ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

MUDANCAS CLIMÁTICAS E SECAS: MODELAGEM ESPACIAL E DESAFIOS PARA A AGRICULTURA NA BRETANHA

LAMY, Chloe – chloe.lamy@gmail.com
LETG – Rennes Costel, Universiitè Rennes 2, CNRS UMR 6554, France

DUBREUIL, Vincent – Vincent.dubreuil@uhb.fr
LETG – Rennes Costel, Universiitè Rennes 2, CNRS UMR 6554, France

MELLO-THERY, Neli Ap. de – namello@usp.br
Universidade de São Paulo, Brasil

RESUME. Les grandes sécheresses du passé (1959, 1976, 1989 ou 2003) ont entrainé des dommages importants sur des activités essentielles pour l'économie de la Bretagne, telles que l'agriculture. Dans un contexte de changement climatique, il apparait donc important d'analyser les évolutions possibles du risque de sécheresse à l'échelle de la région à partir de simulations climatiques du modèle Arpège-Climat pour trois scénarios du GIEC : A1B, A2 et B1. La méthodologie retenue est celle du bilan hydrique et le calcul du déficit d'évaporation. Les résultats montrent une augmentation de l'intensité des sécheresses au cours du 21ème siècle, principalement pour la moitié est de la Bretagne. Le littoral sud serait la région la plus sensible à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. En termes d'intensité, on dépasserait ici 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 entrainer une diminution des écoulements de surface alimentant les nappes phréatiques bretonnes et contraindre les agriculteurs à adapter leurs cultures et leurs pratiques.

MOTS-CLES : Changement climatique, sécheresse, modélisation, bilan hydrique, SIG, Bretagne.

CLIMATE CHANGES AND DRY: SPATIAL MODELLING AND CHALLENGES FOR AGRICULTURE IN FRENCH BRITAIN

ABSTRACT. Great droughts of the past (such as 1959, 1976, 1989 or 2003) have had heavy impacts on important socio-economical activities for the economy of the Brittany, such as agriculture. In a climate change context it seems important to evaluate the possible ways of evolution of that risk in this region. These evolutions have been studied by using climate simulations from three IPCC's scenarios: A1B, A2 and B1. In order to monitor droughts, the methodology used is a soil water balance and the implementation of 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. Exceptional past droughts could become common in the future, impacting both agriculture and water cycle. This could cause a decreasing in runoff aquifer's levels and force farmers to adapt both crops and cropping methods.

KEYWORDS: Climate change, drought, modeling, soil water balance, GIS, Brittany.

RESUMO. As grandes secas do passado (1959, 1976, 1989 ou 2003) resultaram em danos significativos às atividades essenciais para a economia da Bretanha, como a agricultura. Por isso, no contexto das mudanças climáticas, parece importante analisar possíveis mudanças quanto ao o risco de seca na escala regional. Essas mudanças são estudadas por meio de simulações climáticas do modelo Arpège-Clima para três cenários do IPCC: A1B, A2 e B1. Para monitorar as secas, a metodologia utilizada é o balanço hídrico e o cálculo do déficit de evaporação. Os resultados mostram um aumento na intensidade das secas durante o século 21, principalmente para a metade oriental da Bretanha. A costa sul seria a região mais sensível para o aumento e a frequência da intensidade das secas. Em termos de intensidade, seriam ultrapassados os valores registrados durante a seca histórica de 1976, inalteradas as circunstâncias. O risco de seca excepcional no passado tornou-se comum em médio prazo e teria um impacto forte sobre a agricultura e o ciclo da água durante uma grande parte do ano. Isso pode causar uma diminuição no escoamento que alimenta o lençol freático na Bretanha e forçar os agricultores a adaptar as suas culturas e práticas agricolas.

PALAVRAS CHAVES: Mudanças climáticas, seca, modelização, balanço hídrico, SIG, Bretanha

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

1. INTRODUÇÃO

A Bretanha tem um clima conhecido como úmido, mas sofreu nas grandes secas do passado que tiveram um impacto significativo na economia e na sociedade, particularmente em 1976 e 1989 (Mounier, 1965 e 1977; Dubreuil, 1994 e 1997) ou mais recentemente, em 2003 (Dubreuil *et al.*, 2010). Esta vulnerabilidade tem servido como um lembrete de que as secas são um risco que pode acorrer mesmo no domínio oceânico. Na Bretanha, onde as precipitações são geralmente entre 700 e 1000 mm por ano, as secas são significativamente menos frequentes e menos intensos do que nas regiões do sul da França. No entanto, essas secas afetam particularmente o setor agrícola, levando a um declínio significativo no rendimento das culturas (trigo, forragens e milho principalmente). Como a agricultura ocupa uma parte significativa da economia regional e nacional, é estratégico monitorar o desenvolvimento deste risco no contexto das mudanças climáticas (CLIMATOR 2010).

De fato, as consequências das mudanças climáticas apresentadas nos relatórios do IPCC (IPCC, 2000 e 2007) mostram uma tendência de aumento da temperatura e diminuição da precipitação durante a primavera e o verão na costa atlântica da Europa. Se essas tendências se confirmarem no século XXI, as secas podem se tornar mais freqüentes e mais intensas. A análise da mudança climática é o resultado dos modelos climáticos globais usados para monitorar o clima do planeta, mas esses modelos são menos precisos nas escalas regionais. No entanto, nos últimos anos, métodos para escalas menores, downscaling estatístico ou dinâmico, permitiram regionalizar esses produtos dos modelos (Giorgi e Mearns, 1991; Hewitson e gruas, 1996) e, assim, permitir o estudo das mudanças climáticas em escalas mais finas, nacional ou mesmo regional. Esta escala de trabalho faz com que seja possível analisar os impactos das mudanças climáticas sobre as atividades socioeconômicas em escala territorial (projeto Regis - Holman *et al.*, 2002, projeto CLIMSEC - Soubeyroux *et al.*, 2011; Projeto Europeu ARIDE Demuth e Stahl, 2001). O objetivo deste estudo é identificar os prováveis impactos das mudanças climáticas sobre as secas a partir de dados climáticos para todo o território bretão, integrando a metodologia do balanço hídrico espacializado dos resultados de modelos climáticos.

Em geral, os estudos anteriores sobre a análise das secas com balanços hídricos tiveram como base a utilização de dados pontuais de estações meteorológicas. Os mapas eram estabelecidos a partir de 5 a 10 estações por departamento (Mounier, 1977; Dubreuil, 1994), i.e., com poucos detalhes geográficos. Para este estudo o ambito é integrar a diversidade espacial usando Sistemas de Informação Geográfica. Para isso, foram utilizados os dados do modelo Arpège-Clima-SAFRAN cobrindo o território com uma resolução de 8 km (Quintana-Segui *et al.*, 2007 e 2008). Outros conjuntos de dados espaciais permitem representações das características do território como a pedologia e o uso do solo. O cálculo do balanço hídrico é, assim, enriquecido por dados (com 500 m de resolução) sobre o tamanho das reservas de água do solo e da cobertura da terra (com 250m de resolução). A resolução maior destes dados adicionais permite refinar a resolução do balanço hídrico. Depois de computar os dados com uma resolução espacial de 8 km, definida para a resolução dos dados climáticos, um segundo balanço mais adequado para uma abordagem territorial é calculado é apresentado nesse trabalho : a resolução deste balanço hídrico escolhida é de um quilômetro, visando aproveitar a precisão espacial dos dados de solo e uso do solo, limitando a perda de informação relacionada com a desintegração dos dados climáticos.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1. O balanço hídrico, uma ferramenta para caracterizar as secas

A seca atmosférica pode ser facilmente calculada a partir da quantidade de precipitação em uma área ao longo de um determinado período. Este é um perigo meteorológico que, sozinho, não é prejudicial. Para identificar as secas do solo, aquelas que irão impactar as atividades

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

humanas, incluindo a agricultura, a situação é mais complexa, uma vez que é necessário combinar dados meteorológicos com dados do solo. Isto é o que permite o cálculo de um balanço hídrico em que se aproxima o conceito de seca agronômica ou edáfico, que se refere à falta de água nas reservas de água do solo que afetam o crescimento da vegetação. Calcular o balanço de água faz com que seja possível traduzir o comportamento hídrico na interface entre o solo e a atmosfera. De fato, em sua versão completa, o balanço hídrico pode incluir precipitação, evaporação, escoamento (por gravidade e lateral) e umidade do solo e do subsolo (Pedelaborde 1968; Trzpit 1978; Turco e Trzpit 1985). Porém, a versão simplificada utilizada para este estudo não inclui o fluxo lateral: o enchimento das reservas de água do solo é simulado pela infiltração (I) das precipitações (P). A secagem dos solos depende da evapotranspiração (ET), que depende principalmente da temperatura, da radiação solar e do vento.

