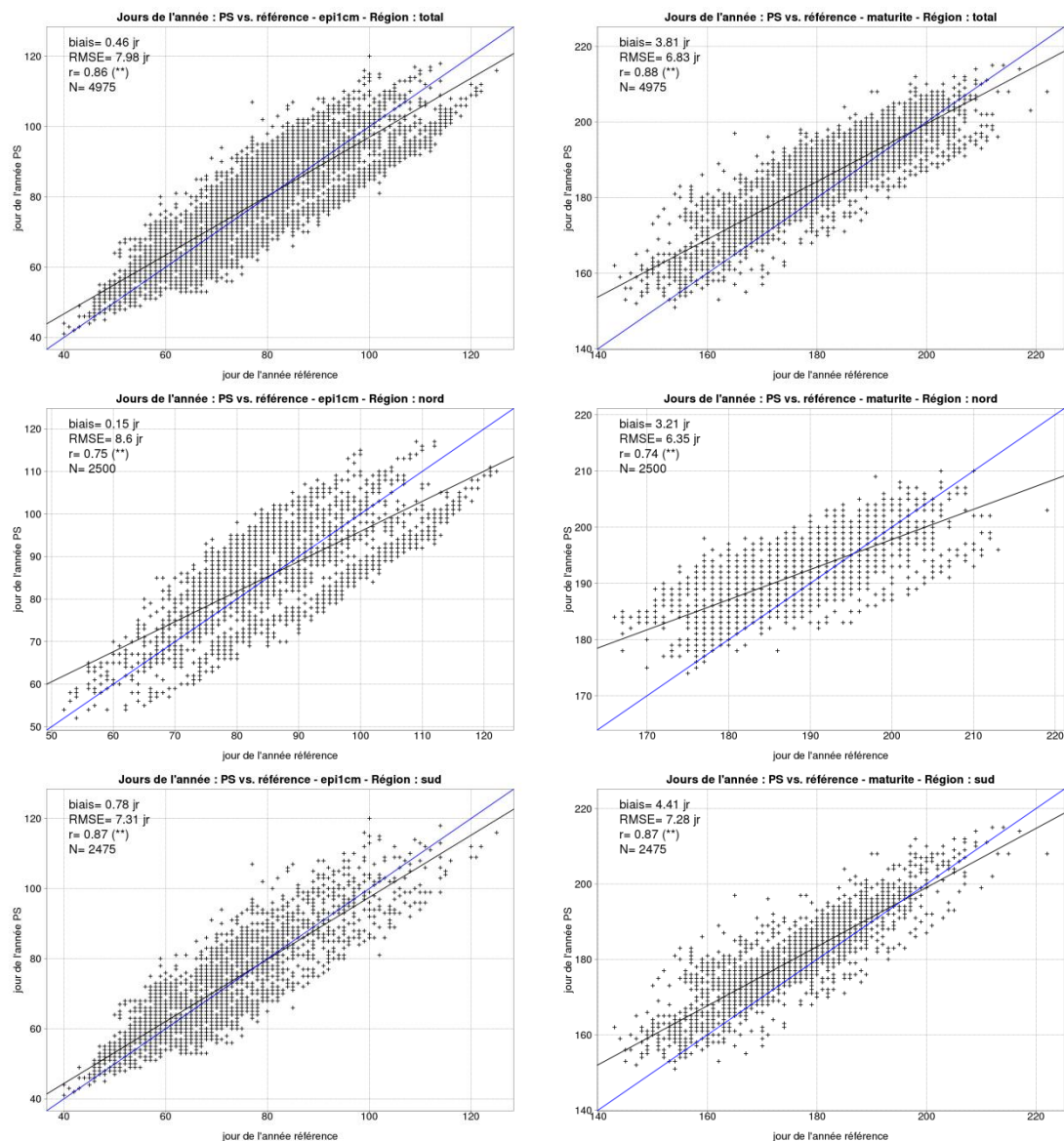


Figure 70: Prévisions des dates de stades « épi à 1 cm » (à gauche) et « maturité » (à droite) obtenues avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse) et sur : l'ensemble des sites (en haut), les sites au nord (au milieu) et les sites au sud (en bas). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité est le jour de l'année.

On peut remarquer sur la Figure 70 que le biais obtenu pour le stade « maturité » (Figure 70, à droite) est bien plus grand que pour le stade « épi à 1 cm » (Figure 70, à gauche), indépendamment de la région. Le biais est croissant au fil des stades. Sur l'ensemble des sites, le biais est pratiquement nul au stade « épi à 1 cm » (Figure 70, en haut à gauche) et atteint presque 4 jours au stade maturité (Figure 70, en haut à droite). L'écart entre le biais calculé pour les sites au nord et celui pour les sites au sud est de 0,6 jour environ au stade « épi à 1 cm » et peut atteindre 1,4 jour au stade « maturité ». Plus on avance dans le calendrier cultural, plus cet écart est grand.

Le jeu de simulations « PS » présente un RMSE qui décroît de 8 jours au stade « épi à 1 cm », à moins de 7 jours au stade « maturité ». Pour ce dernier, il s'agit d'ailleurs du meilleur score obtenu parmi les six stades étudiés (non montrés ici). La variabilité des prévisions décroît avec l'échéance et elle est d'autant plus marquée pour la région nord, avec un RMSE passant de 8,5 jours environ à 6,3 jours (soit un écart de presque 2 jours), tandis que pour la région sud le RMSE est constant. Ainsi, pour les stades « épi à 1 cm » et « 2 nœuds », le RMSE de la région nord est plus élevé que celui obtenu pour la région sud, alors que c'est l'inverse pour les quatre stades suivants (non montré ici). La qualité des prévisions s'améliore d'un stade à l'autre et principalement dans la région nord.

On considère à présent les cartes des scores obtenus pour chacun des sites, afin d'étudier en détail leur variabilité spatiale (Figures 71 et 72).

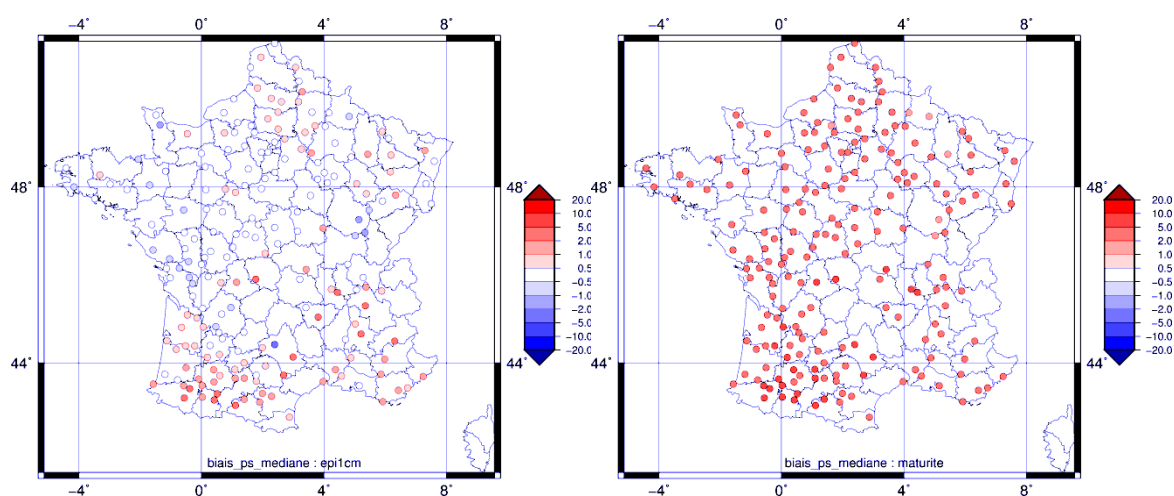


Figure 71: Cartes du biais des prévisions des stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et maturité (à droite) obtenu pour chacun des sites avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » sur la période 1981-2005.

Concernant le biais obtenu pour le stade « épi à 1 cm » (Figure 71, à gauche), il est compris entre -0,5 et 0,5 jour sur la quasi-totalité des sites au nord, alors qu'au sud on relève un biais positif de plusieurs jours sur de nombreux sites, notamment dans le sud-est et près des Pyrénées. Pour le stade « maturité » (Figure 71, à droite), on note également un biais positif sur l'ensemble des sites et compris entre 2 et 5 jours. Dans le quart sud-ouest, certains sites présentent un biais important dépassant 5 jours, expliquant la moindre qualité du biais calculé dans le sud. La prévisibilité apportée par le jeu « PS » semble être réduite dans cette région.

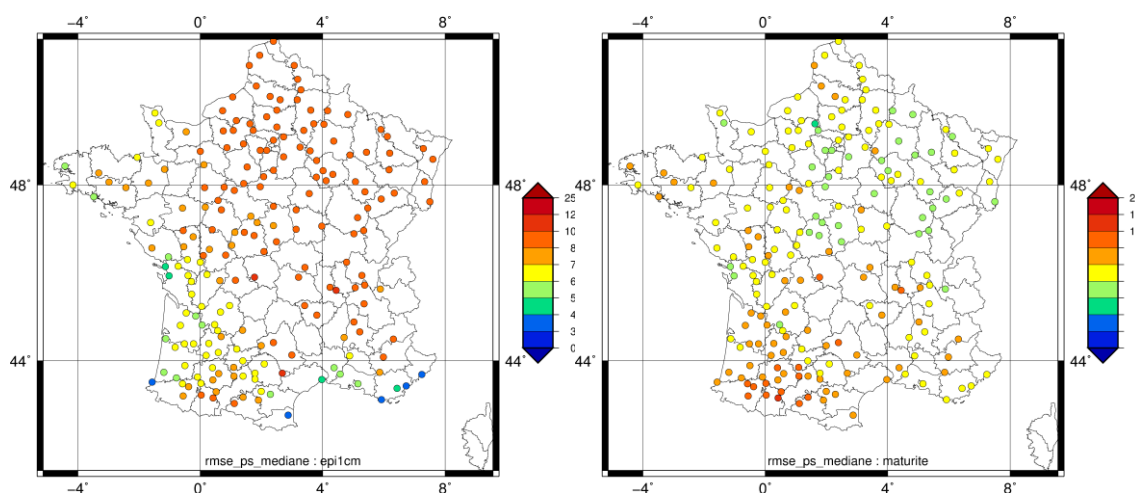


Figure 72: Cartes du RMSE des prévisions des stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et maturité (à droite) obtenues pour chacun des sites avec la simulation « ARP3-AS4 » sur la période 1981-2005.

Dans un premier temps, le RMSE obtenu pour le stade « épi à 1 cm » (Figure 72, à gauche) est très élevé concernant les sites au nord, avec des valeurs supérieures à 8 jours (excepté sur la pointe bretonne). Il est compris entre 6 et 7 jours pour de nombreux sites situés dans le sud-ouest et entre 8 et 12 jours le long des Pyrénées. Le RMSE n'est cependant que de 3 à 6 jours le long de la Méditerranée. Or, on a vu que ce stade était atteint très tôt dans ces régions (parfois en février). Ce score reflète donc un forçage atmosphérique principalement piloté par les réanalyses Safran où seules les dernières semaines apportant de la variabilité sont issues de la prévision saisonnière.

Dans un second temps, le RMSE obtenu pour le stade « maturité » (Figure 72, à droite) présente des caractéristiques opposées. Cette fois, le score est faible pour les sites au nord, avec des valeurs comprises entre 5 et 7 jours, atteignant même 8 jours. Dans le sud, le RMSE atteint fréquemment les 8 jours et jusqu'à 10 jours dans le sud-ouest. Une fois de plus, les sites dans le sud-ouest dégradent les résultats, ce qui explique les principales différences de scores entre les deux régions. On note l'amélioration du RMSE dans le nord entre le stade « épi à 1 cm » et le stade « maturité » durant la période où le forçage atmosphérique est piloté par les données issues de la prévision saisonnière.

Pour vérifier qu'il s'agit bien de la prévisibilité apportée par la prévision saisonnière et non par la climatologie Safran présente dans les forçages atmosphériques, on regarde à présent les scores obtenus avec le jeu de simulations de contrôle « clim » (Figure 73).

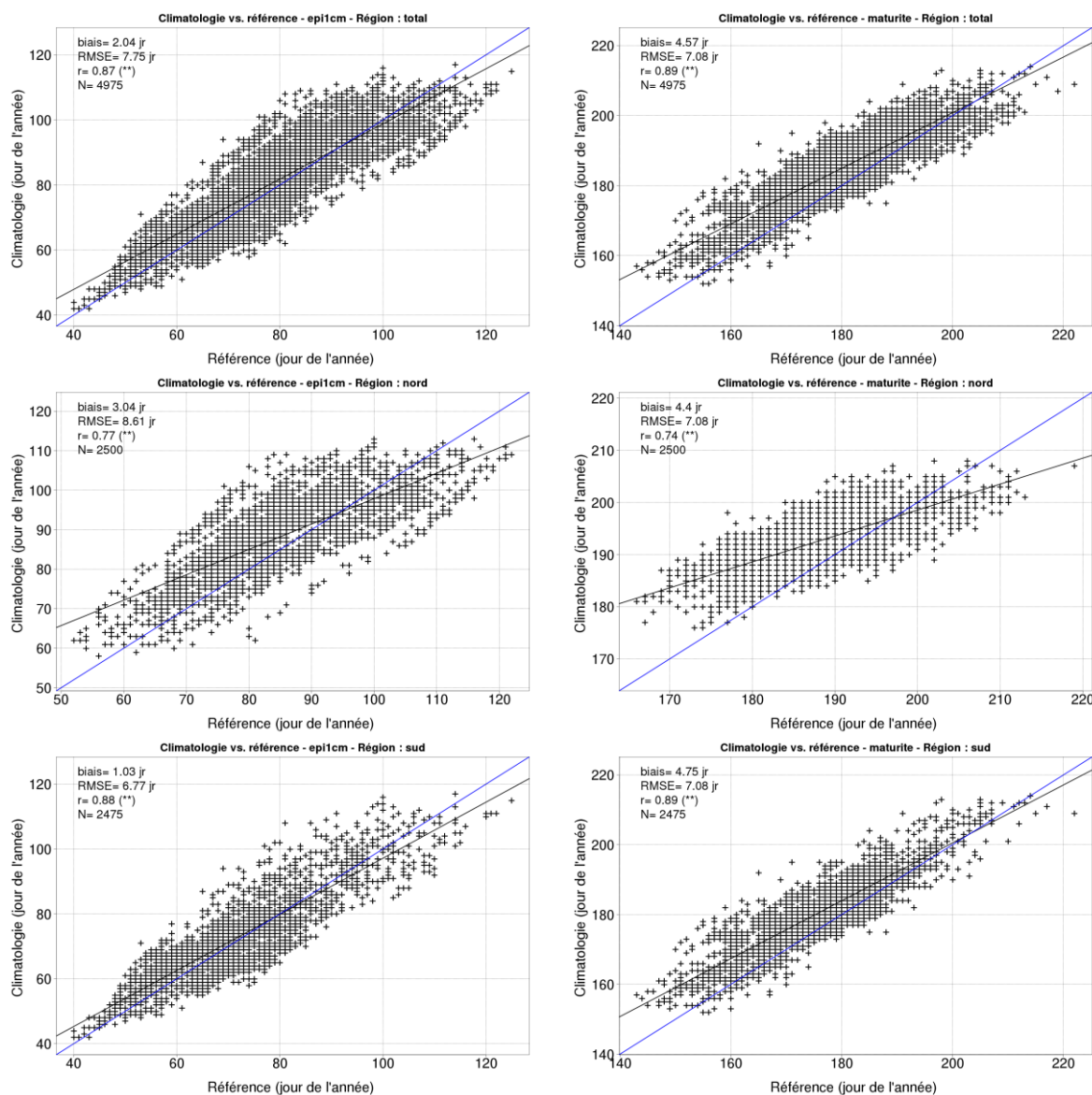


Figure 73: Prévisions des dates de stades « épi à 1 cm » (à gauche) et « maturité » (à droite) obtenues avec le jeu de simulations de contrôle « clim » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse) et sur : l'ensemble des sites (en haut), les sites au nord (au milieu) et les sites au sud (en bas). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité est le jour de l'année.

Le biais obtenu pour chacun des stades phénologiques avec le jeu de simulations de contrôle « clim » est sans exception supérieur à celui présenté pour le jeu de simulations « PS », de +0,7 jour à +1,5 jour (Figure 73). Il l'est également pour les autres stades phénologiques non montrés ici.

Le RMSE obtenu avec le jeu de simulations « clim » est de 7,5 jours (soit -0,4 jour par rapport au jeu de simulations « PS »). Par contre pour le stade « maturité », il est supérieur de + 0,2 jour. Or, on a vu précédemment que la qualité du RMSE est moindre pour les deux premiers stades phénologiques. Ainsi, le fait que le RMSE obtenu avec le jeu de simulations

« clim » soit meilleur pour ces premiers stades n'a pas une grande importance. Le RMSE est de meilleure qualité pour les derniers stades avec le jeu de simulations « PS » et on montre ici que ce n'est pas dû à l'apport de la climatologie.

A présent, on s'intéresse aux résultats obtenus concernant l'ensemble des jeux de simulations réalisées avec les données issues de la prévision saisonnière (Tableau 7).

variable	score	ARP3	ARP3-AS4	ARP3-QQ4	ARP3-QQ6	MM3-QQ6
épi à 1 cm	biais	3.36	0.46	-0.85	-0.84	-0.23
		2.69	0.15	-0.92	-0.89	0.03
		4.04	0.78	-0.78	-0.79	-0.50
	SDD	10.35	7.97	8.17	8.20	7.06
		11.36	8.60	8.74	8.78	7.60
		9.15	7.27	7.55	7.58	6.46
	RMSE	10.88	7.98	8.21	8.25	7.06
		11.68	8.60	8.79	8.82	7.60
		10.01	7.31	7.59	7.62	6.48
	r	0.80	0.86	0.85	0.85	0.89
		0.72	0.75	0.75	0.75	0.80
		0.80	0.87	0.86	0.86	0.89
2 nœuds	biais	6.52	2.02	0.16	0.18	0.72
		5.52	1.75	0.29	0.34	0.98
		7.53	2.30	0.02	0.03	0.46
	SDD	11.22	7.87	8.13	8.16	7.08
		11.47	8.02	8.17	8.20	7.21
		10.87	7.71	8.08	8.11	6.94
	RMSE	12.98	8.13	8.13	8.16	7.11
		12.73	8.21	8.18	8.21	7.27
		13.22	8.04	8.08	8.11	6.95
	r	0.76	0.86	0.86	0.85	0.89
		0.70	0.74	0.74	0.74	0.78
		0.74	0.86	0.85	0.85	0.88
épiaison	biais	8.34	3.10	1.00	0.98	1.08
		7.14	2.60	0.91	0.89	1.02
		9.55	3.62	1.09	1.08	1.14
	SDD	9.80	6.31	6.79	6.86	6.21
		9.14	6.01	6.38	6.42	6.20
		10.28	6.55	7.19	7.27	6.22
	RMSE	12.87	7.03	6.87	6.93	6.30
		11.60	6.55	6.44	6.48	6.28
		14.03	7.49	7.27	7.35	6.32
	r	0.66	0.84	0.82	0.81	0.84
		0.51	0.68	0.65	0.65	0.66
		0.64	0.83	0.81	0.80	0.85

floraison	biais	9.20	3.51	1.17	1.18	1.28
		7.88	2.92	1.05	1.07	1.25
		10.53	4.10	1.29	1.29	1.32
	SDD	10.48	6.76	7.26	7.34	6.72
		9.76	6.44	6.80	6.85	6.67
		11.01	7.02	7.70	7.80	6.77
	RMSE	13.95	7.62	7.36	7.43	6.84
		12.55	7.07	6.88	6.93	6.79
		15.23	8.13	7.80	7.90	6.90
	r	0.66	0.84	0.82	0.82	0.85
		0.51	0.70	0.67	0.66	0.67
		0.64	0.84	0.81	0.81	0.85
maturité	biais	8.41	3.81	1.89	1.13	1.33
		7.17	3.21	1.73	0.96	1.12
		9.65	4.41	2.06	1.31	1.54
	SDD	8.16	5.67	6.00	6.55	5.86
		7.80	5.47	5.70	6.29	5.74
		8.33	5.80	6.27	6.80	5.97
	RMSE	11.72	6.83	6.29	6.65	6.01
		10.59	6.35	5.96	6.37	5.85
		12.75	7.28	6.60	6.92	6.16
	r	0.75	0.88	0.87	0.84	0.87
		0.52	0.74	0.72	0.67	0.71
		0.72	0.87	0.85	0.82	0.86
récolte	biais	8.41	4.00	2.20	1.22	1.37
		7.20	3.33	1.90	1.08	1.13
		9.64	4.68	2.49	1.36	1.60
	SDD	8.04	5.77	6.07	7.04	5.96
		7.77	5.66	5.90	6.76	5.94
		8.12	5.80	6.23	7.30	5.97
	RMSE	11.63	7.02	6.46	7.14	6.12
		10.59	6.56	6.20	6.84	6.05
		12.60	7.45	6.71	7.43	6.18
	r	0.78	0.89	0.88	0.84	0.88
		0.54	0.75	0.73	0.66	0.72
		0.75	0.88	0.86	0.81	0.87

Tableau 7: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des stades phénologiques obtenues avec les différents jeux de simulations « PS ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud. Le meilleur score parmi tous les jeux de simulations est en gras.

Dans un premier temps, on remarque dans le Tableau 7 que le jeu de simulations « ARP » présente les moins bons scores parmi toutes les variables étudiées. Le biais, le SDD et le RMSE sont toujours largement supérieurs à ceux obtenus avec les jeux de simulations utilisant une méthode de descente d'échelle.

Cependant, les prévisions issues des données brutes utilisées comme forçage atmosphérique dans le jeu de simulations « ARP3 » présentent également de bons coefficients de corrélation, ce qui traduit la prévisibilité apportée par la prévision saisonnière. Par contre, le biais est important. L'utilisation de méthodes de descente d'échelle montre que ce biais est réduit, tout en conservant une corrélation significative. Par la suite, on compare uniquement les jeux de simulations où une méthode de descente d'échelle a été utilisée.

De manière générale, on note que pour chaque stade phénologique, à l'exception du stade « épi à 1 cm », l'analyse des scores ne permet pas de définir quel jeu de simulations est le plus performant. Néanmoins, le SDD et le coefficient de corrélation s'accordent pour indiquer quel jeu de simulations présente la plus grande qualité de prévision. Les meilleurs scores sont le plus souvent obtenus avec le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». Le biais calculé sur l'ensemble des sites est faible (entre -1 et 2 jours) et il est même nul dans certains cas pour les sites de la région nord. C'est l'inverse pour le RMSE, avec une valeur totale autour de 7 jours, meilleure pour les sites au sud (6,5 jours), par rapport au nord (7,5 jours) et cependant faible (compris entre 6 et 8 jours) par rapport aux autres jeux de simulations. Les SDD sont également corrects, compris entre 6 et 7 jours seulement, tout comme les coefficients de corrélation élevés, avec des valeurs situées autour de 0,8 à 0,9.

Pour le stade « épi à 1 cm », le jeu de simulations « multi-modèles » possède sans équivoque les meilleurs résultats, tous scores confondus. En regardant uniquement les jeux de simulations « modèle simple », la descente d'échelle quantile-quantile est moins performante. Les scores calculés pour le jeu de simulations « ARP3-AS4 » sont légèrement meilleurs, à l'exception du coefficient de corrélation où aucune simulation ne se distingue.

La même remarque peut être faite concernant le stade « 2 nœuds ». En comparant les différentes descentes d'échelle étudiées, les scores ne sont pas très différents. L'utilisation de la descente d'échelle quantile-quantile aboutit à un biais plus faible mais un SDD plus élevé, tandis que le RMSE et le coefficient de corrélation sont quasiment identiques.

