

IMPACT POTENTIEL DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES SÉCHERESSES PÉDOLOGIQUES EN BRETAGNE AU 21^{ème} SIECLE

Chloé LAMY et Vincent DUBREUIL

Laboratoire LETG-Rennes COSTEL, UMR6554 CNRS – OSUR

Université Rennes 2

Place du Recteur Henri Le Moal

35043 Rennes Cedex – France

chloe.lamy1@gmail.com ; vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

Résumé

La Bretagne a connu par le passé des sécheresses majeures. Celles-ci ont eu des conséquences dommageables sur des activités importantes pour l'économie de la région, telles que l'agriculture. Dans un contexte de changement climatique, il apparaît donc important de cerner les évolutions possibles du risque de sécheresse à l'échelle du territoire. Ces évolutions ont été étudiées à partir de simulations climatiques du modèle Arpège-Climat pour trois scénarios du GIEC : A1B, A2 et B1. Pour suivre les sécheresses pédologiques impactant l'agriculture, un bilan hydrique a été calculé de façon à obtenir un indice de sécheresse : le déficit d'évaporation. Les résultats prévoient une augmentation de l'intensité des sécheresses au cours du 21^{ème} siècle, principalement pour la moitié est du territoire. Le littoral sud serait le secteur le plus sensible à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. En termes d'intensité, on dépasserait, dans ce secteur, les valeurs relevées lors de la sécheresse de 1976, toutes choses égales par ailleurs. Ce risque de voir des sécheresses exceptionnelles par le passé devenir communes à moyen terme, impacterait fortement l'agriculture, ainsi que le cycle de l'eau, sur une grande partie de l'année. Cela pourrait entraîner une diminution des écoulements de surface alimentant les quelques nappes phréatiques bretonnes et les zones humides.

Mots-clés : changement climatique, sécheresse pédologique, Bretagne, modélisation, bilan hydrique.

Abstract

Potential climate change impacts on pedological droughts in Brittany for the 21st Century

In the past, Brittany have been affected by intense droughts. These droughts have had heavy impacts on important socio-economical activities for the economy of the region, such as agriculture. In a climate change context it seems important to evaluate the possible ways of evolution of that risk at a territory scale. These evolutions have been studied by using climate simulations from three IPCC's scenarios: A1B, A2 and B1. In order to monitor pedological droughts which can affect agriculture, a soil water balance have been processed to calculate a drought index: the evaporation deficit. Results revealed an increase of drought intensity during the 21st century, more specifically in the eastern part of the region. The south coastline would be the most sensitive area in terms of droughts' intensity and frequency. In that area a similar intensity as the one measured during the 1976 drought, other things being equal, would be frequently reached and surpass. Exceptional past droughts could become common in the future, impacting both agriculture and water cycle. This could cause a decreasing in runoff which supplies tertiary aquifers and wetlands.

Keywords: climate change, pedological drought, Brittany, modeling, soil water balance.

Introduction

La péninsule bretonne, dont le climat est réputé humide, a connu par le passé des sécheresses importantes. Ces épisodes climatiques extrêmes ont eu des conséquences notables sur l'agriculture, notamment en 1976 et 1989 (Mounier, 1965 et 1977 ; Dubreuil, 1994 et 1997). Cette vulnérabilité a permis de rappeler que les sécheresses sont un risque pouvant sévir même en domaine océanique. L'agriculture occupant une part importante de l'économie régionale et nationale, il apparaît stratégique de suivre l'évolution de cet aléa dans le contexte du changement climatique (CLIMATOR, 2010). Les études régionales sur le changement climatique sont rendues possibles par l'utilisation de modèles climatiques régionalisés. Ainsi,

pour la France, la plus petite résolution de données régionalisées issues de modèles climatiques opérationnels est actuellement de 8 km. Cela permet de réaliser des études nationales sur le changement climatique, comme c'est le cas avec le programme CLIMSEC mené par Météo France (Soubeyrou *et al.*, 2011). On peut également utiliser ces données pour des études régionales (Ducharne *et al.*, 2003 ; Gibelin et Déqué, 2003 ; Somot, 2005 ; Déqué *et al.*, 2005 ; Kamga *et al.*, 2005 ; Pearce *et al.*, 2005 ; Hewitson et Crane, 2006 ; Christensen *et al.*, 2007 ; Déqué, 2007 ; Giorgi et Lionello, 2008 ; Commeaux *et al.*, 2010 ; Lamy et Dubreuil, 2011 ; Piazza *et al.*, 2011, Mérot *et al.*, 2012).

Cependant, les conséquences du changement climatique à l'échelle des territoires français sont encore peu étudiées. Nous proposons ainsi une analyse régionale du risque sécheresse en domaine océanique dans le contexte du changement climatique. Les objectifs de ce travail sont de cerner les conséquences possibles du changement sur la fréquence et l'intensité des sécheresses d'après les données du modèle Arpège-Climat de Météo France et trois scénarios du GIEC : le scénario B1, optimiste sur l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre ; le scénario A2, pessimiste sur ce point ; et un scénario intermédiaire, A1B. L'originalité de la Bretagne, outre l'importance de la filière agricole, est qu'elle ne bénéficie pas de ressources hydriques souterraines importantes, comme cela peut être le cas dans le bassin parisien. La ressource en eau est principalement superficielle et la disponibilité de l'eau se situe donc essentiellement au niveau des sols, selon la taille de la réserve utile. La modélisation du bilan hydrique proposée ici intègre l'occupation du sol, pour cerner au mieux le comportement de l'eau à l'interface sol-atmosphère.

1. Enjeux historiques des sécheresses en Bretagne

L'agriculture bretonne est principalement orientée vers l'élevage et la polyculture, destinée avant tout à l'alimentation animale. La ressource en eau est donc utilisée pour la croissance et la maturation des cultures mais aussi pour la consommation du bétail. Les études antérieures ont montré l'intérêt d'étudier les sécheresses à l'échelle régionale à partir de méthodes de bilan de l'eau. La démarche adoptée ici mobilise donc l'agroclimatologie (et notamment un bilan hydrique simplifié) qui permet de comprendre la vulnérabilité du système agricole breton aux épisodes secs actuels et futurs.

Le climat général de la Bretagne (figure 1) est qualifié de tempéré océanique de façade ouest (Péguy, 1970 ; Mounier, 1979). Il se caractérise par des hivers doux et humides et des étés frais généralement moins arrosés.