A evapotranspiração representa as necessidades de água das plantas de acordo com o clima do ambiente. Podemos distinguir entre evapotranspiração potencial (ETP) valor teórico com base nas condições meteorológicas, e a evapotranspiração real (ETR), que depende da disponibilidade real de água no "sistema terra-atmosfera". A evapotranspiração potencial usada aqui é determinada pela fórmula de Penman-Monteith alterada pela Météo France (Ducharne, 2002), ou seja :

$$ETP_{MF} = ETP_1 + ETP_2$$

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

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

Com □□ a inclinação da relação de Clausius-Clapeyron ; □□□a constante psicrométrica; U_{10}, a velocidade do vento a 10 m ; $e_s - e_a$, o déficit da pressão de vapor da água; Rn, a radiação da superfície; □□ o calor latente de vaporização da água; □□□a constante de tempo.

Quando a chuva é importante ETR é igual à ETP, é geralmente o caso no outono, no inverno e início da primavera para a área de estudo. Quando a precipitação não ajuda a resolver as necessidades da vegetação, geralmente durante o verão, as plantas aproveitarão a reserva da umidade do solo. Durante esse período mais seco, a evapotranspiração real é inferior a ETP. O déficit de evaporação (DE = ETP-ETR) é positivo quando há escassez de água para garantir o bom crescimento vegetação. Assim, o déficit de evaporação é um bom indicador para caracterizar as secas (Mounier, 1965 Dubreuil, 1994). Este é o parâmetro que será analisado aqui, principalmente para monitorar as secas potenciais no século XXI.

No entanto, a evapotranspiração potencial é calculada com base de uma cobertura vegetal em um ambiente controlado, como "gramínea" que não da para perceber a realidade regional relacionada com a diversidade do uso da terra. De fato, as necessidades de água para a vegetação variam de espécie para outra e dentro de uma espécie, elas variam de acordo com as suas fases fenológicas. Estes *fenostades* são relacionados com o crescimento da planta e são, portanto, diferente de uma cultura para outra. Por exemplo, o trigo é plantado mais cedo do que o milho, e a estação de crescimento dele, que requer grandes quantidades de água, também ocorre mais cedo. Estas variações das necessidades hídricas das culturas ao longo do tempo faz que um período de seca não tenha as mesmas consequências para as espécies de plantas (Dubreuil, 2005). O cálculo de um balanço hídrico pode levar em conta esses estádios fenológicos para dar conta dessa característica. Para isso, a evapotranspiração máxima (ETM) é calculada a partir da ETP usando um coeficiente de cultura. Esse índice reflete as necessidades de água das plantas à medida que crescem. Ele varia durante o ano e de uma espécie de planta para outra. A Tabela 1 apresenta um exemplo dos valores dos coeficientes para diferentes tipos de culturas da Bretanha. Uma vez obtido a ETM, o déficit de evaporação é calculada, neste momento, como a diferença entre a ETM e a ETR, a fim de manter os valores específicos em relação com o uso do solo.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

	Pastagens	Legumes	Floresta	Trigo	Milho
Janeiro	1	0,5	0,8	0,5	0,5
fevereiro	1	0,6	0,8	0,5	0,5
Março	1	0,8	0,8	0,6	0,5
Abril	1	1	1,2	0,7	0,5
Maio	1	0,6	1,2	0,8	0,5
Junho	1	0,6	1,2	1,2	0,7
Julho	1	0,7	1,2	0,6	0,8
Agosto	1	0,8	1,2	0,5	1,2
Setembro	1	1	1,2	0,5	1,2
Outubro	1	0,8	0,8	0,5	0,6
Novembro	1	0,6	0,8	0,5	0,5
Dezembro	1	0,5	0,8	0,5	0,5

Tabela 1 - Coeficientes culturais mensais para diversos usos do solo na Bretanha (de acordo com Allen *et al.,* 1994).

2.2. Dados dos modelos climáticos: ARPEGE-Climat e SAFRAN (Météo France)

Para este estudo, utilizamos os resultados do modelo ARPEGE-Clima de Météo France. Esse modelo climático é uma ferramenta numérica para simular o clima em diferentes escalas espaciais (local a global) e temporais (de alguns anos a milênios) (www.cnrm.meteo.fr). O modelo de circulação atmosférica geral ARPEGE-Climat faz parte, com o modelo ARPEGE-Aladin, do conjunto Arpege (Ação de Investigação de Pequena e Grande Escala), desenvolvido no Centro Nacional de Pesquisas Meteorológicas (CNRM) da França. O CNRM é apoiado pelo CNRS e Météo-France, e é o serviço de pesquisa de Météo-France. Ambos os modelos ARPEGE têm finalidades diferentes: Arpege-Climat é a base da modelagem climática para a comunidade francesa (Déqué *et al.*, 1994) e Arpege-Aladin fornece previsões meteorológicas com uma resolução de 14,4 km (Pailleux *et al.*, 2000). Estes dados climáticos são desagregados pelo CERFACS a partir do ARPEGE-Clima versão retic (Pagé e Terray, 2010) e para três cenários B1, A1B e A2. Os produtos do modelo produzido na desagregação do CERFACS foram realizados utilizando um método estatístico com base nos tipos de circulações atmosféricas (Pagé e Terray, 2010). Esta desagregação está baseada na malha de dados SAFRAN (Figura 1). Os dados SAFRAN da Météo France são híbridos entre reanálise e observação. Eles correspondem a uma análise de meso-escala da França metropolitana, ao longo do período 1958-2008 (Quintana-Segui *et al.*, 2008). É a sua resolução espacial de 8 km que determinou a resolução de saídas desagregadas, calculadas pelo CERFACS. Além disso, as saídas de dados desagregados têm uma resolução temporal diária.

Estas saídas do modelo cobriram três cenários utilizados pelo IPCC: B1, A1B e A2 (IPCC 2000 e 2007). O cenário B1 é o mais otimista dos três, ele oferece um pequeno aumento na concentração de CO_2 (550 ppmv em 2100), levando a um aquecimento global baixo. O cenário A2 é o mais pessimista dos três: ele fornece os níveis mais altos de CO_2 atmosférico (840 ppmv em 2100), resultando em grandes mudanças do clima na escala do planeta. O cenário A1B, moderado, proporciona uma situação intermediária com os dois outros cenários: em 2100 a concentração de CO_2 atmosférico seria de 700 ppmv. É impossível dizer se qualquer um desses cenários acontecerá no futuro, sabendo que estes cenários são utilizados aqui como quadros de futuros possíveis.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

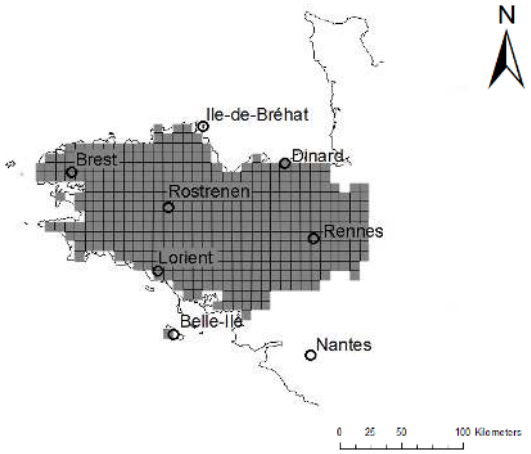


Figura 1: Representação da malha SAFRAN de 8 km e algumas estações de observação da Bretanha e do oeste da França.

