

Les changements climatiques annoncés vont-ils induire une modification du cycle de l'eau et des débits dans un bassin comme la Loire, géologiquement contrasté et soumis à des climats variés (océanique, continental, cévenol) ?

Nos résultats suggèrent une diminution des ressources en eau disponibles en moyennes eaux et en étiage.

En revanche la dynamique et l'intensité des crues ne devraient pas varier significativement.

La Loire à Chalonnes (Maine-et-Loire).

The Loire River at Chalonnes (Maine-et-Loire Department).

© S. Rodrigues, Université de Tours, UMR ISTO.

La Loire à l'épreuve du changement climatique



78

MODÉLISATION



Florentina Moatar

PROFESSEUR, UNIVERSITÉ
FRANÇOIS-RABELAIS DE TOURS
COORDINATION ICC-HYDROQUAL
moatar@univ-tours.fr



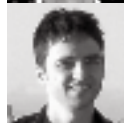
Agnès Ducharne

CHERCHEUR CNRS, UMR SISYPHE, PARIS VI
Agnès.ducharne@upmc.fr



Dominique Thiéry

CHEF DE PROJETS DE RECHERCHE,
SERVICE EAU, BRGM
d.thiery@brgm.fr



Vincent Bustillo

POST-DOCTORANT, UNIVERSITÉ
FRANÇOIS-RABELAIS DE TOURS
bustillovincent@hotmail.com



Éric Sauquet

CHERCHEUR CEMAGREF, UNITÉ
DE RECHERCHE HYDROLOGIE-HYDRAULIQUE
eric.sauquet@cemagref.fr



Jean-Philippe Vidal

CHERCHEUR CEMAGREF, UNITÉ
DE RECHERCHE HYDROLOGIE-HYDRAULIQUE
jean-philippe.vidal@cemagref.fr

L'augmentation, par les activités humaines, en gaz à effets de serre dans l'atmosphère entraîne des modifications du climat qui sont déjà décelables au XX^e siècle, et qui sont appelées à s'intensifier au cours du XXI^e siècle [GIEC (2007)]. Ces modifications concernent les températures et les précipitations, en termes de moyennes mais aussi de variabilité, qu'elle soit saisonnière, interannuelle, ou à plus courte échelle de temps (quelques jours pour les événements pluvieux par exemple). Les impacts de ces changements sur les bassins versants sont potentiellement nombreux et concernent notamment les régimes hydrologiques, via le manteau neigeux, l'évapotranspiration depuis les surfaces continentales, et les écoulements superficiels (débits des cours d'eau) et souterrains (nappes aquifères). La qualité physico-chimique et écologique des cours d'eau est aussi susceptible d'être affectée, via le réchauffement de l'eau et la modification des écoulements. Le projet de recherche ICC-Hydroqual, centré sur le bassin de la Loire, a étudié l'impact potentiel du changement climatique sur l'évolution des régimes hydrologiques, thermiques ainsi que sur l'évolution de la qualité physico-chimique des cours d'eau. Pour plus de précisions sur le bilan hydrologique actuel du bassin de Loire, voir encadré p. 81.

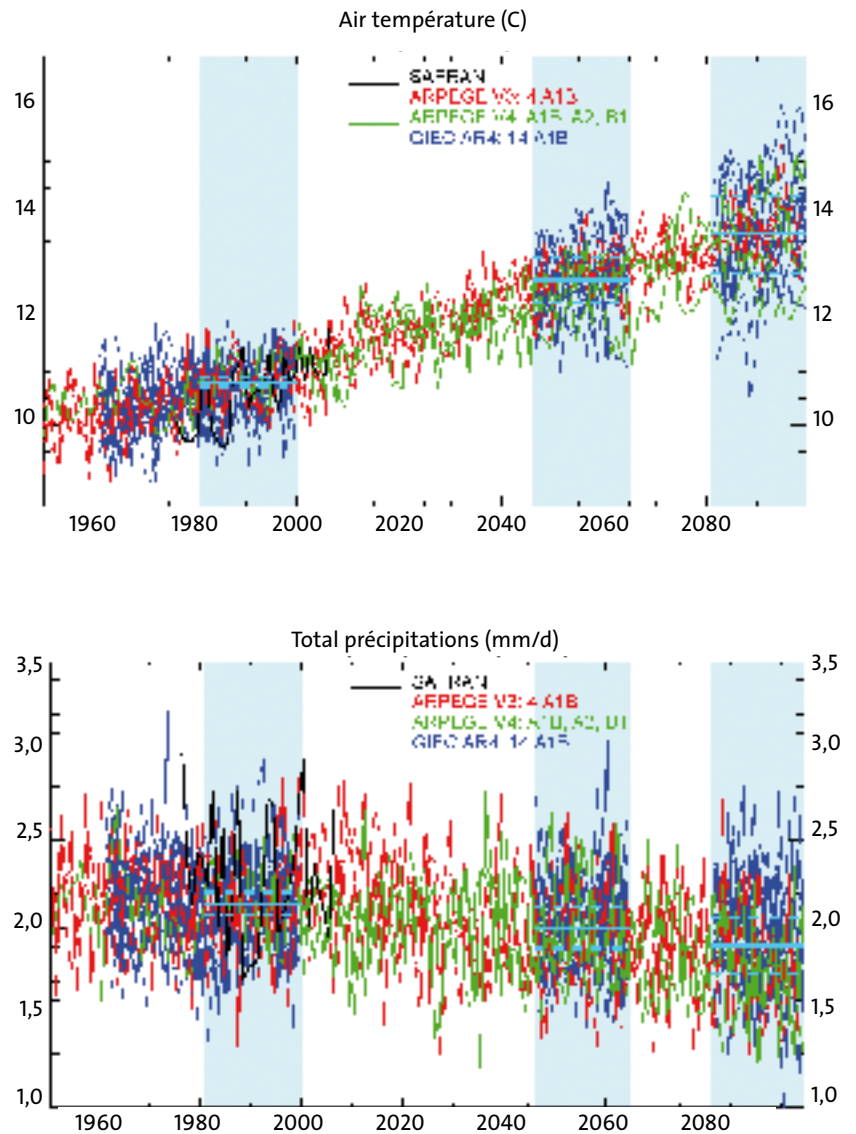
Nous présentons ici les résultats de ce projet pour les régimes hydrologiques saisonniers, d'étiage et de crue de la Loire et ses principaux affluents, après avoir décrit brièvement la démarche utilisée.

Scénarios climatiques régionalisés pour le XXI^e siècle

Les premiers ingrédients d'une étude d'impact hydrologique sont les projections des conditions climatiques du futur. Elles ont ici été simulées par plusieurs modèles du climat global en fonction de scénarios d'émissions anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols) pour le XXI^e siècle. Ces projections climatiques, dites de grande échelle du fait de leur faible résolution spatiale, sont ensuite régionalisées pour permettre l'étude à l'échelle du bassin versant régional. En effet, certains phénomènes importants mais d'extension géographique régionale ou locale, comme les contrastes liés au relief ou les précipitations intenses, ne peuvent pas être simulés explicitement par les modèles de climat. Pour pallier ces défauts, plusieurs méthodes de régionalisation, assez différentes mais complémentaires, sont disponibles.