Enfin, pour les stades « maturité » et « récolte », on peut noter que le biais est plus faible avec l'utilisation de six mois d'échéances, alors que c'est l'inverse pour le RMSE. A noter également que la légère différence des scores pour les variables dont l'occurrence a lieu dans les quatre premiers mois de la prévision s'explique par des données de forçages atmosphériques sensiblement différentes, mais cela ne doit pas entrer dans l'appréciation des résultats. Ce constat est valable pour l'analyse des résultats obtenus avec les autres catégories de variables étudiées. On remarque également que le SDD et le coefficient de corrélation sont meilleurs pour le jeu de simulations « ARP3-AS4 ».

En conclusion, l'utilisation d'une méthode de descente d'échelle permet d'améliorer les coefficients de corrélation d'environ 0,1 point et de diviser les biais pratiquement par deux. Le RMSE et le SDD sont presque réduits de moitié. Ensuite, le gain apporté par l'approche « multi-modèles » par rapport au « modèle unique » est encore plus grand, notamment jusqu'au stade floraison. Seuls quelques biais sont meilleurs avec les jeux de simulations « modèle-unique ».

La descente d'échelle basée sur le calcul d'anomalies standardisées présente les meilleurs scores. L'utilisation de toutes les données de prévision saisonnière « descendues d'échelle » réduit le biais (mais augmente le RMSE) en fin de cycle cultural. Si l'on exclut le biais de l'analyse, en ne s'intéressant donc qu'aux SDD et aux coefficients de corrélation obtenus pour chacun des jeux de simulations, on peut voir que le meilleur jeu de simulations est « ARP3-AS4 ». La méthode de descente d'échelle quantile-quantile est plus apte à réduire le biais, mais augmente également l'erreur générale de la prévision. Enfin, les scores de la région nord sont sensiblement meilleurs, à l'exception des stades « épi à 1 cm » et « 2 nœuds ».

On s'intéresse à présent aux résultats obtenus pour les variables hydriques.

- Les variables hydriques

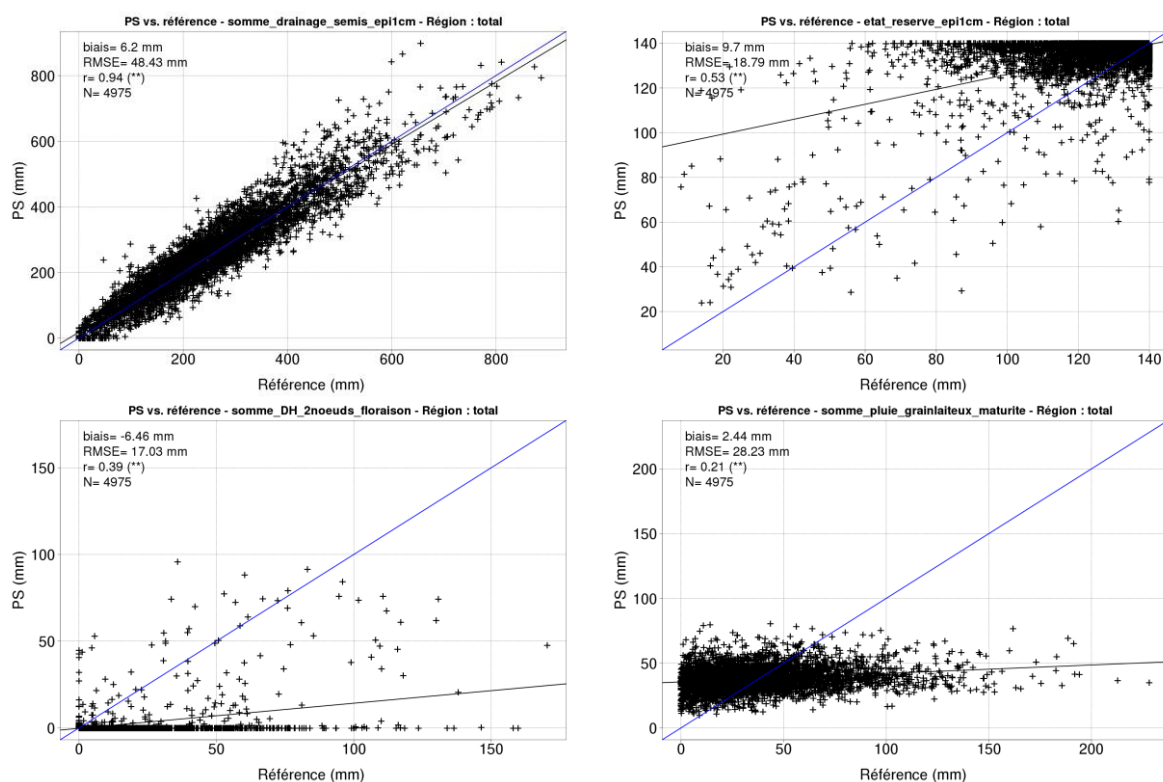


Figure 74: Prévisions des variables hydriques (intitulés indiqués sur les graphes) obtenues sur l'ensemble des sites avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité est le mm sur tous les graphes.

La distribution des prévisions obtenues pour les variables hydriques sont très différents d'une variable à l'autre (Figure 74).

Concernant la variable « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm » (Figure 74, en haut à gauche), la relation avec la référence est très forte, avec un coefficient de corrélation de 0,94 (p -value < 0,001) et une droite de régression quasiment

confondue avec l'axe $y=x$. On note cependant un léger biais (6,2 mm) et un RMSE assez élevé (48 mm), à confronter néanmoins à une gamme étendue des prévisions (entre 0 et 600 mm environ). L'ensemble des prévisions est globalement de bonne qualité.

Ce n'est pas le cas des prévisions obtenues pour la variable « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm » (Figure 74, en haut à droite). Beaucoup trop de prévisions à 140 mm sont obtenues avec le jeu de simulations « PS », qui ne reproduit donc pas correctement la variabilité observée avec la référence (biais de presque 10 mm et un coefficient de corrélation de seulement 0,53). Un grand nombre de prévisions est également réparti de manière aléatoire, ce qui augmente encore le RMSE (19 mm environ).

La variable « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison » (Figure 74, en bas à gauche) est la moins bien prévue, avec beaucoup trop de valeurs nulles. Le jeu de simulations est incapable de représenter correctement la variabilité de la référence, sans doute à cause du fait que le score déterministe considère uniquement la médiane de l'ensemble. Le biais est négatif (-6 mm), le RMSE est élevé (17 mm) et le coefficient de corrélation moyen ($r=0,39$).

Enfin, la variable « somme des précipitations totales entre les stades grain-laiteux et maturité » (Figure 74, en bas à droite) est prévue avec une faible dispersion (RMSE=28 mm). Le biais est d'environ 2 mm. La relation avec la référence est faible ici ($r=0,21$). La variabilité de la référence est clairement sous-représentée. En effet, beaucoup de valeurs de référence dépassent les 100 mm, alors que ce jeu de simulation plafonne la réserve à 50 mm. La variable similaire concernant la somme de précipitations totales (non montrée ici) possède les mêmes caractéristiques, avec des scores moins bons.

Si l'on s'intéresse aux scores obtenus avec le jeu de simulations de contrôle « clim » (non montré ici), on note que les scores sont meilleurs que ceux qui viennent d'être présentés (à l'exception des variables liées à l'état de la réserve utile). En conclusion, les bons résultats surlignés dans cette étude peuvent être en partie à l'origine de la climatologie présente dans les forçages atmosphériques utilisés. On présente l'ensemble des scores obtenus pour les différents jeux de simulations (Tableau 8).

variable	score	ARP3	ARP3-AS4	ARP3-QQ4	ARP3-QQ6	MM3-QQ6
somme du drainage entre la date de semis et le stade "épi à 1 cm"	biais	23.10	6.20	-2.51	-2.54	-4.44
		43.63	5.84	-1.89	-1.89	-2.80
		2.36	6.57	-3.13	-3.20	-6.09
	SDD	66.69	48.03	51.83	51.79	40.24
		66.74	50.97	53.66	53.69	40.55
		59.86	44.87	49.91	49.78	39.85
	RMSE	70.57	48.43	51.89	51.85	40.48
		79.73	51.30	53.69	53.72	40.65
		59.91	45.34	50.01	49.88	40.31
	r	0.88	0.94	0.93	0.93	0.96
		0.87	0.93	0.92	0.92	0.95
		0.91	0.95	0.94	0.94	0.96

état de la réserve hydrique au stade "épi à 1 cm"	biais	9.49	9.70	4.40	4.34	4.67
		10.41	7.90	4.22	4.13	5.14
		8.55	11.53	4.58	4.55	4.18
	SDD	17.51	16.10	16.98	17.00	15.67
		12.99	13.08	13.57	13.61	12.79
		21.08	18.48	19.84	19.85	18.11
	RMSE	19.92	18.80	17.54	17.55	16.35
		16.65	15.28	14.21	14.22	13.79
		22.75	21.78	20.36	20.36	18.58
	r	0.49	0.53	0.53	0.53	0.60
		0.20	0.19	0.20	0.20	0.26
		0.52	0.59	0.59	0.59	0.65
somme des précipitations totales entre les stades "épi à 1 cm" et "2 nœuds"	biais	13.85	5.30	-3.44	-3.46	-3.40
		25.45	5.17	-0.13	-0.25	0.00
		2.12	5.44	-6.77	-6.70	-6.84
	SDD	47.31	41.76	43.50	43.48	39.03
		42.11	37.74	38.93	38.84	36.43
		49.34	45.45	47.44	47.49	41.21
	RMSE	49.30	42.09	43.63	43.62	39.18
		49.21	38.09	38.93	38.84	36.43
		49.38	45.78	47.92	47.96	41.77
	r	-0.03	0.13	0.10	0.09	0.22
		-0.01	0.14	0.11	0.11	0.15
		-0.01	0.11	0.09	0.09	0.26
somme du déficit hydrique entre les stades "2 nœuds" et "floraison"	biais	-4.01	-6.46	-5.01	-5.11	-5.39
		-4.56	-4.56	-4.46	-4.46	-4.56
		-3.46	-8.37	-5.57	-5.77	-6.22
	SDD	16.82	15.76	15.41	15.36	14.87
		9.86	9.86	9.93	9.93	9.86
		21.68	19.84	19.42	19.32	18.58
	RMSE	17.29	17.03	16.21	16.18	15.82
		10.87	10.87	10.89	10.89	10.87
		21.95	21.54	20.20	20.17	19.59
	r	0.46	0.39	0.47	0.47	0.50
		NA	-0.02	-0.06	-0.06	-0.01
		0.49	0.41	0.50	0.50	0.53
état de la réserve hydrique au stade "épiaison"	biais	18.64	17.90	5.43	5.64	10.70
		28.24	16.01	5.64	5.94	10.28
		8.96	19.81	5.21	5.35	11.12
	SDD	44.03	41.30	42.18	41.81	38.08
		38.79	39.64	40.46	39.96	35.66
		46.80	42.82	43.84	43.61	40.38
	RMSE	47.82	45.01	42.53	42.19	39.55
		47.98	42.75	40.86	40.40	37.11
		47.65	47.18	44.15	43.93	41.88
	r	0.11	0.11	0.11	0.12	0.26
		-0.13	-0.17	-0.18	-0.15	0.03
		0.22	0.25	0.25	0.25	0.35

état de la réserve hydrique au stade "floraison"	biais	18.31	18.76	5.27	5.22	11.50
		28.18	17.70	6.46	6.73	11.78
		8.34	19.83	4.07	3.68	11.22
	SDD	45.15	43.07	44.13	44.29	38.99
		39.55	41.15	41.76	42.29	36.70
		48.16	44.91	46.37	46.17	41.17
	RMSE	48.72	46.98	44.45	44.60	40.65
		48.57	44.80	42.26	42.82	38.55
		48.88	49.09	46.55	46.32	42.67
	r	0.10	0.11	0.09	0.08	0.27
		-0.03	-0.07	-0.08	-0.09	0.11
		0.19	0.21	0.19	0.18	0.35
somme des précipitations totales entre les stades "grain-laiteux" et "maturité"	biais	-0.19	2.44	2.68	-5.57	-0.42
		1.04	2.46	2.84	-3.61	-1.75
		-1.44	2.42	2.53	-7.55	0.93
	SDD	28.41	28.12	28.19	29.07	27.87
		26.41	26.18	26.15	26.62	25.35
		30.23	29.95	30.11	31.22	30.14
	RMSE	28.41	28.23	28.32	29.60	27.87
		26.43	26.30	26.31	26.87	25.41
		30.27	30.05	30.21	32.12	30.15
	r	0.18	0.21	0.21	0.24	0.26
		0.15	0.19	0.20	0.28	0.30
		0.20	0.22	0.22	0.20	0.24
état de la réserve hydrique au stade "maturité"	biais	5.57	8.74	1.56	0.27	5.38
		9.82	5.27	-0.46	1.27	2.67
		1.27	12.25	3.61	-0.74	8.12
	SDD	35.34	35.43	34.22	33.37	33.17
		32.33	32.57	31.79	31.66	30.23
		37.66	37.78	36.39	34.98	35.70
	RMSE	35.78	36.49	34.25	33.37	33.61
		33.79	32.99	31.79	31.69	30.35
		37.68	39.71	36.57	34.99	36.61
	r	0.38	0.41	0.41	0.42	0.43
		0.35	0.36	0.36	0.39	0.40
		0.40	0.44	0.45	0.45	0.45

Tableau 8: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des variables hydriques obtenues avec les différents jeux de simulations « PS ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud. Le meilleur score parmi tous les jeux de simulations est en gras.

Dans le Tableau 8, on constate que le jeu de simulations « ARP3 » possède quelques scores étant meilleurs que ceux obtenus avec les autres jeux de simulations utilisant une méthode de descente d'échelle. Cela traduit la difficulté pour ces variables de retranscrire l'information fournie par les GCM à l'échelle locale. Cela montre également une forte

variabilité qui rend difficile leur prévision. La médiane des prévisions utilisée ici n'est donc pas suffisamment représentative pour correctement simuler ces variables.

On remarque également que la qualité des scores est moins bonne que pour les stades phénologiques et qu'elle est différente d'une variable à l'autre. Les meilleurs résultats obtenus dépendent principalement de la variable étudiée. Souvent, les scores ne sont pratiquement pas différents d'un jeu de simulations à l'autre. C'est le cas pour les variables « état de la réserve hydrique au stade épi à 1 cm » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison ».

Les jeux de simulations « modèle unique » présentent souvent les meilleurs biais, mais concernant les autres scores, le jeu de simulations « multi-modèles » est globalement meilleur, comme pour le SDD et le coefficient de corrélation. Une exception est observée pour certains scores calculés sur les sites de la région sud. Le biais calculé avec les jeux de simulations utilisant une descente d'échelle quantile-quantile est très souvent meilleur, sauf pour la variable « somme des précipitations totales entre les stades grain-laiteux et maturité ». Là encore, les meilleurs scores sont souvent obtenus pour les sites au nord, à l'exception des coefficients de corrélation, où aucune différence remarquable n'est observée.

Comme ce qui a été observé concernant les stades phénologiques, c'est la descente d'échelle basée sur les anomalies standardisées qui obtient les meilleurs SDD. Pour le score de RMSE, c'est moins évident. Selon la variable étudiée, ce n'est pas le même jeu de simulations qui révèle celui étant le plus performant. Le jeu de simulation « ARP3-AS4 » possède un RMSE meilleur calculé sur l'ensemble des sites pour les variables « somme du drainage entre la date de semis et le stade épi à 1 cm », « somme des précipitations totales entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds » et « somme des précipitations totales entre les stades grain-laiteux et maturité ».

Pour les variables « état de la réserve hydrique au stade épi à 1 cm » et « somme du déficit hydrique entre les stades 2 nœuds et floraison », les scores de RMSE sont pratiquement identiques pour les trois jeux de simulations utilisant la méthode quantile-quantile.

Pour la variable « état de la réserve hydrique au stade épi à 1 cm », l'utilisation de toutes les variables descendues d'échelle avec la méthode quantile-quantile permet d'obtenir les meilleurs RMSE.

Enfin, concernant l'état de la réserve hydrique aux stades « épiaison », « floraison » et « maturité », l'utilisation de seulement trois variables descendues d'échelle avec la méthode quantile-quantile présente les meilleurs RMSE. Les forçages météorologiques utilisés pour prévoir ces variables sont issus de précipitations avec une variabilité forte, mais également une ETP qui provient d'une climatologie. Cela introduit une source de prévisibilité supplémentaire qui n'est pas utilisée pour la prévision des stades phénologiques. Cela peut expliquer la variabilité observée dans les prévisions des variables hydriques.

On observe également que les scores de biais, de SDD et de RMSE calculés pour les sites de la région nord sont souvent meilleurs que dans la région sud.

A présent, on s'intéresse aux résultats obtenus pour les variables thermiques.

- Variables thermiques

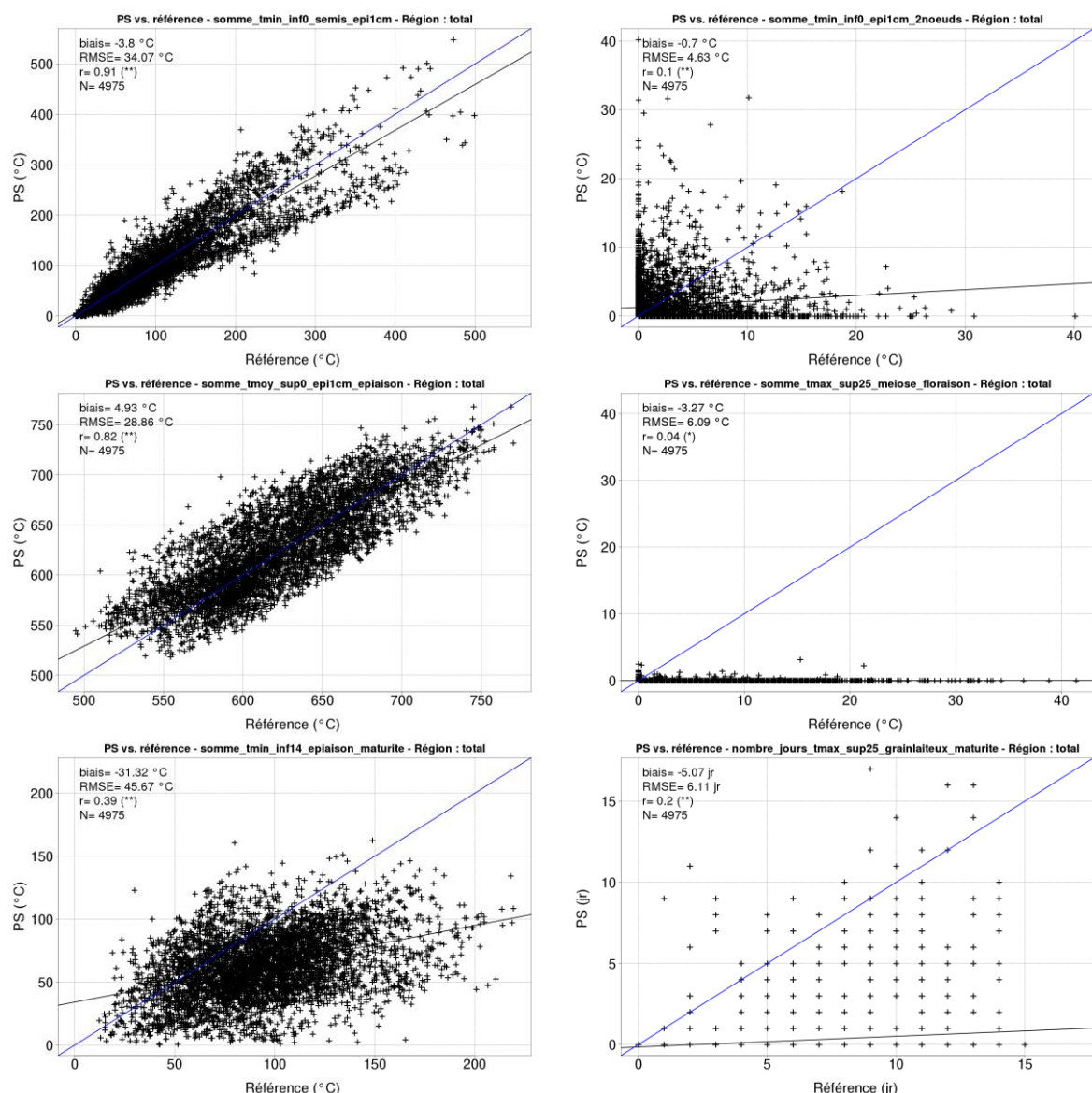


Figure 75: Prévisions des variables thermiques (intitulés indiqués sur les graphes) obtenues sur l'ensemble des sites avec le jeu de simulations « ARP3-AS4 » (en ordonnée) en fonction de la référence (en abscisse). Les scores déterministes sont indiqués sur chacun des graphes, ainsi que la droite de régression (en noir). En bleu, l'axe $y=x$ représentant les prévisions « parfaites ». L'unité du graphique en bas à droite est en jour, les autres sont en °C.

Comme pour les variables hydriques, les caractéristiques de chacune des distributions des prévisions obtenues sur l'ensemble des sites sont propres à la variable étudiée (Figure 75).

Concernant la variable « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade épi à 1 cm » (Figure 75, en haut à gauche), la relation avec les valeurs de référence est bonne, notamment pour la gamme de valeurs comprises entre 0 et 150°C. Au-delà, les prévisions sont plus dispersées. Le coefficient de corrélation est très fort

(0,91 et p-value < 0,001), par contre les autres scores sont assez médiocres, avec un biais négatif (-3.8°C) et un fort RMSE (38°C).

La variable « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds » (Figure 75, en haut à droite) présente une distribution de prévisions tout à fait différente de la précédente. Les températures négatives sont plus rarement simulées entre ces deux stades. La gamme de prévisions réalisée avec le jeu de simulations « PS » est proche de celle obtenue avec la référence. Néanmoins, la majorité des prévisions restent inférieures aux valeurs de référence si l'on considère la droite de régression très décalée par rapport à l'axe $y=x$ ainsi qu'un léger biais négatif (-0.7°C). Beaucoup de prévisions sont dispersées, réduisant ainsi le coefficient de corrélation à $r=0,1$ et augmentant le RMSE à presque 5°C.

La variable « somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et épiaison » (Figure 75, au milieu à gauche) possède des prévisions bien corrélées avec celles de la référence ($r=0,82$ et p-value < 0,001). Or, les prévisions sont très dispersées, avec un RMSE élevé (29°C), le résultat d'une importante gamme de valeurs prévues. Aucune prévision n'est cependant aberrante.

Pour les trois dernières variables, la qualité des prévisions obtenues avec le jeu de simulations « PS » est nettement moins bonne que pour les variables précédentes. Ainsi, pour la variable « somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades méiose et floraison » (Figure 75, au milieu à droite), le jeu de simulation ne prévoit pratiquement pas de valeurs différentes de zéro, avec des scores en conséquence. Cette méthode de descente d'échelle ne corrige pas suffisamment le biais. La variable « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » (Figure 75, en bas à gauche) est prévue de façon assez aléatoire, sans relation avec la référence, les scores l'illustrant également. C'est aussi le cas pour la variable « nombre de jours entre les stades grain-laiteux et maturité » (Figure 75, en bas à droite). La variabilité des prévisions est clairement inférieure à celle obtenue avec la référence.