2.3. Dados de reserva útil de agua do solo e do uso da terra

Os dados climáticos estão associados com dados do solo, relativos ao tamanho das reservas úteis, para calcular o balanço de água. Informações sobre o solo foram preparadas no âmbito do programa "Solos da Bretanha" e fornecidas pelo Laboratório de Ciências do Solo - Agrocampus Oeste. Os dados pedológicos tem uma resolução espacial de cerca de 2,5 km, relacionadas as campanhas de campo (Lemercier *et al.*, 2010), e projetados para 500m.

Para trazer mais precisão para o balanço hídrico, um terceiro conjunto de dados é incluído no cálculo e refere-se ao uso da terra. Esta informação vem de duas fontes : i) a base Corine Land Cover (CLC), que tem uma resolução espacial de cerca de 25 m (Büttner *et al.*, 2002). ii) Dados de uso do solo derivados dos produtos de satélite MODIS (com uma resolução de 250m) desenvolvidos pela equipe COSTEL, como parte da tese de doutorado de Rémi Lecerf (2008) também foram utilizados para atualizar a base do CLC.

Como estes três conjuntos de dados têm diferentes resoluções espaciais (tabela 2), a escolha foi feita para determinar a resolução espacial ideal do balanço hídrico. Dada a importância dos dados climáticos, a primeira resolução do balanço hídrico escolhida é a mesmo que as saídas de dados desagregados do clima, ou seja 8 km. Estes dados permitem ter uma boa visão de futuro previsto das mudanças climáticas na escala de uma região como a Bretanha. No entanto, para uma análise do balanço hídrico na escala do território pode ser interessante ter os dados com uma resolução mais fina, interpolando os dados do clima e agregando os dados de solo e do uso terra com a mesma resolução de um quilômetro. Depois de vários testes, a interpolação por *splines* provou melhor para a interpolação dos dados do clima, que são densas e regulares. Este método pode ser visto como uma abordagem complementar entre a *krigagem* e a consideração da distância mínima dos *pixeis* (Metais, 2000). Esta técnica de interpolação é bem adequada para refinar a resolução de uma imagem raster, uma vez que considera o ambiente perto de cada pixel. Mapas de resolução de 1 km obtidos por este método mostrou-se mais conclusivo do que aqueles resultados feitos com as técnicas de *krigagem* e *co-krigagem* com altitude (Lamy, 2013). Assim, um segundo conjunto de dados de balanço hídrico pode ser obtido, adotando uma escala de um quilômetro, mais adequada para a malha administrativa francesa e para os atores territoriais.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Tipos de dados	Resolução espacial	Fontes *(organismos e bases de dados)*
Climáticos *Chuvas (P)* *Evapotranspiração (ET)*	8 km	CERFACS
Uso do solo	≤ 25 m 250 m	CORINE Land Cover MODIS, tese R.Lecerf, 2008
Pedologia *Tamanho da reserva util (RU)*	2,5 km 500 m	Laboratoire Science du Sol, Agrocampus Ouest

Tabela 2 : Características geométricas e fontes dos dados utilizados para o calculo do balanço hídrico.

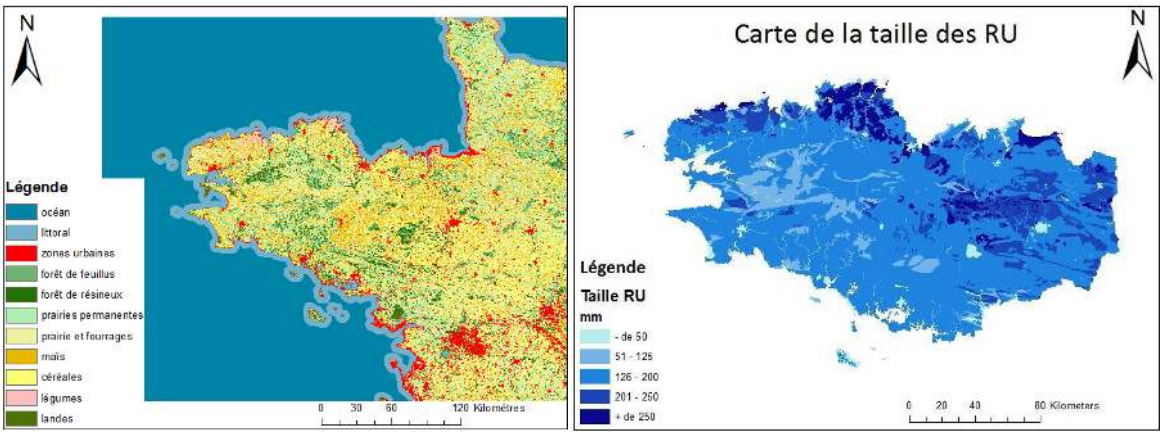


Figura 2 : Dados do solo e do uso do solo em plena resolução espacial: A esquerda, mapa de ocupação do solo para o verão no início do século 21 (com base em dados do sensor MODIS com resolução de 250 metros da tese do Lecerf, 2008); A direita : tamanho das reservas úteis de águas, Laboratório de Ciência do Solo, Agrocampus Oeste

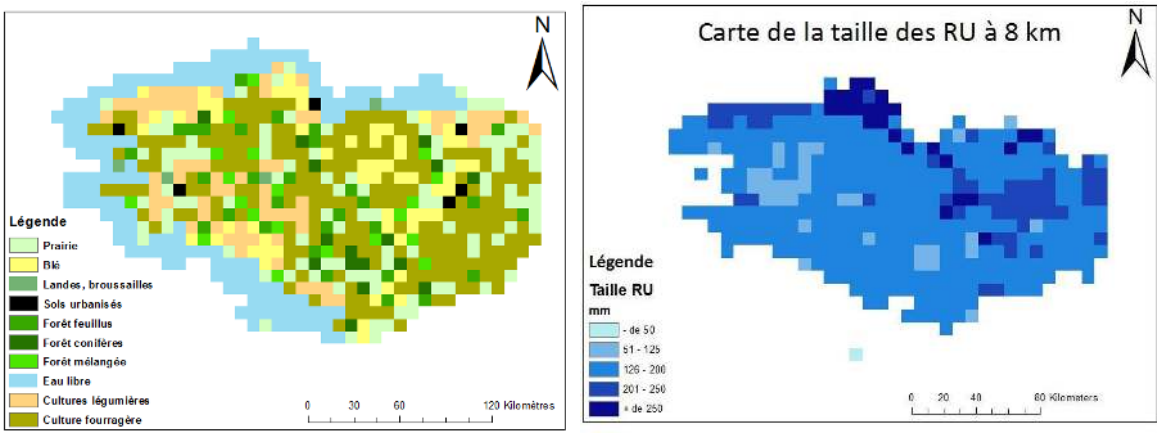


Figura 3 : Dados de solo e de uso da terra na resolução espacial de 8 km: A esquerda, uso da terra baseada Corine Land Cover complementada pela análise do Canévet (1992); A direita, tamanho das reservas úteis de águas, Laboratório de Ciência do Solo, Agrocampus Oeste