Dans le bassin de la Loire, nous avons utilisé un ensemble de 21 projections climatiques de grande échelle basées sur plusieurs scénarios d'émissions couvrant la période 1950-2100 : un scénario relativement optimiste (B1) qui correspond à une réduction efficace et générale des émissions permettant de ralentir l'augmentation de la concentration atmosphérique, un scénario beaucoup plus pessimiste (A2) qui résulte d'une certaine inaction des autorités mondiales, qui ne pourraient éviter d'ici 2100 un triplement de la teneur atmosphérique en CO₂ par rapport au début de l'ère industrielle, et enfin un scénario intermédiaire (A1B). De plus, ces projections climatiques sont issues de plusieurs modèles de circulation générale : 14 projections A1B ont été réalisées avec les modèles climatiques internationaux utilisés pour le quatrième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, AR4), et 7 projections complémentaires ont été simulées par des versions du modèle Arpège de Météo-France sous scénarios A1B, B1 et A2. Les projections issues du modèle Arpège sont disponibles de manière continue sur la période 1950-2100 ; les autres projections le sont sur trois horizons temporels, 1950-2000 (pour le présent), 2046-2065 (milieu du siècle) et 2081-2100 (fin du siècle).

Ces projections de grande échelle ont ensuite été régionalisées par une méthode statistique dite des régimes de temps [Boé *et al.* (2006)]. Celle-ci consiste à établir pour le climat présent des relations statistiques entre les caractéristiques du climat local et l'état climatique de grande échelle, pour ensuite les appliquer aux simulations à grande échelle pour le futur. La *figure 1* présente l'évolution des températures et précipitations annuelles moyennes selon l'ensemble des 21 projections climatiques régionalisées pour l'ensemble du bassin de la



▲ **Fig. 1 : Évolution des températures et précipitations annuelles moyennes pour le bassin de la Loire à Montjean-sur-Loire entre 1950 et 2100, selon l'ensemble des 21 projections climatiques du projet ICC-Hydroqual. Les valeurs historiques pour le temps présent selon la réanalyse SAFRAN apparaissent en noir. Les segments horizontaux bleus indiquent les moyennes d'ensemble (en trait plein) et les écarts-types des moyennes interannuelles des différents scénarios.**

Fig. 1: Evolution of annual average temperatures and precipitation of the Loire Basin at Montjean-sur-Loire between 1950 and 2100 according to all 21 climate projections from the ICC-Hydroqual project. Present-day historical values taken from the SAFRAN reanalysis appear in black. The horizontal segments in blue indicate overall mean values (solid lines) and standard deviations on the interannual means for the different scenarios.

© UMR Sisyphe.

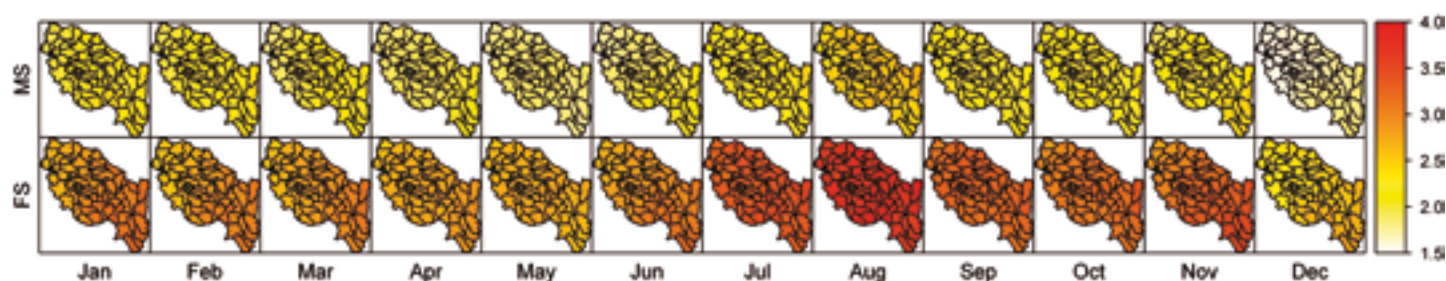


Fig. 2 : Changement des températures moyennes mensuelles entre le milieu du siècle (MS, ligne du haut), la fin du siècle (FS, ligne du bas) et 1971-2000, en degré Celsius selon la moyenne des 14 projections A1B du GIEC.

Fig. 2: Change in mean monthly temperatures between the middle of the century (MS, upper row) and the end (FS, lower row) as compared to the period 1971-2000, in degrees Celsius, according to IPCC's 14 A1B projections.
© Cemagref.

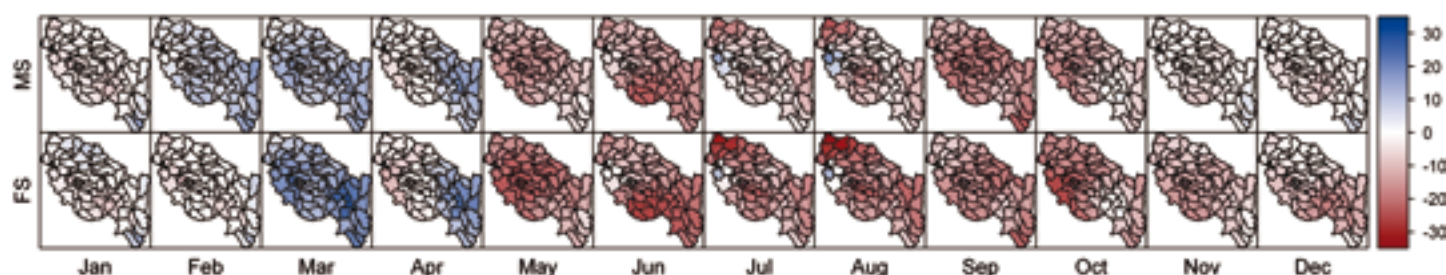


Fig. 3 : Changement des précipitations totales moyennes mensuelles entre le milieu du siècle (MS, ligne du haut), la fin du siècle (FS, ligne du bas) et 1971-2000, en % selon la moyenne des 14 projections A1B du GIEC.

Fig. 3: Change in mean monthly total rainfall between the middle of the century (MS, upper row) and the end (FS, lower row) as compared to the period 1971-2000, in percentage, according to IPCC's 14 A1B projections.
© Cemagref.

