



MEDIAS/GB/db/2002/161

Toulouse, 25 novembre 2002

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET IMPACT SUR LE RÉGIME DES EAUX EN FRANCE

DOCUMENT RÉALISÉ POUR LE COMPTE DE
L'UICN À LA DEMANDE DE LA MIES

AUTEURS :

Jean-Luc REDAUD, Ingénieur en Chef du Génie Rural, des Eaux et Forêts –
Conseil Général du GREF
Joël NOILHAN, Météo-France/CNRM
Marc GILLET, Chef de Projet ONERC
Mireille HUC & Gérard BEGNI MEDIAS-France

*Document établi avec le concours de la MIES (Mission Interministérielle à l'effet de Serre),
et du MEDD [Ministère de l'Écologie et du développement Durable – Direction de l'Eau et
DPPR (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques)]*

AVERTISSEMENT

Le présent document a été conçu en deux parties. La première d'entre elles, très synthétique, suit le plan recommandé par l'UICN dans le document «Protocol for country baseline studies – Water, wetlands and climate change – Mediterranean component ». Il a été conçu de manière à pouvoir alimenter commodément une table ronde sur les sujets précités, dans le cadre de la réunion d'Athènes. Il tient lieu du résumé demandé. Les éléments techniques indispensables à la compréhension et à la justification de cette première partie se présentent sous la forme d'un dossier constituée de trois volets, « état des ressources en eau en France », « impacts du changement climatique sur le régime des eaux » et « mesures récentes adoptées ». Celle-ci est présentée à la manière d'un rapport classique, d'une plus grande pérennité et qui pourra être réutilisée en tant que tel.

A - LE CONTEXTE FRANÇAIS

A.1 -SITUATION ACTUELLE DES RESSOURCES EN EAU ET DES ZONES HUMIDES EN FRANCE

Les précipitations atteignent environ 440 milliards de m³ par an, dont en moyenne 100 milliards de m³ par an disponibles pour les usages humains (60 milliards de m³ lors des années de sécheresse, soit une toutes les décennies), après prise en compte de l'évapotranspiration, des problèmes d'accessibilité et des pertes en période d'inondations. Cependant, ces chiffres moyens masquent l'irrégularité de la répartition des ressources dans le temps et l'espace, le développement des irrigations (*voir Dossier technique 1.3*) dans la moitié sud du pays mobilise des volumes d'eau importants qui créent des situations locales de déficit forts les années de sécheresse. La fin des années 1980 et le début des années 1990 ont été caractérisés par des sécheresses prolongées.

La France bénéficie de plusieurs bassins sédimentaires de vaste ampleur intéressants pour la mobilisation d'eaux souterraines (bassin Parisien, bassin Aquitain) et de nappes d'accompagnement des principales rivières. Ces nappes constituent une ressource privilégiée pour l'alimentation en eau potable.

La majorité des prélèvements est effectuée dans les eaux de surface : les eaux souterraines n'en représentent en moyenne que 15%. Toutefois, 56 % de l'eau alimentant les réseaux de distribution publics proviennent des nappes phréatiques.

Des inondations importantes (*voir Dossier technique 1.4*) peuvent occuper plusieurs semaines les vastes plaines sous influence du climat atlantique, tandis que des crues torrentielles et violentes caractérisent les rivières méditerranéennes.

Enfin, la France dispose d'un réseau de lacs et de zones humides variés et de grande valeur écologique. Les zones humides couvrent environ 2 millions d'hectares. Un rapport établi en 1994 par l'Etat a mis en évidence une dégradation forte du réseau des zones humides dont il a été estimé que plus de la moitié de celles qui existaient, il y a 30 ans, ont disparu ou ont été fortement dégradées.

A.2 - PERSPECTIVES CONCERNANT LES IMPACTS HYDROLOGIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE

Les simulations issues de modèles de circulation générale (MCG) sous hypothèse du doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique (à l' horizon 2050 suivant divers scénarios de croissance des gaz à effet de serre) s'accordent sur des anomalies très marquées des variables atmosphériques près de la surface par rapport au climat actuel. Bien qu'encore dispersés, les scénarios disponibles sur la France simulent des perturbations notables des champs de précipitation et de température de l'air attendues pour la première moitié du 21^{ème} siècle : augmentation des précipitations hivernales et diminution des précipitations estivales, augmentation de la température de l'air, plus marquée l'été que l'hiver. L'utilisation de modèles régionaux hydro-météorologiques mis en place sur les principaux bassins versants Français a permis une première évaluation des impacts hydrologiques en réponse aux

anomalies mensuelles simulées par les MCG sous hypothèse du doublement de la concentration atmosphérique du CO₂. Ces études (voir rapport détaillé) montrent que l'augmentation des précipitations hivernales augmente le contenu en eau du sol et donc le ruissellement de surface et le drainage. Sur les zones montagneuses, malgré l'augmentation des précipitations, l'augmentation simultanée de la température de l'air provoque une réduction des accumulations hivernales (particulièrement en zone de moyenne montagne). La diminution des précipitations estivales, ainsi que l'augmentation de la température de l'air augmentent le déficit hydrique du sol, ce qui entraîne une désaturation des sols plus précoce et des étiages plus sévères en automne.

• **Impact hydrologique sur un premier bassin versant typique : le Rhône**

Une étude détaillée (GICC-Rhône) a été conduite sur la partie française du bassin versant qui englobe une variabilité importante de régimes climatiques et hydrologiques : régime continental pour le bassin de la Saône, climat de montagne et régime hydrologique nival pour les bassins du Doubs, de l'Isère et de la Haute-Durance, climat méditerranéen pour la Durance et climat cévenol dans la partie Sud-Est du bassin. On peut ainsi examiner l'impact différentiel du changement climatique en fonction des différents contextes hydrologiques actuels.

Pour les rivières alpines, différents scénarios climatiques montrent que les anomalies du manteau neigeux auraient un impact hydrologique important. Par exemple, on observerait pour la Durance une réduction très importante de l'équivalent eau et fonte nivale plus précoce d'un mois environ. Cette fonte précoce entraînerait un pic de crue au mois de mai, ce qui constitue une avance d'un mois environ, et par la suite des étiages beaucoup plus prononcés en juillet et août.

Les mêmes modèles prédisent des impacts très différents suivant les zones du bassin, avec par exemple une augmentation du débit annuel de la Saône et une diminution sur les bassins du Sud. Ces réponses contrastées suivant les domaines climatiques se compenseraient en grande partie dans le cas du bassin versant du Rhône, ce qui conduirait à une faible réduction du volume d'eau annuel à l'exutoire du Rhône.

• **Impact hydrologique sur un second bassin versant typique : Adour-Garonne**

Les modèles hydrologiques prédisent un impact plus important des anomalies climatiques sur les Pyrénées que sur les Alpes, du fait de leur altitude plus faible et d'une augmentation plus modérée des précipitations hivernales. Il en résulterait une perturbation importante de la composante nivale sur le bassin Adour-Garonne, ce qui pourrait entraîner des étiages plus précoces. Cependant, la présence dans ce bassin d'aquifères importants, qui seraient mieux alimentés en hiver du fait de l'augmentation des précipitations, pourrait éventuellement compenser les déficits estivaux, dans une proportion qui reste à étudier.

• **Impact hydrologique sur les petits bassins littoraux méditerranéens et occurrence des phénomènes climatiques extrêmes**

Le problème de l'impact du changement climatique est plus difficile à traiter sur les petits bassins que sur les grands bassins, du fait des différences d'échelles, à la fois spatiales et temporelles entre les scénarios MCG (de l'ordre de la centaine de kms et anomalies atmosphériques mensuelles) et les petits bassins versants (de l'ordre du km et temps de réponse de l'ordre de l'heure). On peut cependant imaginer que le changement climatique s'accompagnera de crues automnales et hivernales plus fortes et de périodes de sécheresse plus marquées.

La question de l'augmentation de la fréquence des crues fortes ne peut être traitée par l'approche numérique utilisée jusqu'à présent sur les grands bassins. Il faudrait pour cela pouvoir interpréter les modélisations MCG en terme d'occurrence de phénomènes extrêmes, ce qui se situe jusqu'à présent au-delà des limites des MCG. De même, l'analyse statistique de ces épisodes extrêmes pour la période actuelle ne permet pas de discerner d'évolution dans l'occurrence de ces phénomènes.

Par contre, indépendamment de la question du changement climatique, la prévision ponctuelle de ces crues peut être réalisée avec des modèles météorologiques à forte résolution (maille de l'ordre du kilomètre), sur des zones géographiques limitées, et pour des échéances temporelles courtes (de l'ordre de la journée) en utilisant des analyses fréquentes des champs d'humidité atmosphérique. Le couplage de ces modèles de précipitations avec des modèles hydrologiques de crues rapides est en cours de test dans la communauté scientifique (projets soutenus par les programmes nationaux PATOM et PNRH).

A.3 - DOMAINES LES PLUS VULNERABLES ET LES PLUS SENSIBLES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

- **Anticipation des phénomènes d'étiage** dans certains bassins versants (décrite dans la section précédente).

Cette anticipation pourrait particulièrement augmenter les problèmes d'utilisation de l'eau déjà présents dans le bassin Adour-Garonne, du fait de l'augmentation des cultures irriguées au cours de ces dernières années.

- **Accroissement de l'évapotranspiration et modification des calendriers agricoles.**

- **Zones humides**

Deux mécanismes liés au changement climatique pourraient conduire à une invasion d'eaux marines des étangs littoraux et du delta de la Camargue : le relèvement du niveau des mers ainsi que la subsidence de la zone côtière par défaut d'alimentation en amont.

- **Ecosystèmes forestiers**

Un réchauffement climatique de l'ordre de 3° pourrait entraîner une contraction des zones naturelles de végétation à cause de l'aridité et une légère montée des étages de végétation avec une décroissance de la productivité. Les risques liés à l'incendie seraient accrus par un allongement des périodes de sécheresse.

- **Crués méditerranéennes**

Indépendamment de la question de l'augmentation de la fréquence de phénomènes climatiques extrêmes, l'augmentation des pluies hivernales peut faire craindre une multiplication des phénomènes d'inondations.

B - INSTITUTIONS

B.1 - INSTITUTIONS/RESEAUX CONCERNES

Créée en 1992, la **Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES)** est chargée de coordonner l'action de la France dans sa lutte contre les émissions de gaz à effet de serre tant au niveau national que dans les instances européennes et internationales. Elle a fait l'objet d'une réforme en juin 1998 par modification du décret la régissant : renforcée dans ses moyens, elle a été rattachée au Premier Ministre (tout en étant placée à la disposition du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable).

Au niveau français, un premier programme national d'action a été défini en 1993, puis revu en 1995 et en 1997. Il s'agissait pour l'essentiel de réaliser l'objectif contenu dans la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (UNFCCC) dite de Rio, de stabilisation des émissions en 2000 à leur niveau de 1990. Désormais, le nouveau Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC) pour la première décennie du 21ème siècle, validé par la Commission Interministérielle de l'Effet de Serre du 19 janvier 2000 est cohérent avec les objectifs souscrits par l'Europe et la France dans le cadre du protocole de Kyoto (stabilisation en 2010 des émissions de GES au niveau qu'elles atteignaient en 1990).

La MIES pour assurer ses missions s'appuie sur plusieurs réseaux :

- réseaux de correspondants dans les principales directions des ministères concernés ;
- réseaux de spécialistes des questions de coopération est-ouest ou nord-sud. Ils permettent d'élaborer la participation française aux mécanismes créés dans ce domaine par le Protocole de Kyoto ;
- réseaux d'experts scientifiques et économistes mobilisables en France, à travers le comité de coordination de l'expertise scientifique mis en place auprès de la MIES, en coopération avec le service de recherche MEDD ;
- réseaux de centres de recherche internationaux ou étrangers sur les aspects socio-économiques de politiques de prévention des changements climatiques.

Le PNLCC n'aborde pas les questions des impacts du changement climatique ni de l'adaptation.

On trouvera dans la troisième communication nationale à la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques l'état des recherches sur les impacts. Les études sur les impacts sont largement développées en France, principalement sous l'égide du programme de recherche Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC) du MEDD.

Un **Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique** (ONERC), en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre mer, a été créé par la loi du 19 février 2001, pour collecter les informations, études et recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux phénomènes climatiques extrêmes, en liaison avec les établissements et instituts de recherche concernés et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cet observatoire, en cours de constitution, pourra faire des propositions en matière d'adaptation.

Instituts de recherche impliqués

De très nombreux organismes français ont effectué des recherches ou collecté des informations relatives au changement climatique : CNRS, Météo-France, Cemagref, Cirad, Ifen, Ifremer, Ined, Inra, Inserm, IRD, GIP Medias-France.

B.2 – COORDINATION

Comme expliqué plus haut, la MIES, de par sa nature interministérielle, coordonne toutes les questions liées au changement climatique causé par l'effet de serre et ses impacts.

La recherche appliquée à caractère environnemental est coordonnée par le MEDD (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable).

La recherche à caractère académique est menée, comme partout ailleurs, dans les Universités. De plus, le Ministère de la Recherche dispose d'une structure spécifique, le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), organisé en divers instituts, notamment l'INSUE (Institut National des Sciences de l'Univers et de l'Environnement). Il existe, de plus, des structures de recherche spécifique telles que l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), l'INRA (Institut National de la recherche Agronomique), le CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) ou le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et, dans le domaine météorologique, le CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) de Météo-France.

En matière décisionnelle, les acteurs sont selon les sujets le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, le Ministère de l'Agriculture et leurs structures décentralisées, et, en cas de crise telles que les inondations, le Ministère de l'Intérieur. Elles agissent en concertations avec les élus et les représentants de la société civile à l'échelle régionale et locale.

C - INTEGRATION DES POLITIQUES ET DES PRATIQUES

La France a adopté, sous la conduite de la MIES, un Programme National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC) qui vise principalement les dispositifs de réduction de production des gaz à effet de serre et aborde encore peu les mesures adaptatives.

Les trois lois fondamentales sur l'eau de 1964 (création des Comités de Bassin et des Agences de l'Eau), de 1992 (mise en place de nouveaux outils de planification) et de 1995 (renforcement des dispositifs de lutte contre les risques naturels) constituent le cadre général d'intervention des pouvoirs publics. Elles ont conduit le pays à mieux s'armer pour lutter contre les effets des sécheresses, des inondations et des pollutions. Le Gouvernement envisage de proposer prochainement des nouveaux projet de loi sur l'eau et sur les risques naturels qui devraient renforcer ces dispositifs.

D - STRATEGIES ADAPTATIVES

D.1 – INTRODUCTION

La France n'a pas encore défini de programme national d'adaptation au changement climatique. En revanche, il existe des lois sur l'aménagement du territoire, sur la protection de l'environnement, et des plans, découlant de ces lois, de prévention des risques naturels et de gestion intégrée des espaces, milieux et ressources naturelles. Il convient de noter que de nombreux systèmes sont mal adaptés aux conditions climatiques d'aujourd'hui, et à la variabilité de ce climat et que, par conséquent, un point de départ consisterait à retenir les mesures permettant de renforcer la résistance de ces systèmes aux conditions actuelles. Ces mesures concourraient à mieux protéger le pays des impacts éventuels du changement climatique sur le régime des eaux, même si ses effets sont encore mal connus.

Pour ce qui concerne le régime des eaux, les études à horizon de 50 ans, mettent en évidence les points d'inquiétude suivants :

- anticipation des phénomènes d'étiage : un mois sur le bassin du Rhône, à l'étude sur le bassin de la Garonne
- accroissement de l'évapotranspiration et modification des calendriers agricoles :
- multiplication de crues méditerranéennes dévastatrices
- risques concernant certaines zones côtières qui pourraient être sensibles à un relèvement du niveau des mers (delta de la Camargue en zone méditerranéenne)

D.2 - LUTTE CONTRE LES SECHERESSES

En application de la loi sur l'eau de 1992, des SDAGE¹ ont été établis par grands bassins qui fixent des débits objectifs d'étiage pour les principales rivières soumises à de forts prélèvements et définissent des zones de répartition des eaux là où ressources en eau et besoins présentent un déséquilibre. Sur ces secteurs tout nouveau prélèvement de ressources est interdit ou doit être compensé par de nouvelles réserves.

