

Adaptation au changement climatique : évaluation de la réserve en eau des sols

Rapport technique

Février 2010

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : EVALUATION DE LA RESERVE EN EAU DES SOLS

| | |
|--|-----------|
| Remerciements..... | 4 |
| 1. Introduction..... | 5 |
| 1.1 Contexte de la thématique..... | 5 |
| 1.2 Construction du projet..... | 5 |
| 2. La ressource en eau en Bourgogne : contexte et problématique | 7 |
| 2.1 Le contexte pédoclimatique de la Bourgogne | 7 |
| 2.1.1 PEDOLOGIQUE, HYDROLOGIQUE ET GEOLOGIQUE | 7 |
| 2.1.2 LA BOURGOGNE, CROISEMENT DE TROIS INFLUENCES CLIMATIQUES | 7 |
| 2.1.3 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN BOURGOGNE | 7 |
| 2.2 Contexte de la ressource en eau | 8 |
| 2.2.1 LE RISQUE SECHERESSE EXISTE DEJA SUR CERTAINS TERRITOIRES | 8 |
| 2.2.2 UNE GESTION DE L'EAU DE PLUS EN PLUS TENDUE | 8 |
| 2.3 Influence du changement climatique sur le cycle de l'eau | 9 |
| 3. Méthodologie | 10 |
| 3.1 Climatologie | 10 |
| 3.1.1 CHOIX DES ANNEES CLIMATIQUES DE REFERENCE | 10 |
| 3.1.2 MODELISATION CLIMATIQUE | 12 |
| 3.1.3 LA MODELISATION DES DONNEES CLIMATIQUES : POUR CONCLURE | 16 |
| 3.2 Pédologie | 17 |
| 3.2.1 ELABORATION DE LA CARTE DES RESERVES UTILES EN EAU DES SOLS BOURGUIGNONS | 17 |
| 3.2.2 CONSTRUCTION DU MODELE DE BILAN HYDRIQUE | 22 |
| 3.2.3 DONNEES PEDOLOGIQUES : POUR CONCLURE | 23 |
| 3.3 Hydrologie | 24 |
| 3.3.1 VALIDATION DU BILAN HYDRIQUE SUR QUELQUES BASSINS VERSANTS | 24 |
| 3.3.2 BILANS HYDROLOGIQUES : POUR CONCLURE | 26 |
| 3.4 Traitement des données et règles de décision | 27 |
| 3.4.1 LE PAS DE TEMPS CHOISI : DONNEES CLIMATIQUES MENSUELLES | 27 |
| 3.4.2 TRAITEMENT GEOMATIQUE DES DONNEES : LA COMPATIBILITE DES ECHELLES | 27 |
| 3.4.3 AUTRES REGLES DE DECISION LORS DE L'ELABORATION DU MODELE | 27 |
| 4. Analyse cartographique des résultats | 29 |
| 4.1 Le critère taux de remplissage de la RU | 29 |
| 4.2 Sensibilité des sols à la sécheresse : analyse printemps/été | 29 |
| 4.2.1 CARACTERISATION DU PRINTEMPS ACTUEL | 29 |
| 4.2.2 COMPARAISON DES DEUX ANNEES CLIMATIQUES | 31 |
| 4.2.3 SENSIBILITE GEOGRAPHIQUE A LA SECHERESSE | 31 |
| 4.3 Recharge potentielle en eau des milieux : analyse automne/hiver | 32 |
| 4.3.1 SATURATION DES RU ET RECHARGE DES MILIEUX : RAPPEL | 32 |
| 4.3.2 INFORMATIONS FOURNIES PAR LES ANNEES ETUDIEES | 33 |
| 4.3.3 POTENTIEL DE RECHARGE HIVERNALE | 35 |
| 4.4 Impacts probables du changement climatique sur la réserve en eau des sols | 36 |
| 5. Quelle utilisation par les acteurs de territoire ? | 37 |
| 5.1 Exemples d'analyse locale sectorielle | 37 |
| 5.1.1 ANALYSE D'UN SECTEUR VITICOLE : VOSNE-ROMANEE | 37 |
| 5.1.2 ANALYSE DE DEUX SECTEURS FORESTIERS : MORVAN | 39 |
| 5.2 De l'élaboration des connaissances au passage à l'action | 41 |
| 5.2.1 ANALYSE DE L'INTERDISCIPLINARITE | 41 |
| 5.2.2 ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : ANALYSE DU CHEMINEMENT VERS L'ACTION | 41 |
| 5.3 La vision des acteurs : intérêt et limites de l'étude, pour conclure | 42 |
| Conclusions | 43 |
| Annexes Construction du modèle hydrique : détail de la méthode | 44 |

Remerciements

Ce projet, initié par Alterre Bourgogne, a été porté par un comité de pilotage composé de chercheurs et d'experts qui se sont impliqués volontairement dans cette étude. La qualité, la richesse et la densité des échanges et des travaux réalisés par chacun ont permis de donner à cette étude un caractère interdisciplinaire et partenarial. Ce travail construit et réalisé collectivement est appelé à perdurer, à enrichir et s'enrichir d'autres travaux. L'intérêt manifesté par les acteurs de territoires lors des réunions de restitution en est le garant.

Nous remercions chaleureusement chacune des personnes qui se sont investies dans ce projet :

Philippe AMIOTTE-SUCHET (Université de Bourgogne, Géosciences), Thierry CASTEL (CRC et AgroSup Dijon), Pierre CURMI (AgroSup Dijon), Marie-Cécile DECONNINCK (CRPF), Chloë LAMY (stagiaire M2 de l'Université de Tours, doctorante en géographie COSTEL), Dany LEVEQUE (DIREN-DREAL), Christine MONNAMY (BIVB), Sandrine PETIT (INRA, LISTO), Yves RICHARD (Centre de Recherches de Climatologie), Marjorie UBERTOSI (AgroSup Dijon), Arnaud VAUTIER (Chambre d'Agriculture de la Nièvre).

Ce projet n'aurait pas pu voir le jour sans la participation financière du FEDER, de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, du Conseil régional et de l'ADEME, ni sans les efforts financiers consacrés antérieurement par ces mêmes structures et les structures partenaires (ministères de l'Environnement et de la Recherche) sur le développement des bases de données. La modélisation trouve ici toute son importance grâce à l'antériorité de ces travaux.

1. Introduction

1.1 Contexte de la thématique

Changement climatique et gestion de la ressource en eau sont deux enjeux importants pour demain. Ils ont fait et font l'objet de cadrages réglementaires et des objectifs quantitatifs sont fixés.

L'atténuation des émissions de GES contribuant au changement climatique est une préoccupation inscrite dans les Plans Energie Climat des territoires. Mais la nécessité est également ressentie de ne pas oublier le pan de l'adaptation. Cela suppose d'estimer les vulnérabilités des territoires face aux manifestations du changement climatique, notamment sur la disponibilité des ressources naturelles. C'est un préalable à la mise en œuvre de stratégie d'adaptation.

Concernant la ressource en eau, les territoires sont déjà impactés par son altération, tant quantitative que qualitative. Retrouver le bon état de la ressource est un enjeu fort et l'UE a fixé des obligations à ses états membres pour 2015, dans le cadre de la Directive Cadre Européenne sur l'eau. Les territoires sensibles ont été cartographiés et classés en fonction du « risque de non atteinte du bon état ».

Les impacts probables du changement climatique sur la ressource en eau ont été répertoriés dans le rapport d'expertise collective de l'INRA¹, sur lequel s'est appuyé l'ONERC dans son dernier rapport². Le changement climatique devrait accroître la pression exercée sur les ressources en eau, en raison de l'aggravation de l'intensité et de la périodicité de phénomènes tels que la pénurie d'eau et les sécheresses. Déjà inégaux face à la disponibilité de l'eau, les territoires ne seront pas touchés de manière uniforme. Des disparités pourraient s'accroître.

Ces sensibilités sont accrues lorsque les usages sont multiples et importants. Les secteurs, où le risque de ne pas retrouver le bon état quantitatif est trop fort, sont définis en ZRE, zones de répartition des eaux. Sur ces zones, des mesures de protection réglementeront bientôt les prélèvements en fonction de la disponibilité réelle de l'eau dans le milieu.

Si les secteurs déjà sensibles aux tensions sur la ressource en eau sont connus, qu'en sera-t-il demain avec l'évolution du climat ? D'autres secteurs géographiques seront-ils concernés par un manque d'eau saisonnier ?

La gestion de la ressource en eau devra tenir compte des déséquilibres qu'entraînent une répartition géographique inégale des ressources et des variations climatiques saisonnières plus fortes demain.

1.2 Construction du projet

En 2003, puis en 2005, l'OREB, devenu Alterre Bourgogne, avait initié des travaux sur l'identification des impacts liés au changement climatique³. Depuis, Alterre Bourgogne s'est appuyé sur un réseau d'acteurs régionaux pour fédérer les réflexions et favoriser les échanges d'expérience sur les pistes d'adaptations sectorielles⁴. Pour animer ce réseau, appelé aussi Observatoire Partenarial, de récents travaux menés par des équipes de recherche implanté en Bourgogne, en climatologie et en pédologie, ont été présentés et ont permis d'intéressants échanges et avancées. Le thème présenté ici résulte de ces travaux de groupe.

¹ **Sécheresse et agriculture : réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau.** Rapport d'expertise. INRA, 2006

² **Changement climatique : coûts des impacts et pistes d'adaptation.** Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. La documentation française, 2009

³ **Sécheresse et canicule 2003 : la Bourgogne face aux aléas climatiques.** OREB, Repères n°34, juin 2004 ; **La Bourgogne face aux changements climatiques.** OREB, Repères n°38, juin 2005

⁴ **S'adapter aux changements climatiques.** Alterre Bourgogne, Repères n°46, avril 2008

La vulnérabilité face aux effets du changement climatique a été stigmatisée par 2003, année de forte canicule et de sécheresse qui a provoqué localement des baisses de récolte, des fissures dans les bâtiments, et parfois aussi des tensions sur la disponibilité quantitative et qualitative en eau. Qu'en sera-t-il quand 2003 deviendra une année « moyenne » ? D'autres effets liés au caractère erratique des précipitations hivernales sont à craindre, risquant de provoquer sécheresses ou ruissellements excessifs. L'augmentation possible de la variabilité climatique en Europe (Schär et al. 2004) nous oblige à repenser et repositionner nos activités sur les milieux, l'action préventive étant moins coûteuse que l'action curative d'urgence. Mais comment identifier les territoires les plus exposés ? Quelle est la nature exacte de ces risques, et leur ampleur ?

Pour ce faire, des outils scientifiques sont actuellement disponibles en Bourgogne : modélisation dynamique à partir du modèle climatique régional (MCR) de climat (WRF), cartographie des sols au 1/250 000^e et réseau de mesures hydrologiques. La combinaison de ces outils, orchestrée par les chercheurs concernés, permet de définir et d'identifier la sensibilité de la réserve en eau des sols bourguignons au changement climatique. Elle permet par exemple de zoner les secteurs géographiques pouvant être impactés par la sécheresse ou des ruissellements excessifs. Ce travail à caractère scientifique a bénéficié de la collaboration de trois équipes de recherche de l'Université de Bourgogne et d'AgroSup Dijon, le Centre de Recherches de Climatologie (CRC), hydrologie et pédologie.

L'utilisation concrète d'un tel travail nécessite une « traduction » opérationnelle. L'analyse des résultats gagne en pertinence lorsque les regards d'experts et d'acteurs de terrain se croisent et se confrontent. Elle contribue à mieux évaluer les vulnérabilités par secteur d'activité et par milieu, et ainsi à imaginer des pistes d'adaptation relevant du développement durable.

Pour réaliser ce travail collectif, les chercheurs ont dû échanger des données conçues pour des échelles différentes. La co-construction d'un modèle hydrique s'est faite pas à pas, avec des règles de décision progressives. Celles-ci ont été prises par le comité de pilotage, composé des chercheurs impliqués et des experts sectoriels. Les différentes réunions de travail ont été des temps forts dans la construction du modèle et les échanges entre disciplines. Deux rencontres plus larges avec les acteurs de territoires ont permis d'échanger très tôt sur l'intérêt et l'utilisation potentielle de cette étude.

Une sociologue de l'INRA a suivi les différentes phases du projet et a apporté son analyse sur le déroulement de ce travail, sur la façon dont il s'est construit et a évolué avec les chercheurs, mais aussi avec les partenaires.

Ce rapport présente les résultats de ces travaux. Il intègre les présentations des équipes de chercheurs lors des réunions de restitution.

2. La ressource en eau en Bourgogne : contexte et problématique

2.1 *Le contexte pédoclimatique de la Bourgogne*

2.1.1 Pédologique, hydrologique et géologique

Le territoire bourguignon est réparti sur trois grands bassins versants : 44 % de la région se trouve sur le bassin Loire-Bretagne, 28 % occupe le bassin Seine-Normandie et 28 % se situe sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse. Le réseau hydrographique régional est dense du fait des 1 200 km de cours d'eau, mais sa répartition est très inégale. On retrouve ainsi de nombreux chevelus au niveau des substrats géologiques peu perméables du Morvan ou de l'Auxois, contrairement aux grands plateaux calcaires perméables du nord de Dijon.

83 % de l'alimentation en eau potable est d'origine souterraine. Les nappes souterraines sont souvent de dimension moyenne à l'exception de celles du nord de l'Yonne, plus importantes, qui alimentent la ville de Paris.

La géologie du territoire bourguignon est contrastée. Au centre de la région, le socle primaire forme le massif du Morvan. Ce socle, composé de roches granitiques et métamorphiques, s'étend jusqu'au sud de la Saône-et-Loire. Le Morvan est encerclé par une zone de roches sédimentaires dont la limite externe est figurée par les villes de Nevers, Auxerre, Dijon et Mâcon. Cette zone présente une topographie hétérogène avec de vastes plateaux calcaires à l'ouest de l'Yonne et au nord de la Côte-d'Or, des escarpements calcaires entre Dijon et Mâcon et des collines marneuses entrecoupées de petits plateaux calcaires dans la Nièvre. Le nord-ouest de l'Yonne est de nature crayeuse. La Bresse, région située à l'est de la Bourgogne, et la Sologne bourbonnaise, située au sud de la Nièvre, sont d'anciens fossés d'effondrement qui ont été comblés par des sables et des argiles imperméables. Les vallées de la Saône, de la Loire et de l'Yonne, principaux cours d'eau de la région, sont recouvertes de sédiments alluvionnaires.

2.1.2 La Bourgogne, croisement de trois influences climatiques

Le territoire bourguignon est soumis à trois influences climatiques dont la répartition géographique est liée à la topographie, et en particulier à la présence du massif du Morvan.

La Bourgogne connaît un climat océanique sur les territoires des bassins ligérien et séquanien (l'intégralité des départements de la Nièvre et de l'Yonne). Il s'altère vers le Nord-Est et offre des nuances continentales. Des caractères subméditerranéens sont présents à l'est de la Saône-et-Loire, dans le bassin versant de la Saône.

Ce climat, et ses variantes, assure aux territoires bourguignons des précipitations moyennes annuelles comprises entre 700 et 1 000 mm. En moyenne toujours, ces précipitations sont assez bien réparties tout au long de l'année (Marceau et al, 1994).

Les risques d'inondations et de sécheresses n'en sont pas pour autant inexistantes. Ils sont liés à la variabilité interannuelle du climat.

2.1.3 Le changement climatique en Bourgogne

Les travaux du GIEC, à l'issue de simulations climatiques, sont formels : les températures moyennes s'élèvent en toutes saisons (IPCC, 2007). L'amplitude de ce réchauffement varie surtout en fonction du scénario envisagé (B2, A2, B1, A1...) et de la latitude des territoires. Il sera plus fort aux pôles et à l'intérieur des terres. **Aussi, l'élévation moyenne de températures de 2°C à l'échelle mondiale équivaudrait à notre latitude et à l'intérieur des terres à 3° ou 4°C.**

Les simulations des précipitations, moins fiables, présentent des évolutions plus contrastées. Elles augmenteraient en saison froide et diminueraient en saison chaude, là encore avec des nuances selon les latitudes : l'augmentation des précipitations en saison froide prévaudrait en Europe à climat océanique, tandis que la diminution pendant la saison chaude l'emporterait en Europe à climat méditerranéen.

Pour la Bourgogne soumise à trois influences climatiques, comment se traduiraient ces changements climatiques ? Les études menées sur les évolutions récentes (1961-2007) en partenariat entre Météo France et le Centre de Recherche de Climatologie posent l'hypothèse d'une évolution des limites climatiques actuelles.

2.2 Contexte de la ressource en eau

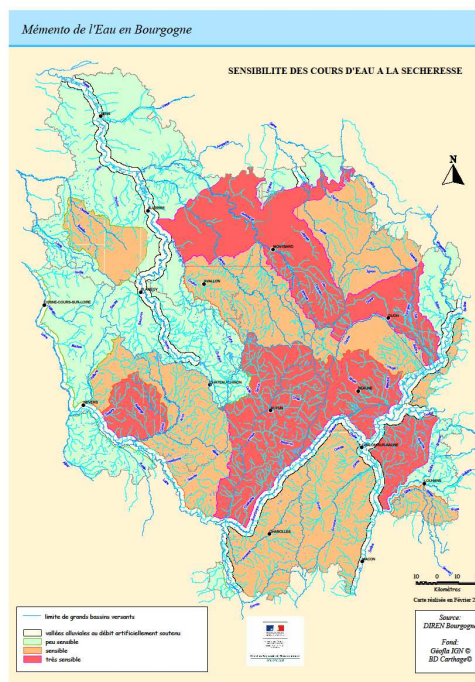
2.2.1 Le risque sécheresse existe déjà sur certains territoires

Fig. 1 : Sensibilité des cours d'eau à la sécheresse
(source : DIREN)

En Bourgogne, certains bassins d'alimentation en eau sont déjà sensibles aux sécheresses. Une carte a été élaborée par la DIREN à partir des suivis d'étiages des cours d'eau.

Plusieurs critères déterminent cette sensibilité à la sécheresse :

- Les débits des cours d'eau : lorsqu'ils sont faibles, ils accusent des étiages sévères en été.
- Les aquifères fissurés (karst). Les circulations de l'eau sont rapides empruntant le réseau de fissures. Leur capacité à amortir les aléas pluviométriques est réduite.
- Les aquifères inexistant (socle granitique du Morvan) ou de petite capacité sont sensibles aux aléas de précipitations.



2.2.2 Une gestion de l'eau de plus en plus tendue

Aujourd'hui encore, il est impossible d'estimer les volumes d'eau disponibles sur le territoire. Les cellules sécheresse des départements s'appuient sur les observations d'étiage des cours d'eau pour déclencher les alertes. Les mesures piézométriques des nappes permettent de suivre l'évolution des niveaux des nappes. C'est un indicateur essentiel pour déterminer si la sollicitation des ressources souterraines est supérieure ou non à la capacité du milieu à se régénérer. Certaines nappes présentent une altération quantitative notoire.

La gestion des ressources en eau, notamment celles offertes par les plans d'eau (réservoirs et retenues) vise à satisfaire de multiples usages : écrêtage de crues, alimentation en eau potable, tourisme fluvial, soutien d'étiage, etc. Les besoins de ces usages sont parfois contradictoires. Gérer le remplissage de ces réservoirs, c'est parfois arbitrer entre ces différents usages. Prenons l'exemple d'un barrage qui sert deux usages principaux, l'écrêtage, les crues et la navigation. S'il est rempli trop tôt en hiver et que le printemps qui suit est très arrosé, il ne tiendra plus son rôle d'écrêteur de crues. Par contre, s'il est rempli trop tard mais que les pluies de printemps sont insuffisantes, la navigation ne sera pas possible. Pour un barrage de ce type (le lac de Pont), il est avéré qu'une année sur cinq, un des deux usages n'est pas satisfait. Cette fréquence augmentera-t-elle à l'avenir ?

Le caractère de plus en plus aléatoire des pluies et la multiplication des usages sur une même ressource augmenteront les risques de conflits d'usage. La gestion collective d'une ressource s'oriente actuellement vers la coordination des gestions sectorielles. C'est l'objectif des ZRE.