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

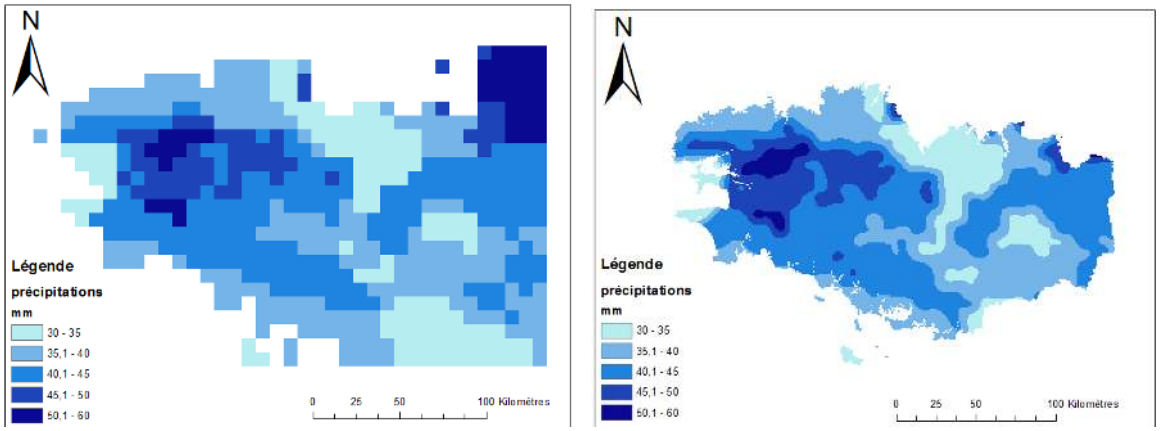


Figura 4 : Exemplo de dados de precipitação mensais modelado: a esquerda, dados Arpège Safran a 8 km; a direita, interpolação destes dados por método spline com uma resolução de 1 quilômetro

2.4. Generalização e espacialização do balanço hídrico com ArcGIS

Calcular o balanço hídrico diariamente para a Bretanha por diferentes cenários e diferentes períodos do século XXI é um processo longo e repetitivo. É melhor automatizar os cálculos usando *scripts* do computador e técnicas de geoprocessamento como o software ArcGIS. Para automatizar o cálculo do balanço hídrico, por isso, naturalmente usou a linguagem de programação Python associado com a suíte de software ESRI. Python é uma linguagem de código aberto e livre de programação (http://www.python.org/) originada com o ArcGIS 9. Ela oferece uma sintaxe simples que facilita o aprendizado e domínio dele. Na verdade, ela permite uma introdução aos princípios básicos da programação mais fácil para outras linguagens, como C e Java. A existência de bibliotecas especializadas para diferentes tratamentos torna esta linguagem adequada para uma variedade de usos. No entanto, ela é mais comumente usada como uma linguagem de *script* para automatizar tarefas simples, mas demoradas ou combos repetitivos de ações.

Além de ser integrado com o software ArcGIS, essa linguagem satisfaz as necessidades referidas no presente estudo. Os *scripts* codificados devem cumprir três requisitos: 1) Em primeiro lugar, eles permitem que o pré-tratamento de dados climáticos tenha um formato de dados adequado para o *software* ArcGIS; 2) O uso de *scripts*, em seguida, permite a automação do cálculo do balanço hídrico e os processamentos efetuados com os resultados do balanço de água; 3) O uso de *scripts* também reduz os erros relacionados com a repetição de certas manipulações.

Este balanço é calculado usando dados climáticos do CERFACS sobre evapotranspiração potencial e precipitação. Isso leva ao déficit de evaporação que quantifica a intensidade da seca. Este índice de seca pode ser tratado de várias maneiras para seguir a mudança de tempo diário, ou experimentar o total anual, por exemplo. Neste trabalho objetivamos estabelecer as tendências médias esperadas no século XXI, para quatro períodos de 20 anos. Foram considerados: 2020-2039, 2040-2059, 2060-2079 e 2080-2099. Para estes períodos são calculados valores médios climáticos, mensais e diários, para a evapotranspiração potencial e a precipitação.

Uma vez que os dados sobre a precipitação e evapotranspiração são transformados em camadas de informação em formato *raster*, é possível calcular o balanço hídrico. O *script* para automatizar o cálculo do balanço hídrico na sequência é composto de linhas de códigos para o cálculo de diversas variáveis. Essas variáveis são as etapas intermediárias para a obtenção de um valor de déficit de evaporação e de reserva de água a partir de uma quantidade de precipitação e evapotranspiração. Cada variável calculada é armazenada como informação em formato *raster*. Um total de nove variáveis são calculadas para reproduzir o balanço hídrico na interface entre o solo e a atmosfera. O cálculo do balanço de água funciona como um ciclo de maneira interativa. Isso exige todos os cálculos de um período antes de prosseguir para o próximo. De fato, algumas operações por um período P dependem de valores ao longo do

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

período P-1; por exemplo, para o balanço de água mensal, a reserva de água do mês m é obtida a partir da alteração no nível de água calculada para o mês m e a reserva hídrica do mês anterior (n).

Para um período dado, o coeficiente de cultura é calculado em primeiro lugar a partir da informação de uso da terra. Este fator é aplicado na evapotranspiração potencial fornecido pelo CERFACS, para obter a evapotranspiração máxima (ETM). A comparação entre o valor de precipitação e ETM, então, permite a calcular o superávit e o déficit de precipitação. O déficit é positivo quando a precipitação é menor do que a ETM. Posteriormente, calcula-se a alteração no teor de água em reservas de água (DRU), que é uma função de déficit e excesso de chuva, bem como do tamanho do reservatório de água. O esgotamento da reserva de água é baseado numa abordagem logarítmica para reproduzir o aumento da dificuldade das plantas para capturar a água nos últimos milímetros do solo. A partir dos valores de déficit de chuvas, da ETM e da mudança de nível de água nas reservas, a evapotranspiração real (ETR) pode ser calculada. A diferença entre a ETM e ETR proporciona então o valor de déficit de evaporação. A nova quantidade de água contida nos reservatórios de solo pode ser calculada. A variável final, sobre o excesso de água que pode fluir na superfície, é calculada para completar a análise do balanço da água.

O período para o cálculo do balanço hídrico não corresponde a um ano civil, mas é baseado na dinâmica do ciclo da água. Ele foi escolhido para este estudo, a partir do final do inverno, período em que as reservas de umidade do solo estão, em média, em sua capacidade máxima, devido às características do clima bretão (Mounier, 1965 Dubreuil, 1994). O balanço hídrico é calculado a partir do primeiro dia de março, antes que a vegetação comece a consumir quaisquer reservas de água. O nível de água nas reservas do solo, assim, pode variar de um valor máximo no início de março, atingindo geralmente um mínimo no final de agosto. O outono é então caracterizado por recarga das reservas de água para completar o preenchimento até o final de fevereiro.

Esses *scripts* foram utilizados para calcular um balanço hídrico para todo o território bretão, incorporando o tamanho real das reservas hídricas úteis e a ocupação do solo atual (sabendo que, sem duvida, o uso do solo não vai ficar o mesmo até o final do século). Eles também permitem uma variedade de tratamentos sobre as variáveis do balanço hídrico. Isso leva à obtenção de resultados em diferentes formas (arquivos do Excel, camadas de informação em formato *raster* e *shapefiles*) para acompanhar as secas o mais completamente possível. Os resultados do balanço hídrico devem permitir a análise das consequências plausíveis das mudanças climáticas em termos de seca em toda a região da Bretanha.

3. MUDANÇAS NA FREQUÊNCIA E INTENSIDADE DAS SECAS NO SÉCULO XXI NA BRETANHA

Os resultados aqui apresentados são baseados em simulações climáticas para três cenários do IPCC: B1, A1B e A2. Anteriormente, uma análise crítica deve ser realizada sobre os resultados dos modelos climáticos para identificar os erros eventuais em relação aos dados observados. Em segundo lugar, as tendências regionais em uma resolução espacial de 8 km e um quilômetro são apresentadas. Finalmente, um monitoramento do déficit de evaporação em quatro partes da região de acordo com um intervalo de tempo diário é proposto. Estes três tipos de resultados salientam os resultados potenciais associados com o uso de um balanço hídrico automático. Eles também permitem uma caracterização espaço-temporal mais completa das secas na Bretanha, no contexto das mudanças climáticas.

