



APR Gestion des impacts du Changements Climatiques 2010

Rapport final du projet

INVULNERABLE Phase 2

Coordination : Pascale Braconnot, LSCE/IPSL

Convention :10-MCGOT-GICC-5-CVS-119



TABLE DES MATIERES

Récapitulatif du projet	4
Objectifs et organisation du projet	5
Organisation du rapport	7
SECTION 1 : Lot 1 – Étude de l’impact des vagues de froid sur la France	8
1- Rappel des objectifs	8
2- Personnes impliquées	8
3- Déroulement du travail	9
a- Réalisations	9
b- Difficultés rencontrées	10
c- Réunions et points de rencontre	10
Livrables	11
Rapport d’étude du lot de travail n°1	12
SECTION 2 : Lot 2 – Étude des précipitations extrêmes avec Veolia-Eau Valence	42
1- Rappel des objectifs	42
2- Personnes impliquées	42
3- Déroulement du travail	43
a- Réalisations	43
b- Difficultés rencontrées	44
c- Séminaires et réunions	44
4- Livrables	45
a- Bibliographie des projets existants en région méditerranéenne	46
b- Synthèse sur les méthodes de descente d'échelle	47
c- Analyse des stations	49
d- Analyse des données simulées	49
e- Références	50
Fiches de synthèse n°1 : « Précipitations intenses en région Méditerranéenne : origines et caractéristiques »	51
Fiches de synthèse n°2 : « Techniques de descente d'échelle climatique en région Méditerranéenne »	64
Fiches de synthèse n°3 : « Caractérisation des évènements pluvieux en région Méditerranéenne »	81
Fiches de synthèse n°4 : « Analyse des précipitations intenses dans les	99

données historiques et dans les simulations de modèles : les scénarii
SCRATCH10 »

SECTION 3 : Lot 3 - Analyse des incertitudes des projections climatiques régionales et globales sur la France. Impact sur les analyses mises à disposition des industriels	124
1- Rappel des objectifs	124
2- Personnes impliquées	124
3- Déroulement du travail	124
a- Réalisations	124
b- Difficultés rencontrées	125
c- Séminaires et réunions	125
4- Livrables	125
SECTION 4 : Bilan du colloque « Services Climatiques et Industrie »	124
1- Présentation de la journée et objectifs	124
2- Enseignements	124
3- Compte-rendu détaillé	126
Annexe 1 : Programme	138

RECAPITULATIF DU PROJET

Titre du projet :

INVULNERABLE : Phase 2

Responsable/Coordinateur scientifique : IPSL

Pascale Braconnot, Chercheur CEA à l'IPSL/Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement :

IPSL/LSCE

Unité mixte CEA-CNRS-UVSQ,

Bât. 712, Orme des Merisiers

91191 Gif sur Yvette Cedex.

Tél : 01 69 08 77 21

Fax : 01 69 08 77 16

pascale.braconnot@lsce.ipsl.fr

Partenaire n°1 : CNRM-CERFACS

Gestionnaire : CNRM

Responsable scientifique : Serge Planton

16, avenue Edouard BELIN

B.P. 4367

31055 Toulouse Cedex 4

Tél : 05 61 07 93 76

Serge.planton@meteo.fr

Partenaire n°2 : IDDRI

Responsable scientifique : Michel Colombier

Directeur Scientifique de l'IDDRI

27 rue Saint Guillaume,

75337 Paris Cedex 07

Tél : 01 45 49 76 58

michel.colombier@iddri.org

Durée du projet : 12 mois



OBJECTIFS ET ORGANISATION DU PROJET

Le projet INVULNERABLE-2 fait suite au projet INVULNERABLE-1 (<http://www.iddri.org/Iddri/Fondation/Projet-INVULNERABLE>) initié par l'IDDRI sur la question de la vulnérabilité des entreprises au changement climatique. Cette première phase de réflexion a montré que les entreprises restent peu concernées par cette problématique bien que de nombreuses difficultés pourraient les affecter :

1. Robustesse des installations et infrastructures dont la conception est basée sur des données statistiques historiques ;
2. Changement dans les facteurs qui commandent la demande de biens ou de services ;
3. Changement dans l'environnement qui affecte la gestion de l'outil industriel ;
4. Changement d'occurrences des « incidents climatiques » industriels.

S'appuyant sur cette base de réflexion, le 1^{er} volet du projet INVULNERABLE a permis de faire ressortir des besoins concrets en terme de produits climatiques et d'expertise scientifique au sein des entreprises du secteur de l'énergie et de l'eau. La réponse à ces besoins industriels à partir des données climatiques n'est pas triviale. On constate que de nombreuses demandes se situent à la limite des compétences et savoir-faire développés par les climatologues. Pour certains aspects, elles renvoient à des questions de recherche plus ou moins abouties et se situent bien souvent à cheval sur différents domaines de recherche. Dans ce contexte, le deuxième volet du projet INVULNERABLE se proposait de travailler sur l'information climatique de base nécessaire aux études de vulnérabilité industrielle et d'identifier les limites de cette information.

Pour ce faire, nous avons sélectionné deux études de cas présentant un intérêt particulier pour les entreprises partenaires et traitée la partie de la question liée à l'aléa climatique. Les objectifs étaient d'apporter de l'information à ces demandes à partir des outils existants, de définir le degré de confiance de ces réponses, d'évaluer les limites de l'exercice vis-à-vis de questions d'adaptation industrielle et enfin de déterminer les partenariats à mettre en place pour les questions multidisciplinaires.

La première étude de cas traite des vagues de froid, en partant d'un exemple ayant conduit à un déficit sur la France de la distribution de gaz. La deuxième étude de cas concerne une station d'épuration et les débits seuils en fonction des caractéristiques (intensité, durée et fréquence) des événements pluvieux. Une partie du travail a consisté à améliorer les indicateurs issus de la première phase du projet ou définir de nouveaux indicateurs. Ces indicateurs ont ensuite été analysés en s'appuyant au préalable sur une revue complète de la bibliographie existante. Pour ces 2 cas, les biais des modèles ont été évalués. Nous avons également tenté de les mettre en lien avec les caractéristiques de la circulation météorologique synoptique à l'échelle de la France et de l'Europe. Enfin, en fonction des besoins et des données disponibles, nous avons déterminé :

- 1 l'apport des nouvelles simulations globales et/ou régionales ;
- 2 l'apport de la descente d'échelle en comparant les résultats obtenus sur la France avec les scénarios globaux et les scénarios régionalisés ;

Afin de répondre à ces objectifs, le projet a été divisé en trois lots de travail :

- Lot n°1 : Analyse des vagues de froid sur la France pour le secteur énergétique
- Lot n°2 : Étude des précipitations extrêmes avec Veolia Eau Valence
- Lot n°3 : Analyse des incertitudes des projections climatiques régionales et globales sur la France. Impact sur les analyses mises à disposition des industriels

Le suivi de chacun des lots de travail a été effectué par des points réguliers sous forme de réunions ou de vidéoconférences entre les partenaires académiques. En complément de ces différentes réunions de travail des ateliers de travail ont été organisés afin de présenter les résultats des deux études aux partenaires industriels concernés et dégager à partir de ces exemples les différents besoins associés à ces études et qui pourront par la suite être déployés dans des services climatiques.

En parallèle aux analyses effectuées dans les 3 lots de travail; nous avons poursuivi l'effort de sensibilisation de la communauté industrielle. Cela a consisté à renforcer le dialogue avec les entreprises concernées par le projet en s'appuyant entre autre sur la mise à disposition de documents vulgarisés sur les études de cas. En complément, un colloque intitulé « Services Climatiques et Industrie » à destination des industriels a été organisé le 10 janvier 2012.

ORGANISATION DU RAPPORT

Les deux premiers lots de travail font l'objet de rapports et/ou fiches de synthèses spécifiques. Les principales actions réalisées pour ces 2 lots de travail sont présentées en **section 1** et **section 2**. Le troisième lot est transverse. Il a servi d'appui à la réalisation des deux études de cas. Contrairement à ce qui était initialement prévu, il ne fait pas l'objet de fiches de synthèses dédié. Afin de rendre plus lisible les résultats du projet, nous avons préféré regrouper les analyses effectuées pour chacune des études de cas en un seul bloc. Les résultats des analyses du lot 3 sont donc distillés au sein des rapports et fiches de synthèses des lots 1 et 2. Le bilan pour ce lot de travail est présenté en **section 3**.

La dernière section (**section 4**) est dédiée aux enseignements du colloque « Services Climatiques et Industrie » concernant la mise en place de services climatiques pour le secteur industriel.

SECTION 1

Lot de travail n°1 : Étude de l'impact des vagues de froid sur la France

1. RAPPEL DES OBJECTIFS

L'étude sur les vagues de froid a débuté dans INVULNERABLE-1 sous l'impulsion de l'IDDRI. Les partenaires industriels impliqués dans cette étude, principalement des groupes du secteur énergétique, souhaitent comprendre quel est l'impact réel des vagues de froid sur leur activité et quelle sera l'évolution future de ce type d'évènements.

Le travail effectué dans INVULNERABLE-1 a permis entre autre de définir un premier jeu de critères de vulnérabilité propres au secteur énergétique. Cependant le peu de connaissances scientifiques sur ce sujet a révélé le besoin de recherches complémentaires pour répondre aux questions posées. En particulier, nous devons vérifier la capacité des modèles à représenter les vagues de froid. Il s'est avéré nécessaire de développer une méthode d'analyse des vagues de froid avant de pouvoir réaliser l'étude détaillée de leur évolution future et ainsi étudier la vulnérabilité des industries énergétiques face à ce type d'évènement.

2. PERSONNES IMPLIQUÉES

Les personnes ayant contribué à cette étude sont listées ci-dessous. Elles sont issues principalement des laboratoires de recherche. Les industriels ont eu principalement un rôle de comité d'utilisateurs.

CNRM-GAME : C. Déandreis ; S. Planton ; J. Cattiaux ; H. Douville (CNRM-GAME); G. Ouzeau (CNRM-GAME); Y. Peings (CNRM-GAME)

IPSL : P. Braconnot (IPSL / LSCE) ; B. Quesada (IPSL / LSCE); R. Vautard (IPSL / LSCE).