Enfin les dispositifs de contrôle du fonctionnement des irrigations ont été puissamment renforcés.

La hausse importante des tarifs de prélèvement et usage de l'eau a conduit à une forme d'auto-régulation de la demande.

D.3 – AGRICULTURE

L'agriculture constitue le sujet de préoccupation majeur dans le domaine de la gestion des usages de l'eau par ses impacts quantitatifs (assèchements dus aux irrigations) et ses impacts qualitatifs (eutrophisation de rivières ou de milieux littoraux, contamination des prises d'eaux par les nitrates ou les pesticides). Les surfaces irriguées ne représentent en France que moins de 8 % de la SAU² (culture + fourrage), un changement du régime des eaux pourrait avoir un impact sur l'ensemble de l'agriculture française.

Les irrégularités du régime des pluies et des eaux se traduisent, dès aujourd'hui, par une sensibilité forte des activités agricoles aux intempéries (orages de grêle, inondations,...) qui mobilisent des crédits importants d'indemnités et un développement des irrigations de complément qui ont pour objet d'assurer une sécurisation des productions, notamment pour les productions liées à des activités agro-industrielles dans le Nord de la France.

Un effort important a été initié au sein des organismes de recherche (Programme Agrotech piloté par l'INRA³) pour évaluer l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre sur l'agriculture. Les principaux résultats mettent en évidence un double effet : positif avec l'effet de la fertilisation carbonée (hausse des rendements et réduction des besoins en eau), négatif avec le raccourcissement du cycle végétatif dû au réchauffement.

Des changements de calendriers agricoles sensibles sont déjà constatés.

Un enjeu majeur de l'agriculture française est la sécurisation des productions : il est toutefois difficile de faire la part des aléas constatés dans les productions de ce qui tient au contexte agronomique (nouvelles variétés,...) de ce qui tient au changement climatique.

D.4 - LUTTE CONTRE LES INONDATIONS

Le gouvernement a décidé :

- d'accélérer le rythme de mise en place de Plans de Prévention des Risques (PPR) ;
- d'améliorer les systèmes d'annonce de crues par une meilleure collaboration entre les Services hydrologiques, les Services de Météo-France et le dispositif d'alerte de la population.

La prévision des crues dans les régions méditerranéennes est difficile. Les systèmes de prévision sur l'annonce de pluies torrentielles par Météo-France ont été renforcés (en particulier par l'extension de

¹ Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

² Surface Agricole Utile

³ Institut National de la Recherche Agronomique

dispositifs de suivi des phénomènes orageux par radars) et font l'objet d'alertes à court terme (24 heures) auprès des autorités locales et du grand public, avec 4 niveaux de gradation de risques. Ce système d'alerte a, ainsi, correctement fonctionné lors des crues du Gard de septembre 2002. La localisation exacte de la survenue de l'orage sur de petits bassins versants fragmentés constitue, cependant, encore un obstacle à la prévision de crues locales qui peuvent se révéler catastrophiques sur de toutes petites rivières en systèmes méditerranéens.

Les récentes crues catastrophiques du Gard ont conduit le Gouvernement à annoncer un renforcement des mesures de protection des populations et des biens :

1 - réduction des rythmes d'écoulement des eaux par le développement de mesures de régulation et ralentissement du débit en tête de bassin versant : microretenues sèches, ouverture de zones d'expansion de crues

2 - renforcement des dispositifs de prévision des crues. A cet effet un Centre technique National d'appui aux services d'annonces des crues va être installé à Toulouse avec une mise en commun des outils techniques développés par les services de Météo-France et du Ministère de l'Environnement : banque HYDRO et PLUVIO, diffusion d'outils de simulation de crues, publication de cartes de vigilance inondations en accompagnement des cartes de vigilance météo déjà existantes,... Parallèlement les réseaux de mesures vont être renforcés, dont en particulier le réseau ARAMIS de mesure des précipitations par radars, qui couvre l'ensemble du territoire métropolitain et des zones importantes dans les départements et territoires d'Outre-mer.

3 - accélération de la démarche de prescription et d'approbation des PPR⁴

De manière générale, les services spécialisés ont été invités à un développement auprès des populations d'une conscience et d'une culture du risque par une diffusion plus rapide et plus directe auprès des populations, des informations disponibles sur la prévision des risques (annonces d'événements extrêmes) et la vulnérabilité (atlas de zones inondables,?), des mesures de prévention possibles et des comportements à avoir en cas de la survenance de la crue.

Enfin le Gouvernement a confirmé son intention de déposer prochainement un projet de loi sur les risques.

Les mesures législatives traitant des risques naturels figurent dans le titre II du projet de loi en cours de gestation intitulé « mesures de prévention face aux risques naturels ». Ce titre comprend différents chapitres portant respectivement sur différentes composantes de la prévention :

- l'amélioration de l'accès à l'information de la population
- l'utilisation du sol et l'aménagement : au-delà des dispositions préventives relatives aux terrains soumis à des risques, on s'intéresse ici aux terrains qui participent à l'aggravation du risque ou qui pourraient être utilisés pour le diminuer.
- les travaux contre les risques naturels : il s'agit notamment de faciliter l'intervention des collectivités locales dans leurs actions de protection et d'entretien à maîtrise d'ouvrage publique
- les dispositions financières : elles ont pour but principal de favoriser les mesures de prévention, notamment les travaux mais aussi les acquisitions amiables de biens menacés
- l'action des services de restauration des terrains de montagne (RTM) et de l'office national des forêts (ONF) en matière de prévention des risques

⁴ Plan de Prévention des Risques

DOSSIER TECHNIQUE EN TROIS VOLETS :

1 - ETAT DES RESSOURCES EN EAU EN FRANCE

**2 - IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
SUR LE REGIME DES EAUX**

3 – MESURES RECENTES ADOPTEES

1 - ETAT DES RESSOURCES EN EAU EN FRANCE

1.1 - Un potentiel aquatique exceptionnel

La France dispose, par l'abondance de ses ressources en eau et une grande diversité de milieux géographiques, d'un potentiel aquatique de qualité remarquable d'un point de vue écologique, mais exploité de manière excessive dans certaines régions.

Les précipitations atteignent environ 440 milliards de m³ par an, dont en moyenne 100 milliards de m³ par an disponibles pour les usages humains (60 milliards de m³ lors des années de sécheresse, soit une toutes les décennies), après prise en compte de l'évapotranspiration, des problèmes d'accessibilité et des pertes en période d'inondations. Cependant, ces chiffres moyens masquent l'irrégularité de la répartition des ressources dans le temps et l'espace, le développement des irrigations dans la moitié sud du pays mobilise des volumes d'eau importants qui créent des situations locales de déficit forts les années de sécheresse. La fin des années 1980 et le début des années 1990 ont été caractérisés par des sécheresses prolongées.

Le pays comporte plus de 110 000 kilomètres de cours d'eau d'une largeur supérieure à un mètre, appartenant au domaine privé, et plus de 12 000 kilomètres de rivières plus importantes relevant du domaine public dont la gestion est assurée par le ministère de l'Environnement.

La France bénéficie de plusieurs bassins sédimentaires de vaste ampleur intéressants pour la mobilisation d'eaux souterraines (bassin Parisien, bassin Aquitain) et de nappes d'accompagnement des principales rivières. Ces nappes constituent une ressource privilégiée pour l'alimentation en eau potable.

La majorité des prélèvements est effectuée dans les eaux de surface : les eaux souterraines n'en représentent en moyenne que 15%. Toutefois, 56 % de l'eau alimentant les réseaux de distribution publics proviennent des nappes phréatiques. Les nappes profondes sont le système d'alimentation dominant de vastes régions comme l'Aquitaine et la région parisienne pour l'eau potable ou la Beauce pour l'agriculture.

Des inondations importantes peuvent occuper plusieurs semaines les vastes plaines sous influence du climat atlantique, tandis que des crues torrentielles et violentes caractérisent les rivières méditerranéennes.

Enfin, la France dispose d'un réseau de lacs et de zones humides variés et de grande valeur écologique. Les zones humides couvrent environ 2 millions d'hectares. Un rapport établi en 1994 par l'Etat a mis en évidence une dégradation forte du réseau des zones humides dont il a été estimé que plus de la moitié de celles qui existaient, il y a 30 ans, ont disparu ou ont été fortement dégradées.

1.2 - Des pressions nombreuses et variées

En France, les prélèvements pour les besoins de l'homme sont évalués actuellement à quelque 38 milliards de m³, dont 15% à usage domestique, 19% pour les activités industrielles, 64% pour le refroidissement des centrales thermiques et 12% pour l'agriculture.. Les prélèvements industriels et domestiques sont stabilisés depuis quelques années, mais le pays doit faire face à une croissance des prélèvements agricoles à la suite d'une augmentation importante des irrigations dans les années 1980 et 1990.

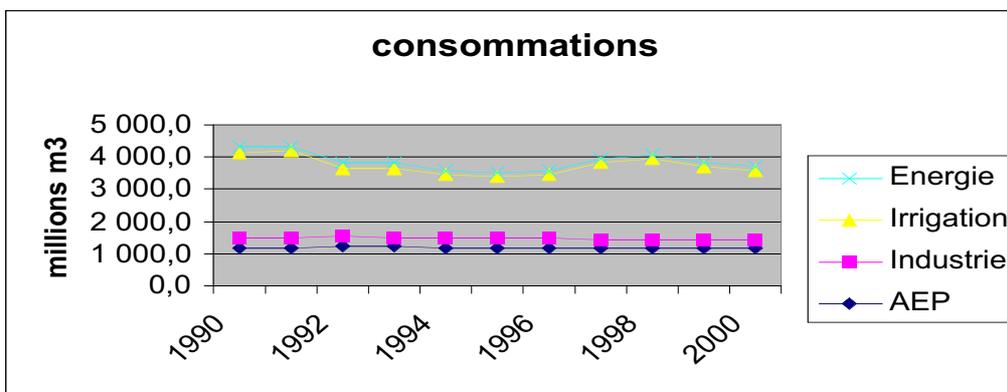
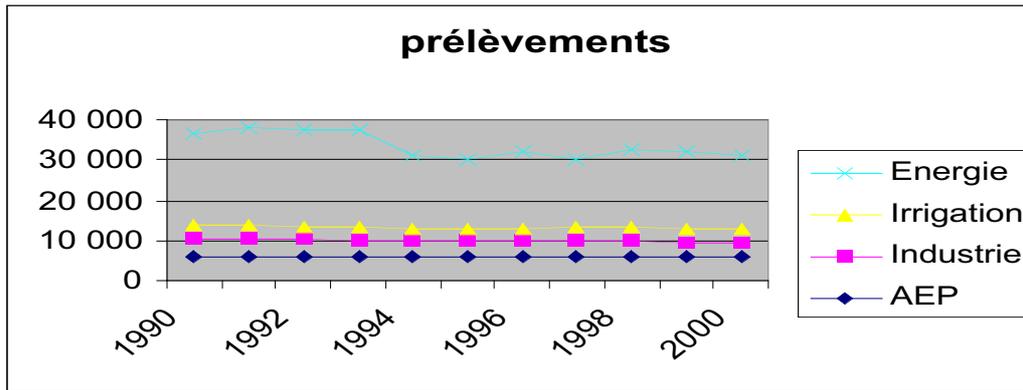


Figure 1 - Prélèvements et consommations (en millions de m³)

L'essentiel des prélèvements industriels et domestiques est restitué aux milieux naturels, alors que la plus grande partie des prélèvements pour irrigation est consommé. Les besoins pour les irrigations constituent la part la plus importante des volumes soustraits aux milieux naturels dans le sud de la France. La croissance forte et récente d'irrigations non compensées par la création de réserves en eau a conduit, en 1989 et 1990, à des phénomènes d'assèchement graves de nombreuses rivières particulièrement dans le sud-ouest.

Comme dans bien des pays développés, la consommation d'eau à des fins industrielles diminue depuis un certain nombre d'années. La baisse d'activité dans les secteurs minier et sidérurgique représente l'essentiel de la réduction de la demande industrielle. La modernisation des usines et les économies d'eau ont, également, conduit à une réduction des prélèvements mobilisés par l'agro-alimentaire ou la pâte à papier. Les prélèvements des centrales électriques, en forte croissance à partir du début des années 1970, sont aujourd'hui stabilisés à la suite de l'achèvement du programme électronucléaire. La consommation à usage domestique a augmenté de 15 % entre la fin des années 70 et le début des années 90. Cette croissance est désormais stabilisée: d'une part l'essentiel des équipements de desserte est assuré, d'autre part des investissements importants sont engagés pour réduire les fuites des réseaux. La hausse du prix de l'eau et des récentes dispositions légales imposant une facturation volumétrique et non plus forfaitaire ont contribué à accélérer les opérations d'économie d'eau.

Les prélèvements d'origine agricole tendent à augmenter. Les surfaces irrigables représentent 2 700 000 ha dont les développements reposent pour l'essentiel sur des techniques par aspersion ou goutte à goutte pour lesquelles on estime que plus de 80 % des eaux prélevées, soit de 2000 à 3000 m³/ha/an selon les années sont évapotranspirées. Dans le sud-ouest de la France plus de 60 %

des volumes d'eau consommés sont imputables aux irrigations. La satisfaction de ces besoins a nécessité des investissements importants de créations de réserves en eau et ouvrages de transferts. L'essentiel de la population est aujourd'hui desservie par un réseau d'adduction d'eau potable de manière convenable. Les principales préoccupations qui interpellent le consommateur et les pouvoirs publics concernent les nitrates, les pesticides et le plomb.

1.3 – Les irrigations en France

Le fait majeur à souligner pour la France est une croissance forte dans le Sud-Ouest au cours des années 1980.

Les statistiques du ministère de l'Agriculture comptabilisent, en 1997, 2 700 000 ha de surfaces équipées et 1 900 000 ha de surfaces irriguées.

Les surfaces équipées comprennent des irrigations temporaires (irrigations de complément dans le nord de la France) ou permanentes. Les équipements mobilisés et les surfaces irriguées varient fortement entre une année sèche et une année humide.

Ces chiffres sont variables selon les définitions utilisées. Les surfaces effectivement irriguées font l'objet de déclarations non cohérentes selon les fichiers utilisés.

A compter de 1970, on constate, avec une accélération dans les années 1980 une croissance forte des surfaces irriguées.

(ha)	1970	1979	1988	1995	1997	2000
Surfaces équipées	767 000	1 325 000	1 796 000	2 510 000	2 700 000	2 634 000
Surfaces irriguées	539 000	801 000	1 147 000	1 630 000	1 907 000	1 576 000

Tableau 1 – Evolution des surfaces équipées et irriguées en France.

La Provence (18% de la sole irriguée) et Languedoc-Roussillon (7%) sont des régions anciennes d'irrigation (cultures spéciales, fourrages). Le développement récent et rapide de surfaces irriguées permanentes a concerné pour l'essentiel le sud-ouest (Aquitaine, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes : 200 000 ha à 600 000 ha en 10 ans, soit 30% de la sole irriguée), ainsi que des régions comme les Pays de la Loire, l'Alsace et le Val-de-Saône .

L'essentiel provient du développement du maïs, plante réagissant bien à l'apport d'eau et sensible aux sécheresses des années récentes. Le maïs est la culture dominante de la sole irriguée (45% pour la France entière, 2/3 dans le sud-ouest), suivie des légumes et vergers (18%) et des oléagineux (10%).