3.1. Análise crítica dos dados do modelo climático em relação com os dados observados

Antes de discutir sobre os dados futuros, é necessário comparar os resultados do modelo ARPEGE-clima na Bretanha para o período 1971-2010, com os dados atuais da rede de

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

observações. A comparação apresentada se centra na precipitação e evapotranspiração, devido à importância destes parâmetros para o estudo da seca e também devido à natureza "integradora" da ETP, uma vez que depende da temperatura, da velocidade do vento, da pressão, da insolação, da radiação solar e da pressão de vapor de água. Além da análise da precipitação e evapotranspiração, o foco também está no DE, o índice de seca. Para estes testes, e para permanecer numa comparação global, o mesmo tamanho médio da reserva útil de água, ou seja, 125 mm (Mounier, 1965; Dubreuil, 1994), foi usado para cada estação.

Os dados observados são as séries da rede de Météo France. Devido às suas fronteiras e sua história marítima, a Bretanha tem mais estações meteorológicas no litoral do que no interior. Uma seleção foi feita para ter estações sinóticas em operação contínua ao longo do período 1971-2010, no litoral bem como no interior, para obter um período analisado consistente. Diversos testes estatísticos foram realizados para assegurar a qualidade e estabilidade dos conjuntos de dados : dez estações foram finalmente selecionados para um teste qualitativo dos dados simulados desagregados (Lamy, 2013). A comparação dos dados simulados e observados ao longo do período 1971-2010 abrange diferentes parâmetros climáticos, apresentados na Tabela 3.

		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

Tabela 3 : Valores anuais (em mm) observadas (obs) e modelados (mod) para as 10 estações selecionadas e as variáveis: P, precipitação; ETP, evapotranspiração potencial; ETR, evapotranspiração real; DE, déficit de evaporação; diff, diferença entre modelado e observado. (Extraído de Lamy e Dubreuil, 2013).

Diferenças na evapotranspiração e precipitação são baixas para a maioria das 10 estações, entre -10 e + 10% (Tabela 3). As diferenças são importantes para o déficit de evaporação. De fato, como o DE é obtido a partir da evapotranspiração potencial e real, erros sobre estas variáveis são cumulativos e podem conduzir a um desvio maior para o déficit de evaporação. No entanto, as diferenças observadas para o índice de seca P-ET são igualmente importantes e, assim, mostram que a modelagem do déficit de evaporação é correto e aceitável. A maioria dos estudos (Déqué *et al.*, 2005; Déqué, 2007; Lamy e Dubreuil, 2011) concordam com a maior dificuldade em modelizar a temperatura de que a precipitação, como se verifica na Tabela 3 as diferenças menores para a evapotranspiração potencial de que para as precipitações.

Na escala mensal, a maioria das estações tem desvios no déficit de evaporação de entre -12 a +7 milímetros, o que é aceitável para o monitoramento das secas. Diferenças máximas ocorrem principalmente em julho (5 estações) e setembro (3 estações), um pouco menos frequentemente em agosto e, excepcionalmente, em junho. Assim observa-se que o modelo

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

vai superestimar o déficit de evaporação no início do verão (junho-julho), devido a uma subestimação das chuvas. A subestimação do DE no final do verão (agosto-setembro) está relacionada com o direcionamento frio do modelo (Bluhm e Bush, 2010). As maiores super estimativas aparecem principalmente para as estações costeiras, enquanto que as maiores subestimações, ao contrário, acontecem principalmente para as estações continentais (Lamy, 2013). Os erros dos resultados do modelo ficam, principalmente, em menos de 10 mm por mês. Este limiar é aceitável para este estudo que confirma a viabilidade da utilização das saídas de dados dos modelos ARPEGE-clima para o estudo da seca na Bretanha no contexto das mudanças climáticas.

3.2. Evolução do déficit de evaporação durante o verão na escala regional

O déficit de evaporação de verão, com base no período de junho a agosto, reflete a intensidade das secas em relação às médias mensais. Para avaliar as mudanças na intensidade das secas no século XXI, a Figura 5 apresenta mapas do déficit de evaporação do verão esperado no início (2020-2039), durante (2040-2059 e 2060-2079) e no final (2080-2099) do século XXI no cenário mediano A1B e uma resolução de 8 km.

Para os primeiros períodos modelados do século XXI, no cenário A1B, teria uma média de 50-150 mm do déficit de evaporação no verão no oeste da região e de 100-200 mm no leste da Bretanha. O sul (sudeste de Lorient) teria o maior déficit de evaporação de verão da região com, localmente (menos de 10% do território), valores média acima de 200 mm. Ao longo das duas décadas seguintes (2040-2059) o déficit tende a estagnar no leste e subir ligeiramente no oeste, reduzindo as diferenças entre as médias do leste e do oeste do território.

Após este período de estagnação na intensidade da estiagem, o período de 2060-2079 experimentaria secas mais intensas, superando os valores do período 2020-2039. O leste da Bretanha teria uma intensidade média de déficit de verão de 200 a 300 mm. A metade oeste do interior da região experimentaria secas mais intensas (média de 150 a 250 mm) do que no litoral (déficit médio de 100 a 200 mm). O final do século XXI (2080-2099) iria experimentar secas mais intensas na região norte e nordeste do litoral e da região central e sudeste (déficits superiores a 200 milímetros). Poucas regiões (menos do que 20% do território contra mais do que três-quartos para o período atual) tiveram um déficit médio inferior a 100 mm; por outro lado, quase a metade da região ira experimentar déficits médios maiores que 200 milímetros, um fenômeno ainda incomum hoje.

A aparência do mosaico observada nestes mapas pode ser explicada pelo modelo do clima, mas ainda tem de se notar que o uso do solo e o tamanho das reservas de água também tem um peso no processamento final. Os resultados com a resolução de um quilômetro permitirá uma análise mais refinada da diversidade das situações regionais e locais.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

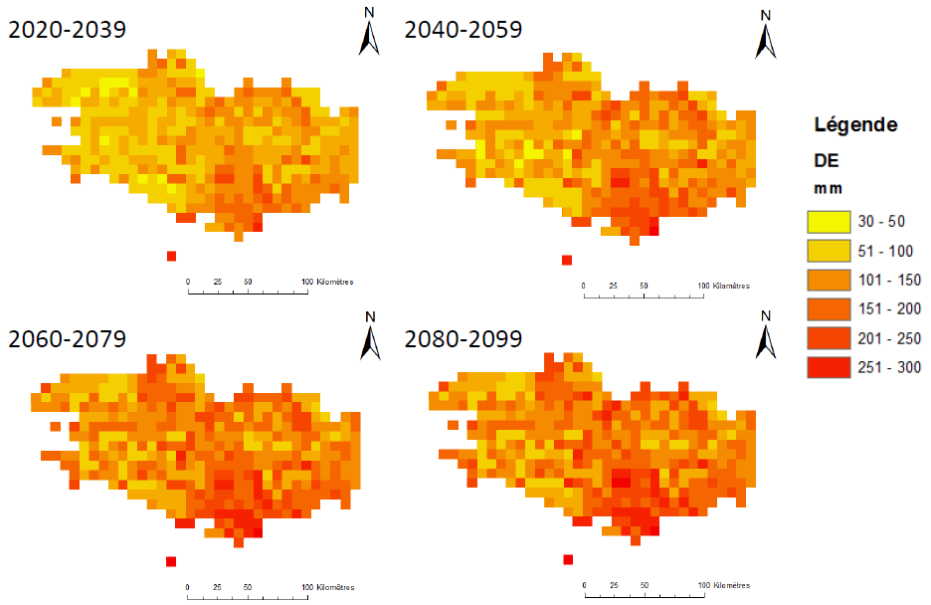


Figura 5. Evolução do déficit de evaporação no verão na Bretanha no cenário A1B e por quatro períodos do século XXI (resolução espacial: 8 km).