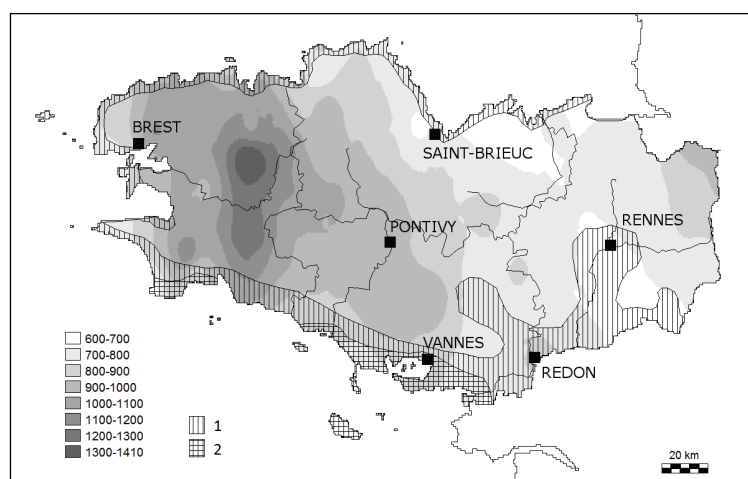


Figure 1 : Précipitations moyennes annuelles en mm sur la période 1961-1990 (d'après Dubreuil *et al.*, 2012, In Mérot *et al.*, 2012) ; Hachures : 1 = deux mois secs ($P < 3T$) ; 2 = un mois sec ($P < 2T$). Mean annual rainfall in mm for the 1961-1990 period (according to Dubreuil *et al.*, 2012, In Mérot *et al.*, 2012) ; hatching: 1 = two subdry months ($P < 3T$) ; 2 = one dry month ($P < 2T$).

En janvier, les températures moyennes (1951-1980) sont généralement comprises entre 4 et 7°C, et en juillet-août, entre 15 et 20°C. Les précipitations annuelles, comprises le plus souvent entre 600 et 1000 mm, présentent une importante variabilité spatiale. Ainsi, Mounier (1977) estime que « *le tiers à peine de la péninsule reçoit plus de 1000 millimètres d'eau par an* ».

Le risque sécheresse a déjà été étudié dans le nord-ouest français suite aux grandes sécheresses de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, qui ont rappelé la sensibilité de ce territoire aux événements secs. On distingue trois types de sécheresses : atmosphérique, définie par une absence de précipitations sur une période déterminée ; pédologique, caractérisant un manque d'eau dans les sols pour la végétation ; hydraulique, lorsque l'on atteint un étiage plus ou moins sévère des cours d'eau (Lambert, 1996). Dubreuil (1994) a réalisé le bilan hydrique de plusieurs stations de Bretagne afin de mettre en évidence, sur la période 1961-1990, le déficit moyen. Ces travaux indiquent un climat plus propice à la sécheresse pour la Bretagne méridionale et orientale (exemple de Lorient et de Rennes), par rapport à la partie occidentale de la région (exemple de Brest). Les grandes sécheresses qui ont marqué la France au cours du 20^{ème} siècle (1921, 1976, 1959, 1989) ont également été ressenties en Bretagne, plus ou moins fortement selon les secteurs, les plus impactés étant généralement situés au sud et à l'est du territoire.

2. Méthodologie

La sécheresse atmosphérique s'estime facilement à partir de la quantité de précipitations tombée sur un secteur et sur une période donnée. Pour repérer les sécheresses pédologiques, la situation est plus complexe puisqu'il faut combiner les données climatiques avec des données pédologiques. Le bilan hydrique est dès lors particulièrement adapté au suivi des sécheresses des sols puisque, dans sa version complète, il intègre les précipitations, l'évaporation, l'écoulement (gravitaire et latéral) et l'humidité du sol et du sous-sol (Pédaborde, 1968 ; Trzpit, 1978 ; Turc et Trzpit, 1985 ; Entekhabi *et al.*, 1992 ; Ritchie, 1998 ; Ciais *et al.*, 2005 ; Cantat *et al.*, 2010). Plusieurs études ont déjà utilisé cette méthodologie pour l'étude historique de ce risque en Bretagne (Mounier, 1965 ; Dubreuil, 1994 et 1997).

Le bilan hydrique permet de suivre la teneur en eau dans les réserves hydriques des sols à différents pas de temps. Il permet également le calcul d'un indice de sécheresse : le déficit d'évaporation (nommé ci-après DE), qui met en évidence les sécheresses pédologiques, événements les plus impactant pour l'agriculture. Dans la version simplifiée du bilan hydrique, qui est utilisée dans cette étude, l'écoulement horizontal n'est pas pris en compte.

Pour ce travail, plusieurs jeux de données sont nécessaires au calcul du bilan hydrique (tableau 1). Les données climatiques utilisées sont des sorties désagrégées calculées par le CERFACS à partir du modèle ARPEGE-Climat retic (Pagé et Terray, 2010) et pour les trois scénarios B1, A1B et A2. Ce travail ne s'appuyant que sur un seul modèle climatique, il n'est pas permis d'inter-comparer différents modèles climatiques, ce qui pourrait amener une réflexion plus robuste sur les simulations. L'objectif est ici plutôt de proposer une réflexion méthodologique sur la spatialisation de l'aléa sécheresse en Bretagne à partir de simulations climatiques au cours du 21^{ème} siècle.

La désagrégation des sorties de modèles réalisée au CERFACS a été effectuée selon une méthode statistique qui repose sur les types de circulation (Pagé et Terray, 2010). La désagrégation s'appuie sur la base de données SAFRAN. Ces données de Météo France sont des hybrides entre la réanalyse et l'observation. Elles correspondent à une analyse méso-échelle sur la France métropolitaine, sur la période 1958-2008 (Quintana-Seguí *et al.*, 2008). C'est leur résolution spatiale de 8 km qui a déterminé la résolution des sorties désagrégées

calculées au CERFACS. Les sorties désagrégées ont, par ailleurs, une résolution temporelle journalière.

Types de données	Résolution spatiale	Sources <i>(organismes et bases de données)</i>
Climatiques <i>Précipitations (P)</i> <i>Evapotranspiration (ET)</i>	8 km	CERFACS
Occupation du sol	≤ 25 m	CORINE Land Cover
Pédologie <i>Taille réserve utile (RU)</i>	2,5 km	Laboratoire Science du Sol, Agrocampus Ouest

Tableau 1 : Caractéristiques des données en points de grille utilisées pour calculer le bilan hydrique. *Characteristics of databases used to implement the soil water balance.*

Les données climatiques sont associées à des données pédologiques, relatives à la taille de la réserve utile, pour calculer le bilan hydrique. Les informations pédologiques ont été établies dans le cadre du programme ‘Sols de Bretagne’ et fournies par le laboratoire Science du Sol, d’Agrocampus Ouest. Les données pédologiques ont une résolution spatiale de l’ordre de 2,5 km, liée aux campagnes de terrain (Lemercier *et al.*, 2010). Pour amener plus de précision au bilan hydrique, un troisième jeu de données est intégré au calcul et concerne l’occupation du sol. Ces informations proviennent de la base CORINE Land Cover qui possède une résolution spatiale de l’ordre de 25 m (Büttner *et al.*, 2002).

Ces trois jeux de données ayant des résolutions spatiales différentes, un choix a été fait pour déterminer la résolution spatiale optimale du bilan hydrique. Etant donné l’importance des données climatiques et afin de ne pas rajouter de biais à ces données, la résolution du bilan hydrique est la même que celle des sorties climatiques désagrégées, soit 8 km. Sur le plan technique, l’ensemble des traitements et calculs ont été réalisés sous ArcGIS et codés en langage Python.