Sur la façade méditerranéenne, le déficit pluviométrique est élevé en été et implique un recours systématique aux irrigations pour les cultures dominantes (vergers, maraîchages, fourrages). La puissance de l'hydraulicité du Rhône, des ouvrages de réserves en eau importants et des transferts des ressources en eaux du bassin du Rhône menés dans les années 1960 assurent une ressource en eau largement suffisante pour les régions Provence (Canal de Provence) et Languedoc-Roussillon (Canal du Bas Rhône-Languedoc)

Dans le Sud-Ouest, dès 1988, l'Agence de l'eau Adour-Garonne avait signalé que la croissance des irrigations conduisait à une situation de déficit chronique des ressources en eau. Plus de 800 millions de m³ d'eau, dont 87 % imputables aux irrigations, sont soustraits aux milieux naturels dès les années 1990 , soit un débit supérieur à ceux apportés par la Garonne, l'Adour et la Charente à l'aval de leur bassin versant en période d'étiage. Ceci a conduit à des situations de crise en 1985, 1986, 1988, 1991 et à une situation chronique de déficit sur des rivières comme la Charente ou les principaux affluents de la Garonne. Même pour les années récentes, relativement favorables en termes de pluviométrie, les débits des rivières constatés sont tombés en deçà des débits d'étiage de référence.

Compte tenu de la pluviométrie, les besoins en eau d'irrigation peuvent varier de 1500 à 2500 m³/ha/an selon les années pour le maïs. L'extension de la culture du maïs a généré de graves déficits en eau et la nécessité de mettre en place un programme de barrages et d'ouvrages de transferts.

Le Comité de Bassin avait proposé qu'un ambitieux programme de création de réserves en eau soit réalisé pour compenser l'effet de ces prélèvements : création de 600 millions de m³ de réserves en eau en 10 ans.

Ce programme n'a pu que partiellement être mis en place en raison des réactions très négatives des milieux écologistes qui y voyaient une course sans fin après l'irrigation. Par défaut de financement, l'Etat a décidé de réduire progressivement ses aides à ce type d'équipements.

L'adéquation offre/demande en eau agricole a du, dès lors reposé principalement sur une régulation de la demande : réduction du rythme d'accroissement des irrigations et meilleure maîtrise de leur fonctionnement (avertissements agricoles, économies d'eaux).

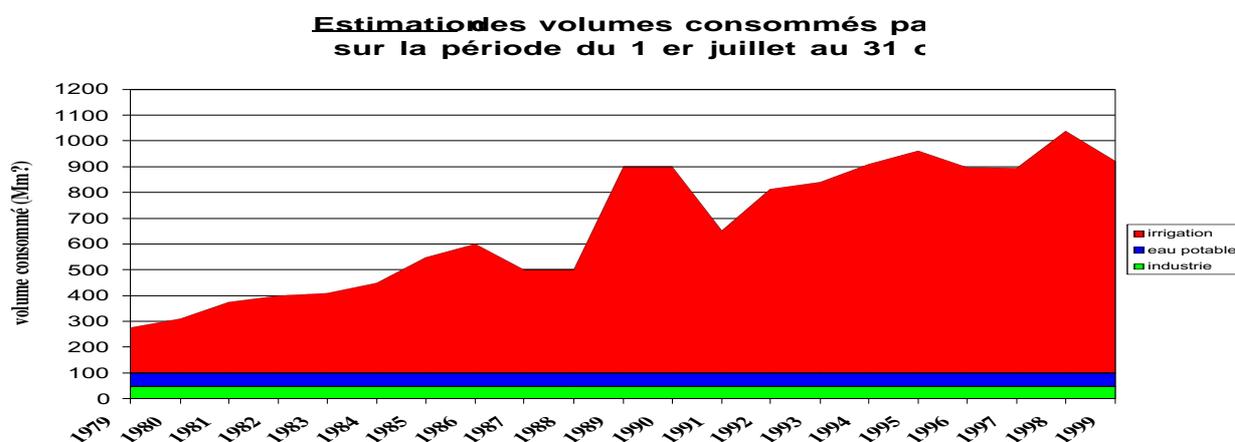


Figure 2 – Estimation des volumes consommés par usage sur la période du 01/07 au 31/10 Bassin Adour-Garonne.

1.4 - Les crues et les inondations en France

1.4.1 - Les faits.

Avec la sécheresse, l'inondation est le principal risque naturel lié à l'eau en France.

Trois grands types d'inondations et risques existent dans notre pays : les crues de régime océanique (type Seine, Loire, Garonne), longues avec de forts volumes d'eau écoulés ; les crues méditerranéennes (type Nîmes, Vaison-la-Romaine, Gard) courtes, mais violentes et difficiles à anticiper ; les crues urbaines, liées à la saturation des réseaux d'assainissement, et généralement dues à la présence d'orages.

Il conviendrait d'y rajouter, au titre des catastrophes aquatiques, les cyclones qui frappent périodiquement La Réunion et les Antilles. Le cyclone Mitch de 1998 a montré les effets dévastateurs de ces phénomènes dans des pays pauvres mal préparés (Nicaragua, Costa-Rica).

Evaluer les mesures à prendre pour lutter contre les inondations n'est pas facile. Il faut croiser une approche technique et scientifique classique (probabilité de la crue et évaluation des débordements), avec une approche de vulnérabilité socio-économique (valeur économique et sensibilité au recouvrement par l'eau de biens matériels). Des méthodes nouvelles, comme la méthode "inondabilité", mise au point par le CEMAGREF ont permis d'améliorer ces connaissances.

Les inondations sont des phénomènes naturels. Les désordres pour la société sont pour beaucoup d'origine anthropique. Ce diagnostic est fort ancien. Les progrès de la connaissance (dont une partie fait appel à l'étude des chroniques historiques) permettent aujourd'hui d'améliorer la prévision de ces phénomènes et on sait identifier les causes humaines qui concourent à les amplifier.

Les catastrophes liées aux inondations ont été plus nombreuses dans notre pays, dans les 25 dernières années qu'au cours des 100 années antérieures (l'explication principale étant l'occupation croissante des zones inondables par des installations vulnérables).

Année	Evénement	Victimes morts (m) et sinistrés (s)
1875	Loire	
1910	La Seine à Paris	150 000 s
1930	Le Tarn à Montauban	200 m+10 000 s
1930	La Garonne à Toulouse	171 m
1940	Pyrénées Orientales	50m
1958	Rivières cévenoles	38 m
1977	Rivières du Lannemezan	16 m
1987	Torrent du Grand-Bornand	23 m
1988	Nîmes	11 m + 50 000s
1992	Vaison-la-Romaine	46 m
1993	Lèze à Bollène	3 m
1993	Rupture digues Camargue	26 m
1994	Sud-Est -Corse	4 m
1996	Béziers	3 m
1999	Aude - Pyrénées Orientales	29 m
2001	rivières bretonnes (Oder,...)	
2001	Somme	
2002	Gard	29 m

Tableau 2 - Inondations majeures en France

La modification de l'occupation des espaces (déforestations, remembrements agricoles, imperméabilisation des sols en zones urbaines, réduction des champs d'expansion des crues) accentue ces phénomènes. Environ 40 000 hectares sont gagnés chaque année par les villes sur les forêts et les campagnes. Ils concourent à une accélération rapide des ruissellements. En milieu rural, la disparition des haies et l'augmentation des surfaces labourées avec maintien de sols nus en hiver au détriment des prairies accélèrent les ruissellements. Les travaux de restauration des terrains en montagne et de reforestation, engagés dans les Alpes et les Pyrénées dès la fin du 19ème siècle pour lutter contre les érosions et poursuivis jusqu'à ce jour ont un effet très bénéfique sur la régulation des crues.

L'action publique revêt, dans tous les pays, trois grands aspects: les moyens de lutte, la prévention et les secours. L'organisation des secours est indispensable, la prévention est seule susceptible de réduire l'importance des dégâts. L'équilibre entre ces modes d'action publique est variable selon les pays, tout

comme la dominante des risques (dommages humains dans les pays pauvres, matériels dans les pays riches).

Encadré - Le rôle des acteurs.

- ☛ Etat :
 - Météo-France : prévision et mesure des précipitations
 - Ministère de l'Environnement : organisation de la prévention (réseaux d'alerte et gestion préventive)
 - Ministère de l'Intérieur : organisation des secours
- ☛ Communes: ouvrages de protection, gestion de l'urbanisme, alerte rapprochée.

Outils juridiques

- Code des communes (1884) : pouvoir de police générale du maire
- Loi de 1982 : création d'un régime d'indemnisation des catastrophes naturelles par les assurances
- Loi de 1982/84 : instaure la mise en place des plans d'exposition au risques (PER) mis sous la responsabilité des communes
- Loi de 1995 : simplifie la procédure des PER en instituant les plans de prévention des risques (PPR) à l'initiative de l'Etat et un régime d'expropriation pour menace grave

1.4.2 – Les outils de prévention des dommages liés aux inondations

Les moyens de lutte sont l'endiguement, la réalisation d'ouvrages écrêteurs de crues et la réservation de zones d'expansion de crues.

L'endiguement est la technique la plus ancienne. Nos grands fleuves (Seine, Loire, Garonne) sont endigués sur de longues distances dans les basses vallées. Ces digues, réalisées dès le 19^{ème} siècle à l'initiative de l'Etat, puis prolongées ou renforcées par des collectivités locales ou des associations syndicales d'agriculteurs, souffrent d'un entretien insuffisant.

Ces digues comportent des ouvertures pour permettre une expansion des crues sur des territoires peu exposés et pouvant supporter, sans dommages, des périodes d'inondations. Les prairies sont des terrains privilégiés d'expansion des crues. La transformation des prairies en culture et le mitage de certains territoires agricoles par des habitations rendent de plus en plus difficile la maintenance de ces champs d'expansion des crues.

Hors les villes qui y voient l'occasion d'étendre les zones urbanisables, peu de partenaires publics sont prêts à engager des crédits importants pour l'entretien de ces ouvrages qui restent une charge financière lourde pour le ministère de l'Environnement. Les ruptures catastrophiques des digues de Camargue en 1993, digues privées qui avaient fait l'objet de divers bricolages (passages de canalisations) et d'un abandon par les intéressés, ont montré que l'Etat et les collectivités locales pouvaient difficilement se désintéresser de la sauvegarde de ces ouvrages.

La réalisation de réserves pour écrêter les crues ne peut avoir qu'un effet très limité sur les grands bassins versants. Il est très difficile d'espérer effacer les crues par des barrages au vu des énormes volumes d'eaux écoulés en comparaison des capacités des meilleurs sites. Le programme d'effacement partiel des crues de la Seine ne serait pas envisageable pour la Loire ou la Garonne dont les crues sont beaucoup plus fortes (8000 m³/s pour la Loire à Tours).

La priorité doit être donnée à une meilleure gestion des écoulements sur l'ensemble des bassins versants, à l'instar de ce qui avait été entrepris au 19^{ème} siècle par les services de restauration des

terrains de montagne, pour y restaurer les capacités de ralentissement et de stockage des crues, en reconstituant des haies et en mobilisant toutes les techniques de ralentissement et d'infiltration des eaux. Cette politique alternative à la réalisation de grands ouvrages a déjà été initiée par des agglomérations urbaines, telles que Bordeaux en obligeant par des règles d'urbanisme les aménageurs de zones urbaines de stocker sur les zones aménagées les débits engendrés par les constructions nouvelles.

1.4.3 - Une meilleure anticipation de la montée des eaux

La prévision est confiée aux services d'annonces de crues en collaboration avec Météo-France. Ce sont des services de l'Etat, organisés, au sein des Directions Régionales (DIREN) du Ministère de l'Environnement par grands bassins versants, qui couvrent la partie la plus exposée des grands cours d'eau. La modernisation des stations de mesure (automatisation), l'installation de radars destinés à mesurer les précipitations, le développement des moyens de transmissions hertziens ou par satellite et l'amélioration des méthodes de calcul ont permis d'anticiper et d'améliorer sensiblement la qualité des prévisions de montée des eaux sur les grands systèmes hydrographiques, comme la Seine, la Loire, la Garonne, la Dordogne, le Rhône,...

La prévision est plus difficile pour les crues torrentielles de type méditerranéen. Les phénomènes pluviométriques peuvent conduire à des aménées d'eaux considérables en un court laps de temps, sans qu'il soit possible avec précision de prévoir le bassin versant, souvent restreint, sur lequel la pluie va tomber. Les conséquences de ces événements touchent de toutes petites rivières qui tendent à déborder rapidement et s'accompagnent d'aménées de boues et matériaux aggravant le caractère catastrophique de l'inondation. Une collaboration accrue sur ces bassins entre Météo-France et les services de prévision des crues est nécessaire, avec l'utilisation de radars de surveillance des précipitations (réseau ARAMIS) mis en place par Météo-France avec le concours financier du budget de l'environnement.

Un certain nombre de communes (Paris, Bordeaux, Nîmes, Marseille...) et de syndicats de communes ont mis en place des systèmes de prévision locale complémentaire à ceux mis en place par l'Etat pour faire face à des phénomènes plus localisés qui peuvent avoir des effets importants sur les quartiers vulnérables.

L'organisation de l'alerte, en fonction des annonces de prévision de crues, est ensuite de la compétence des services de la sécurité civile des préfectures et, localement, des maires.

1.4.4 - Prévention : les communes hésitent à afficher les risques

La cartographie des zones inondables est un instrument de prévention majeur. Outre sa fonction d'alerte, la cartographie a pour objet d'identifier le risque pour éviter la création d'installations sensibles dans les zones soumises à un risque d'inondation. Les maires, par les plans locaux d'urbanisme (PLU) et l'attribution des permis de construire sont les principaux garants du respect de ces prescriptions.

L'Etat a établi dès 1935 des plans de surfaces submersibles pour les grands cours d'eau (Loire, Seine, Garonne, Rhône). Mais l'échelle (1/25 000ème) et l'insuffisance de couverture n'ont pas permis de faire de ces cartes des documents imposant de servitudes aux tiers.

La loi de 1982/84 a confié aux communes l'établissement des Plans d'Exposition aux Risques (PER) qui devait conduire à une réglementation des autorisations des constructions en zones inondables correspondant à des servitudes inscrites aux plans d'occupation des sols. Les communes ont été généralement assez réticentes à engager ces procédures qui pouvaient constituer des contraintes fortes pour les POS.

Plus de 10 ans après leur création, il n'y avait en 1995 que 347 PER approuvés, alors qu'un recensement de 1982 évaluait à environ 10 000 le nombre de communes exposées. Les communes sont davantage disposées à engager des travaux de protection qu' à afficher des risques.

La loi de 1995, en simplifiant les procédures d'établissement de ces plans devenus plans de prévention des risques approuvés par arrêté préfectoral, et la multiplication par 3 puis par 6 des budgets engagés par l'Etat a permis de corriger cette situation.

En 2002 l'établissement de PPR est prescrit sur plus de 8000 communes sur les 10 000 communes identifiées prioritaires au titre des catastrophes naturelles. Plus de 3000 PPR sont aujourd'hui approuvés, plus de 500 nouveaux PPR sont approuvés chaque année.

Le sort à réserver aux installations construites par le passé, en zones inondables, est moins facile : la loi de 1995 prévoit une procédure d'expropriation des installations les plus vulnérables, procédure qui ne peut cependant, être raisonnablement activée qu'à titre exceptionnel. Pour compléter cette disposition le fonds créé en 1995 pour financer ces expropriations (fonds « Barnier ») sera mobilisé à partir de 2003 pour financer les mesures de réduction de vulnérabilité des bâtiments situés en zone inondable imposées par les PPR.

1.4.5 - Des plans de secours dans chaque département

Aujourd'hui, des plans de secours n'ont pas encore été élaborés dans tous les départements sous l'autorité des préfets. Quand ils existent, ils prévoient une gradation de moyens selon l'importance des catastrophes et les mesures de sauvegarde à prendre pour les activités vitales (alimentation en eau, circulation, fonctionnement des grandes usines). Les secours d'urgence sont organisés à l'initiative des services de Sécurité Civile sous l'autorité des préfets, qui peuvent avoir recours, en cas de besoin, à des moyens exceptionnels (armée). Le ministère de l'intérieur prévoit de rendre obligatoire l'élaboration de tels plans. Sans attendre cette obligation les services de l'Etat en région Ile-de-France ont engagé depuis deux ans l'élaboration d'un plan interdépartemental de secours. Cette élaboration y est particulièrement ardue en raison de l'ampleur des risques existants (près d'un million d'habitants concernés) et de l'extrême complexité des services publics de l'agglomération parisienne. Mais l'enjeu est de taille : le coût des dommages que pourraient subir l'agglomération si une crue similaire à celle de 1910 s'y renouvelait est aujourd'hui évalué à plus de 10 milliards d'euros, soit près de dix fois le coût des dommages subis en 1910 époque à laquelle la population exposée était cinq fois moins nombreuse et où les équipements urbains étaient beaucoup plus simples à faire fonctionner.

