



## Quel climat futur en Pays-de-la-Loire : Régionalisation des résultats des simulations climatiques

Pour se projeter vers le climat du futur, on ne peut se satisfaire d'une simple interpolation mathématique des séries de mesure historiques. Il est devenu incontournable de tenir compte de la grande variabilité du climat à l'échelle de quelques années ou de quelques décennies, et de l'accentuation de l'effet de serre. Les progrès récents de la modélisation et l'augmentation de la capacité des calculateurs permettent, depuis quelques années, de réaliser des simulations climatiques à l'échelle du globe, en considérant l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. Les simulations s'appuient donc sur les équations physiques qui régissent le comportement de l'atmosphère.

Nombreux sont les modèles de climat exploités par une multitude de laboratoires de recherche dans le monde. Les résultats de ces simulations sont relativement convergents en ce qui concerne la température. Leur variabilité est beaucoup plus importante pour les précipitations, ce qui se traduit par des résultats parfois très différents à l'échelle régionale.

Ce document présente quelques illustrations de ce que pourrait être le climat futur des Pays-de-la-Loire. L'accent sera mis sur les incertitudes inhérentes à ce type de simulations (en fonction du modèle, des scénarios d'émission de gaz à effet de serre attendus ces prochaines décennies, méthode de descente d'échelle utilisée...).

Les résultats des simulations dites « RETIC » issues du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France permettront de concrétiser ces projections climatiques à l'échelle régionale et d'aborder les difficultés liées aux méthodes de descente d'échelle (par. 4.1 à 4.3). Les incertitudes associées au modèle utilisé seront décrites lors de l'examen du comportement des précipitations (par. 4 - projet Scampe). Elles seront rappelées au travers de l'évolution possible d'autres paramètres météorologiques (vent, insolation...). Enfin, on évoquera les progrès attendus dans le domaine de la modélisation climatique ces prochaines années et la mise à disposition de l'ensemble de ces données via le portail DRIAS.

### 1. La méthode « Datar »

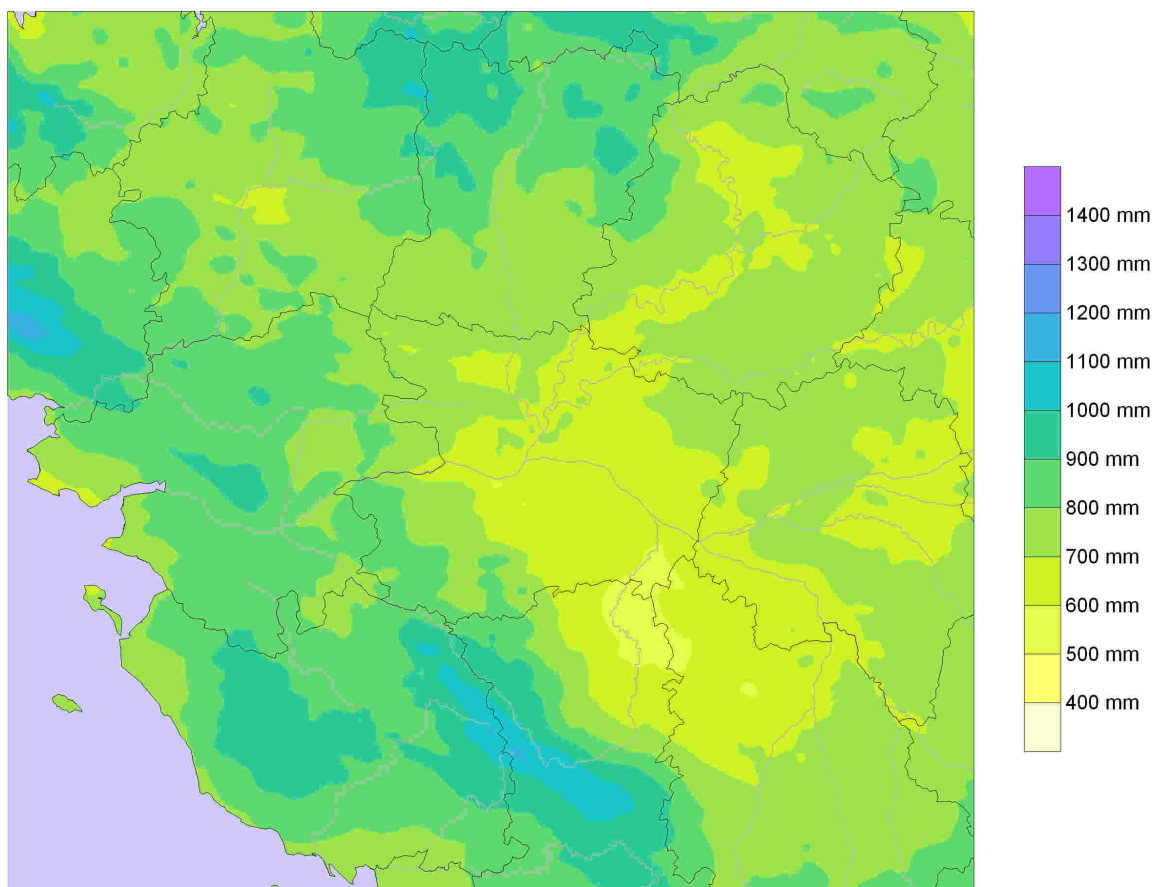
Le plus souvent, les simulations globales sont réalisées à une échelle horizontale de l'ordre de 300 km. Ces données sont ensuite couplées à des modèles de résolution de quelques dizaines de kilomètres à l'échelle d'un pays comme la France. Cette résolution est souvent insuffisante pour décrire le climat d'une région. Il est donc nécessaire de réaliser une descente d'échelle spatiale pour mieux prendre en compte les effets de relief ou de côte. Des méthodes sont parfois utilisées pour réaliser des descentes d'échelle dynamiques (en imbriquant un modèle à maille fine dans un modèle de plus grande échelle). Ces techniques nécessitent de gros moyens et sont utilisées uniquement pour des programmes de recherche spécifiques. Par ailleurs, l'utilisation directe des paramètres issus des modèles de climat montre souvent l'existence de biais (lorsqu'on les compare aux observations sur la période de référence 1950/2000).