3. Résultats

Les résultats présentés ici sont issus de bilans hydriques spatialisés et stationnels afin de proposer une analyse la plus complète possible sur les caractéristiques des sécheresses en Bretagne, dans le contexte du changement climatique. Ces bilans ont été calculés sur des périodes moyennes de 20 ans. Lorsqu’on souhaite travailler sur des valeurs moyennes, comme ici, on utilise généralement des périodes de 20 ou 30 ans, de façon à s’affranchir de la variabilité interannuelle. Nous avons choisi d’utiliser des périodes de 20 ans pour apprécier l’évolution du climat au 21^{ème} siècle à partir d’un plus grand nombre de séries. Dans un premier temps, une comparaison des données simulées avec les données observées est effectuée : l’objectif est de confirmer la qualité des simulations pour une utilisation dans un contexte de suivi des sécheresses à une échelle régionale. Pour cela, le bilan hydrique est calculé à partir des seules données climatiques. Par la suite, les résultats concernant l’évolution du DE dans le temps et l’espace sont issus d’un bilan hydrique intégrant la diversité spatiale bretonne avec la taille réelle des réserves utiles et l’occupation des sols.

Deux approches complémentaires sont présentées pour analyser le déficit d’évaporation ; tout d’abord, celle avec la spatialisation du déficit moyen estival à moyen et long terme. Puis, l’évolution du DE est détaillée mois par mois en 4 points de grille en secteur breton, de façon à analyser l’évolution saisonnière du déficit.

3.1. Analyse critique des biais du modèle par rapport aux données observées

Avant d'étudier les données futures, il convient de comparer les sorties du modèle ARPEGE-Climat en Bretagne, pour la période 1971-2010, avec les données observées du réseau de Météo France. La comparaison présentée ici focalise sur les précipitations et l'évapotranspiration du fait de l'importance de ces paramètres pour l'étude des sécheresses et également du fait du caractère "intégrateur" de l'ETP, puisqu'elle dépend de la température, de la vitesse du vent, de la pression, de l'insolation, de la radiation et de la pression de vapeur d'eau. En complément de l'analyse des précipitations et de l'évapotranspiration, on s'intéresse également à l'indice de sécheresse DE. Pour calculer cet indice, il est donc nécessaire de prendre en compte la taille de la réserve utile, afin de l'intégrer dans un bilan hydrique. Pour rester sur une comparaison climatique, la taille moyenne de la réserve utile en Bretagne, soit 125 mm (Mounier, 1965 ; Dubreuil, 1994), a été utilisée pour chacune des stations. L'évapotranspiration potentielle est obtenue selon la formule Penman-Monteith modifiée par Météo France (Ducharne, 2002) (cf. formule 1). Les données simulées correspondent aux sorties désagrégées CERFACS présentées plus haut.

$$ETP_{MF} = ETP_1 + ETP_2 \quad (1)$$

$$ETP_1 = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \frac{R_n}{\lambda}$$

$$ETP_2 = \frac{\gamma}{(\Delta + \gamma)} \frac{0.26 (1. + 0.4U_{10})(e_s - e_a)}{\tau}$$

Avec Δ la pente de la relation de Clausius-Clapeyron ; γ la constante psychrométrique ; U_{10} la vitesse du vent à 10 m ; $e_s - e_a$ le déficit de la pression de vapeur d'eau ; R_n le rayonnement net en surface ; λ la chaleur latente de vaporisation de l'eau ; τ la constante de temps.

Les données observées proviennent des séries du réseau Météo France. Du fait de ses limites et de son histoire maritime, la Bretagne possède plus de stations météorologiques sur la côte que dans les terres. Une sélection a donc été faite pour conserver les stations synoptiques en fonctionnement continu sur la période 1971-2010, situées sur la côte et dans les terres, pour avoir une période analysée cohérente. Des tests statistiques ont été réalisés pour s'assurer de la qualité et la stationnarité des séries de données. Dix stations ont finalement été retenues pour un test qualitatif des données simulées désagrégées (Lamy, 2013). La comparaison des données simulées et observées sur la période 1971-2010 porte sur différents paramètres climatiques, présentés dans le tableau 2.

Les différences d'évapotranspiration et de précipitations sont faibles pour la majorité des 10 stations, comprises entre -10 et +10 % (tableau 2). Les différences sont plus importantes pour le déficit d'évaporation, à cause d'un cumul des biais dans la chaîne de calcul. Le DE étant obtenu à partir de l'évapotranspiration potentielle et réelle, les biais sur ces variables se cumulent et peuvent conduire à un biais plus important pour le déficit d'évaporation. Cependant, les différences observées pour l'indice de sécheresse P-ET sont également importantes et montrent ainsi que la modélisation du déficit d'évaporation est correcte et acceptable. La plupart des études (Déqué *et al.*, 2005 ; Déqué, 2007 ; Lamy et Dubreuil, 2011) s'accordent sur la plus grande difficulté à modéliser les précipitations que les températures, ce qui s'observe dans le tableau 2 à la vue des taux de différences moindres pour l'évapotranspiration potentielle que pour les précipitations.

	Angers	Belle-Ile	Ile-de-Bréhat	Brest	Caen	Dinard	Lorient	Nantes	Rennes	Rostrenen	
P	obs	673	692	750	1166	730	750	921	800	675	1095
	mod	668	781	723	1133	711	754	1081	782	674	1067
	diff (mm)	-5	89	-27	-34	-19	4	160	-18	-1	-29
	diff (%)	-1	11	-4	-3	-3	0	15	-2	0	-3
ET	obs	811	731	651	655	702	732	715	816	775	632
	mod	739	745	683	655	692	754	726	783	706	629
	diff (mm)	-73	14	32	0	-10	22	11	-32	-69	-4
	diff (%)	-10	2	5	0	-1	3	2	-4	-9	-1
ETR	obs	558	520	534	577	571	584	624	574	550	536
	mod	529	546	538	572	549	576	597	557	525	534
	diff (mm)	-29	26	4	-6	-22	-7	-27	-16	-25	-2
	diff (%)	-6	5	1	-1	-4	-1	-5	-3	-5	0
DE	obs	252	210	117	77	130	147	147	241	224	96
	mod	209	199	145	82	142	177	129	226	181	94
	diff (mm)	-44	-11	28	5	12	29	-19	-16	-44	-2
P-ETP	obs	-138	-39	99	511	28	18	206	-16	-100	463
	mod	-71	36	40	478	19	0	355	-1	-32	438
	diff (mm)	67	75	-59	-33	-9	-18	149	15	68	-25

Tableau 2 : Valeurs annuelles (en mm) observées (obs) et modélisées (mod) pour les 10 stations retenues et pour les variables : P, précipitations, ETP, évapotranspiration potentielle, ETR, évapotranspiration réelle, DE, déficit d'évaporation, diff, différence entre modélisé et observé. *Annual values in mm for observed (obs) and simulated (mod) data for the ten chosen meteorological stations for various parameters: P, rainfall, ETP, potential evapotranspiration, ETR, real evapotranspiration, DE, evaporation deficit, diff, differences between modeling and observed data.*

Au pas de temps mensuel, la plupart des stations ont un écart de déficit d'évaporation compris entre -12 et +7 mm, ce qui est acceptable pour un suivi des sécheresses. Les pics de différences se produisent essentiellement en juillet (5 stations) et en septembre (3 stations), un peu plus rarement en août et exceptionnellement en juin. On remarque ainsi une surestimation du déficit d'évaporation par le modèle au début de l'été (juin-juillet) du fait d'une sous-estimation des pluies. La sous-estimation du DE à la fin de l'été (août-septembre) est liée au biais froid du modèle (Bluhm et Plante, 2010). Les plus fortes surestimations apparaissent majoritairement pour les stations côtières, tandis que les plus fortes sous-estimations concernent, à l'inverse, principalement les stations plus continentales (Lamy, 2013). Les biais du modèle conduisent à des écarts majoritairement inférieurs à 10 mm par mois. Ce seuil étant acceptable pour obtenir une interprétation relativement robuste, cette étude permet de confirmer la faisabilité d'une utilisation des sorties des modèles ARPEGE-Climat pour une étude des sécheresses dans le contexte du changement climatique.