1.4.6 - Socialisation du risque et responsabilité individuelle

Après la catastrophe et la mise en place des secours d'urgence, la loi sur les assurances de 1992 permet de mettre en place un mécanisme d'indemnités aux usagers, dès lors que le Préfet a fait reconnaître à l'inondation son caractère de catastrophe naturelle.

Le régime français d'assurance de 1982 prévoit:

- surprime à taux fixe rendue obligatoire pour tous les assurés
- assujettissement de l'indemnisation à un arrêté reconnaissant l'événement et désignant les communes concernées
- possibilité, pour les assurances, de réassurance auprès de la Caisse centrale de réassurance pour bénéficier de la garantie de l'Etat.

Ce dispositif a permis la mise en place rapide d'une indemnisation des personnes ou activités touchées par des catastrophes. Ce système de socialisation systématique du risque s'est faite au détriment de la responsabilité individuelle de personnes. L'expérience montre que de nombreuses activités qui ont pris le risque de s'installer dans des zones exposées et sont soumises à des inondations fréquentes ont bénéficié, à ce titre d'indemnisations répétées.

La dissociation de la décision entre celui qui constate la catastrophe (le préfet) et celui qui paye (l'assurance) et la possibilité pour les assurances de se faire couvrir par la Caisse de réassurance conduit à couvrir des risques répétitifs, le risque d'une catastrophe majeure étant couvert par le fonds garanti par l'Etat.

De nombreux avis convergent pour considérer que ce système déresponsabilise excessivement les principaux acteurs concernés et pour qu'une distinction soit faite entre le risque répétitif, lié souvent à l'occupation d'un espace identifié comme inondable, et le risque exceptionnel, auquel pourraient être réservées les indemnités.

Le coût du dispositif d'assurance des catastrophes naturelles en France est élevé (un milliard d'euros environ par an, tous risques naturels confondus) et croissant (le taux de la surprime assurance a été porté de 9 à 12 %, en 1999). En regard des crédits consacrés à la politique de prévention, et en particulier à l'alerte et à l'élaboration des PPR (15 millions d'euros en 2001 pour les projets) apparaissent faibles. De nombreux experts ont fait observer qu'un rééquilibrage des moyens entre ces deux politiques d'actions serait fort utile.

Ce rééquilibrage s'opère progressivement depuis 1994 avec la création en 1995 du fonds Barnier alimenté par un prélèvement de 2% sur les surprimes finançant les indemnités qui pourrait être porté à 4% dans les prochaines années avec l'extension du champ d'intervention de ce fonds au financement des travaux de réduction de la vulnérabilité.

2 - IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE REGIME DES EAUX

2.1 - Impact hydrologique du changement climatique sur un grand bassin versant Français : le bassin du Rhône

Les simulations de modèle de circulation générales (MCG) sous hypothèse du doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique (aux horizons 2050 suivant les scénarios de croissance des gaz à effet de serre) s'accordent sur des anomalies très marquées des variables atmosphériques près de la surface par rapport au climat actuel. Bien qu'encore dispersés, les scénarios disponibles sur la France simulent des perturbations notables des champs de précipitation et de température de l'air attendues pour la moitié du 21^{ème} siècle : augmentation des précipitations hivernales et diminution des précipitations estivales, augmentation de la température de l'air plus marquée l'été que l'hiver. Ces anomalies impacteront significativement l'hydrologie des grands bassins versants Français. Il est donc essentiel de mettre en place des outils de modélisation hydro-météorologique capables d'intégrer les anomalies climatiques attendues pour évaluer leur impact hydrologique à une échelle régionale. Ce chapitre décrit la méthodologie développée sur le bassin du Rhône (projet soutenu par le programme GICC) pour évaluer les modifications possibles des divers compartiments hydrologiques (neige, évaporation, eau du sol, ruissellement, débits) en réponse à 6 scénarios de MCG interpolés sur le bassin. Après une brève description du modèle hydro-météorologique ISBA-MODCOU développé sur le Rhône, les anomalies mensuelles simulées dans les 6 scénarios sont discutées. L'impact hydrologique sur la neige, l'eau du sol, l'évaporation et les débits pour divers sous-bassins est brièvement analysé dans la dernière partie.

2.2 - La base de données 'Gewex-Rhône' et la modélisation hydro-météorologique pour le climat actuel

L'étude d'impact climatique est basée sur les réalisations du projet coopératif Gewex-Rhône qui a conduit à la mise en place d'une base de données inégalée sur le bassin et au développement d'une modélisation hydro-météorologique de complexité croissante sur une longue période de temps (1981-1996) (Habets et al., Etchevers et al.). Cette base constitue la référence du climat présent pour évaluer les perturbations des divers compartiments de l'hydrosystème sous hypothèse de climat modifié. Le domaine d'intérêt couvre la partie Française du bassin versant (Fig 3) englobant ainsi une variabilité importante de régimes climatiques et hydrologiques : régime plutôt continental dans le bassin de la Saône, climat de montagne et régime hydrologique nival sur les bassins du Doubs, de l'Isère et de la Haute Durance, climat Méditerranéen sur la Durance, climat cévenol au Sud Est du domaine. Ainsi, l'impact différentiel du changement climatique peut être ainsi examiné en fonction de la diversité des contextes hydrologiques du climat actuel. La base de données météorologiques correspond à 8 variables atmosphériques interpolées sur une grille régulière de 8 km à partir de la totalité des mesures disponibles sur la période (plus de 1700 postes de précipitations journalières) : précipitation liquide et solide, température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent, flux radiatifs solaire et atmosphérique, pression de surface. Cette base météorologique constitue la climatologie du bassin pour la période actuelle et est utilisée pour définir le climat modifié par combinaison des anomalies mensuelles simulées par divers scénarios MCG (en particulier précipitations et température de l'air).

Une base de données de débits journaliers sur une centaine de stations (Fig. 3) est utilisée pour évaluer les performances de la modélisation de climat actuel et les perturbations mensuelles de débits pour les climats modifiés en différents points nodaux du réseau hydrographique (calculé à partir d'un MNT à 1 km de résolution). A cette base hydrologique, il faut aussi associer les observations de hauteurs de neige disponibles en 25 stations qui ont permis d'étalonner divers schémas de neige. Le dernier aspect de la base concerne le sol (base des sols INRA à 1 km) et la végétation (base 'Corine Land Cover' croisée une classification d'indices satellitaires NDVI/AVHRR).

La modélisation hydro – météorologique est basée sur le modèle couplé ISBA-MODCOU (Habets et al. 1999, Etchevers et al. 2000) permettant de simuler simultanément les interactions entre surface-atmosphère (schéma de surface ISBA) et surface-hydrologie (modèle hydrologique MODCOU). Le schéma de surface ISBA (Noilhan et Planton 89) utilisés dans les modèles atmosphériques opérationnels simulent le cycle diurne des bilans hydrique et d'énergie : neige au sol, évapotranspiration, ruissellement de surface et drainage, diffusion de la température et de l'eau du sol en prenant en compte de façon explicite l'occupation du sol et la texture du sol. Les flux de ruissellement et de drainage sont transférés au modèle hydrologique distribué MODCOU qui reconstitue le débit de chaque sous bassin à partir de l'écoulement dans le réseau hydrographique de surface (1 km de résolution) et l'évolution de la nappe (dans cette application, la nappe souterraine est limitée à la vallée du Rhône et de la Saône). Les études approfondies de Habets et al. (1999) et Etchevers et al. (2001) ont montré que le modèle couplé était capable de simuler de façon très réaliste les débits décennaux des bassins de taille supérieure à 100 km² ainsi que l'évolution du manteau neigeux sur une longue période de temps (1981-1996). A titre d'exemple, la figure 4 présente la comparaison des débits mensuels observés et simulés sur les principaux sous-bassin et à l'exutoire du Rhône au Viviers. Ainsi, le modèle permet une description cohérente des différents aspects du cycle continental de l'eau en particulier de relier les échanges surface-atmosphère (précipitation, évapotranspiration) à l'hydrologie (neige, contenu en eau du sol, écoulement et débits). Ceci constitue un atout pour analyser l'impact hydrologique du changement climatique.

2.3 - Les scénarios de changement climatique sur le bassin du Rhône

Six scénarios issus de 4 MCG ont été considérés : modèles LMD (IPSL), CNRM (Arpege-Climat), HC (Hadley Center) et UR (Université de Reading). Ces scénarios correspondent à des simulations de type 'time-splitting' pour la période 2050-2060 avec doublement du CO₂ atmosphérique sous hypothèse de 1% de croissance annuelle. Pour chaque scénario, les champs de température de la mer ont été établis à partir de simulations préalables du modèle couplé Océan-Atmosphère du Hadley Centre.). Les 6 scénarios considérés (tableau 3) sont répartis en 4 scénarios 'basse résolution' pour lesquels 2 ou 3 points du MCG sont situés dans le bassin et 2 scénarios 'haute résolution' (LMD-HR et CNRM-HR – Dequé et Marquet 1997) donnant une indication régionale du changement climatique à l'intérieur du bassin (28 points pour CNRM-HR et 10 points pour LMD-HR). Les 4 scénarios 'basse résolution' ont été réalisés dans le cadre du projet européen LSCPR (Polcher et al. 1999).

Pour chacun des 6 scénarios, 2 simulations étaient disponibles pour le climat présent (1xCO₂) et le climat modifié (2xCO₂).

Les simulations 1 CO₂ ont été interpolées spatialement sur la grille régulière 8 km du bassin du Rhône (Boone et al. 2000). Dans le cas des MCG basse résolution un moyenne des 2 ou 3 points de grille dans ou a proximité du bassin a été considérée. Le réalisme de ces 6 scénarios à simuler le climat présent a été examiné par comparaison avec les climatologies Rhône des précipitations et de température de l'air (Noilhan et al. 2001). Généralement, les MCG ont une très bonne capacité à simuler le cycle mensuel de la température de l'air alors que les simulations des précipitations moyennes mensuelles sont beaucoup plus imprécises pour le climat actuel. Si le cycle saisonnier des pluies est généralement bien reproduit, les écarts mensuels peuvent être très important. Par ailleurs l'accroissement de la résolution des MCG ne s'accompagne pas toujours d'une amélioration du réalisme des simulations.

2.4 - Les anomalies mensuelles simulées dans 6 scénarios MCG pour la période 2050-2060

Compte tenu des limites actuelles des MCG à simuler correctement les variables climatiques de surface il semble prématuré d'utiliser directement ces sorties pour forcer les modèles hydrologiques. En effet, on voit bien que les erreurs sur les précipitations pour la période actuelle dans certains scénarios ne peuvent conduire à des simulations réalistes de l'hydrologie régionale. Ainsi, c'est la méthode des anomalies mensuelles qui a été retenue en accord avec les spécialistes de la modélisation climatique. En effet, même si les modélisations MCG sont imparfaites à notre échelle d'intérêt, on peut penser que leur

sensibilité à l'augmentation des gaz à effet de serre est moins entachée d'erreur. Ainsi, pour chaque scénario, les anomalies mensuelles moyennes ont été calculées pour chaque variable à partir des simulations 2x CO2 et 1xCO2 suivant :

$$\Delta T_a = T_a (2CO_2) - T_a (1CO_2)$$

$$\Delta P = (P (2CO_2) - P (1CO_2)) / P (1CO_2)$$

Les anomalies absolues sont considérées pour la température de l'air (généralement bien simulées par les MCG) alors que les anomalies relatives sont considérées pour les précipitations qui sont plus difficilement simulées par les modèles de climat. Les anomalies des précipitations neigeuses sont estimées à partir des précipitations totales et de la température du climat modifié en utilisant la même température critique de partition pluie/neige que pour le climat présent ($T_{critique} = 0.5 \text{ C}$). Ces anomalies ont été interpolées horizontalement sur la grille régulière 8 km .

La figure 5 illustre la variation des anomalies mensuelles de température de l'air à 2 m et des précipitations totales en moyenne sur le bassin. On voit que les anomalies hivernales de températures sont relativement homogènes autour de +2 K alors que les anomalies estivales sont extrêmement dispersées, allant de + 8 K en septembre pour HC à un réchauffement modéré pour le LMD basse résolution. Notons cependant que les 2 scénarios haute résolution donnent des anomalies comparables (+2K en hiver, +4 K en été-automne) avec cependant un déphasage temporel en été.

Concernant les anomalies relatives de précipitations, la dispersion inter- MCG reste élevée même si on peut dégager une tendance moyenne à des hivers plus pluvieux (+ 20% en moyenne) et des étés plus secs (- 30 % en moyenne). Les scénarios simulant les étés les plus secs sont le HC et le LMD-HR. Ce dernier fait apparaître d'ailleurs un déficit de précipitations sur toute l'année à l'exception du mois de février. La variabilité mensuelle est également forte pour la plupart des MCG, surtout en automne.

En résumé, bien que présentant de fortes différences de mois à mois, les 6 scénarios se caractérisent par une augmentation de la température mensuelle d'environ 2 K l'hiver et de 4 K l'été. En moyenne, l'augmentation des précipitations hivernales est de 15% et la diminution estivale est de 20 %. Deux scénarios (HC et LMD-HR) se distinguent par une faible augmentation des précipitations l'hiver et une très forte diminution l'été.

2.5 - Définition des scénarios climatiques pour la période 2050-2060

Les six scénarios sont construits en combinant les variables du climat observé avec les anomalies mensuelles simulées par les MCG :

$$T_a \text{ climat modifié} = T_a \text{ climat observé (1981-1997)} + \Delta T_a \text{ mensuel GCM}$$

$$P \text{ climat modifié} = P \text{ climat observé (1981-1997)} * (1 + (\Delta P / P) \text{ mensuel GCM})$$

Les autres variables météorologiques étant conservées à leur valeur actuelle. Ainsi, le climat modifié est défini sur les 16 ans de la climatologie du bassin au pas tri-horaire. La chronologie des variations interannuelles (année sèche ou humide, ...) n'est pas modifiée pas plus que la distribution mensuelle des précipitations. L'intensité des précipitations est simplement modulée par le facteur d'anomalie relative mensuelle. A l'avenir, on pourrait aussi songer à modifier la distribution des précipitations comme suggéré par certains MCG (le modèle Arpege-Climat montre une tendance à l'augmentation du nombre de jours de précipitations fortes). Malheureusement cette information n'était disponible que pour un seul MCG.

Deux séries de forçages (climats présent et modifié) pour chaque scénario sur la grille 8 km ont été préparés en vue des simulations hydrologiques. Seuls les écarts mensuels entre les simulations

hydrologiques 2xCO₂ et 1xCO₂ sont examinés, en particulier les anomalies mensuelles des débits, de l'évaporation, du contenu en eau du sol et de la neige.

Les cartes de sol et de végétation sont identiques à la période actuelle. A l'avenir, il conviendrait d'examiner les modulations possibles des impacts par la végétation dans un contexte d'atmosphère enrichie (assimilation du CO₂ atmosphérique et adaptation de la biomasse au nouveau contexte climatique et hydrique).

2.6 - Impact hydrologique sur le bassin du Rhône à partir du modèle hydrologique ISBA-MODCOU :

Le modèle ISBA-MODCOU se distingue de modèles hydrologiques plus simples par une description assez fine des processus de surface, en particulier liée à la résolution du cycle diurne des bilans énergétique et hydrique de la surface : schémas de neige détaillés, différentes composantes de l'évapotranspiration, stockage et diffusion de l'eau dans le sol, schémas de ruissellement en surface et de drainage.

Les anomalies climatiques décrites précédemment impactent fortement les bilans de surface pour les raisons suivantes.