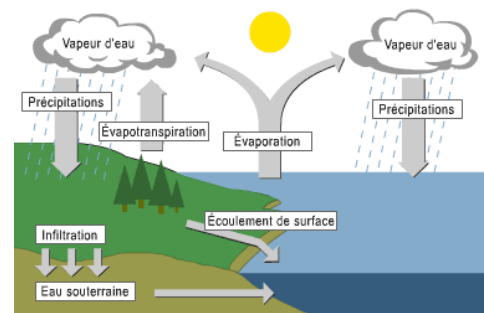
2.3 Influence du changement climatique sur le cycle de l'eau

Fig. 2 : Cycle de l'eau

Le climat influe sur le cycle de l'eau, ce qui n'est pas sans conséquence sur la disponibilité de la ressource en eau. Les variables sont la pluie, le rayonnement global, la température et le vent. Lorsque température et rayonnement augmentent, l'évaporation des masses d'eau et la transpiration des végétaux deviennent plus importantes et les quantités de ressources disponibles et exploitables diminuent.

Avec le changement climatique, des périodes de pénurie en eau pourraient apparaître dans certaines régions. Les modèles climatiques permettent d'estimer les conséquences sur le cycle de l'eau :

- L'accroissement des températures et du rayonnement global stimulera l'évaporation.
- Même dans les régions où les précipitations ne diminuent pas, voire même augmentent légèrement, la disponibilité en eau pourra reculer.
- Les tendances saisonnières joueront un rôle accru. En été, le renforcement de la transpiration, sous l'effet de l'augmentation des températures et du rayonnement global, pourra provoquer une pénurie d'eau dans des régions qui n'en souffrent pas actuellement.



D'importantes incertitudes existent sur les changements du cycle hydrologique dans le climat futur. Les résultats des modèles s'accordent relativement bien sur la probabilité d'avoir une augmentation des précipitations au nord de l'Europe et une diminution au sud du continent. La limite est variable selon les saisons (plus au nord en été et plus au sud en hiver). La France se situant dans la zone de changement de signe, les incertitudes y sont fortes. Les impacts les plus importants auront lieu en été avec une importante diminution des précipitations, si la tendance méridionale l'emporte à cette saison. Ceci n'exclut pas une augmentation d'intensité des événements extrêmes : crues et ruissellement urbain sous orages intenses. Le climat de la Bourgogne se rapprochera-t-il de celui du Nord de l'Europe ou du Sud ?

Cette étude se propose d'estimer l'impact probable du changement climatique sur la ressource en eau des territoires bourguignons, via le cycle de l'eau.

La situation de la ressource en eau en Bourgogne pointe des secteurs géographiques déjà en situation de risque fort pour la sécheresse. La gestion de la ressource en eau doit tenir compte de déséquilibres importants liés à une répartition géographique inégale des ressources, des conditions climatiques et des variations saisonnières. Le CC constitue une tension supplémentaire. Les modifications du cycle hydrologique dues au changement climatique compliqueront encore davantage la gestion de la ressource en eau.

Le risque de manque de disponibilité de l'eau est déjà sensible sur certains territoires. Cette sensibilité s'aggraverait-elle ? D'autres territoires connaîtraient-ils un risque de sécheresse ou de pénurie d'eau ? A quelle période de l'année ?

3. Méthodologie

3.1 Climatologie

Les évolutions du climat sont estimées grâce à des modèles climatiques. Ceux-ci ont généralement une résolution spatiale assez lâche, de l'ordre de 250 km. La Bourgogne est vue comme un seul point, ou plus exactement un espace à l'intersection de 4 points de grille.

Le Centre de Recherches de Climatologie CNRS-Université de Bourgogne dispose avec le modèle climatique régional WRF (Weather Research Forecast), d'un outil et d'une expertise permettant de faire des simulations à une maille fine. La méthodologie mise en œuvre pour faire des simulations à échelle fine est complexe, coûteuse en temps, et demande des validations. Celles-ci ont été effectuées ou sont en cours en ce qui concerne les températures (Legat, 2007 ; Bonnefoy, 2008). Ce n'est pas le cas pour les précipitations. **Ces validations ne peuvent être réalisées que pour des années écoulées**, par confrontation entre simulations et observations Météo France. Ces simulations effectuées sur les deux années retenues ont généré des informations quotidiennes à une maille de 9 par 9 km pour l'ensemble de la région Bourgogne.

Pour utiliser ce modèle dans le cadre de cette étude, un travail préalable a été nécessaire. L'équipe de climatologues a dû identifier dans les années passées deux années représentatives, l'une du climat actuel et l'autre du climat de demain.

3.1.1 Choix des années climatiques de référence

Contribution : Yves Richard, Centre régional de Climatologie

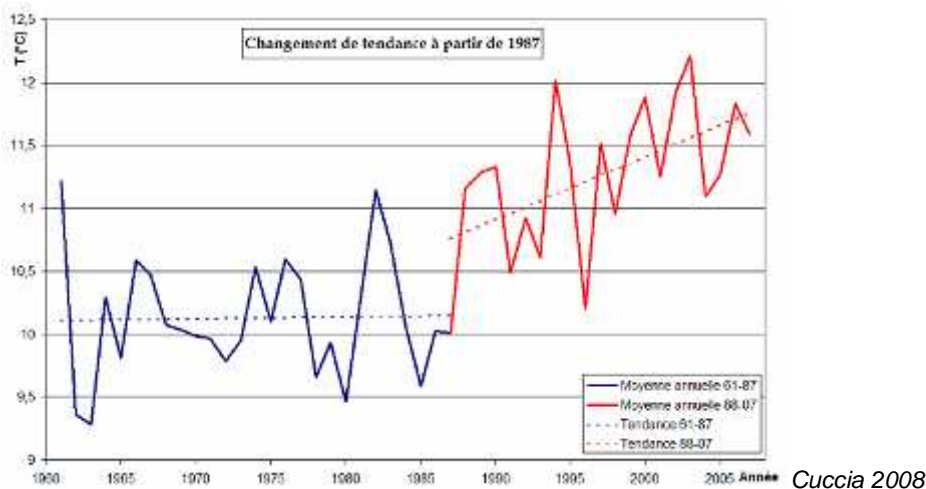
Traitement des données : Yves Richard et son équipe

a - Choix de l'année actuelle

Choisir une année de référence suppose de connaître le climat actuel. En analysant les températures moyennes, l'équipe du Centre de Recherches de Climatologie a identifié deux phases :

- un climat qui semble plus ou moins stationnaire jusqu'en 1987,
- et une autre phase climatique depuis 1988, marqué par une dérive des températures.

Gr. 1 : Températures moyennes annuelles : moyenne spatiale sur 44 stations – Bourgogne et périphérie



Le travail d'analyse pour choisir l'année de référence s'est donc porté sur la dernière séquence climatique (1988-2007), considérée comme représentative du climat actuel. Le croisement des profils quotidiens des moyennes spatiales de précipitations et températures sur la saison végétative (mars-septembre) a permis d'identifier 1991 comme l'année la plus proche du profil moyen (1988-2007).

Adaptation au changement climatique : évaluation de la réserve en eau des sols

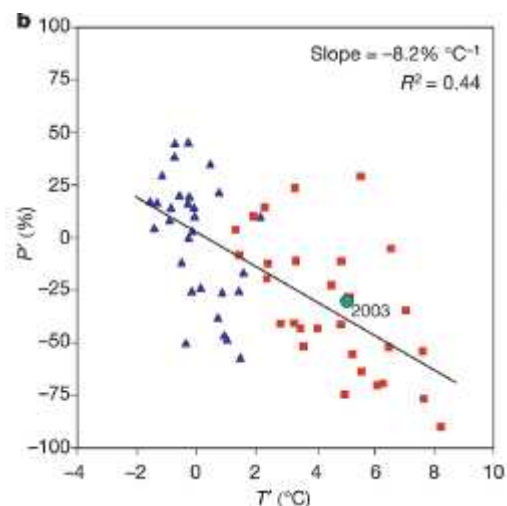
1991 a été l'année où les successions des événements pluvieux et thermiques ont été les plus proches des profils moyens calculés sur 1988-2007 (Gr. 3). En moyenne sur mars-septembre, 1991 est plutôt fraîche par rapport à la moyenne 1988-2007, tout en se situant au-dessus des moyennes de la période antérieure (1961-1987).

b - Choix de l'année future

Pour les experts du GIEC, l'année 2003 est « à l'image des années futures ». Schär et al. (2004) ont précisé son profil estival (juin à août) par rapport aux scénarios du GIEC : 2003 présente les caractéristiques d'un été moyen de demain (2071-2100) pour ses températures et ses précipitations (Gr. 2).

T° simulées JJA
1961-1990 (triangles bleus)
2071-2090 (carrés rouge)
Schär et al. 2004

Gr. 2 : Températures et précipitations estivales dans le nord de la Suisse

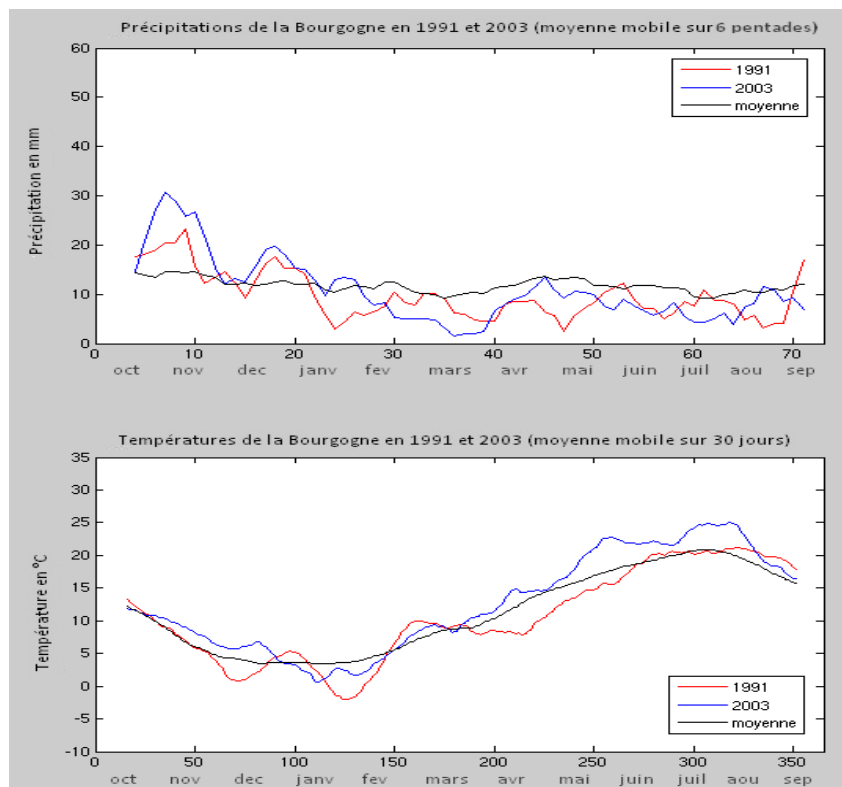


c - Pertinence des deux années retenues

Gr. 3 : Ecart aux déroulements moyens (1988 – 2007) Villery 2009

En Bourgogne, 1991 et 2003 diffèrent surtout du fait de leurs températures de saison végétative (mars-septembre). Les températures de 1991 sont conformes aux moyennes 1988-2007 en juin, juillet et août. Elles sont légèrement supérieures aux moyennes en mars et en septembre, et inférieures en avril et en mai. En revanche, à partir de la mi-mars, 2003 a connu des températures systématiquement supérieures aux moyennes.

Les volumes précipités au cours des années 1991 et 2003 diffèrent peu les uns des autres. Dans les deux cas, ils sont conformes aux moyennes 1988-2007 sur la saison froide qui a précédé, puis plutôt déficitaires tout au long des saisons végétatives 1991 et 2003.



3.1.2 Modélisation climatique

Contributions : Thierry Castel, Centre régional de Climatologie

Elaboration des données : Thierry Castel et son équipe

a - Le principe de la modélisation et les sorties du modèle

Le modèle utilisé, Weather Research Forecast (WRF ; Chen et Dudhia, 2000), permet une désagrégation dynamique du climat (Fig.1). Il intègre des données concernant l'hydrologie, le couvert végétal et la topographie, à une résolution de 8 km, et les données d'un modèle climatique régional à résolution de 50 km.

Du fait de la grande connectivité entre la surface du sol et la basse atmosphère, le modèle climatique utilisé est couplé à un modèle de surface du sol : Land Surface Model (LSM ; Bonan G. B., 1996). Celui-ci fait interagir les conditions de basse atmosphère avec les conditions de sol (Fig. 2). Ce modèle prend également en compte les îlots urbains et la chaleur qu'ils peuvent dégager.

Les informations climatiques élaborées par le modèle comportent entre autres les températures, les précipitations, le rayonnement global et le vent, ainsi qu'un critère proche de l'évapotranspiration.

Fig. 4: Schéma du principe de la désagrégation dynamique du climat (T. Castel, communication personnelle)

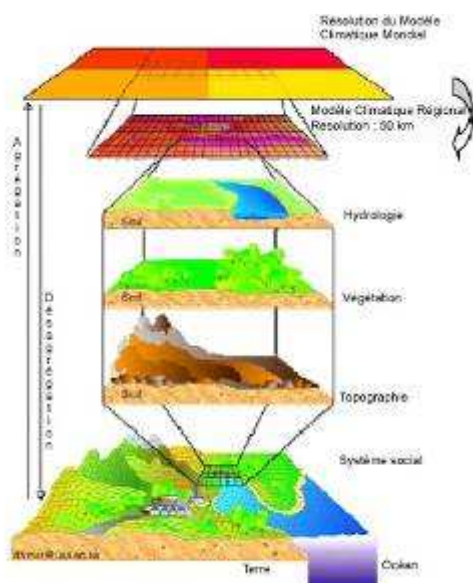
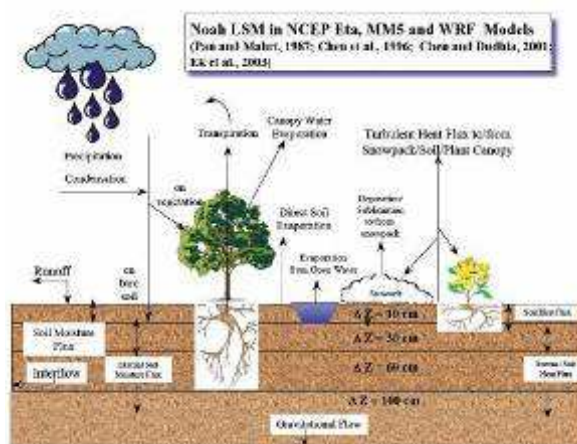


Fig. 5 : Schema du principe de fonctionnement du LSM (source : Chen F., Dudhia J., Coupling an advanced land surface-hydrology model with the penn state-NCAR MM5 modeling system, part 1 : model implementation and sensivity)



Pour chaque période, la modélisation démarre au mois de juin de l'année précédente afin d'avoir le temps d'équilibrer les réservoirs. Les conditions initiales ne reflétant pas la réalité, on laisse le modèle simuler huit mois avant la période voulue. Cette étape permet de s'affranchir des données initiales pouvant fausser la modélisation.

Le jeu de données obtenu est robuste spatialement, mais quelques biais peuvent apparaître au niveau de l'aspect quantitatif. Ces biais sont une information importante pour les chercheurs. Ils permettent de mieux comprendre les déterminants du climat.

b - Les sorties du modèle : les données climatiques fournies

L'évapotranspiration réelle est estimée à partir d'une formule dérivée de la formule de Penman-Monteith par la notion de flux de chaleur latente. En utilisant cette méthode, l'ETR n'est pas déterminé à partir de l'ETP. La végétation rentre en jeu dans son estimation, la distinction est faite entre les forêts, les champs et les prairies. Mais elle n'est pas affinée par type de culture ou de boisement. Une pondération par le pourcentage surfacique est effectuée quand plusieurs types de végétation se trouvent sur une même maille.

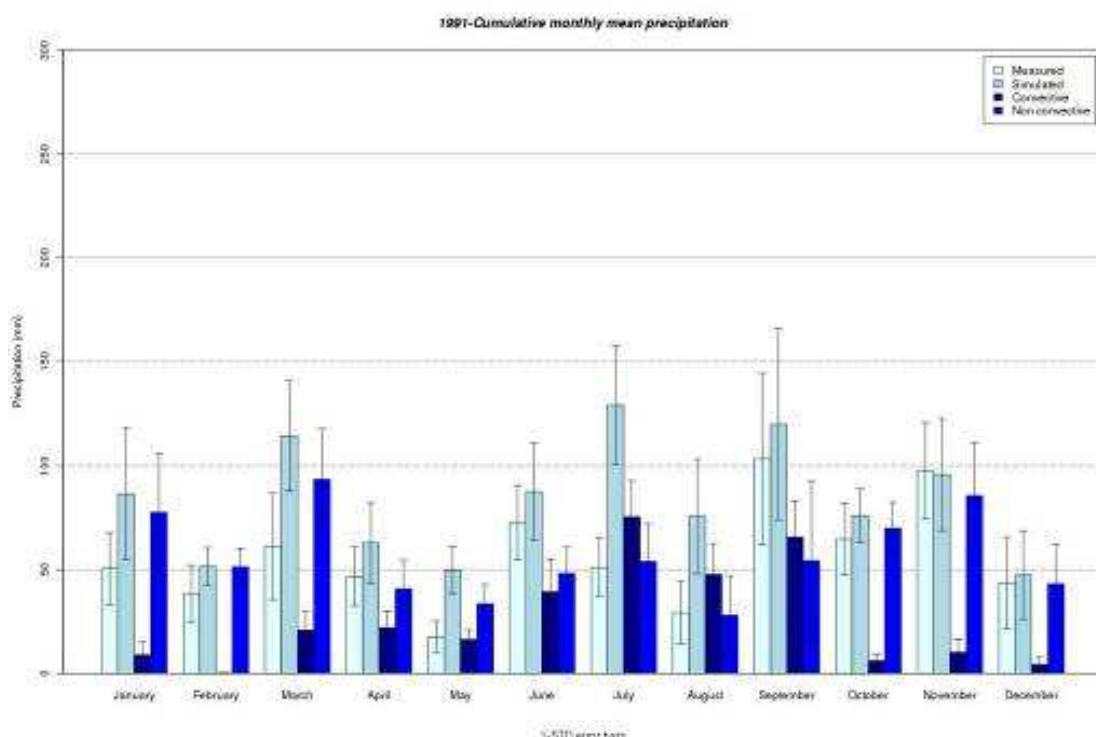
Les climatologues font état d'une surestimation des précipitations simulées par WRF. Cette surestimation est systématique, ce qui constitue un biais gérable. Une correction peut donc être envisagée. Ce biais semble surtout dû aux précipitations d'origine convective. Or les fortes chaleurs sont responsables des pluies convectives. Le biais est donc plus prononcé en saison chaude (Gr. 4 et 5). Les plus forts écarts entre les pluies mesurées et simulées sont pour les mois de juillet 1991 et surtout en juin 2003. **Cela laisse supposer plus largement que les biais de modélisation peuvent être différents selon qu'on modélise une année fraîche ou chaude.**

NB : On distingue deux modes de calcul de l'évapotranspiration :