3.2. Evolution des sécheresses pédologiques en Bretagne au 21^{ème} siècle

La diversité des climats bretons fait que toute la péninsule ne présente pas la même vulnérabilité face au risque sécheresse. Mounier (1965) et Dubreuil (1994) ont ainsi mis en évidence que le déficit d'évaporation estival est plus important dans l'est de la région par rapport à l'ouest (figure 1). Dans le contexte du changement climatique, on peut s'interroger sur ces différences spatiales actuelles qui pourraient s'amplifier ou se réduire. Les tendances régionales attendues sont présentées ici à partir de 3 scénarios du GIEC, à moyen et long termes. Pour prendre en compte la diversité du territoire breton, le bilan hydrique intègre ici la taille des réserves utiles réelles (fournies par le laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest) et l'occupation du sol (issue de la base CORINE Land Cover).

Le scénario B1 prédit, pour la période 2020-2039 (figure 2), une moitié ouest de la Bretagne moins sèche qu'à l'est, avec un déficit estival moyen compris entre 50 et 150 mm contre 100 à 200 mm à l'est. Les secteurs de Vannes et Redon connaîtraient un déficit

d'évaporation estival plus important que le reste de la Bretagne, avec des valeurs moyennes annuelles comprises entre 200 et 250 mm.

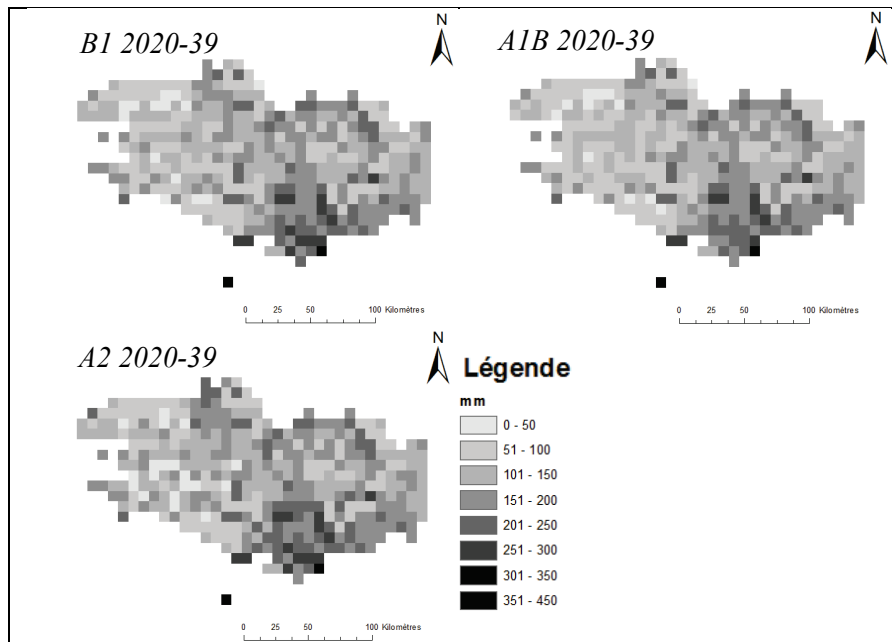


Figure 2 : Déficit d'évaporation estival en Bretagne d'après les scénarios B1, A1B et A2 pour la période 2020-2039. *Evaporation deficit in Brittany for B1, A1B and A2 scenarios, for the 2020-2039 period.*

Pour la fin du 21^{ème} siècle (figure 3), le modèle prévoit une augmentation modérée de l'intensité des sécheresses par rapport à la période précédente. Au sud-est, l'augmentation serait plus marquée et l'on pourrait atteindre un déficit estival de l'ordre de 300 mm. Même en étant optimiste sur les futures teneurs en gaz à effet de serre, le scénario B1 prévoit une nette augmentation de l'intensité des sécheresses en Bretagne. Sur la période 2080-2099, des sécheresses de même intensité que celle de 1976 (déficit d'évaporation de 300 mm) seraient souvent atteintes dans la région de Redon et Vannes.

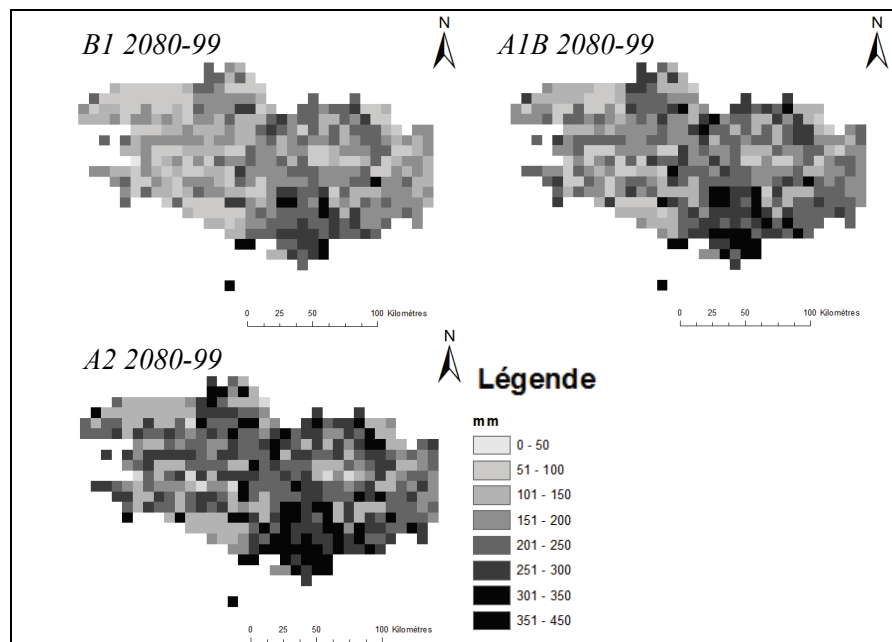


Figure 3 : Idem figure 2, mais pour la période 2080-2099. *Same as in figure 2 but for the 2080-2099 period.*

Dans le cas du scénario A1B, la situation serait quelque peu différente du scénario B1, dès 2020-2039 (figure 2). Sur cette période, le déficit d'évaporation estival serait relativement similaire entre les deux scénarios pour la partie ouest de la région, tandis qu'il serait plus élevé à l'est dans l'hypothèse du scénario A1B. Cependant, la différence d'intensité des sécheresses entre l'ouest et l'est resterait globalement similaire à la situation modélisée avec le scénario B1, soit un déficit d'évaporation estival moyen de 50-150 mm à l'ouest et de 100-200 mm à l'est. Le sud du Morbihan enregistrerait le déficit d'évaporation estival le plus important de la région avec des valeurs moyennes de l'ordre de 250 à 300 mm.