On présente l'ensemble des scores obtenus pour les différents jeux de simulations (Tableau 9).

variable	score	ARP3	ARP3-AS4	ARP3-QQ4	ARP3-QQ6	MM3-QQ6
somme des températures minimales inférieures à 0°C entre la date de semis et le stade "épi à 1 cm"	biais	9.74	-3.80	-8.19	-8.46	-9.16
		13.18	-3.22	-9.91	-10.11	-10.88
		6.26	-4.38	-6.45	-6.79	-7.43
	SDD	41.63	33.86	30.79	30.99	26.28
		47.42	38.63	36.58	36.77	31.10
		34.46	28.21	23.40	23.64	20.11
	RMSE	42.75	34.07	31.86	32.12	27.83
		49.22	38.77	37.89	38.14	32.95
		35.03	28.55	24.28	24.60	21.44
	r	0.88	0.91	0.93	0.92	0.95
		0.87	0.89	0.90	0.90	0.93
		0.88	0.93	0.95	0.95	0.96

somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades "épi à 1 cm" et "2 nœuds"	biais	1.80	-0.70	-0.92	-1.07	-1.50
		1.92	-1.10	-0.75	-0.90	-1.42
		1.68	-0.28	-1.09	-1.25	-1.59
	SDD	5.50	4.59	3.86	3.83	3.53
		5.46	3.79	3.56	3.56	3.23
		5.53	5.25	4.13	4.07	3.81
	RMSE	5.78	4.65	3.96	3.97	3.84
		5.78	3.95	3.64	3.67	3.53
		5.78	5.26	4.27	4.26	4.13
	r	0.13	0.10	0.20	0.20	0.29
		0.05	0.11	0.18	0.16	0.23
		0.19	0.05	0.22	0.22	0.32
somme des températures moyennes supérieures à 0°C entre les stades "épi à 1 cm" et "épiaison"	biais	2.04	4.92	3.53	3.72	2.69
		7.00	4.11	2.37	2.61	1.40
		-2.98	5.74	4.70	4.83	4.00
	SDD	31.68	28.45	29.23	29.19	23.87
		31.24	28.00	28.68	28.55	22.12
		31.33	28.87	29.72	29.77	25.46
	RMSE	31.75	28.87	29.44	29.42	24.02
		32.01	28.30	28.78	28.67	22.16
		31.48	29.44	30.09	30.16	25.77
	r	0.77	0.82	0.81	0.81	0.87
		0.70	0.70	0.70	0.70	0.80
		0.67	0.75	0.74	0.74	0.80
somme des températures maximales supérieures à 25°C entre les stades "mésiose" et "floraison"	biais	-3.25	-3.26	-2.78	-2.64	-2.94
		-2.98	-2.97	-2.46	-2.28	-2.69
		-3.52	-3.56	-3.10	-3.01	-3.19
	SDD	5.16	5.15	5.15	5.16	5.03
		4.56	4.55	4.54	4.56	4.44
		5.69	5.67	5.68	5.68	5.54
	RMSE	6.10	6.09	5.85	5.80	5.82
		5.44	5.43	5.16	5.10	5.19
		6.69	6.70	6.47	6.43	6.40
	r	-0.03	0.04	0.12	0.13	0.26
		0.04	0.07	0.15	0.16	0.26
		-0.05	0.01	0.10	0.11	0.25
somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades "épiaison" et "maturité"	biais	-32.70	-31.33	-17.15	-7.19	-2.27
		-33.43	-27.50	-18.45	-8.73	-3.27
		-31.96	-35.19	-15.84	-5.62	-1.26
	SDD	37.43	33.23	34.74	36.27	29.76
		34.99	30.22	31.69	34.72	28.14
		39.74	35.61	37.53	37.70	31.29
	RMSE	49.70	45.67	38.75	36.97	29.85
		48.39	40.86	36.67	35.80	28.33
		50.99	50.06	40.74	38.12	31.31
	r	0.36	0.39	0.34	0.27	0.48
		0.42	0.42	0.42	0.30	0.48
		0.25	0.24	0.18	0.16	0.39

nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C entre les stades "grain-laiteux" et "maturité"	biais	-4.39	-5.07	-4.98	-0.47	-0.62
		-4.34	-4.39	-4.39	-0.47	-0.51
		-4.44	-5.76	-5.57	-0.47	-0.74
	SDD	4.06	3.40	3.46	3.67	3.08
		3.28	3.27	3.27	3.62	3.02
		4.72	3.38	3.54	3.71	3.14
	RMSE	5.98	6.11	6.06	3.70	3.14
		5.44	5.48	5.48	3.65	3.06
		6.49	6.68	6.60	3.74	3.22
	r	0.19	0.20	0.16	0.32	0.46
		0.06	0.06	0.14	0.27	0.42
		0.17	0.23	0.07	0.25	0.40

Tableau 9: Scores de biais, écart-type des différences (SDD), erreur quadratique moyenne (RMSE) et coefficient de corrélation (r) des prévisions des variables thermiques obtenues avec les différents jeux de simulations « PS ». Dans chaque case, la ligne du haut représente l'ensemble des sites, celle du milieu les sites de la région nord et celle du bas les sites de la région sud. Le meilleur score parmi tous les jeux de simulations est en gras. Les scores de la variable « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C entre les stades grain-laiteux et maturité » sont en jours.

Dans le Tableau 9, on peut constater que les scores dépendent fortement de la variable étudiée. A nouveau, quasiment tous les scores sont meilleurs avec les jeux de simulations utilisant une méthode de descente d'échelle. A l'exception du biais pour certaines variables, l'ensemble des scores est de meilleure qualité avec le jeu de simulations « multi-modèles ».

Dans l'ensemble, les scores ne sont pas très différents lorsqu'il s'agit de comparer le nombre de variables ou l'échéance qui ont été utilisés avec les données issue de la prévision saisonnière. Concernant le jeu de simulations basé sur le calcul d'anomalies standardisées, le biais obtenu est le meilleur seulement pour les deux variables correspondant aux sommes des températures minimales inférieures à 0°C. C'est l'inverse concernant le SDD. Les scores des variables « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » et « nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C entre les stades grain-laiteux et maturité » sont très dégradés avec le jeu de simulations « ARP3-QQ4 ». Cela peut traduire l'intérêt d'utiliser six mois d'échéance pour mieux prévoir ces variables.

Enfin, on peut remarquer que les écarts de scores entre la région nord et la région sud grandissent au fil des variables prévues. Compte-tenu de la différence de qualité entre le SDD et le coefficient de corrélation pour chacun des jeux de simulations, on ne peut pas conclure ici sur celui à utiliser pour prévoir le plus correctement possible les variables thermiques avec l'approche « modèle simple ».

L'approche « multi-modèles » améliore globalement les prévisions des dates médianes des différents stades phénologiques. C'est également le cas pour les autres catégories de variables, mais de façon moins évidente. On voit néanmoins une forte amélioration des

prévisions de l'état de la réserve utile à différents stades. Les scores sont meilleurs, notamment le SDD et la qualité de la relation avec le jeu de simulations de référence est conservée. Le biais est quant à lui souvent de meilleure qualité avec l'approche « modèle unique ». Le meilleur jeu de simulations obtenu avec la prévision saisonnière d'un point de vue déterministe est « MM3-QQ6 ».

Globalement, les stades phénologiques sont les variables les mieux prévues. Néanmoins, on a mis en évidence un comportement atypique d'un certain nombre de prévisions qui se détache des autres sur les graphes. Les variables hydriques, à l'exception de deux, sont beaucoup plus difficiles à reproduire. C'est également valable pour certaines variables thermiques. De manière générale, les prévisions issues des jeux de simulations « PS » sont sous-représentatives de la distribution des valeurs obtenues avec la référence. Pour ces deux catégories de variables prévues, une difficulté supplémentaire est ajoutée dans leur prévision, puisqu'elles sont incluses entre deux stades phénologiques déjà issus d'une prévision. Cela double la source d'erreur de prévision.

La prévision saisonnière introduit un biais de plus en plus important au fil de la prévision et principalement sur les sites de la région sud.

A une exception près, on a également mis en évidence l'intérêt d'utiliser une descente d'échelle afin d'adapter les données de prévision saisonnière en entrée du modèle Panoramix.

On peut également remarquer ici qu'hormis de rares exceptions, l'utilisation de la prévision saisonnière à six mois d'échéance n'améliore pas significativement les scores des variables dont l'occurrence se situe entre quatre et six mois de la date d'initialisation des simulations. De la même manière, les faibles coefficients de corrélation obtenus avec le jeu de simulations « ARP3-QQ6 » mettent en évidence une qualité moins bonne de l'ETP calculée avec les données issues de la prévision saisonnière, plutôt qu'en prenant les valeurs issues de la climatologie.

La climatologie présente dans les forçages météorologiques de certains jeux de simulations n'est pas à l'origine de la qualité du biais observé pour les stades phénologiques. Par contre, pour les autres catégories de variables, elle peut y contribuer. Cependant, cela ne semble pas être à l'origine des bons résultats obtenus pour certaines variables.

La méthode de descente d'échelle quantile-quantile améliore incontestablement le biais. Par contre, elle augmente l'erreur du modèle à travers une hausse du SDD. Ainsi, si l'on ne regarde que ce score couplé au coefficient de corrélation, on remarque que le jeu de simulations « ARP3-AS4 » présente les meilleurs résultats. Seules les prévisions des variables thermiques ne confirment pas ce résultat.

La distinction nord-sud n'est ici pas évidente, même si l'on retrouve souvent de meilleurs scores dans la région nord.

En conclusion, la qualité des jeux de simulations est fortement liée à la variable prévue. Néanmoins, il est difficile de conclure de manière générale sur l'évaluation de ces jeux de simulations. Une des principale informations relevée dans cette partie est que le jeu de

simulations « PS » est incapable de reproduire la variabilité de la référence indépendamment de la variable considérée, même si des coefficients de corrélation élevés peuvent être obtenus pour certaines variables. L'utilisation de la prévision en mode déterministe en est la première raison.

b. Les scores probabilistes

A présent, on s'intéresse à l'évaluation des différents jeux de simulations à l'aide de scores probabilistes. Le but est de caractériser l'information apportée par la prévision d'ensemble. Compte-tenu de la quantité d'information issue de ces scores, nous nous limitons à ne regarder que les résultats obtenus pour les stades phénologiques.

Pour cela, on s'intéresse aux caractéristiques du jeu de simulations « MM3-QQ6 », utilisant les données météorologiques issues de l'ensemble des cinq GCM (Figure 76).

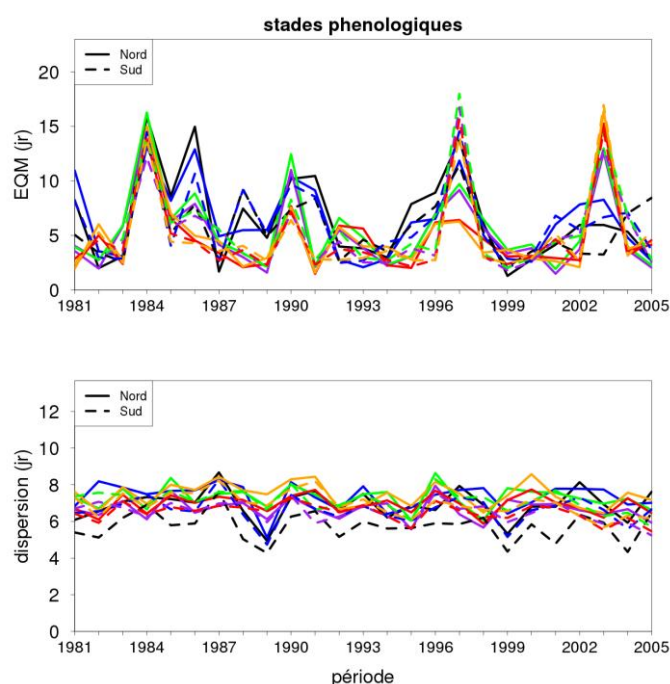


Figure 76: Diagrammes représentant l'EQM et la dispersion calculés par année pour les six stades phénologiques et par région pour le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». En noir est représenté le stade « épi à 1 cm », en bleu le stade « 2 nœuds », en violet le stade « épiaison », en vert le stade « floraison », en rouge le stade « maturité » et en orange le stade « récolte ».

En analysant la Figure 76, on cherche à vérifier que l'EQM et la dispersion de l'ensemble sont du même ordre de grandeur pour les prévisions des différents stades phénologiques et pour les deux régions étudiées. La gamme de valeurs obtenues pour chacun des scores sont proches, même si celle de l'EQM est légèrement supérieure, comprise entre 2 et 16 jours,

tandis que celle de la dispersion est comprise entre 4 et 8 jours. L'ensemble n'est donc sensiblement pas assez dispersif au regard de l'EQM obtenu. Ces caractéristiques sont retrouvées pour l'ensemble des jeux de simulations « PS » (non montrés ici).

On s'intéresse à présent aux diagrammes de Talagrand obtenus avec ce jeu de simulations (Figure 77). On rappelle ici que le diagramme de Talagrand permet de caractériser le comportement de la prévision d'ensemble (Sect. 4.2.2.).

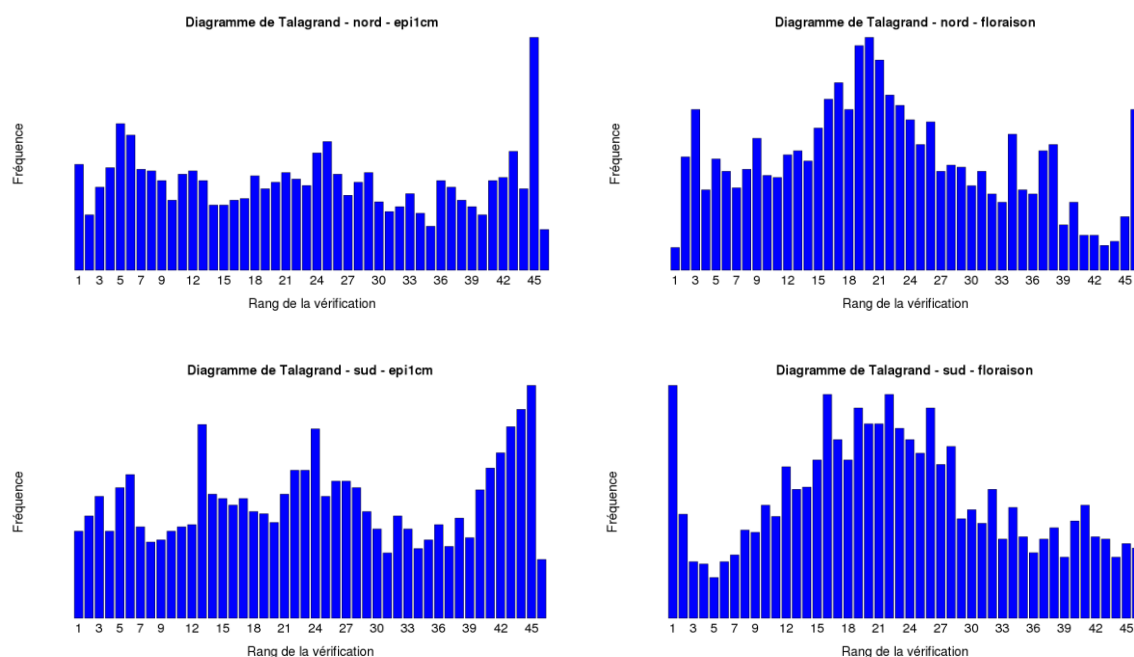


Figure 77: Diagrammes de Talagrand obtenus pour les différents ensembles de prévisions des stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et « floraison » (à droite), réalisés avec le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». A gauche, pour les sites au nord, à droite, pour ceux du sud.

Concernant le stade « épi à 1 cm », tous les rangs possèdent un nombre important d'observations, donnant lieu à des diagrammes relativement équilibrés. On relève un biais négatif observé par la surpopulation des rangs de gauche, plus important dans la région nord (Figure 77, en haut à gauche). Pour le stade « floraison », on remarque une sur-dispersion du système de prévisions, avec une surpopulation des rangs du milieu. Pour la région sud (Figure 77, en bas à droite), on observe également un biais positif avec une surpopulation du premier rang. Ces caractéristiques sont différentes de celles obtenues avec l'utilisation d'un « modèle unique » (non montré ici). Pour ces dernières, un biais positif est aperçu. Néanmoins, les caractéristiques mises en évidences ici sont retrouvées pour chacun des jeux de simulations « multi-modèles ».

Enfin, on analyse les différents diagrammes de fiabilité obtenus avec ce jeu de simulations (Figure 78).

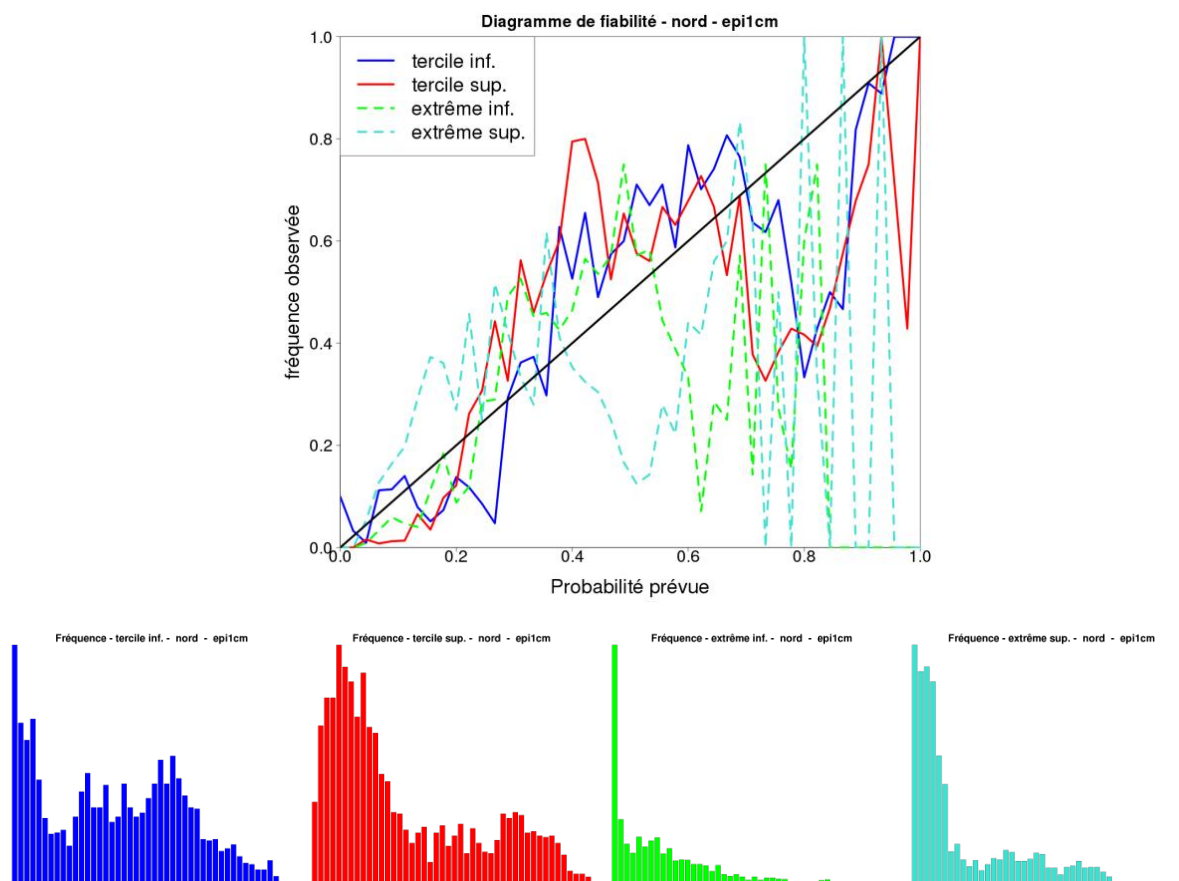


Figure 78: Diagramme de fiabilité et histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité (au nombre de 46) pour les prévisions du stade « épi à 1 cm » sur les sites de la région nord, obtenus avec le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». Les quatre catégories de prévisions sont représentées : les terciles inférieur (en bleu) et supérieur (en rouge), les extrêmes inférieur (en vert) et supérieur (en cyan).

La fiabilité du système de prévision saisonnière est évaluée grâce au diagramme de fiabilité associé aux histogrammes de fréquence d'occurrence, présentés sur la Figure 78 pour le stade « épi à 1 cm » et pour la région nord. Les prévisions des catégories « tercile » ont une fiabilité correcte jusqu'à une probabilité de 70%. En effet, jusqu'à ce seuil, les courbes de fiabilité oscillent autour de la diagonale, tout comme les prévisions de la catégorie « extrême supérieur », jusqu'à la probabilité 50%. Au-delà, toutes les courbes chutent, exprimant ainsi des prévisions d'événements n'ayant pas lieu. Pour la catégorie « extrême inférieur », cette chute est observée dès la probabilité 40%. Seule la catégorie « tercile inférieur » présente une fiabilité correcte pour les probabilités supérieures à 90%, avec un retour de la courbe de fiabilité proche de la diagonale. Si l'on observe à présent les histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité (Figure 78, en bas), on remarque que les probabilités minimales sont largement utilisées, notamment pour la catégorie « extrême ». Concernant les catégories « tercile », beaucoup d'autres catégories de probabilités sont utilisées, même si un biais positif subsiste. On observe ici un problème d'échantillonnage du système de prévisions. En effet, comme on peut l'apercevoir sur les histogrammes de fréquence d'occurrence, les fortes probabilités sont quasiment inexistantes, le système de

prévision ne détecte pas ces événements, ce qui a pour conséquence le « bruitage » pour ces catégories de probabilité.

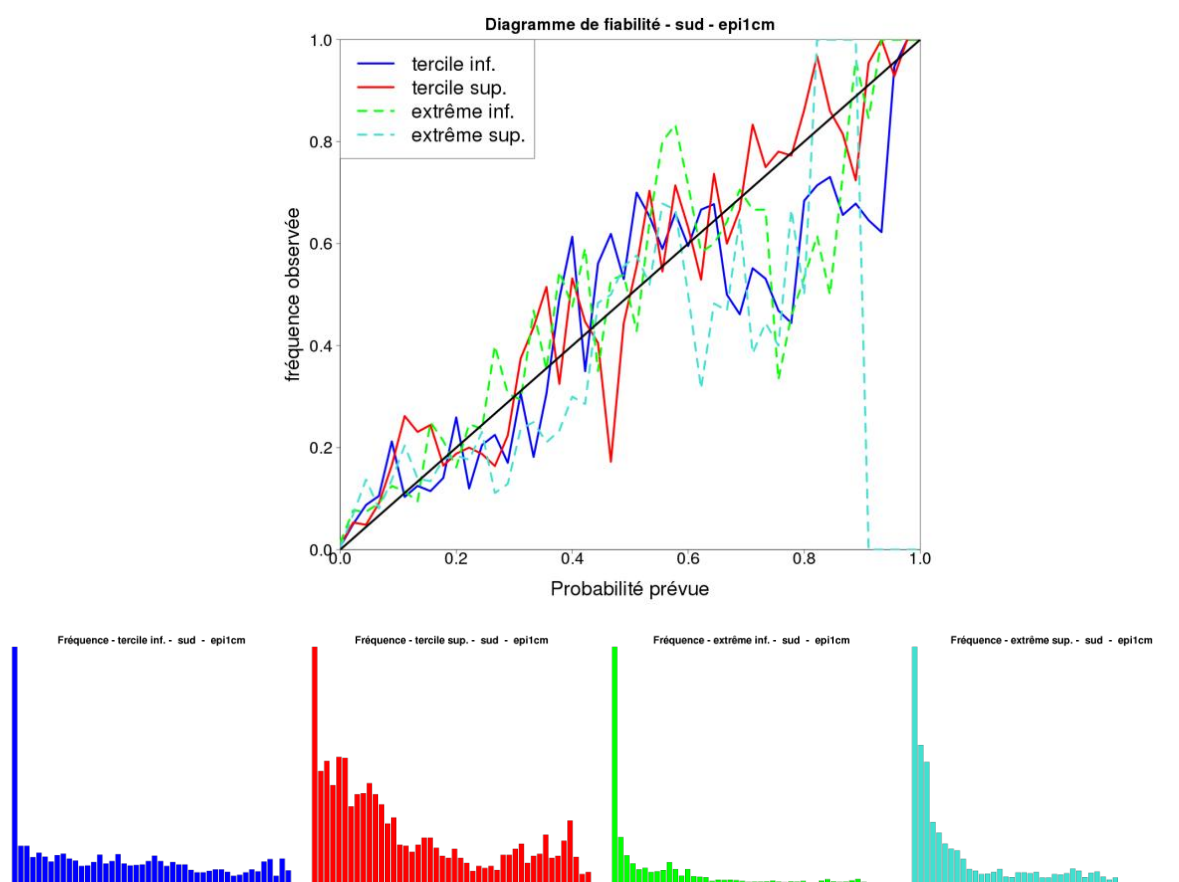


Figure 79: Comme sur la Figure 78, mais pour les sites de la région sud.