Nous utilisons ici une descente d'échelle statistique baptisée « méthode des Deltas » qui permet à la fois d'obtenir une résolution spatiale fine adaptée au climat régional et de corriger le biais éventuel dans les données.

Le climat actuel est décrit par une climatologie fine (résolution 1km) issue de la spatialisation des observations sur la période 1971-2000 par la méthode AURELHY. La méthode AURELHY permet d'obtenir des champs météorologiques (pluie et température) par l'interpolation des mesures effectuées sur une longue période en prenant en compte le relief. Cette climatologie fine constitue actuellement la climatologie de référence.

### Pluies moyennes annuelles - Période 1981/2010



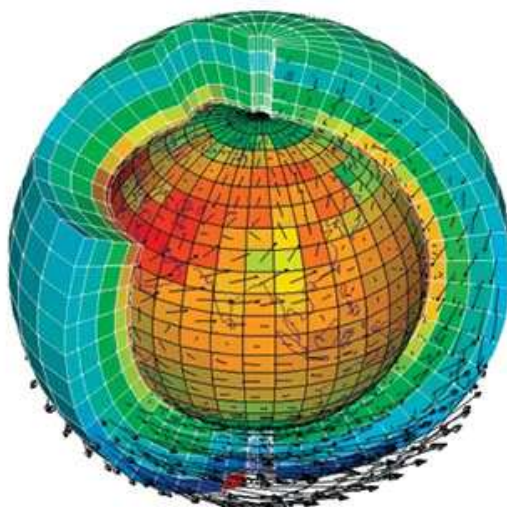
*Exemple de champ de précipitations moyennes annuelles obtenu par la méthode Aurelhy. Il met en évidence les fortes pluies associées au relief et les précipitations souvent plus faibles en bord de mer.*

La méthode des deltas s'appuie sur le calcul de l'évolution climatique (delta) entre la période représentant le climat actuel et une période du climat futur. Les deltas (différences) entre la période du climat futur et la période actuelle ou dite « de référence » (1971-2000) sont calculés à partir des simulations climatiques aux points de grille du modèle de résolution 50km. Ils sont ensuite interpolés spatialement de façon « mathématique » (méthode du krigeage) à la même résolution que celle utilisée pour la climatologie de référence actuelle. Pour obtenir le climat futur à cette même échelle, les deltas interpolés sont ajoutés à la climatologie de référence actuelle.



Cette méthode a été utilisée pour établir les cartographies réalisées dans le cadre de l'étude DATAR dont les résultats sont mis à disposition dans le cadre des SRCAE. Celles-ci ont été réalisées en utilisant les simulations du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France (version 4) dont les résultats sont exploitables depuis trois ans environ. Les caractéristiques de ces simulations sont présentées succinctement ci-après.

ARPEGE-Climat est un modèle climatique global développé par le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM). Il dispose d'une maille étirée qui offre une résolution horizontale d'environ 50km sur la France.



*Principe du calcul en points de grille (horizontaux et verticaux), crédit IPSL*

Ce modèle est forcé par un jeu de données de la température de surface de la mer, issues de simulations couplées à résolution de 300km. Il fait partie des modèles français servant de référence pour les travaux liés au rapport du Giec 2007, au même titre que celui de l'Institut Pierre Simon Laplace (modèle LMDZ). Ses résultats ont été validés et utilisés dans de nombreuses études. Quatre jeux de simulations ont été calculés par la version 4 d'ARPEGE-Climat et sont disponibles pour l'étude du climat du 21ème siècle :

- 50 ans de simulations climatiques sur la période 1950-2000 pour évaluer la capacité du modèle à simuler l'évolution du climat déjà constatée par comparaison avec les observations disponibles.
- 100 ans sur la période 2001-2100 avec le scénario A1B
- 100 ans sur la période 2001-2100 avec le scénario A2
- 100 ans sur la période 2001-2100 avec le scénario B1