Au cours de la période 2080-2099 (figure 3), la Bretagne connaîtrait des sécheresses encore plus intenses au niveau du littoral des Côtes d'Armor et de l'Ille-et-Vilaine, et le long de l'axe Saint-Brieuc / Vannes (DE compris entre 250 et 350 mm) ainsi que sur la moitié ouest de l'Ille-et-Vilaine (150-200 mm) et le nord du Finistère (100-200 mm). Le scénario A1B prévoit donc des sécheresses plus intenses que le scénario B1. De manière générale, l'intensité attendue des sécheresses au cours du 21^{ème} siècle serait sensiblement identique pour les deux scénarios pour la moitié ouest de la Bretagne. La différence entre les deux scénarios concerne la moitié est de la région qui connaîtrait des sécheresses plus intenses dans le contexte du scénario A1B avec une différence de déficit de 100 mm environ.

D'après le scénario A2, les sécheresses seraient légèrement plus intenses sur la période 2020-2039 en comparaison aux scénarios A1B et B1 (figure 2). Le déficit moyen de l'est et l'ouest de la région resterait du même ordre de grandeur que pour les deux autres scénarios. Il serait de 50-150 mm en moyenne à l'ouest et de 100-200 mm en moyenne à l'est. Au sud, le déficit serait un peu plus important, 200 à 250 mm en moyenne, sur un espace limité à la région vannetaise et au golfe du Morbihan, donc plus réduit que dans le cas du scénario B1. Le scénario A2 ne prévoit donc pas franchement une situation plus pessimiste que les deux autres scénarios pour la période 2020-2039.

Il faut attendre la période 2080-2099 pour observer des sécheresses plus intenses dans le cas du scénario A2 sur toute la région Bretagne. On aurait alors à la fin du 21^{ème} siècle (figure 3), d'après le scénario A2, un déficit d'évaporation moyen compris entre 200 et 250 mm à l'ouest et entre 250 et 300 mm à l'est. Le scénario A2, qui prévoit les plus fortes concentrations en gaz à effet de serre des trois scénarios SRES étudiés ici, n'aurait donc pas pour autant des conséquences dramatiques en termes de sécheresses à moyen terme. La différence majeure du scénario A2 concerne l'assèchement des sols de l'ouest de la région qui serait plus intense que celui estimé par les projections des scénarios B1 et A1B à la fin du 21^{ème} siècle.

C'est seulement sur les vingt dernières années que les scénarios se distinguent (figure 3). Sur cette période, on retrouve les caractéristiques majeures des scénarios : les sécheresses seraient plus intenses dans le cas du scénario A2 et moins intenses pour le scénario B1. Ces résultats révèlent ainsi qu'une augmentation en gaz à effet de serre même modérée (scénario A1B) aurait des conséquences notables sur le climat breton. Les sécheresses gagneraient en intensité au cours du 21^{ème} siècle, pour atteindre régulièrement des seuils encore exceptionnels à l'heure actuelle. Le seuil de déficit d'évaporation de 300 mm qui correspond à l'intensité de la sécheresse de 1976 observée à Rennes, serait ainsi atteint très régulièrement à la fin du 21^{ème} siècle dans le cas des scénarios A1B et A2 sur l'est de la région.

A partir de cette spatialisation du déficit d'évaporation, on remarque quatre tendances concernant l'intensité des sécheresses à l'échelle du territoire. A l'est, les sécheresses sont plus intenses qu'à l'ouest. Le littoral, notamment dans le sud, est plus sensible aux sécheresses que l'intérieur des terres.

3.3. Evolution mensuelle des sécheresses en quatre points précis du territoire

En complément des résultats précédents, on propose ici un suivi mensuel du déficit d'évaporation en quelques points de grille sur le territoire breton. Ces points de grille de 8 km de côté ont été choisis de façon à illustrer plus en détails les quatre grandes tendances observées à l'échelle de la région. Le premier point (48.062°N - 1.985°W) est situé en Ile-et-Vilaine à proximité de Rennes où l'occupation du sol est majoritairement orientée vers la culture de céréales. Le second (48.202°N - 2.970°W) est situé au centre de la Bretagne, dans les Côtes d'Armor, près de Pontivy, dans une région agricole à dominante céréalière et fourragère. Le troisième point (48.495°N - 4.093°W) est situé entre deux bois à proximité de Landivisiau dans le Finistère, dans un secteur agricole. Le quatrième point (47.689°N - 2.952°W) est situé au nord-est de Vannes dans le Morbihan, toujours en secteur à dominante agricole.

A partir des valeurs moyennes mensuelles calculées pour quatre périodes vicennales de référence (2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 et 2080-2099), on peut remarquer que, pour le point de grille d'Ile-et-Vilaine, la durée de la saison déficitaire n'évolue ni dans le temps ni en fonction des scénarios (figure 4). Elle commence en avril avec un léger déficit d'évaporation (inférieur à 5 mm) et se termine en septembre. En revanche, au cours du 21^{ème} siècle, le déficit d'évaporation mensuel augmenterait progressivement. Par exemple, pour le mois de juillet, il passerait de 60-65 mm en moyenne sur la période 2020-2039 (tous scénarios confondus) à 80-100 mm à la fin du siècle. A la fin de l'été, en septembre, le déficit augmenterait également de 20 mm environ entre les périodes 2020-2039 et 2080-2099. Sur la période 2020-2039, le déficit d'évaporation varie peu d'un scénario à l'autre (maximum de 15 mm), tandis que sur la seconde moitié du siècle, le modèle prédit plus de 20 mm de différence entre deux scénarios. Cela s'explique par des évolutions de températures assez proches entre les scénarios jusque dans les années 2070. Il faut attendre les années 2080 pour avoir des différences thermiques plus importantes d'un scénario à l'autre.

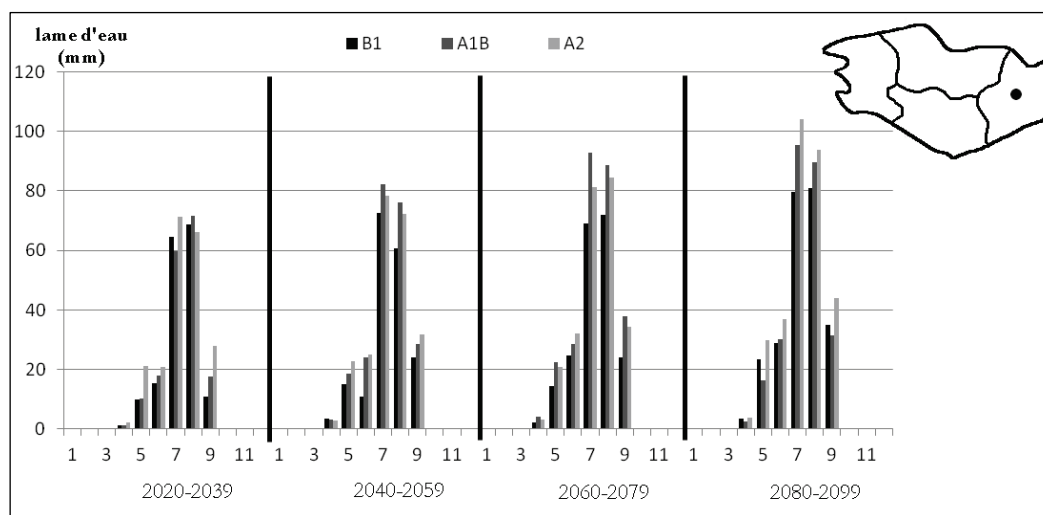


Figure 4 : Evolution mensuelle du déficit d'évaporation selon 3 scénarios pour 4 périodes du 21^{ème} siècle pour un point de grille situé en Ile-et-Vilaine. *Monthly evolution of evaporation deficit according to 3 scenarios and for 4 periods of 21st century for a gridpoint in Ile-et-Vilaine.*