Loire. Sur cette même figure, nous avons représenté en noir les données de la réanalyse atmosphérique SAFRAN sur le temps présent, issues des données observées au niveau des stations météorologiques [Vidal *et al.* (2010)]. Il faut mentionner ici la particularité des simulations climatiques sous temps présent qui ne simulent pas la chronologie des événements actuels, mais seulement des réalisations possibles avec les émissions actuelles de gaz à effet de serre.

Nous avons vérifié la validité des propriétés statistiques reproduites par les scénarios climatiques sur le temps présent. Les biais sont faibles et la distribution des valeurs journalières assez fidèle. Pour les extrêmes pluviométriques, la dynamique saisonnière est bien reproduite, malgré une sous-estimation de leur variabilité par la chaîne modèles de climat/méthode de régionalisation. Dans la suite de ce travail, les résultats issus des 14 projections sous scénario d'émission des gaz à effet de serre A1B (GIEC AR4 : 14 A1B) sont analysés pour apprécier l'incertitude liée aux modèles climatiques (figures 2 et 3).

Aux deux horizons analysés au cours du XXI^e siècle, le changement climatique se caractérise sur l'ensemble

du bassin par un réchauffement de l'ordre de 2 °C ($\pm 0,4$ °C) en moyenne annuelle au milieu du siècle et de l'ordre de 2,8 °C ($\pm 0,7$) en fin du siècle. Il est plus important en été et automne, pour atteindre près de 4 °C en août en fin de siècle (figure 2). Ce réchauffement s'accompagne d'une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. L'évolution des cumuls pluviométriques mensuels est plus contrastée de manière spatiale et suivant les saisons (figure 3). On observe une forte diminution en été/automne, mais aussi de légères augmentations au printemps. Pour les intensités des événements extrêmes, des augmentations pour la partie amont du bassin sont mises en évidence. De plus, il est observé un décalage temporel progressif de la saison des extrêmes vers l'hiver avec diminution des épisodes d'automne. Sur la partie aval du bassin, les modifications sont moins marquées avec une majorité des changements se situant dans la limite ± 10 %.

“ Le changement climatique se caractérise sur l'ensemble du bassin par un réchauffement de l'ordre de 2 °C. ”

► BILAN HYDROLOGIQUE ET USAGE DE L'EAU DANS LE BASSIN DE LA LOIRE

Jean-François Vernoux – BRGM, Service EAU – jf.vernoux@brgm.fr

Pascal Billault – Agence de l'Eau Loire, Bretagne – pascal.billault@eau-loire-bretagne.fr

Didier Pennequin – BRGM, Service EAU – d.pennequin@brgm.fr

Le bassin de la Loire couvre une superficie de 117 000 km² et contient d'importants réservoirs d'eau souterraine, dont une partie des grands systèmes aquifères de la Beauce et du Cénomani. Il se situe dans une zone de pluviométrie moyenne, avec toutefois des écarts significatifs et de fortes variations dans le temps.

Le bilan hydrologique moyen sur l'ensemble du bassin affiche 813 mm/an de précipitations (environ 95 milliards de m³), 123 mm de ruissellement (14,4 milliards de m³), 129 mm d'infiltration (15 milliards de m³).

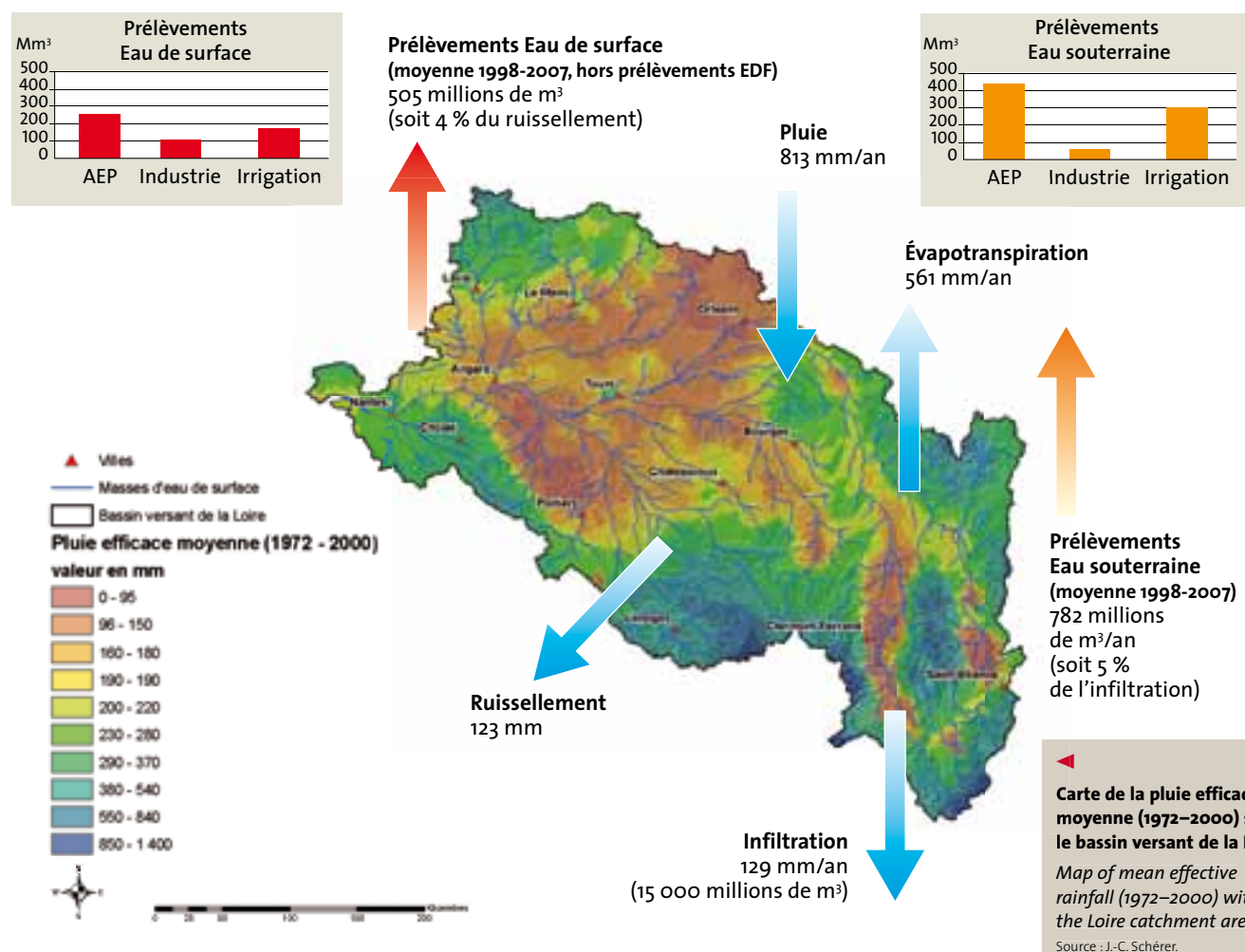
D'importantes quantités d'eau sont prélevées pour l'alimentation en eau potable (AEP), pour l'industrie et pour l'irrigation. Les prélèvements en eau sont utilisés majoritairement pour satisfaire les besoins de l'AEP (54 %), avant l'irrigation (35 %) et l'industrie (eau de refroidissement des centrales EDF exclue) qui consomme environ 11 % de l'eau prélevée.