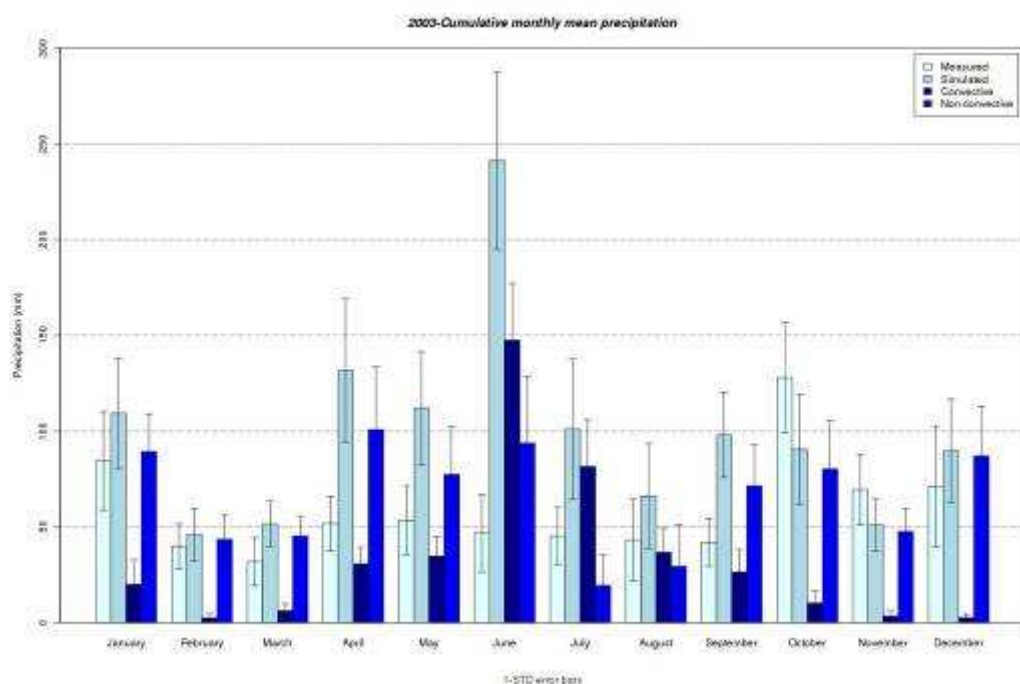
ETP : l'évapotranspiration potentielle correspond à la quantité pouvant s'évaporer du fait des seules conditions climatiques

ETR : l'évapotranspiration réelle tient compte des conditions climatiques et de la végétation

Gr. 4 : Moyenne mensuelle des précipitations mesurées et modélisées en 1991

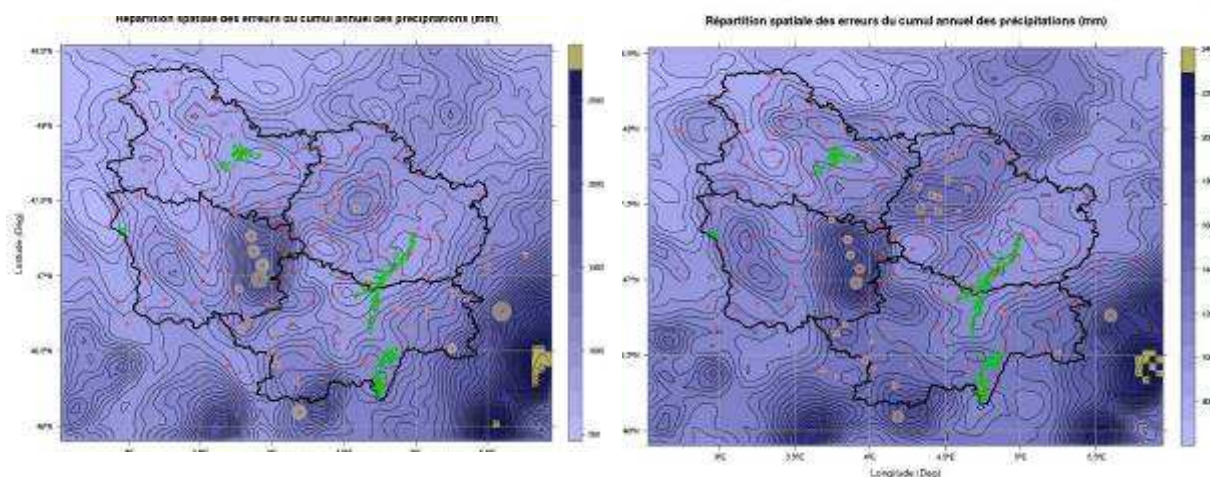


Gr. 5 : Moyenne mensuelle des précipitations mesurées et modélisées en 2003



Une surestimation des pluies dans l'espace est également possible (Fig. 6), elle serait plus marquée au niveau des reliefs tels que le massif du Morvan.

Fig. 6 : Répartition spatiale des erreurs en 1991 (gauche) et 2003 (droite)



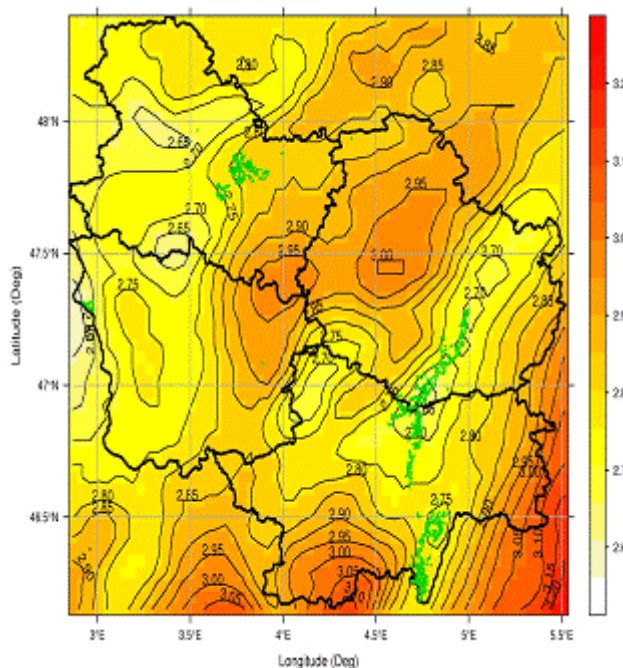
Calculer un correctif adapté au type d'année (chaude ou fraîche) et identifier les distorsions géographiques (relief) permettraient de corriger artificiellement les précipitations simulées aux valeurs observées, mais limiteraient les possibilités d'interprétation de compréhension des mécanismes. Il a donc été convenu d'appliquer un correctif moyen, calculé sur la base des deux années sur la période incriminée (avril à septembre) afin d'atténuer cet effet du modèle WRF.

Tous les résultats qui suivent seront présentés avec ce correctif sur les pluies d'avril à septembre.

c - Le contexte climatique modélisé, « l'actuel » et « le futur »

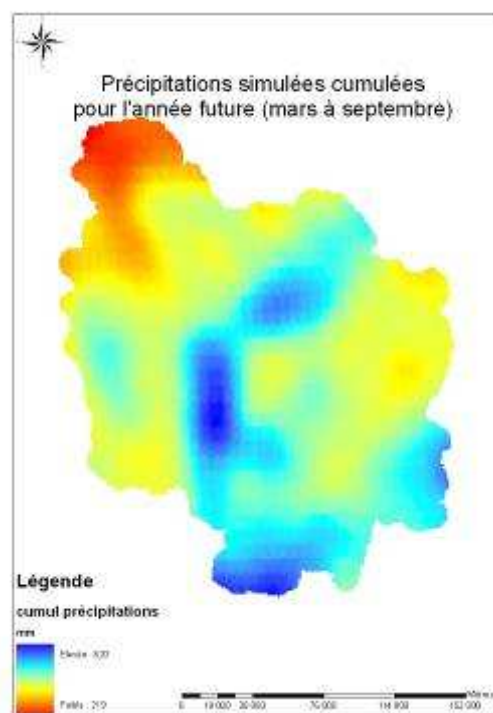
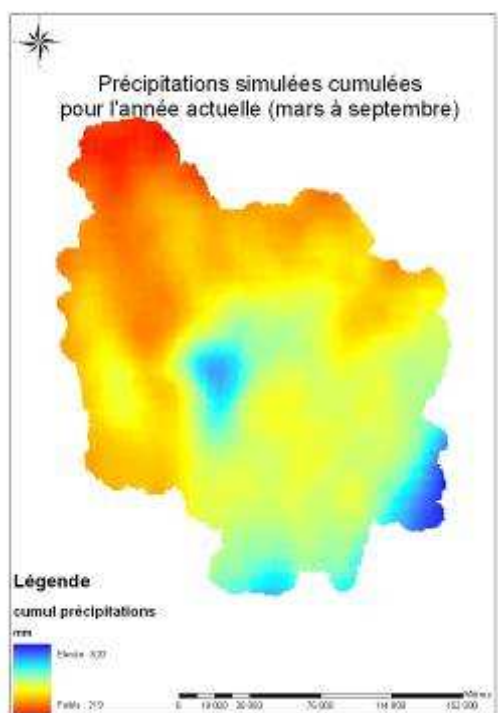
Les températures sont analysées sur la période printemps/été, comme indiqué plus haut. Les écarts ainsi observés entre les températures simulées en 1991, représentatives de la période actuelle et celles simulées en 2003, représentatives de la période future, sont de l'ordre de 1,8° à 2°C. Cet écart est inférieur à ce qui a été observé. Il varie selon l'altitude. On a ainsi des écarts compris entre 1,8° et 2°C pour les zones de plus haute altitude, et des écarts compris entre 1,6° et 1,8°C pour des zones de plaine. A l'avenir, les secteurs les plus concernés par le réchauffement climatique sont ceux dont l'altitude est élevée. Cette géographie où les stations d'altitudes ont été les plus marquées par des anomalies de température a été observée au nord-est de la France et à ses bordures luxembourgeoise et allemande durant la canicule 2003 (Droque et al., 2005).

Fig. 7 : Différence entre 2003 et 1991 de température moyenne pour la période avril/août (source : CRC – 2009)



Les écarts de pluviométrie simulée sur la période « mars à septembre » sont faibles conformément à ce qui a été observé.

Fig. 8 et 9 : précipitations simulées pour l'année actuelle (Fig. 8) et future (Fig. 9)



3.1.3 La modélisation des données climatiques : pour conclure

2003 est un bon candidat du climat futur au titre de ses températures de printemps et surtout d'été. Mais l'hiver 2003 est trop froid par rapport au climat futur. 1991 est très représentatif des années 1990. C'est une année déjà un peu fraîche et sèche au regard des années 2000. Les deux années sont comparables en termes de moyennes de précipitations. Elles ne se distinguent nettement qu'au vu des températures printanières et estivales.

Le travail réalisé ici peut être considéré comme un test de sensibilité du milieu à la variation de températures pendant la saison végétative.

Dans la présentation des résultats, nous distinguerons donc deux types de réponses aux effets des conditions climatiques :

- les réponses de la période printemps/été qui expriment le changement climatique probable : les années modélisées seront appelées « actuelle » et « future » dans la présentation des résultats,*
- et les réponses de la période automne/hiver qui résultent davantage de l'effet interannuel : les résultats feront directement référence aux années choisies, 1991 et 2003, pour bien spécifier qu'il s'agit de contextes climatiques particuliers aux années choisies.*

Le jeu de données climatiques est robuste spatialement. Mais comme toute modélisation, des biais apparaissent. Le principal biais généré ici concerne les pluies convectives estivales. Il est plus important en année chaude. Ce constat, particulièrement intéressant pour les modélisateurs, car il interroge sur le fonctionnement de la « machine » climatique, nous a obligés à introduire un coefficient correctif moyen calculé sur la base des deux années et appliqué uniformément sur la période d'avril à septembre.

Travailler sur les sorties du modèle et non sur les données brutes présente un double intérêt : obtenir des données climatiques cohérentes à une échelle fine compatible avec l'échelle des sols, et tester localement la pertinence du modèle grâce à la comparaison avec les données réelles.

3.2 Pédologie

Evaluer la vulnérabilité des sols à la sécheresse ou aux excès d'eau nécessite tout d'abord de connaître la capacité des sols à stocker de l'eau, c'est-à-dire la taille de leur réservoir, appelé aussi réserve utile. Ensuite, pour savoir comment évolue le remplissage ou l'assèchement de ces réserves utiles au cours de l'année, il faut passer par un bilan hydrique à l'échelle de chaque unité spatiale. Outre les données des sols, le bilan hydrique intègre et combine les critères climatiques, températures et précipitations, et les informations relatives au couvert végétal.

Définition : **La réserve utile (RU)**, exprimée en mm d'eau, correspond au volume d'eau que le sol est susceptible d'absorber et qui est utilisable par tous les végétaux.

3.2.1 Elaboration de la carte des réserves utiles en eau des sols bourguignons

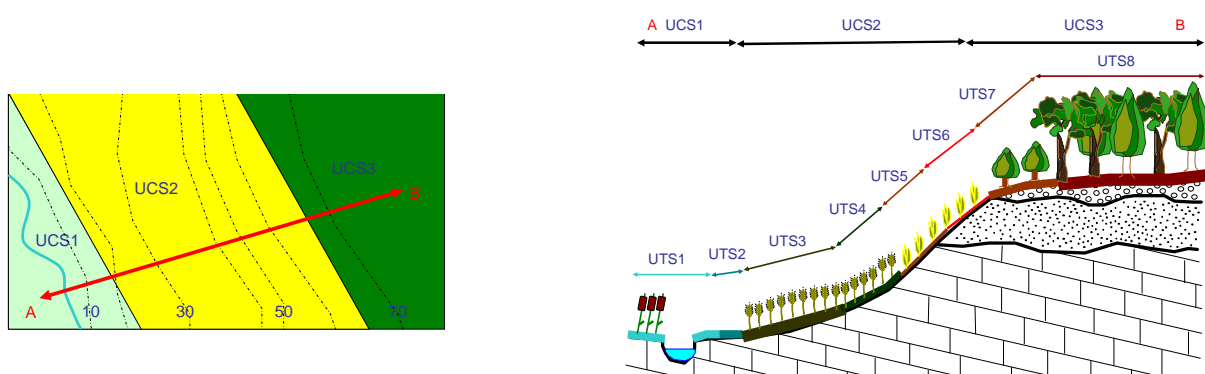
Contribution : Marjorie Ubertosi et Pierre Curmi, Agrosup Dijon,
et Arnaud Vautier, Chambre d'Agriculture de la Nièvre
Elaboration des données : Arnaud Vautier

a - Quelques définitions pédologiques

Un **pédopaysage** (ou UCS, Unité Cartographique Spatialisée) est une portion de la couverture pédologique représentable à l'échelle du 1/250 000^e. Les UCS regroupent plusieurs unités non spatialisées dont on connaît les proportions surfaciques, appelées **type de sol** (ou UTS, unités typologiques de sol). Ces unités sont des portions de la couverture pédologique qui présentent la même succession d'horizons (ou **strates**) en tout lieu de l'espace.

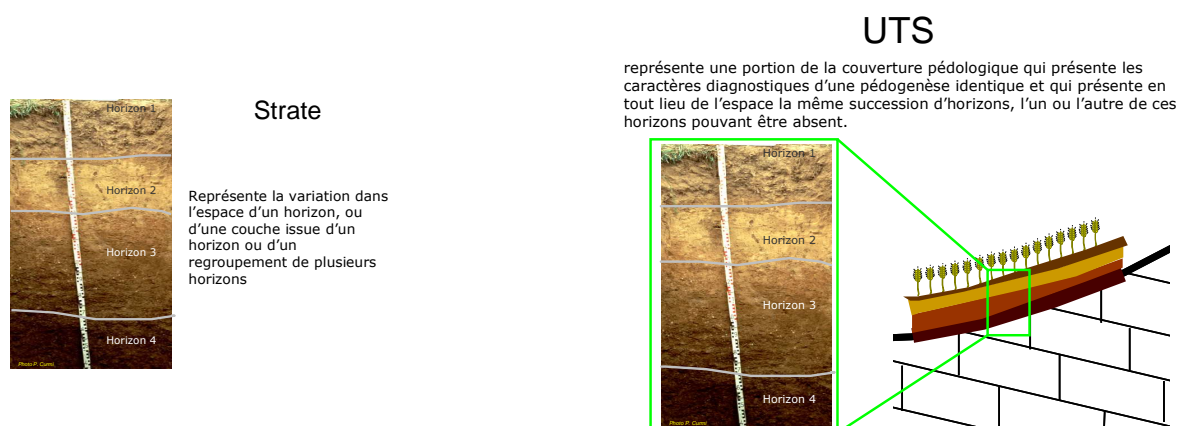
La description des UTS englobe le contexte géologique (nature et profondeur d'apparition des matériaux géologiques) et topographique (location topographique, orientation et déclivité des pentes), et les caractéristiques pédologiques globales (nombre de strates, profondeur du sol, texture dominante, pierrosité, degré d'hydromorphie). Les sols sont décrits jusqu'à la roche mère dans la base de données. Ainsi, un assez grand nombre de sol ont une épaisseur inférieure au mètre. Dans le cadre de l'étude, la profondeur maximale d'enracinement retenue est de 120 cm.

Fig. 10 : Exemple d'une analyse de pédopaysage
détail de séquence sur la ligne AB de la représentation spatiale



Chaque **strate** constitutive de l'UTS fait l'objet d'une description détaillée. Les paramètres pris en compte portent sur les aspects physiques du sol (description des taches, description des éléments grossiers, texture, compacité, etc.) et ses caractéristiques chimiques (pH, % matière organique, % carbonate de calcium, etc.).

Fig. 11 : Schéma explicatif de strate et d'unité typologique de sol



Les informations sont disponibles dans la base de données du programme national Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS ; IGCS – Sols et Territoires de Bourgogne). 450 unités pédopaysagères sont ainsi référencées en Bourgogne. Une unité pédopaysagère contient entre 1 et 10 types de sol. Un nombre de 3 à 5 est très fréquent. Une unité de sol est constituée de 1 à 5 strates, le plus fréquemment entre 2 et 4.

b - Calculs des RU

La réserve utile est estimée à partir de l'épaisseur, la texture, la teneur en éléments grossiers et en matière organique d'un sol. Ces paramètres pédologiques sont extraits de la base de données IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols). La combinaison de ces différents paramètres permet dès lors d'estimer la réserve utile maximale par strate en fonction du taux de terre fine, de l'épaisseur de la strate et du potentiel hydrique. On peut donc ensuite calculer la réserve utile par unité de sol (UTS), puis par unité cartographique (UCS) ou pédopaysage. La méthodologie suivie est celle élaborée par Larroche (1997) et Grimberty (1999) dans leurs travaux de cartographie de la réserve en eau des sols.

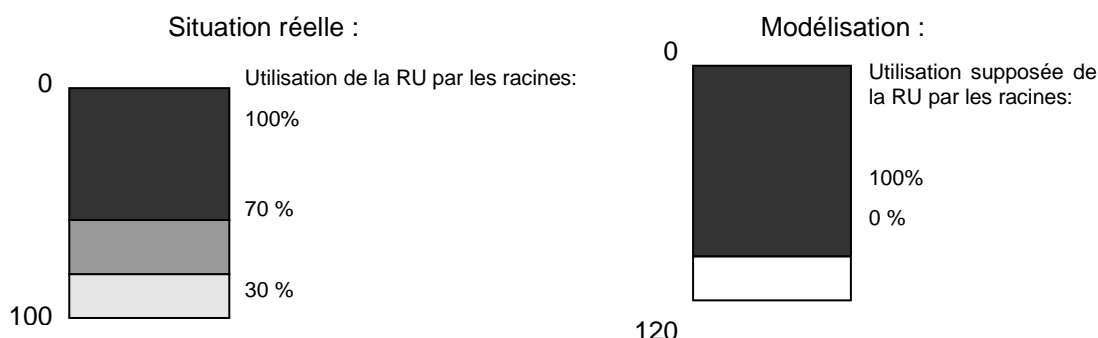
$$\text{RU UCS} = \sum (\text{RU UTS} * \% \text{ surfacique UTS})$$

$$\text{et RU UTS} = \sum \text{RU (strates)}$$

Les approximations adoptées sont les suivantes :

- **La profondeur maximale de sol prise en compte est 1,20 m.** Dans le cas des sols profonds occupés par une végétation à enracinement profond, des racines sont présentes au delà de cette profondeur. Cependant, la densité racinaire au-delà du mètre de profondeur n'est pas très élevée, elle ne permet le plus souvent qu'une utilisation partielle des réserves en eau des horizons profonds. Or, le modèle retenu ne reproduit pas cette réalité. La RU peut être intégralement consommée quelle que soit la profondeur considérée. On suppose qu'une compensation s'opère entre l'eau disponible à plus de 120 cm, non comptabilisée dans le calcul de la RU, et la surestimation des consommations d'eau entre 1 et 1,2 m de profondeur.