L'augmentation des pluies hivernales plus forte que l'augmentation de l'ETP augmente le contenu en eau du sol et partant le ruissellement de surface et le drainage. Sur les zones montagneuses, l'augmentation simultanée de la température de l'air s'accompagne d'une diminution des précipitations neigeuses et par conséquent d'une réduction des accumulations hivernales (en particulier en zone de moyenne montagne).

La diminution des précipitations estivales accroît le déficit hydrique du sol (l'excédant hivernal étant perdu pour le réservoir sol par ruissellement). Le déficit hydrique est encore renforcé par l'augmentation de l'ETP (augmentation de la température de l'air) ce qui entraîne une désaturation des sols beaucoup plus précoce et des étiages plus sévères en automne.

L'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de l'évaporation réelle pendant l'hiver et le printemps car les sols sont bien alimentés en eau. En revanche, l'évaporation réelle a tendance à être réduite en été – automne par effet de stress hydrique. Le flux de chaleur sensible vers l'atmosphère est alors renforcé. Dans le cadre des échanges couplés surface-atmosphère ceci induit possiblement une rétroaction positive en accentuant le risque de réduction des précipitations. La neige est aussi un compartiment très sensible par accentuation de la fonte et réduction de l'accumulation comme ceci a été montré par Etchevers et al. (2001). L'évolution du manteau neigeux a été calculée à partir de 2 modèles physiques de neige : le modèle détaillé CROCUS et un modèle de neige plus simples à 3 couches (Etchevers et Boone, 2001). Quelque soit le scénario, la hauteur et le nombre de jours de neige décroissent à toutes les tranches d'altitudes, les réductions les plus fortes étant associées aux 2 scénarios extrêmes (HC et LMD-HR). Etchevers et al. (2001) montrent que cette réduction concerne fortement la tranche d'altitude moyenne (entre 1500 et 2400m) qui est aussi la tranche d'altitude où se concentrent les stations de sport d'hiver : -30 cm de diminution de la hauteur de neige moyenne et diminution de 50 jours en moyenne du nombre de jours de neige. Les surfaces enneigées diminuent en moyenne de 25 % à 40 % suivant les scénarios. Le manteau neigeux pour les altitudes élevées est un peu moins affecté car la température moyenne y est largement inférieure au point de fusion (donc moins sensible à l'élévation de la température)

Les anomalies du manteau neigeux risquent d'impacter très fortement le régime des rivières alpines. Ceci est illustré à la fig. 6 qui montre l'évolution du manteau neigeux et des débits pour le bassin de la Haute Durance (en amont de Laclapière). Cette partie du haut bassin alpin est dépourvue de barrages ce qui permet de relier directement la dynamique du manteau neigeux au régime hydrologique. Pour les conditions actuelles, la modélisation est capable de reproduire remarquablement les débits mensuels. Les scénarios climatiques montrent une réduction de l'équivalent eau d'environ 50 % et une

fonte beaucoup plus précoce d'environ 1 mois. La fonte nivale précoce entraîne un pic de crue au mois de mai, en avance d'un mois environ. Il est remarquable de noter que ce décalage est présent dans tous les scénarios. Il s'en suit des étiages beaucoup plus prononcés en juillet et août. En automne et hiver, on peut noter une augmentation significative des débits dus à la plus grande proportion de précipitations liquides. Des évolutions comparables ont été quantifiées sur les bassins de l'Isère à St-Gervais, du Drac à Fontaine, de l'Ubaye à Barcelonnette et du Doubs à Conclavon (Etchevers et al 2001).

La fig. 7 illustre l'évolution possible des débits, du contenu en eau du sol et de l'évaporation estimée à partir du modèle hydrologique Isba-Modcou pour 2 bassins au régime hydrologique contrasté : les bassins de la Saône et de la Haute Durance. L'enveloppe de toutes les simulations avec les 6 scénarios ainsi que la valeur moyenne sont comparées à la climatologie du climat présent. Pour le bassin de la Haute Durance, le renforcement des débits hivernaux et la diminution des débits estivaux est bien liée à l'augmentation du contenu en eau du sol de hiver (dans le climat présent, la neige limite l'infiltration hivernale) et à une forte réduction l'été. L'évaporation est augmentée légèrement l'hiver et au printemps (plus forte proportion de surface déneigée) et diminue l'été quand l'eau du sol devient un facteur limitant (malgré l'augmentation de l'ETP). Des évolutions comparables apparaissent pour le bassin de la Saône bien que plus dispersées au niveau des débits. Sur ce bassin, la dynamique nivale n'est pas déterminante et le changement climatique ne s'accompagne pas d'un décalage temporel marqué de régime hydrologique. En moyenne, c'est à dire si on considère chaque scénario comme équivalent - probable, on note une augmentation d'environ 10 % des débits hivernaux et une réduction un peu plus faible des débits d'étiage. Cependant, les simulations sur ce bassin sont plus incertaines car le diagramme de dispersion des MCG englobe la climatologie du présent (contrairement au bassin de la haute Durance). En effet, les 2 scénarios extrêmes (LMD-HR et HC) pour ce bassin simulent une baisse des débits sur toute l'année. Le contenu en eau du sol du bassin de la Saône a tendance à diminuer toute l'année, fortement l'été, mais aussi l'hiver sous l'effet de l'augmentation de l'ETP et ceci quelque soit le scénario MCG.

La fig. 8 montre que les variations régionales des impacts hydrologiques peuvent être fortes au sein du bassin du Rhône. Il s'agit d'anomalies annuelles relatives au scénario CNRM haute résolution qui en valeur moyenne se comparent assez bien aux 4 scénarios basse résolution. L'impact sur les débits est fortement différent entre le Nord (Saône) et le Sud (Ardèche, Durance) du domaine : augmentation du débit annuel de la Saône d'environ 10 %, diminution plus forte sur les bassins de l'Ardèche et de la Durance (atteignant 15 % pour ce dernier). Ces réponses régionales contrastées se compensent au niveau de l'exutoire du Rhône au Viviers qui présente une faible réduction du volume d'eau annuel (environ 2 %). L'évapotranspiration réelle est fortement augmentée sur les zones de relief à cause de la réduction des surfaces enneigées. L'évaporation augmente également légèrement dans le Nord et est réduite beaucoup plus fortement (5 %) dans le Sud sous l'effet du stress hydrique du sol. Le contenu en eau est globalement diminué sur l'ensemble du domaine (à cause de l'augmentation de l'évaporation), notamment sur les bassins du Sud accentuant ainsi leur vulnérabilité actuelle.

Le tableau 4 présente une synthèse de l'impact de ces 6 scénarios sur les débits saisonniers et annuels pour la Durance, la Saône, l'Ardèche et tout le bassin du Rhône. Malgré leur dispersion, en moyenne les débits hivernaux sont augmentés (d'autant plus que leur composante nivale actuelle est forte) et les débits estivaux sont significativement réduits. C'est d'ailleurs pour cette période, que l'accord entre les MCG est le plus fort : aucun scénario ne conduit à une augmentation des débits estivaux du Rhône au Viviers alors que 2 scénarios indiquent une réduction possible des débits hivernaux.

2.7 - Extrapolation à d'autres bassins

Le modèle SIM est actuellement en place sur les bassins Adour-Garonne et Seine, sur lesquels les simulations hydrologiques de la période actuelle sont satisfaisantes au pas de temps décennales. Ces deux bassins possèdent des régimes hydrologiques assez différents de ceux du Rhône pouvant conduire à des vulnérabilités plus prononcées face au changement climatique. Une étude en cours sur le bassin Adour-Garonne (Morel, 2002), montre que la sensibilité hydrologique au changement

climatique peut être accrue en particulier pour les régimes d'étiages. En effet, la composante nivale serait plus affectée que sur le bassin du Rhône en raison de l'altitude plus faible des Pyrénées conjuguée à une augmentation plus modérée des précipitations hivernales. Il pourrait en résulter des étiages plus précoces dans un bassin où les usages de l'eau posent déjà des problèmes en raison de l'augmentation des cultures irriguées au cours de ces dernières années (plus de 50 % des débits d'étiage de l'Adour sont actuellement utilisés pour l'irrigation du maïs). Les bassins de l'Adour et de la Seine possèdent également des aquifères importants (nappe des Landes, grands aquifères du bassin Parisien) alors que cette composante souterraine est plus limitée sur le bassin du Rhône. Ces réserves d'eau souterraines peuvent être notablement affectées par des perturbations de leur alimentation hivernale et printanière et impacter sur les débits d'étiage. On ne peut exclure qu'une meilleure alimentation hivernale des nappes parvienne à contrebalancer les déficits hydrologiques estivaux des eaux de surface. Ceci est un sujet d'étude en soi !

Le cas des petits bassins littoraux face au changement climatique :

Ce problème est plus difficile que pour les grands bassins en raison de la différence d'échelles spatio-temporelles entre scénarios MCG (100 km et anomalies mensuelles) et ces petits bassins (quelques km) à temps de réponse rapide (quelques heures). Pour les bassins du littoral méditerranéen, on peut imaginer que le changement climatique s'accompagnera de crues hivernales et automnales plus fortes (l'augmentation de l'intensité des pluies est d'autant plus sensible que la taille du bassin est faible) et de périodes de sécheresse encore plus marquées. La question de l'augmentation de la fréquence des crues fortes ne peut être traitée par l'approche 'grand bassin' du modèle SIM. Il faudrait tout d'abord être capable d'interpréter les simulations GCM en terme de modification de la distribution des précipitations et en terme d'occurrence de phénomènes extrêmes, ce qui est très difficile actuellement. Ensuite, les outils de désagrégation pour ramener l'information GCM à la taille du bassin doivent faire appel à des méthodes beaucoup plus sophistiquées telles que celles en cours de développement dans la communauté Française (méthode des types de temps analogues, modélisation climatique à méso-échelle).

En revanche, la prévision des crues éclaircies sur les petits bassins versants est un problème d'actualité comme le rappellent fréquemment les épisodes cévenols et ceci indépendamment de la question du changement climatique. La prévision de ces phénomènes fait appel à des outils numériques plus détaillés que les MCG tels que les modèles météorologiques à forte résolution (maille de quelques km) opérant sur un domaine limité et pour des échéances de l'ordre de la journée. De tels modèles de recherche enrichis par des analyses fréquentes des champs d'humidité atmosphérique (information radar et satellitaire) ont montré leur excellente capacité à prévoir des champs de pluies extrêmes (Ducrocq et al. 2002). Des expériences de couplage avec des modèles hydrologiques de crues rapides sont également en cours de test dans la communauté.

2.8 - Eléments de conclusion

Cette étude décrit un exemple de régionalisation de l'impact du changement climatique sur un grand bassin versant Français, et soulève les problèmes liés à l'extrapolation à d'autres bassins, notamment au cas des petits bassins littoraux. 6 scénarios de MCG sous hypothèse de doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique sont utilisés pour forcer un modèle hydro-météorologique calé sur le climat actuel, et fournit des éléments d'extrapolation à d'autres cas.

Compte tenu limites actuelles des MCG, seules les anomalies mensuelles de température et de précipitations sont considérées et combinées au climat actuel pour définir le climat modifié. Les divers compartiment du cycle de l'eau continental apparaissent significativement affectés par la hausse de la température moyenne de l'air (2 K en hiver et 4 K en été), par l'augmentation des précipitations hivernales et leur diminution estivale. Ceci conduit à une réduction de l'accumulation hivernale de neige et une fonte beaucoup plus précoce au printemps. Il s'ensuit une modification notable des régimes hydrologiques des bassins à réponse nivale. Le Sud du domaine considéré semble le plus

affecté du fait de la conjonction la plus forte entre réduction des précipitations et augmentation de l'ETP.

La présente étude n'aborde pas l'impact d'une occurrence modifiée des phénomènes climatiques extrêmes sous hypothèse de climat modifié. Les limites actuelles des MCG (physique et résolution des MCG) ne permettent pas encore de discerner une évolution possible des phénomènes extrêmes, pas plus d'ailleurs que l'analyse statistique de ces épisodes pour le climat actuel. Pour les petits bassins versants, un consensus semble se dégager sur l'idée que la probabilité des phénomènes extrêmes soit l'hypothèse la plus vraisemblable.

Modèle	Schéma de surface	Résolution	
		(deg)	(km)
HC	MOSES	2.5 x 3.5	
LMD	SECHIBA	1.6 x 3.75	
CNRM	ISBA	3.8 x 3.7	
UR	TESSEL	2.8 x 2.8	
LMD-HR	SECHIBA	100	
CNRM	ISBA	50	

Tableau 3 – Les 6 scénarios de MCG interpolés sur le bassin du Rhône : 4 scénarios à basse résolution (projet LSCPR) et 2 scénarios à haute résolution : LMD et CNRM-HR

	Durance (La Clap.)			Saône (Le Chatelet)			Ardèche (Sauze)			Rhône (Viviers)		
	Hiver	Été	Moy.	Hiver	Été	Moy.	Hiver	Été	Moy.	Hiver	Été	Moy.
CNRM HR	1.06	0.78	0.87	1.09	1.09	1.09	0.91	0.67	0.85	1.07	0.87	0.98
CNRM	1.35	0.89	1.03	1.18	0.87	1.08	1.21	0.96	1.14	1.23	0.83	1.06
LMD – HR	1.05	0.67	0.79	0.85	0.80	0.84	0.95	0.64	0.87	0.91	0.66	0.80
LMD	1.00	0.86	0.91	0.88	0.94	0.90	0.89	0.93	0.90	0.93	0.87	0.91
HC	1.31	0.76	0.93	1.04	0.77	0.96	1.14	0.78	1.04	1.13	0.70	0.95
UR	1.32	0.96	1.07	1.20	1.03	1.15	1.16	1.07	1.14	1.25	0.96	1.12
Moyenne	1.18	0.82	0.93	1.04	0.92	1.00	1.04	0.84	0.99	1.09	0.82	0.97

Tableau 4 – Evolution relative des débits hivernaux (oct-mars), estivaux (avril-sept.) et annuel calculées par le modèle hydrologique ISBA-MODCOU pour les 6 scénarios pour les bassins de la Durance, de la Saône, de l'Ardèche et du Rhône au Viviers.

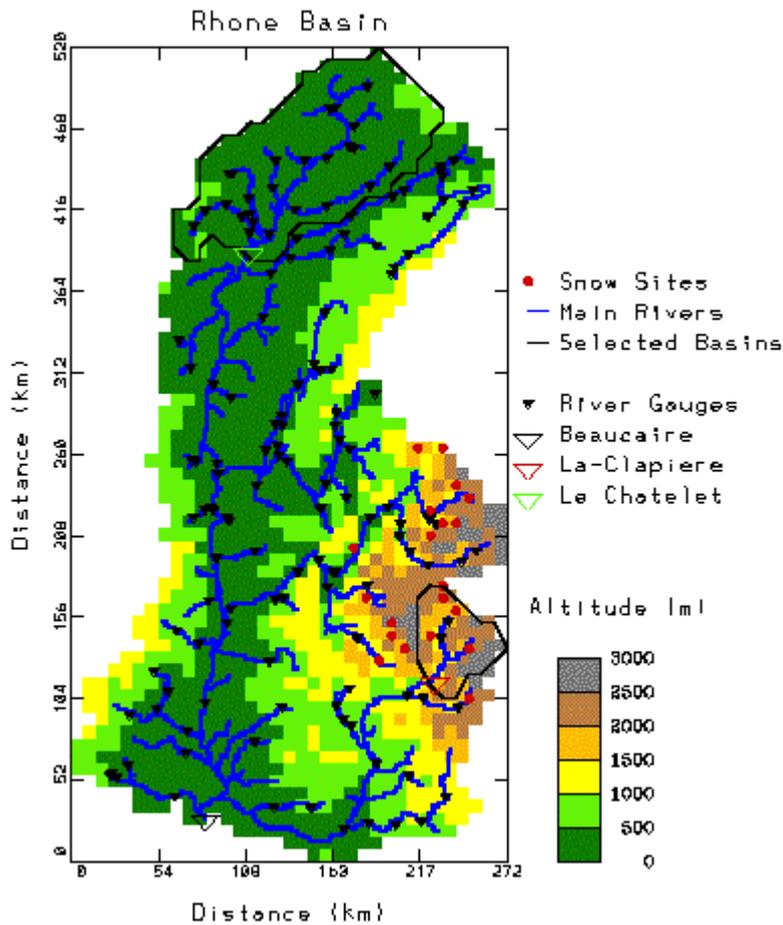


Figure 3 – Le domaine modélisé du bassin versant du Rhône faisant apparaître les postes d'observation de débits et de hauteurs de neige utilisés pour la validation des modèles ainsi que la topographie sur la grille de calcul régulière de 8 km. Les limites de bassins versants de la Saône et de la Haute Durance étudiés plus spécifiquement dans l'étude sont indiqués.