Globalement, la part des prélèvements en eau de surface représente moins de 4 % des eaux de ruissellement, chiffre également valable pour les eaux souterraines, avec un prélèvement moyen annuel largement inférieur à la ressource renouvelable (environ 5 %).

Toutefois, ces chiffres doivent être nuancés car ils masquent des disparités

locales fortes avec des secteurs à moins de 150 mm par an et d'autres supérieurs à 500 mm, sur laquelle se superpose une distribution inégale des besoins en eau (forts par endroits, faibles dans d'autres). Ainsi certaines zones peuvent accuser des déficits estivaux importants en eaux souterraines et de surface. C'est notamment le cas dans les zones de répartition des eaux classées ainsi par décret en 1994 et 2003, où le déficit quantitatif est chronique et l'alimentation des cours d'eau par les nappes est souvent insuffisante en période estivale (Beauce, Marais Poitevin, bassin du Clain...). Dans d'autres cas, l'alimentation de la nappe est insuffisante au regard des prélèvements effectués, et le niveau piézométrique chute inexorablement (système aquifère du Cénomani).

Mais ces chiffres correspondent à des années moyennes, avec de grandes différences d'une année sur l'autre ; en année sèche on peut par exemple avoir des ressources renouvelables plus faibles et des prélèvements plus importants, ce qui peut provoquer des situations de manque d'eau. En général, les prélèvements agricoles sont répartis sur les quelques mois d'été et non pas sur toute l'année comme l'AEP, ce qui provoque un impact plus intense à une période où la ressource est moindre. ■

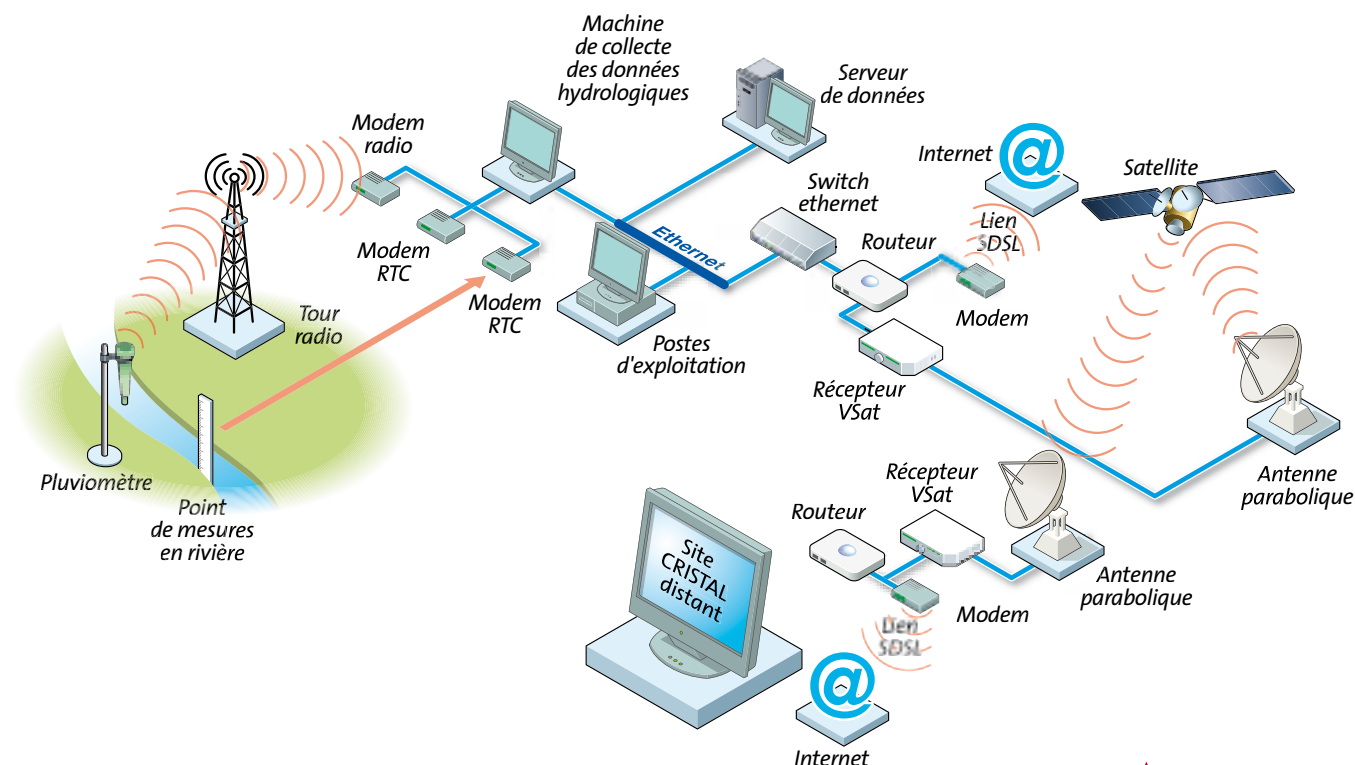


► RÉSEAU CRISTAL, SYSTÈME DE PRÉVISION DES CRUES DEPUIS 25 ANS

David Goutx – Chef du service Hydrométrie, Prévision des Étiages et des Crues (SHPC), DREAL Centre – david.GOUTX@developpement-durable.gouv.fr

David Besson – david-p.besson@developpement-durable.gouv.fr

Jacques Laurent – jacques-e.laurent@developpement-durable.gouv.fr



Opérationnel depuis 1985, le réseau CRISTAL permet de connaître et de suivre en permanence l'état hydrologique de la Loire et de ses affluents sur plus de 400 points de mesure de hauteurs d'eau et de pluies. Il fut conçu à l'origine pour anticiper les crues et optimiser la gestion du barrage de Villerest, en partenariat tri-partite associant l'Établissement Public Loire, l'État et l'Agence de l'eau Loire-Bretagne. En 2004, la propriété et la gestion du réseau CRISTAL ont été confiées à l'État (actuelle DREAL Centre) dans le cadre de ses missions régaliennes, tandis qu'une convention met à la disposition de l'Établissement Public Loire les données mesurées et un appui technique pour leur utilisation dans le cadre de la gestion des retenues de Naussac (Allier) et de Villerest (Loire). Depuis la réforme de l'hydrométrie, en 2005, le réseau CRISTAL est progressivement adapté au suivi des étiages.