En comparaison du point de grille d'Ile-et-Vilaine, on voit que le mois de juin est nettement plus sec en centre Bretagne, avec un déficit moyen de 50 mm environ, sur la période 2020-2039, contre 20 mm en Ile-et-Vilaine pour cette même période (figure 5). A la fin du 21^{ème} siècle, on pourrait ainsi atteindre un déficit d'évaporation compris entre 60 et 90 mm pour le mois de juin en Centre Bretagne. Pour le mois de septembre, les sécheresses

pédologiques seraient légèrement plus intenses que celles vécues en Ile-et-Vilaine, puisque le déficit d'évaporation serait de 5 à 10 mm supérieur à celui modélisé pour la station d'Ile-et-Vilaine, pour toutes les périodes étudiées. L'augmentation du déficit mensuel au cours du 21^{ème} siècle est notable. Les moyennes mensuelles estivales (de juin à août) seraient comprises entre 50 et 80 mm pour la période 2020-2039, entre 45 et 85 mm pour 2040-2059, entre 60 et 100 mm pour 2060-2079 et entre 65 et 120 mm pour la fin du siècle. La saison déficitaire, qui démarre en juin, apparaît ici plus précoce que pour le point de grille d'Ile-et-Vilaine. Globalement, le déficit d'évaporation serait plus fort dans le contexte du scénario A2, mais ponctuellement, le scénario A1B prévoit des sécheresses plus intenses que le scénario A2.

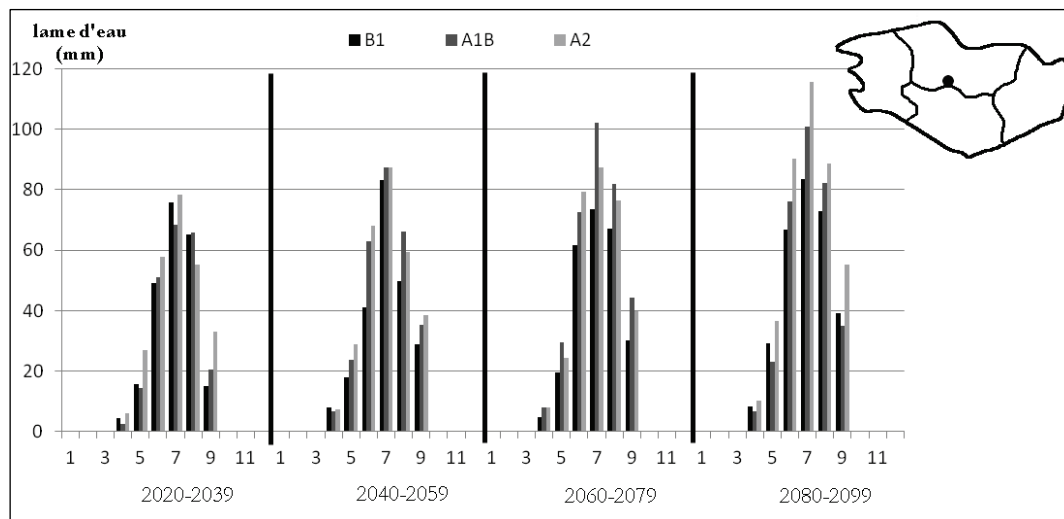


Figure 5 : Idem qu'en figure 4, mais pour un point de grille situé en Centre Bretagne. *Same as in figure 4 but for a gridpoint located in the center of Brittany.*

Le déficit d'évaporation décrit par le point de grille du Finistère est plus faible que pour les deux autres points de grille (figure 6). Pour le mois de juillet par exemple, un pic de 60-70 mm est observé sur la période 2020-2039, qui augmenterait progressivement au cours du 21^{ème} siècle pour atteindre, sur la période 2080-2099, entre 65 mm selon le scénario B1 et près de 110 mm d'après le scénario A2.

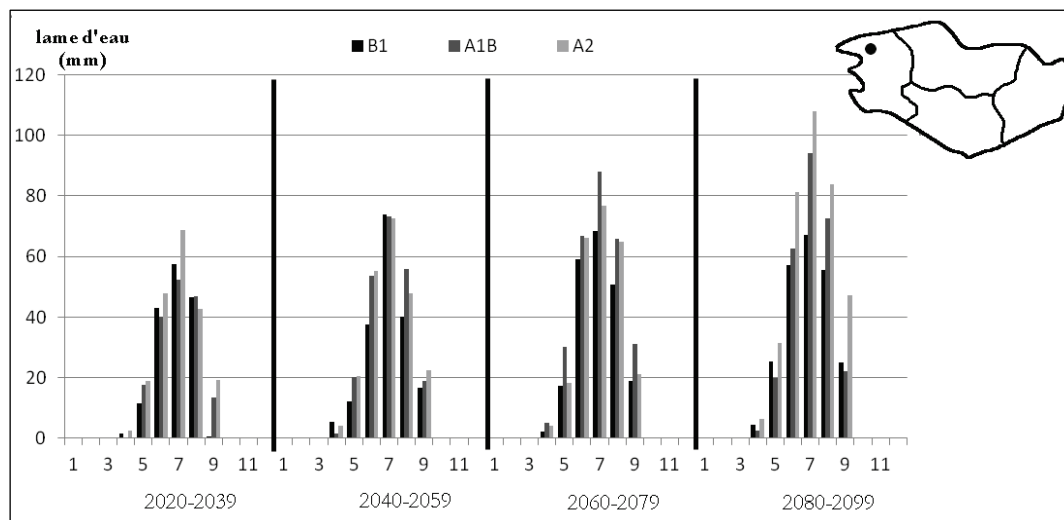


Figure 6 : Idem qu'en figure 4, mais pour un point du Finistère. *Same as in figure 4 but for a gridpoint located in Finistère.*

Sur la période 2020-2039 par exemple, le déficit en juin et août serait de 40 mm, puis pour la période 2040-2059, il serait compris entre 40 et 55 mm. Sur la période 2060-2079, il atteindrait 60 mm environ pour les mois de juin et août. Pour 2080-2099, le déficit d'évaporation en juin est compris entre 60 et 80 mm, le scénario A2 prévoyant ainsi une sécheresse pédologique nettement plus forte que les deux autres scénarios. Sur cette même période, pour le mois d'août, les valeurs attendues seraient de 60 mm d'après le scénario B1, de 70 mm selon le scénario A1B et 80 mm avec le scénario A2. Pour la période 2080-2099, c'est dans le contexte du scénario A2 que seraient observées les sécheresses les plus intenses.