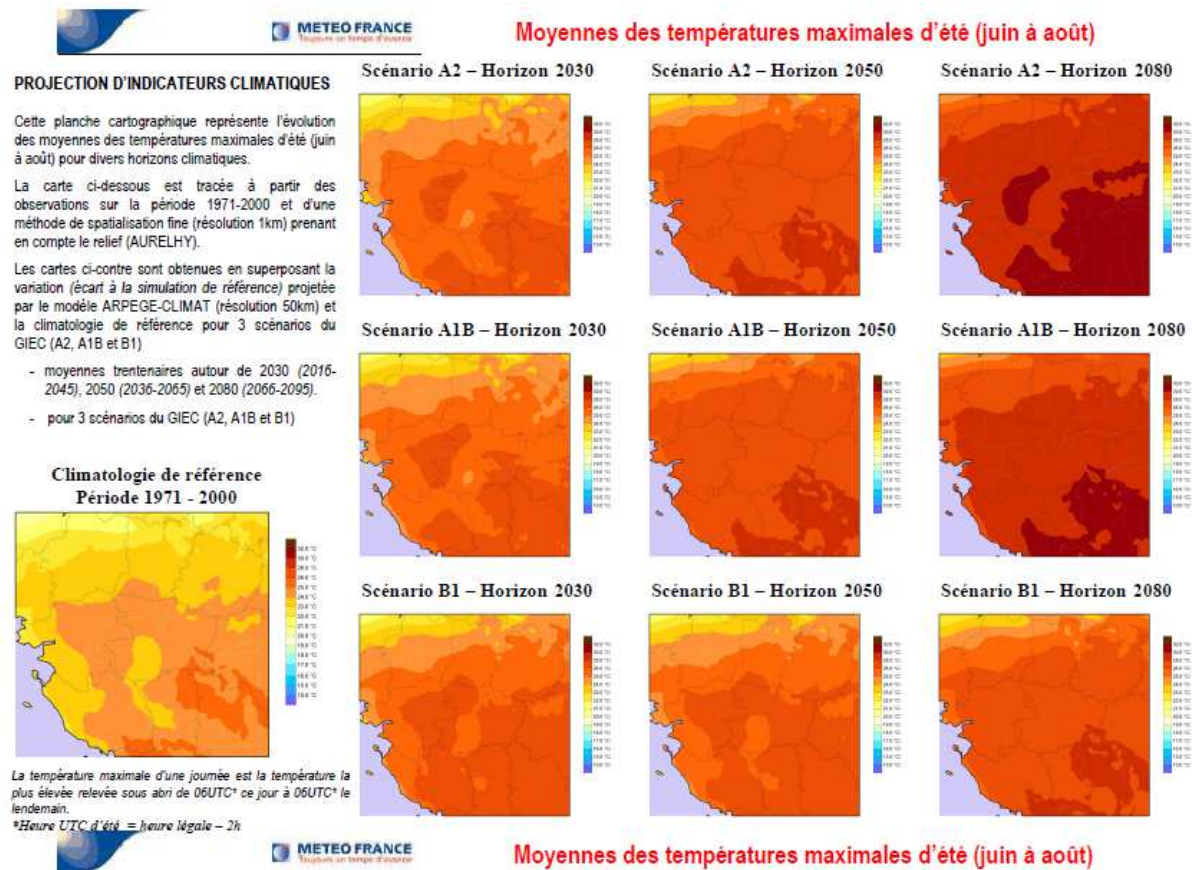
L'étude des horizons 2030, 2050 et 2080 correspondra à l'étude des paramètres simulés, moyennés sur des périodes de 30 ans centrées sur les années 2030, 2050 et 2080 (soit 2016/2045, 2036/2065 et 2066/2095). Ces périodes de 30 ans sont tout à fait adaptées à la description du climat selon les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).



Les scénarios **A2**, **B1** et **A1B** ont été définis par le GIEC, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Ils sont qualifiés de scénarios optimiste (B1), médian (A1B) et pessimiste (A2) par rapport à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau global. Ces scénarios ont servi de base aux travaux du GIEC (rapport 2007).

## 2. Analyse des résultats

Les résultats présentés ici sont à interpréter avec prudence car il ne s'agit que d'une tendance d'un changement possible sur un ensemble de points de grille. Il faut bien garder à l'esprit qu'il ne s'agit que d'un « zoom » à échelle régionale de simulations du climat futur réalisées à l'échelle globale. En changeant de forçage à grande échelle, on peut évidemment obtenir des résultats significativement différents. Les planches fournies en annexe sont volontairement présentées sous la forme de 10 cartes par paramètres pour illustrer la sensibilité du climat futur aux hypothèses de travail (sensibilité à l'horizon 2030/2050/2080 et aux scénarios d'augmentation des GES du GIEC A1B, B1, A2).



*Exemple de planches donnant les résultats des simulations à échelle régional pour les températures maximales en été*

La première carte en bas à gauche représente la référence (normales ou moyenne trentenaire du paramètre météorologique pour le climat de référence 1971/2000). Les 9 autres cartes représentent le résultat des simulations pour chacun des 3 horizons temporels et chacun des scénarios d'émission de GES du GIEC.



Le zoom géographique utilisé est adapté à la région Pays-de-la-Loire. Cela ne signifie en rien que l'état actuel des connaissances, en terme de modélisation climatique, permet d'obtenir une si grande précision géographique pour le climat futur. **Cette cartographie doit être interprétée avec une grande prudence** (il ne s'agit que d'une illustration de l'évolution possible de paramètres climatiques).