Les informations enregistrées en continu par les capteurs de hauteurs (d'eau libre ou de pluie) circulent jusqu'au service de prévision des étiages et des crues de la DREAL Centre par liaison radio, réseau téléphonique et réseau privé virtuel (VPN), avec une possibilité de secours par voie satellitaire. Elles sont ensuite transmises au Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des

inondations (SCHAPI), et publiées, moins d'une heure plus tard, sur le site Internet www.vigicrues.ecologie.gouv.fr afin que chacun (citoyen vigilant, maire, préfet, pompiers, gendarmes, etc.) puisse suivre l'évolution de la situation et prendre les mesures utiles. Des efforts importants sont consentis par la DREAL Centre pour fiabiliser le réseau CRISTAL et lui donner la capacité de résister aux violents écoulements torrentiels qui caractérisent les crues majeures de la Loire et de la plupart de ses affluents amont tout en restant fonctionnel lors des étiages sévères.

L'exploitation des informations de hauteurs d'eau pour la prévision des étiages, des crues et la mise en œuvre de l'écrêtement par le barrage de Villerest nécessite leur transformation en informations de débits. La fiabilité de cette transformation conditionne étroitement la qualité des prévisions hydrologiques, aussi un soin tout particulier est-il porté à l'étalonnage régulier (environ mensuel et durant chaque épisode de crue ou d'étiage, de jour comme de nuit) des relations entre hauteur d'eau et débit (appelées « courbes de tarage ») par des mesures ponctuelles effectuées par les hydromètres de la DREAL Centre. ■

▲ Schéma simplifié d'un site d'exploitation CRISTAL.

A simplified diagram of a CRISTAL work facility.

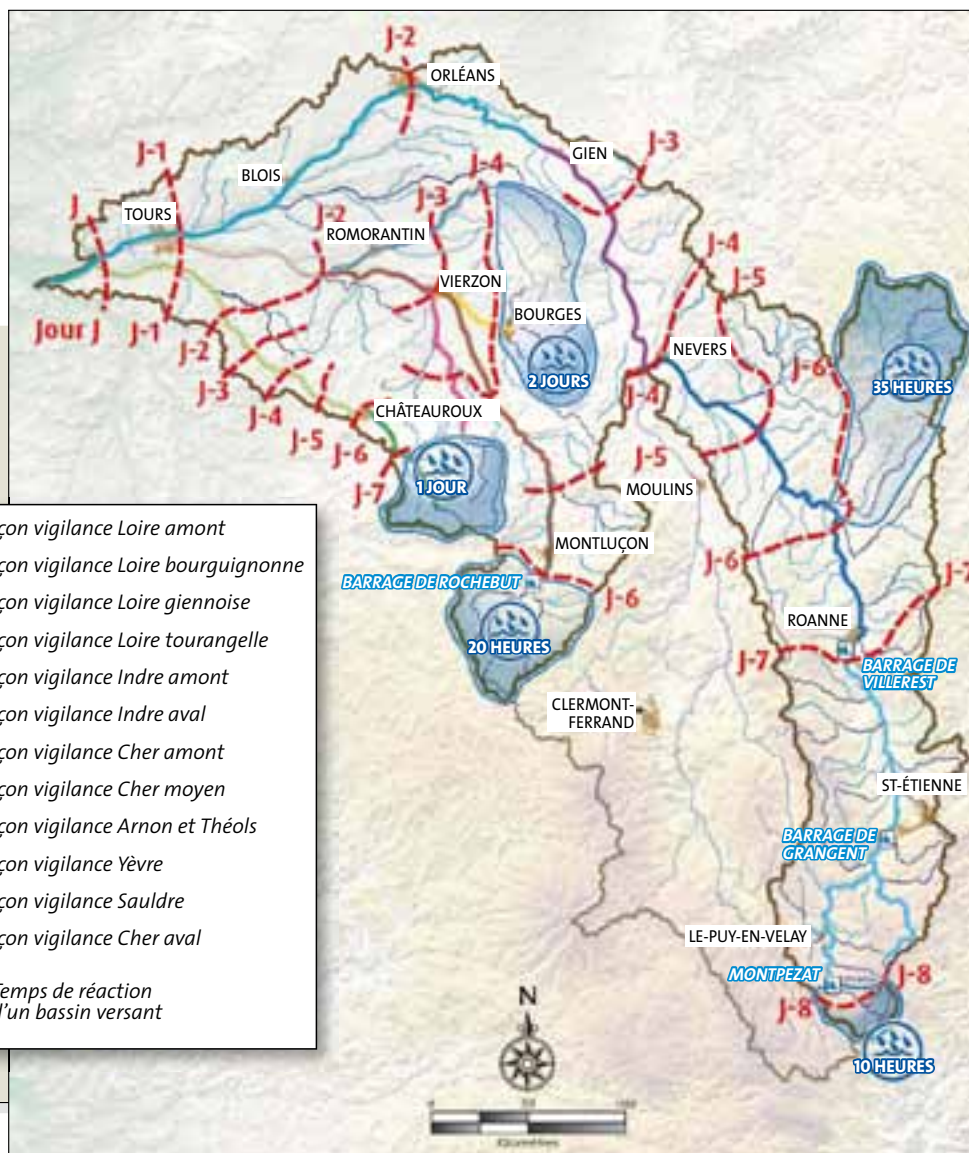
© BRGM - Art Presse – D'après : DREAL Centre.

►
Isochrones
crédibles
d'une crue
généralisée
convergeant
à Langeais
représentés
sur les stations
de mesure
du système CRISTAL.

Plausible isochrons
for a widespread
flood converging
on Langeais,
represented on
the measurement
stations of
the CRISTAL system.

© DREAL Centre. © Fond BD
Carthage® IGN 2007.

• Stations
de mesure
collectables
par le système
CRISTAL.



Évolution du régime hydrologique saisonnier au XXI^e siècle

La deuxième étape de la démarche consiste à transformer les projections climatiques en projections hydrologiques, si possible à partir de plusieurs modèles hydrologiques afin de mieux apprécier la robustesse des évolutions ainsi projetées. Ces modèles sont d'abord calés sur les conditions actuelles, puis utilisés pour simuler les évolutions potentielles des débits des cours d'eau selon les projections climatiques désagrégées.