En ce qui concerne la fiabilité obtenue dans la région sud, cette fois la qualité est très supérieure à celle observée dans la région nord (Figure 78). Quasiment toutes les courbes sont proches de la diagonale, même si l'on observe un léger décrochement au-delà de 60% de probabilité. Seule la catégorie « extrême supérieur » ne présente pas une bonne fiabilité au-delà de 90% de probabilité (à cause du problème d'échantillonnage). Tous les histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité montrent une importante utilisation des faibles probabilités (Figure 79, en bas). Seule la catégorie « tercile supérieur » présente un nombre significatif d'observations dans toutes les classes de probabilités, mais reste biaisée.

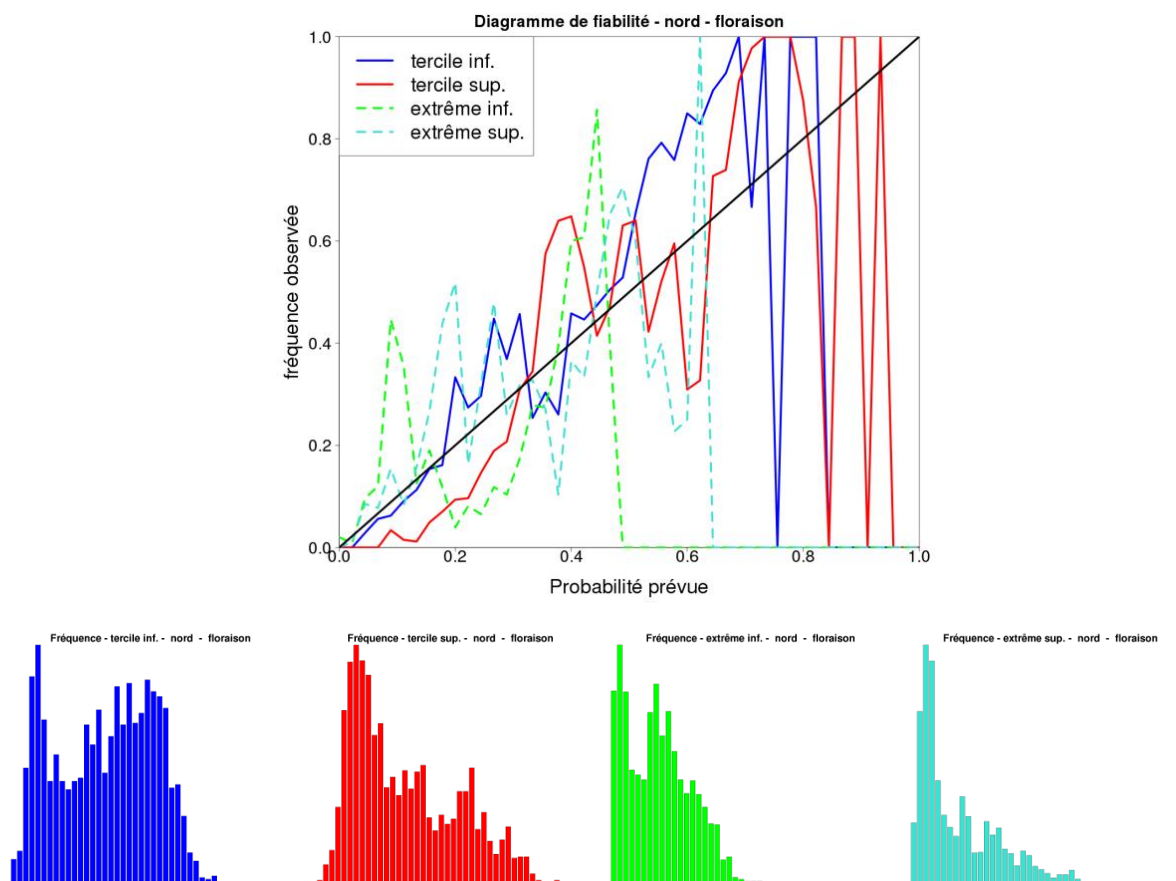


Figure 80: Comme sur la Figure 78, mais pour le stade « floraison ».

Si l'on examine à présent la fiabilité observée pour les prévisions d'ensemble du stade « floraison » pour la région nord (Figure 80), les caractéristiques sont différentes de celles venant d'être présentées. Jusqu'à une probabilité de 40%, toutes les courbes sont relativement autour de la diagonale, traduisant une bonne fiabilité. Au-delà, deux cas de figure se distinguent : concernant la catégorie « tercile », la fiabilité est mauvaise, avec une oscillation des courbes très marquée. Pour la catégorie « extrême », on note une absence d'événement observé au-delà de 50% et 60% de probabilité pour les prévisions de la catégorie « extrême inférieur » et « extrême supérieur », respectivement. Quant aux histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité, ils révèlent cette fois une utilisation plus large des différents seuils. Les fortes probabilités de prévisions sont peu utilisées. Pour les catégories « extrême », les faibles probabilités de prévisions sont très dominantes.

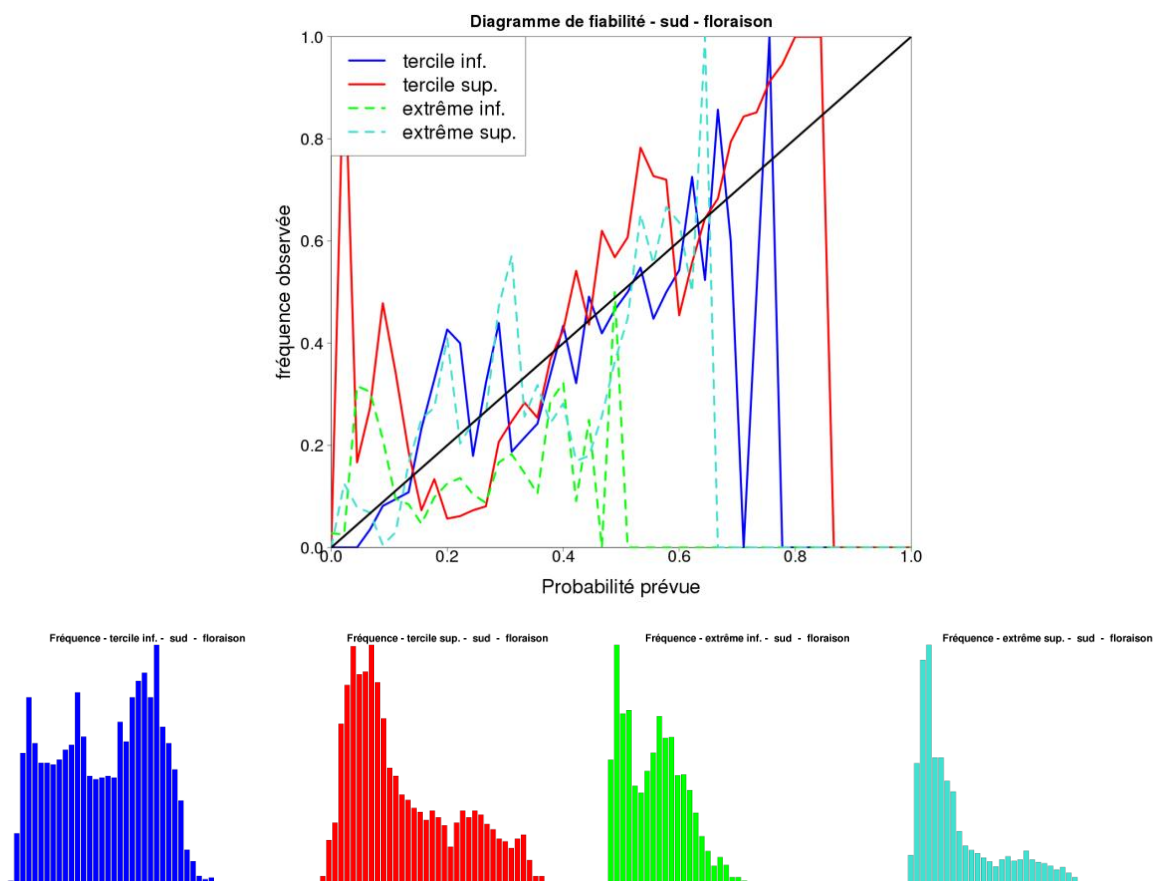


Figure 81: Comme sur la Figure 80, mais pour les sites de la région sud.

Si l'on observe cette fois la fiabilité pour la région sud (Figure 81), elle est observée seulement entre 20% et 80% de probabilité pour la catégorie « tercile supérieur » et entre 0 et 60% de probabilité pour les catégories « tercile inférieur » et « extrême supérieur ». La catégorie « extrême inférieur » ne présente pas une bonne fiabilité au-delà de 50%, expliqué de nouveau par un problème d'échantillonnage. Toutes les prévisions montrent une probabilité d'occurrence de l'événement nettement supérieure à ce qui est réellement observé.

Les histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité (Figure 81, en bas) sont peu différents de ceux détaillés pour la région nord.

Les scores probabilistes indiquent une bonne qualité générale de notre système de prévision « multi-modèles ». Cependant, certains défauts sont relevés, comme un biais positif ou une absence de fiabilité pour certaines catégories. La dispersion des membres de l'ensemble est généralement meilleure avec le système multi-modèles, notamment pour les stades phénologiques en fin de cycle, illustrée par les diagrammes de Talagrand.

La qualité globale du jeu de simulations « MM3-QQ6 » d'un point de vue ensembliste est mise en évidence ici. Le système de prévision analysé dans cette partie est de qualité égale ou meilleure que les autres jeux de simulations (non montrés ici). Par conséquent, ce jeu de

simulations sera ensuite comparé avec le jeu de simulations « fréq » afin de déterminer quel système de prévision est le plus performant.

En conclusion, le système de prévisions est relativement biaisé, produisant des prévisions généralement sous-estimées, pouvant être à l'origine d'un biais positif. Ce biais diminue au fil des stades phénologiques. Ceci peut être relié à la variabilité décroissante des prévisions déjà mise en évidence précédemment. Néanmoins, la fiabilité est présente au regard des probabilités d'occurrence cohérentes avec la fréquence de l'événement réellement observé. Elle n'est cependant pas observée pour toutes les catégories de prévisions (notamment les catégories « extrêmes »), ni pour toutes les probabilités de prévision (autour de 100%, la fiabilité est absente dû à un problème d'échantillonnage). Les histogrammes de fréquence d'utilisation de chaque classe de probabilité montrent que les classes de faible probabilité sont les plus utilisées : peu de membres s'accordent à prévoir l'occurrence d'un stade phénologique.

5.3. Confrontation de simulations avec données de prévision saisonnière et avec calcul fréquentiel

L'évaluation de l'ensemble des simulations a été faite à l'aide des différents scores déterministes et probabilistes. On compare à présent les deux systèmes de prévisions étudiés dans cette thèse : le calcul fréquentiel et l'utilisation de données de prévision saisonnière. Pour cela, on sélectionne le meilleur jeu de simulations « PS » mis en évidence précédemment : le jeu de simulations « MM3-QQ6 ». La comparaison est réalisée d'un point de vue déterministe et ensembliste.

5.3.1. Les prévisions déterministes

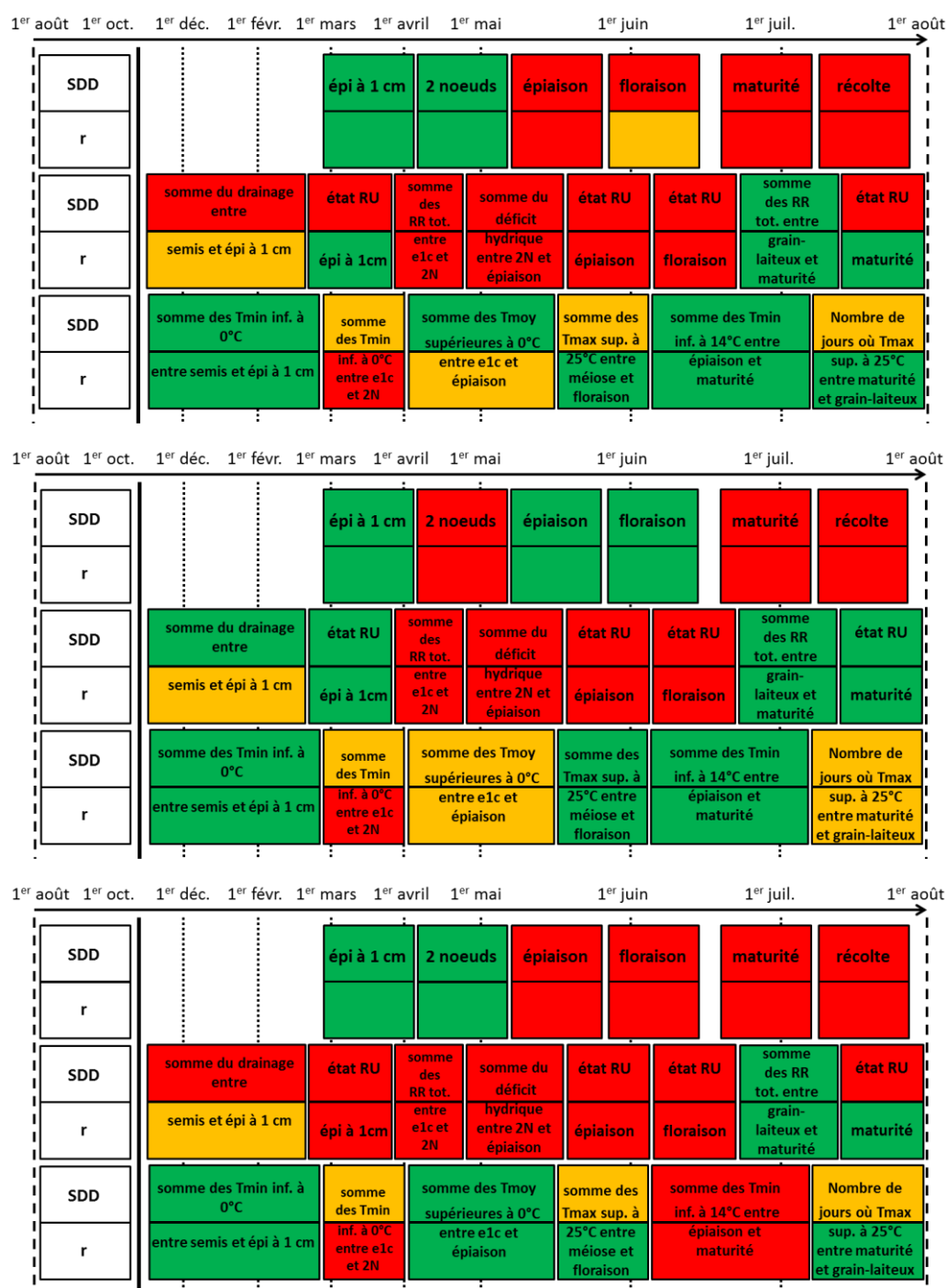


Figure 82: Récapitulatif du SDD et du coefficient de corrélation obtenus pour la prévision des stades phénologiques entre le jeu de simulations « MM3-QQ6 » et « fréq-ens » présentés dans les Sect. 5.1. et 5.2. Pour chaque variable, les scores sont représentés comme l'indique les cellules de gauche. En vert, il est indiqué que le score obtenu avec le jeu de simulations « PS » est meilleur que celui avec « fréq-ens », en rouge le cas contraire et en orange les scores sont identiques. En haut, le graphe représente les scores de l'ensemble des 199 sites, au milieu ceux obtenus pour les sites de la région nord et en bas ceux obtenus pour les sites de la région sud.

Dans un premier temps, on remarque sur la Figure 82 que le meilleur jeu de simulations, identifié par les différents scores obtenus, est différent d'une variable à l'autre.

Les scores calculés sur l'ensemble des sites (Figure 82, graphe du haut), indiquent que concernant les stades phénologiques, le jeu de simulations « PS » est meilleur uniquement pour les deux premiers stades. Au-delà, le calcul fréquentiel présente des scores (le SDD et le coefficient de corrélation) meilleurs.

Pour les deux scores présentés ici, la majorité des variables hydriques prévue sur l'ensemble des sites est mieux prévue avec le calcul fréquentiel. Seuls les scores obtenus pour la variable « somme des précipitations totales entre les stades grain-laiteux et maturité » sont meilleurs avec le jeu de simulations « PS ». Le coefficient de corrélation obtenu pour la variable « état de la réserve utile au stade épi à 1 cm » est également en faveur du jeu de simulations « PS ».

Enfin, concernant les variables thermiques, les résultats obtenus sur l'ensemble des sites sont différents. Seul le coefficient de corrélation obtenu pour la variable « somme des températures minimales inférieures à 0°C entre les stades épi à 1 cm et 2 nœuds » est moins bon avec le jeu de simulations « PS ».

Concernant les autres variables, on peut observer que les scores issus du jeu « PS » sont toujours au moins égaux ou supérieurs à ceux obtenus avec le jeu « fréq-ens ».

Si l'on s'intéresse aux résultats distingués par région, on remarque plusieurs différences. Pour les sites au nord (Figure 82, graphe du milieu), par rapport aux scores obtenus sur l'ensemble des sites, le SDD et le coefficient de corrélation sont meilleurs avec le jeu « PS » pour les stades « épiaison » et « floraison », mais plus pour le stade « 2 nœuds ». Les scores sont dans ce cas meilleurs avec le jeu de simulations « PS » pour les variables en début et en fin de cycle. Peu de changements sont observés pour les variables thermiques. Concernant la région sud (Figure 82, graphe du bas), les scores sont globalement identiques à ceux obtenus sur l'ensemble des sites. Seule la variable « somme des températures minimales inférieures à 14°C entre les stades épiaison et maturité » est mieux prévue avec le calcul fréquentiel.

Les scores déterministes démontrent les résultats limités que l'on peut obtenir avec le jeu de simulations « PS ». Globalement, cette méthode améliore les prévisions des stades situés avant juin, à l'exception des variables hydriques où là pratiquement aucune prévisibilité n'est apportée. Seuls sur les sites du nord certaines variables présentent des bons résultats avec la prévision saisonnière. Les meilleurs résultats sont cependant obtenus pour les variables thermiques. Les variables basées sur la somme des températures sont correctement prévues avec le système de prévision « PS ».

Considérons à présent les scores d'anomalies standardisées obtenus pour chacun des jeux de simulations : « PS », « fréq » et « réf ». Jusqu'à présent, les scores utilisés ont été calculés sur la période 1981-2005, mais aucun score n'a été regardé à l'échelle de la campagne. Le but est de voir les années où l'événement ayant eu lieu présente un écart par rapport à la tendance « normale », à travers des anomalies standardisées supérieures à un seuil prédéfini. Puis, il s'agit de vérifier si la prévision saisonnière identifie également ces années « atypiques » et de

la comparer aux performances du calcul fréquentiel (Figure 83). Cette partie se limite également aux prévisions des stades phénologiques.

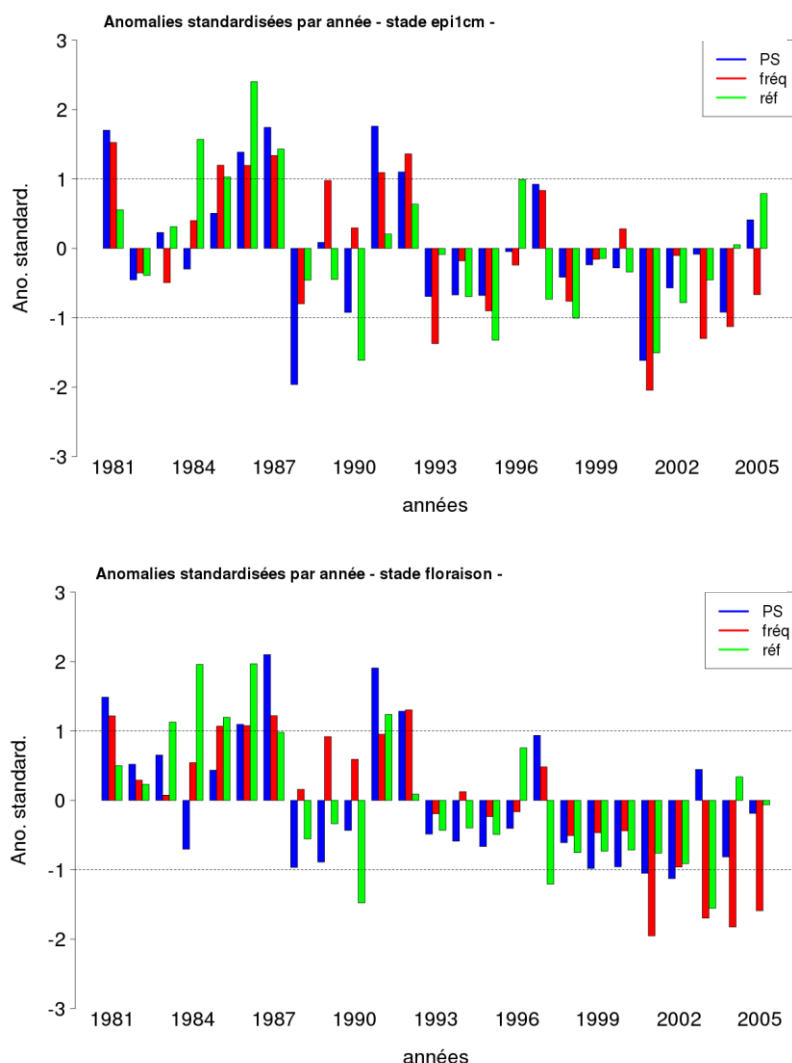


Figure 83: Anomalies standardisées annuelles calculées sur l'ensemble des prévisions des stades « épi à 1 cm » et « floraison » pour les jeux de simulations « MM3-QQ6 », « fréq-dét » et « réf » sur la période 1981-2005.

Les années qualifiées d'« atypiques » sont représentées sur la Figure 83 par des anomalies standardisées supérieures (inférieures) à 1 (-1). Une anomalie standardisée positive représente une date prévue supérieure à la moyenne. Comme il s'agit du jour de l'année, c'est une prévision « en retard » par rapport à la date moyenne. Une anomalie standardisée négative représente donc une prévision « en avance ».

Pour les prévisions du stade « épi à 1 cm » (Figure 83, en haut), on constate que les années « atypiques » sont observées par la référence au nombre de 9 (sur 25), avec 5 années « en retard » (de 1984 à 1987 et en 1996) et 4 « en avance » (en 1990, 1995, 1998 et 2001). Il n'y a pas de tendance observée sur la période 1981-2005. Pour le calcul fréquentiel, ce dernier en distingue quant à lui 11, soit deux de plus, dont 7 « en retard » (en 1981, de 1985 à 1987,

en 1989, 1991 et 1992) et seulement 4 « en avance » (en 1993, 2001, 2003 et 2004). Dans un premier temps, on constate que les prévisions issues du calcul fréquentiel ont une tendance négative, c'est-à-dire qu'elles prévoient une occurrence du stade « épi à 1 cm » de plus en plus tôt et de façon marquée sur les dernières années. Ensuite, on remarque que sur les 11 années prévues « atypiques », seules 4 sont prévues à raison (soit 36% : de 1985 à 1987 pour les années « en retard » et en 2001 pour les années « en avance »). Cela signifie que 7 sont prévues à tort et que 5 ne sont pas prévues. Enfin, pour la prévision saisonnière, 7 années sont prévues comme étant « atypiques », dont 5 « en retard » (en 1981, de 1985 à 1986 et de 1991 à 1992) pour seulement 2 « en avance » (en 1988 et 2001). Il n'y a cette fois-ci pas de tendance marquée. Sur les 7 années définies comme « atypiques », seulement 3 le sont à raison (soit 43% : en 1986 et 1987 pour les années « en retard » et en 2001 pour les années « en avance »). Ainsi, 4 années sont prévues « atypiques » à tort et 6 ne sont pas prévues.