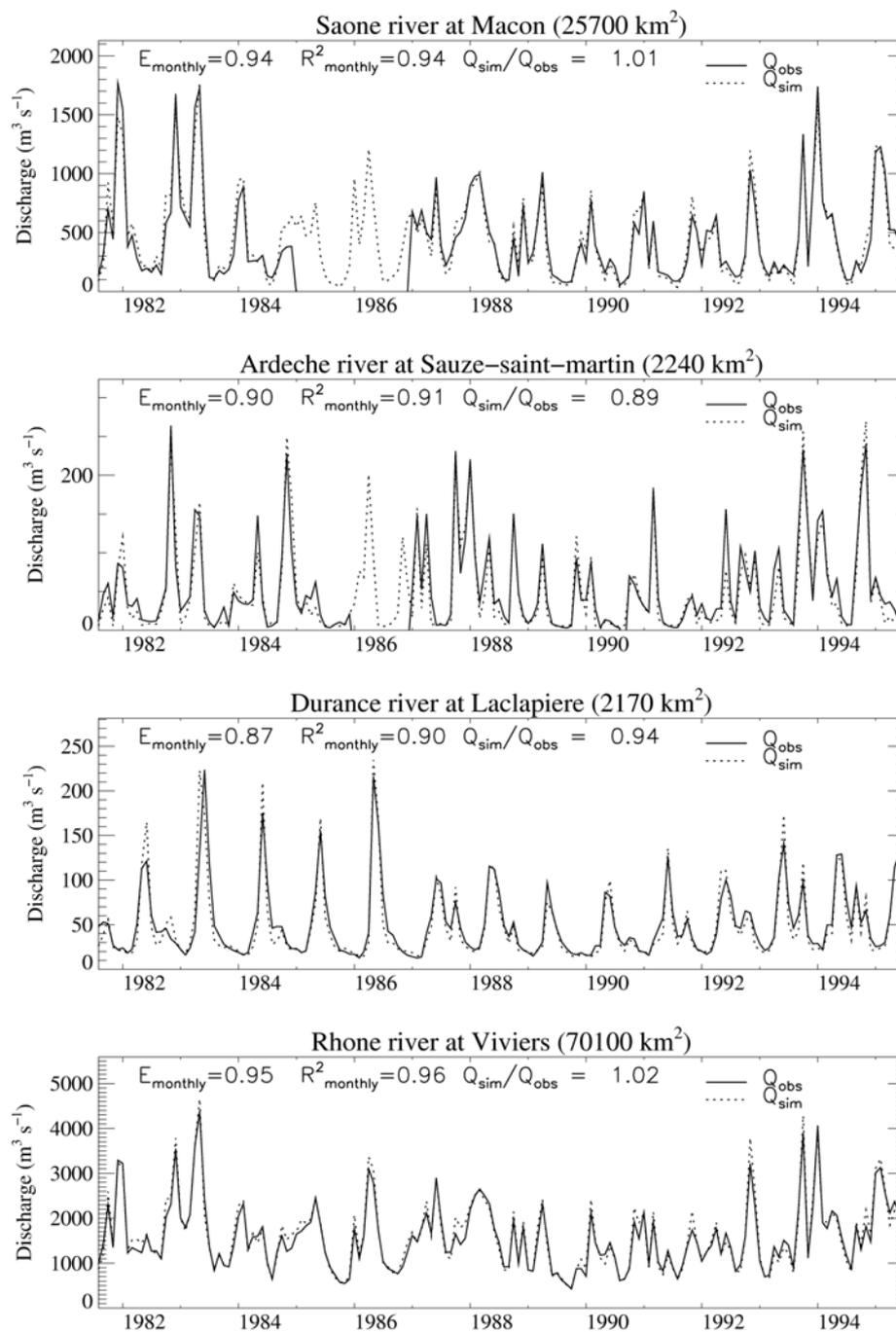


Figure 4 – Comparaison de débits mensuels observés et simulés (modèle ISBA-MODCOU) de la Saône (Macon), de l’Ardèche (Sauze), de la Durance (La Clapière) et du Rhône (Viviers) sur la période 1981-1996 (Etchevers et al. 2001). Les scores statistiques des simulations sont indiqués (l’efficacité E_{monthly} , la corrélation R^2 et le rapport annuel des lames d’eau $Q_{\text{sim}}/Q_{\text{obs}}$)

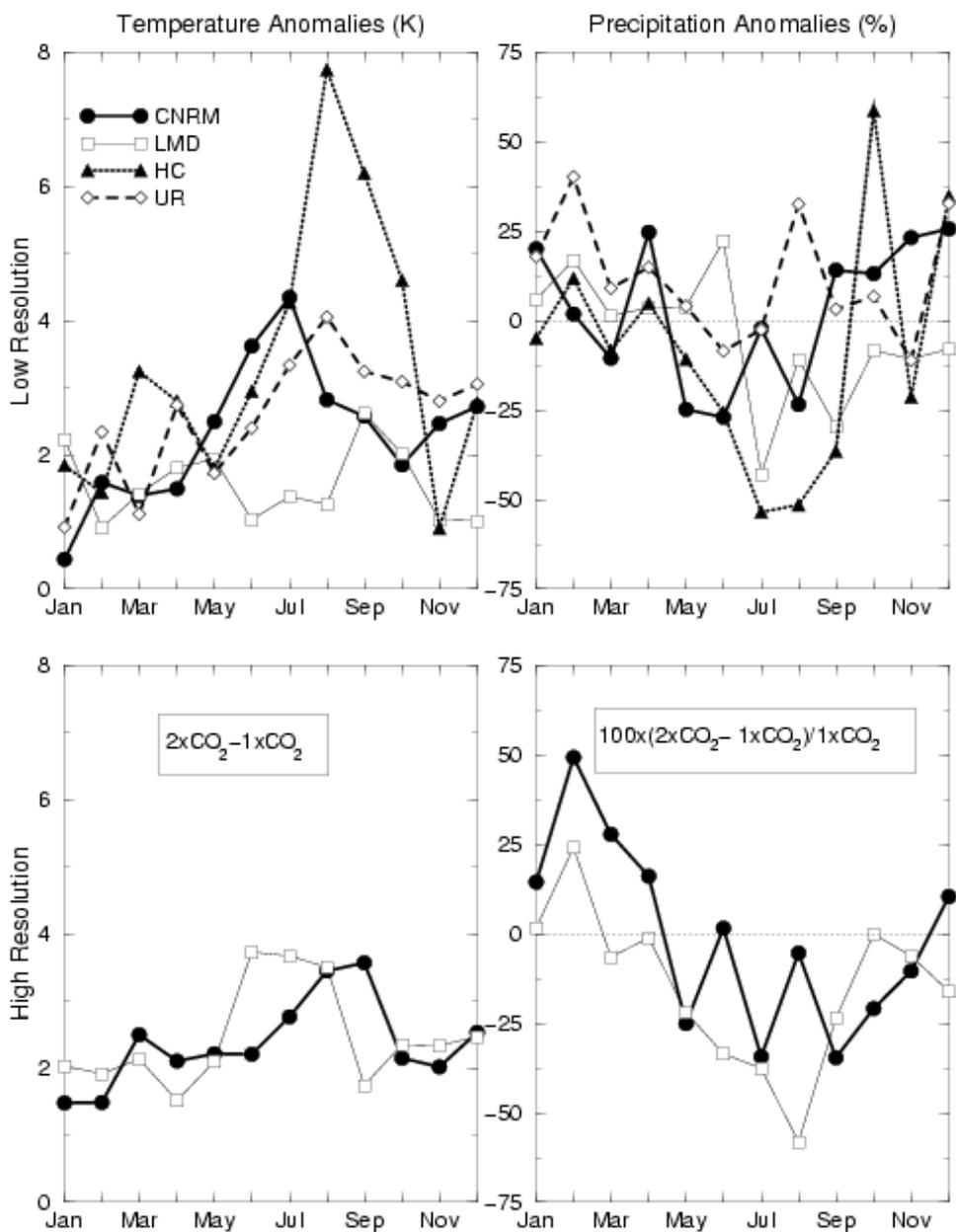
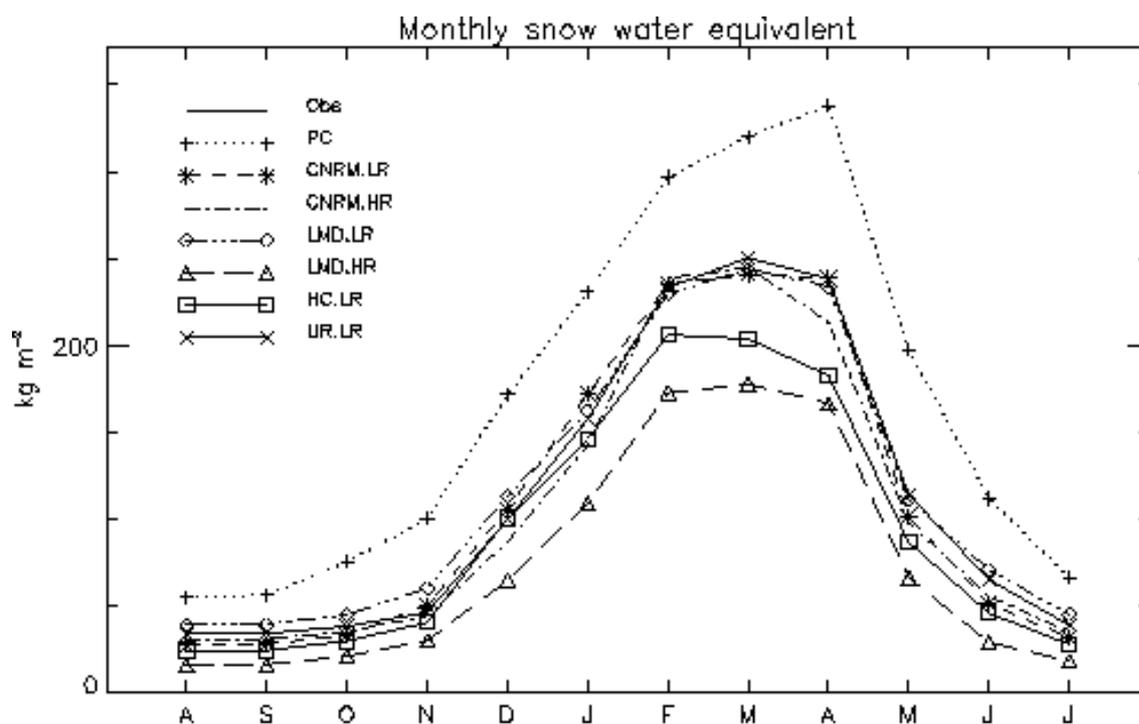


Figure 5 – Anomalies de précipitation (variation relative) et de température de l'air pour les 6 scénarios sur l'ensemble du bassin du Rhône. Ces anomalies mensuelles sont calculées à partir des simulations 2xCO₂ et 1xCO₂ de chaque MCG. Elles sont ensuite combinées au climat observé (1981-1997) pour définir les 6 scénarios du climat modifié.



Durance at Laclapiere (2170 km²)

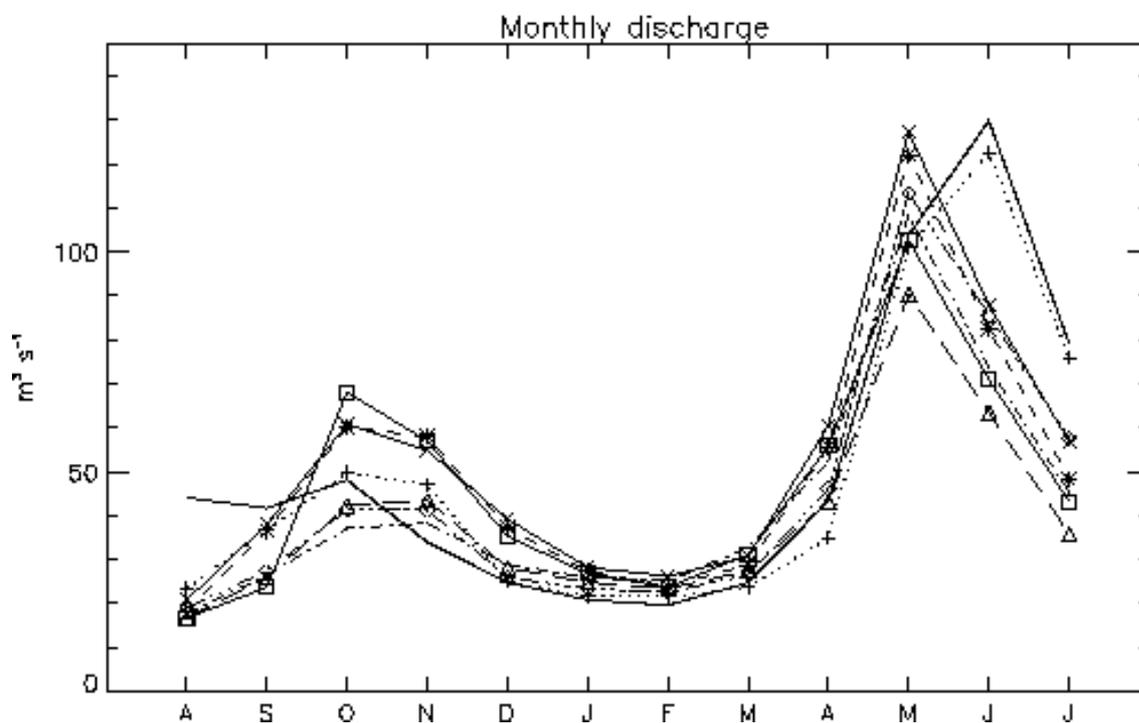


Figure 6 - Evolution du manteau neigeux et des débits sur le bassin versant de la Haute Durance ; les 6 scénarios sont comparés au climat présent (Obs et PC) (Etchevers et al. 2001).