### **L'analyse de ces cartes sur les Pays-de-la-Loire montre :**

Une augmentation significative des **températures moyennes annuelles**. Celle-ci est d'autant plus importante que l'horizon s'éloigne et que le taux de GES augmente. Cette hausse peut être estimée selon les hypothèses entre +2 et +5°C. L'effet régulateur de l'océan resterait significatif avec moins de fortes chaleurs estivales près de la côte Atlantique et moins de gel en hiver tout au long du littoral (voir planches concernant **les températures maximales d'été** et celles concernant les **températures minimales d'hiver**) La convergence de l'ensemble des modèles sur l'augmentation des températures à l'échelle du globe est assez bonne. Ces résultats ARPEGE-Climat version 4, adaptés à la région, **tendent tous vers un réchauffement** quel que soit le scénario du Giec utilisé et l'horizon temporel. On remarque que, plus la concentration de gaz à effet de serre augmente au fil du temps, plus le réchauffement est prononcé.

Concernant les **pluies moyennes annuelles**, le changement est beaucoup moins significatif. Les simulations ARPEGE-Climat version 4 présentées ici penchent vers une diminution lente et progressive de la quantité annuelle de précipitations en Pays-de-la-Loire. Du fait de la méthode de descente d'échelle utilisée, le gradient entre les zones les plus sèches (Anjou, région côtière...) et les plus arrosées (collines de Vendée, versants sud-ouest du relief normand) resterait identique (avec un facteur multiplicatif voisin de 2). Nous verrons par la suite qu'il faut interpréter cette baisse des précipitations avec une grande prudence compte tenu de l'incertitude des simulations de pluie à cette échelle.

Les planches concernant les pluies d'hiver de la saison dite « de recharge » (octobre à mars) et sur la saison estivale « dite d'étiage » (avril à septembre) donnent des résultats généralement concordants, selon les horizons et scénarios simulés par cette version d'ARPEGE-Climat, mais parfois assez différents.

La baisse des **pluies d'été** moyennes sur les Pays-de-la-Loire est à peu près régulière selon ces simulations au fil des échéances. Elle est particulièrement forte pour l'horizon 2080 selon le scénario A1B.

**En hiver**, les simulations ARPEGE-Climat gardent les pluies moyennes à peu près constantes sur la région.

### **3. Effets attendus sur la température**

Les planches d'évolution des températures expriment une tendance moyenne, calculée sur des périodes de 30 années. Un réchauffement moyen sur 30 ans n'exclut pas la possibilité des refroidissements temporaires (comme une vague de froid en hiver ou un été frais). La fréquence de ces anomalies froides devrait diminuer au fil des décennies mais un épisode



isolé reste toujours possible (comme ce fut le cas début février 2012). L'augmentation de la température en hiver et en été devrait se traduire par une augmentation significative de la fréquence des vagues de chaleur estivales (tempérées à proximité de la mer) et par celle des hivers doux. Ainsi, des événements comme les vagues de chaleur des étés 1976, 1990, 2003 ou 2006 pourraient devenir beaucoup plus « habituels » dans le futur.

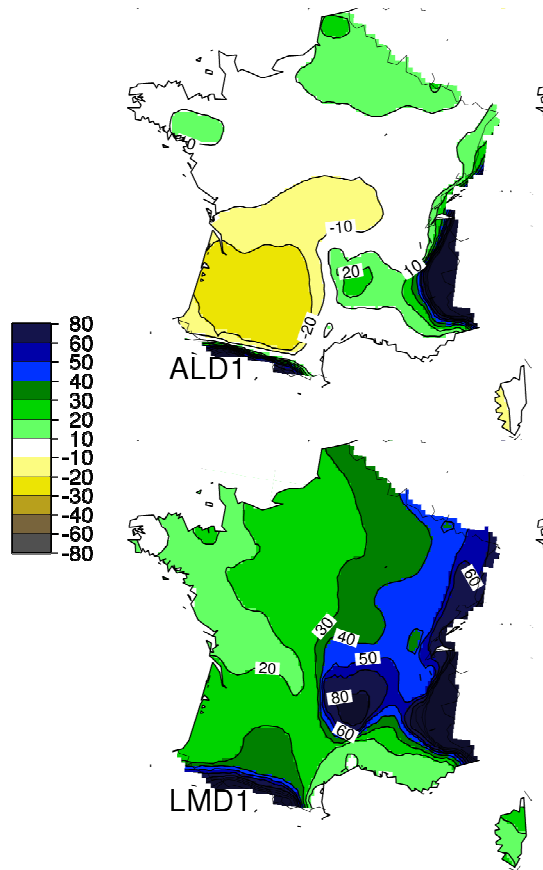
## **4. Effets attendus sur les pluies**

### **4.1 Contexte**

L'ensemble des modèles de climat disponibles tendent à faire augmenter la température à toutes les échelles spatiales (globe, continent voire région). Il n'en est pas de même pour l'évolution des précipitations. Les simulations d'évolution des pluies sont généralement cohérentes à l'échelle mondiale mais peuvent donner des résultats tout à fait différents à une échelle plus locale.

Ces éléments s'expliquent en partie par la très grande sensibilité des modèles au résultat en termes de précipitation (lié à des effets non linéaires). Un décalage spatial des zones plus arrosées, sans grande conséquence à l'échelle d'un continent, peut aussi se traduire par un résultat complètement différent sur un pays. Les cartes ci-après donnent un exemple qui peut dérouter certains mais qui traduit la grande incertitude qui subsiste sur l'évolution de ce paramètre.