Nous avons ici retenu deux modèles hydrologiques qui étaient représentatifs des différences entre six modèles testés dans une étude des impacts hydrologiques du changement climatique dans les bassins de la Somme [Ducharne *et al.* (2009)]. Ces deux modèles, à savoir le modèle CLSM [Gascoin *et al.* (2009)] et le modèle EROS du BRGM [Thiery et Moutzopoulos (1995)] ont été mis en œuvre en subdivisant le bassin de la Loire en 68 sous-bassins, homogènes d'un point de vue climatique et géologique, avec des tailles comprises entre 120 et

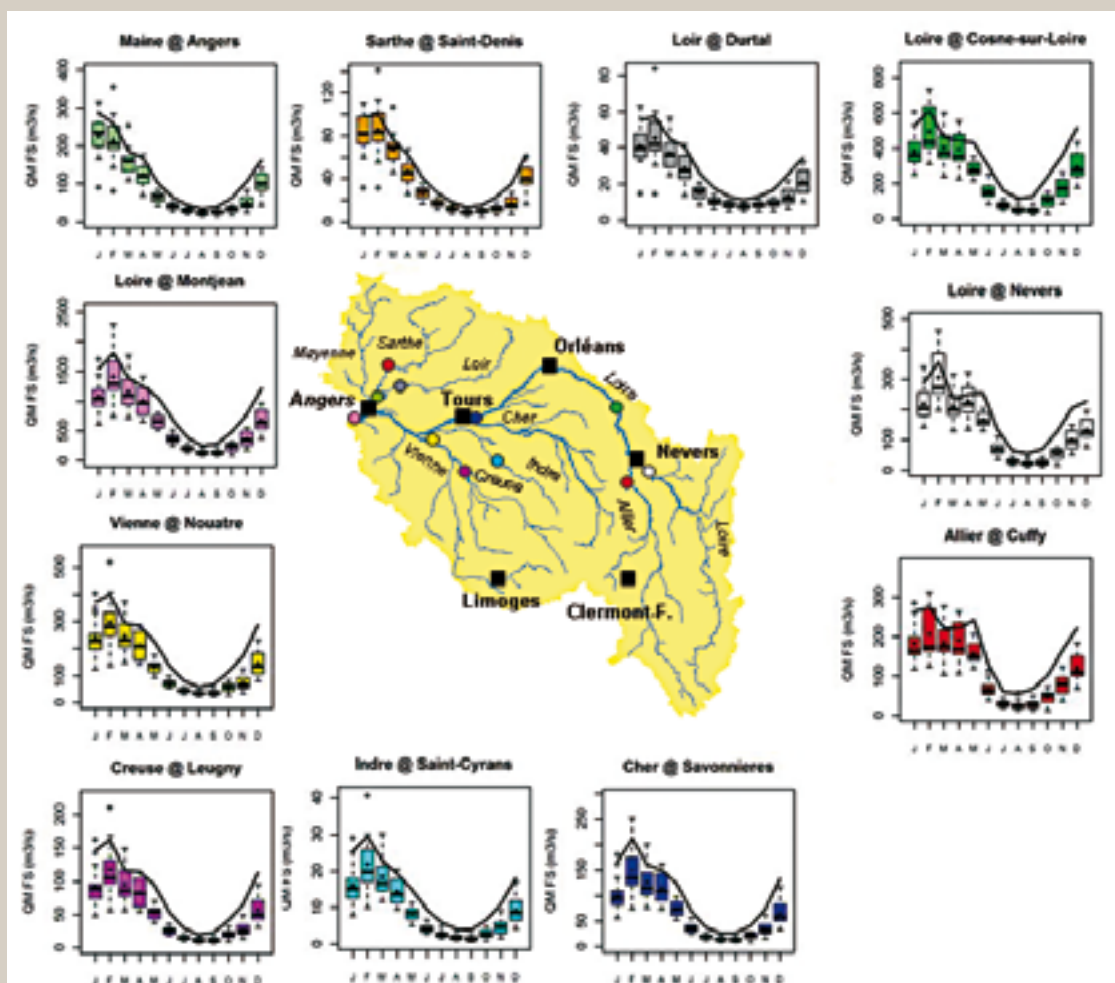
3 700 km² (ces sous-bassins apparaissent en figures 2 et 3). Ces modèles ont été calés pour bien reproduire les débits observés sous le climat observé des dernières décennies. La simulation des extrêmes de crue et d'étiage est cependant moins bonne du fait d'un calage privilégié sur les débits fréquents. S'ajoute, sur la Loire, une complexité supplémentaire du fait d'actions humaines perturbant le cycle hydrologique naturel (barrages-réservoirs et prélèvements d'eau).

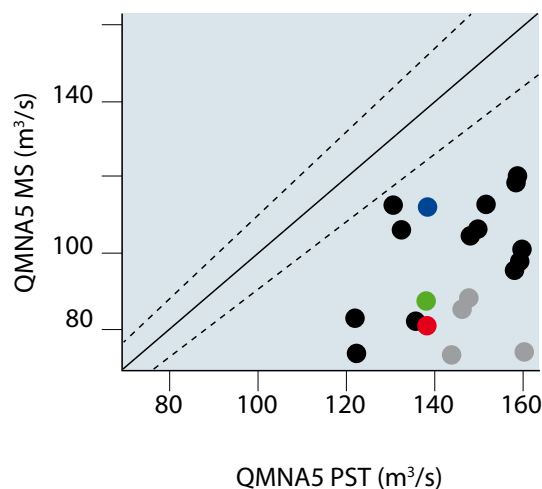
Les changements projetés pour le XXI^e siècle sont beaucoup plus importants que les imperfections ci-dessus. Ils indiquent d'abord une baisse importante des débits moyens annuels, dès le milieu du siècle. À Montjean-sur-Loire, la station hydrométrique la plus aval non influencée par l'estuaire (surface amont de 109 930 km²), la diminution du débit annuel annoncée par CLSM est d'environ 50 %. Celle suggérée par EROS est plus modérée, de l'ordre de 30 % avec cependant une incertitude de l'ordre de 15 % pour les deux modèles. Il faut noter que pour un exercice similaire sur le bassin de la Seine et de

Les changements projetés pour le XXI^e siècle indiquent une baisse importante des débits.

Fig. 4 : Évolution saisonnière en onze stations des débits mensuels en fin de siècle selon le modèle EROS (boîtes à moustaches) comparée aux valeurs observées sur le temps présent (courbe noire).
Les boîtes à moustaches résumant la dispersion des débits mensuels simulés à partir de 14 projections A1B du GIEC : le rectangle est défini par les premier et troisième quartiles et coupé par la médiane ; la longueur des « moustaches » est définie par 1,5 fois l'écart interquartile ; la moyenne est représentée par un losange noir.

Fig. 4: Seasonal evolution in eleven stations of monthly discharges at the end of the century according to the EROS model (box and whisker plots) compared to current observed values (black curve). The box and whisker plots summarize the scatter monthly discharge values simulated from IPCC's 14 A1B projections: the rectangle is defined by the first and third quartiles and is intersected by the median: the length of the "whiskers" is defined by 1.5 times the interquartile interval; the mean value is represented by a black diamond shape.