GDF-Suez : P. Poncet

EDF R&D : S. Parey

3. DÉROULEMENT DU TRAVAIL

Le travail pour cette étude de cas s'est articulé autour des 4 tâches suivantes :

- Tâche n°1 : Validation/Amélioration du jeu de critères de vulnérabilité en fonction des métiers considérés (électricité, gaz). Analyse des vagues de froid récentes
- Tâche n°2 : Evaluation de la capacité des modèles à représenter les caractéristiques des vagues de froids sur les critères sélectionnés. Evaluation des biais des modèles.
- Tâche n°3 : Evaluation de différentes méthodes d'analyse des vagues de froid dans les modèles : correction quantile/quantile et régimes de temps.
- Tâche n°4 : Tentative de projection des vagues de froid - Analyse des incertitudes – Proposition d'amélioration pour de futures analyses.

a) Réalisation

Le **tableau 1** fait état des réalisations du projet.

Tâches	Réalisé	Non réalisé / Perspectives
Tâche n°1 : Validation / Amélioration des critères de vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Caractérisation des 10 vagues de froid les plus intenses ◆ Caractérisation des vagues de froid les plus récentes (2009-2011) ◆ Définition d'un indicateur pour le secteur de l'électricité (en lien avec le projet SECIF) 	
Tâche n°2 : Validation des données simulées par rapport aux données observées	<p>Etude réalisée pour les 2 modèles français :</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Biais moyen de T_{\min}, T_{moyen}, distribution des anomalies de T_{moyen} ◆ Représentation des indicateurs de vagues de froid ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$) ◆ Représentation du critère de persistance ◆ Évaluation des biais des modèles en lien avec les régimes de temps. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Critères d'intensité et d'extension géographique
Tâche n°3 Evaluation des méthodes d'analyses des vagues de froid	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Correction des données brutes de T_{\min} à partir de la méthode quantile/quantile et du jeu d'observation 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Correction des données de températures à partir

	HADGHCND <ul style="list-style-type: none"> ◆ Avantages et Inconvénients de l'utilisation des régimes de temps pour l'analyse des vagues de froid 	des observations EOBS <ul style="list-style-type: none"> ◆ Mise en place d'une méthode basée sur les régimes de temps
Tâche n°4 Projection des vagues de froid	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Evolution des indicateurs industriels ◆ Analyse du critère de persistance ◆ Analyse de l'effet de la correction ◆ Analyse multi-modèle limitée aux 2 modèles français 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Critères d'intensité et d'extension géographique ◆ Détection d'un signal anthropique par rapport à la variabilité naturelle

Tableau 1 : tâches réalisées dans le lot 1

b) Difficultés rencontrées

Comme indiqué dans le **tableau 1**, certaines des analyses prévues initialement n'ont pas été réalisées. Ainsi les données globales de la base de données ENSEMBLES/STREAM2 n'ont pas pu être corrigées à partir des observations EOBS. Les principales causes sont la difficulté à gérer le volume de données générées et le temps nécessaire au processing.

L'analyse des critères d'extension géographique et d'intensité pour l'indicateur gaz n'a pas été complètement réalisée par manque de temps.

Dans le cas de la mise en place d'une méthode d'analyse basée sur les régimes de temps, les résultats préliminaires et l'analyse bibliographique ont montré que les propositions faites initialement n'étaient pas valables. Le développement d'une telle méthode nécessiterait une analyse beaucoup plus fine du lien entre régime de temps et vague de froid ce qui n'était pas envisageable dans le temps imparti par le projet.

Enfin l'indisponibilité de certains jeux de données a également limité le nombre d'analyses réalisées. C'est le cas des simulations CMIP5 et des données décennales dont la production par les différents groupes de modélisation a pris une année de retard par rapport au calendrier initial.

c) Réunions

Comme prévu dans la proposition du projet, une réunion avec l'ensemble des partenaires académiques et industriels s'est tenue à mi-parcours de l'étude. Cette réunion en partenariat avec le projet SECIF a permis de faire le point sur les études en cours de réalisation à l'IPSL et au CNRM et de les orienter en fonction des besoins industriels.

Enfin, des points réguliers ont été effectués entre le CNRM et l'IPSL au cours de l'avancée des travaux.

4. LIVRABLES

Il était initialement prévu de fournir 2 livrables distincts contenant :

L1.1 : fiches de synthèse à destination des industriels. Chaque étape de l'identification et de l'étude des vagues de froid (incertitudes comprises) sera décrite.

- ⇒ Critères de vulnérabilités et indicateurs associés
- ⇒ Forces et faiblesses des modèles et des méthodes d'analyses des vagues de froid
- ⇒ Résultat préliminaire de la projection des vagues de froid
- ⇒ Recommandation pour l'analyse des vagues de froid

L1.2 : bilan des besoins identifiés au cours de la discussion avec les industriels

- ⇒ Variation des critères en fonction des secteurs et industriels impliqués
- ⇒ Mise en forme des résultats avec prise en compte des différents besoins.
- ⇒ Validation des indicateurs pour le croisement avec des indicateurs sectoriels propres aux industriels et pour la prise de décision.

Afin de faciliter la communication sur cette étude de cas, nous avons préféré rassembler l'ensemble des travaux dans un unique document intitulé « rapport d'étude du lot 1 et inséré à la fin de cette section. Ce document sera distribué à l'ensemble des partenaires industriels ayant participé à cette étude de cas.

RAPPORT D'ETUDE DU LOT 1

Étude de l'impact des vagues de froid sur la France

Auteurs :

C. Déandreis (CNRM-GAME / IPSL);
P. Braconnot (IPSL / LSCE) ; S. Planton (CRM-GAME)

Résultats issus des travaux de :

J. Cattiaux (CNRM-GAME); C. Déandreis (IPSL / CNRM-GAME); H. Douville (CNRM-GAME); G. Ouzeau (CNRM-GAME); S. Parey (EDF R&D); Y. Peings (CNRM-GAME); P. Poncet (GDF-Suez); B. Quesada (IPSL / LSCE); R. Vautard (IPSL / LSCE).

1- Critères de vulnérabilité

a- Secteur gaz

Le travail effectué au cours du projet FONDDRI/INVULNERABLE-1 a mis en avant l'importance de bien choisir les critères et seuils de vulnérabilité pour analyser la vulnérabilité d'un métier donné face à un aléa climatique. Ainsi, dans le cadre de la vulnérabilité du secteur énergétique aux vagues de froid, un indicateur classique de vague de froid ne permet pas de représenter correctement la vulnérabilité du métier gaz. De même, un indicateur spécifiquement développé pour le secteur du gaz ne sera pas adapté au secteur de l'électricité. Cette réalité a été largement démontrée par l'étude de l'impact de la vague de froid de février/mars 2005 sur le secteur gazier, réalisée dans le cadre d'INVULNERABLE-1 et finalisée dans le cadre du projet INVULNERABLE-2.

Cette étude a permis de déterminer trois critères de vulnérabilité pour le secteur gazier ainsi que les seuils de vulnérabilité associés :

- durée > 15 jours
- anomalie cumulée < -75°C
- extension géographique forte.

La sélection et la validation de ces critères sont discutées dans la fiche de synthèse du projet INVULNERABLE-1 (à consulter sur <http://www.iddri.org/Iddri/Fondation/Projet-INVULNERABLE>).

Ces 3 critères font de la vague de froid de février/mars 2005 un événement de forte intensité, contrairement à ce qui est obtenu avec les critères usuels de Météo-France. En effet, comme le montre la **Figure L1.1**, cette vague de froid n'apparaît pas parmi les 20 vagues de froid les plus sévères de la classification de Météo-France portant sur la période 1947-2012 qui utilise un indicateur basé sur le cumul de degrés inférieurs à zéro de l'« indicateur thermique quotidien ». L'indicateur thermique quotidien correspond à la moyenne de la température moyenne quotidienne de 22 stations métropolitaines. Cette définition de l'intensité ne prend donc pas directement en compte les facteurs tels que la durée de l'épisode froid, les pics de froid ou l'extension géographique de la vague de froid.

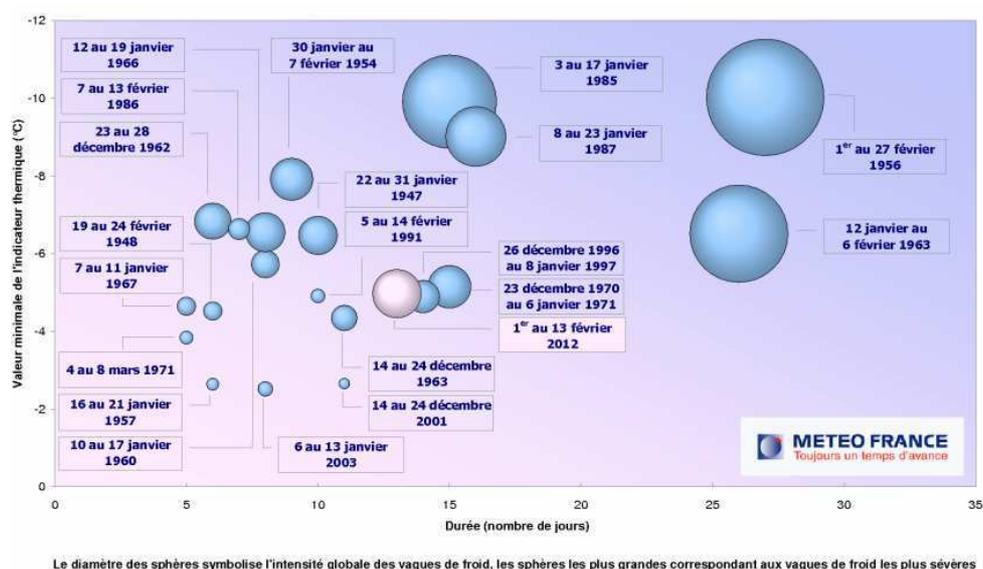


Figure L1.1 : Classification des vagues de froid de la période 1947-2012 suivant l'indicateur thermique de Météo-France. Source: meteofrance.fr.