Fig. 12 : schéma d'utilisation de la RU par les racines

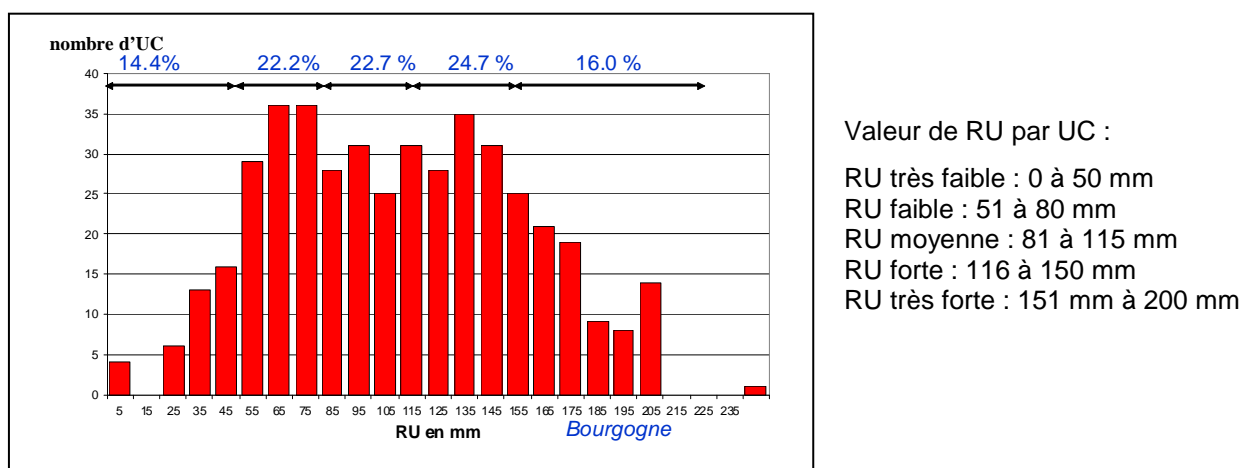


- **Les remontées capillaires ont été prises en compte** au sein des types de sol où elles sont susceptibles d'apporter une contribution significative. Lorsqu'un matériau non colonisé par les racines et du type des alluvions sableuses, des grèzes calcaires ou encore de la craie est présent à moins de 120 cm de profondeur, nous avons inclus 10-15 cm de ce matériau et 20-25 cm pour la craie où les remontées sont très importantes.

c - Détermination des classes de RU

Chaque Unité Cartographique est ainsi affectée d'une valeur de RU. Pour obtenir une visualisation cartographique simple, cinq classes de réserves utiles ont été déterminées de façon à ce que chacune soit caractéristique d'1/5^e des UC (effectif identique par classe).

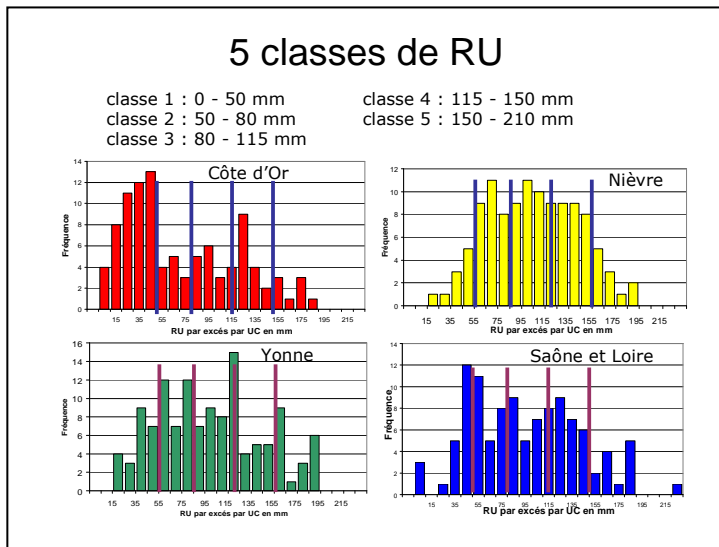
Gr. 6 : Unités Cartographiques de Bourgogne classées en fonction de leur RU :
détermination des fréquences



Pour mémoire, un sol avec une RU supérieure à 115 mm offre un très bon potentiel pour les cultures. Quant aux sols avec des RU inférieures à 50 mm, ils correspondront davantage à des zones d'agriculture extensive, souvent d'élevage extensif car la fourniture en eau de ces sols limite l'expression de potentiels de cultures.

Des différences apparaissent par département, comme le montre l'analyse ci-jointe.

Gr. 7 : Classes de RU par département



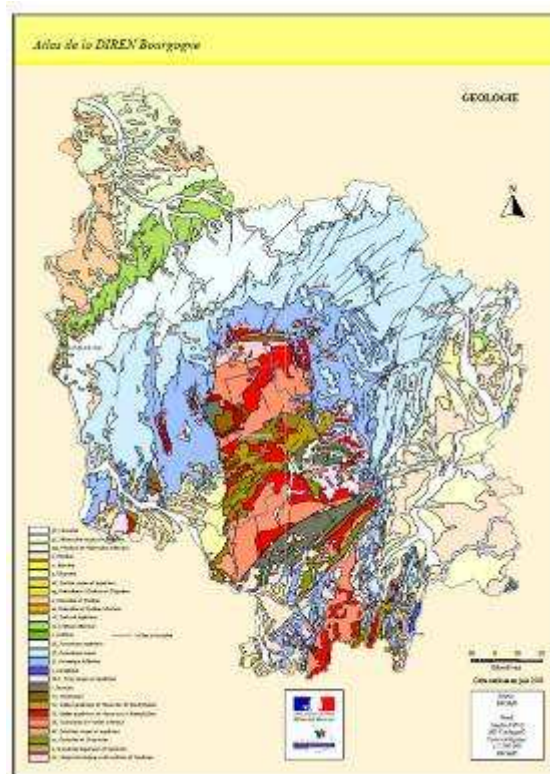
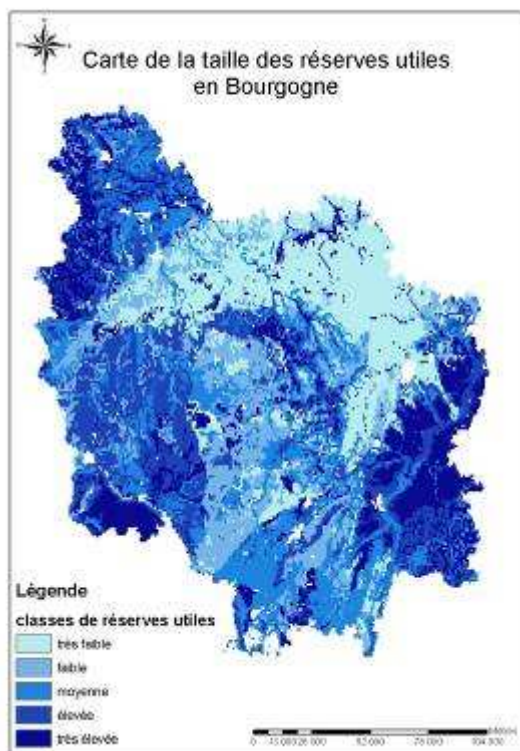
La Côte-d'Or est très largement concernée par des sols à faible RU.

A l'inverse, l'essentiel des sols de la Nièvre a une RU moyenne à très correcte.

Les sols des deux autres départements sont plus inégalement répartis.

d - Les cartes des RU des sols bourguignons

Fig. 13 et 14 : Carte des RU de Bourgogne (Fig. 13) comparée à la carte géologique (Fig. 14)



La carte de la taille des réserves utiles (RU) présente des valeurs contrastées, imputables en grande partie à la profondeur des sols. La corrélation avec la géologie est évidente : les petites RU sont essentiellement localisées sur les plateaux calcaires de l'Yonne et de la Côte-d'Or, les RU petites à moyennes sont situées dans le massif cristallin du Morvan et à l'ouest de la Saône-et-Loire, les RU plus grandes apparaissent au niveau des formations sédimentaires argileuses et marneuses et des dépôts limoneux (départements de l'Yonne, de la Nièvre et secteur de la Bresse). **La taille des RU renseigne sur la sensibilité intrinsèque des sols à la sécheresse.** Les zones de faible RU sont les zones qui seront sensibles aux phénomènes de sécheresse.

Adaptation au changement climatique : évaluation de la réserve en eau des sols

Fig. 15 : Carte des RU de Bourgogne : écarts-types

Ces moyennes par pédopaysage ne laissent pas apparaître les nuances locales. Une UTS de réserve utile faible et de surface faible sera « gommée » par la moyenne pondérée.

La carte des écarts-types permet de visualiser les territoires qui ont de très fortes hétérogénéités de RU.

En fait, peu de secteurs offrent une classe de RU dominante : les sols à RU < 50 mm sont concentrés sur le nord-est de la Côte-d'Or, et les sols à RU > 150 mm sont en marge de la région et en quantité surfacique faible. L'hétérogénéité des sols pour leur RU est une caractéristique dominante. Elle est figurée ci-dessous dans la rubrique « autre ». Cette catégorie est de loin la plus importante en termes de surface.

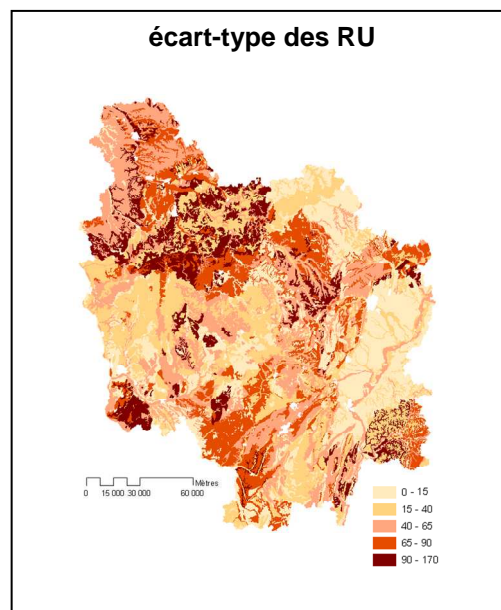
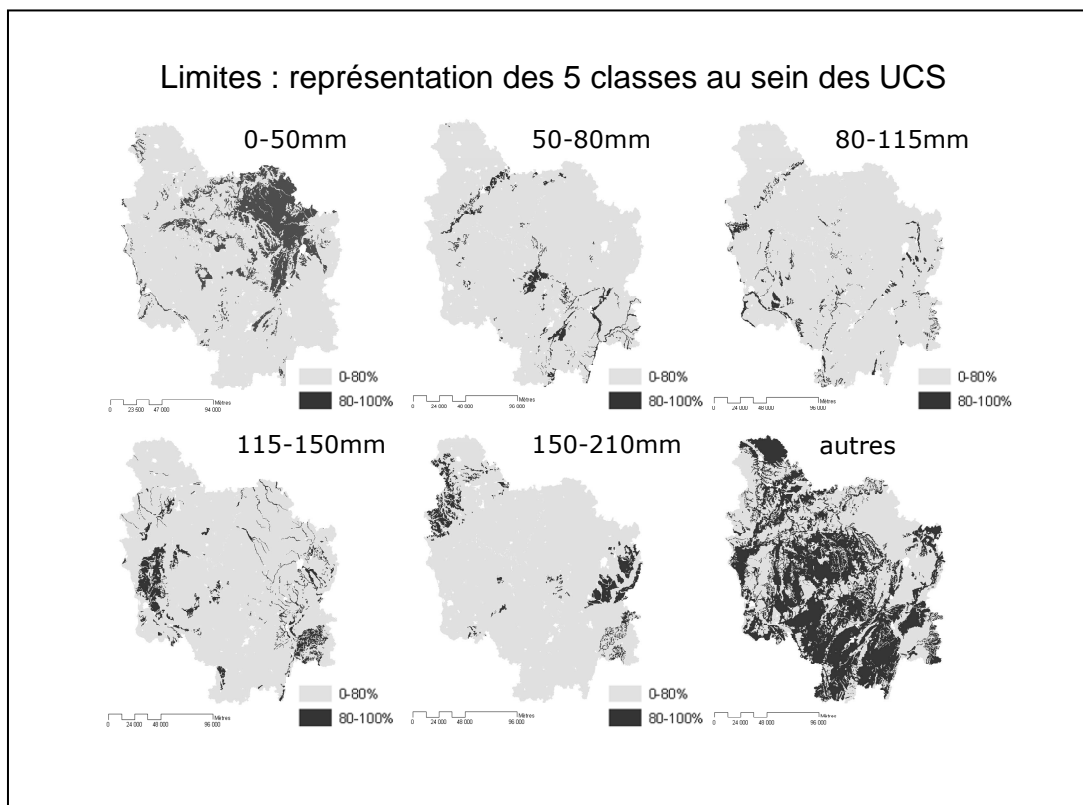


Fig 16 : Carte des RU de Bourgogne : importance des classes par secteur géographique



Une fois la taille du réservoir « sol » connue, le travail suivant consiste à estimer quand et comment se remplissent et se vidant ces réservoirs par année-type. Il est nécessaire de passer par un modèle de bilan hydrique pour tenir compte de l'effet combiné sol, couvert végétal, conditions climatiques (températures et pluies).

3.2.2 Construction du modèle de bilan hydrique

*Contribution : Philippe Amiotte-Suchet, Université de Bourgogne,
et Chloë Lamy, Alterre Bourgogne*

Elaboration du bilan hydrique : Philippe Amiotte-Suchet et Chloë Lamy

Le bilan hydrique permet d'évaluer la réaction du sol et de sa couverture végétale face aux pluies. A cette échelle régionale, il n'existe pas vraiment de modèle de bilan hydrique. Le choix a été fait ici de faire un bilan simplifié. Aussi, la méthodologie mise en place est plus grossière que celle utilisée à l'échelle de bassin versant et ne nécessite pas de données de précipitation à un pas de temps très fin. Une donnée mensuelle suffira, alors qu'elle existe à la demi-journée.

Pour calculer le bilan hydrique, une donnée est essentielle : l'évapotranspiration. C'est la partie de l'eau qui est transpirée par les végétaux et évaporée dans l'air sous l'effet des températures et du rayonnement, entre autres. Le calcul du bilan hydrique intègre donc les paramètres importants du climat.

Les résultats du modèle ont ensuite été confrontés aux observations de terrain sur quelques bassins versants (voir paragraphe 2.3.1).

a - Conception d'un modèle à l'échelle régionale

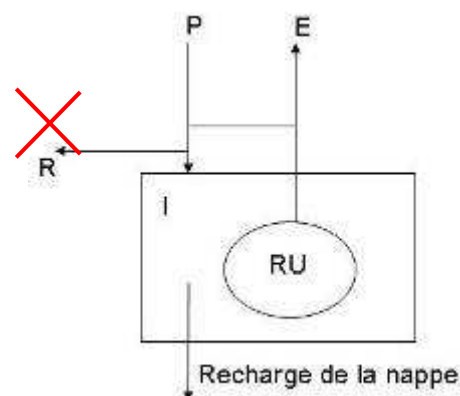
Le modèle de bilan hydrique qui a été conçu comprend les paramètres Précipitations (P), Evapotranspiration (E), Infiltration (I), la variation du stock d'eau de la réserve utile et les excédents d'eau (voir formule en annexe 1).

L'évapotranspiration, bien que fournie par le modèle climatique, a été recalculée par les hydrologues pour être à une échelle spatiale plus fine. C'est une donnée intéressante car elle intègre la température et le rayonnement global. Or ces deux paramètres sont des critères qui vont évoluer avec le changement climatique.

La notion de ruissellement n'a pas été retenue dans ce modèle. En effet, l'échelle spatiale de 1 km x 1 km ne permet pas une vision assez précise des pentes. De plus, la modélisation de ruissellement nécessite de connaître l'intensité des pluies, notamment les pluies d'orage. Même le pas de temps de 6 heures, disponible par le modèle climatique, n'informe pas de façon suffisamment fiable ce critère.

NB : La réserve utile (RU), donnée fournie par les pédologues, représente la réserve utile maximale pour la modélisation hydrique. Pour pouvoir comparer les seuls effets des deux années climatiques étudiées et donc s'affranchir de l'effet des années antérieures, nous avons considéré que les réserves des sols étaient pleines en fin d'hiver (classiquement fin février).

Fig. 17 : Modèle de bilan hydrique retenu



b - Cas particulier de la construction de l'ETR

Le modèle de climatologie fournit une donnée d'évapotranspiration à partir de la formule de Penman-Monteith, proche de l'évapotranspiration réelle (ETR), à la maille de 8 km. Afin d'avoir l'information à la maille du km, nous avons pris le parti de recalculer l'ETR à partir de la formule de Turc. La donnée d'évapotranspiration intègre le couvert végétal qui est disponible à l'échelle bourguignonne grâce au CORINE Land Cover. Un coefficient a été affecté à chaque type de couvert (voir annexe 1).

La comparaison, mois par mois, de l'ETR calculé par les hydrogéologues avec celui fourni par les climatologues, sur l'ensemble de la Bourgogne, montre que les valeurs obtenues par le modèle de bilan hydrique sont souvent supérieures à celles du modèle climatique. Globalement, l'ETR calculé par le modèle hydrologique est supérieur à celui fourni par le modèle climatique. Seuls les mois d'été ont une surestimation de l'ETR du modèle climatique.

3.2.3 Données pédologiques : pour conclure

La base régionale des sols fournit les informations et données nécessaires pour évaluer la sensibilité du milieu aux événements climatiques : les données renseignées permettent de calculer les réserves utiles pour chaque unité de sol et l'échelle est cohérente avec celle du modèle climatique utilisé. Une fois affecté d'une valeur, le sol n'apparaît plus comme une « boîte noire » mais comme un élément dynamique du milieu : la RU se remplit ou se vide selon les aléas climatiques et l'occupation du sol.

Le bilan hydrique élaboré ici est un bilan simplifié du fonctionnement hydrique des sols. Il n'intègre pas le devenir de l'eau en excès. On estime ainsi que les ressources du milieu naturel, tant les nappes d'eau que les cours d'eau, se rechargent dès que les réserves utiles sont pleines. Cette approche simplifiée a pour mérite de cibler les territoires bourguignons susceptibles de contribuer à l'alimentation des ressources.

L'estimation des réserves utiles des sols réalisée à partir de la base des sols est pérenne : la banque de données ainsi constituée, et la cartographie qui en résulte, sont utilisables pour d'autres thématiques. Elle contribue à mieux connaître la sensibilité des sols de Bourgogne à la sécheresse. C'est aussi un indicateur du potentiel des sols.

Tout travail ultérieur à une échelle locale devra cependant être complété par un bilan hydrique plus fin.

3.3 Hydrologie

L'aspect hydrologie est traité dans cette étude par un bilan hydrologique sur quelques bassins versants. On compare les données de débits observés sur quelques stations avec les données de pluies efficaces simulées par le modèle de bilan hydrique. Le principe de cette comparaison est de valider le modèle de bilan hydrique. Le modèle sera jugé proche de la réalité quand les valeurs observées et modélisées sont voisines.

Une approche plus complète est prévue à l'avenir, tant pour valider et corriger le modèle que pour obtenir un bilan plus complet sur l'ensemble de la Bourgogne. Il sera alors possible de faire des hypothèses sur le devenir des stocks d'eau dans les sols, notamment en matière de recharge des nappes et alimentation des cours d'eau.

3.3.1 Validation du bilan hydrique sur quelques bassins versants

Contribution : Philippe Amiotte-Suchet, Université de Bourgogne,
Chloë Lamy, Alterre Bourgogne
Elaboration des bilans : Philippe Amiotte-Suchet et Chloë Lamy

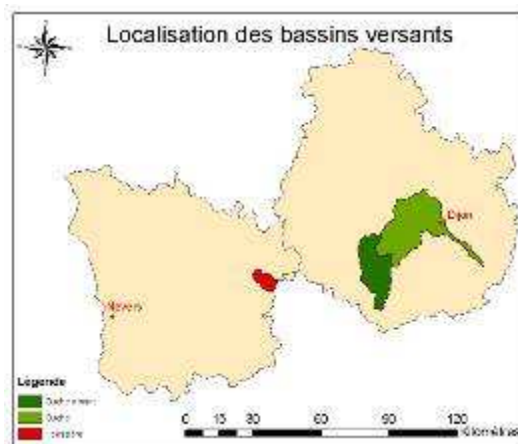
a - Principe de la validation

Avec cette analyse, on compare les débits mesurés à l'exutoire de bassins versants (source : banque hydro) avec la différence $P - ETR$ estimée par la modélisation. Cette différence correspond aux excédents d'eau calculés par notre modèle, appelés également pluies efficaces. La comparaison des valeurs de pluies efficaces et des débits n'est a priori valable que pour un cumul annuel. Pour établir cette comparaison, on suppose qu'il n'y a pas de variation de stock d'eau au sein des nappes d'une année sur l'autre et qu'il n'y a ni pertes ni gains d'eau au niveau du sol. On considère aussi que les réserves utiles sont pleines début mars. La comparaison est faite de mars de l'année N à février de $N+1$.

b - Caractéristiques des bassins retenus

Les bilans hydrologiques sont réalisés sur trois bassins versants : l'Houssière à Chaumard, l'Ouche à La Bussière sur Ouche et l'Ouche à Crimolois.