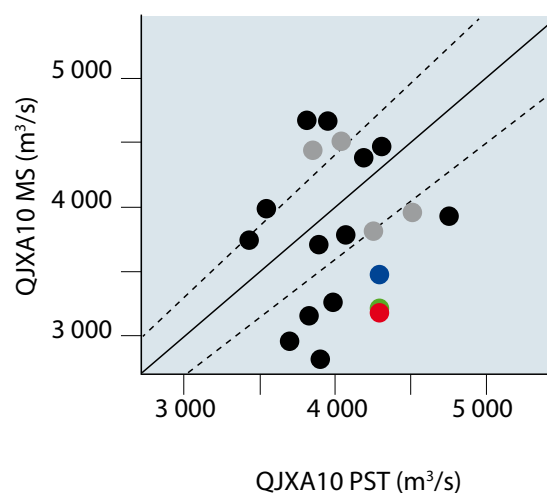


la Somme [Ducharne *et al.* (2009)], l'assèchement plus prononcé avec CLSM sous changement climatique avait déjà été remarqué, tandis que le modèle EROS simulait des impacts quantitativement très proches de ceux du modèle hydrogéologique finement distribué MARTHE, également développé par le BRGM.

Si l'on s'intéresse ensuite aux variations saisonnières le long de la Loire et de ses principaux affluents (figure 4), la diminution des débits se répercute davantage sur les basses eaux que sur les hautes eaux, dont la baisse est moins robuste. En basses eaux, tous les éléments qui constituent les boîtes à moustaches (description dans la légende) se situent sous la courbe des débits observés : la diminution est robuste en période estivale ; la durée de la période d'étiage augmente au cours du XXI^e siècle. En hautes eaux, le signal est moins cohérent.

Évolution du régime des étiages et des crues au XXI^e siècle

Les chroniques de débit journalier générées par la modélisation peuvent aussi être exploitées pour caractériser les valeurs extrêmes, rarement dépassées (en crue) ou sous passées (en étiage) (encadré p.86). Les indicateurs retenus dérivent des techniques classiques d'analyse fréquentielle pour l'hydrologie, et sont couramment utilisés pour la gestion opérationnelle des eaux et la prévention des risques. Les étiages sévères sont ainsi caractérisés par le débit mensuel minimal de temps de retour 5 ans (QMNA5), débit de référence en étiage pris en application du code de l'environnement de la loi sur l'eau. Pour les crues sévères, nous avons choisi le débit journalier maximal annuel de temps de retour 10 ans (QJXA10). Nous nous sommes ici attachés aux



projections simulées avec le modèle EROS, qui nous semblent plus plausibles que celles obtenues à partir du modèle CLSM.

Sur l'ensemble des onze stations du bassin de la Loire qui sont représentées en figure 5, le QMNA5 baisserait fortement, de l'ordre de 25 à 50 % en milieu du siècle, et entre 30 et 60 % en fin du siècle. Concernant le régime des crues, le principal résultat est l'absence d'évolution significative, les changements simulés étant modérés, dans la limite ± 10 %, et avec une dispersion importante. En fin du siècle, les moyennes des changements sont légèrement négatives ; cependant les incertitudes sont très importantes. La dispersion des résultats est telle qu'il n'est pas possible de conclure de manière définitive sur l'évolution de cette caractéristique des crues.

Ces tendances entre le milieu du siècle et le temps présent, simulées à Montjean-sur-Loire pour les 21 scénarios, sont illustrées en figure 5. La nette diminution des débits d'étiage (à gauche) est systématique (tous les points sont sous la première bissectrice) malgré la dispersion des projections. Pour les débits de crue, en revanche, il n'y a pas de tendance partagée. La dispersion du nuage est forte, et les points se situent de part et d'autre de la bissectrice.

La restriction des ressources conduira à exacerber les questions déjà cruciales de l'usage de l'eau.

Fig. 5 : Évolution des variables caractéristiques de crue (QJXA10) et d'étiage (QMNA5) simulées par le modèle EROS à Montjean-sur-Loire pour le milieu du siècle. L'axe horizontal permet de visualiser les indicateurs des débits extrêmes correspondant au climat simulé pour le temps présent (PST). L'axe vertical représente les mêmes indicateurs, mais obtenus pour le climat simulé au milieu du XXI^e siècle (MS). Chaque point représente la variation entre le temps présent et le milieu de siècle simulée par une projection climatique (les couleurs correspondent aux familles de projections : en noir (14 modèles climatiques A1B), en vert (Arpège V4, A1B), en rouge (Arpège V4, A2), en bleu (Arpège V4, B1), en gris (Arpège V4, quatre différents états initiaux pour A1B)). Les points se situant en dessous de la diagonale indiquent une tendance à la baisse, les points au-dessus une tendance à la hausse. Les droites en pointillés sont des enveloppes à ± 10 % de la valeur obtenue sous climat présent.

Fig. 5: The evolution of the characteristics of high (QJXA10) and low (QMNA5) water episodes simulated for mid-century at Montjean-sur-Loire using the EROS model. The horizontal axis makes it possible to visualize the indicators of extreme discharges corresponding to the climate simulated for the present day (PST). The vertical axis represents the same indicators, but obtained for the climate simulated for the middle of the 21st century (MS). Each point displays the change between the present and the mid-century for a given climate projection (colours refer to the different climatic projections). The dots located beneath the diagonal indicate a tendency to drop and those above, a tendency to rise. The dotted lines are the envelopes at ± 10 % of the value obtained under current climate conditions.

© Cemagref.

► PRÉVISION – PRÉVENTION – PROTECTION : L'ÉTUDE « 3P » ALLIER

86

Engagée dans le cadre du plan Loire grandeur nature 2007-2013, et financée par les collectivités riveraines de l'Allier, l'État et l'Europe, l'étude globale « 3P » Prévision/Prévention/Protection contre les inondations sur le bassin de l'Allier (14 000 km²) a pour objectif essentiel de permettre un partage des connaissances sur les risques liés aux inondations (aléas, enjeux, vulnérabilité), conduisant à l'élaboration de plans d'action cohérents et concertés pour réduire ce risque. Elle s'inscrit en anticipation de l'application de la Directive « inondation ».

L'étude s'articule autour d'un premier volet, qui consiste en un diagnostic complet du territoire au regard des aspects hydrologiques et hydrauliques, réglementaires, socio-économiques, environnementaux, ainsi que la prévision des crues.

Un second volet conduira à des propositions d'amélioration concernant la prévision, la prévention et la protection contre les crues, sur la base des différents constats et enjeux mis en lumière par le diagnostic. Cette étude permet ainsi de capitaliser, exploiter et partager l'importante quantité d'informations disponibles sur le territoire, en s'appuyant notamment sur un large dispositif de concertation, ou encore l'élaboration d'une base documentaire et cartographique régulièrement enrichie visant à mettre à disposition les données collectées. L'étude « 3P » Allier a été engagée au début de l'année 2010 pour une durée d'un an. Des documents synthétiques représentatifs des principaux résultats sont d'ores et déjà disponibles sur les pages du site du plan Loire dédiées à l'étude : www.plan-loire.fr/etude3P-allier.