Au cours du projet INVULNERABLE-2, les résultats de cette étude ont été présentés à plusieurs services de l'entreprise GDF-Suez, dont le département climat mais également plusieurs départements opérationnels. Tous ont validé l'importance des critères sélectionnés pour leur métier. Ils ont également souligné que la date d'arrivée de la vague de froid devait être prise en compte, les vagues de froid tardives étant beaucoup plus nuisibles que les vagues de froid précoces en raison du niveau plus faible des stocks de gaz.

Une classification des vagues de froid historiques a été réalisée pour la période 1971-2011 incluant les vagues de froid des hivers 2009-2010 et 2010-2011. L'ensemble de vagues de froid répondant à au moins un des trois critères de vulnérabilité sélectionnés pour cette étude a été répertorié sur la **Figure LI.2**. Cette classification peut être comparée à celle réalisée par Météo-France avec leurs propres critères de sélection (**Figure LI.1**).

En complément, le **Tableau LI.1** indique la persistance, l'amplitude et l'extension géographique des 10 vagues de froid les plus intenses pour la période 1971-2011.

Période	Durée	Anomalie cumulée France	% de surface Europe	Anomalie cumulée Europe
Février / Mars 1971	23	-99,8	97,7	-88,3
Janvier 1979	19	-78,3	80,4	-140,6
Décembre 1984 / Janvier 1985	30	-190,9	98,3	-169
Janvier 1987	17	-87	96,8	-91,8
Janvier / Février 1991	34	-138	99,4	-99,2
Avril 1991	34	-118,4	83,2	-92
Novembre 1993	17	-75,1	91,1	-131,4
Décembre 1996 / Janvier 1997	24	-121,5	86,2	-149,9
Décembre 2001	21	-102,8	96,9	-144,2
Février / Mars 2005	28	-124,1	96,6	-93,5

Tableau LI.1 : Liste des 10 vagues de froid les plus intenses sur la période 1971-2011 et suivant nos critères de vulnérabilité. La durée (jours), l'anomalie de température cumulée au cours de la période de froid sur la France (°C), la surface impactée par la vague de froid en Europe (%) et l'anomalie de température cumulée sur cette zone en Europe (°C) sont également indiquées. Les valeurs sont issues des réanalyses ERA40 et ERA Interim du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT).

La vague de froid de février/mars 2005 ressort bien parmi les plus intenses de cette période. En revanche, les événements retenus pour la période la plus récente 2009-2011 (symboles avec un contour bleu sur la **Figure 2**) apparaissent comme des événements de faible intensité. Les vagues de froid successives de l'hiver 2009/2010 n'ont pas été retenues dans notre classification puisqu'elles ne répondent à aucun des trois critères sélectionnés. On se rappelle pourtant leurs impacts sur le secteur du transport. Pour ce secteur d'activité, c'est principalement le facteur enneigement qui était à l'origine des difficultés rencontrées.

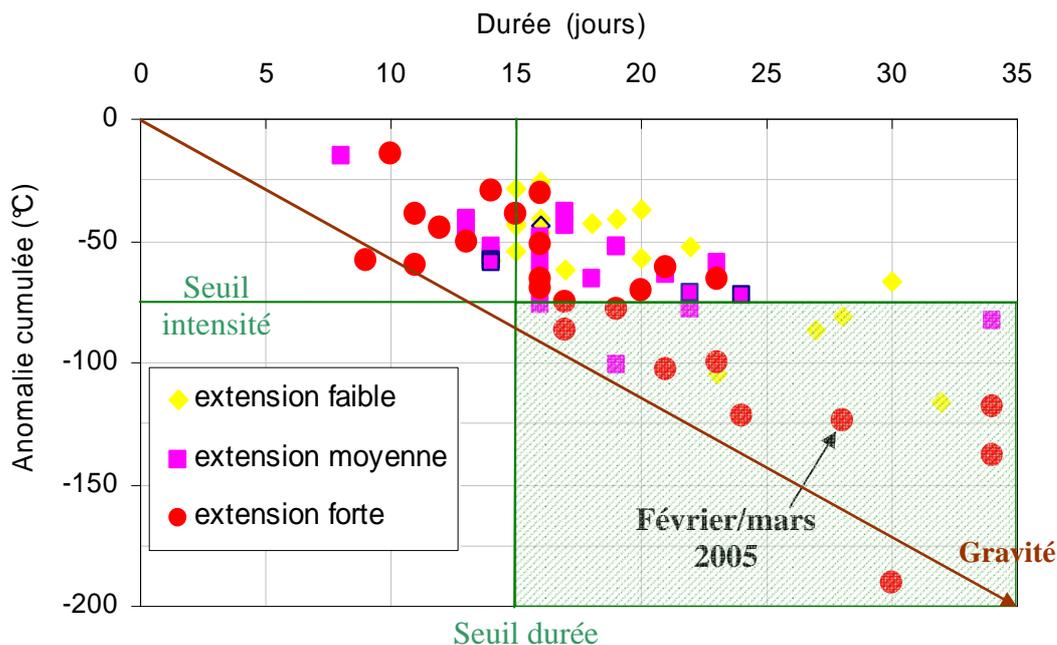


Figure L1.2 : classification des vagues de froid de la période 1971-2011, selon les critères de vulnérabilité sélectionnés pour le secteur gazier : durée (abscisse), anomalie cumulée de température sur la France (ordonnée) et extension géographique (rouge = fort ; rose = moyen ; jaune = faible). Les anomalies de température ont été calculées par rapport à la période de référence 1971-2000. Les vagues de froid ont été analysées pour les mois d'octobre à avril. Ces résultats ont été obtenus à partir des réanalyses ERA40 et ERA Interim du CEPMMT. Les seuils critiques définis à partir de la vague de froid de février/mars 2005 sont indiqués par les droites vertes. Les symboles entourés en bleu correspondent aux vagues de froid les plus récentes (2009-2011)

b- Secteur de l'électricité

Les vagues de froid entraînent une augmentation de la consommation d'électricité principalement du fait de l'utilisation des chauffages électriques. Ainsi on estime qu'une diminution de 1°C de la température en hiver en France Métropolitaine entraîne une augmentation de la consommation électrique de 2 300 MWh (soit environ 2 fois la consommation de la ville de Marseille).

En parallèle du travail réalisé avec GDF-Suez pour le secteur gazier, une étude a été lancée par EDF dans le cadre du projet ANR/SECIF afin de définir et étudier un indicateur de vulnérabilité des pics de consommations d'électricité. Nous reprenons ainsi les principaux résultats de cette étude afin d'explicitier l'indicateur et l'intégrer à notre analyse.

Les données ayant servi à cette étude sont les données de températures CNPE (Centre Nucléaire de Production d'Electricité) fournies par Météo-France. Le jeu de données inclut les minima de températures T_{\min} , les maxima de températures T_{\max} et les données tri-horaires pour 16 villes de France¹ et pour la période 1950/1975 à 2008. Les données de consommation d'électricité sont issues des archives publiques de RTE accessibles sur leur site web (<http://clients.rte-france.com/>). Ce sont des données nationales couvrant la période plus récente 1996-2008.

¹ Agen, Ambérieu, Bordeaux, Colmar, Dieppe, Dunkerque, Lyon, Metz, Montélimar, Nevers, Orange, Orléans, Poitiers, Reims, Tours.

Le travail a consisté dans un premier temps à définir un indicateur de vulnérabilité en se basant sur un indicateur existant et déjà utilisé par EDF et en l'adaptant au climat et vulnérabilité actuels. Les épisodes de froid d'intérêt pour ce cas d'étude seront les périodes d'au moins deux jours consécutifs de T_{\min} inférieur à 0°C .

La **Figure L1.3** montre la sensibilité au seuil d'intensité (0°C et -2°C) de cet indicateur. On constate ainsi que le seuil -2°C réduit fortement le nombre d'épisodes de froid sélectionnés.

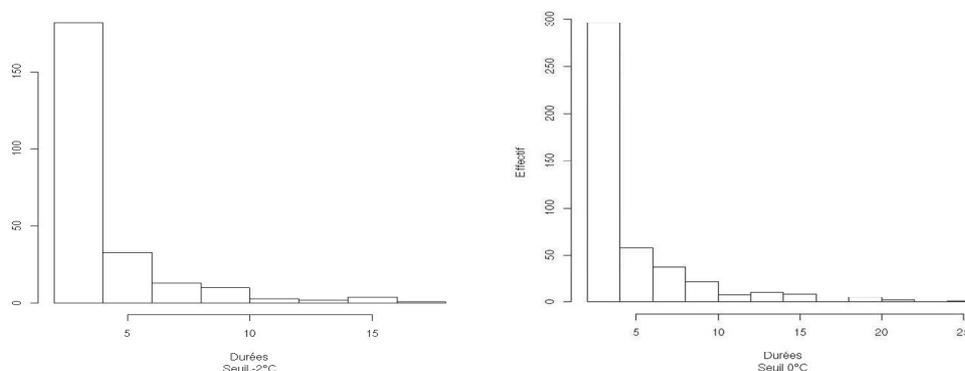


Figure L1.3 : Fréquence des épisodes de froid en fonction de leur durée en jours pour la ville d'Agen. Test de sensibilité de l'indicateur EDF au seuil d'intensité : -2°C (échelle 0 à 150) à gauche et 0°C (échelle 0 à 300) à droite. Source : présentation de J. Compaore effectuée au cours de l'atelier de travail sur les vagues de froid, 2011.

Sur la base de cet indicateur, le lien entre vagues de froid et pics de consommation a été étudié pour la période historique afin de valider les critères de vulnérabilité choisis.