Les différences entre les résultats de ces simulations sont plus ou moins fortes selon les régions françaises, le nord-ouest de la France du fait de son éloignement des grands reliefs et de sa situation péninsulaire est une région où la variabilité n'est pas la plus forte.



Exemple de simulation d'évolution des pluies en pourcentage de la normale de référence, sur la France en hiver à l'horizon de la fin du XXIe siècle, pour le même forçage en GES, selon les modèles Arpège en haut (ALD1) et IPSL en bas (LMD1).

- Le premier simule un déficit de précipitations sur le sud-ouest de la France, de façon assez prononcée, la moitié Est étant quant à elle excédentaire par rapport à la référence.
- Le second modèle simule une augmentation sur tout le Pays.

## 4.2 Le projet SCAMPEI

Le projet ANR/SCAMPEI s'est terminé fin 2011. Il avait pour objectif principal d'apporter une réponse plus précise à la question du changement climatique dans les régions de montagne de la France métropolitaine. Pour cela, les partenaires du projet ont choisi d'associer la modélisation à haute résolution (12 km) avec les modèles de Météo-France, du LMD (IPSL) et du LGGE. Ces données ont été dé-biaisées sur la période de référence et homogénéisées à un format standard (grille 8 km) pour permettre de comparer les simulations entre elles sur des points précis du territoire. Les simulations de températures de ces 3 modèles pour un même scénario du GIEC sont relativement concordantes à l'échelle de la France. Elles le sont beaucoup moins en ce qui concerne les précipitations.

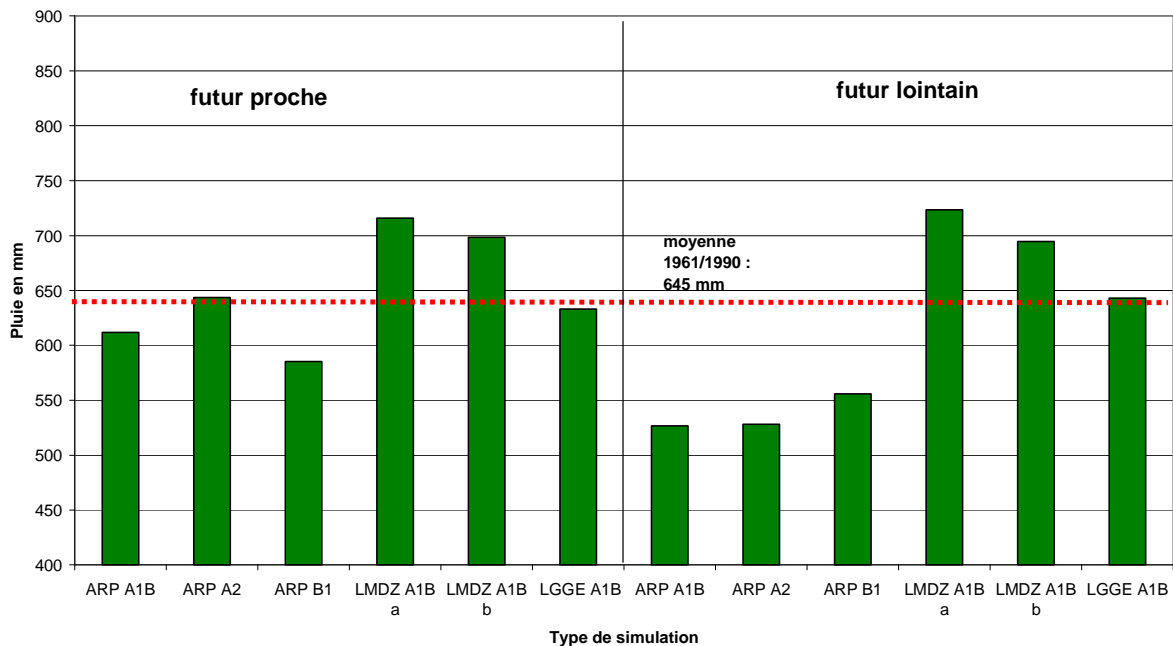
Des éléments supplémentaires sur ce projet sont disponibles sur :

<http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>

Pour illustrer la variabilité des simulations de pluie, nous présentons ci-après des graphiques des pluies prévues sur l'Anjou et sur Pré-en-Pail (53). Ces pluies seront comparées à la moyenne de référence « Scampe » calculée sur 1961/19900 (en rouge ci-après). Celle-ci est peu différente des moyennes 1971/2000 utilisées pour la méthode Datar explicitée précédemment.