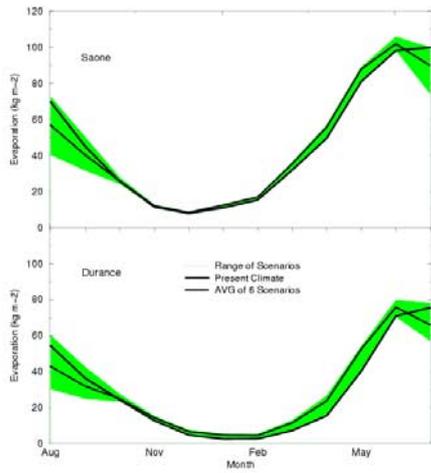
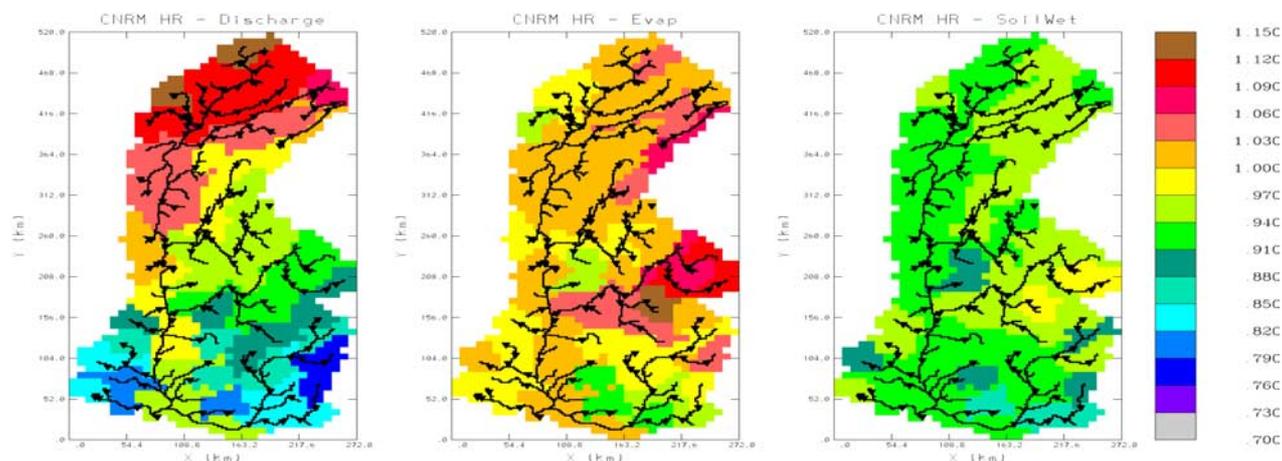


Figure 7 – Evolution des débits mensuels (haut gauche) de l'évapotranspiration (bas gauche) et de l'humidité des sols (haut droit) des bassins de la Saône et de la Durance sous l'hypothèse de changement climatique : la valeur moyenne est indiquée ainsi que l'enveloppe simulée par les 6 scénarios pour comparaison avec la valeur moyenne du climat actuel.



1

Figure 8 – Anomalies mensuelles des débits (gauche), de l'évapotranspiration (milieu) et de l'humidité du sol sous hypothèse du scénario CNRM haute résolution. Les anomalies correspondent aux différences de chaque terme entre les simulations hydrologiques sous climat modifié (2xCO2) et la période actuelle (1xCO2).

3 – MESURES RECENTES ADOPTEES

3.1 – Considérations générales – Programmes et observatoires.

La France a adopté le 19 janvier 2000 un Plan National de Lutte contre le Changement Climatique (PNLCC) dont l'objectif essentiel est d'organiser un plan d'action pour respecter l'engagement pris dans le cadre du protocole de Kyoto. Celui-ci se traduit pour la France par une stabilisation en 2010 des émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau qu'elles atteignaient en 1990. Ceci passe par une meilleure maîtrise des activités concourant à la production de GES. A ce titre sont visées particulièrement les activités liées à la production d'énergie, à l'habitat tertiaire, aux transports, et à la production agricole. Le PNLCC prévoit une centaine de mesures nouvelles ou renforçant des mesures existantes, s'adressant à ces secteurs. Les grands principes qui l'inspirent sont la mise en place d'instruments économiques d'incitation, l'équilibre entre mesures internes et mécanismes de marché, la maîtrise et l'économie d'énergies à la production comme à la consommation, la nécessité d'une information précise sur les conséquences en termes d'émission de gaz effet de serre de toute décision d'investissement public ou privé. La mise en œuvre de ces mesures est passée en revue chaque année avec la participation de la société civile, dans le cadre de la Conférence nationale de l'effet de serre, dont la dernière s'est tenue à Lyon les 27 et 28 novembre 2002. Le programme et ses évolutions sont examinés et approuvés par la Commission interministérielle de l'effet de serre (CIES), qui réunit, sous la présidence du Premier ministre, l'ensemble des ministres concernés.

Le PNLCC n'aborde pas les questions des impacts du changement climatique et de l'adaptation. On trouvera dans la troisième communication nationale à la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques l'état des recherches sur les impacts. Les études sur les impacts sont largement développées en France, principalement sous l'égide du programme de recherche Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC) du MEDD⁵.

La France n'a pas (encore) défini de programme national d'adaptation au changement climatique. En revanche, il existe des lois sur l'aménagement du territoire et sur la protection de l'environnement, et des plans de prévention des risques naturels et de gestion intégrée des espaces, milieux et ressources naturels.

Un Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre mer, a été créé par la loi du 19 février 2001, pour collecter les informations, études et recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux phénomènes climatiques extrêmes, en liaison avec les établissements et instituts de recherche concernés et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cet observatoire peut faire des propositions en matière d'adaptation.

Pour ce qui concerne le régime des eaux, les études, à horizon de 50 ans, mettent en évidence les points d'inquiétude suivants :

- anticipation des phénomènes d'étiage : un mois sur le bassin du Rhône, à l'étude sur le bassin de la Garonne
- accroissement de l'évapotranspiration et modification des calendriers agricoles :
- multiplication de crues méditerranéennes dévastatrices
- risques concernant certaines zones côtières qui pourraient être sensibles à un relèvement du niveau des mers (delta de la Camargue en zone méditerranéenne)

⁵ Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable

Globalement, les études actuelles mettent moins en évidence un risque de réduction des écoulements annuels qui pourraient même être accrus, qu'un risque d'extension des phénomènes extrêmes: périodes des sécheresses et d'inondations.

Le PNLCC actuel aborde encore peu les mesures d'adaptation aux conséquences du changement climatique sur le régime des eaux. Aucune corrélation significative entre le changement climatique, le régime des eaux et l'évolution de besoins ne peut être faite à ce jour en France.

De nombreux motifs d'origine anthropique peuvent expliquer les difficultés actuelles dans la gestion de eaux et ont conduit la France à mieux s'armer contre ces phénomènes. Ces mesures concourront à mieux protéger le pays des impacts éventuels du Changement Climatique sur le régime des eaux, même si ces effet sont encore mal connus.

3.2 - Lutte contre les sécheresses

En application de la loi sur l'eau de 1992, des SDAGE⁶ ont été établis par grands bassins qui fixent des débits objectifs d'étiage pour les principales rivières soumises à de forts prélèvements et définissent des zones de répartition de eaux là où l'équilibre entre ressources en eau et besoins est déséquilibré. Sur ces secteurs tout nouveau prélèvement de ressources est interdit ou doit être compensé par de nouvelles réserves.

L'attribution de "surprimes" PAC⁷ pour les cultures en maïs irriguée a été à l'origine des expansions importantes de la sole irriguée. La réforme de la PAC de 1992 a jugulée à partir des années 1995 cette croissance, en limitant les surfaces aidables, mais en créant des files d'attente auprès des agriculteurs pour lesquels, aujourd'hui, encore, l'irrigation offre une perspective de croissance et stabilisation des revenus.

Enfin les dispositifs de contrôle du fonctionnement des irrigations ont été puissamment renforcés : programme PURE⁸ développement des comptages, système d'avertissements sur les besoins des plantes au profit des agriculteurs. Le comptage est ainsi devenu une condition d'attribution des aides au titre de la PAC.

Une hausse progressive des tarifs de prélèvement et usage de l'eau visant à faire participer la profession agricole au coût de mise à disposition de la ressource (jusqu'alors quasi intégralement pris en charge sur des fonds publics) a conduit à une forme d'auto-régulation de la demande.

3.3 - Agriculture

L'agriculture constitue le sujet de préoccupation majeur dans le domaine de la gestion des usages de l'eau par ses impacts quantitatifs (assèchements dus aux irrigations) et ses impacts qualitatifs (eutrophisation de rivières ou de milieux littoraux, contamination des prises d'eaux par les nitrates ou les pesticides). Les surfaces irriguées ne représentent en France que moins de 8 % de la SAU⁹ (culture + fourrage), un changement du régime des eaux pourrait avoir un impact sur l'ensemble de l'agriculture française.

Les irrégularités du régime des pluies et des eaux se traduisent, dès aujourd'hui, par une sensibilité forte des activités agricoles aux intempéries (orages de grêle, inondations,...) qui mobilisent des crédits importants d'indemnisations et un développement des irrigations de complément qui ont pour objet d'assurer une sécurisation des productions, notamment pour les productions liées à des activités agro-industrielles dans le Nord de la France.

⁶ Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux

⁷ Politique Agricole Commune

⁸ Programmes d'utilisation rationnelle de l'eau

⁹ Surface Agricole Utile

Un effort important a été initié au sein des organismes de recherche (Programme Agrotech piloté par l'INRA¹⁰ pour évaluer l'impact de l'augmentation des gaz à effet de serre sur l'agriculture. Les principaux résultats mettent en évidence un double effet : positif avec l'effet de la fertilisation carbonée (hausse des rendements et réduction des besoins en eau), négatif avec le raccourcissement du cycle végétatif du au réchauffement

Des changements de calendriers agricoles sensibles sont déjà constatés : anticipation de la floraison du pommier dans le Sud-Est, dates de récolte des vendanges (début septembre aujourd'hui à château Neuf du Pape au lieu de fin septembre), accélération des premières coupes de prairie.

Avec la réforme de la PAC, la France s'est résolument engagée dans une politique volontariste d'encouragement au développement de nouvelles valorisations non alimentaires Le développement des valorisations non alimentaires des productions végétales (plantes textiles, certains oléagineux et plus récemment l'amidon, la fécule de pomme de terre, l'alcool de betteraves pour la chimie - environ 260 000 ha) s'inscrit à la fois dans une logique de politique agricole et de développement rural (création de nouvelles sources de revenus et d'emplois, multifonctionnalité de l'agriculture, promotion des matières premières renouvelables), d'indépendance énergétique et de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre. Ils bénéficient à ce titre de mesures fiscales.

C'est dans ce contexte que les pouvoirs publics ont décidé dès 1992 d'accorder un avantage fiscal aux biocarburants, premier débouché non alimentaire en termes de surfaces agricoles.

Par ailleurs, un important effort de recherche développement a été consenti via le GIS AGRICE (Agriculture pour la chimie et l'énergie) dans les domaines des biocarburants, biocombustibles, biomatériaux et biomolécules.

Ainsi, les nouveaux débouchés non alimentaires mobilisant actuellement 320 000 ha affectés à la production de biocarburants et 60 000 ha ayant pour débouchés les secteurs des lubrifiants, tensioactifs, plastifiants, solvants et agents de nettoyage, formulations cosmétiques, peintures, plantes aromatiques, à parfum et médicinales.

Un enjeu majeur de l'agriculture française est la sécurisation des productions : il est toutefois difficile de faire la part des alea constatés dans les productions de ce qui tient au contexte agronomique (nouvelles variétés,...) de ce qui tient au changement climatique

Des renforcements importants de la réglementation ont été mises en place en application de la Directive européenne de 1995, dite "nitrates", pour limiter les effets des cultures intensives (apports d'engrais et de pesticides) ou ceux des élevages hors-sols. La plupart des experts reconnaissent, cependant, que ces mesures ne pourront trouver leur efficacité que dans un nouveau comportement des agriculteurs qui supposerait une réforme profonde de la PAC. Cette inflexion partiellement engagée avec les réformes de la PAC de 1992 et 1999 qui consolident le volet rural au détriment du volet lié à la production agricole fait l'objet de fortes réticences des agriculteurs inquiets de la dégradation de leurs revenus.

Les tableaux et figures suivants donnent une indication de l'impact du changement climatique sur la production agricole (d'après Bernard Seguin, INRA, in *Courier de l'Environnement*, juin 2002).

¹⁰ Institut National de la recherche Agronomique

Culture	Lieu	Rendement	Consommation en eau
1 - Blé	Versailles (sans irrigation)	+5,7	- 1,7
	Avignon (irrigué)	+2,5	- 5,7
- Maïs	Versailles (sans irrigation)	+10,6	- 12,4
	Avignon (irrigué)	-16,1	- 16,2
2 - Blé	Toulouse (irrigué)	+4,0	- 5,8
	Versailles (irrigué)	+2,9	0

Variations simulées des rendements et des consommations en eau de cultures de blé et de maïs en différents lieux (exprimées en pourcentages des valeurs simulées en conditions actuelles).

Résultats 1 : scénario climatique GISS transitoire, année 2030, CO2 460 ppm, modèles CÉRES, moyenne sur 30 ans simulés.

Résultats 2 : scénario ARPÈGE Climat, anomalies de températures sur sept ans, modèles STICS, effet CO2 non pris en compte, moyenne sur 16 années simulées. Sources : Delécolle (données non publiées).

Tableau 5 - Impacts simulés pour différentes espèces et conditions.

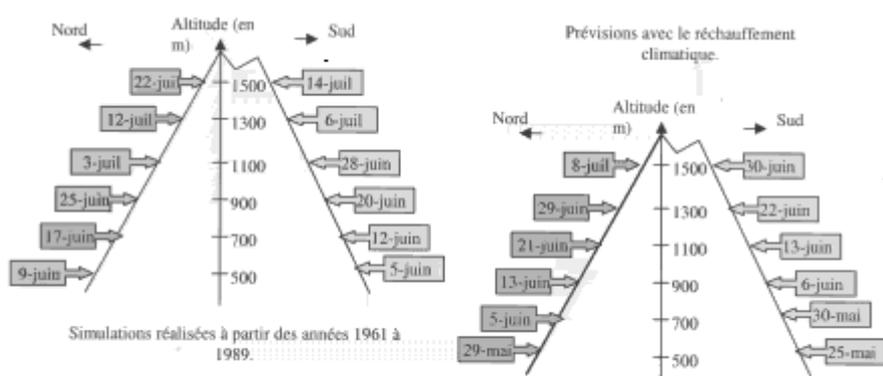


Figure 9 – Prairies: Effets du réchauffement climatique sur la première date de coupe en moyenne montagne alpine (juin, 2001)

3.4 - Lutte contre les inondations

Le gouvernement a décidé d'une part d'accélérer le rythme de mise en place de Plans de Prévention des Risques et d'autre part améliorer les systèmes d'annonce de crues par une meilleure collaboration entre les Services hydrologiques, les Services de Météo-France et le dispositif d'alerte de la population.

La prévision des crues dans les régions méditerranéennes est difficile.

A titre d'exemple, la catastrophe de novembre 1999 qui a touché une partie des départements de l'Aude et des Pyrénées Orientales a été ainsi la conséquence d'un apport de pluies de plus de 200 millimètres, avec des pointes de précipitation de 350 à 500 millimètres en 12 heures sur les secteurs les plus arrosés (soit 5000 mètres-cube d'eaux à l'hectare ou presque l'apport moyen inter-annuel constaté dans ces régions). Cet événement s'est conjugué avec une tempête en Méditerranée qui a contrarié l'écoulement normal des fleuves à la mer. Dès le jeudi 11 novembre Météo-France avait diagnostiqué l'arrivée rapide d'un phénomène pluviométrique exceptionnel dans ces régions, sans pouvoir localiser le point d'impact des plus gros orages qui frappèrent dans la nuit du vendredi. Il est presque impossible de se prémunir contre les conséquences de ce type d'événement exceptionnel,

même s'il est vrai qu'une partie des dégâts aurait pu être réduite par un meilleur respect des zones de débordements des cours d'eaux. Cela reste vrai en ce qui concerne des événements plus récents.

Les systèmes de prévision sur l'annonce de pluies torrentielles par Météo-France ont été renforcés (en particulier par l'extension de dispositifs de suivi des phénomènes orageux par radars) et font l'objet d'alertes à court terme (24 heures) auprès des autorités locales et du grand public, avec niveaux de gradation de risques. Ce système d'alerte a, ainsi, correctement fonctionné lors des crues récentes du Gard. La localisation exacte de la survenue de l'orage sur de petits bassins versants fragmentés constitue, cependant, encore un obstacle à la prévision de crues locales qui peuvent se révéler catastrophiques sur de toutes petites rivières en systèmes méditerranéens.