Les résultats de cette analyse montrent que les villes du Nord ont une meilleure représentativité des pics de consommation. Le fait que les températures soient plus froides dans le Nord que dans le Sud pourrait être à l'origine de cette différence Nord/Sud. Dans le cadre d'une analyse de projection climatique des pics de consommation d'électricité, il pourrait donc être judicieux d'utiliser cet indicateur sur la moitié Nord de la France.

c- Autres indicateurs

En parallèle aux 2 études de cas menées en partenariat avec GDF-Suez et EDF ; les laboratoires de recherche impliqués dans INVULNERABLE-2 ont utilisé d'autres indicateurs pour réaliser leur étude des vagues de froid historiques et futures. Ces indicateurs ont été choisis en fonction des objectifs des études menés.

Le LSCE a utilisé le critère proposé par Vavrus et al., 2006 qui correspond au nombre de jours où :

$T_{\text{moy-jour-hiver}} \leq 2\sigma_{\text{distribution-hiver}}$ pendant au moins 2 jours consécutifs

Le seuil de -2σ est illustré sur la **Figure L1.4**. Le comptage est effectué sur la période de novembre à mars. Cet indicateur a été choisi car il permet de filtrer les épisodes les plus courts et s'intéresse aux valeurs extrêmes de températures (seuil à 2σ). Il présente une faible dépendance latitudinale ce qui permet de l'utiliser sur de vastes régions (Europe par exemple). D'autre part, cet indicateur est en accord avec les résultats de Météo-France, puisqu'il capte la majorité des événements de forte, moyenne et faible intensité de leur classification.

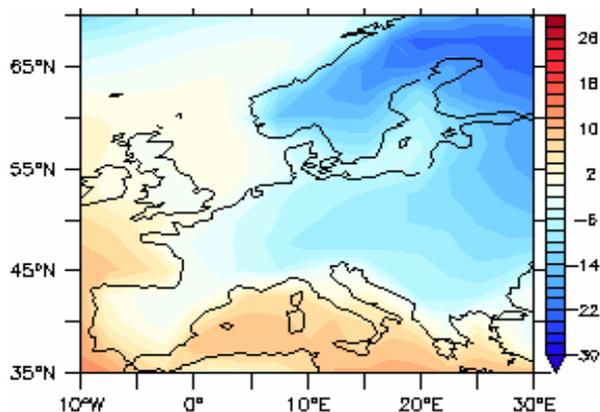


Figure L1.4 : valeur du seuil (-2σ) de température de l'indicateur de vague de froid de Vavrus et al., 2006 calculé dans ERA-40 pour la période 1961-2000.

Le CNRM-GAME a opté pour un indicateur ETCCDI² sélectionné dans le cadre du projet CLIVAR (WIREs, 2011) pour l'étude des événements extrêmes. L'indicateur CSDI (Cold Spell Duration Index) comptabilise le nombre de jours où :

$T_{\min} < \text{Quantile}_{10}$ pendant au moins 6 jours consécutifs

La **Figure L1.5** présente les valeurs du 10^{ème} quantile (Q10) de la distribution de T_{\min} pour la période 1961-2000.

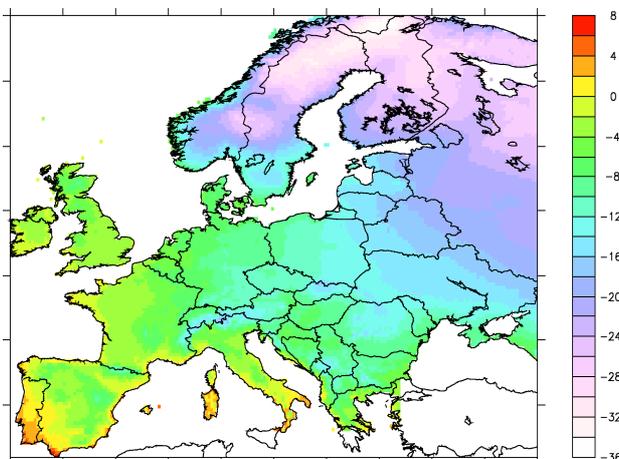


Figure L1.5 : 10^{ème} quantile de la distribution des minima de températures, utilisé dans la définition de l'indicateur de vague de froid CSDI. Il a été calculé sur la période 1961-2000 à partir des données observées E-OBS.

Cet indicateur est un indicateur de référence dans la communauté climat qui présente les avantages d'être statistiquement robuste, de couvrir un large spectre de climat, et d'avoir un bon rapport signal sur bruit. Il a été utilisé par le CNRM pour l'analyse des vagues de froid présentes et futures et sous une forme simplifiée (sans critère de persistance) pour l'étude de cas de l'hiver 2009-2010 et pour l'étude des biais des modèles (**Section 2.2**).

² "Expert Team of Climate Change Detection and Indices"

d- Récapitulatif

Les indicateurs de vague de froid utilisés dans le cadre de cette étude sont rassemblés dans le **tableau L1.2**. Certains ont été sélectionnés par les laboratoires de recherche et n'ont pas de valeur en terme de vulnérabilité du secteur énergétique. Par contre ils ont l'avantage d'être reconnu par la communauté scientifique et de présenter des critères adaptés à l'étude de phénomènes climatiques. D'autres critères ont été élaborés par les industriels eux-mêmes en lien étroit avec les climatologues pour décrire une des vulnérabilités de leur métier à l'aléa vague de froid.

Partenai -res	Objectifs	Paramètres	Indicateur climatique	Critères de sélection / critères de vulnérabilité		
				Persistance	Amplitude	Ext. Géo
IPSL / GDF- SUEZ	Vulnérabilité de la distribution de gaz	ΔT_{moy} p/r 1971- 2000 (ΔT_{moy}) Saison : NDJFM	Nombre de jours où $\Delta T_{\text{moy}} < 0^{\circ}\text{C}$	≥ 15 jours	Anomalie cumulée $\leq -75^{\circ}\text{C}$	Forte sur l'Europe
EDF	Analyse des pics de consommation d'électricité	T_{min} Saison : NDJFM	Nombre de jours où $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$	≥ 2 jours		Ville du Nord de la France
CNRM- GAME	Caractérisation de l'hiver 2009- 2010	ΔT_{min} p/r 1971- 2000 Saison : DJFM	Nombre de jours où $\Delta T_{\text{min}} < Q_{10}$			
	Mécanismes et prévisibilité	ΔT_{min} p/r 1971- 2000 Saison: DJFM	Nombre de jours où $\Delta T_{\text{min}} < Q_{10}$			
	Analyse des biais des modèles	T_{min} Saison: DJFM	Nombre de jours où $T_{\text{min}} < Q_{10}$			
	Analyse des VDF présentes et futures	T_{min} Saison: DJFM	Nombre de jours où $T_{\text{min}} < Q_{10}$	≥ 6 jours		
LSCE	Représentation des VDF dans les modèles.	ΔT_{moy} p/r à 1961- 2000 Saison : NDJFM	Nombre de jours où $\Delta T_{\text{moy}} < 2\sigma$			

Tableau L1.2 : Liste des indicateurs de vagues de froid (VDF) utilisés par les partenaires du projet pour étudier leurs caractéristiques et leur impact sur le secteur énergétique.

Ce tableau illustre la diversité d'indicateurs utilisables pour l'étude d'un aléa pour un secteur d'activité particulier. Le nombre d'indicateurs pourrait être multiplié à l'infini à mesure que l'on affine les objectifs poursuivis : type de vulnérabilité, infrastructures, procédé industriel, mode de gestion, région d'intérêt...

Il est donc très difficile de définir un indicateur universel pour alimenter les bases de données à destination des utilisateurs finaux (portail de service climatique français DRIAS ou portail d'impact européen IS-ENES). En terme de mise à disposition des indicateurs de vulnérabilité, il semble plus judicieux de s'orienter sur du calcul en ligne basé sur les technologies telles que les services web et les standards OGC. Elles permettent à chacun d'adapter la définition d'indicateurs et d'ajuster les seuils de vulnérabilité à ses propres besoins.

2- Évaluation des modèles

a- Évaluation des températures simulées sur la période historique

Les biais moyens de T_{\min} et T_{moyen} des deux modèles français sont évalués par rapport à deux jeux d'observations grillés. Le jeu d'observations du projet « European Climate Assessment and Dataset » (EOBS) inclut les observations in-situ des T_{\min} et T_{moyen} interpolées sur une grille régulière en latitude et longitude à la résolution de 0.25° sur l'Europe (Haylock et al., 2008). Le jeu d'observations du Hadley Center (HADGHCND) comprend les données de T_{\min} interpolées sur une grille régulière en latitude et longitude à la résolution de 96×73 au niveau global. Les données sur l'Europe ont été extraites pour conduire les analyses. Ces deux jeux d'observations ne sont pas homogénéisés. L'homogénéisation est une technique de correction des séries d'observations. Elle permet de tenir compte des différences de mode opératoire qui interviennent au cours du temps sur un site de mesure (changement d'appareil de mesure, déplacement du site de mesure, construction d'une route ou d'un immeuble à proximité du site de mesure...) et engendrent des erreurs importantes dans la série de données.

Pour les données modèles, la base de données du projet européen ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) a été utilisée. L'expérience STREAM 2 fournit les simulations de 6 modèles européens et plusieurs membres pour chaque modèle à l'échelle globale et pour le scénario SRES A1B. Ainsi, un total de 13 simulations est disponible pour la période 1961-2100 permettant une analyse des incertitudes liées au choix du modèle. Dans le cadre de cette étude, nous nous limitons à l'analyse des résultats des 2 modèles français : le modèle de l'IPSL-CM4 (IPCM4 dans la suite) à la résolution 144×143 , le modèle du CNRM-CM3.3 (CNCM33 dans la suite) à la résolution 64×128 . L'analyse détaillée des incertitudes et la prise en compte de simulations climatiques régionales de plus forte résolution spatiale sur l'Europe sera finalisée dans le cadre du projet ANR/SECIF.

Afin de simplifier l'intercomparaison des modèles et observations, l'ensemble des jeux de données utilisé a été interpolé sur une grille commune, la grille EOBS, à partir d'une interpolation bicubique. Les effets d'altitudes ne sont pas pris en compte dans la méthode appliquée. Il ne sera donc pas possible d'avoir des résultats fiables sur les régions de relief.