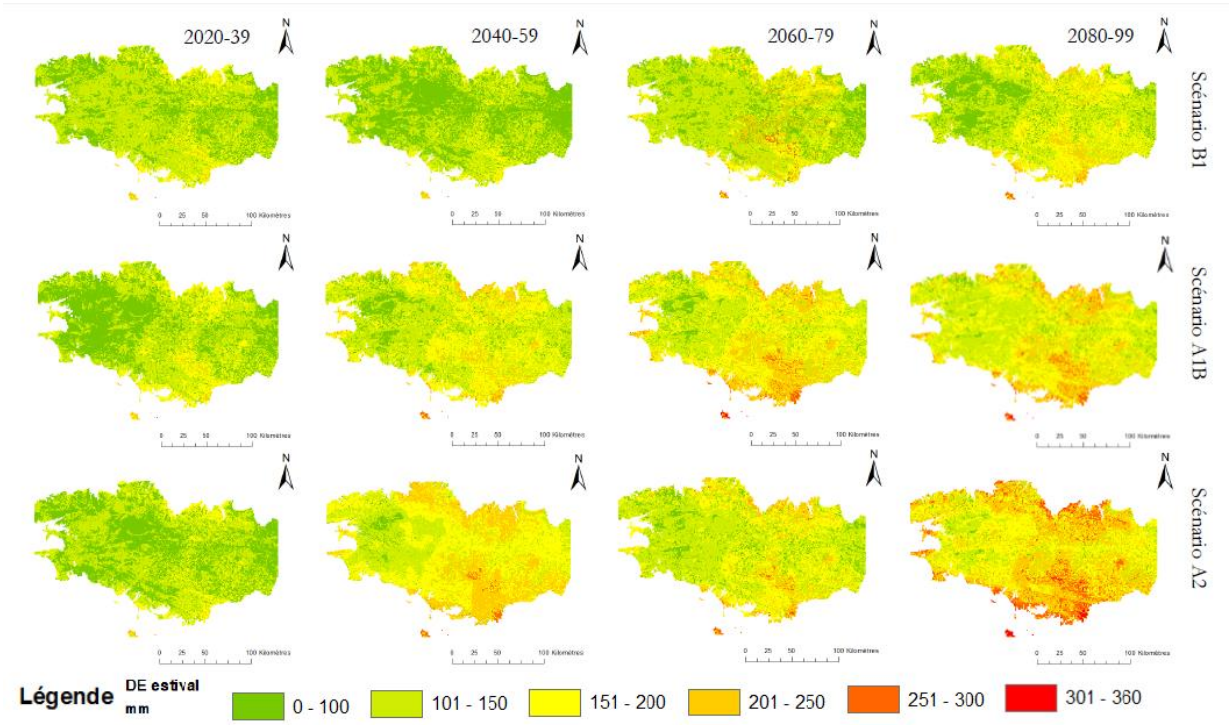


Figura 6 : Evolução do déficit de evaporação médio de verão (junho-agosto) em três cenários do IPCC, para quatro períodos (colunas) do século 21 - Resolução 1 km, reserva útil "real" e uso da terra seguindo Lecerf (2008), a 1 km de resolução espacial

3.3. Modelagem das secas futuras na resolução de 1 km

Os mapas da Figura 6 mostram a evolução do déficit de evaporação no verão para os três cenários e os quatro períodos de 20 anos. Durante a primeira metade do século XXI, as tendências desses três cenários são semelhantes em termos da concentração de gases de efeito de estufa. Assim, o déficit de evaporação é substancialmente idêntico a um cenário para

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

outro. Estes três cenários mostram uma diversidade espacial do déficit da evaporação devido aos diferentes climas bretões. Três sub-regiões diferem em termos de intensidade média do déficit de evaporação:

- A metade ocidental, onde o déficit de evaporação é baixo (inferior a 100 mm, principalmente);

- A parte leste é caracterizada por um déficit de evaporação médio (100 a 150 mm);

- O sudeste, onde o déficit de evaporação é maior (150-200 mm).

Lembre-se que, atualmente, o déficit de evaporação é da ordem de 50-60 mm no oeste e 80 mm no leste. Em Rennes, durante o século XX, o déficit de evaporação do verão variou principalmente entre 150 e 200 mm. No entanto, em secas muito severas um déficit maior pode ser observado: em Rennes foi medido 300 milímetros de déficit em 1976 (Lamy e Dubreuil, 2010).

Para que as diferenças sejam mais pronunciadas de um cenário para outro é preciso esperar até a segunda metade do século XXI. No cenário B1, o aumento das secas é moderado e limitado para a segunda metade do século XX: 100 mm no oeste e cerca de 150 mm para o leste, em média. No cenário A1B, o aumento é gradual, com o dobro do déficit no verão para a maioria das áreas entre o início e o fim do período de estudo. No período 2060-2079, muitas partes do sudeste experimentaram déficits médios do verão superiores a 300 mm. O cenário A2 é original, porque marcado pela estagnação do aumento das secas durante o período de 2060-2079. No final do século XXI, no entanto, o aumento do déficit é o mais importante, com numerosas regiões com um déficit médio acima de 300 mm.

Estes valores médios localmente superiores a 300 mm (poucos no cenário B1, mas bem representados no cenário A1B e mais ainda no cenário A2) podem ser comparados à seca histórica de 1976. A intensidade excepcional da seca de 1976, cujo impacto na agricultura foi muito importante, pode caracterizar uma intensidade média no final do século XXI. Assim, no sul da Bretanha, secas semelhantes ao episódio 1976 podem se tornar comum, podendo ocorrer uma vez a cada dois anos. Neste caso, o conhecimento da reserva de água do solo e a demanda de água pelas culturas serão decisivos para a correta gestão dos recursos hídricos. Para complementar esta abordagem, podemos considerar agora o uso do modelo para um monitoramento diário da evolução do déficit do verão.

3.4. Modelização da evolução do déficit de evaporação na escala quotidiana

O monitoramento do déficit de evaporação é proposto com um tempo diário (acumulado para toda a temporada do déficit), ainda de acordo com os três cenários B1, A1B e A2 e quatro subespaços representante as combinações clima / solo / cultura na região.

O gráfico 7a apresenta os resultados para uma área agrícola localizada no leste da Bretanha (região de Rennes), onde o uso do solo principal é a cerealicultura. Ele confirma as tendências observadas anteriormente, indicando um aumento do déficit de evaporação no próximo século. Este aumento não é homogêneo, como pode ser visto com o cenário A2 para o qual as secas são ligeiramente menos intensas no período 2060-2079, em comparação com os períodos de 2040-2059 e 2080-2099. Estas observações são devido à variabilidade decenal, especialmente da chuva. No início do século, o déficit máximo seria de cerca de 150 mm para os três cenários.Para os demais períodos, o déficit poderia chegar a valores que variam entre 150 e 250 mm, dependendo do cenário. O cenário A2 prevê secas mais intensas para todos os períodos, mesmo sim durante o período de 2020-2039, as distinções entre os cenários são baixas ; que as secas ocorrem mais intensa para o cenário B1 após do cenário A1B não é significativo. No final do século, os três cenários preveem uma evolução semelhante ao déficit de evaporação em junho. A partir daí, as curvas se separam, resultando em um déficit superior de acordo com o cenário A2 e menor no cenário B1. As diferentes curvas são geralmente paralelas ao período 2080-2099, durante os meses de julho, agosto e setembro. Isso destaca alguma regularidade na secagem de solos entre os cenários. No entanto, o rápido

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

aumento na intensidade do déficit de evaporação no caso do cenário A2 significa que as secas serão mais intensas do que no caso de A1B e B1.

A segunda área de estudo está localizada no centro da Bretanha (região de Rostrenen) em áreas agrícolas para culturas forrageiras. Esta área está localizada na junção das três grandes regiões climáticas acima identificadas (mais úmida no oeste, mais seca no leste e, mais seca ainda no sudeste). O déficit de evaporação máxima também seria entre 150 e 250 mm (Figura 7b). No entanto, observa-se um aumento gradual do déficit para este setor apenas no cenário B1. No cenário A2, o período 2060-2079 experimentaria secas menos intensas do que os períodos 2040-2059 e 2080-2099 (bem como na região de Rennes). No cenário A1B, é o final do século que iria conhecer secas menos intensas do que em períodos de meados do século. Essas mudanças apontam a variabilidade decenal bem modelizada pelo Arpege-Climat. Em 2100, o déficit de evaporação geralmente seguem as mesmas tendências entre o A1B e B1. O cenário A2 difere a partir do mês de junho com um grande e rápido aumento do déficit de evaporação. O déficit máximo que é de 200 mm dependendo do cenário A1B e B1 e sobe as 270 mm com o cenário A2.