On voit une nette augmentation des moyennes mensuelles de déficit d'évaporation au cours du siècle pour le point de grille du littoral morbihannais (figure 7). Cette observation concerne les mois de juin, juillet, août et septembre durant lesquels le déficit mensuel augmente de 20 à 40 mm en 60 ans. Pour le mois de mai, l'augmentation est moins marquée.

Les déficits d'évaporation prévus par les scénarios A1B et A2 sont assez proches pour les périodes 2040-2059 et 2060-2079. Pour la période 2080-2099, le scénario A2 prédit les sécheresses les plus intenses. Le littoral morbihannais connaîtrait les plus forts déficits d'évaporation pour les mois de juillet et août sur la période 2020-2039, par rapport aux autres points de la région Bretagne étudiés ici. A la fin du 21^{ème} siècle, ce serait toujours le cas avec un maximum en juillet de 120 mm de déficit, et 100 mm en août, contre 100-110 mm pour les autres régions étudiées en juillet et 80-90 mm en août.

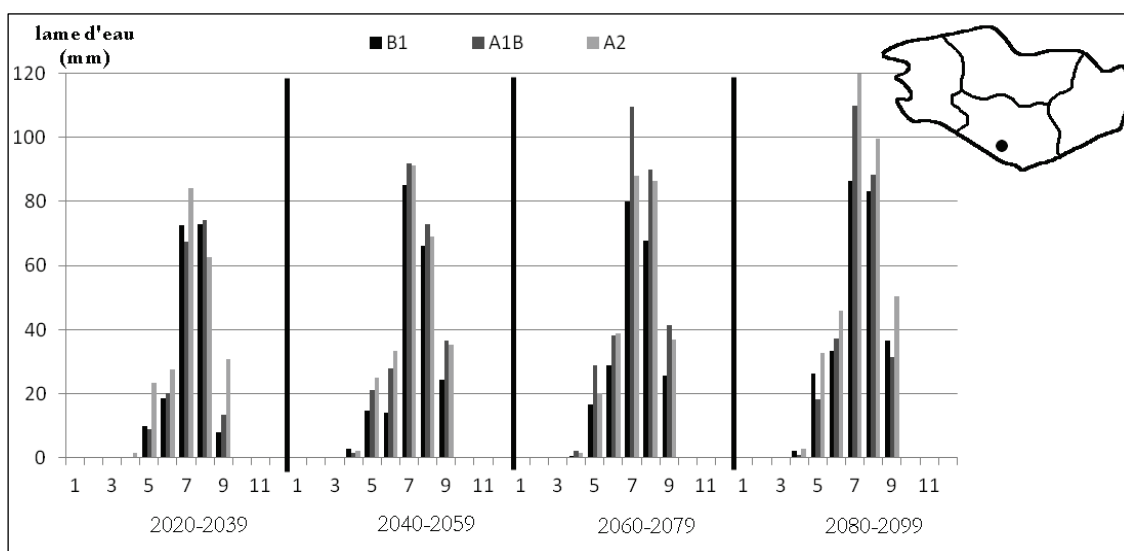


Figure 7 : Idem qu'en figure 4, mais pour un point du Morbihan. *Same as in figure 4 but for a gridpoint located in Morbihan.*

Ces résultats ponctuels et spatialisés illustrant la dynamique des sécheresses en Bretagne dans le contexte du changement climatique, révèlent un assèchement plus intense et plus fréquent des sols au cours de l'été. Cette tendance influence la recharge automnale des réserves hydriques qui se trouve décalée d'un mois environ. Alors que les réserves hydriques sont entièrement remplies à la fin du mois de décembre actuellement, il faudrait attendre le mois de janvier pour faire le même constat à la fin du 21^{ème} siècle.

Cette perte d'efficacité de la recharge en eau des réservoirs pédologiques pourrait affecter la partie superficielle de la dynamique du cycle de l'eau, liée aux écoulements. Cela pourrait en effet perturber les écoulements de surface qui alimentent le réseau hydrographique du territoire, ainsi que les zones humides et les nappes (Lambert, 1968 ; Pédelaborde, 1968).

Conclusion

Cette étude permet de mettre en évidence les évolutions possibles des sécheresses au cours du 21^{ème} siècle, du fait des changements globaux dans la péninsule bretonne. Les conséquences du changement climatique sur les températures et précipitations impacteraient la teneur hydrique des sols.

Les bilans hydriques spatialisés mettent en évidence une conservation de la diversité spatiale de la vulnérabilité face à l'aléa sécheresse. La moitié est de la région connaîtrait des sécheresses plus régulières et plus intenses qu'à l'ouest. Le littoral sud serait le secteur le plus sensible de Bretagne. Les bilans hydriques ponctuels montrent une augmentation de l'intensité des sécheresses au cours du siècle. Il faut attendre la seconde moitié du 21^{ème} siècle pour distinguer des variations d'intensité des sécheresses prévues par les différents scénarios. Le scénario A2, qui repose sur une forte augmentation de la concentration en gaz à effet de serre, conduit logiquement aux sécheresses les plus intenses. Ainsi, dans le cas du scénario A2, le sud et l'est de la Bretagne pourraient connaître à l'horizon 2100 des sécheresses d'intensité égale ou supérieure à celle de 1976 mesurée à Rennes, toutes choses égales par ailleurs. On aurait un risque notable de voir des sécheresses exceptionnelles par le passé devenir communes à l'horizon 2100. Ces changements pourraient entraîner un retard de la recharge automnale, pouvant alors altérer la dynamique superficielle de l'eau. Ces résultats sont cohérents avec les tendances mises en évidence par Météo France dans le cadre du programme CLIMSEC et basées sur un autre indice de sécheresse pédologique, le SSWI (Soubeyrou *et al.*, 2011).

Une approche spatiale basée sur un bilan hydrique de résolution plus fine, à 1 km, est prévue à la suite de cette étude. Son objectif est d'affiner les structures infra régionales dont la vulnérabilité aux sécheresses a été mise en évidence par le bilan hydrique de résolution 8 km. Ce bilan de résolution kilométrique est également conduit selon une résolution temporelle plus fine, journalière, de façon à être plus proche du rythme des épisodes de sécheresse.

Remerciements : Nous aimerions remercier Christian Pagé du CERFACS pour nous avoir fourni l'accès aux sorties désagrégées du modèle climatique ARPEGE-Climat. Nous souhaitons également remercier Blandine Foucaud-Lemercier du laboratoire Science du Sol d'Agrocampus Ouest pour nous avoir transmis des données pédologiques couvrant le territoire breton, issues du programme 'Sols de Bretagne'. Cette étude fait partie de travaux de thèse financés par la région Bretagne et qui s'intègrent dans le programme CLIMASTER (Changements climatiques, systèmes agricoles, ressources naturelles et développement territorial) financé par le programme PSDR GO (Programme Pour et Sur le Développement Régional en Grand Ouest) de l'INRA (Mérot *et al.*, 2012).