Les crues catastrophiques du Gard d'octobre 2002 ont conduit le Gouvernement à annoncer un renforcement des mesures de protection des populations et des biens :

1 - réduction des rythmes d'écoulement des eaux par le développement de mesures de régulation et ralentissement du débit en tête de bassin versant : microretenues sèches, ouverture de zones d'expansion de crues

2 - renforcement des dispositifs de prévision des crues. A cet effet un Centre technique National d'appui aux services d'annonces des crues va être installé à Toulouse avec une mise en commun des outils techniques développés par les services de Météo-France et du Ministère de l'Environnement : banque HYDRO et PLUVIO, diffusion d'outils de simulation de crues, publication de cartes de vigilance inondations en accompagnement des cartes de vigilance météo déjà existantes,....Parallèlement les réseaux de mesures vont être renforcés, dont en particulier le réseau ARAMIS de mesure des précipitations par radars, qui couvre l'ensemble du territoire métropolitain et des zones importantes dans les départements et territoires d'Outre-mer.

3 - accélération de la démarche de prescription et d'approbation des PPR¹¹

De manière générale, les services spécialisés ont été invités à un développement auprès des populations d'une conscience et d'une culture du risque par une diffusion plus rapide et plus directe auprès des populations, des informations disponibles sur la prévision des risques (annonces d'événements extrêmes) et la vulnérabilité (atlas de zones inondables,...), des mesures de prévention possible et des comportements à avoir en cas de survenance de la crue.

Enfin le Gouvernement a confirmé son intention de déposer prochainement un projet de loi sur les risques.....

Les mesures législatives traitant des risques naturels figurent dans le titre II du projet de loi en cours de gestation intitulé « mesures de prévention face aux risques naturels ». Ce titre comprend différents chapitres portant respectivement sur l'information de la population, l'utilisation du sol et l'aménagement, les travaux et des dispositions financières qui sont autant de composantes de la prévention. Un dernier chapitre, enfin, est consacré à l'action des services de restauration des terrains de montagne (RTM) et de l'office national des forêts (ONF) en matière de prévention des risques.

L'amélioration de **l'accès à l'information** –qui est un droit- se traduit par les dispositions suivantes:

- ☛ l'indication de la situation des biens immobiliers vis à vis des risques à l'occasion de transactions
- ☛ l'information communale sur les risques à l'initiative des maires
- ☛ la pose de repères de crues

¹¹ Plan de Prévention des Risques

- ☛ la prévision de crue dont le dispositif doit être ajusté dans le cadre de schémas d'organisation de la prévision des crues établis au niveau de chaque circonscription de bassin après consultation des collectivités locales.

L'utilisation du sol et l'aménagement

Au delà des dispositions préventives relatives aux terrains soumis à des risques, on s'intéresse ici aux terrains qui participent à l'aggravation du risque ou qui pourraient être utilisés pour le diminuer. Quatre mesures sont prévues pour ce faire :

1 - l'instauration de servitudes d'utilité publique facilitant :

a) la rétention des crues par sur-inondation de certaines zones, pour en accroître la capacité de stockage des eaux de crues,

b) la restauration du déplacement naturel des cours d'eau lorsque ce déplacement est nécessaire à l'alimentation du débit solide entraîné par le cours d'eau et au maintien de son équilibre morphologique,

2 - la prévention de l'érosion des sols par limitation ou interdiction des pratiques agricoles nuisibles dans des zones sensibles à l'érosion.

3 - la reconstitution des haies et talus en permettant l'implantation de ceux ci en limite de parcelle et non plus à deux mètres.

4 - une dérogation au statut du fermage sur les terrains acquis par les collectivités dans le lit majeur d'un cours d'eau en réalisation d'un programme d'intérêt général pour la prévention des risques naturels majeurs.

En matière **de travaux** contre les risques naturels, il s'agit notamment de faciliter l'intervention des collectivités locales dans leurs actions de protection et d'entretien à maîtrise d'ouvrage publique en procédant notamment à la mise à jour de la liste des travaux pour lesquelles les communes sont habilitées à intervenir (avalanches, inondations, incendie...), en simplifiant les procédures d'intervention en cas de péril (suppression de l'enquête publique) et en instaurant des servitudes de passage au profit des collectivités pour assurer les interventions.

Les dispositions financières proposées ont principalement pour but de favoriser les mesures de prévention, notamment les travaux mais aussi les acquisitions amiables de biens menacés, soit en contribuant à leur financement, soit en prévoyant l'exonération de taxes quand il s'agit de réaménager un bâtiment pour le rendre moins vulnérable aux risques, soit en prévoyant des primes ou franchises d'assurance plus élevées en cas de non réalisation de travaux de prévention. Les mesures traitent de :

- ☛ la prise en compte des indemnités catastrophe naturelle dans le calcul des indemnités d'expropriation pour risque
- ☛ l'élargissement de l'utilisation du fonds de prévention des risques naturels majeurs qui pourra être utilisé pour contribuer au financement des études et des travaux de prévention à maîtrise d'ouvrage privée sur les biens couverts par la garantie contre les catastrophes naturelles, réalisés en application de plans de prévention des risques approuvés.
- ☛ la prise en compte de la prévention des inondations dans les politiques départementales de protection des espaces naturels en donnant aux Conseils Généraux la possibilité d'utilisation de la TDENS (taxe départementale des espaces naturels sensibles) à la préservation des champs d'expansion de crues.
- ☛ l'exonération des travaux de prévention des taxes d'urbanisme
- ☛ la possibilité d'expropriation au bénéfice des communes ou à leurs groupements pour cause de risque naturel majeur
- ☛ l'élargissement de la saisine du Bureau central de tarification au préfet et au président de la Caisse centrale de réassurance permettant de revoir le montant de la surprime catastrophe

naturelle après intervention du BCT saisi par le préfet ou le président de la CCR dans des cas où les assurés refusent d'envisager des mesures de prévention élémentaires.

3.5 – Les écosystèmes méditerranéens

Deux types d'écosystèmes paraissent particulièrement menacés sur le littoral méditerranéen français : les zones humides et les écosystèmes forestiers.

Pour ce qui concerne les zones humides, les principales menaces actuelles, liées à l'agriculture et à l'urbanisation ont amené les pouvoirs publics à mettre en réserve naturelle les principaux étangs littoraux et le delta de la Camargue. La principale menace liée au changement climatique pourrait être l'invasion d'eaux marines, mais les études les plus récentes sur le delta du Rhône font apparaître de ce point de vue que ces problèmes seraient plus dépendants d'un risque de subsidence de ces milieux, par défaut d'alimentation amont plutôt que par le risque d'une élévation du niveau de la mer.

Pour ce qui concerne les écosystèmes forestiers, la principale menace est le risque d'incendies lié à la croissance de la pression démographique et à une insuffisance des précipitations en été. Un réchauffement climatique de l'ordre de 3° pourrait entraîner une contraction des zones naturelles de végétation à cause de l'aridité et une légère montée des étages de végétation avec une décroissance de la productivité. Ces modifications ne pourront, toutefois, être perçues qu'à long terme de nombreuses espèces méditerranéennes, comme le chêne vert ayant des capacités fortes d'adaptation à des phénomènes de sécheresse. Les risques liés à l'incendie seraient, cependant, accrus par un allongement des périodes de sécheresse.



ZONES DE REPARTITION DES EAUX

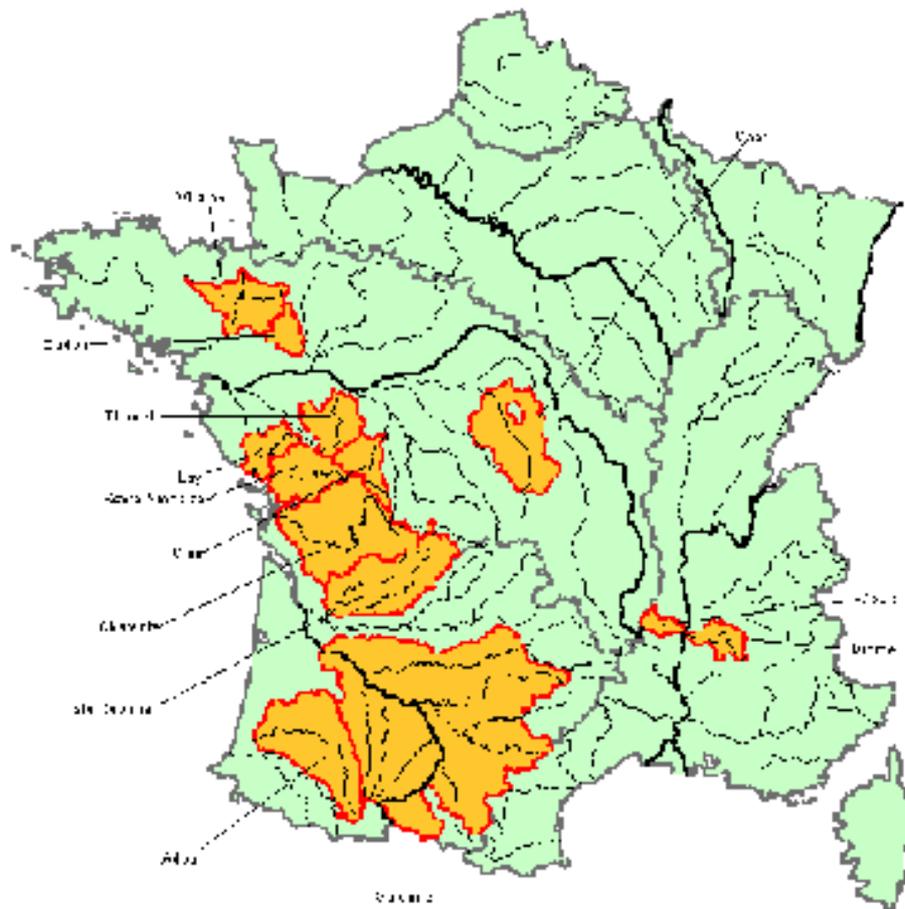


Fig. 10 – Synthèse : les zones de répartition des eaux en France

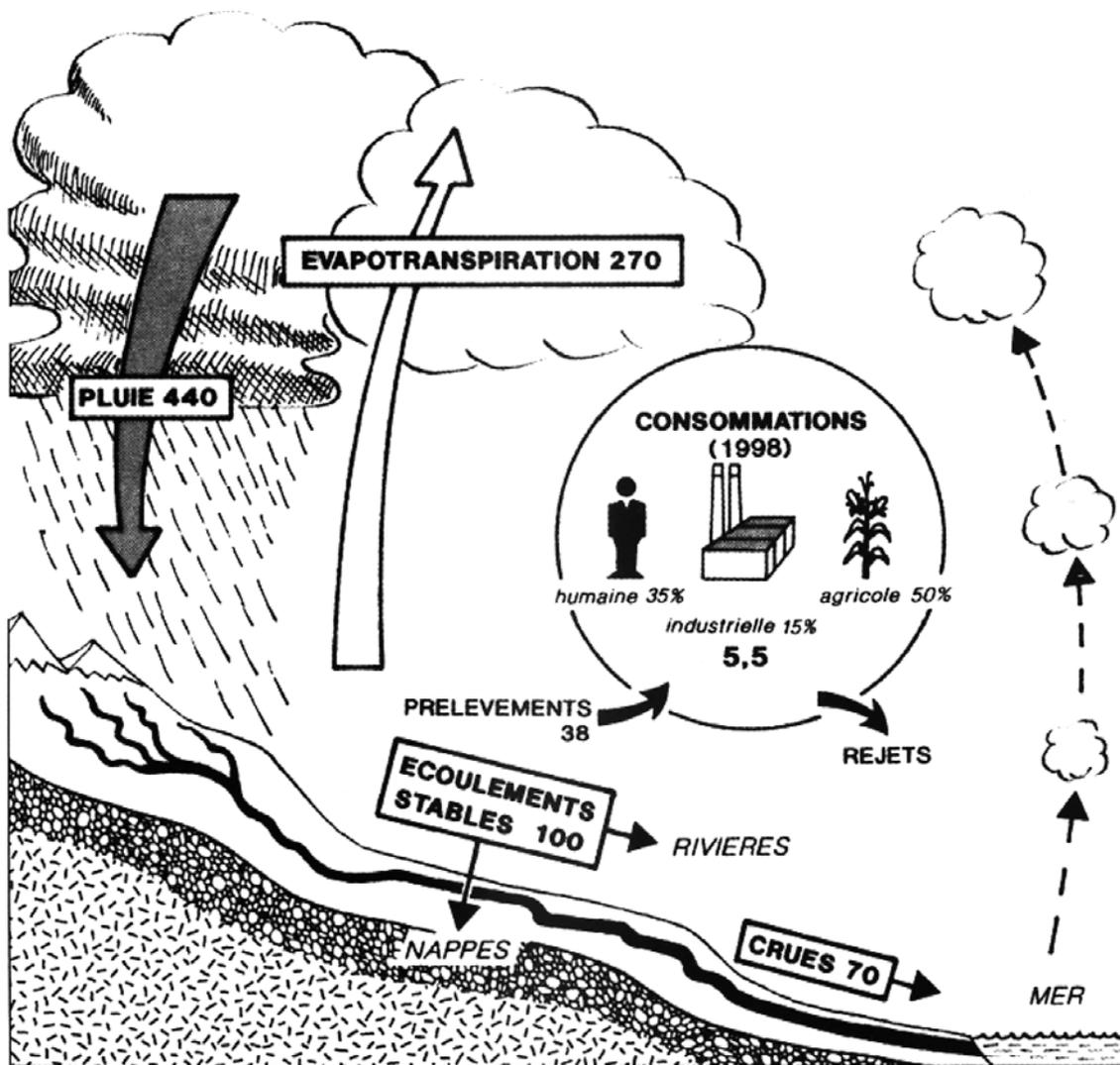


Fig. 11 – Synthèse : le cycle de l'eau (incluant les usages) en France – aspects quantitatifs

BIBLIOGRAPHIE

Boone A., J.-C. Calvet and J. Noilhan, 1999, *Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force restore*, J. Appl. Meteor., **38**(11), 1611-1630

Boone A., J. Noilhan et P. Etchevers, 2000 : *GICC-Rhône Climate Scenarios*. Technical report of the GICC/Rhône program, Novembre 2000, 44p. (available upon request to J. Noilhan, Météo-France/CNRM, 42 ave. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France)

Etchevers, P. , Golaz C. et F. Habets, 2001 : *Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994*. J. Hydrol., 244, 60-85.

Etchevers P., A. Boone and J. Noilhan, 2001: *Enneigement sous l'hypothèse d'un réchauffement climatique: programme Gewex/Rhône*. Technical report of the GICC/Rhône program, Oct. 2001, 23 p. (available upon request to J. Noilhan, Météo-France/CNRM, 42 ave. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France)

Habets, F., P. Etchevers, C. Golaz, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, J. Noilhan et C. Ottlé, 1999. *Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin*, J. Geophys. Res., **104**, D24, 31,145-31,172.

Noilhan J. and S. Planton, 1989: *A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*. Mon. Wea. Rev., **117**, 536-549.

Noilhan, J. A. Boone and P. Etchevers, 2001: *Application of climate change scenarios to the Rhone basin*. Dans 'Applying Climate Scenarios for Regional Studies with particular reference to the Mediterranean', Rapport No 4 ECLAT 2, édité par S. Planton, C. Hanson, D. Viner and M. Hoepffner, Toulouse, 25-27 octobre 2000, 58- 74

POUR CONTACTER LES AUTEURS PRINCIPAUX :

Jean- Luc REDAUD

Conseil Général du GREF
251 rue de Vaugirard
75732 Paris07
France
Tel: 33 (0)1 49 55 56 35 - Fax: 33 (0)1 49 55 56 01
jean-luc.redaud@agriculture.gouv.fr

Joël NOILHAN

Météo-France/CNRM
42, Avenue Gaspard Coriolis
31057 TOULOUSE
France
Tel : 33 (0)5 61 07 90 90
joel.noilhan@meteo.fr

Marc GILLET

Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES)
35 Rue Saint Dominique –
75700 PARIS
France
Tel. 33 (0)1.42.75.87.14 - Fax 33 (0)1.47.53.76.34
marc.gillet@mies.pm.gouv.fr

Gérard BEGNI

MEDIAS-France,
18, Avenue Edouard Belin – Bpi 2102
31401 TOULOUSE CEDEX 4
France
Tel. 33(0)5 61 27 31 82 – Fax 33(0)5 61 28 29 05
gerard.begni@medias.cnes.fr