### Evolution des pluies annuelles sur Angers



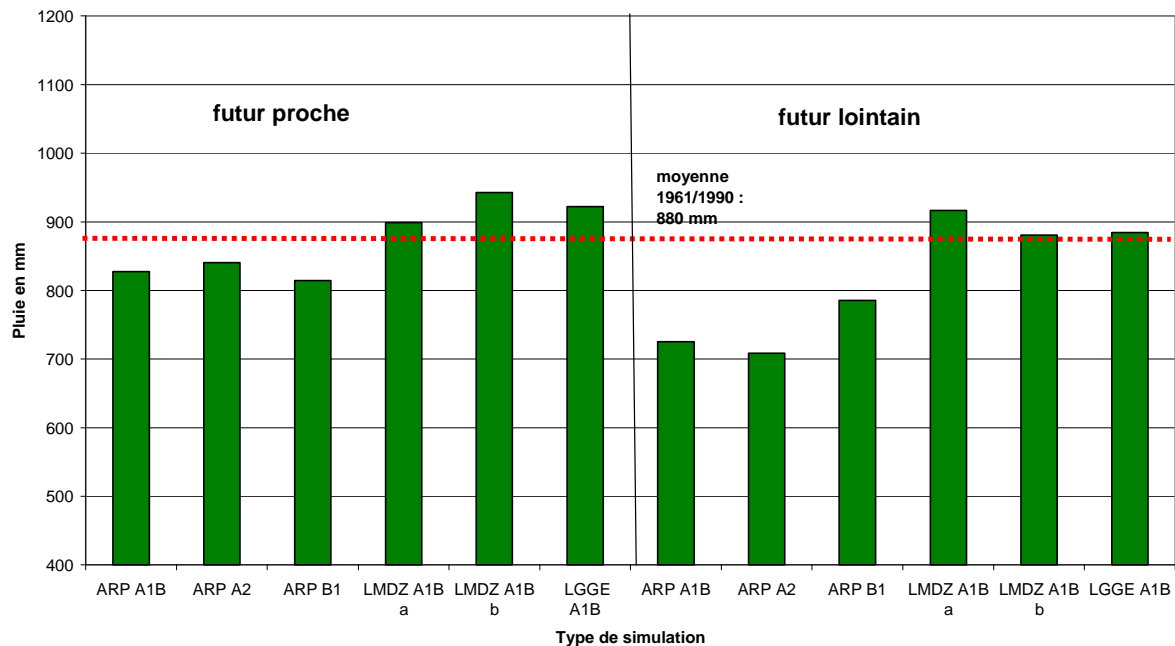
*Projections des pluies annuelles en Anjou en fonction du modèle utilisé selon deux horizons du projet Scampei (futur proche et futur lointain). La référence est en tireté rouge*

Les simulations ARPEGE-Climat (ARP) sur ce point gardent à peu près constantes les pluies annuelles dans le futur proche mais les diminuent dans le futur lointain (quel que soit le scénario Giec 2007 A1B, A2 ou B1).

Les simulations LMDZ (a et b) de l'IPSL, pour le scénario A1B, augmentent les pluies annuelles dans le futur proche. Les pluies annuelles diminuent ensuite dans le futur lointain, tout en restant excédentaires par rapport à la référence 1961/1990 de **645** mm par an. Le modèle LGGE pour le futur lointain est proche des valeurs d'ARPEGE-Climat scénario B1.



### Evolution des pluies annuelles sur Pré en Pail



*Projections des pluies annuelles à Pré-en-Pail (53) en fonction du modèle utilisé selon deux horizons du projet Scampeï (futur proche et futur lointain). La référence est en tireté rouge*

Compte-tenu de cette divergence des modèles sur le nord-ouest de la France en ce qui concerne la pluie moyenne annuelle, il est difficile de conclure sur une possible augmentation des événements de pluie extrêmes. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, rien ne permet d'affirmer que cette tendance pourrait s'appliquer à une échelle plus fine comme celle de la région Pays-de-la-Loire. La divergence des simulations de pluie sur la France illustrées par les résultats du projet Scampeï au chapitre précédent montre qu'il faut rester très prudent. La région des Pays-de-la-Loire, en raison de son exposition aux pluies océaniques, de son relief et de son réseau hydrographique reste exposée aux inondations même sans augmentation ou diminution des événements pluvieux extrêmes.

Quelle que soit la tendance de l'évolution des pluies estivales (en légère baisse ou en légère hausse selon les modèles), l'augmentation consensuelle des températures en été conduira à une hausse de l'évaporation et donc un risque accru de sécheresses agricoles estivales.