Fig. 18 : Carte des bassins versants



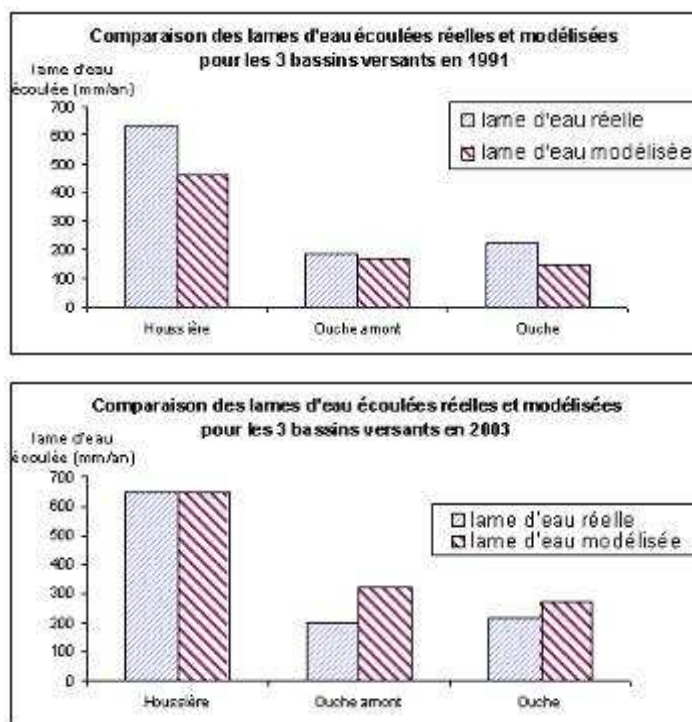
Le bassin versant de l'Houssière à Chaumard est un système supposé clos du fait de sa situation sur le socle granitique du Morvan. Sa superficie est de 55 km².

A l'inverse, les deux bassins versants de l'Ouche sont situés en système karstique ; le bassin versant à Crimolois est soumis à plus d'échanges de volume d'eau avec les bassins versants voisins que le bassin versant à La Bussière sur Ouche. Les limites du bassin versant de l'Ouche sont complexes du fait de la localisation sur un système karstique. L'amont du bassin versant de l'Ouche (à Bussière sur Ouche) présente une superficie de 304 km², plus à l'aval la surface du bassin versant de l'Ouche à Crimolois est de 860 km².

c - Bilans hydrologiques : premiers résultats

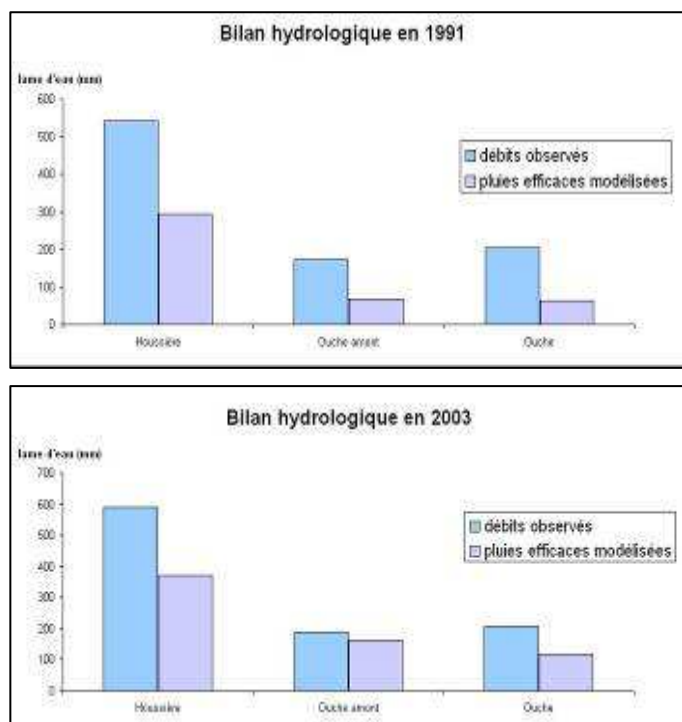
Les bilans hydrologiques ont été réalisés avec et sans le correctif climatique.

Gr. 9 : Comparaison hydrologique à l'échelle de trois bassins versants sur les années modélisées sans le correctif climatique



En 1991, le modèle sous-estime légèrement les écoulements à la Houssière et pour l'Ouche aval. L'intensité de la sous-estimation semble être au prorata de la lame d'eau écoulée. Même si des progrès sont à faire, les résultats obtenus sont honorables. En 2003, les surestimations portent au contraire sur les valeurs modélisées. Seules les valeurs modélisées pour le bassin versant de l'Houssière à Chaumard présentent des valeurs identiques à la réalité. Comme les lames d'eau écoulées sur ce bassin versant étaient les plus sous-estimées en 1991, il est possible que la surestimation du modèle en 2003 soit compensée, pour ce bassin versant, par une sous-estimation générale.

Gr. 10 : Comparaison hydrologique à l'échelle de trois bassins versants sur les années modélisées après correction sur les pluies convectives



Après correction des pluies estivales modélisées, la comparaison montre une sous-estimation générale des pluies efficaces. Les écarts sont plus réguliers que précédemment et sont pratiquement proportionnels à la lame d'eau. Ils peuvent être considérés comme acceptables pour 2003 (30 %), mais trop forts pour 1991 (60 %).

Ces différences appellent un travail complémentaire sur les variables explicatives (formule de l'ETR, modélisation de P, stocks d'eau réels des bassins...).

3.3.2 Bilans hydrologiques : pour conclure

Le test sur le bassin de la Houssière est pertinent car ce bassin fonctionne en système clos. Ce n'est pas le cas pour l'Ouche qui subit de nombreuses interactions d'origine anthropique (importante alimentation en aval de l'Ouche par les eaux épurées en provenance de la station de Dijon, transfert des eaux entre l'Ouche amont et le canal...).

Ces bilans hydrologiques sont simplifiés et ont pour objectif de valider la construction du modèle. A ce stade de l'étude, il paraît difficile d'apprécier si les écarts constatés entre l'observé et le modélisé sont dans une fourchette acceptable ou non. Ils ont plusieurs origines possibles :

- Avec le coefficient correctif sur les précipitations estivales, les résultats sont plus homogènes qu'en l'absence de correctif. Mais ils sont systématiquement plus faibles que les débits observés, et ce correctif moyen semble trop fort pour 1991. Des travaux de recherche plus conséquents pourront affiner ce point ultérieurement.
- Les réserves en eau des sols sont supposées pleines en début d'évaluation (mars), ce qui n'a probablement pas été le cas dans la réalité.

Un travail complémentaire sera réalisé dans le prolongement de cette étude. Il visera à tester le modèle de bilan hydrique sur d'autres bassins versants. Dans un premier temps, les calculs s'affranchiront de la modélisation climatique (utilisation des données réelles des deux années) pour mieux estimer la solidité du modèle de bilan hydrique. Ensuite, les calculs seront réalisés avec les données climatiques modélisées.

3.4 Traitement des données et règles de décision

Globalement, la maille du modèle climatique est compatible avec celle des unités de sol. La construction de jeux de données a cependant nécessité un travail intermédiaire d'homogénéisation des échelles, mais aussi des choix méthodologiques tout au long de l'élaboration du modèle.

Deux échelles de temps et d'espace se sont confrontées : une maille de 8 km est considérée par les climatologues comme une échelle très fine, alors que les hydrologues travaillent à des échelles de l'ordre de 100 m ; les climatologues analysent leurs données sur des tranches de 6 heures, pas de temps qu'ils estiment peu fin, tandis que les hydrologues se satisfont de la décade.

L'ensemble des données fournies ou élaborées sont géo-référencées. Le traitement géomatique a été une phase importante du travail.

3.4.1 Le pas de temps choisi : données climatiques mensuelles

Les données élaborées par le modèle climatique sont à un pas de temps de 6 heures, mais les sorties effectives du modèle climatique ont été faites sur un pas de temps journalier. Le modèle hydrique étant à une très large échelle, il n'était pas nécessaire d'apporter une information plus fine que décadaire. In fine, il a été décidé de travailler sur des données agrégées en mensuel.

3.4.2 Traitement géomatique des données : la compatibilité des échelles

Les données climatiques et pédologiques sont fournies à des échelles compatibles, mais pas sur des références géographiques identiques. Des transformations ont donc été effectuées sur ces jeux de données afin d'avoir des informations sur un maillage kilométrique.

Les données climatiques fournies par les climatologues sont ponctuelles (maille de 8 km). Un krigeage sous ArcGis a été nécessaire pour pouvoir travailler avec ces données à la précision du kilomètre et au format raster.

Les données pédologiques sont des valeurs attribuées aux unités cartographiques de sol, soit au format vecteur sous SIG. Une conversion vecteur-raster à l'échelle d'un kilomètre a dû être effectuée sur les jeux de données pédologiques.

Une fois les couches de paramètres climatiques et pédologiques générées, le bilan hydrique a pu être réalisé (voir détail en annexe 1).

Chaque pixel cartographique, d'une maille d'1 km sur 1 km est ainsi informé par des données climatiques mensuelles relatives aux deux années modélisées, et par une donnée pédologique, la capacité de réserve utile.

3.4.3 Autres règles de décision lors de l'élaboration du modèle

a - Le ruissellement

Le ruissellement est une composante importante d'un bilan hydrique. Pour bien l'estimer, il est nécessaire de prendre en compte l'intensité des pluies, le couvert végétal, la constitution du sol. Cela demande aussi de se situer à des échelles d'espace et de temps (spatio-temporelles) beaucoup plus fines, un bas de pente par exemple et des pluies d'orage de quelques heures. Le critère intensité des pluies n'est pas fourni par la modélisation climatique.

L'intégration de ce critère a été abandonnée assez tard dans l'étude. Elle a fait l'objet d'un travail d'exploration. La comparaison de différents modèles existants a été étudiée lors du comité de pilotage de mai. Plusieurs constats ont conduit à n'en retenir aucun dans le cadre de cette étude :

- Le critère intensité des pluies n'est pas mesuré (pour le modèle Hortonien).
- Les crues ne sont pas prises en compte (pour TOPMODEL).
- La finesse d'échelle nécessaire n'est pas celle utilisée ici dans cette étude régionale (TOPMODEL et Hortonien).
- Un travail ultérieur basé sur le modèle Hortonien pourrait être réalisé sur quelques bassins versants types (hydromorphie avec pente, zone artificialisée urbaine, zone de karst...). Il nécessite un temps important d'étude.

b - Le calcul de l'ETR

Le choix des modalités de calcul de l'ETR a été un point discuté en comité technique : ETR fournie par le modèle climatique ou ETR recalculée par les hydrologues ? Se reporter au paragraphe 3.2.2 b.

c - La modélisation du bilan hydrique

Les bilans hydriques étant simplifiés, il a été suggéré de considérer le sol comme ayant deux réservoirs, l'un (40 % de la RU) favorisant l'ETR, l'autre ayant une réponse plus lente à l'ETR. Cela permet d'éviter de considérer qu'une RU est nulle, ce qui est très rare même en cas de fort déficit hydrique. Cette proposition n'a finalement pas été retenue. Le travail de simplification vise à favoriser l'approche spatiale et à forcer un peu les contrastes, même dans les situations d'épuisement théorique des sols en cas de forts déficits. Cette étude, conduite sur un temps très court, a pour but de pointer les vulnérabilités locales, d'excès ou de déficit. Au vu des résultats et de l'intérêt qu'ils suscitent, un approfondissement méthodologique pourra être opéré.

Par ailleurs, les excédents d'eau sont considérés dans un premier temps comme alimentant la recharge des nappes.

4. Analyse cartographique des résultats

Une fois les bilans hydriques calculés, l'évolution du remplissage de la Réserve Utile des sols est cartographiée, mois par mois. Les résultats permettent de visualiser la variation spatiale du remplissage des réserves en eau entre la situation actuelle et celle de demain.

Ce critère renseigne sur l'assèchement des sols, souvent synonyme de vulnérabilité des territoires, ou au contraire la saturation des réserves, qui, elle, contribue potentiellement à la recharge des nappes et à l'alimentation des cours d'eau. Ces analyses cartographiques aident à mieux comprendre l'évolution de ces événements dans le contexte de changement climatique. Elles éclairent les questions suivantes : Les territoires seront-ils affectés de façon identique ou y aura-t-il un déplacement géographique des phénomènes ? Observera-t-on un allongement de la saison chaude, un décalage des pluies dans l'année ?

4.1 Le critère taux de remplissage de la RU

Pour visualiser la sensibilité des sols à la sécheresse (ou aux excès d'eau), le critère « taux de remplissage » est utilisé. Il est défini comme étant égal au rapport « quantité d'eau dans la RU / taille de la RU » en %. Quelques mois clés ont été choisis pour comprendre à quel moment la situation hydrique évolue fortement, dans le contexte climatique actuel et futur. Les taux de remplissage sont exprimés en mois révolus : ainsi le taux d'avril est celui de la fin avril (qui est égal à celui de début mai).

Cette unité relative permet de s'affranchir de la taille de la RU très variable sur le territoire bourguignon. Elle permet donc de visualiser la sensibilité à la sécheresse en saison végétative d'une part, et le potentiel de recharge des ressources du milieu d'autre part :

- Un taux de remplissage de RU voisin de 0 % indique que les réserves en eau des sols sont épuisées. La fraction de l'eau restant dans le sol est difficilement extractible par les plantes. Ces dernières sont alors en stress hydrique. Leur croissance dépend entièrement des précipitations. Rappelons que nous avons choisi une approche simplifiée du calcul de la RU, avec un seul compartiment de RU et non deux comme cela peut se pratiquer. Cette simplification volontaire a pour objectif de forcer les contrastes (cf. chapitre 2.4.3). Les analyses qui suivent s'entendent dans cet esprit : **une RU qui apparaît totalement vide ne l'est que très rarement dans la réalité, mais sa recharge est critique**. Rappelons aussi que le pas de temps mensuel gomme les effets bénéfiques d'une pluie d'orage sur la végétation.
- Une RU pleine à 100 % signifie que les excès d'eau vont, soit s'écouler en surface, soit s'infiltrer pour alimenter les nappes. En s'intéressant à la saturation des RU, on peut avoir des éléments de compréhension sur le potentiel des sols à recharger les nappes ou à alimenter les cours d'eau.

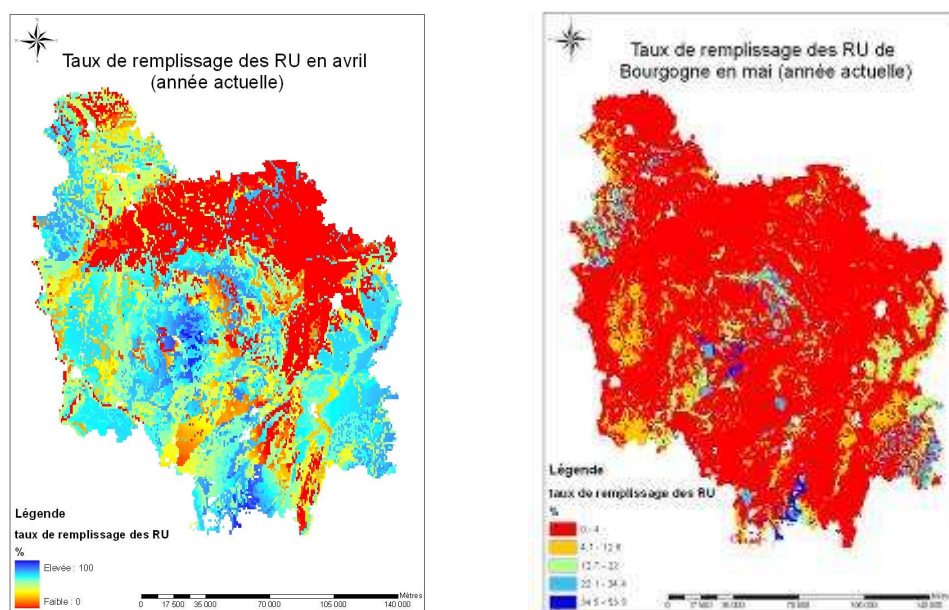
4.2 Sensibilité des sols à la sécheresse : analyse printemps/été

4.2.1 Caractérisation du printemps actuel

En avril, dans le contexte climatique actuel, les RU sont remplies à 60 % environ sur l'essentiel de la Bourgogne, à l'exception des plateaux calcaires qui présentent déjà des réserves en eau critiques. Localement, des secteurs de l'Yonne et de la Saône-et-Loire ont des RU remplies à 30 %.

Fin mai, l'assèchement est très marqué : sur la majeure partie de la région, les réserves en eau du sol sont critiques (entre 0 et 4 %). Des secteurs qui ont des RU remplies à 20-30 % parsèment le territoire. Quelques sols présentent une RU encore remplie (au maximum à 50 %). Ces localisations éparses sont la conséquence de pluies ponctuelles.

Fig. 19 : Cartes des taux de remplissage des sols en année actuelle

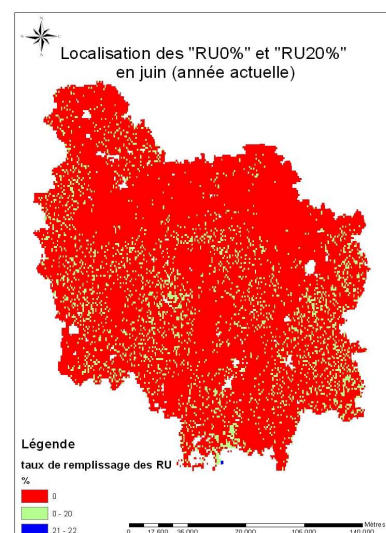


Dans le contexte climatique d'aujourd'hui, l'assèchement des sols est atteint courant mai. En effet, dès le mois d'avril, la végétation est en pleine croissance et les besoins en eau sont élevés. Le bilan P – ETR est déficitaire sur cette période. Les réserves en eau du sol sont donc fortement sollicitées.

Fig. 20 : Carte des RU asséchées en juin de l'année actuelle

Ce maillage diffus et lâche des réserves encore partiellement remplies permet de situer le mois de mai comme mois charnière de l'assèchement des réserves utiles : fin mai, celles-ci sont pratiquement vidées.

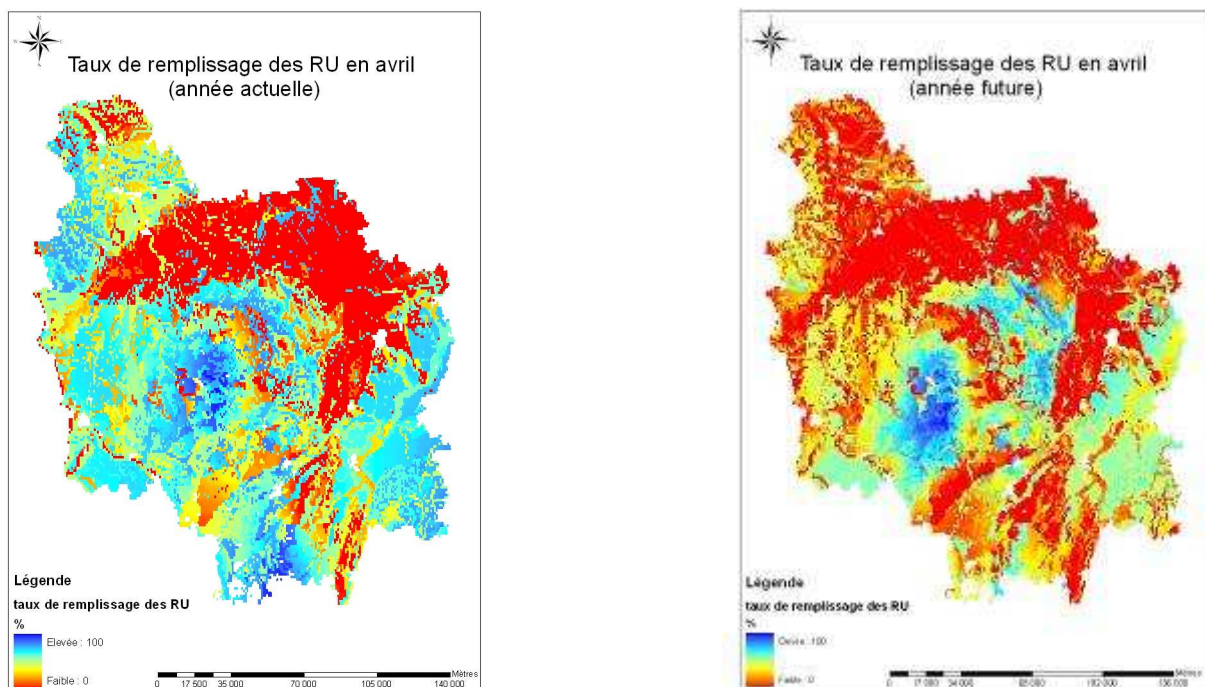
L'assèchement se confirme d'ailleurs en juin (voir ci-contre).