Concernant le stade « floraison », on constate que jusqu'en 1987, toutes les années sont observées « en retard », dont 5 sont qualifiées d'« atypiques ». Depuis 1993, c'est l'inverse, la quasi-totalité des années sont observées « en avance » par la référence, même si seulement 2 sont qualifiées d'« atypiques ». On relève ici une tendance négative. Là encore, ce sont au total 9 années qualifiées d'« atypiques », dont 6 « en retard » (de 1983 à 1987 et en 1991) et seulement 3 « en avance » (en 1990, 1997 et 2003). Les années 1983 et 2003 sont à présent « atypiques » (par rapport au stade « épi à 1 cm ») et les années 1995 et 2001 sont devenues « normales ». Le calcul fréquentiel montre de nouveau une tendance négative marquée et voit également 9 années « atypiques », dont 5 « en retard » (en 1981 et de 1984 à 1986) et 4 « en avance » (en 2001 et de 2003 à 2005). Sur les 9 années prévues « atypiques », seulement 4 le sont à juste titre (soit 44% : de 1985 à 1987 et en 2003). Ainsi, 5 années sont prévues à tort et autant ne sont pas prévues. Concernant la prévision saisonnière, une tendance négative est également observée, mais de façon moins évidente. 8 années sont prévues « atypiques », dont 5 « en retard » (en 1981, 1986, 1987, 1991 et 1992) et 3 « en avance » (en 1999, 2001 et 2002). Parmi ces 8 années, 3 sont bien prévues (en 1986, 1987 et 1991). Ce sont donc les mêmes résultats que ceux obtenus avec le calcul fréquentiel. A noter qu'aucune année « en avance » n'est bien prévue, mais toutes les années avec une anomalie négative (mais sans dépasser le seuil d'anomalie de ± 1), à l'exception de 2 (1997 et 2003), sont vues par la prévision saisonnière.

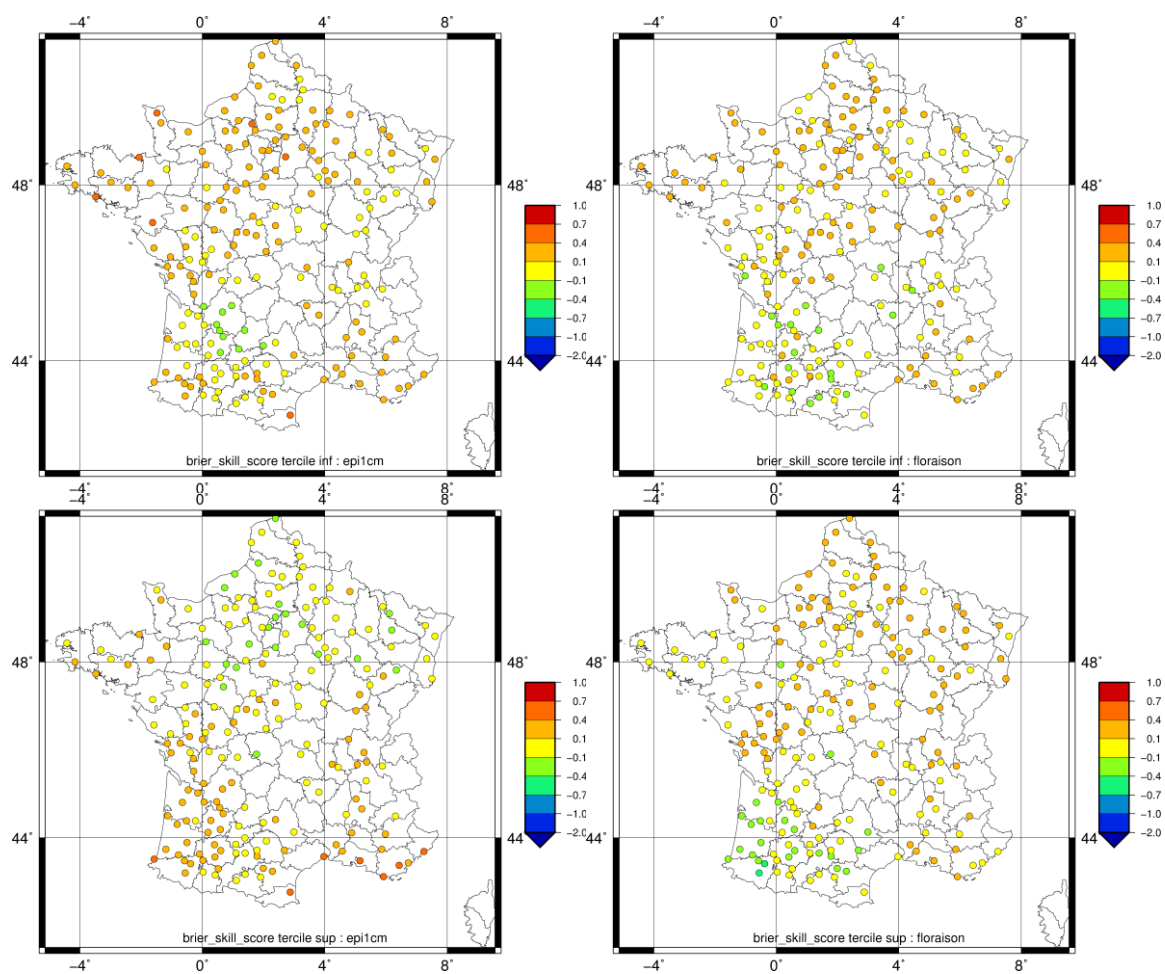
En conclusion, les scores obtenus avec le meilleur jeu de simulations « PS » identifié dans la partie précédente (Sect. 5.2.) sont, par rapport au jeu de simulations « fréq », meilleurs dans certains cas. Le premier cas concerne la quasi-totalité des stades phénologiques, même si l'on n'atteint pas le coefficient de corrélation obtenu avec le jeu de simulations « fréq ». Ensuite, pour quelques variables de chaque catégorie, les prévisions saisonnières sont meilleures, à savoir les variables hydriques en début et en fin de cycle cultural et plus de la moitié des variables thermiques. Même pour ces dernières, les scores ne sont pas tous en accord, comme le montre le biais. Les autres variables, sauf rares exceptions, ne sont pas aussi bien représentées avec la prévision saisonnière. En regardant les résultats par région, on peut se rendre compte que certains scores obtenus avec la prévision saisonnière sont meilleurs que

lorsqu'ils sont calculés sur l'ensemble des sites et inversement. Une plus grande majorité de scores sont meilleurs dans la région nord que dans la région sud.

D'un point de vue anomalies annuelles, le jeu de prévision saisonnière relève quelques années « atypiques » identifiées par la référence. De manière générale, la tendance observée (une avance au fil des ans de l'occurrence des stades) est également perçue par la prévision saisonnière. Sa capacité de prévision du stade « épi à 1 cm » est meilleure que le calcul fréquentiel, avec un pourcentage d'années bien prévues supérieur. La prévision saisonnière fait jeu égal avec le calcul fréquentiel pour la prévision du stade « floraison ». On a également remarqué que depuis les années 2000, le calcul fréquentiel tend à surestimer très largement l'avance de l'occurrence des stades étudiés ici, ce qui n'est pas le cas pour la référence. La dernière étape consiste maintenant à comparer les deux ensembles de prévisions obtenus d'un point de vue ensembliste.

5.3.2. Les prévisions probabilistes

Dans un premier temps, on considère les BSS des prévisions des différents stades phénologiques obtenus avec les deux jeux de simulations « MM3-QQ4 » et « fréq-ens » (Figure 84). Les prévisions utilisant la méthode de calcul fréquentiel font office de « référence » dans ce cas. La taille de l'ensemble utilisé est néanmoins différente pour chacun des jeux de simulations (45 membres contre 20). Il faut donc analyser les résultats qui vont être présentés en gardant à l'esprit cette différence de taille de l'ensemble. Cependant, les scores probabilistes présentés pour ce jeu de simulations « PS » ont également été calculés pour un jeu de simulations avec 18 membres seulement. Les résultats obtenus diffèrent comme cela été prévu, mais ne change en rien les conclusions qui vont être présentées.



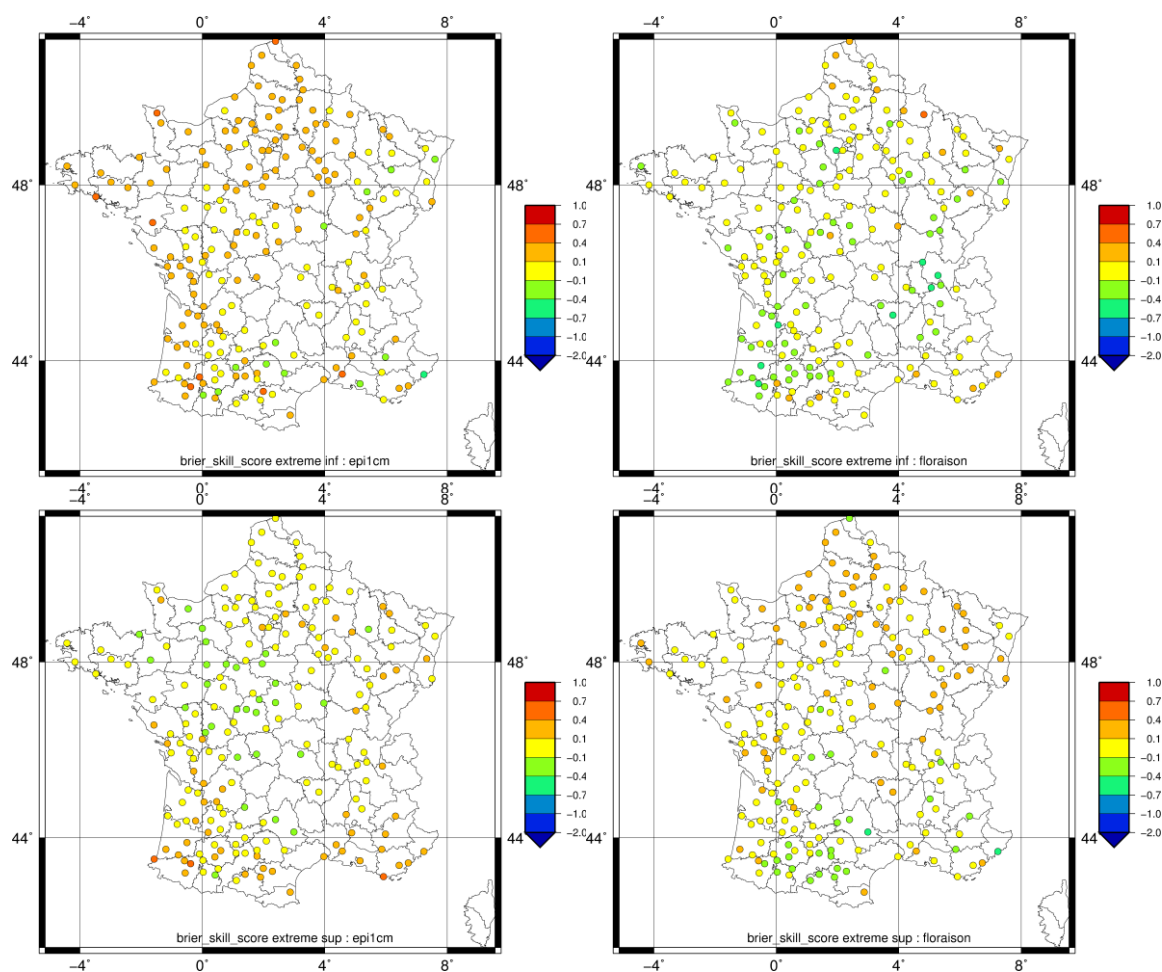


Figure 84: Cartes des BSS calculés par site pour les stades phénologiques « épi à 1 cm » (à gauche) et « floraison » (à droite), obtenus pour les différentes catégories de prévisions avec le jeu de simulations « MM3-QQ4 ». De haut en bas : la catégorie « tercile inférieur », « tercile supérieur », « extrême inférieur » et « extrême supérieur ».

Le BSS observé sur les cartes de la Figure 84 révèle quel ensemble de prévisions est de meilleure qualité. En effet, si celui-ci est positif, alors d'après l'équation (16) (Sect. 4.2.2.), le score de Brier est meilleur pour le jeu de simulations « PS » (représenté par des couleurs « chaudes » sur les cartes, à l'exception du jaune qui montre une différence non significative).

Concernant les prévisions de la catégorie « tercile inférieur » (Figure 84, en haut), on remarque que beaucoup de sites sont en jaune et en vert, notamment dans le sud-ouest. On retrouve ce qui avait été mis en évidence dans l'analyse des scores déterministes obtenus pour les jeux de simulations « PS » : les sites de la région sud-ouest présentent des prévisions de moins bonne qualité. On le retrouve ici à travers la qualité de l'ensemble. Pour les autres régions, notamment dans le sud-est et dans le nord-ouest, on observe des sites en orange, là où la qualité de l'ensemble réalisé avec la prévision saisonnière est la meilleure. Ces sites s'étendent dans la région nord-est pour le stade « floraison ». On retrouve une qualité croissante au fil des stades, ce qui avait également été montré pour les scores déterministes (non montré ici pour les autres stades).

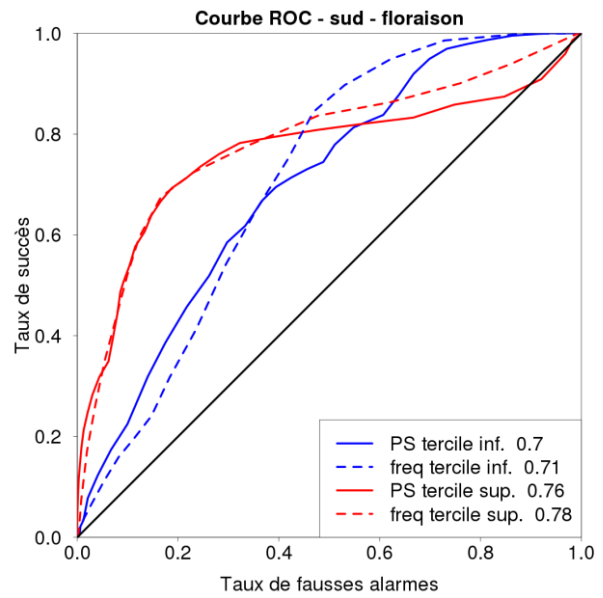
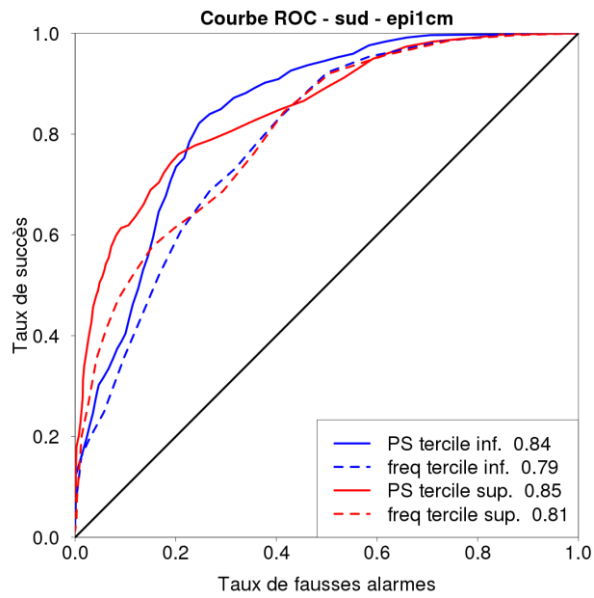
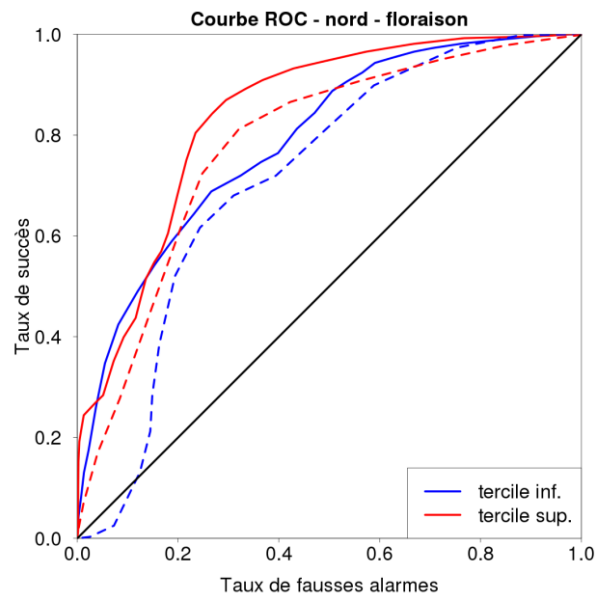
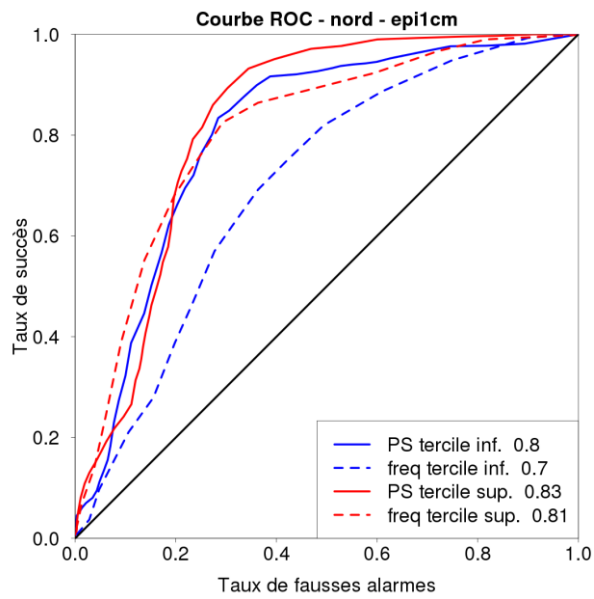
Concernant les prévisions dans la catégorie « tercile supérieur » (Figure 84, 2^{ème} ligne), on observe pratiquement les caractéristiques opposées : de nombreux sites dans le sud-ouest sont en orange, tandis que tous les sites nord sont en vert. La qualité est spatialement inversée. On conserve tout de même de nombreux sites en orange, autour de la Méditerranée, avec même quelques sites en rouge, traduisant une excellente qualité de la prévision saisonnière par rapport au calcul fréquentiel. Ce n'est pas le cas pour le stade « floraison », qui a les mêmes caractéristiques pour les deux catégories de prévisions.

Si l'on considère à présent la catégorie « extrême inférieur » (Figure 84, 3^{ème} ligne), on retrouve pour les prévisions du stade « épi à 1 cm » des sites en orange dispersés sur la France, que l'on aperçoit groupés dans le nord et sur la bordure Atlantique. Une partie du sud-ouest et du nord-est présentent des sites en vert. Pour le stade « floraison », les sites de bonne qualité ont disparu. Seuls quelques sites en orange sont présents, notamment le long de la frontière belge.

On observe des caractéristiques opposées entre ces deux stades pour la catégorie « extrême supérieur » (Figure 84, en bas). Les sites montrant une meilleure qualité obtenue avec le jeu de simulations « PS » sont situés à l'extrême sud pour le stade « épi à 1 cm » et au nord pour le stade « floraison ».

Globalement, aucune prévision n'est de mauvaise qualité pour le jeu de simulations « PS » (sauf de très rares exceptions indiquées par des sites en bleu). A l'exception de la catégorie « extrême inférieur », les prévisions du jeu de simulations « PS » s'améliorent au fil des stades phénologiques.

Afin de terminer cette évaluation, on s'intéresse à présent aux courbes ROC (Figure 85).



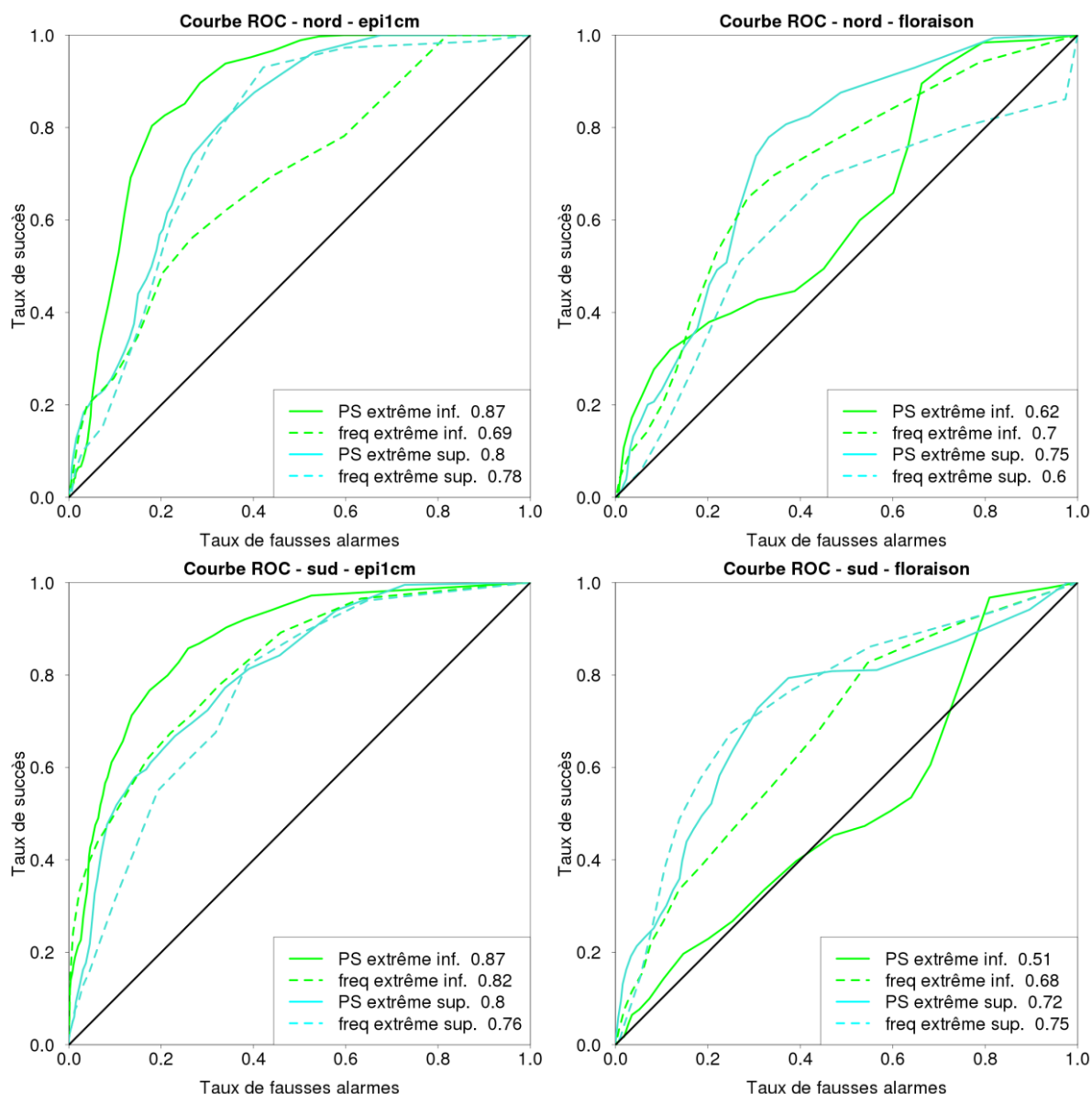


Figure 85: Courbes ROC des prévisions d'ensemble des stades « épi à 1 cm » (à gauche) et « floraison » (à droite) obtenues avec le jeu de simulations « MM3-QQ4 ». Sur les quatre premiers graphes est représentée la catégorie « tercile ». Sur les quatre derniers graphes est représentée la catégorie « extrême ». Dans les deux cas, sont représentés en haut les sites au nord et en bas les sites au sud. L'aire sous la courbe (AUC) est également indiquée dans la légende du graphe.