Bibliographie

BLUHM M. & PLANTE C., 2010 : *Étude de la prévisibilité à l'échelle décennale sur l'Europe*. Université Paul Sabatier – Toulouse III, CERFACS.

BÜTTNER G., FERANEC J., JAFFRAIN G., STEENMANS C., GHEORGHE A., & LIMA V., 2002 : Corine land cover update 2000. *Technical guidelines, Copenhagen, Denmark: European Environment Agency*.

CANTAT O., LE GOUEE P., BENSALID A., SAVOURET E., 2010 : Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. *Actes du 23^{ème} colloque de l'AIC « Risque et Changement climatique »*, Rennes, 23, 101-106.

CHRISTENSEN J.H., HEWITSON B., BUSUIOC A., CHEN A., GAO X., HELD I., JONES R., KOLI R.K., KWON W.-T., LAPRISE R., RUEDA V.M., MEARNS L., MENÉNDEZ C.G., RÄISÄNEN J., RINKE A., SARR A. & WHETTON P., 2007 : *Regional climate projections. Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 847-940.

CIAIS P., REICHSTEIN M., VIOVY N., GRANIER A., OGÉE J., ALLARD V., AUBINET M., BUCHMANN N., BERNHOFER C., CARRARA A., CHEVALLIER F., DE NOBLET N., FRIEND A. D., FRIEDLINGSTEIN P., GRÜNWARD T., HEINESCH B., KERONEN P., KNOHL A., KRINNER G., LOUSTAU D., MANCA G., MATTEUCCI G., MIGLIETTA F., OURCIVAL J. M., PAPALE D., PILEGAARD K., RAMBAL S., SEUFERT G., SOUSSANA J. F., SANZ M. J., SCHULZE E. D., VESALA T. & VALENTINI R., 2005 : Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529-533. DOI : 10.1038/nature03972.

CLIMATOR, 2010 : *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*. http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/.

COMMEAUX F., DROGUE G. & FRANCOIS D., 2010 : Analyse prospective des débits mensuels d'étiage de la Meuse française à l'aide d'un modèle hydrologique: sensibilité aux méthodes de descente d'échelle spatiale et aux scénarios d'émission. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 87(2), 178-193.

DÉQUÉ M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.

DÉQUÉ M., JONES R.G., WILD M., GIORGI F., CHRISTENSEN J.H., HASSELL D.C., VIDALE P.L., ROCKEL B., JACOB D., KJELLSTRÖM E., DE CASTRO M., KUCHARSKI F. & VAN DEN HURK B., 2005 : Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results. *Climate Dyn.*, 25, 653-670.

DUBREUIL V., 1994 : *La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2, 381 pages.

DUBREUIL V., 1997 : La sécheresse dans la France de l'Ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, 8, 47-55.

DUCHARNE A., 2002 : *Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP*. 10 pages.

DUCHARNE A., THERY S., VIENNOT P., LEDOUX E., GOMEZ E. & DEQUE M., 2003 : Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 4(3).

ENTEKHABI D, RODRIGUEZ-ITURBE I., BRAS R. L., 1992 : Variability in large-scale water balance with land surface-atmosphere interaction. *Journal of Climate*, 5, 798-813. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0798:VILSWB>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0798:VILSWB>2.0.CO;2).

GIBELIN A. L. & DÉQUÉ M., 2003 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20(4), 327-339.

GIORGI F. & LIONELLO P., 2008 : Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2), 90-104.

- HEWITSON B.C. & R.G. CRANE, 2006 : Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. *Int. J. Climatol.*, 26, 1315-1337.
- KAMGA A.F., JENKINS G.S., GAYE A.T., GARBA A., SARR A. & ADEDOYIN A., 2005 : Evaluating the National Center for Atmospheric Research climate system model over West Africa: present-day and the 21st century A1 scenario. *J. Geophys Res. – Atmos.*, 110, D03106, doi:10.1029/2004JD004689.
- LAMBERT R., 1968 : Recherche de la structure hydrologique d'un bassin-versant. *Annales de Géographie*, t. 77, n°424, 687-706. doi : 10.3406/geo.1968.15756.
- LAMBERT R., 1996 : *Géographie du cycle de l'eau*. Presses Universitaires du Mirail, Toulouse, 37-82.
- LAMY C., 2013 : *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2, 286 pages.
- LAMY C. & DUBREUIL, V., 2011 : Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 24, 357-362.
- LEMERCIER B., BERTHIER L., BUQUEN G., DUTIN G., GUICHARD S., LE BRIS A. L., HANOCQ D., 2010 : *Programme Sols de Bretagne (2005-2010) - Rapport final*. Document UMR 1069 SAS, 111 p + annexes.
- MEROT P., DUBREUIL V., DELAHAYE D., DESNOS P., 2012 : Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions. *Presses Universitaires de Rennes*, 458 pages.
- MOUNIER J., 1965 : Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application à la Bretagne. *Norois*, 48, 437-448.
- MOUNIER J., 1977 : Aspects et fréquences de la sécheresse en Bretagne : essai de définition de la sécheresse en Europe océanique. *Revue de géographie de Lyon*, 52, 167-176.
- MOUNIER J., 1979 : *Les climats océaniques des régions atlantiques de l'Espagne et du Portugal. Contribution synoptique à la géographie des climats humides des latitudes moyennes*. Paris-Toulouse, Honoré-Champion, 1221 pages (3 vol.).
- PAGE C., TERRAY L., 2010 : *Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010*. Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/10/58, CERFACS, Toulouse, France, 25 pages.
- PEARCE G., MULLAN A.B., SALINGER M.J., OPPERMAN T.W., WOODS D. & MOORE J.R., 2005 : Impact of climate variability and change on long-term fire danger. Report to the New Zealand Fire Service Commission, 75 pages, http://www.fire.org.nz/research/reports/reports/Report_50.pdf.
- PEDELABORDE P., 1968 : Les bilans hydriques. *Cahiers de géographie du Québec*, 12, 5.
- PEGUY C. P., 1970 : *Précis de climatologie*. Paris, Masson, 2^{ème} éd., 468 pages.
- PIAZZA M., PAGE C., SANCHEZ E. & TERRAY L., 2011 : *Comparaison des méthodes de désagrégation statistique et dynamique pour l'évaluation du changement climatique sur les zones de montagnes en France*. CERFACS, Toulouse, France.
- QUINTANA-SEGUÍ P., LE MOIGNE P., DURAND Y., MARTIN E., HABETS F., BAILLON M., CANELLAS C., FRANCHISTEGUY L., & MOREL S., 2008 : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.

RITCHIE J. T., 1998 : Soil water balance and plant water stress. *Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*, 7, 41-54.

SOMOT S., 2005 : *Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 240 pages.

SOUBEYROUX J.-M., VIDAL J.-P., NAJAC J., KITOVA N., BLANCHARD M., DANDIN P., MARTIN E., PAGE C. & HABETS F., 2011 : *Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*. Rapport final du projet ClimSec, Météo France, 72 pages.

TRZPIT J. P., 1978 : La sécheresse en Basse-Normandie ; calamité accidentelle ou mal récurrent. *Etudes Normandes*, 1-2, 55-74.

TURC L. & TRZPIT J. P., 1985 : Les bilans d'eau : un thème de recherche fondamental pour la climatologie écologique. *Physio-Géo*, 12, 41-57.