En complément de l'analyse des biais moyens de températures, nous avons également évalué la capacité des modèles à représenter la distribution des anomalies journalières de T_{\min} et T_{moyen} par rapport à ces jeux d'observations. Dans cette étude les anomalies de température journalières ont été calculées comme la différence de température d'un jour donné par rapport à la climatologie de ce jour pour la période de référence 1971-2000.

5. BIAIS MOYEN

Le biais moyen en T_{\min} est présenté sur la *Figure L1.6* pour les deux modèles français et pour les deux jeux d'observations sélectionnés pour cette étude. Les mois d'hiver (NDJFM) de la période 1971-2000 ont été analysés. Le modèle de l'IPSL présente un biais froid généralisé sur l'ensemble de l'Europe, avec une moyenne de -2.7°C (-3.5°C) par rapport aux observations EOBS (HADGHCND). Les températures minimales simulées par le modèle du

CNRM sont elles aussi, en moyenne, inférieures aux observations avec un biais s'élevant à -1.3°C (-2.4°C) par rapport à EOBS (HADGHCND). En revanche, avec ce modèle, le sud de l'Europe et les régions montagneuses (Alpes, Pyrénées, Alpes Scandinaves) présentent un biais chaud. Les biais au-dessus des régions présentant une orographie complexe sont probablement en lien avec la faible résolution horizontale des modèles ainsi qu'au manque de correction de l'altitude lors de la phase d'interpolation.

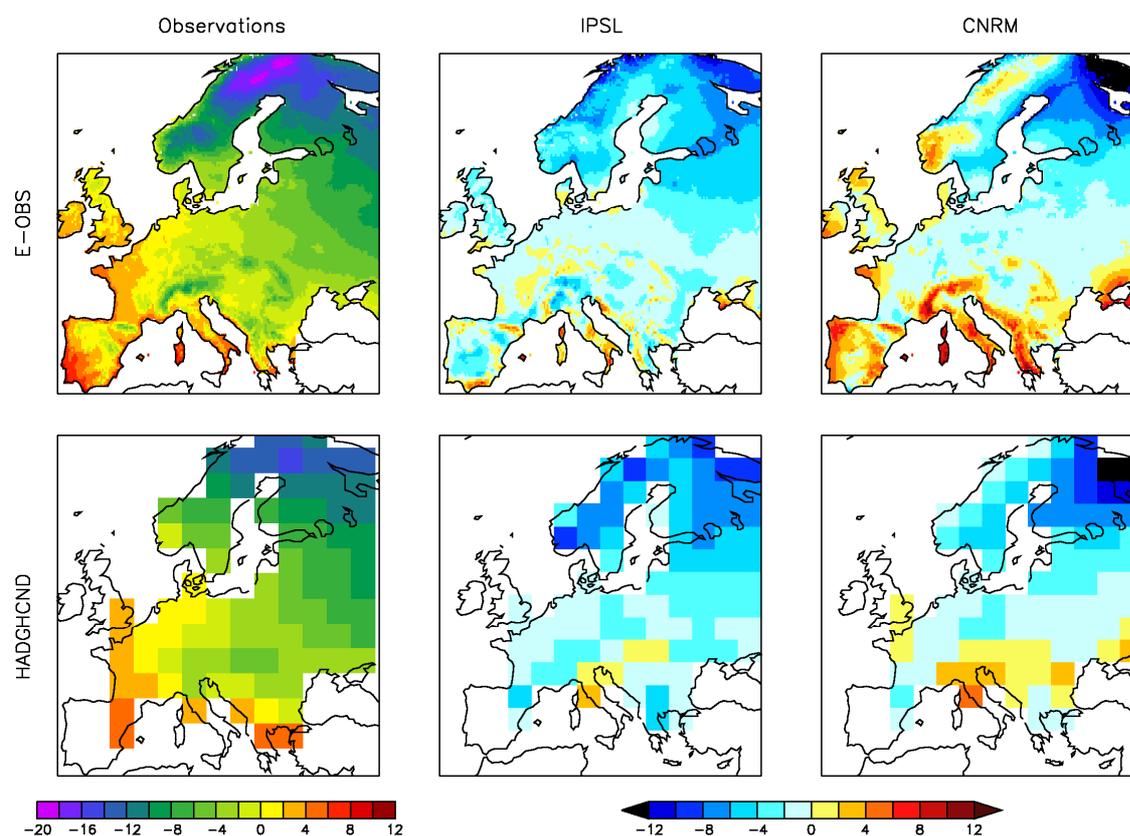


Figure L1.6: Biais moyen de T_{\min} par rapport à E-OBS et HADGHCND pour le modèle de l'IPSL et du CNRM. Les moyennes ont été calculées pour les mois de novembre à mars de la période 1971-2000.

Les biais moyens de T_{moyen} par rapport aux observations EOBS sont présentés sur la **Figure L1.7** pour les 2 modèles français, pour la période 1971-2000. Comme pour le T_{\min} , le biais froid est plus généralisé avec le modèle de l'IPSL (-2.7°C) qu'avec le modèle du CNRM (-2.3°C). On observe également avec le modèle du CNRM des zones de biais chaud importants principalement sur les régions d'altitude.

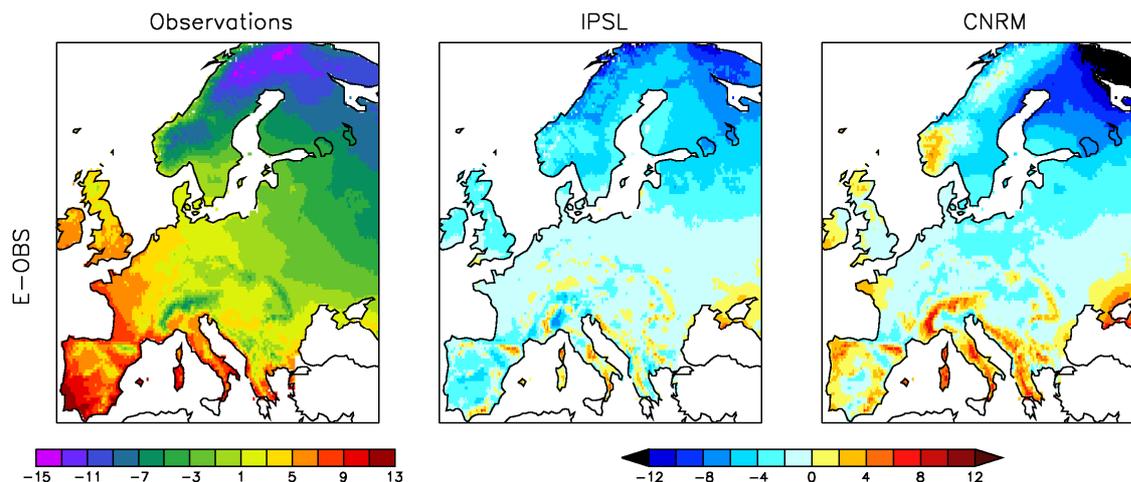


Figure L1.7: Biais moyen de T_{moy} par rapport à E-OBS pour les modèles de l'IPSL et du CNRM. été calculées pour les mois de novembre à mars de la période 1971-2000.

Ces biais sont plus importants que ceux décrits par Cattiaux et al., 2012 dans les versions plus récentes des modèles CNRM-CM5 et IPSL-CM5A-LR qui ont été utilisée pour l'exercice d'intercomparaison de modèle couplé CMIP5. Ces biais sont en revanche assez proches de ceux obtenus avec les versions antérieures des modèles de l'IPSL et du CNRM développées dans le cadre de CMIP3 (cf fiche support INVULNERABLE / Traitement des incertitudes et correction des données simulées dans le cadre de l'étude de cas « Dalkia et les réseaux de chaleur » sur <http://www.iddri.org/Id드리/Fondation/Projet-INVULNERABLE>).

6. ANOMALIES PAR RAPPORT À LA PÉRIODE 1971-2000

Les anomalies journalières de T_{min} et T_{moyen} par rapport à la période 1971-2000 ont également été analysées. Leurs distributions pour les deux modèles français et pour le jeu d'observation EOBS sont présentées sur la **Figure L1.8**. L'analyse couvre les mois d'hiver de la période 1971-2000.

Alors que les distributions de données observées d'anomalies de T_{min} et T_{moyen} sont quasiment symétrique, les distributions simulées par le modèle du CNRM présentent une dissymétrie vers les valeurs élevées de température (skewness <1, pic de la distribution $\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ pour le T_{moyen} et 3.5°C pour le T_{min}). Les distributions du CNRM sont également plus aplaties que celles de EOBS ce qui entraîne une surestimation du nombre de jour où les anomalies de température sont les plus faibles (anomalies inférieures à environ -5°C). Malgré la dissymétrie, on constate également une légère surestimation du nombre de jour où les anomalies sont les plus fortes.

Les distributions simulées par le modèle de l'IPSL sont très proche de celles observées sur la zone Europe (bonne symétrie, bon aplatissement). Par contre, sur la France, les distributions sont beaucoup plus « pointues » que celles observées. Ceci entraîne une sous-estimation du

nombre de jour d'anomalies extrêmes et une surestimation du nombre de jour où l'anomalie est proche de zéro.