O terceiro gráfico (Figura 7c) apresenta a região de Brest (noroeste da Bretanha) em uma área agrícola onde são cultivadas principalmente forragem e legumes. Em consonância com as tendências observadas anteriormente, os valores são mais baixos do que para os outros setores, devido a um clima mais frio e úmido. O déficit máximo seria entre 100 e 150 milímetros no começo do século, e os valores poderiam aumentar gradualmente entre 170 e 250 mm para o período de 2080-2099. Durante o período de 2020-2039, os cenários A2 e B1 proporcionariam um aumento semelhante no déficit de evaporação. Este seria um pouco mais baixo no cenário A1B, mas esta diferença não é significativa durante o período em que os cenários são caracterizados pelo mesmo padrão de aumento da concentração de gases de efeito de estufa. Durante o período seguinte (2040-2059), os cenários diferem mais incluem uma hierarquia lógica com um déficit de evaporação maior para o A2 e menor de acordo com o cenário B1. Durante o período de 2060-2079, as curvas estão geralmente próximas, por isso, os três cenários fornecem substancialmente a mesma evolução do déficit de evaporação. No final do século, no período de 2080-2099, os três cenários são de novo juntos até junho. A partir de julho, o déficit aumentaria mais fortemente no caso do A2 e, em menor medida, de acordo com o cenário B1, A1B ficando localizado em uma posição intermediária. Para este último cenário, os valores modelizados para o fim do século XXI nessa região, a mais úmida da Bretanha, serão comparáveis aos valores de hoje observados nas regiões mais secas !

Dos quatro setores analisados, a costa sul, no leste de Lorient (7d), onde em sua maioria são cultivados grãos, tem o maior potencial de aumento do déficit de evaporação durante o século XXI. O déficit máximo seria de cerca de 170 mm do início do século e 260 mm no final (valores comparáveis com aqueles do sul da França hoje). No início deste século, o déficit de evaporação iria evoluir da mesma forma para todos os três cenários. A situação é mais diversificada no período seguinte (2040-2059), incluindo o cenário A2, em que o déficit de evaporação poderá aumentar fortemente durante os meses de junho e julho. Durante o período de 2060-2079, o cenário B1 prevê um déficit de evaporação maior até junho, mas depois o cenário A1B indica um déficit de evaporação mais forte durante este período. O déficit sobe até 270 mm com o cenário A1B, 225 milímetros para o cenário A2 e 195 mm para o cenário B1. No final do século (2080-2099), o déficit de evaporação continua a evoluir, para os três cenários, de acordo com o mesmo padrão até junho. Depois, de acordo com o cenário A2, o déficit poderá crescer mais rapidamente do que o cenário A1B, e mais ainda que no caso do cenário B1, com valores que variam entre 220 e 300 mm para 2100.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

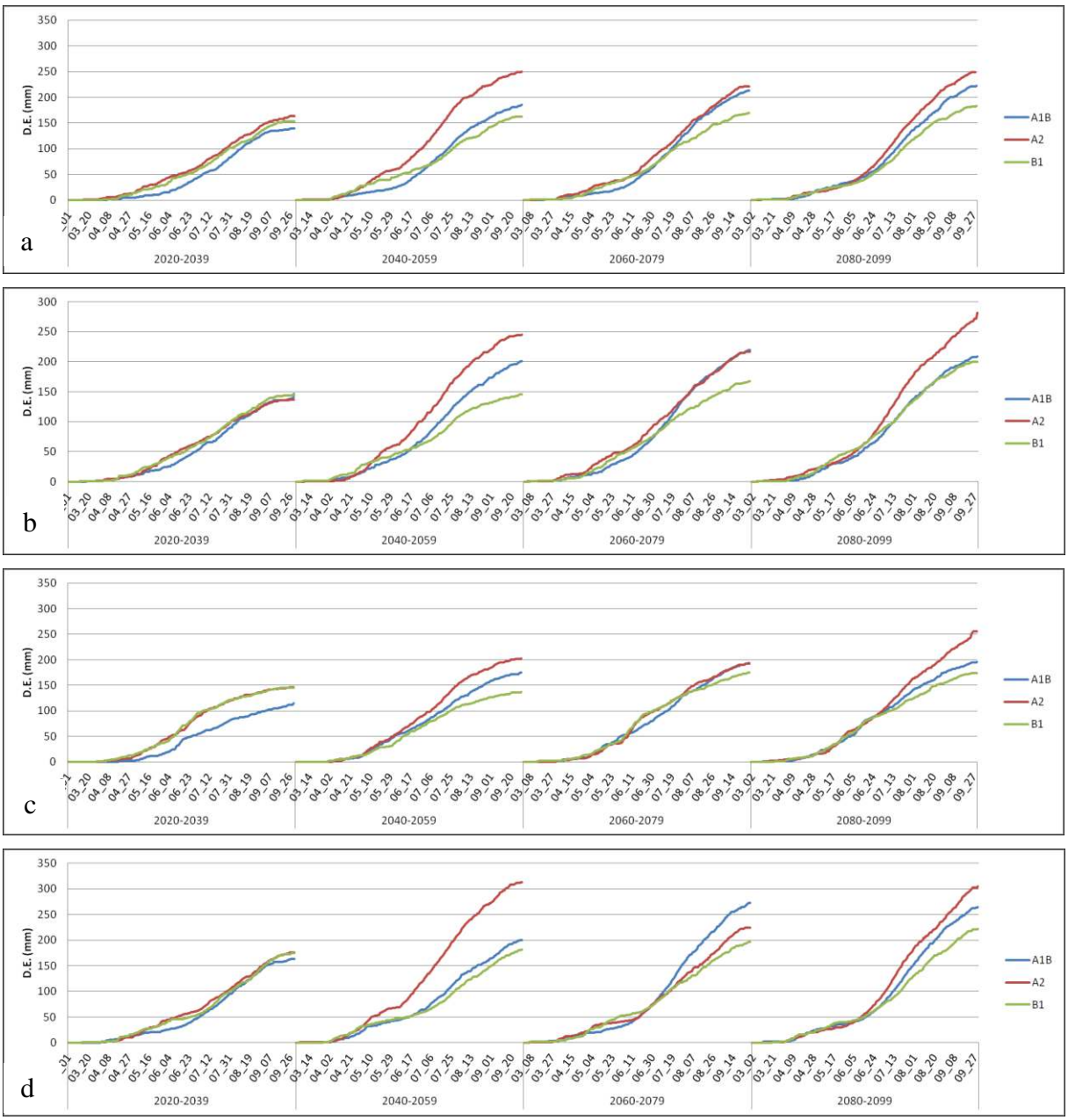


Figura 7. Evolução por dia do déficit de evaporação acumulado durante quatro períodos do século 21, e para 4 regiões da Bretanha: De cima para baixo: a) região de Rennes, b) Centro da Bretanha (Rostrenen), c) Norte da Finisterra (Brest), d) Litoral do Morbihan (sudeste de Lorient).

No geral, a evolução do déficit de evaporação para as quatro áreas de estudo revela uma situação semelhante entre os cenários ao longo do período 2020-2039 e que se diferenciam de forma mais aberta, em seguida, durante a segunda metade do século : a maioria dos déficits importantes aparecem com o cenário A2 e, especialmente, para o leste e sudeste da Bretanha com valores frequentemente duas vezes superiores em relação aos valores atuais. Em todos os casos, o melhor conhecimento da combinação do clima, solos e fatores agrícolas é fundamental para entender o desenvolvimento e a severidade das secas no futuro.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das alterações na frequência e intensidade das secas no contexto das mudanças climáticas envolve o uso de grandes quantidades de dados. O tratamento destes dados é simplificado pelo uso de *scripts* em linguagem Python que facilita a automação de tarefas

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

simples. Esta linguagem é adaptado ao conjunto do software ArcGIS, que também permite a automatização dos tratamentos espaciais utilizando diferentes conjuntos de dados em diferentes escalas. Esta abordagem é particularmente adequada para o monitoramento e o cálculo do balanço hídrico a nível regional, tanto para os dados atuais que para dados climáticos futuros fornecidos para os modelos globais e regionais.