Sur la Figure 85, on remarque de façon générale que les courbes sont quasiment toutes au-dessus de la diagonale : l'ensemble des prévisions prévoit davantage d'événements avec succès par rapport au nombre de fausses alarmes. On rappelle que plus les courbes sont proches du coin haut gauche, meilleur est le système de prévisions. Si une courbe est au-dessus de l'autre, cela traduit un meilleur système de prévisions d'ensemble par rapport à la simulation déterministe de référence. Pour le stade « épi à 1 cm », les meilleures prévisions appartiennent à la catégorie « extrême inférieur », au nord comme au sud, et sont obtenues avec le calcul fréquentiel. Les prévisions des catégories « terciles » sont peu différentes,

excepté dans la région nord et pour le « tercile supérieur », où le jeu de simulations « fréq-ens » est le plus performant. Pour le stade « floraison », c'est différent : la qualité générale du système de prévision est moins marquée, avec des courbes plus proches de la diagonale. C'est la même constatation si l'on regarde les scores obtenus par région. La région nord présente les meilleurs résultats selon les courbes ROC. Les prévisions des catégories « tercile » sont nettement meilleures. Les courbes de la catégorie « extrême inférieure » sont sous la diagonale pour la région sud. Au nord, le jeu de simulations « fréq-ens » est meilleur pour la catégorie « extrême inférieur » mais également pour toutes les autres catégories de prévisions au sud.

On compare à présent l'ensemble des scores probabilistes obtenus pour les jeux de simulations « PS » et « fréq » (Figure 86).

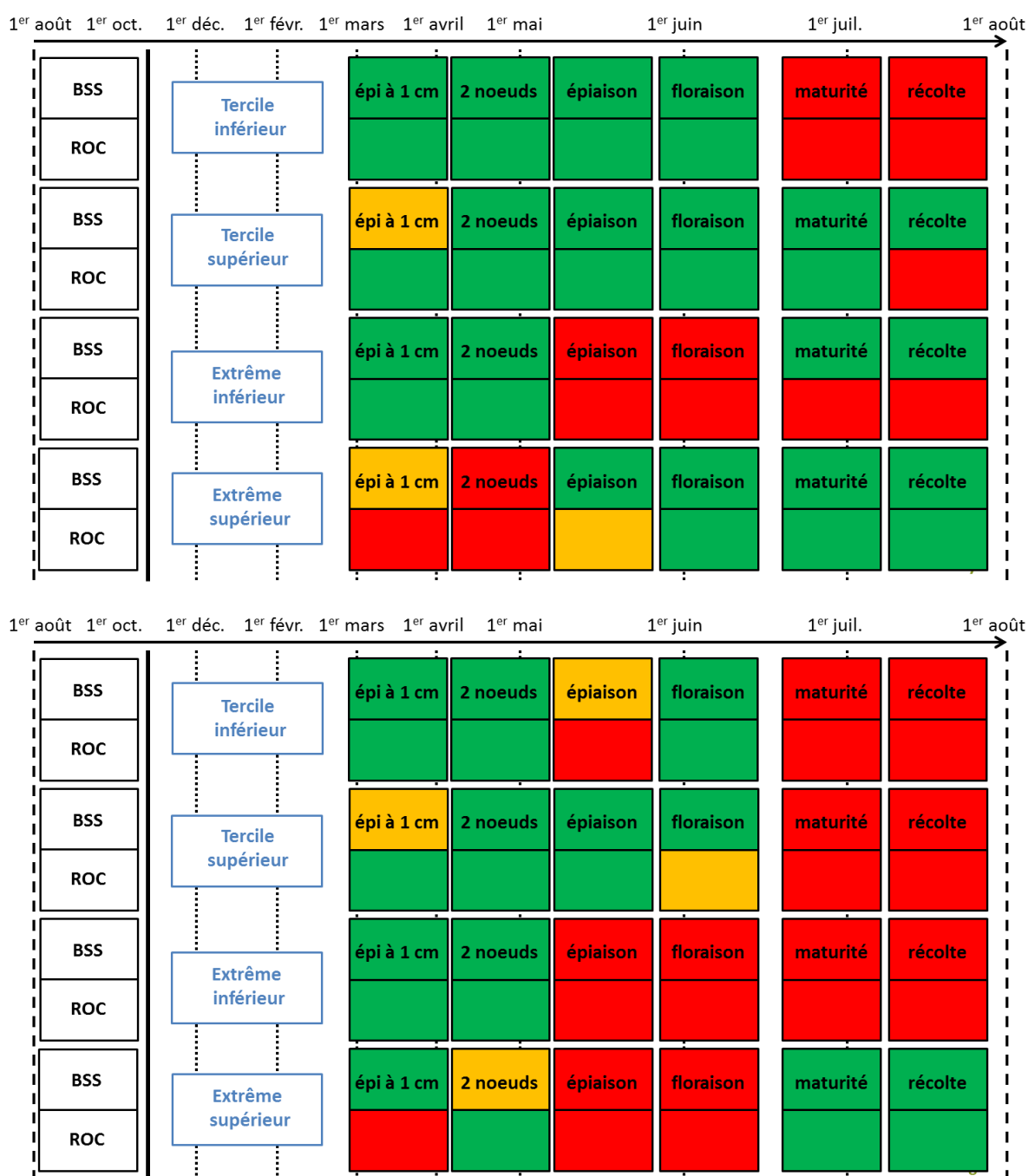


Figure 86: Récapitulatif du BSS et des courbes ROC obtenus pour la prévision des stades phénologiques entre le jeu de simulations « MM3-QQ6 » et « fréq-ens ». Pour chaque variable, les scores sont représentés comme l'indique les cellules de gauche. En vert, il est indiqué que le score obtenu avec le jeu de simulations « PS » est meilleur que « fréq-ens », en rouge le cas contraire et en orange les scores sont identiques. En haut, le graphe représente les scores pour les sites de la région nord, en bas ceux obtenus pour les sites de la région sud.

A l'exception des derniers stades, les prévisions classées dans la catégorie « tercile » sont globalement meilleures avec la prévision saisonnière (Figure 86). Concernant les sites au nord, le BSS indique même que les prévisions classées dans le tercile supérieur sont quasiment toutes meilleures avec ce système de prévision.

Les résultats sont moins bons pour la catégorie « extrême ». Pour les prévisions classées dans la catégorie « extrême inférieur », la prévision saisonnière simule correctement les deux premiers stades, alors que c'est le contraire pour la catégorie « extrême supérieur ». Hormis cette exception, on constate que les prévisions classées « extrêmes » sont globalement mal prévues, ainsi que les stades phénologiques en fin de cycle.

Les scores obtenus avec la prévision saisonnière sont moins bons dans le sud, avec entre trois et cinq stades phénologiques mieux prévus avec le calcul fréquentiel.

En conclusion de cette partie, au regard des différents scores présentés ici, la qualité du système de prévisions d'ensemble « PS » est correcte. Néanmoins, elle ne surpasse pas toujours celle issue du calcul fréquentiel. En effet, selon les régions où sont situés les sites et la catégorie de prévisions étudiée, les résultats varient. La région nord présente les meilleurs scores. L'analyse des BSS calculés par sites nous a permis de montrer que l'utilisation de la prévision saisonnière présentait des lacunes lorsqu'il s'agit de prévoir les stades phénologiques pour les sites situés dans le sud-ouest.

6. Conclusions

Après une analyse globale de la simulation de référence ayant permis d'illustrer la variabilité naturelle des variables agro-météorologiques étudiées dans cette thèse, une évaluation de l'approche fréquentielle développée et utilisée par Arvalis - Institut du végétal a été menée. La qualité globale de cette méthode a été mise en évidence, notamment pour les stades phénologiques. Cependant, des biais importants ont été observés, croissants d'un stade à l'autre. Au contraire, les erreurs SDD et RMSE ont plutôt tendance à décroître, indiquant une prévision sensiblement de meilleure qualité en fin de cycle. Dans l'ensemble, le coefficient de corrélation reste élevé concernant la prévision des stades phénologiques. Toujours pour cette catégorie de variables, des scores globalement meilleurs sont obtenus dans la région sud. Pour les autres variables, à quelques exceptions près, on ne parvient pas à obtenir des scores aussi bons que pour les stades phénologiques. La forte variabilité des prévisions des précipitations cumulées est expliquée par le fait que ces dernières soient plus difficiles à prévoir que les températures. D'autre part, une autre source d'incertitude réside dans l'estimation de la durée de la période séparant deux stades phénologiques. Sur les quelques variables présentant des scores corrects, on note également une différence marquée entre les régions nord et sud.

Après avoir réalisé l'évaluation du jeu de simulations issu de la méthode fréquentielle, les mêmes scores ont été produits pour le jeu utilisant les données issues de la prévision saisonnière. Dans un premier temps, des similarités avec les résultats obtenus pour le calcul fréquentiel sont trouvées. Dans l'ensemble, seuls les stades phénologiques présentent de bons scores de prévision. Le biais est également croissant au fil des stades, mais nul au début du cycle, ce qui montre l'intérêt ici d'utiliser une méthode de descente d'échelle. Dernier point identique, le RMSE a tendance également à décroître au fil des stades, notamment au Nord.

La variabilité des variables hydriques explique de nouveau les résultats médiocres obtenus. Cette variabilité est très difficilement représentée avec les simulations « PS » par rapport à la simulation de référence. Il faut néanmoins souligner que ces résultats sont obtenus avec une paramétrisation des conditions initiales du modèle fixe, comme la réserve utile ou le type de sol. Une étude sur des valeurs adaptées à chaque site étudié permettrait d'affiner les résultats pour cette catégorie de variables.

Lorsqu'on étudie les scores par sites, on constate que ceux de la région sud sont moins bons que ceux de la région nord. Les prévisions sont particulièrement mauvaises dans le sud-ouest de la France. Néanmoins, les bons résultats mis en évidence avec le jeu « PS » ne sont pas dus à la climatologie Safran, présente dans les forçages atmosphériques. Même si l'utilisation d'une méthode de descente d'échelle est susceptible d'améliorer les scores, la simulation « ARP » (sorties brutes) présente des coefficients de corrélation très corrects, ce qui montre qu'il existe de la prévisibilité dans les données de prévision saisonnière. Si l'on compare les deux méthodes de descente d'échelle utilisées dans cette thèse (à travers les simulations « ARP3-AS4 » et « ARP3-QQ4 »), certains scores montrent que la méthode basée sur le calcul d'anomalies standardisées est la plus intéressante. Par contre, dans l'optique de réduire le biais, la méthode « Quantile-Quantile » reste la plus adéquate. Concernant les stades phénologiques en fin de cycle, il a été montré qu'à une échéance à 6 mois, la prévision saisonnière permettait d'obtenir des scores sensiblement meilleurs que ceux obtenus avec la méthode fréquentielle (en comparant les simulations « ARP3-QQ4 » et « ARP3-QQ6 »). Enfin, l'utilisation d'une approche « multi-modèles » aboutit aux meilleurs résultats d'un point de vue déterministe (en comparant les simulations « ARP3-QQ4 » et « MM3-QQ4 »). La majorité des scores comparés parmi les différents jeux de simulations « PS » indique que la simulation « MM3-QQ4 » est la plus performante, surtout si l'on souhaite prévoir les stades phénologiques en fin de cycle.

On a ensuite effectué une évaluation probabiliste de la capacité du système de prévision saisonnière à prévoir les stades phénologiques, c'est-à-dire en ne considérant plus uniquement la médiane des prévisions mais la globalité de l'information fournie par le système ensembliste. Dans un premier temps, on s'est assuré que l'ensemble présentait des caractéristiques cohérentes. Pour cela, il a été vérifié que les gammes de scores d'EQM et de dispersion de l'ensemble était du même ordre de grandeur, même si l'EQM est sensiblement plus variable. Les diagrammes de Talagrand ont mis en évidence un biais positif avec les simulations « modèle unique », en accord avec les résultats déterministes. Par contre, un biais négatif est observé pour les simulations « multi-modèles » en début de cycle, puis une sous-dispersion de l'ensemble. La fiabilité a également été vérifiée et on montre que les événements les plus rares sont prévus avec une faible probabilité. Cependant, les événements prévus avec une forte probabilité sont peu fréquemment observés et induisent un problème d'échantillonnage (à compter des seuils de probabilités autour de 60%) rendant la fiabilité moins bonne, notamment pour les variables de fin de cycle. Si l'on compare les fiabilités obtenues pour chaque catégorie de prévision, on s'aperçoit que seuls les prévisions de la catégorie tercile possèdent une bonne fiabilité. Concernant la catégorie extrême, la fiabilité est plus rare. Le système « prévision saisonnière » semble avoir des difficultés à correctement prévoir les événements peu fréquents.

Les évaluations ayant été réalisées pour les deux systèmes de prévisions établis dans cette thèse, on a ensuite comparé les scores dans le but d'évaluer dans quelle mesure la prévision saisonnière est capable d'apporter une information plus intéressante sur la prévision de la croissance du blé tendre. Dans un premier temps, la comparaison a été menée sur les scores déterministes, en utilisant les scores de corrélation et de SDD. La prévision saisonnière améliore les scores déterministes pour les premiers stades phénologiques, tandis que seule une variable hydrique située en fin de cycle est mieux prévue. Pour les variables thermiques, la prévision saisonnière améliore les scores ou les égale, sans vraiment pouvoir identifier quelle période du cycle est avantagée. En analysant ensuite ces scores par région, on a pu souligner que la prévisibilité de la prévision saisonnière est repoussée au-delà de quatre stades phénologiques, mais également qu'elle produit des scores meilleurs pour une variable hydrique sur deux.

D'un point de vue probabiliste, la prévision saisonnière est globalement meilleure sur la plupart des sites. En particulier, de meilleurs résultats sont obtenus sur la région nord et pour les terciles. La distinction nord/sud est surtout visible pour le stade floraison. Concernant l'analyse avec les courbes ROC, on remarque à nouveau que la prévision saisonnière améliore la prévisibilité des quatre premiers stades, voire l'intégralité dans certains cas (tercile inférieur). Cependant, cela n'est pas vérifié pour la catégorie extrême, spécifiquement « inférieur », où la qualité est identique à l'évaluation déterministe. La distinction nord/sud est encore plus marquée, avec de bien meilleurs résultats pour la région nord.

De manière générale, il a été mis en évidence dans ce chapitre que des simulations incluant des données issues de la prévision saisonnière du temps produisaient des prévisions des variables agro-météorologiques liées à la croissance du blé tendre de qualité dès lors qu'elles sont situées dans les quatre mois à compter de la date d'initialisation. Lorsqu'on cherche à prévoir les stades phénologiques, la limite de prévisibilité est repoussée si l'on utilise la prévision saisonnière d'un point de vue probabiliste.

Une dernière évaluation a permis d'évaluer la performance de la prévision saisonnière à l'échelle annuelle avec une méthode basée sur le calcul d'anomalies standardisées et non plus de façon globale sur toute la période 1981-2005. Quelques années atypiques, définies selon les cas où la prévision dépasse un seuil calculé à partir de l'écart-type de la distribution des prévisions, sont identifiées pour chacun des deux systèmes de prévision et ensuite comparées aux années atypiques réellement observée (en utilisant la référence). De manière générale, la performance de chacun des deux systèmes de prévision est équivalente. Les années dites « extrêmes » (où des événements rares se produisent) restent difficilement identifiables.

CHAPITRE V

V. Conclusions et perspectives

L'agriculture compte parmi les secteurs économiques les plus vulnérables face à l'évolution du climat (IPCC, 2014). Afin de réduire l'impact des aléas climatiques sur les rendements, la modification des pratiques culturales est employée à travers des stratégies d'adaptation. Une connaissance de l'état futur des conditions climatiques à échéance de quelques semaines ou de quelques mois, transposée à l'échelle locale, est pour cela nécessaire. La faisabilité de l'utilisation de la prévision numérique du temps pour ces applications a été démontrée pour les régions tropicales. Ces régions bénéficient d'une source de prévisibilité importante car la variabilité climatique y est fortement pilotée par les températures de surfaces océaniques (TSO). Un enjeu scientifique consiste à évaluer dans quelle mesure la prévisibilité apportée par les téléconnexions aux latitudes moyennes permet de mieux anticiper les variables liées à la croissance des cultures. Pilotés par des variables climatiques, les modèles des surfaces continentales sont en partie élaborés afin de représenter l'évolution de la végétation contrainte par l'état hydrique du sol racinaire. Une fois ces modèles localement ajustés, ils peuvent fournir des indicateurs sur l'état futur de la végétation.

La question scientifique soulevée dans cette thèse était la suivante : « dans quelle mesure la prévision saisonnière peut-elle apporter une information pertinente quant à l'anticipation de la croissance des cultures en France ? ». Deux objectifs ont découlé de cette problématique, chacun faisant l'objet d'une étude approfondie dans cette thèse. Le premier a consisté à évaluer la capacité du modèle des surfaces continentales ISBA-A-gs à fournir des indicateurs précoces sur l'état futur des céréales printemps/hiver et des prairies. Au préalable, il a été nécessaire d'évaluer les différentes configurations du profil racinaire du modèle à travers la représentation de la variabilité interannuelle des rendements agricoles en France. Le second objectif était d'évaluer la pertinence de l'information apportée par la prévision saisonnière du temps, utilisée pour forcer un modèle de culture du blé tendre. Pour cela, les données de prévision saisonnière issues du projet ENSEMBLES ont été utilisées sur la période 1981-2005.

- Un jeu de simulations optimisées des couverts agricoles avec ISBA-A-gs

La première partie de ce travail de thèse a consisté à l'évaluation des différentes configurations du profil racinaire du modèle ISBA-A-gs à l'échelle de la France. Pour cela, plusieurs jeux de simulations ont été réalisés afin de représenter la variabilité interannuelle de la production de biomasse sur la période 1994-2010 et de la comparer aux observations de production agricole (Agreste). La version standard « force-restore 2 couches » et la version

diffusive multicouches du modèle de bilan hydrique du sol ont été examinés. L'utilisation d'un nouveau schéma de transfert radiatif dans la végétation a également été évaluée. Pour les cultures céréalières hiver/printemps et pour les prairies naturelles, il a été calculé un nombre de sites présentant un coefficient de détermination (R^2) significatif au seuil de 1% (p -value < 0,01) entre la valeur maximale de la biomasse aérienne simulée (B_{agX}) et le rendement final issu d'Agreste. A chaque fois, différentes valeurs de conductance du mésophylle et du contenu maximal en eau disponible dans le sol (le couple g_m/MaxAWC) ont été examinées. Il a été mis en évidence que les prairies naturelles étaient correctement représentées mais qu'il est plus difficile de capter la variabilité interannuelle des céréales de printemps/hiver. La modélisation d'une couche supplémentaire de sol sous la zone racinaire pour un sol de profondeur constante (environ 2 m) dégrade ces résultats. En effet, l'apport d'eau par remontées capillaires étant excessif, le point de flétrissement n'est jamais atteint par la plante. La croissance de la biomasse n'est donc pas correctement modélisée. Le profil racinaire est également une source d'incertitude. En effet, la forme du profil de densité des racines (équation de Jackson) utilisé dans les simulations avec un sol multi-couches a un fort impact sur l'humidité des couches racinaires proches de la surface et sur l'occurrence de la sénescence. L'utilisation d'un nouveau schéma de transfert radiatif dans ces simulations (DIF-NRT) raccourcit la durée de cycle du LAI et améliore sensiblement la représentation de la variabilité interannuelle des rendements. Cette version du modèle a été comparée à la version standard afin de vérifier la capacité de chacune des simulations à représenter correctement les années qui présentent une anomalie de rendement. La version DIF-NRT n'améliore pas la représentation des années atypiques pour les céréales. En particulier, l'année 2007, marquée par une baisse des rendements, n'est pas identifiée comme une année défavorable dans les simulations. En revanche, les deux versions sont performantes pour les prairies naturelles.

- Recherche de prévisibilité à travers l'humidité racinaire simulée par ISBA-A-gs

La seconde partie de ce travail de thèse a été consacrée à l'utilisation des variables biogéophysiques simulées par le modèle ISBA-A-gs, ainsi que les données de LAI satellitaire GEOV1 corrigées. L'objectif était d'obtenir une information exploitable sur l'état futur de la croissance de la végétation à partir d'indicateurs simulés ou observés. Il est possible d'anticiper la tendance du rendement des céréales printemps/hiver et des prairies lors de périodes clés identifiées au cours de l'année. Dans un premier temps, il a été montré qu'il existe une corrélation élevée entre l'humidité du sol racinaire (wg_2) simulée décadaire et le LAI simulé décadaire sur de nombreux sites en France. Pour les cultures de type C3, cette relation apparaît à partir du mois de mai et à partir du mois d'avril pour les prairies naturelles. A compter du mois de juin, le wg_2 est en mesure de fournir une information sur l'état futur du LAI et du B_{agX} , de 2 à 4 décades en avance. Une période sensible apparaît dans les simulations, au cours de laquelle la biomasse aérienne est pilotée par l'état hydrique de la couche racinaire. A partir de mi-juin, le wg_2 est en mesure de fournir une information sur la production agricole observée, mais uniquement pour les prairies naturelles. Ces relations nous

ont permis de retrouver la tendance du rendement avec un modèle de régression simple. La qualité de cette prévision est dépendante de l'état de la croissance de la biomasse, exprimée par la valeur du LAI simulé. Cette étape clé correspond à un seuil de LAI de $3.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Il serait intéressant d'établir une correspondance entre le LAI simulé et les stades phénologiques des céréales, en utilisant des observations satellitaires et des simulations issues d'un modèle de culture. De cette manière, il serait possible de clairement identifier l'étape de la croissance de la culture pour laquelle le potentiel prédictif de wg_2 est le plus grand.

La méthode utilisant les modèles de surface continentale ne tient pas compte de l'état réel du climat à venir, mais de l'état hydrique du sol à un instant donné. Cette variable biogéophysique est un indicateur de l'état futur des couverts agricoles. Ainsi dans certaines situations, le modèle de surface continentale peut fournir une information précoce de l'état de la végétation sans disposer de prévisions atmosphériques. Un calage préalable du MaxAWC est cependant nécessaire.

- Utilisation combinée du LAI satellitaire et de l'humidité racinaire simulée

Il est mis en évidence que le LAI satellitaire GEOV1 était corrélé significativement avec le LAI simulé autour du mois de juillet, soit en fin de cycle de la culture. Cela montre que, dans une certaine mesure, la variabilité interannuelle du maximum annuel du LAI satellitaire GEOV1 pourrait être utilisée pour représenter celle de la production agricole. D'autre part, le wg_2 décadaire est dans certains cas bien corrélé avec le LAI satellitaire de la même décade et des six suivantes, uniquement en fin du cycle de croissance de la végétation (à partir de mi-juin). Pour les céréales, le potentiel prédictif est faible compte-tenu du peu de sites présentant une corrélation significative. Par contre, pour les prairies naturelles, ce potentiel est plus grand avec près de la moitié des sites donnant lieu à des résultats significatifs. Une fois cette recherche d'indicateurs réalisée, on a vérifié que le LAI satellitaire GEOV1 était en mesure de reproduire spatialement l'occurrence de la date de récolte sur 32 sites et sur la période 1997-2010. De nombreux sites ont présenté une corrélation significative entre la valeur maximale du LAI satellitaire GEOV1 et les rendements Agreste. Cette fois encore, le plus grand nombre de sites présentant une corrélation significative est obtenu pour les prairies naturelles. Couplés à la télédétection, des indicateurs comme l'anomalie de l'humidité du sol simulée peuvent être en mesure de nous informer sur la tendance du rendement final.

De manière générale les résultats sont meilleurs pour les prairies. En effet, les prairies semblent être davantage sensibles à la variabilité climatique que les céréales, notamment à cause d'un système racinaire plus superficiel. La prévision de l'état futur des céréales est donc plus difficile à réaliser que pour les prairies. Il est donc nécessaire d'améliorer la description de la réserve utile du sol pour les céréales, par exemple en utilisant des cartes détaillées des propriétés des sols et des séries multi-annuelles de LAI observé par télédétection.

- La prévision saisonnière du temps en entrée du modèle de culture Panoramix

Le dernier volet de cette thèse a concerné l'évaluation à l'échelle de la France des prévisions de variables agro-météorologiques du blé tendre issues de plusieurs jeux de simulations. Pour cela, le modèle de culture du blé tendre Panoramix, créé par l'institut Arvalis - Institut du végétal, a été forcé avec des données issues de la prévision saisonnière du temps. Afin de mener cette évaluation, un jeu de simulations de référence a été constitué, forcé uniquement avec des données météorologiques issues des réanalyses Safran.