Contact : ddre@eptb-loire.fr



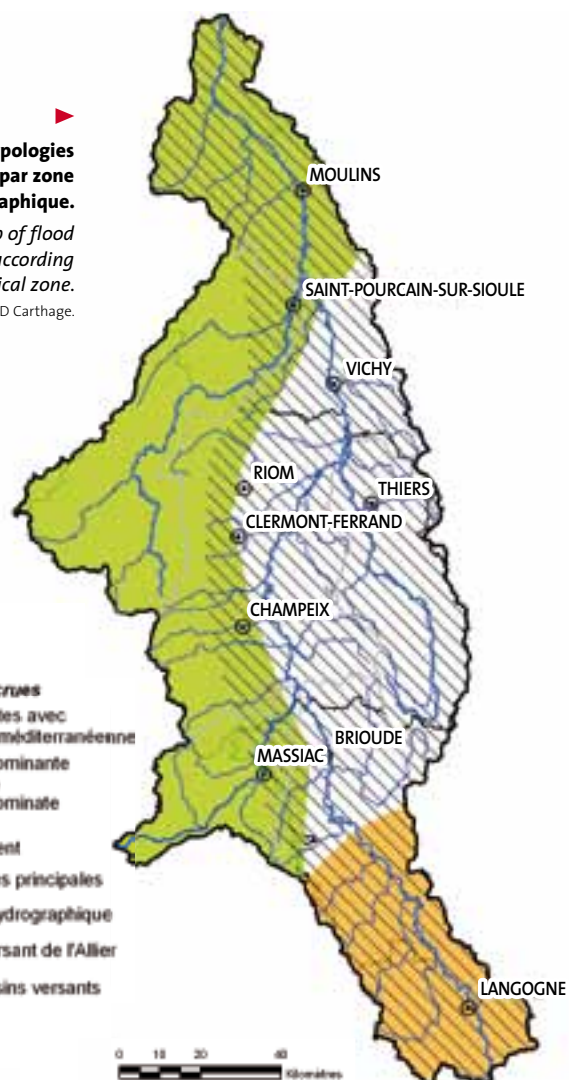
Carte des typologies de crue par zone géographique.

A map of flood typologies according to geographical zone.

© BD Carthage.

Typologies des crues

- Crues mixtes avec remontée méditerranéenne
- Crues à dominante océanique
- Crues à dominante cévenole
- Département
- Communes principales
- Réseau hydrographique
- Bassin versant de l'Allier
- Sous-bassins versants



L'étude des conséquences du changement climatique sur les régimes hydrologiques implique la mise en œuvre d'une chaîne de modélisation complexe, en climat présent comme en climat futur. La construction de cette chaîne s'accompagne d'incertitudes à tous les niveaux ; certaines incertitudes concernent les scénarios d'émissions des gaz à effet de serre et aérosols reposant sur des considérations économiques, politiques, démographiques ; d'autres se situent au niveau des modèles climatiques, des techniques de désagrégation, ou alors des modèles hydrologiques. Dans ce projet nous avons analysé la convergence des résultats des deux modèles hydrologiques et exploré l'incertitude liée aux modèles climatiques par la comparaison de multiples projections. La tendance à une diminution des débits moyens et

des débits d'étiage, et à un allongement des périodes de faibles débits, est partagée par les deux modèles hydrologiques. Cette restriction des ressources en eau, notamment aux bas débits, conduira à exacerber les questions déjà cruciales de l'usage de l'eau et de la gestion des étiages. Une stratégie d'adaptation selon la disponibilité de l'eau serait à élaborer. Cette modification profonde attendue est liée à l'augmentation des pertes par évapotranspiration et à la diminution des précipitations liquides et neigeuses.

L'absence de tendance significative sur l'évolution des crues est aussi à signaler, que ce soit sur la dynamique ou sur l'intensité, avec des changements modérés sans cohérence de signe. Ce résultat doit cependant être



▲ **Le barrage de Villerset sur la Loire.
Crue du 3 novembre 2008.**

*Villerset Dam on the Loire River.
Flood on 3 November 2008.*

© Direction départementale des Territoires de la Loire (DDT 42).

regardé avec précaution vu les incertitudes fortes qui l'entachent, notamment sur la capacité des modèles climatiques à reproduire les précipitations extrêmes.

Enfin, ces tendances sont conformes aux évolutions observées sur un bassin voisin, la Seine, étudié dans le projet « RExHySS » avec les mêmes projections climatiques [Ducharne *et al.* (2009)]. Il convient aussi de rappeler que cette étude se limite à l'impact direct du changement climatique sans tenir compte des usages de l'eau et de l'évolution d'occupation des terres ou d'aménagement. ■

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ICC-HYDROQUAL (Impact du changement climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, régime thermique, QUALité), financé par l'Établissement Public Loire et FEDER.



The Loire River under Pressure from Climate Change

*Variations in the water resource during the 21st century expected due to the effects of climate change are estimated for the Loire Basin. A set of 21 large-scale climate projections based on a number of emissions scenarios has been used. These projections have been drawn from several general circulation models: international climate models for IPCC's fourth report (IPCC AR4), on the one hand, and various versions of Arpège, Météo-France's (French national weather service) model, on the other. The large-scale climate projections derived from these models are used after regionalization. Three time ranges were studied: 1950-2000 (for the present), 2046-2065 (mid-century) and 2081-2100 (end of the century). The climate projections were then converted into hydrological projections using two semi-global hydrological models: the CLSM model (Gascoin *et al.*, 2009) and BRGM's ÉROS model (Thiéry et Moutzopoulos, 1995). These models,*

which subdivide the Loire Basin into 68 sub-basins uniform geologically and climate-wise, are first calibrated on the basis of flow rates (and of groundwater levels, in the case of EROS) observed over the past 35 years. These are then used to simulate possible evolutions in flow rates of watercourses in terms of the different climate projections. After analysis of uncertainties, a decrease in mean discharge and mean low water is observed, together with a lengthening of low-discharge periods liable to aggravate water-use conflicts. This extensive anticipated alteration stems from the combined effects of increased losses via evapotranspiration and decreased precipitation. However, no significant tendency towards changes in the dynamics of flooding is indicated. This latter result should nevertheless be regarded with circumspection in view of the high levels of uncertainty.

Bibliographie : Boé, J., Terray, L., Habets, F. & Martin, E. (2006) – A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *Journal of Geophysical Research*, 111, D23106. Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J. (2009) – Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, Rapport final du projet RExHySS, Programme GICC, 62 pp. http://www.sisyph.jussieu.fr/~agnes/rehyss/documents_rapport.php. GIEC (2007) – Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages. Thiéry et Moutzopoulos (1995) – Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. In : VIII^{èmes} journée hydrologiques de l'ORSTOM « Régionalisation en hydrologie, application au développement », Le Barbé et E. Servat (Eds), ORSTOM Editions, pp. 285-295. Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyrou J.-M. (2010) – A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644.