Os resultados apresentados,na forma de mapas, fornecem informações sobre as variações espaciais na intensidade das secas. Três grandes setores na Bretanha se distinguem pela sua sensibilidade à seca. Para os três cenários do IPCC aqui estudados (B1, A1B e A2) o oeste da região parece menos susceptível à seca do que a metade leste. O déficit de evaporação é, em média, inferior a 150 mm no oeste, contra 150 a 200 mm no leste. O sudeste da Bretanha mostra os valores de déficit de evaporação maiores da região (200 a 250 mm, em média). Os mapas de resolução mais fina (escala quilométrica) ajudam para avaliar as mudanças na intensidade das secas nestas grandes unidades territoriais. Estas variações estão relacionadas com os tipos de uso da terra ou reservatórios de água do solo. Por exemplo, as reservas de água no solo pequenas (menos de 125 mm) tem uma dinâmica mais rápida do que os solos com elevadas reservas de água (acima de 200 mm), que demoram mais para recarregar. Os solos localizados no oeste da Bretanha com reservas inferiores a 125 mm, onde os episódios de chuva são mais regulares do que em outros setores bretões, parecem menos vulneráveis à seca. Pelo contrário, no caso do cenário A2, o sul e o leste da Bretanha poderia conhecer em 2100 secas de intensidade media iguais ou superiores a aquela do ano de 1976, todas outras coisas sendo iguais. O risco significativo de secas excepcionais no passado poderia se tornar comum em 2100 (a cada dois anos, aproximadamente). Essas mudanças poderiam causar um atraso na recarga das reservas de água no outono e poderia então alterar a dinâmica de água na superfície e, assim, levar a secas mais longas e mais intensas.

O método aqui apresentado permite simular espacialmente não só uma ampla gama de cenários climáticos, mas também da para ver o que vai acontecer com as reservas de agua do solo (e assim as secas), dependendo dos tipos de culturas, ou seja, dependendo das decisões dos agricultores. De acordo com as tendências, cultura de legumes impactaria menos as reserva de água do que o trigo ou forragem em um contexto de elevadas reservas de água sob um clima de tipo oceânico da costa norte da região. O milho, no contrário, teria um impacto significativo sobre as reservas de água nos três climas investigados e para todos os tipos de solo.

Dessa forma, se a magnitude das mudanças climáticas fica difícil de definir, especialmente a nível regional, os *scripts* relacionados ao balanço de água utilizados para este trabalho, podem ser um apoio à decisão e ajudar às políticas territoriais de adaptação às mudanças climáticas. Assim, a introdução de espécies menos consumidores de água ou cuja necessidade de água seria mais bem distribuída ao longo do ano, é também uma solução para a adaptação da agricultura às mudanças climáticas e ao risco de seca. Este estudo poderia, portanto, orientar abordagens territoriais para a sustentabilidade da agricultura.

Agradecimentos : Agradecemos Christian Pagé do CERFACS para fornecer acesso as saídas de dados desagregadas do modelo climático ARPEGE-Climat. Agradecemos também Blandine Lemercier-Foucaud do laboratório de Ciência do Solo Agrocampus por ter enviado os dados de solo do programa "Solos da Bretanha". Este estudo é parte do trabalho de tese financiado pela região Bretanha e esta integrada no projeto Climaster (alterações climáticas, sistemas agrícolas, recursos naturais e desenvolvimento territorial) financiado pelo programa PSDR-GO (Programa para e sobre o Desenvolvimento Regional do Grande Oeste) e o Instituto Nacional de Pesquisa em Agronomia da França (Mérot *et al.*, 2012). Agrademos também ao CNPq pela bolsa CSF 201392-2012-7 concedida à pesquisadora Neli Ap. de Mello-Théry, entre 2012 e 2013, permitindo-lhe realizar estudo comparativo da sustentabilidade da agricultura na Bretanha e no Mato Grosso.

ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica)

Bibliografia

Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A. & Pereira, L.S., 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin** 43 (2), 1-92.

Brochet, P., 1977. La sécheresse 1976 en France : aspects climatologiques et conséquences / The 1976 drought in France: climatological aspects and consequences. **Hydrological Sciences Bulletin** 22, 393–411.

Courault, D., Clastre, P., Guinot, J.-P. & Seguin, B., 1994. Analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d'un modèle agrométéorologique. **Agronomie** 14, 41-56.

Demuth, S. & Stahl, K., 2001. **ARIDE-Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe: Final Report.** Institute of Hydrology, University of Freiburg.

Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A. & Cariolle, D., 1994. The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. **Climate Dynamics 10:** 249–266.

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 Dynamics**, 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 p.

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.

Dubreuil, V., 2005. Un risque climatique à géographie variable : la sécheresse dans la France de l'ouest. In : **Les risques climatiques,** 147-173.

Dubreuil V., Lamy C., Lecerf R., Planchon O., 2010 : monitoramento de secas na bretanha : reconstituição histórica e abordagem por teledetecção. **Mercator. 9 (1)**, 107-119.

Dubreuil, V., Planchon, O., Lamy, C., Bonnardot, V. & Quénol, H., 2012. Le changement climatique dans la France de l'Ouest : observations et tendances. In : **Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions.** Dir : Merot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 19-30.

Giorgi, F. & Mearns, L. O., 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: A review. **Reviews of Geophysics***,* 29, 191-216.

Hewitson, B. C. & Crane, R. G., 1996. Climate downscaling: techniques and application. **Climate Research***,* 7, 85-95.

Holman, I. P. *et al.*, 2002**. REGIS - Regional Climate Change Impact Response Studies in East Anglia and North West England.** Department for Environment, Food & Rural Affairs: London.

IPCC, 2000. **Emissions Scenarios.** Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. 570 p.

IPCC, 2007. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lamy, C. & Dubreuil, V., 2011. Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. **Actes du 24ème colloque de l'AIC**, 357-362.

Lamy, C., 2013. **Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne.** Thèse de doctorat. Université Rennes 2. 274 p.

Lamy C., Dubreuil V., 2013 : Impact potentiel du changement climatique sur les sécheresses pédologiques en Bretagne au 21eme siècle. **Climatologie**. 10, 107-121

Lecerf, R., 2008. **Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne).** Thèse de doctorat. Université Rennes 2. 326 p.

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, 111p + annexes.

Métais C., 2000**. Interpolation, la méthode des splines.** Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Caen.

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.

Najac, J., Kitova, N., Vidal, J.-P., Soubeyroux, J.-M. & Martin, E., 2010. Caractérisation des sécheresses en France au cours du XXIème siècle. ***Risques et Changement Climatique, 23ème colloque de l'AIC***, 433-438.

Pagé, C., Terray, L. & Boé, J. 2010. **dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology**. Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/09/21. CERFACS.

Pailleux, J., Geleyn, J.-F. & Legrand, E. 2000. Numerical weather prediction with the models Arpège and Aladin; assessment and prospects. **La Météorologie**, 30, 32-60.

Pédelaborde, P., 1968. Les bilans hydriques. **Cahiers de géographie du Québec**, 12, 5 p.

Quintana-Segui, P., Martin, E. & Habets, F., 2007. **Impact de l'impact d'un profil exponentiel de conductivité hydraulique dans le sol pour la chaîne SAFRAN-ISBA-MODCOU**. Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 16-18 janvier 2007, Toulouse.

Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., *et al.*, 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 47(1), 92-107. doi:10.1175/2007JAMC1636.1

Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Najac, J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Pagé, 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 p.

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.