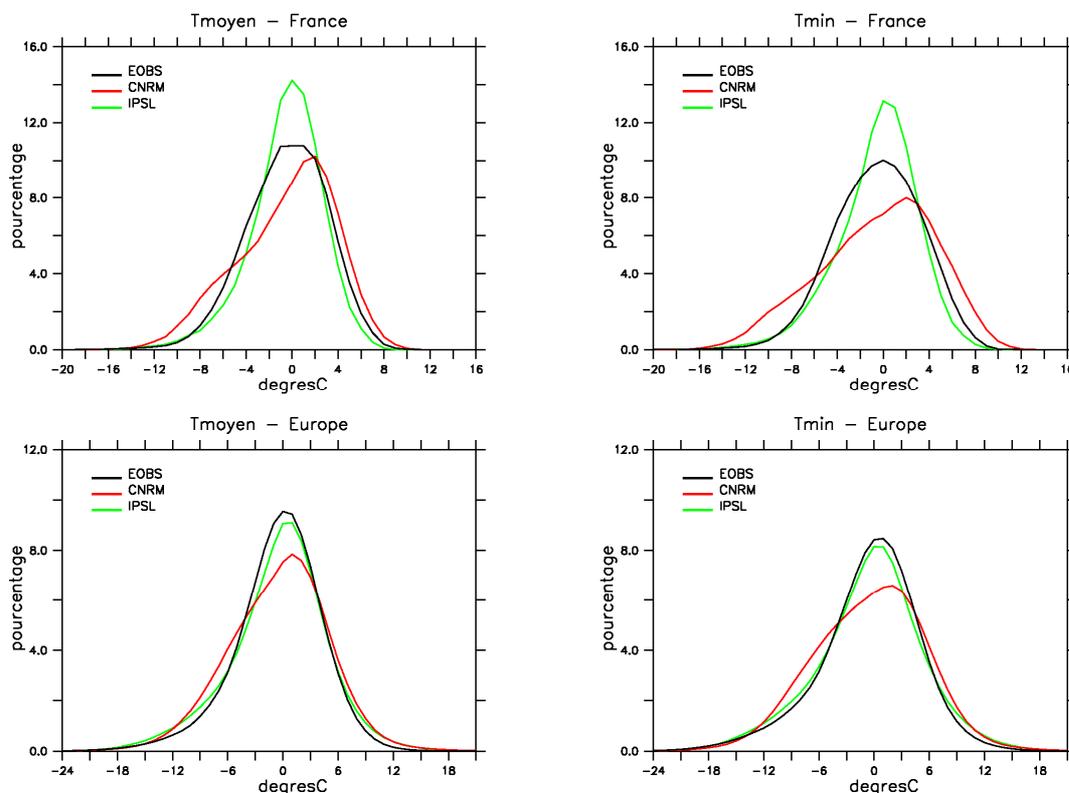


Figure L1.8: Distribution des anomalies de température moyenne (colonne de gauche) et de température minimale (colonne de droite) au-dessus de la France (haut) et de l'Europe (bas) dans les observations E-OBS (courbe noire), le modèle du CNRM (courbe rouge) et le modèle de l'IPSL (courbe verte) et pour la période 1971-2000. Les anomalies sont calculées par rapport à la période de référence 1971-2000.

b- Évaluation des indicateurs climatiques

Dans cette section, nous évaluons la capacité des modèles à représenter deux des indicateurs climatiques définis précédemment pour l'analyse des vagues de froid.

Le premier indicateur climatique est celui de l'étude de cas EDF et correspond au nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$. Les valeurs de cet indicateur calculées dans les données E-OBS et les deux modèles français sont présentées sur la **Figure L1.9** pour les mois d'hiver de la période 1971-2000.

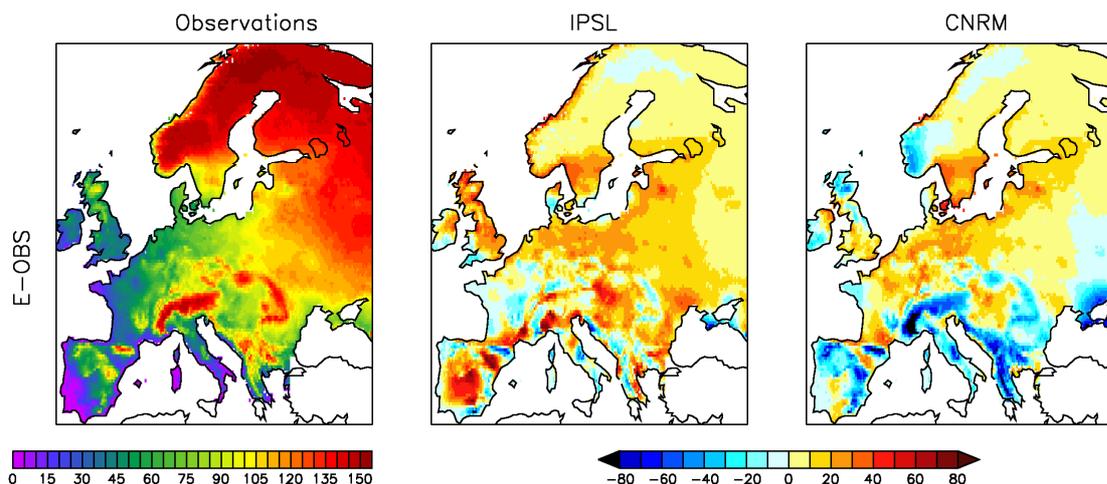


Figure L1.9 : Nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ pour la période 1971-2000 calculé à partir du jeu d'observations EOBS (gauche). Différence du nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ entre le modèle de l'IPSL et EOBS (milieu) et entre le modèle du CNRM et EOBS (droite) pour la période 1971-2000.

En moyenne sur la zone Europe, l'indicateur varie entre 0 et 155 jours par hiver dans le jeu de données EOBS avec une valeur moyenne de 101.6 jours par hiver sur la zone d'étude. Les valeurs les plus élevées se situent dans le Nord de l'Europe (la Scandinavie principalement) et les régions montagneuses (Alpes et Pyrénées). Sur la France, les zones alpines, pyrénéennes et le Massif Central sont les plus touchées par des températures minimales négatives.

Le modèle de l'IPSL a tendance, de façon assez généralisée sur l'ensemble du domaine, à surestimer les valeurs de cet indicateur. En moyenne le modèle de l'IPSL simule 112.1 jours par hiver de T_{\min} négatif. Localement le biais peut atteindre plus de 80 jours par saison.

Le modèle du CNRM est très proche de la valeur observée en moyenne sur l'Europe avec 101 jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$. Régionalement, on constate une surestimation des valeurs de l'indicateur climatique dans la plupart des régions du Nord de l'Europe alors que la tendance est à la sous-estimation dans les régions du sud et dans les régions d'altitude (le biais atteint plus de 80 jours sur les Alpes).

La distribution spatiale de l'indicateur climatique et des biais des modèles est fortement anti-corrélée à celle des T_{\min} (**Figure L1.6**). Ainsi les valeurs de l'indicateur sont le plus élevées dans les régions où le T_{\min} est le plus faible et les modèles ont tendance à surestimer les valeurs de l'indicateur dans les régions où ils sous-estiment les valeurs de T_{\min} .

Le deuxième indicateur climatique est celui de l'étude de cas GDF-Suez et correspond au nombre de jours où les anomalies de températures moyennes sont négatives ($\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$). Les valeurs de cet indicateur ont été calculées dans les données EOBS et les deux modèles français et sont présentées sur la **Figure L1.10** pour les mois d'hiver de la période 1971-2000.

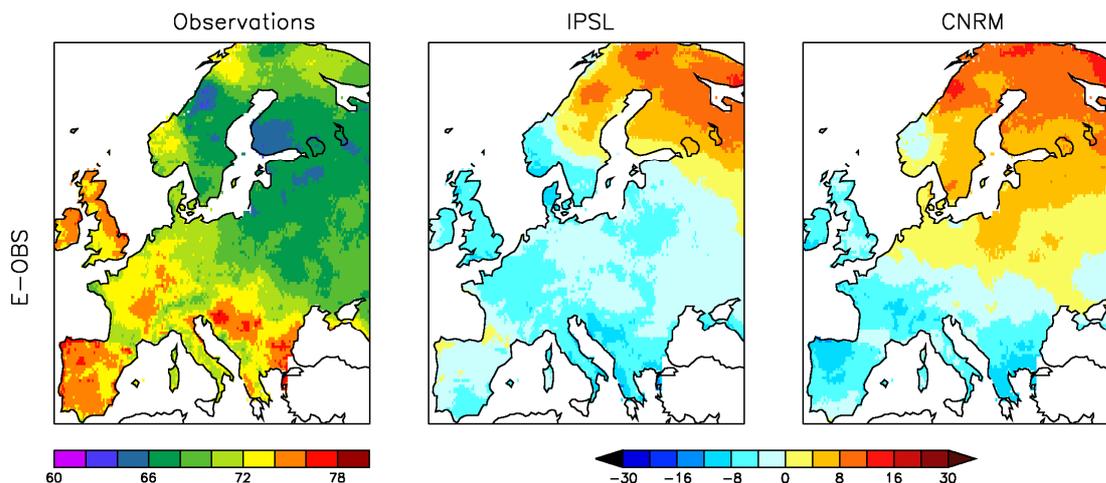


Figure L1.10 : Nombre de jours où $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ pour la période 1971-2000 obtenu à partir du jeu d'observations E-OBS (gauche). Différence du nombre de jours où $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ entre le modèle de l'IPSL et E-OBS (milieu) et entre le modèle du CNRM et E-OBS (droite) pour la période 1971-2000.

En moyenne sur la zone Europe, cet indicateur atteint une valeur de 70.1 jours par hiver dans EOBS. Contrairement à l'indicateur précédent, ce sont les régions du Sud et de l'Ouest de l'Europe qui présentent les valeurs les plus élevées. En effet, si les températures sont plus froides dans le Nord de l'Europe, elles sont plus variables dans le Sud-Ouest de la région. La distribution spatiale de cet indicateur est beaucoup plus homogène que celle de l'indicateur EDF avec des valeurs réparties entre 62 et 80 jours.

Les 2 modèles français présentent des biais moyens faible sur l'Europe (> 4 jours de différence par rapport aux observations), avec une légère sous-estimation de l'indicateur par le modèle de l'IPSL (69.1 jours par hiver) et une légère surestimation par le modèle du CNRM (71.6 jours par hiver). Spatialement on constate pour les 2 modèles 2 zones distinctes : une zone au Nord-Est de l'Europe de biais positifs pouvant atteindre +14 jours et une zone au Sud-Ouest de l'Europe de biais négatifs pouvant atteindre -12 jours. La limite de ces 2 zones est décalée vers le sud-ouest pour le modèle du CNRM par rapport à celui de l'IPSL. Pour les 2 modèles, la France se situe dans la zone de biais négatif avec une sous-estimation d'environ 8 jours par hiver d'anomalie négative de T_{moyen} .