4.2.2 Comparaison des deux années climatiques

Influence du changement climatique sur la saison végétative

Fig. 21 : Comparaison des taux de remplissage des sols d'avril en année actuelle ou future



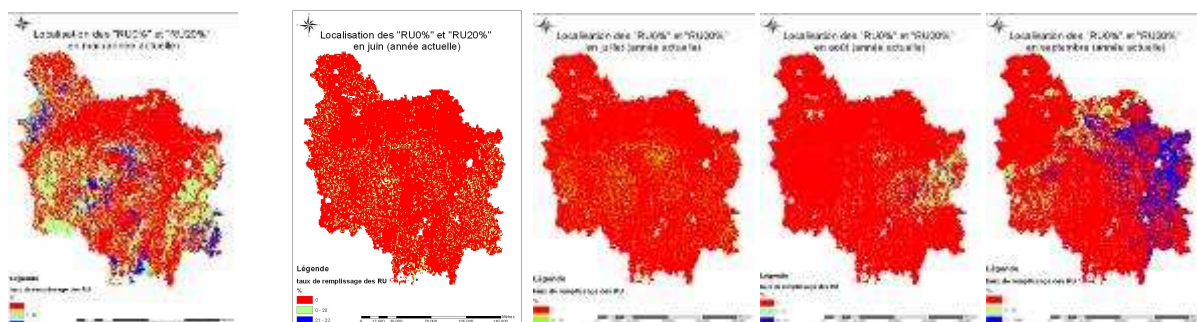
Dans le climat futur, les réserves utiles d'avril sont moins remplies qu'en année actuelle : les valeurs basses, comprises entre 0 et 30 %, concernent seulement les sols à faible RU des plateaux calcaires dans le climat actuel, alors qu'elles touchent l'essentiel du territoire avec les simulations du climat futur. Seules deux zones géographiques font exception, l'est de la région (RU voisin de 50 %) et le Morvan (RU supérieure à 70 %).

Une des incidences du changement climatique est donc une forte dépendance de la seconde partie du cycle végétatif aux précipitations. Cet effet sera partiellement compensé par une avance prévisible des cycles végétatifs de 1 à 2 semaines par rapport au climat actuel.

4.2.3 Sensibilité géographique à la sécheresse

L'année actuelle :

Fig. 22 : Suivi des secteurs à RU=0 % et RU=20 % de mai à septembre, période « actuelle »



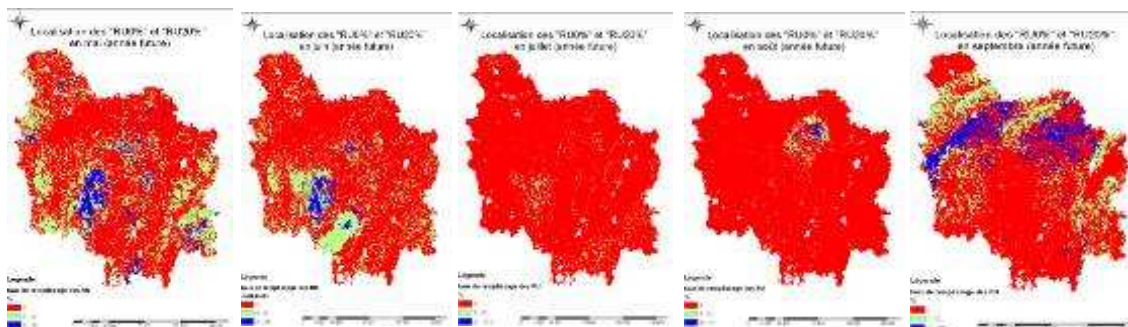
De façon générale, les RU se vident en mai-juin : l'évapotranspiration est nettement supérieure aux précipitations car les besoins en eau de la végétation sont importants et les précipitations sont faibles. L'information est donnée avec les cartes mois par mois sur les RU faiblement remplies (inférieures à 20 %).

Durant les mois de juillet et août, le bilan P – ETR est déficitaire. La recharge des réserves en eau du sol n'a pas commencé. Seuls quelques secteurs avec des taux de remplissage entre 20 et 50 % apparaissent çà et là, à l'occasion d'orages.

En septembre le phénomène de recharge automnale est enclenché. Pour l'année actuelle, elle débute sur l'est de la région.

L'année future :

Fig. 23 : Suivi des secteurs à RU=0 % et RU=20 % de mai à septembre, période « future »



Les observations de la simulation d'une année future sont relativement proches de la simulation d'une année actuelle. En mai et juin, pour l'essentiel des sols bourguignons, les réserves en eau sont épuisées : le taux de remplissage est compris entre 0 et 4 %. Sur quelques secteurs, le taux de remplissage des RU oscille entre 10 et 50 %. Durant les mois de juillet et août, l'influence des pluies d'orage est à nouveau perceptible. Elle se traduit sur les cartes par de rares tâches ponctuelles de couleur plus claire. En septembre, le phénomène de recharge automnale démarre. La localisation du début de recharge automnale en eau des sols pour l'année 2003 (année « future ») diffère de l'année 1991 (année « actuelle »). **Cette différence est liée aux variations inter-annuelles et non au changement climatique.**

4.3 Recharge potentielle en eau des milieux : analyse automne/hiver

4.3.1 Saturation des RU et recharge des milieux : rappel

La relation n'est pas directe entre le remplissage des RU et la recharge des nappes. A l'automne, l'évapotranspiration faiblit du fait de la baisse des températures et d'un fonctionnement moindre de la végétation. Les pluies alimentent alors essentiellement les réserves des sols. Lorsque ces réserves sont saturées, c'est-à-dire lorsque le taux de remplissage est à 100 %, les précipitations excédentaires vont soit ruisseler pour alimenter les cours d'eau, soit s'infiltrer et alimenter la recharge des nappes. La recharge des nappes est donc fonction de l'importance de ces pluies excédentaires et de la perméabilité des sols. Lorsque le remplissage des RU se fait précocement en automne, les pluies des mois hivernaux contribueront davantage à l'alimentation de la ressource en eau des milieux.

La saturation des RU est un préalable à la recharge des ressources en eau du milieu. Les sols peu profonds seaturent en premier. Lorsque les sols profonds commencent eux aussi à se saturer, on peut supposer que le potentiel de recharge des nappes est en place. Il a lieu avec un décalage dans le temps qui est fonction de la profondeur des nappes.

La recharge en eau des milieux a plus de chance d'être à son optimum avec un remplissage des RU précoce.

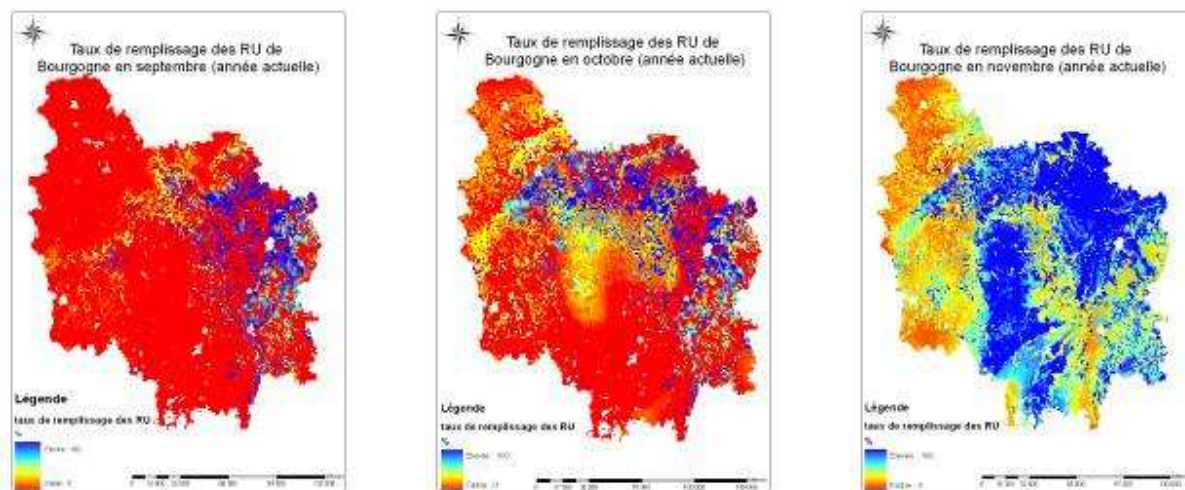
4.3.2 Informations fournies par les années étudiées

Les précipitations automnales ne sont pas à proprement parler le reflet du changement climatique, mais elles représentent une **variabilité interannuelle** (voir plus haut). De ce fait, nous n'utiliserons plus les termes « actuelle » et « future » dans cette partie mais nous ferons référence aux années utilisées pour ces simulations. C'est-à-dire 1991 pour la période « actuelle » et 2003 pour la période « future ». Ces cartes illustrent donc surtout la capacité du modèle à simuler les variations de remplissage des RU en fonction de la température et des précipitations. Cependant, il est intéressant de pouvoir évaluer ces aléas de remplissage sur deux années différentes sans anticiper sur la probabilité d'occurrence.

A quel moment se fait le remplissage hivernal des réserves ? Est-il suffisant pour garantir une alimentation des nappes et des cours d'eau ?

L'année 1991 :

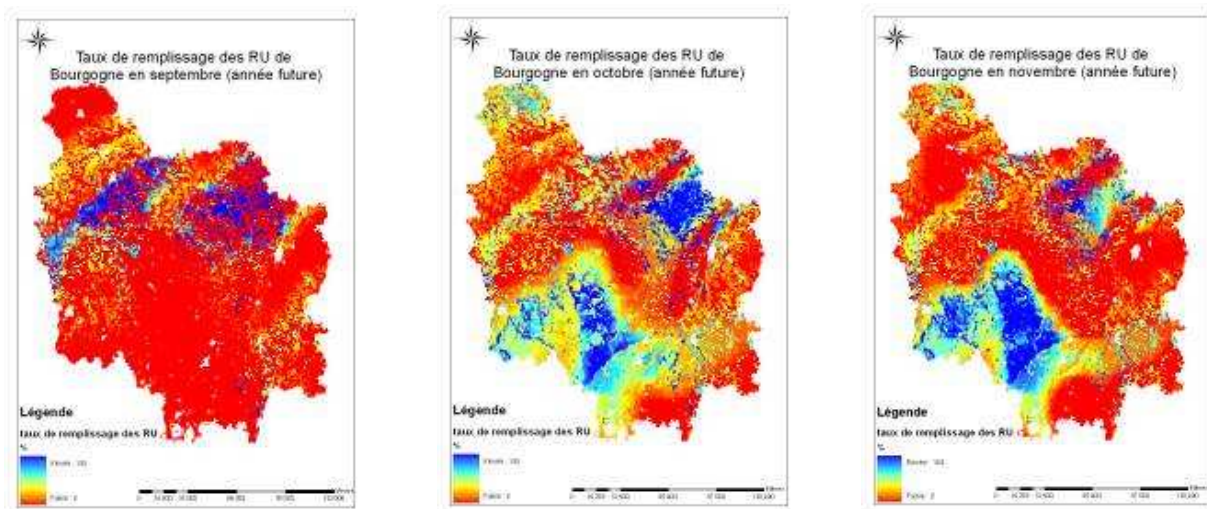
Fig. 24 : Année actuelle 1991 : évolution du taux de remplissage des RU sur les mois d'automne



Les simulations de l'année 1991 montrent qu'une partie des sols ont leur réserve en eau reconstituée en novembre. Sur ces secteurs, les précipitations deviennent efficaces : elles permettent un début de recharge en eau des nappes et une hausse du débit des cours d'eau. Les premières nappes à être rechargées sont les nappes des plateaux calcaires de Bourgogne, et les premiers cours d'eau réalimentés par les pluies sont ceux du Morvan.

L'année 2003 :

Fig. 25 : Année future 2003 : évolution du taux de remplissage des RU sur les mois d'automne



Sur l'année simulée 2003, ni la localisation des remplissages de RU, ni l'importance surfacique ne ressemblent à la situation simulée de 1991 :

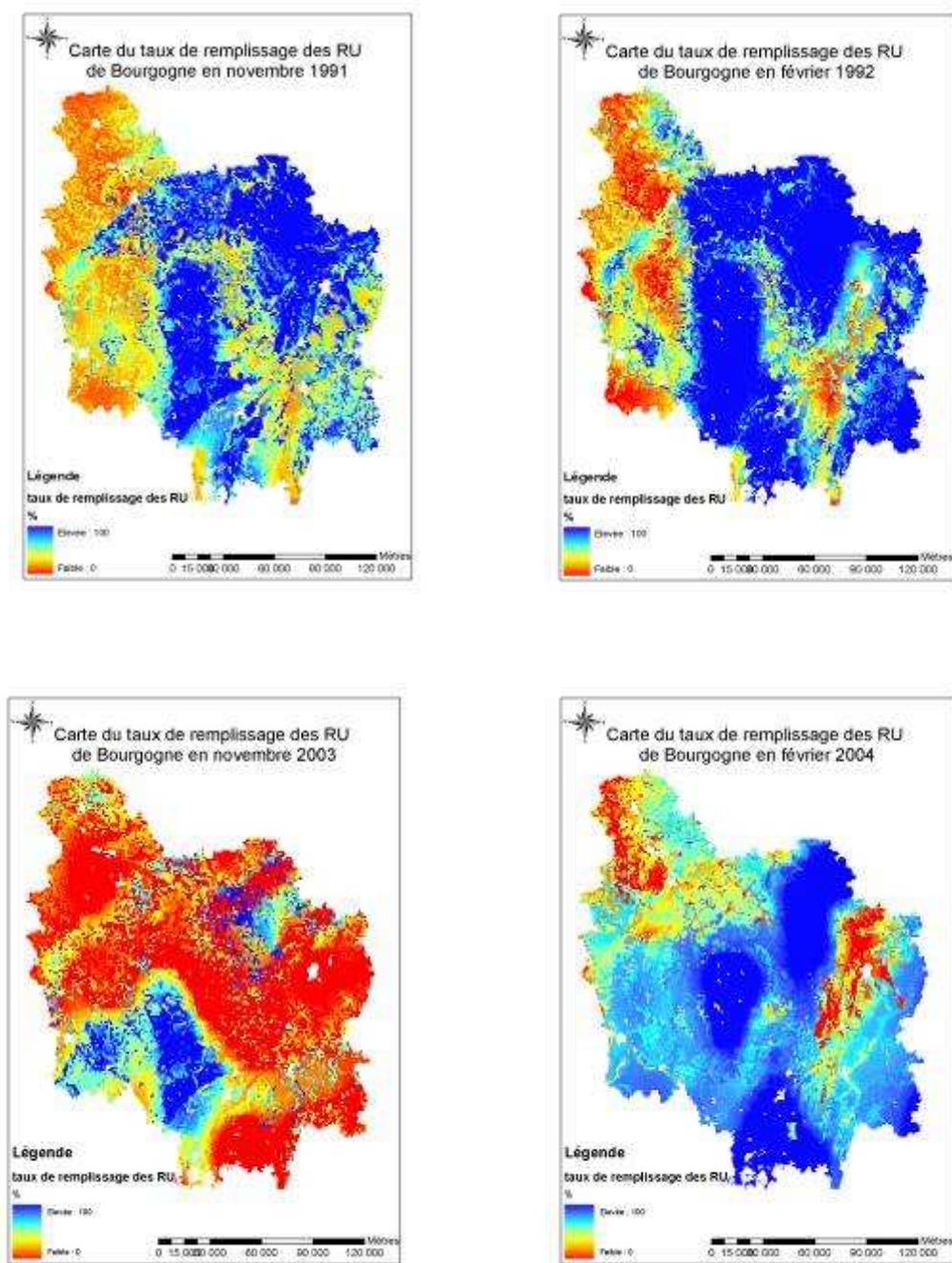
- En septembre, quelques RU sont saturées. Comme en 1991, les sols peu profonds se saturent en premier, même si géographiquement ce ne sont pas les mêmes localisations.
- En novembre, l'assèchement perdure sur une grande partie du territoire. Seules les régions au sud-ouest du Morvan et une partie des sols superficiels du nord-est de la Bourgogne ont leur réserve en eau reconstituée en novembre.
- Les sols profonds ont un taux de remplissage très bas (inférieur à 20 %) en novembre sur une large partie de la Bourgogne.

Dans ce contexte climatique, le potentiel de recharge des milieux est fortement affecté.

4.3.3 Potentiel de recharge hivernale

Pour aller plus loin, et toujours avec les mêmes réserves méthodologiques, regardons l'état des remplissages des années simulées à la fin de l'hiver (février 1992 et 2004).

Fig. 26 : Potentiel de saturation des RU pour la recharge des nappes : début et fin d'hiver 1991-2003



Globalement, la saturation des RU est moins importante en février 2004 qu'elle ne l'était en février 1992. Ces cartes confirment le sentiment qu'une recharge insuffisante en fin d'automne a peu de chance d'être satisfaisante à la fin de l'hiver. Elles soulèvent toutefois quelques interrogations et amènent à nuancer certaines affirmations :

- **Les déficits de début d'hiver sont plus vite comblés sur les sols superficiels que sur les sols profonds, mais l'importance quantitative des pluies reste le facteur principal de la répartition des zones où les réserves en eau des sols sont pleines.** C'est ce qui ressort de l'observation des plateaux calcaires, surtout en 2003. Le volume de pluies hivernales est un facteur important. Les réserves de sols superficiels peuvent se vider par endroit. C'est le cas ici sur la façade ouest de la Bourgogne en 1991 et la côte viticole au nord-est en 2003. Il s'agit d'un biais du modèle. Dans la réalité, les dessèchements ne sont pas aussi importants.
- **Les déficits de RU constatés en début d'hiver s'atténuent en fin d'hiver toutes zones confondues. Les situations par secteur sont très contrastées. Elles dépendent très largement des volumes précipités.** L'année 2003 illustre bien le phénomène. Les secteurs ouest et est de la Bourgogne présentaient un taux de remplissage identique en début d'hiver. En fin d'hiver, les sols de la façade ouest de la Bourgogne ne se rechargent pas et, localement, leur déficit hydrique se creuse. A l'inverse, le taux de remplissage de la RU est élevé à l'est de la Bourgogne.

4.4 Impacts probables du changement climatique sur la réserve en eau des sols

...pour conclure

On distingue deux phases du cycle de l'eau dans le sol : celle qui correspond à la saison végétative (printemps/été) et celle qui correspond à la recharge des ressources en eau (automne/hiver).

Au printemps, l'effet climatique pourrait se faire ressentir par un dessèchement plus précoce des sols. La seconde partie du cycle végétatif dépendrait alors plus fortement de la régularité et de l'intensité des pluies.