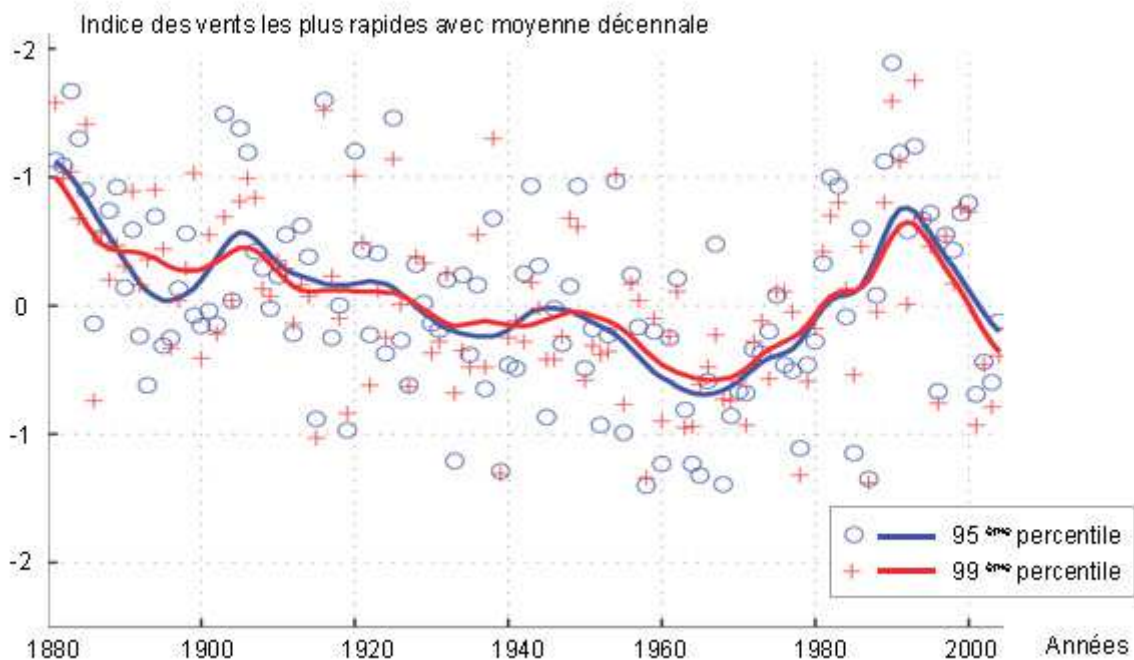
## 5. Incertitude sur les autres effets attendus

Les modèles de climat simulent l'évolution de l'ensemble des paramètres météorologiques et ce, à différents niveaux de l'atmosphère. Les résultats sont potentiellement accessibles pour des phénomènes du type vent, rayonnement, orages, tempêtes, grands froids, sécheresse, canicules etc...



L'évolution des phénomènes de grande échelle spatiale et temporelle comme les vagues de froid ou les périodes de canicules peut être quantifiée grâce à une analyse spécifique. En revanche, celle de paramètres plus sensibles aux variations spatio-temporelles (régime de vent, rayonnement solaire, tempêtes, orages...) est plus difficilement exploitable à l'aide des modèles de climat actuellement disponibles. Leur éventuelle évolution doit faire l'objet d'une étude spécifique notamment pour tout ce qui concerne la validation des modèles sur la période de référence 1950/2000.

On trouvera ci-après un exemple de résultat d'étude de l'évolution de la fréquence des tempêtes passées en Europe du Nord (Indice normé issu IPCC l'AR4).



Evolution des tempêtes en Europe du nord entre 1880 et 2005 (source IPCC AR4)

Cette figure montre l'évolution des vents théoriques les plus forts (dits vents géostrophiques) sur une partie des côtes de l'Europe du Nord durant le XXe siècle. La courbe rouge représente les vents les plus intenses (99<sup>e</sup> percentile), en bleu le 90<sup>e</sup> percentile. On ne discerne pas pour l'instant de tendance incontestable dans l'évolution du nombre des tempêtes sur cette zone. Ceci dit, avec la hausse probable du niveau de la mer d'au moins quelques dizaines de centimètres, la vulnérabilité de nos côtes aux phénomènes de surcote pourrait augmenter (même à fréquence égale des tempêtes).

## 6. DRIAS et les progrès de la modélisation attendus ces prochaines années

L'intérêt grandissant pour la question du changement climatique, l'augmentation de la puissance des calculateurs et l'avancée de la science ouvrent de grandes perspectives. La modélisation du climat pourra en bénéficier en améliorant la résolution des modèles, en affinant la prise en compte de certains phénomènes physiques, en intégrant des modèles d'océan plus performants. Le prochain rapport du GIEC, attendu en 2013, fera le point sur ces



avancées. Les premiers résultats de modélisation destinés à l'alimenter sont cohérents avec ceux des modèles d'ancienne génération présentés ici.

Le portail DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>), récemment ouvert à toute la communauté scientifique, permet l'accès à des nouvelles simulations sous un format homogène pour faciliter les inter-comparaisons et la prise en compte de l'incertitude liée au modèle. Il sera alimenté par de nouvelles simulations climatiques régionalisées ces prochaines années.

La prévision décennale (quel climat pour 2020 ?) reste encore une question scientifique majeure. Elle fait appel à des processus atmosphériques et océaniques qui ne sont pas encore modélisables mais qui font l'objet de nombreux travaux de recherche. Cet horizon proche intéresse fortement les décideurs mais aucun élément fiable n'est pour l'instant disponible pour appréhender le climat de ces prochaines années.

### **2013 : un nouveau rapport du GIEC attendu**

Les simulations à réaliser en amont du **5e rapport du GIEC** ont été définies fin 2008 par le Groupe de travail sur les modèles couplés du PMRC, dans le cadre du « **CMIP5** ».

- CMIP5 fournit un cadre de travail précis aux équipes développant les modèles de climat et réalisant les simulations climatiques.

Dans ce cadre, plusieurs types de simulations ont été retenus :

- des simulations "classiques" comme l'évolution du climat depuis 150 ans,
- des projections climatiques pour les 100 ou 300 prochaines années selon différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre et des changements climatiques en réponse à des évolutions idéalisées des gaz à effet de serre ;
- des simulations nouvelles, notamment des tentatives de prévision de l'évolution du climat à l'échelle de 10 ans, des simulations couplées climat-carbone, des simulations des climats très anciens ou de nouvelles simulations idéalisées.