Finalement les biais sur la distribution des anomalies de T_{moyen} présentés en **Figure L1.8** ont un effet faible sur cet indicateur climatique. En particulier, pour le modèle du CNRM, on peut supposer une compensation des effets d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution.

c- Évaluation des critères de vagues de froid

Le critère de persistance a été évalué pour l'indicateur $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ dans les 2 modèles français et comparé avec les données observées EOBS. Deux seuils de persistance ont été testés : le seuil à 6 jours recommandé par l'ETCCDI et le seuil de 15 jours issus des travaux réalisés avec GDF-Suez.

Les évènements très persistants (seuil de 15 jours) sont très rares. Ainsi, on compte en moyenne sur la période 1971-2000 moins d'un épisode par hiver de ce type (cf. **tableau L1.3**).

Les modèles représentent assez bien la fréquence de ce type d'évènement avec une légère sous-estimation (surestimation) de la part du modèle de l'IPSL (du CNRM).

La fréquence des évènements de persistance 6 jours est également bien représentée par les modèles en moyenne sur l'Europe (erreur de moins de 5%), avec en moyenne 4 épisodes d'au moins 6 jours par hiver sur la période 1971-2000. Le biais est un peu plus important sur la France, avec une sous-estimation des valeurs de la part des 2 modèles

Ces résultats vont à l'encontre de ceux obtenus par B. Quesada (présentation de l'atelier sur les vagues de froid) avec l'indicateur $\Delta T_{\text{moyen}} < -2\sigma$ et qui concluaient à une surestimation du nombre d'épisode peu persistant et à une sous-estimation des épisodes persistants par les modèles. Cette différence provient probablement de la définition de l'indicateur. En effet l'indicateur $\Delta T_{\text{moyen}} < -2\sigma$ correspondant à des évènements beaucoup plus extrêmes que les évènements $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^\circ\text{C}$. Ils sont moins bien représentés dans les modèles globaux utilisés pour cette étude.

		Europe			France		
		EOBS	IPSL	CNRM	EOBS	IPSL	CNRM
Persistance = 15 jours	NEV	0.82	0.76	1.0	0.93	0.59	0.94
	ND	17.7	15.9	21.5	19.1	12.5	21.6
Persistance = 6 jours	NEV	3.9	3.7	4.1	4.0	3.5	3.6
	ND	44.7	41.9	49.1	45.8	37.0	45.3

Tableau L1.3 : Estimation du nombre d'évènements $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^\circ\text{C}$ ayant une persistance d'au moins 6 et 15 jours pour les hivers de la période 1971-2000 dans les observations, le modèle de l'IPSL et le modèle du CNRM. « NEV » représente le nombre d'évènements moyens par hiver ; « ND » le nombre de jours associés à ces évènements en moyenne par hiver.

Le nombre de jours associés à ces évènements est présenté sur la **Figure L1.11** pour le seuil de 15 jours et la **Figure L1.12** pour le seuil de 6 jours. Les régions les plus affectées par des évènements persistants se situent au centre de l'Europe et celles les moins affectées au Nord-Est de l'Europe (Scandinavie principalement). Ces résultats sont vérifiés pour les 2 seuils de persistance considérés. La France connaît une situation intermédiaire avec 19.1 (45.8) jours par hiver associés à des évènements froids de persistance de plus de 15 jours (6 jours).

Le biais du modèle de l'IPSL est très fortement corrélé à celui du nombre de jours total de $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^\circ\text{C}$ (**Figure L1.10**) avec une zone au Nord-Est de l'Europe de biais positifs et une zone au Sud-Ouest de l'Europe de biais négatifs. La répartition spatiale des biais du modèle du CNRM est moins bien corrélée avec ceux de la **Figure L1.10** qui surestime le nombre de jours d'épisodes persistants également en Grande Bretagne, dans l'ouest de la France et en Espagne et en Grèce.

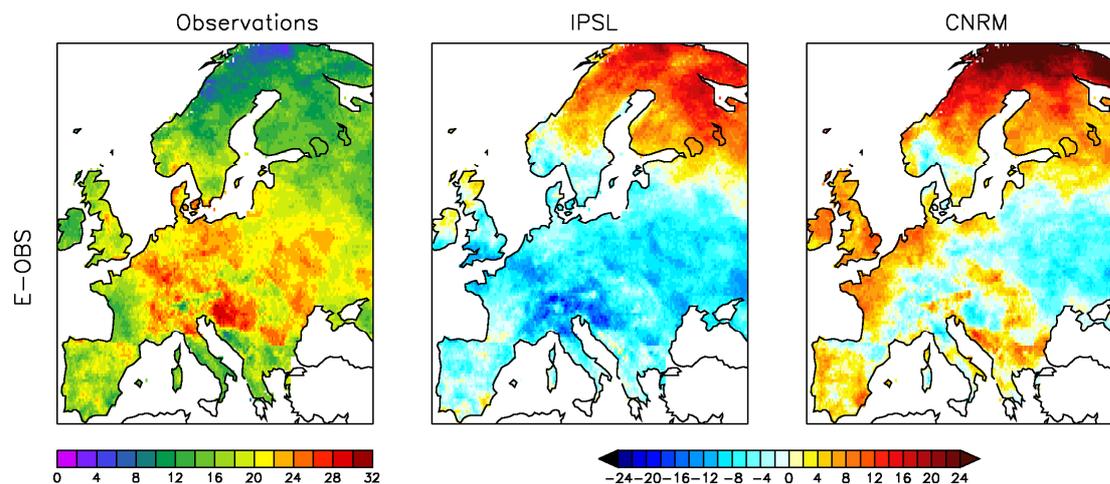


Figure L1.11 : Nombre de jours associés aux évènements de type $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ ayant une persistance d'au moins 15 jours pour la période 1971-2000 et estimé à partir des observations EOBS (gauche). Différence de ce nombre de jours entre le modèle de l'IPSL et EOBS (milieu) et entre le modèle du CNRM et EOBS (droite)

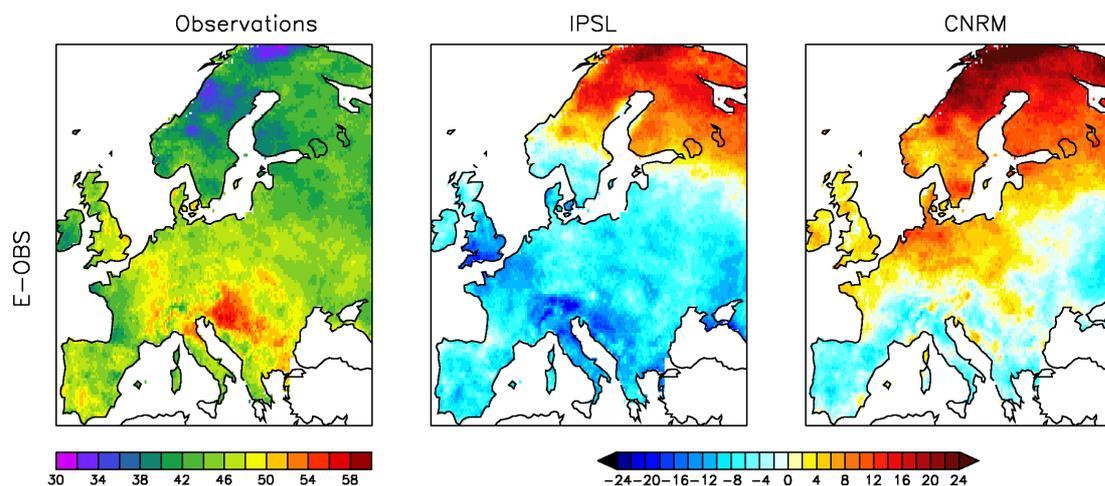


Figure L1.12 : Idem pour les évènements de type $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ ayant une persistance d'au moins 6 jours.

d- Compréhension des biais des modèles

Les 3 vagues de froid successives de l'hiver 2009/2010 et leur impact ont déclenché un intérêt particulier pour ces évènements. Une série d'études a donc été lancée au CNRM et à l'IPSL. L'objectif était de comprendre l'origine des biais des modèles globaux sur les extrêmes de froid et de proposer des solutions pour en améliorer la représentation. Les principaux résultats de ces études sont résumés ci-dessous.

7. RÔLE DE LA STRATOSPHERE

Une première étude s'est concentrée sur le rôle de la basse stratosphère dans la représentation des phases de l'oscillation Nord-Atlantique mais aussi dans la représentation des anomalies de T_{\min} et de la fréquence des jours les plus froids. Les résultats de ces travaux sont détaillés dans Ouzeau et al., 2011.

Dans cette expérience, deux jeux de simulations ont été réalisés avec le modèle Arpège-Climat forcé par des SST mensuelles observées. Chacun de ces jeux de simulations inclut une expérience de contrôle sur la période 1971-2000 (5 membres) et un ensemble de 30 membres pour la période octobre2009-mars-2010. Ils diffèrent par le traitement de la stratosphère. En effet, dans le premier jeu de simulations, la stratosphère est libre alors que la deuxième série de simulations inclut au nord de 25°N, un rappel des champs de vents horizontaux et de températures de la stratosphère vers les analyses du CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme).

Les anomalies de géopotentiel à 500 hPa (Z500) et de T_{\min} ainsi que le nombre de jours très froids ($T_{\min} < Q_{10}$) de l'hiver³ 2009/2010 ont été comparés pour les deux jeux de simulations aux réanalyses du CEPMMT ERA40/ERA-Interim (Uppala et al., 2005 ; Uppala et al., 2008). Ils sont présentées sur la **Figure L1.13** (issue de Ouzeau et al., 2011). Les anomalies ont été calculées par rapport à la climatologie de la période 1971-2000.