- *Dans le climat actuel, les RU sont encore bien fournies fin avril, à l'exception des sols peu profonds comme ceux des plateaux karstiques. L'assèchement démarre en mai, se confirme durant le mois de juin et se prolonge tout au long de l'été.*
- *Dans le climat de demain, les RU auront tendance à se vider plus précocement sur une grande partie du territoire. En avril, les sols superficiels ont déjà des réserves très altérées. Seule une partie du Morvan pourrait bénéficier encore de bonnes réserves en eau dans les sols.*

Dans l'été, l'assèchement est très marqué, tant aujourd'hui que dans le futur. Seuls quelques épisodes orageux conséquents apparaissent sur ces cartes mensuelles. Sur cette période estivale, où l'évapotranspiration est toujours nettement supérieure aux précipitations, il serait intéressant d'affiner les résultats sur un pas de temps plus court. En effet, les cumuls mensuels gommant les événements pluvieux ponctuels, alors qu'ils peuvent se révéler très bénéfiques pour un couvert végétal. Enfin, la difficulté d'obtenir des données sur l'intensité des pluies et leur caractère aléatoire ne permet pas de cibler les secteurs vulnérables aux violents orages.

En septembre, la recharge des réserves utiles débute seulement. Selon les années, elle ne s'opère pas sur les mêmes secteurs géographiques. Une bonne recharge des nappes et des cours d'eau se fait plus facilement avec des saturations précoces de RU des sols. Les résultats observés à l'automne relèvent de la variabilité interannuelle et non du changement climatique. Ils montrent l'importance des volumes précipités pour la saturation des sols et la recharge en eau des nappes.

Quantitativement, le remplissage automnal des RU est moins bon en 2003 qu'en 1991. Les sols profonds n'arrivent toujours pas à saturation fin novembre. Un automne comme 2003 offre un faible potentiel de recharge des nappes et risque d'affecter les ressources en eau de certains territoires sur l'année suivante.

5. Quelle utilisation par les acteurs de territoire ?

5.1 Exemples d'analyse locale sectorielle

Les cartographies obtenues interrogent. Pour mieux cerner l'intérêt et les questionnements soulevés, nous avons enquêté auprès de quelques acteurs sectoriels. Le dialogue autour des cartes a souvent conduit à une demande d'analyse sur quelques points du territoire.

Le sujet ne traitant pas encore le volet hydrologique, les questionnements portent pour l'instant sur les secteurs utilisant l'eau des sols, essentiellement donc l'agriculture et la forêt.

5.1.1 Analyse d'un secteur viticole : Vosne-Romanée

Contribution : Christine Monamy – BIVB

a - Changement climatique et vignoble

En viticulture, le changement climatique aura des effets sur la physiologie de la vigne, sur son parasitisme, mais aussi, in fine, sur les caractéristiques des vins.

Les évolutions de température impactent directement les stades phénologiques. Les différences d'augmentation de température qu'on observera sur le territoire amènent à un constat : l'augmentation de température sera plus importante pour les zones tardives (notamment le Chablisien) et un peu moins importante sur les Hautes-Côtes (600 à 700 m). Les écarts actuels entre vignobles de l'Yonne, de la Côte-d'Or et de la Saône-et-Loire devraient donc se réduire.

L'avancement des stades phénologiques risque d'apporter de la fragilité en situation de gel printanier. En haut de coteaux, les vignes subiront les influences complexes du changement climatique.

Parmi les effets prévisibles, les amplitudes thermiques nuit/jour seront plus importantes au printemps et plus faibles en période de forte chaleur. Aussi, en situation de sols pierreux calcaires (blancs), le rayonnement indirect amplifiera les effets du changement climatique.

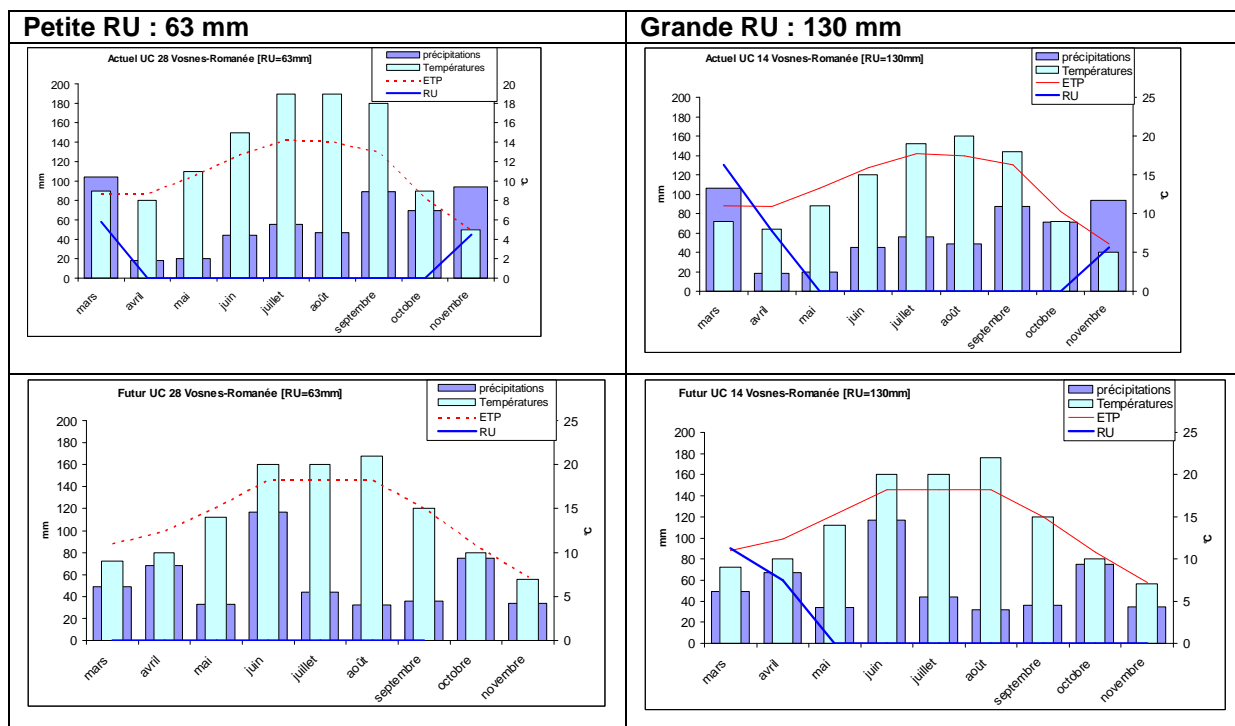
b - Analyse locale

Dans le vignoble, les RU vont de 30 à 150 mm. Ces variations permettent de comprendre et d'expliquer certains phénomènes comme les influences des stress hydriques ou au contraire des excès d'eau sur la maturité.

Prenons l'exemple de deux parcelles situées sur la commune de Vosne-Romanée : l'une est à flanc de coteau et à petite RU, tandis que l'autre est située dans la plaine et à grande RU.

- La parcelle à petite RU (UC 28, plaine) a une phénologie précoce.
- La parcelle à grande RU (UC 14, côte) est de précocité variable selon les années. Les températures et la pluviométrie annuelles en déterminent la précocité.

Gr. 11 : Evolution de la RU sur deux types de sol en fonction du climat actuel ou futur



Dans le climat futur, les parcelles à faible réserve en eau souffriront davantage : elles subiraient un assèchement au début du printemps. Pour les parcelles plus profondes, l'effet est sensible, mais moins marqué du fait de la profondeur.

Le pas de temps mensuel est un pas de temps trop lâche pour apprécier les incidences agronomiques. Pour un même cumul mensuel de pluie, les effets sur la vigne seront très dépendants selon la répartition de ces pluies au cours du mois. La quantification du ruissellement est également un élément important pour expliquer les phénomènes d'érosion sur les coteaux. Or, il nécessite quasiment de connaître l'intensité des pluies à un pas de temps horaire.

c - Adaptation au changement climatique

Les conséquences du changement climatique sur la vigne seraient de plusieurs ordres. Certaines techniques aujourd'hui pratiquées dans les régions plus méridionales peuvent permettre de s'y adapter. Mais certaines interrogations sont encore trop imprécises pour avoir des solutions. Elles nécessitent davantage d'observation et de recherche :

- Les risques de gel printanier seront accrus sur les zones tardives : les moyens de lutte contre ce risque sont connus. Il s'agit soit de brûlots entre les rangs de vigne, soit de système à aspersion lorsqu'une retenue d'eau a pu être faite, ou encore de système éolien lorsque le gel précoce est un phénomène de vallée (différence de température entre couches haute et basse de l'air). Mais au jour d'aujourd'hui, seul le vignoble du Chablisien est équipé car il subit d'ores et déjà cet aléa climatique. Le vignoble des Hautes-Côtes, pour les secteurs gélifs, a adapté le mode de conduite de la vigne (vignes hautes) afin de limiter les effets du gel. Néanmoins, ces « protections » sont coûteuses et tous les niveaux d'appellation, notamment les Régionales, ne pourront vraisemblablement pas investir.
- Les phénomènes de sécheresse seront plus fréquents sur les sols à très faible RU : si un stress hydrique modéré est favorable à la qualité des vins, un excès de sécheresse peut être préjudiciable. S'adapter à des risques fréquents de sécheresse oblige à repenser le mode de conduite de la vigne, écartement des rangs, hauteur de palissage, type de taille, le mode d'entretien des sols, etc.
- La maturation sera plus homogène sur les trois départements mais surtout plus précoce. Toutefois, cet aspect peut être contrebalancé par une sécheresse printanière ou estivale plus marquée (ou encore des températures maximales estivales plus importantes) qui peut provoquer un arrêt de croissance de la plante et/ou un blocage de la maturité.

5.1.2 Analyse de deux secteurs forestiers : Morvan

a - Le risque du changement climatique sur les forêts bourguignonnes

Contribution : Marie-Cécile Deconninck – CRPF

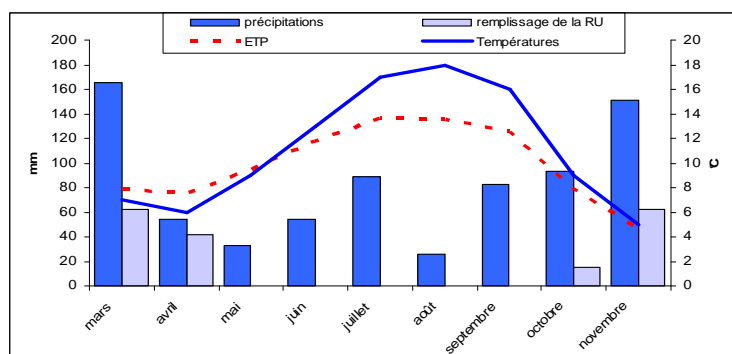
Il est difficile de s'adapter dans le monde forestier du fait de la durée de vie et de croissance des arbres. De plus, la période actuelle est une période intermédiaire où les étés sont de plus en plus chauds et secs tout en ayant ponctuellement des hivers pouvant être très rigoureux. De ce fait, l'implantation d'espèces franchement méditerranéennes en Bourgogne n'est pas possible, car elles ne survivraient pas à un gel en fin d'hiver ou début de printemps, période qui correspond à leur débourrement.

Un autre phénomène du changement climatique est l'arrivée de maladies ou de parasitisme cantonnés habituellement en zone méditerranéenne. La chenille processionnaire du pin, par exemple, a commencé sa progression vers le nord, on en croise aujourd'hui au nord de Dijon.

Les stress hydriques et thermiques affaiblissent les arbres et les rendent plus vulnérables aux attaques parasitaires. C'est l'un des risques supplémentaires induit par le changement climatique d'autant plus que les moyens de lutte en forêt sont extrêmement complexes et réduits. La prévention (essences adaptées aux stations, sylviculture pour favoriser la bonne santé des peuplements) reste la réponse la plus efficace. Est-elle adaptée pour le climat de demain ?

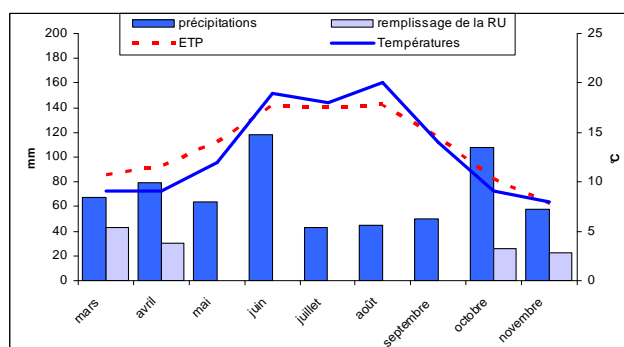
b - Analyse locale

Gr. 12 : Analyse d'un secteur forestier dans le Morvan
(altitude > 500 m et P annuelles > 900 mm) : RU = 62 mm



1991

2003



Ces deux graphiques permettent de suivre sur plusieurs mois les paramètres climatiques et hydriques pour un secteur particulier, en l'occurrence ici le secteur forestier du Morvan.

En 1991, le stock d'eau dans la RU diminue à partir du mois d'avril, car les pluies sont inférieures à l'ETP. La RU est vide au mois de mai. Elle ne recommence à se remplir qu'au mois d'octobre du fait de précipitations automnales supérieures à l'ETP. En 2003, les précipitations sont inférieures à l'ETP sur toute la période étudiée, à l'exception du mois d'octobre. La RU commence à se vider dès le mois de mars.

c - Adaptation au changement climatique

Les questions d'adaptation interrogent la recherche. Un programme national Dryade, financé par l'ANR et mis en œuvre par l'INRA, porte sur la réponse du douglas et du chêne aux aléas climatiques. Un volet bourguignon de cette étude, financé par Conseil régional de Bourgogne s'est attaché à mettre en évidence les facteurs de vulnérabilité du douglas aux aléas climatiques, à comprendre les facteurs déterminants des dépérissements et à répondre aux questions suivantes : Son aire d'introduction en Bourgogne correspond-elle bien à son aire climatique potentielle ? Les dépérissements observés sont-ils révélateurs d'erreurs d'introduction du douglas, ou bien d'une évolution des caractéristiques climatiques locales ? Des essais comparatifs de plantations de douglas ont été réalisés en 2009, avec l'aide du Conseil régional de Bourgogne afin d'étudier le comportement des provenances selon les situations climatiques : période de débourrement, résistance au stress hydrique... On cherche ainsi à mettre en évidence les provenances les plus résistantes et les mieux adaptées au changement climatique. Sur les stations où le dépérissement du chêne pédonculé est important, on teste son remplacement par une autre essence, le chêne sessile.

La sylviculture offre également des solutions d'adaptation : en privilégiant les mélanges et la diversité génétique des forêts, le forestier augmente ses chances de trouver au moins une espèce capable de survivre aux phénomènes extrêmes qui pourraient survenir. La diversité génétique des forêts est naturellement importante, c'est un plus pour l'adaptation des forêts au changement climatique.

5.2 De l'élaboration des connaissances au passage à l'action

...le point de vue du sociologue

Contribution de Sandrine Petit, sociologue à l'INRA-LISTO

Le projet a été construit initialement de façon pluridisciplinaire, comme un enchaînement de données apportées par les disciplines sollicitées. Mais au final, le modèle hydrique régional, sorte de méta-modèle, a été construit collectivement. Basée sur l'interaction entre les données et modèles des différentes disciplines, sa construction a nécessité l'expertise de tous. Le travail réalisé relève in fine de l'interdisciplinarité. Si les difficultés de compatibilité d'échelle, d'organisation de données étaient pressenties au départ, aucune intuition des résultats n'était sous-jacente. Une sociologue a accompagné cette « aventure ». Elle a analysé la construction interdisciplinaire et partenariale, mais aussi la difficulté du passage à l'action.

5.2.1 Analyse de l'interdisciplinarité

La méthodologie d'analyse repose sur l'observation de quelques réunions du comité de pilotage et d'entretiens complémentaires. La grille d'interprétation est construite principalement à travers des concepts de la sociologie de la science en action et de la théorie de l'acteur-réseau (Callon, Latour).

Selon Sandrine Petit, le travail relève deux défis, celui de la régionalisation des données climatiques et celui de l'investigation des formes d'impacts possibles du changement climatique. **Cette échelle locale est primordiale pour aborder la question de la vulnérabilité.**

L'expérience de ce projet est originale. Les chercheurs, d'abord convoqués sur le mode de l'expertise, se sont lancés dans une recherche interdisciplinaire associant climatologie, pédologie et hydrologie. Ensemble, ils ont mis au point une forme de « méta-modèle » qui est l'association de trois modèles ou bases de données existants mais qui n'avaient jamais été reliés entre eux. Ce travail a supposé une harmonisation des variables utilisées et des échelles d'espace et de temps. Le résultat permet de présenter des cartes prévisionnelles de disponibilité de la ressource en eau dans les sols et à terme des bilans hydrologiques. Ce projet collectif a enrichi aussi la réflexion des chercheurs dans leur propre discipline. Des communications scientifiques ont pu être élaborées à partir de leur engagement dans ce dispositif. Les partenaires professionnels n'étaient pas étrangers au processus de recherche, certains d'entre eux y ont directement contribué par leur expertise de terrain ou ont mis en cause certains choix des chercheurs.

Pour Sandrine Petit, « *les données n'ont pas été données, elles ont été construites* ».

5.2.2 Adaptation au changement climatique : analyse du cheminement vers l'action

S'adapter aux risques liés aux changements climatiques, c'est tout d'abord les connaître et les évaluer. Puis ensuite les gérer et les anticiper.

La question du risque est souvent fournie par les prévisions générales. Mais elle peut être approchée par la vulnérabilité. Un travail partenarial et collectif permet d'identifier sa propre vulnérabilité (sectorielle, territoriale...). On peut interroger le modèle dans ce sens, ce que permet l'échelle locale utilisée.

A partir des enquêtes auprès des acteurs sectoriels se dégagent trois niveaux d'utilisation des résultats : prendre conscience du risque, s'interroger sur ses impacts et envisager des adaptations :

- **Prendre conscience du risque** : Représenter le risque sous forme cartographique permet cette première appropriation. Les cartes réalisées à l'échelle régionale représentant les évolutions de températures et de précipitations et leurs conséquences sur la ressource en eau matérialisent le risque, le font finalement exister. L'intérêt d'un tel travail est de conduire progressivement à une réflexion intersectorielle, le climat, comme l'eau et les ressources naturelles, étant un bien collectif.
- **S'interroger sur ses impacts** : Une utilisation directe des cartes est envisagée (gestionnaire de l'eau notamment) pour déterminer les secteurs les plus sensibles aux assèchements et aux excès d'eau. Les représentations cartographiques permettent de générer des questionnements sur les impacts et les modes d'adaptation. Les territoires et les secteurs d'activités peuvent apprécier leur vulnérabilité et s'interroger en quoi les modifications du climat et de la ressource en eau des sols vont les affecter.
- **Envisager des adaptations** : Le besoin d'affiner l'échelle spatio-temporelle a été exprimé, notamment sur les périodes de développement de la végétation. Dans sa forme actuelle le modèle n'est pas encore utilisable pour préciser les phénomènes d'érosion, ou les problèmes à l'échelle des bassins d'alimentation de captage par exemple. En l'enrichissant d'un modèle hydrologique, il sera possible d'obtenir des informations sur la recharge des nappes et la réalimentation des cours d'eau.

5.3 La vision des acteurs : intérêt et limites de l'étude, pour conclure

La connaissance de la RU des sols et de l'évolution de son remplissage sous l'influence climatique répond d'abord aux enjeux des secteurs utilisateurs de l'eau du sol, l'agriculture, la vigne et la forêt. L'outil tel qu'il est permet une sensibilisation des acteurs aux risques encourus, les cartographies obtenues permettant de visualiser le risque.

L'outil peut contribuer dès à présent à d'autres études sectorielles (vigne et forêt notamment). En effet, les secteurs géographiques qui risquent de connaître des sécheresses agronomiques plus précoces sont localisés. Sur ces zones, il sera peut-être nécessaire d'adapter les variétés, les cultures ou les essences forestières, ou de modifier les pratiques culturales ou sylvicoles. Le suivi mensuel du remplissage des RU permet également d'explicitier les causes pédoclimatiques de maladies (maladie du bois). Cela demande toutefois d'affiner l'échelle spatio-temporelle. La cartographie à l'échelle régionale pourrait aussi alimenter les réflexions lors de l'élaboration de schéma directeur de l'eau (SDAGE) ou de choix culturels. En poursuivant l'étude par la prise en compte des phénomènes de ruissellement et d'infiltration, il sera possible de mieux appréhender les phénomènes de recharge des nappes et de comprendre les risques sur certains bassins versants. Des débouchés en hydrologie (voie navigable, production hydroélectrique, alimentation en eau potable) sont attendus.