Ces travaux se basent donc sur de nouveaux scénarios d'évolution de gaz à effet de serre.

### **Les RCP de l'AR5 et l'exercice CMIP5**

Dans le cadre de CMIP5, les groupes de travail internationaux ont retenu une nouvelle approche. Modélisateurs du climat et économistes ont travaillé en parallèle, les premiers pour effectuer des projections climatiques, les seconds pour élaborer des scénarios socio-économiques, à partir de « trajectoires » d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre : les RCP. Ces trajectoires proviennent des résultats des recherches les plus récentes menées à partir de modèles intégrant les évolutions socio-économiques et climatiques. Cette démarche parallèle permet aux économistes d'établir des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques permettant de rendre compte de ces RCP, notamment ceux qui prennent en compte des politiques climatiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette hypothèse n'avait pas été explorée lors des précédents exercices. Par ailleurs, la démarche parallèle n'impose plus de procéder à de nouvelles simulations climatiques après toute modification des scénarios socio-économiques. Les RCP peuvent être traduits en termes de modification du bilan radiatif de la planète, ce qui permet de les comparer avec les anciens scénarios d'émission (les SRES) utilisés par le GIEC



dans ces deux derniers rapports (2001 et 2007). Quatre scénarios RCP de référence ont été retenus pour le projet CMIP5 parmi plus de 300 couvrant les années 2000 à 2300. Trois d'entre eux donnent lieu à des trajectoires d'évolution de concentrations de gaz à effet de serre comparables à celles utilisées pour les deux derniers rapports du GIEC du point de vue de la perturbation du bilan énergétique terrestre. Le scénario le plus élevé (RCP8.5) est toutefois un peu plus sévère que l'ancien scénario le plus pessimiste A2. Le scénario le plus bas (RCP2.6) n'a, quant à lui, pas d'équivalent parmi les anciens scénarios. Il correspond à des comportements vertueux, très sobres en émission de gaz à effet de serre.

Les modèles de l'AR5 sont plus complexes que ceux de l'AR4 avec la prise en compte de composantes supplémentaires pour certains modèles (carbone couplé au climat, aérosols interactifs...). La résolution a été augmentée parfois avec une augmentation du nombre de niveaux verticaux mais le plus souvent avec une augmentation du nombre de points de maillage sur l'horizontale (multipliée par 2 pour les modèles français).

L'ensemble multi-modèles est plus large : de 15 groupes et 23 modèles pour l'AR4, on passe à 23 groupes et un peu plus de 50 modèles pour l'AR5 (les résultats sont accessibles pour 24 modèles de 14 groupes).

#### GHG forcing : AR5 vs AR4

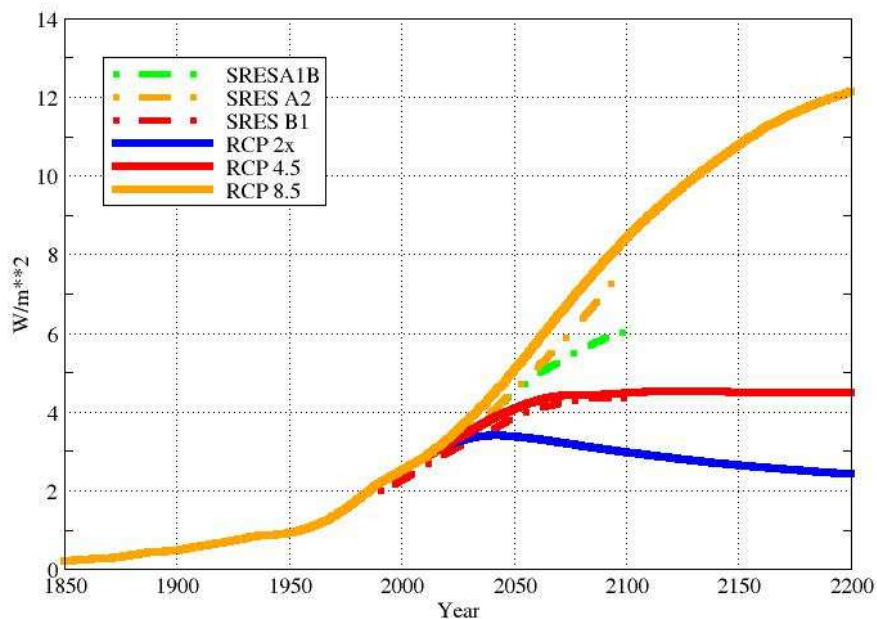


Figure 1 : forçages radiatifs associés aux scénarios AR5 versus scénarios AR4 (CNRM-GAME/GMGEC)

Nom	Forçage radiatif	Concentration (ppm)	Trajectoire
<b>RCP8.5</b>	>8,5Wm-2 en 2100	>1370 eq-CO2 en 2100	Croissante
<b>RCP6.0</b>	~6Wm-2 au niveau de	~850 eq-CO2 au niveau de	Stabilisation sans dépassement



	stabilisation après 2100	stabilisation après 2100	
<b>RCP4.5</b>	~4,5Wm-2 au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO2 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
<b>RCP2.6</b>	Pic à ~3Wm-2 avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO2 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau 1 : les 4 RCP de CMIP5 (Moss et al, Nature, 2010)