Sur la période 1981-2005, il a été montré que la méthode de descente d'échelle quantile-quantile est la plus apte à réduire le biais des données issues des GCM. Néanmoins, le SDD et le coefficient de corrélation ont prouvé que la méthode de descente d'échelle basée sur les anomalies standardisées était plus précise. Les meilleurs scores ont été obtenus grâce à une prévision d'ensemble constituée de tous les membres issus des GCM ayant contribué au projet ENSEMBLES. Les résultats sont de meilleure qualité lorsque les scores sont calculés sur les sites du nord de la France. En effet, des scores dégradés ont été mis en évidence dans de nombreux sites situés au sud et plus particulièrement dans la région sud-ouest. Les mailles de la grille des GCM fournissant l'information de base à la prévision saisonnière ont une résolution spatiale de 2.5° et les techniques de descente d'échelle ne permettent pas de représenter parfaitement le climat local dans cette région.

Les meilleurs scores déterministes sont obtenus pour les variables liées aux sommes de températures, notamment les dates des stades phénologiques. Elles ont plus de prévisibilité que les variables hydriques, qui ont une grande variabilité naturelle. Notamment, l'état de la réserve utile à différentes étapes de la croissance de la plante présente de moins bons scores. Les variables hydriques sont en partie pilotées par les précipitations totales, dont l'occurrence est très discontinue et qui ont une moins bonne prévisibilité à longue échéance que la température. La prévision d'ensemble a été évaluée vis-à-vis des stades phénologiques d'un point de vue probabiliste. Il a été montré que l'ensemble des prévisions obtenues possède une certaine fiabilité, c'est-à-dire que le système est en mesure de prévoir un événement avec un taux de probabilité proche de la fréquence d'occurrence réellement observée. Néanmoins, une sous-dispersion assez marquée est observée pour les prévisions des premiers stades phénologiques. L'utilisation d'un modèle unique ne permet pas de prévoir de façon fiable les événements extrêmes. Par contre, une approche multi-modèles (deux ou cinq modèles issus du projet ENSEMBLES) permet de corriger, au moins partiellement, ces problèmes.

Ce travail avait également pour objectif d'évaluer la capacité de cette méthode de prévision innovante à apporter une information plus pertinente que celle fournie par la méthode basée sur le calcul fréquentiel actuellement utilisée en opérationnel par Arvalis - Institut du végétal. En comparant les scores de SDD et les coefficients de corrélation obtenus pour chacun des systèmes de prévision, il a été mis en évidence que la prévision saisonnière apporte de meilleurs résultats, mais de façon limitée et sur certaines variables seulement. Sur l'ensemble des sites étudiés, les scores sont meilleurs pour les prévisions des deux premiers stades phénologiques. Dans le nord de la France, ils le sont également pour les prévisions de

la moitié des stades. Concernant les variables hydriques, sauf quelques exceptions, les prévisions ne sont pas améliorées avec l'utilisation de la prévision saisonnière. De nouveau, les meilleurs scores sont obtenus pour les sites au nord de la France. Dans ce cas, les prévisions des variables positionnées en début et en fin de cycle sont meilleures avec la prévision saisonnière. Enfin, les variables thermiques semblent bénéficier plus largement de la prévision saisonnière. En considérant les scores sur l'ensemble des sites, aucune de ces variables n'est moins bien prévue par la prévision d'ensemble. La prévision saisonnière et le calcul fréquentiel présentent des performances similaires lorsqu'il s'agit de simuler les années atypiques.

Les deux systèmes de prévision ont ensuite été évalués d'un point de vue probabiliste, en utilisant deux seuils permettant de classer les prévisions dans quatre différentes catégories : les terciles inférieur et supérieur, ainsi que les extrêmes inférieur et supérieur. Concernant les stades phénologiques et selon la catégorie de prévisions étudiées, certaines régions présentent des Brier Skill Score très concluants. Grâce à la prévision saisonnière, de bons résultats sont acquis sur les sites au nord de la France. Sur les sites au sud, des BSS de qualité sont obtenus avec la prévision saisonnière seulement pour les premiers stades phénologiques. Ces résultats ont été confirmés avec la comparaison des taux de succès et des taux de fausses alarmes du système de prévision, illustrée par les courbes ROC. La prévision d'ensemble construite avec des données issues de la prévision saisonnière fournit, dans certains cas, de meilleures prévisions que celles obtenues avec la méthode de calcul fréquentiel. Pour les sites situés au sud de la France, seules les prévisions classées dans la catégorie « tercile » sont moins performantes à partir du stade « maturité », et à partir du stade « épiaison » pour celles classées dans la catégorie « extrême inférieur ». Même si les prévisions classées dans la catégorie « extrême supérieur » semblent en mesure de prévoir correctement les stades en fin de cycle, la limite de prévisibilité est franchie à partir du stade « maturité » seulement, soit environ quatre mois après la date d'initialisation au 1^{er} février.

Ce travail de thèse a montré les avantages et les limites de l'utilisation de la prévision saisonnière. Bien sûr, pour les années où les téléconnexions depuis la zone tropicale sont faibles, une absence de prévisibilité atmosphérique conduit à des prévisions de moins bonne qualité. Néanmoins, la capacité à mieux prévoir certaines variables agro-météorologiques liées au blé tendre a été démontrée. Ainsi, il est possible d'améliorer sensiblement la connaissance de l'état futur de la croissance de la plante. Cela permet ainsi de mieux gérer les intrants (azote, produits phytosanitaires) et de mieux appliquer des mesures visant à protéger les cultures. En effet, ces activités nécessitent une connaissance précise de l'occurrence future des étapes clé de la plante. La prévision saisonnière peut donc être utilisée pour la prévision à quatre mois d'échéance des principaux stades phénologiques que constituent la croissance du blé tendre en France.

A l'issue de ce travail, il est possible de formuler des recommandations concernant l'utilisation des données issues de la prévision saisonnière du temps. En particulier, il est important d'utiliser une prévision d'ensemble plutôt qu'une prévision saisonnière déterministe et de considérer les variables liées aux sommes de températures. Jusqu'à quatre mois d'échéance, seules les variables thermiques peuvent être prévues correctement. Pour les variables hydriques, cette limite est de l'ordre d'un à deux mois seulement.

- Modèle de culture ou modèle générique ?

Si aucun renseignement sur la croissance de la plante n'est fourni au modèle de culture Panoramix, il n'est pas possible de réaliser une prévision du rendement. Or, le modèle ISBA-A-gs permet, une fois étalonné, d'en représenter la variabilité interannuelle. Par contre, ce dernier ne simule pas les stades phénologiques de la plante. De ce point de vue, cela rend l'approche utilisant un modèle de culture et l'approche utilisant un modèle des surfaces continentales complémentaires. L'utilisation couplée des deux méthodes est une perspective intéressante. Il est possible d'utiliser conjointement les deux types de modèles pour avoir une information sur l'état futur de la végétation en combinant les différentes variables apportées par chacun des modèles. L'utilisation de la prévision saisonnière du temps comme forçage météorologique du modèle ISBA-A-gs pourrait également être évaluée.

Aucune des deux méthodes qui ont été utilisées dans cette thèse ne peut être qualifiée de meilleure, ou de plus fiable, l'une par rapport à l'autre, compte-tenu de la manière dont elles ont été appliquées et évaluées dans ce travail. La combinaison des deux approches développées dans cette thèse est encore à explorer pour extraire le fort potentiel de chacune d'entre elles et constituer ainsi un système combiné robuste et fiable. Néanmoins, des efforts restent à faire pour réduire les défauts qui ont été identifiés dans ce manuscrit.

- Vers une utilisation plus intensive de l'outil de télédétection

La nécessité d'avoir une bonne connaissance du MaxAWC pour simuler correctement l'évolution de la végétation à l'échelle locale est clairement soulignée dans cette thèse. Cela ouvre les perspectives sur l'utilisation de la télédétection afin de réduire les incertitudes liées aux valeurs du MaxAWC et ainsi correctement simuler les couverts agricoles. La télédétection couvre l'ensemble des surfaces terrestres, à des résolutions spatiales kilométrique à hectométrique et ce travail pourrait être étendue à l'échelle du globe en utilisant des variables biophysiques issues de l'observation spatiale (comme le LAI), plutôt que des statistiques agricoles. Ces dernières sont agrégées par des découpages administratifs plutôt que par les conditions environnementales. D'autre part, une assimilation séquentielle de données satellitaires dans le modèle ISBA-A-gs est possible grâce à la plateforme SURFEX (Barbu et al., 2014). Ce « Land Data Assimilation System » fonctionne actuellement sur la France métropolitaine et est en cours d'extension à l'échelle mondiale (LDAS-Monde). Des données satellitaires décrivant le LAI et l'humidité du sol sont intégrées dans le modèle. Il serait probablement possible de réduire fortement les biais locaux du modèle en optimisant les valeurs de MaxAWC. Les données de texture du sol ont été fixées dans cette thèse, mais il semble pertinent, en plus d'utiliser la télédétection, de tenir compte du profil réel des propriétés du sol dans la couche racinaire.

La modélisation des surfaces agricoles a été réalisée à l'échelle de la France, mais elle pourrait être étendue à l'échelle du globe. Dans la continuité du lancement du satellite Sentinel-1, de nouveaux produits satellitaires seront développés avec le lancement d'ici 2015

des satellites Sentinel-2 et 3. Ils fourniront une nouvelle génération de produits satellitaires (LAI, en particulier) dont certains à plus haute résolution spatiale. En complément des données satellitaires disponibles depuis près de trente ans, il sera possible de réduire les incertitudes liées aux valeurs de MaxAWC et de mieux estimer le profil racinaire du sol par modélisation inverse. Ces produits satellitaires pourront également fournir un jeu de données permettant d'évaluer les nouvelles versions des modèles des surfaces continentales. La combinaison de données satellitaires à haute résolution (pouvant également être issues d'autres capteurs, comme la télédétection radar, thermique...) et de la modélisation des surfaces continentales permettra ainsi d'affiner la prévision de l'état futur des couverts végétaux, notamment d'améliorer les résultats concernant les cultures.

- Perspectives quant à l'utilisation des données issues de la prévision saisonnière du temps

Les paramétrisations du modèle de culture Panoramix ont été utilisées de manière uniforme dans cette thèse, afin de ne rendre compte que de la variabilité apportée par les forçages atmosphériques et de n'évaluer que l'apport de la prévision saisonnière du temps. Or, l'incertitude apportée par les conditions initiales du modèle peut avoir également une influence non négligeable sur les résultats. Notamment, le choix de la réserve utile mériterait un approfondissement en explorant d'autres gammes de valeurs, comme cela a été fait ici avec le modèle ISBA-A-gs et dans le projet Climator (Brisson et Levraut, 2012).

Lors de l'utilisation des données issues de la prévision saisonnière, il serait nécessaire de mettre en place un indicateur de confiance permettant de quantifier la prévisibilité existante au cours d'une année. Cet indicateur pourrait être basé sur l'indice ENSO ou encore sur la phase de l'oscillation de Madden-Julian. Ce travail a été mené grâce à des données issues de la prévision saisonnière réalisée dans le cadre du projet ENSEMBLES, initié en 2002. Depuis, les GCM actuellement utilisés pour cet exercice ont bénéficié de progrès importants grâce à la recherche dans ce domaine, comme l'utilisation de nouvelles méthodes statistiques, l'augmentation de la résolution horizontale et verticale, ou encore la prise en compte de données assimilées bien plus pertinentes pour définir les conditions initiales du système. La prévision saisonnière du temps comporte des imperfections et doit encore être améliorée pour obtenir des résultats plus fiables. Le projet SPECS présenté dans l'Introduction a été initié dans cet objectif. Le projet européen FP7 EUPORIAS (www.euporias.eu) propose également des services climatiques incluant l'utilisation de la prévision saisonnière du temps, à destination de divers secteurs comme l'agriculture. Ces projets contribuent à la poursuite des recherches en prévision saisonnière. Les nombreuses avancées dans ce domaine permettront de fournir des prévisions atmosphériques plus précises et plus fiables. En particulier, la taille des ensembles fournis par les systèmes opérationnels actuels est bien plus grande (51 membres par GCM) que l'ensemble utilisé dans ce travail (seulement 9 membres par GCM). Utiliser ces ensembles avec une approche multi-modèles permettrait de mieux quantifier les incertitudes, voire d'obtenir de meilleurs résultats. L'utilisation des prévisions opérationnelles initialisées chaque mois permettra d'affiner et de confirmer la tendance future des variables

agro-météorologiques au fil du calendrier cultural. En hydrologie, Singla (2012) a notamment montré que la prévisibilité apportée par l'humidité des sols est bien plus importante à partir du mois d'avril. La prévision saisonnière initialisée à cette date pourrait être en mesure d'apporter la prévisibilité nécessaire à la prévision des variables agro-météorologiques qui sont déterminantes en fin de cycle cultural. Une suite à ce travail pourrait donc être d'évaluer l'utilisation de données issues des systèmes opérationnels participant au consortium EUROSIP, à partir du système de prévision mis en place dans cette thèse.

Bibliographie

Agreste: <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar>, dernier accès : Juin 2015.

Alessandri, A. et Navarra, A.: On the coupling between vegetation and rainfall inter-annual anomalies: Possible contributions to seasonal rainfall predictability over land areas, *Geophys. Res. Lett.*, 35(2), L02718, doi:10.1029/2007GL032415, 2008.

Alessandri, A., Borrelli, A., Navarra, A., Arribas, A., Déqué, M., Rogel, P. et Weisheimer, A.: Evaluation of probabilistic quality and value of the ENSEMBLES multimodel seasonal forecasts: Comparison with DEMETER, *Mon. Weather Rev.*, 139(2), 581–607, doi:10.1175/2010MWR3417.1, 2011.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. et Smith, M.: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300pp., 1998.

Arribas, A., Glover, M., Maidens, A., Peterson, K., Gordon, M., MacLachlan, C., Graham, R., Fereday, D., Camp, J., Scaife, A. A., Xavier, P., McLean, P., Colman, A. et Cusack, S.: The GloSea4 ensemble prediction system for seasonal forecasting, *Mon. Weather Rev.*, 139(6), 1891–1910, doi:10.1175/2010MWR3615.1, 2011.

Barbu, A. L., Calvet, J.-C., Mahfouf, J.-F. et Lafont, S.: Integrating ASCAT surface soil moisture and GEOV1 leaf area index into the SURFEX modelling platform: a land data assimilation application over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(1), 173–192, doi:10.5194/hess-18-173-2014, 2014.

Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P. et Smets, B.: GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production, *Remote Sens. Environ.*, 137, 299–309, doi:10.1016/j.rse.2012.12.027, 2013.

Bierkens, M. F. P. et Van Den Hurk, L. P. H.: Groundwater convergence as a possible mechanism for multi-year persistence in rainfall, *Geophys. Res. Lett.*, 34(2), L02402, doi:10.1029/2006GL028396, 2007.

Boé, J., Terray, L., Habets, F. et Martin, E.: A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.*, 111(D23), D23106, doi:10.1029/2005JD006889, 2006.

Boé, J.: Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France, 264pp., PhD. thesis., Université Toulouse III, France, 2007.

Bonn, F. et Rochon, G.: Remote sensing handbook. Vol 1: Principles and methods. Presses Univ. Quebec, 485pp., 1992.

- Boone A., Masson, V., Meyers, T. et Noilhan, J.: The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme, *J. Appl. Meteorol.*, 39, 1544–1569, 2000.
- Brankovic, C., Palmer, T. N. et Ferranti, L.: Predictability of seasonal atmospheric variations, *J. Clim.*, 7, 217–237, 1994.
- Brankovic, C. et Palmer, T. N.: Seasonal skill and predictability of ECMWF PROVOST ensembles, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, 2035–2067, 2000.
- Brier, G. W.: Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon. Weather Rev.*, 78(1), 1-3, 1950.
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X. et Huard, F.: Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France, *F. Crop. Res.*, 119(1), 201–212, doi:10.1016/j.fcr.2010.07.012, 2010.
- Brisson, N. et Levraut, F.: Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d’impacts sur les principales espèces. *Le Livre vert du projet Climator (2007-2010)*. op. cit, 336pp., 2010.
- Brochet P. et Gerbier N.: L’évapotranspiration, aspect agrométéorologique. Evaluation pratique de l’évapotranspiration potentielle, Monographie N°65 de la Météorologie Nationale, 67pp., 1968.
- Calas, C.: Concepts et méthodes pour le météorologiste. Tome 1 : Modèles conceptuels et données disponibles, Cours et méthodes n°21, 2014.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A. et Wigneron, J.: An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites, *Agric. For. Meteorol.*, 92, 73–95, 1998.
- Calvet, J.-C.: Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data, *Agric. For. Meteorol.*, 103, 229–247, 2000.
- Calvet, J.-C. et Soussana, J.-F.: Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme, *Agric. For. Meteorol.*, 108, 129–152, 2001.
- Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C. et Guehl, J.-M.: Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes-response to soil moisture stress, *Agric. For. Meteorol.*, 124, 143–156, doi:10.1016/j.agrformet.2004.01.007, 2004.
- Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Roujean, J.-L., Martin, E., Le Moigne, P., Douville, H. et Noilhan, J.: Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France, *Atmos. Chem. Phys.*, 8(2), 397–406, doi:10.5194/acp-8-397-2008, 2008.

- Calvet, J.-C., Lafont, S., Cloppet, E., Souverain, F., Badeau, V. et Le Bas, C.: Use of agricultural statistics to verify the interannual variability in land surface models: a case study over France with ISBA-A-gs, *Geosci. Model Dev.*, 5(1), 37–54, doi:10.5194/gmd-5-37-2012, 2012.
- Cane, M. A., Zebiak, S. E. et Dolan, S. C.: Experimental forecasts of El Niño, *Nature*, 321, 827–832, 1986.
- Cantelaube, P., Terres, J. et Doblas-Reyes, F. J.: Influence of climate variability on European agriculture - analysis of winter wheat production, *Clim. Res.*, 27, 135–144, 2004.
- Cantelaube, P. et Terres, J.-M.: Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe, *Tellus*, 57(A), 476–487, 2005.
- Carrer, D., Roujean, J.-L., Lafont, S., Calvet, J.-C., Boone, A., Decharme, B., Delire, C. et Gastellu-Etchegorry, J.-P.: A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation model ISBA-A-gs: Impact on carbon fluxes, *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, 118(2), 888–903, doi:10.1002/jgrg.20070, 2013.
- Cassou, C.: Du changement climatique aux régimes de temps : l’oscillation nord-atlantique, *La Météorologie*, 45, 21–32, 2004.
- Cassou, C. et Terray, L.: Tropical atlantic influence on european heat waves, *J. Clim.*, 18, 2805–2811, 2005.
- Cassou, C.: Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation, *Nature*, 455, 523–527, doi:10.1038/nature07286, 2008.
- Cavarero, V., Peltier, A., Aubail, X., Leroy, A., Dubuisson, B., Jourdain, S., Ganachaud, A., Gibelin, A.-L., Lefèvre, J., Menkes, C. et Lengaigne, M.: Les évolutions passées et futures du climat de la Nouvelle-Calédonie, *Météorologie*, 77, 13–21, 2012.
- Challinor, A., J., Slingo, J. M., Wheeler, T. R. et Doblas-Reyes, F. J.: Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles, *Tellus*, 57(A), 498–512, 2005.
- Champagne, C., Berg, A. A., McNairn, H., Drewitt, G. et Huffman, T.: Evaluation of soil moisture extremes for agricultural productivity in the Canadian prairies, *Agric. For. Meteorol.*, 165, 1–11, doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.003, 2012.
- Chatelin, M. H., Aubry, C., Poussin, J. C., Meynard, J. M., Massé, J., Verjux, N., Gate, P. et Le Bris, X.: DéciBlé, a software package for wheat crop management simulation, *Agric. Syst.*, 83(1), 77–99, doi:10.1016/j.agry.2004.03.003, 2005.
- Chauvin, F., Royer, J.-F. et Déqué, M.: Response of hurricane-type vortices to global warming as simulated by ARPEGE-Climat at high resolution, *Clim. Dyn.*, 27(4), 377–399, doi:10.1007/s00382-006-0135-7, 2006.

- Chevallier, M. et Salas-Mélia, D.: The role of sea ice thickness distribution in the Arctic sea ice potential predictability: A diagnostic approach with a coupled GCM, *J. Clim.*, 25(8), 3025–3038, doi:10.1175/JCLI-D-11-00209.1, 2012.
- Chipanshi, A. C., Ripley, E. A. et Lawford, R. G.: Early prediction of spring wheat yields in Saskatchewan from current et historical weather data using the CERES-Wheat model, *Agric. For. Meteorol.*, 84(3-4), 223–232, doi:10.1016/S0168-1923(96)02363-5, 1997.
- Coelho, C. A. S. et Costa, S. M. S.: Challenges for integrating seasonal climate forecasts in user applications, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 2(5), 317–325, doi:10.1016/j.cosust.2010.09.002, 2010.
- Collatz, G. J., Ribas-Carbo, M. et Berry, J. A.: Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 19, 519-538, 1992.
- Colman, A. et Davey, M.: Prediction of summer temperature, rainfall and pressure in Europe from preceding winter North Atlantic Ocean temperature, *Int. J. Climatol.*, 19(5), 513–536, 1999.
- Conil, S., Douville, H. et Tyteca, S.: Contribution of realistic soil moisture initial conditions to boreal summer climate predictability, *Clim. Dyn.*, 32(1), 75–93, doi:10.1007/s00382-008-0375-9, 2008.
- Crow, W. T., Kumar, S. V. et Bolten, J. D.: On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(9), 3451–3460, doi:10.5194/hess-16-3451-2012, 2012.
- Deardorff, J. W.: A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models, *J. Appl. Meteorol.*, 16, 1182–1185, 1977.
- Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, 20, 1889–1903, 1978.
- Debaeke, P. et Bertrand, M.: Evaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France, *Cah. Agric.*, 17(5), 437–443, 2008.
- Decharme, B., Boone, A., Delire, C. et Noilhan, J.: Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions, *J. Geophys. Res.*, 116(D20), D20126, doi:10.1029/2011JD016002, 2011.
- de Oliveira Cardoso, A., Pinto, H. S., Ávila, A. M. H., Silva Dias, P. L., Marin, F. R. et Pilau, F.: Extended time weather forecasts contributes to agricultural productivity estimates, *Theor. Appl. Climatol.*, 102(3-4), 343–350, doi:10.1007/s00704-010-0264-0, 2010.

de Rosnay, P., Calvet, J.-C., Kerr, Y., Wigneron, J.-P., Lemaître, F., Escorihuela, M. J., Sabater, J. M., Saleh, K., Barrié, J., Bouhours, G., Coret, L., Cherel, G., Dedieu, G., Durbe, R., Fritz, N. E. D., Froissard, F., Hoedjes, J., Kruszewski, A., Lavenu, F., Suquia, D. et Waldteufel, P.: SMOSREX: A long term field campaign experiment for soil moisture and land surface processes remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, 102(3-4), 377–389, doi:10.1016/j.rse.2006.02.021, 2006.

Demeter, *Tellus special issue 57A*, 2005.

Déqué, M.: La prévision numérique à l'échelle saisonnière : que sait-on faire et que peut-on espérer ?, *La Météorologie*, 41, 20–29, 2003.

Déqué, M.: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values, *Glob. Planet. Change*, 57(1), 16–26, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030, 2007.

Doblas-Reyes, F. J., Déqué, M. et Piedelievre, J.-P.: Multi-model spread and probabilistic seasonal forecasts in PROVOST, *Q. J. R. Soc.*, 126(567), 2069–2087, 2000.

Doblas-Reyes, F. J., Hagedorn, R. et Palmer, T. N.: Developments in dynamical seasonal forecasting relevant to agricultural management, *Clim. Res.*, 33, 19–26, 2006.

Douville, H.: Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study, *Clim. Dyn.*, 34(6), 797–818, doi:10.1007/s00382-008-0508-1, 2009.

Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B. et Martin, E.: A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Ann. Geophys.*, 18, 65–71, 1993.

Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Merindol, L. et Martin, E.: A computer-based system simulating snow-pack structures as a tool for regional avalanche forecasting, *Ann. Glaciol.*, 45, 469–484, 1999.

Etchevers, P.: Modélisation de la phase continentale du cycle de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du bassin versant du Rhône., PhD. thesis. Université Toulouse III, France, 2000.

Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A. T., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E. et Moigne, P.-L.: ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development*, 6(2), 563–582, 2013.

Farquhar, G. D.: A Biochemical Model of Photosynthetic, *Planta*, 149, 78–90, 1980.

Fraedrich, K.: An ENSO impact on Europe? A review, *Tellus*, 541–552, 1994.

Frías, M. D., Herrera, S., Cofiño, A. S. et Gutiérrez, J. M.: Assessing the Skill of Precipitation and Temperature Seasonal Forecasts in Spain: Windows of Opportunity Related to ENSO Events, *J. Clim.*, 23(2), 209–220, doi:10.1175/2009JCLI2824.1, 2010.

Galle, A., Florez-Sarasa, I., Tomas, M., Pou, A., Medrano, H., Ribas-Carbo, M. et Flexas, J.: The role of mesophyll conductance during water stress and recovery in tobacco (*Nicotiana sylvestris*): acclimation or limitation?, *J. Exp. Bot.*, 60(8), 2379–90, doi:10.1093/jxb/erp071, 2009.

Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morissette, J. T., Weiss, M., Nickeson, J. E., Fernandes, R., Plummer, S., Shabanov, N. V., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y. et Yang, W.: Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *J. Geophys. Res.*, 113(G2), 2008.

Gaspar, P., Grégoris, Y. et Lefevre, J.-M.: A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site, *J. Geophys. Res.*, 95, 16179–16193, 1990.

Gate, P.: *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*, Tech&Doc Lavoisier, Paris, France. 424pp., 1995.

Gate, P., Brisson, N. et Gouache, D.: Les causes du plafonnement du rendement du blé en France: d'abord une origine climatique. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 96(3), 17-23, 2010.

Giard, D. et Bazile, E.: Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model, *Mon. Weather Rev.*, 128, 997–1015, 2000.

Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L. et Los, S. O.: Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, *J. Geophys. Res.*, 111, D18102, doi:10.1029/2005JD006691, 2006.

Habets, F.: *Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale: application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône*, PhD. Thesis, Université Toulouse III, France, 1998.

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F. et Viennot, P.: The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548, 2008.

Hamill, T. M.: Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts, *Mon. Weather Rev.*, 129, 550–560, 2001.

Hammer, G. L., Hansen, J. W., Phillips, J. G., Mjelde, J. W., Hill, H., Love, A. et Potgieter, A.: Advances in application of climate prediction in agriculture, *Agric. Syst.*, 70(2-3), 515–553, 2001.

Hansen, J. W.: Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges, *Agric. Syst.*, 74(3), 309–330, doi:10.1016/S0308-521X(02)00043-4, 2002.

Hansen, J. W. et Indeje, M.: Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya, *Agric. For. Meteorol.*, 125(1-2), 143–157, doi:10.1016/j.agrformet.2004.02.006, 2004.

Hansen, J. W., Potgieter, A. et Tippet, M. K.: Using a general circulation model to forecast regional wheat yields in northeast Australia, *Agric. For. Meteorol.*, 127(1-2), 77–92, doi:10.1016/j.agrformet.2004.07.005, 2004.

Hansen, J. W.: Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice, *Philos. Trans. R. Soc. B*, 360, 2037–2047, doi:10.1098/rstb.2005.1747, 2005.

Hansen, J. W. et Sivakumar, M. V. K.: Advances in applying climate prediction to agriculture, *Clim. Res.*, 33, 1–2, 2006.

Hansen, J. W., Mishra, A., Rao, K. P. C., Indeje, M. et Ngugi, R. K.: Potential value of GCM-based seasonal rainfall forecasts for maize management in semi-arid Kenya, *Agric. Syst.*, 101(1-2), 80–90, doi:10.1016/j.agry.2009.03.005, 2009.

Hoffman, R. N. et Kalnay, E.: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting, *Tellus*, 35A, 100–118, 1983.

Hoogenboom, G.: Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications, *Agric. For. Meteorol.*, 103(1-2), 137–157, doi:10.1016/S0168-1923(00)00108-8, 2000.

Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G. et Visbeck, M.: An overview of the North Atlantic oscillation. *Geophys. Monogr.*, 134, 1–35, 2003.

IPCC, «Intergovernmental panel on climate change», 5th assessment report, 2014.

Jacobs, C. M. J.: Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration, PhD. Thesis, Agricultural University, Wageningen, the Netherlands, 179pp., 1994.

Jacobs, C. M. J.: Stomatal behaviour and photosynthetic rate of unstressed grapevines in semi-arid conditions, *Agric. For. Meteorol.*, 80, 111–134, 1996.

Jarvis, P. G.: The Interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, *Philos. Trans. R. Soc. London. B*, 273, 593–610, doi:10.1098/rstb.1976.0035, 1976.

Kalnay E.: Atmospheric predictability and ensemble forecasting. In atmospheric modelling: data assimilation and predictability, chapter 6, Cambridge University Press, 2003b.

- Koide, N., Robertson, A. W., Ines, A. V. M., Qian, J.-H. et Dewitt, D. G.: Prediction of Rice Production in the Philippines Using Seasonal Climate Forecasts, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 52, 552–569, doi:10.1175/JAMC-D-11-0254.1, 2013.
- Kong, X., Dorling, S. et Smith, R.: Soil moisture modelling and validation at an agricultural site in Norfolk using the Met Office surface exchange scheme (MOSES), *Meteorol. Appl.*, 18(1), 18–27, doi:10.1002/met.197, 2011.
- Koster, R. D. et Suarez, M. J.: Soil moisture memory in climate models, *J. Hydrometeorol.*, 2, 558–570, 2001.
- Koster, R. D., Suarez, M. J., Liu, P., Jambor, U., Berg, A., Kistler, M., Reichle, R., Rodell, M. et Famiglietti, J.: Realistic Initialization of Land Surface States: Impacts on Subseasonal Forecast Skill, *J. Hydrometeorol.*, 5, 1049–1063, 2004.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. et Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cycles*, 19(1), GB1015, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.
- Krishnamurti, T. N., Kishtawal, C. M., LaRow, T. E., Bachiochi, D. R., Zhang, Z., Williford, C. E., Gadgil, S. et Surendran, S.: Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble., *Science*, 285, 1548–1550, 1999.
- Lafont, S., Zhao, Y., Calvet, J.-C., Peylin, P., Ciais, P., Maignan, F. et Weiss, M.: Modelling LAI, surface water and carbon fluxes at high-resolution over France: comparison of ISBA-A-gs and ORCHIDEE, *Biogeosciences*, 9, 439–456, doi:10.5194/bg-9-439-2012, 2012.
- Le Moigne, P.: Description de l’analogie des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME, Météo-France, 2002.
- Le Moigne, P.: SURFEX scientific documentation, Note de centre du Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle, Météo-France, CNRM, Toulouse. Available from: <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex>, 2012.
- Lloyd-Hughes, B. et Saunders, M. A.: Seasonal prediction of European spring precipitation from El Nino-Southern Oscillation and Local sea-surface temperatures, *Int. J. Climatol.*, 22, 1–14, doi:10.1002/joc.723, 2002.
- Lorenz, E. N.: Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues, *J. Atmos. Sci.*, 26, 636–646, 1969.
- Mahfouf, J.-F., Manzi, A. O., Noilhan, J., Giordani, H. et Déqué, M.: The land surface scheme ISBA within the Météo-France Climate Model ARPEGE. Part I: Implementation and preliminary results, *J. Clim.*, 8, 2039–2057, 1995.

Manabe, S.: Climate and the ocean circulation. 1: The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface, *Mon. Weather Rev.*, 97(11), 739–774, 1969.

Marletto, V., Ventura, F., Fontana, G. et Tomei, F.: Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model, *Agric. For. Meteorol.*, 147(1-2), 71–79, doi:10.1016/j.agrformet.2007.07.003, 2007.

Marletto, V., Zinoni, F., Criscuolo, L., Fontana, G., Marchesi, S., Morgillo, A., Soetendaal, M. V., Ceotto, E. et Andersen, U.: Evaluation of downscaled DEMETER multi-model ensemble seasonal hindcasts in a northern Italy location by means of a model of wheat growth, *Tellus*, 57(A), 488–497, 2005.

Masson, V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-layer Meteorol.*, 94(3), 357–397, 2000.

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V. et Voldoire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013, 2013.

Maybank, J., Bonsai, B., Jones, K., Brien, E. G. O., Ripley, E. A. et Wheaton, E.: Drought as a natural disaster, *Atmosphere-Ocean*, 33(2), 195–222, 1995.

Meynard, J. M.: Which crop models for decision support in crop management ? Example of the DECIBLE system. *Proceeding of the INRA-KCW workshop on DSS*, Laon, 1997.

Mjelde, J. W., Thompson, T. N., Nixon, C. J. et Lamb, P. J.: Utilising a farm-level decision model to help prioritise future climate prediction research needs, *Meteorol. Appl.*, 4(2), 161–170, doi:10.1017/S1350482797000418, 1997.

Molteni, F., Stockdale, T., Balmaseda, M., Balsamo, G., Buizza, R., Ferranti, L., Magnusson, L., Mogensen, K. et Palmer, T.: The new ECMWF seasonal forecast system (System 4), ECMWF, Reading, UK, 49, 2011.

Murphy, A. H.: A new vector partition of the probability score, *J. Appl. Meteorol.*, 12, 595–600, 1973.

Murphy, A. H.: The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation, *Mon. Weather Rev.*, 105(7), 803–816, 1977.

- Neelin, J. D., Anthony, S. B., Jin, C. H. F. et Zebiak, E.: ENSO theory, *J. Geophys. Res.*, 103(C7), 14.261–14.290, 1998.
- Noilhan, J. et Mahfouf, J.-F.: The ISBA land surface parameterisation scheme, *Glob. Planet. Change*, 13, 145–159, 1996.
- Noilhan, S. et Planton, J.: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Weather Rev.*, 117, 536–549, 1989.
- Ogallo, L. A., Boulahya, M. S. et Keane, T.: Applications of seasonal to interannual climate prediction in agricultural planning and operations, *Agric. For. Meteorol.*, 103(1-2), 159–166, doi:10.1016/S0168-1923(00)00109-X, 2000.
- Palmer, T. N. et Anderson, D. L. T.: The prospects for seasonal forecasting - A review paper, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 120, 755–793, 1994.
- Palmer, T. N., Brankovic, C. et Richardson, D. S.: A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126(567), 2013-2033, 2000.
- Palmer, T. N., Doblas-Reyes, F. J., Hagedorn, R., Alessandri, A., Gualdi, S., Andersen, U., Feddersen, H., Cantelaube, P., Terres, J.-M., Davey, M., Graham, R., Délécluse, P., Lazar, A., Déqué, M., Guérémy, J.-F., Díez, E., Orfila, B., Hoshen, M., Morse, A. P., Keenlyside, N., Latif, M., Maisonnave, E., Rogel, P., Marletto, V. et Thomson, M. C.: Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal-to-interannual Prediction (Demeter), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85(6), 853–872, doi:10.1175/BAMS-85-6-853, 2004.
- Panofsky, H. A. et Brier, G. W.: Some applications of statistics to meteorology. The Pennsylvania State University Press, 224pp., 1968.
- Peings, Y. et Douville, H.: Influence of the Eurasian snow cover on the Indian summer monsoon variability in observed climatologies and CMIP3 simulations, *Clim. Dyn.*, 34(5), 643–660, doi:10.1007/s00382-009-0565-0, 2009.
- Peng, P., Kumar, A. et Wang, W.: An analysis of seasonal predictability in coupled model forecasts, *Clim. Dyn.*, 36(3-4), 637–648, doi:10.1007/s00382-009-0711-8, 2009.
- Petoukhov, V. et Semenov, V. A.: A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. Geophys. Res.*, 115(D21), D21111, doi:10.1029/2009JD013568, 2010.
- Podesta, G., Letson, D., Messina, C., Royce, F., Ferreyra, R. A., Hansen, J., Llovet, I., Grondona, M. et Brien, J. J. O.: Use of ENSO-related climate information in agricultural decision making in Argentina: a pilot experience, *Agric. Syst.*, 74, 371–392, 2002.

Pozo-Vázquez, D., Gàmiz-Fortis, S. R., Tovar-Pescador, J., Esteban-Parra, M. J. et Castro-Diez, Y.: El Nino-southern oscillation events and associated European winter precipitation anomalies, *Int. J. Climatol.*, 25(1), 17–31, doi:10.1002/joc.1097, 2005.

Queguiner, S., Martin, E., Lafont, S., Calvet, J.-C., Faroux, S. et Quintana-Seguí, P.: Impact of the use of a CO₂ responsive land surface model in simulating the effect of climate change on the hydrology of French Mediterranean basins, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11(10), 2803–2816, doi:10.5194/nhess-11-2803-2011, 2011.

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L. et Morel, S.: Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47(1), 92–107, doi:10.1175/2007JAMC1636.1, 2008.

Reichler, T. J. et Roads, J. O.: Nonlinear Processes in Geophysics The role of boundary and initial conditions for dynamical seasonal predictability, *Nonlinear Process. Geophys.*, 10, 211–232, 2003.

Reichler, T. J. et Roads, J. O.: Long-range predictability in the Tropics. Part II: 30 – 60-Day Variability, *J. Clim.*, 18, 634–650, 2005.

Rivalland, V., Calvet, J.-C., Berbigier, P., Brunet, Y. et Granier, A.: Transpiration and CO₂ fluxes of a pine forest: modelling the undergrowth effect, *Ann. Geophys.*, 23, 291–304, 2005.

Rousset-Regimbeau, F.: Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d'ensemble des débits. PhD thesis. Université Toulouse III, France, 225 pp., 2007.

Rousset-Regimbeau F., Habets, F., Martin, E. et Noilhan, J.: Ensemble streamflow forecasts over France. *ECWMF Newsletter No 111*, 21-27, 2007.

Sabater, J. M., Jarlan, L., Calvet, J.-C., Bouyssel, F. et de Rosnay, P.: From near-surface to root-zone soil moisture using different assimilation techniques, *J. Hydrometeorol.*, 8(2), 194–206, doi:10.1175/JHM571.1, 2007.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M. et Becker, E.: The NCEP climate forecast system version 2, *J. Clim.*, 27(6), 2185–2208, doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1, 2014.

Salgado, R. et Le Moigne, P.: Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model, *Boreal Environ. Res.*, 15, 1–14, 2010.

Sarrat, C., Noilhan, J., Lacarrère, P., Ceschia, E., Ciais, P., Dolman, A. J., Elbers, J. A., Gerbig, C., Gioli, B., Lauvaux, T., Miglietta, F., Neininger, B., Ramonet, M., Vellinga, O. et Bonnefond, J. M.: Mesoscale modelling of the CO₂ interactions between the surface and the atmosphere applied to the April 2007 CERES field experiment, *Biogeosciences*, 6, 633–646, 2009.

Saunier-Batté, L.: Prévisions d'ensemble à l'échelle saisonnière : mise en place d'une dynamique stochastique, PhD. thesis. Université Paris-Est, France, 223 pp., 2013.

Schmugge, T. J.: Remote sensing of soil moisture: Recent advances, *IEEE T. Geosci. Remote, GE21*, 145-146, 1983.

Semenov, M. A. et Doblas-reyes, F. J.: Utility of dynamical seasonal forecasts in predicting crop yield, *Clim. Res.*, 34, 71–81, 2007.

Singla, S.: Prévisibilité des ressources en eau à l'échelle saisonnière en France, PhD. Thesis, Université Toulouse III, France, 229 pp., 2012.

Singla, S., Céron, J.-P., Martin, E., Rousset-Regimbeau, F., Déqué, M., Habets, F. et Vidal, J.-P.: Predictability of soil moisture and river flows over France for the spring season, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(1), 201–216, doi:10.5194/hess-16-201-2012, 2012.

Sivakumar, M. V. K.: Climate prediction and agriculture: current status and future challenges, *Clim. Res.*, 33, 3–17, 2006.

Smith, P. C., de Noblet-Ducoudré, N., Ciais, P., Peylin, P., Viovy, N., Meurdesoif, Y. et Bondeau, A.: European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: phenology and productivity, *J. Geophys. Res.*, 115, G01014, doi:10.1029/2008JG000800, 2010a.

Smith, P. C., Ciais, P., Peylin, P., De Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Meurdesoif, Y. et Bondeau, A.: European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: 2. Interannual yields and anomalous CO₂ fluxes in 2003, *J. Geophys. Res.*, 115, G04028, doi:10.1029/2009JG001041, 2010b.

Supit, I.: Predicting national wheat yields using a crop simulation and trend models, *Agric. For. Meteorol.*, 88(1-4), 199–214, doi:10.1016/S0168-1923(97)00037-3, 1997.

Szczypta, C., Calvet, J.-C., Albergel, C., Balsamo, G., Boussetta, S., Carrer, D., Lafont, S. et Meurey, C.: Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(2), 647–666, doi:10.5194/hess-15-647-2011, 2011.

Szczypta, C.: Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen, PhD. Thesis, INP Toulouse, France, 180pp., 2012.

Szczypta, C., Calvet, J.-C., Maignan, F., Dorigo, W., Baret, F. et Ciais, P.: Suitability of modelled and remotely sensed essential climate variables for monitoring Euro-Mediterranean droughts, *Geosci. Model Dev.*, 7(3), 931–946, doi:10.5194/gmd-7-931-2014, 2014.

Thompson, D. W. J. et Wallace, J. M.: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, 25(9), 1297–1300, 1998.

Thompson, D. W. J., Baldwin, M. P. et Wallace, J. M.: Stratospheric connection to northern hemisphere wintertime weather: Implications for prediction, *J. Clim.*, 15, 1421–1428, 2002.

Thornton, P. K.: Ex ante impact assessment and seasonal climate forecasts: status and issues, *Clim. Res.*, 33, 55–65, 2006.

Trenberth, K. E.: The Definition of El Niño, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78(12), 2771–2777, 1997.

Troccoli, A.: Review: Seasonal climate forecasting, *Meteorol. Appl.*, 17, 251–268, doi:10.1002/met.184, 2010.

Vautard, R.: Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors, *Mon. Weather Rev.*, 118, 2056–2081, 1990.

Vermote, E., Ellicott, E., Dubovik, O., Lapyonok, T., Chin, M., Giglio, L. et Roberts, G. J.: An approach to estimate global biomass burning emissions of organic and black carbon from MODIS fire radiative power, *J. Geophys. Res.*, 114(D18), D18205, doi:10.1029/2008JD011188, 2009.

Vidal, J., Martin, E., Franchistéguy, L., Habets, F., Soubeyroux, J.-M., Blanchard, M. et Baillon, M.: Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 459–478, 2010.

Vié, B.: Méthodes de prévision d'ensemble pour l'étude de la prévisibilité à l'échelle convective des épisodes de pluies intenses en Méditerranée, PhD. thesis, Université Paris-Est, France, 202pp., 2012.

Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L. et Chauvin, F.: The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, *Clim. Dyn.*, 40(9-10), 2091–2121, doi:10.1007/s00382-011-1259-y, 2012.

Weir, A. H., Bragg P. L., Porter J. R. et Rayner J. H.: A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci.*, 102(02), 371-382, 1984.

Weisheimer, A., Doblas-Reyes, F. J., Jung, T. et Palmer, T. N.: On the predictability of the extreme summer 2003 over Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 38(L05704), doi:10.1029/2010GL046455, 2011.

Wilby, R. L.: Evidence of ENSO in the synoptic climate of the British Isles since 1880, *Weather*, 48, 234–239, 1993.

Wilby, R. L., Wedgbrow, C. S. et Fox, H. R.: Seasonal predictability of the summer hydrometeorology of the River Thames, UK, *J. Hydrol.*, 295(1-4), 1–16, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.02.015, 2004.

Wilks, D. S.: *Statistical methods in atmospheric sciences: An introduction*. Academic Press. 467pp., 1995.

Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V. et Lettenmaier, D. P.: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Clim. Change*, 62(1-3), 189–216, doi:10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e, 2004.

Zorita, E. et Von Storch, H.: The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods, *J. Clim.*, 12, 2474–2489, 1999.

Application à l'agriculture de la prévision saisonnière : évaluation à l'échelle de la France

Spécialité : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Auteur : Nicolas Canal

Directeur de thèse : Jean-Christophe Calvet

Co-directeur de thèse : Grégoire Pigeon

Résumé

Depuis les années 90, des applications de la prévision saisonnière du temps ont été développées dans divers domaines. L'utilisation de plusieurs scénarios météorologiques générés à partir de conditions initiales différentes a permis de développer des prévisions d'ensemble à longue échéance (au-delà du mois). Dans le domaine de l'agriculture, la capacité de modèles de cultures forcés par ces scénarios à fournir des prévisions de rendement sur l'Europe a été évaluée (Cantelaube et Terres, 2005 ; Marletto et al., 2007). Ces auteurs ont montré que dans certaines conditions, et en dépit du fait qu'aux moyennes latitudes la prévision saisonnière du temps est de qualité inférieure à celle observée aux tropiques, les prévisions de rendement ainsi obtenues sont meilleures que celles basées sur des méthodes statistiques. Dans le même temps, la modélisation de la croissance de la végétation a été introduite dans les modèles de climat, et de longues séries d'observations satellitaires de la végétation ont été produites.

Ce travail de thèse vise à évaluer dans quelle mesure l'utilisation de la prévision saisonnière du temps pour forcer un modèle de croissance du blé sur la France permet d'anticiper l'évolution des variables agro-météorologiques de cette culture. Les prévisions saisonnières produites par le projet ENSEMBLES (Weisheimer et al., 2009) sur la période 1981-2005 sont utilisées, ainsi que le modèle de culture Panoramix d'Arvalis (Gate, 1995). En particulier, on considère les principaux stades phénologiques, le bilan hydrique et les sommes de température. L'utilisation de différentes méthodes de descente d'échelle et de différentes échéances de la prévision saisonnière du temps, ainsi que l'apport d'une approche basée sur l'utilisation de prévisions issues de plusieurs modèles de circulation générale sont examinés. En parallèle, des méthodes statistiques de prévision basées sur des indicateurs issus du modèle générique des surfaces continentales ISBA-A-gs (Calvet et al., 1998) ou d'observations satellitaires de la végétation (GEOV1, Baret et al., 2013) sont évaluées.

On montre qu'un ensemble de scénarios utilisant plusieurs modèles de circulation générale donne de meilleures estimations des variables agro-météorologiques que l'utilisation d'un seul modèle ou d'une méthode fréquentielle basée sur des situations passées. Quelle que soit la méthode, les meilleures prévisions sont généralement obtenues dans le nord de la France. La limite de prévisibilité est repoussée avec une approche ensembliste de la prévision saisonnière du temps, par rapport à une approche restreinte à l'utilisation de la médiane des scénarios fournis par le système de prévision. On montre également que dans certaines conditions, le modèle ISBA-A-gs est capable de représenter la variabilité interannuelle des couverts agricoles (céréales hiver/printemps) et des prairies. Pour cela, les statistiques agricoles Agreste sur la période 1994-2010 sont utilisées. La capacité du modèle à produire des indicateurs du rendement dépend fortement de la façon dont l'humidité du sol est représentée (une ou plusieurs couches de sol, profondeur du sol).

Enfin, des produits satellitaires d'indice foliaire de la végétation (Leaf Area Index, ou LAI) sont utilisés dans le même objectif. Le potentiel de prédiction de l'état de la végétation en fin de cycle cultural, à partir de l'humidité du sol simulée par le modèle ou le LAI satellitaire, est généralement plus grand pour les prairies que pour les cultures.

Mots-clés

Prévision saisonnière, rendements agricoles, céréales printemps/hiver, modélisation, ISBA-A-gs, données satellitaires, contenu en eau, multi-modèles.