C'est en s'appropriant ces éléments que les acteurs sectoriels ou territoriaux pourront anticiper leur vulnérabilité et mettre en place des stratégies d'adaptation.

Conclusions

Bien que la Bourgogne ne soit pas concernée au même degré que les zones de montagne ou les bords de mer par le changement climatique, l'évolution du climat est toutefois avérée sur la région : les températures ont augmenté de 1,5°C depuis 20 ans et la modification du régime des pluies est perceptible. L'inégalité géographique de la disponibilité de la ressource est aussi une réalité. Certains bassins d'alimentation en eau sont périodiquement sensibles à la sécheresse ou à la pénurie. Les craintes que les variations climatiques saisonnières plus fortes accroissent les disparités entre territoires se précisent.

Cette étude est une première étape pour mieux connaître les risques que fait peser le changement climatique sur les ressources en eau et donc sur la disponibilité en eau des territoires bourguignons. Elle a consisté à élaborer un outil, ou méta-modèle, qui permet de visualiser dans l'espace et dans le temps l'assèchement et le remplissage des sols. Cet outil a apporté quelques enseignements, tant aux chercheurs qui se sont impliqués dans son élaboration qu'aux acteurs qui en ont testé l'utilisation. La construction interdisciplinaire et partenariale de ce travail a permis d'appréhender les incertitudes et les manques de connaissances inhérents à un tel sujet. C'est aussi une façon d'aborder les vulnérabilités sectorielles, prélude à l'élaboration de stratégies d'adaptation.

Il a d'abord fallu **caractériser l'aléa climatique localement** grâce au travail des chercheurs du CRC : jusqu'à +3°C de réchauffement sur la période végétative d'avril à août (Fig. 7), et des précipitations qui ne devraient pas beaucoup changer en volume, mais davantage en répartition sur l'année (Gr. 4). Travailler sur des années réelles, ici 1991 pour représenter l'année actuelle, et 2003 pour le climat futur, permet de confronter des simulations issues des modèles avec des observations. Ainsi certains résultats ont pu être validés, d'autres rejetés. Cela contribue à améliorer les outils de modélisation, et à mieux comprendre les déterminants de la variabilité climatique. La modélisation réalisée dans le cadre de cette étude a d'ailleurs fait apparaître une question de recherche quant aux pluies convectives estivales. Cependant, la variabilité interannuelle du climat est un élément fondamental, que ce soit pour le climat actuel ou pour le climat futur. Les deux années choisies pour être les plus représentatives possible ne peuvent en aucun cas représenter la diversité des situations observées d'une année sur l'autre.

Avec le calcul de réserves utiles des sols par unité cartographique, les pédologues ont fourni les bases du bilan hydrique. **La sensibilité des sols à la sécheresse est cartographiée** (Fig. 13) et les territoires qui ont une très forte hétérogénéité de réserve utile sont visualisables (Fig. 15). Ce travail est pérenne et peut alimenter d'autres travaux régionaux faisant appel à la connaissance des sols.

Le bilan hydrique élaboré par les hydrologues a combiné les données climatiques (température, précipitation, rayonnement) et les données des sols (taille de la RU), et du couvert végétal (évapotranspiration), mois par mois, pixel par pixel. Cela a permis de **visualiser le risque d'assèchement des sols, et donc, indirectement, le risque de déficit de recharge des ressources en eau**. D'après l'exercice de simulation effectué, les sols se videront plus tôt au printemps et plus sévèrement en été qu'aujourd'hui. Une des premières conséquences portera sur la croissance des végétaux. Une autre conséquence concerne la réalimentation des ressources en eau, nappes souterraines ou cours d'eau, du fait du retard de saturation des réserves utiles des sols. Avec une période de réalimentation des nappes et cours d'eau plus courte (hiver plus tardif, printemps plus précoce), les pluies automnales et hivernales seront davantage déterminantes à l'avenir.

Le modèle construit ici est simplifié pour être compatible avec les échelles de données. Il favorise l'approche spatiale et force quelque peu les contrastes sur les secteurs en déficit ou en excès d'eau. Son originalité réside dans son mode de construction : il associe des données élaborées par d'autres modèles, qui n'avaient jamais été reliés entre eux.

D'autres étapes de travail sont nécessaires pour **appréhender l'évolution de la disponibilité en eau des territoires**. Le modèle nécessite d'être affiné (intégrer le critère ruissellement, établir les bilans hydrologiques sur des bassins versants, détailler les compartiments de RU, tester la variabilité climatique annuelle...) et le travail partenarial d'être poursuivi. En interrogeant le modèle, les territoires et les secteurs d'activité pourront apprécier en quoi ils seront affecté par les modifications du climat et de ressource en eau des sols. C'est en identifiant leur vulnérabilité qu'ils pourront envisager des pistes d'adaptation au changement climatique. L'échelle locale est primordiale pour aborder la question de la vulnérabilité.

Annexes

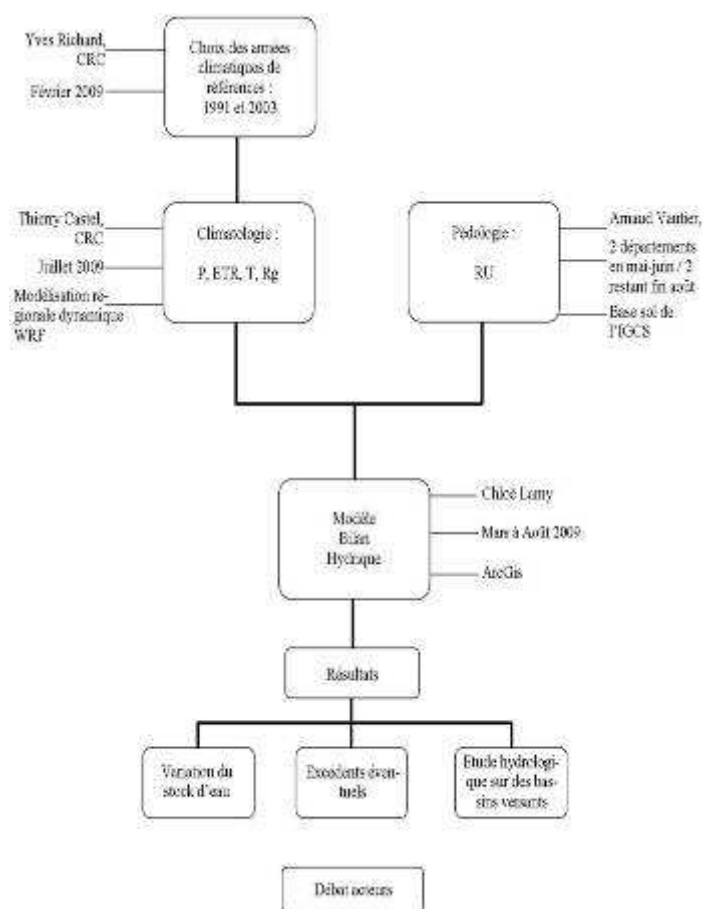
Construction du modèle hydrique : détail de la méthode

extrait du rapport de stage de Chloë LAMY - septembre 2009

Annexe 1 - Collecte et traitement des données

Pour étudier les variations de stock d'eau dans les sols face aux changements climatiques, il a fallu croiser les données climatologiques et pédologiques. Ces données ont été produites par des personnes différentes grâce à des outils variés et sous des formes hétérogènes. L'organigramme suivant permet de visualiser les étapes de travail des chercheurs, les outils et jeux de données utilisés.

Organigramme de travail



A partir de ce modèle de bilan hydrique, une méthodologie a pu être mise en place. Elle consiste en plusieurs étapes clés allant de la conception de tables de données à la réalisation de cartes en passant par une phase de calcul sous ArcGis.

Dans un premier temps, il a donc fallu transformer les fichiers de données fournis par les climatologues et pédologues en tables de données lisibles sous ArcGis. Les tables de données pédologiques (fig. 7) consistent ainsi en une colonne « no_uc » listant les numéros identifiant les différentes unités cartographiques de sol, à laquelle on associe une colonne « RUM carto excès » renseignant sur la taille de la réserve utile maximale en mm. Une troisième colonne « id » a été incréée afin d'attribuer un identifiant unique à chaque unité cartographique de sol à l'échelle de la région, il est en effet possible d'avoir un même code d'unité dans deux départements différents.

Figure 1 : Extrait de la table de données pédologiques de la Nièvre

| | A | B | C |
|---|-------|-------|-----------------|
| 1 | id | no_uc | RUM carto excès |
| 2 | 58001 | 1 | 146 |
| 3 | 58002 | 2 | 137 |
| 4 | 58003 | 3 | 73 |
| 5 | 58004 | 4 | 80 |
| 6 | 58005 | 5 | 113 |
| 7 | 58006 | 6 | 73 |
| 8 | 58007 | 7 | 147 |
| 9 | 58008 | 8 | 90 |

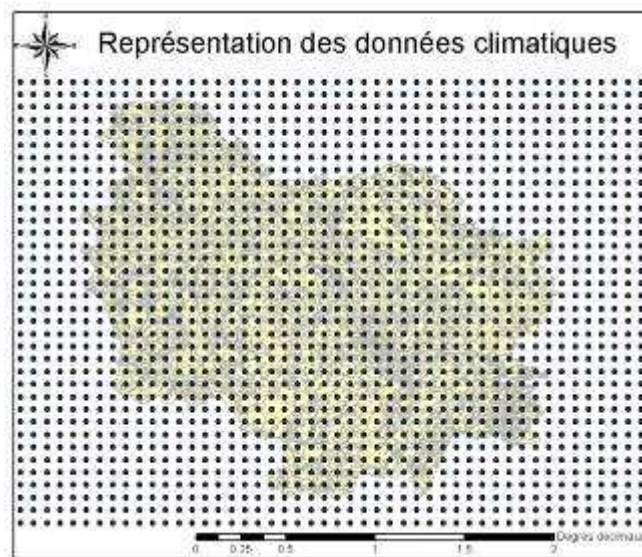
Les tables de données climatologiques (Fig. 8) varient quelque peu des informations pédologiques, car on génère ici un jeu de points. La table est ainsi composée d'une première colonne pour les coordonnées « longitude », une deuxième pour les coordonnées « latitude » et une troisième renseignant sur l'information voulue, c'est-à-dire des précipitations totales mensuelles en mm, des températures moyennes mensuelles en °C, ou du rayonnement global total mensuel en cal,cm-2,j-1.

Figure 2 : Extrait de la table de données climatique : température

| | A | B | C | D |
|----|------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | | Latitude | Longitude | température |
| 2 | 1018 | 46.01742172 | 2.515228271 | 7.430698321 |
| 3 | 1091 | 46.01742172 | 2.589050293 | 7.258538818 |
| 4 | 1163 | 46.01742172 | 2.662872314 | 8.898838136 |
| 5 | 1235 | 46.01742172 | 2.736694336 | 6.910814642 |
| 6 | 1307 | 46.01742172 | 2.810516357 | 7.142912637 |
| 7 | 1378 | 46.01742172 | 2.884338378 | 7.427075589 |
| 8 | 1451 | 46.01742172 | 2.9581604 | 7.701911875 |
| 9 | 1523 | 46.01742172 | 3.031982422 | 8.144092978 |
| 10 | 1595 | 46.01742172 | 3.105804443 | 8.547855716 |
| 11 | 1667 | 46.01742172 | 3.179626465 | 8.904051801 |
| 12 | 1739 | 46.01742172 | 3.253448486 | 9.073336437 |

On a ainsi des tables de données pédologiques qui seront associés à une couche de contours d'unité pédologique, donc sous format « polygone » sous ArcGis et des tables de données climatiques ponctuelles qui seront donc présentées sous formes de points sous ArcGis (Fig. 5).

Figure 3 : Représentation cartographique des données climatiques



Comme on souhaite travailler avec des données au format raster avec des mailles carrées de 1 km de côté, il va falloir traiter ces données avant de commencer à faire des calculs. Le choix d'une maille de 1 km de côté est lié au fait que l'on a souhaité être le plus fin possible tout en restant dans les limites acceptables par rapport aux jeux de données climatiques qui sont à une échelle de 8 km.

Le traitement des données a ainsi consisté en une étape de conversion « vecteur - raster » du jeu de données pédologiques et du CORINE Land Cover afin de passer d'une couche de polygones à un raster de maille carrée d'1 km de côté. Pour les données climatiques, nous avons décidé d'interpoler les données par krigeage à partir de semi-variogrammes calculés sous Surfer (Fig. 6). On passe ainsi de la représentation ponctuelle des données à une représentation continue (Fig. 7). Cette étape a été faite pour chaque mois modélisé et pour les températures, les précipitations et le rayonnement global.

Figure 4 : Propriétés d'un variogramme linéaire sous Surfer

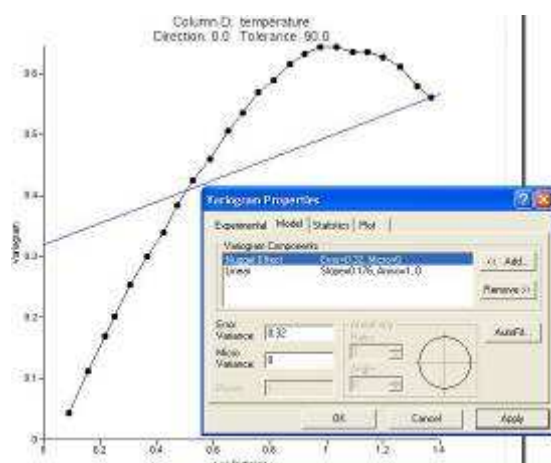
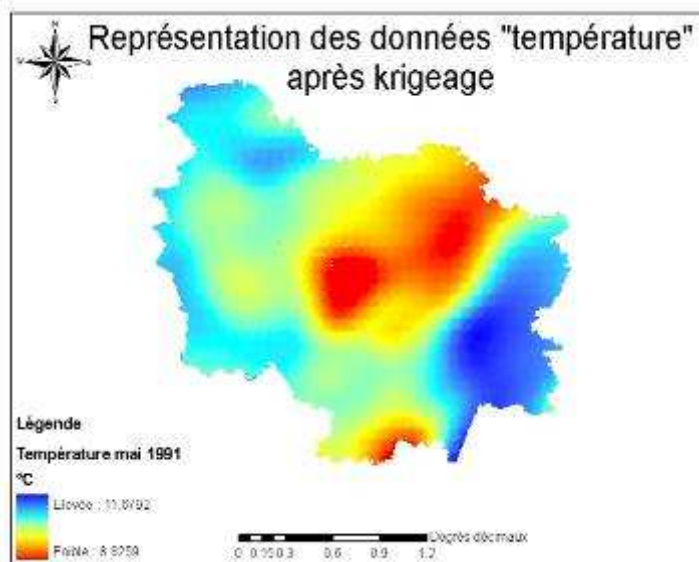


Figure 5 : Représentation des données climatiques après krigeage linéaire



Annexe 2 - Méthode de calcul du bilan hydrique

Une fois que toutes les données sont représentées sous forme de couches au format raster il est possible d'utiliser la calculatrice raster d'ArcGis. La première étape de calcul consiste en l'élaboration de cartes d'ETP. Pour cela, nous avons donc utilisé la formule de Turc :

$$ETP_{Turc} = 0.4 * (Rg + 50) * \frac{t}{t + 15} \text{ (eq. 1)}$$

Nous avons ainsi généré des cartes d'ETP Turc pour chaque mois des périodes étudiées. Nous avons choisi d'utiliser la formule de Turc (eq. 1) car elle permettait de prendre plus de paramètres climatiques en compte que la formule de Thornthwaite et donc d'être plus proche de la réalité, sans être pour autant trop exigeante en nombre de paramètres d'entrée. Une fois cette étape effectuée, on a associé à l'ETP un coefficient cultural (Kc), afin d'intégrer la partie « transpiration ». Cette étape permet d'être encore plus proche de la réalité en tenant compte de la demande en eau de la plante qui varie au cours de sa croissance. Pour cela des couches mensuelles de Kc ont été réalisées à partir du Corine Land Cover. Le principe étant de rasteriser le Corine Land Cover afin d'attribuer à chaque pixel un code végétation (tab. 1). Ce code végétation permet ainsi d'intégrer, au moment du calcul de l'évapotranspiration, les variations du Kc dans l'année et par types de végétation : on peut par exemple distinguer en août les prairies dont le Kc vaut 0.8, des cultures ayant un Kc de 0.3 et des forêts ayant un Kc égal à 1 (Arnaud Vautier, communications personnelles).

Tableau 1 Code végétation pour le calcul du coefficient cultural

| végétation | code végétation |
|------------|-----------------|
| cultures | 0.6 |
| prairies | 0.8 |
| feuillus | 0.9 |
| conifères | 1 |
| absence | 0 |

Une fois les couches mensuelles de Kc générées, elles ont été associées à l'ETP Turc par multiplication, afin de créer les couches définitives d'évapotranspiration : ETP_Kc. A partir de ce point il est donc possible de calculer la variation du stock d'eau dans les sols sur l'année selon l'algorithme suivant :

Figure 6 : Algorithme de calcul de la variation du stock d'eau et des excédents d'eau

Paramètres :
 E : Excédents d'eau
 ETP_Kc : Evapotranspiration
 P : Précipitations
 RU : Stock d'eau maximal de la réserve utile
 RU_i : Stock d'eau dans la réserve utile au début du mois
 RU_f : Stock d'eau dans la réserve utile à la fin du mois

Si $(P - ETP_Kc) < 0$ alors
 Si $(ETP_Kc - P) < RU_i$ alors
 $RU_f = RU_i - (ETP_Kc - P)$ [Calcul de la variation de stock d'eau]
 $E = 0$ [Calcul d'éventuels excédents d'eau]
 Si $(ETP_Kc - P) > RU_i$ alors
 $RU_f = 0$
 $E = 0$
 Fin Si

Si $(P - ETP_Kc) > 0$ alors
 Si $(P - ETP) > (RU - RU_i)$ alors
 $RU_f = RU$
 $E = (P - ETP_Kc) - (RU - RU_i)$
 Si $(P - ETP_Kc) < (RU - RU_i)$ alors
 $RU_f = RU_i + (P - ETP_Kc)$
 $E = 0$
 Fin Si
 Fin Si

Le code pour calculer l'ETP_Kc, la variation du stock d'eau et les éventuels excédents en eau est le suivant :

*Code pour calculer les variations de stock d'eau avec la calculatrice raster dans ArcGis
 exemple pour mars 2003 :*

Calcul du coefficient cultural :

con ([region-raster] == 0, 1, con ([region-raster] > 0.5 & [region-raster] < 0.7, 1, con ([region-raster] == 0.800000011920929, 1, con ([region-raster] > 0.85 & [region-raster] < 0.95, 1, con ([region-raster] == 1, 1))))

Calcul du stock d'eau à la fin du mois :

con ([p0303] < [ett-kc0303] & [rui_0303] > [ett-kc0303] - [p0303], [rui_0303] - ([ett-kc0303] - [p0303]), con ([p0303] < [ett-kc0303] & [rui_0303] <= ([ett-kc0303] - [p0303]), 0, con ([p0303] >= [ett-kc0303] & ([ru] - [rui_0303]) > ([p0303] - [ett-kc0303]), [rui_0303] + ([p0303] - [ett-kc0303]), con ([p0303] >= [ett-kc0303] & [ru] - [rui_0303] < [p0303] - [ett-kc0303], [ru])))

Calcul des éventuels excédents en eau :

Dp : con ([p0303] >= [ett-kc0303] & [ru] - [rui_0303] <= [p0303] - [ett-kc0303], ([p0303] - [ett-kc0303]) - ([ru] - [rui_0303]), 0)

La réserve utile (RU) représente la réserve utile maximale fournie par les pédologues. Elle est égale au stock d'eau initial au mois de mars de chaque année modélisée. Le stock initial de chaque mois correspond donc au stock final du mois précédent.

Alterre Bourgogne a pour mission de mobiliser les acteurs régionaux afin que les enjeux liés à l'environnement et au développement soutenable soient placés au cœur des politiques et des actions des territoires bourguignons. L'agence s'y emploie par le biais d'actions d'information et de sensibilisation, d'accompagnement en faveur de porteurs de projets et de valorisation de bonnes pratiques. Le partenariat étant son mode de fonctionnement privilégié.