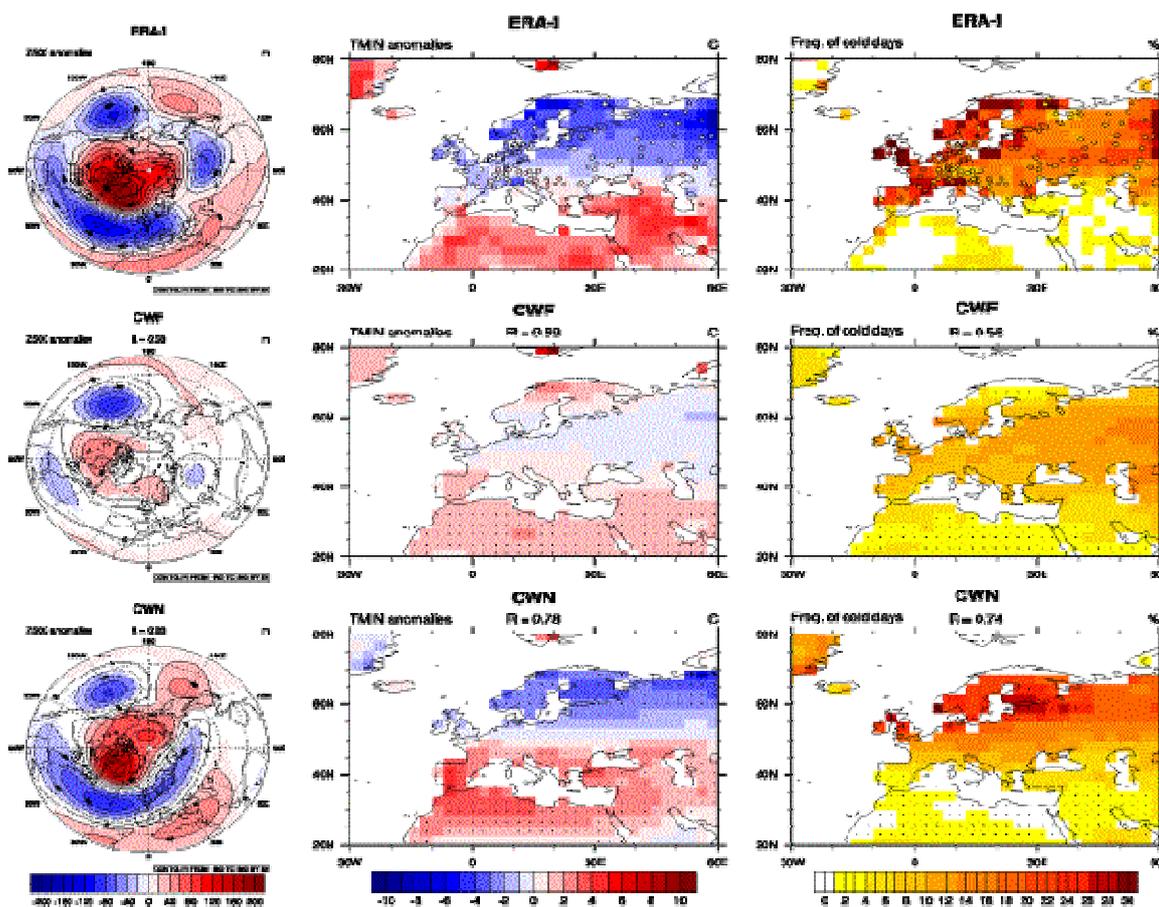


Figure L1.13 : Anomalies de Z500 (gauche) anomalies de Tmin (milieu) et fréquence des jours très froids (droite) de l'hiver 2009 :2010. Les pointillés correspondent aux zones où le signal est statistiquement significatif à 5% pour l'anomalie de Z500, et 10% pour l'anomalie de Tmin et la fréquence en jours très froids. Le

³ Les anomalies ont été calculées pour les mois de décembre à mars.

paramètre R est le coefficient de corrélation APC entre les données simulées et les réanalyses ERA40/ERA-Interim.
Source : Figure 3 de Ouzeaux et al., 2011

Le rappel de la stratosphère sur les analyses du CEPMMT permet de largement améliorer la représentation de l'anomalie de Z500 aussi bien au-dessus du Pacifique Nord que de l'Atlantique Nord, avec une augmentation du coefficient de corrélation APC⁴ de 0.58 à 0.83. Il en est de même pour les champs de T_{\min} . Les simulations sans traitement particulier de la stratosphère représentent mal le gradient méridional d'anomalies de T_{\min} , signature de la phase négative de la NAO. D'autre part les valeurs des anomalies de T_{\min} sont largement sous-estimées et peu de points sont significatifs au niveau de 10%. Le rappel de la stratosphère vers les analyses du CEPMMT améliore largement les structures d'anomalies de T_{\min} et la significativité des résultats. On observe cependant un décalage vers le nord des valeurs positives de l'anomalie.

En ce qui concerne la fréquence des jours très froids, seules les simulations avec rappel de la stratosphère réussissent à simuler des valeurs de plus de 20% comme dans les observations.

Cette étude ne permet pas de définir les facteurs exacts à l'origine de l'amélioration des périodes de froid hivernales dans les modèles. Cependant, les processus ayant une influence sur le vortex polaire stratosphérique (SPV) sont mis en avant dans cette étude. En effet, les fluctuations hebdomadaires à mensuelles du SPV dominent la variabilité de l'atmosphère en hiver dans les moyennes latitudes Nord (Charlton et al., 2007). Scaife and Knight, 2008 ont d'ailleurs montré son rôle dans la représentation de l'hiver 2005/2006. Améliorer la représentation des signaux basses fréquences ayant une influence sur le SPV comme les émissions d'aérosols volcaniques, l'Oscillation Quasi Biennale, le phénomène ENSO, la couverture neigeuse en Eurasie ou la glace de mer en Arctique pourraient améliorer la capacité des modèles à reproduire la dynamique, les températures et donc les vagues de froid hivernales. Améliorer le couplage troposphère/stratosphère est une vraie question scientifique qui ne peut être résolue par la simple augmentation de la résolution verticale des modèles.

Décomposition dynamique/physique

Une seconde étude s'est focalisée sur la capacité des modèles à représenter correctement la fréquence des jours les plus froids (T_{\min} inférieur au 10^{ème} quantile). La part du biais attribuable à la circulation grande-échelle (biais sur la fréquence d'occurrence des régimes et sur la représentation des centroïdes) a été comparée à celle attribuable aux processus non-dynamiques tels que les conditions de surface (températures de surface des mers, humidité du sol, couverture neigeuse, etc.) ou les effets radiatifs (nuages, aérosols, etc.). Les résultats de cette étude sont détaillées dans Cattiaux et al., 2012.

Dans cette étude, les données de T_{\min} et de Z500 des modèles du CNRM (CNRM-CM5, Voltaire et al., 2012) et de l'IPSL (IPSL-CM5A-LR, Dufresne et al., 2011) ont été comparées aux données observées de T_{\min} de ECA&D (EOBS, Haylock et al., 2008) et aux Z500 issus des réanalyses NCEP (National Centers for Environmental Prediction, USA ; Kanamitsu et al., 2002). Une décomposition linéaire du nombre moyen de jours les plus froids (PQ10) a été réalisée en fonction de leur appartenance à un régime de temps :

⁴ Anomaly Pattern Correlation

$$PQ_{10} = \sum_k PQ_{10,k} \times f_k ,$$

avec k représentant les différents régimes de temps, f_k leur fréquence.

Le biais de PQ10 a été analysé en tenant compte de :

- la part du biais due à la différence de fréquence des régimes de temps entre observations et modèles
- la part du biais due à la différence de centroïdes entre observations et modèles
- la part du biais attribuable à la différence de relation PQ10/Z500 entre modèles et observations.

Les résultats de cette étude montrent que les versions CMIP5 des deux modèles français simulent plutôt bien la fréquence des 4 régimes de temps malgré une légère sous-estimation du régime de blocage et une légère surestimation de l'Atlantic Ridge (**Figure L1.14**, source : Cattiaux et al., 2012).

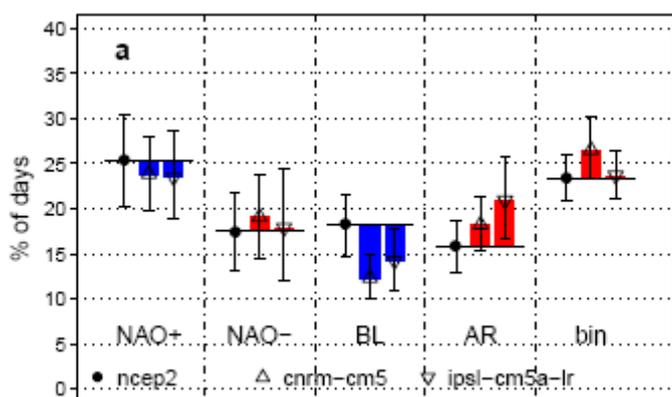


Figure L1.14 : fréquence d'occurrence des régimes de temps simulée par les versions CMIP5 des modèles de l'IPSL (triangle à l'envers) et du CNRM (triangle à l'endroit) dans le cadre de l'expérience AMIP. Les écarts par rapport aux valeurs EOBS (point noir) sont représentés. Les intervalles correspondent au niveau de confiance à 95% et ont été obtenus par la méthode statistique de bootstrap. *Source Cattiaux et al., 2012.*

Ces légers biais sur la fréquence des régimes de temps ont peu d'impact sur la représentation des PQ10. La part du biais liée à la différence de centroïde est elle aussi mineure. Ce sont les termes liés aux-processus non-dynamiques qui ont le plus d'impact sur le biais en PQ10.

3- Méthodes d'analyse

a- Correction des données

Une partie de l'incertitude associée aux imperfections des modèles peut être réduite en corrigeant les biais des modèles. En effet dans l'étude d'indicateurs de vulnérabilité tels que ceux développés dans le cadre de cette étude, il est important de corriger les données brutes issues des modèles afin de :

- 1) Permettre la comparaison des données modèles à un seuil de vulnérabilité absolu. En effet, certains des indicateurs de cette étude mettent en jeu des seuils de vulnérabilité ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$, cumul ($\Delta T_{\text{moyen}} < -75^{\circ}\text{C}$, ...) fixé par les opérationnels en fonction des valeurs observées des variables météorologiques. Il est donc important de travailler sur des données modèles débiaisés afin de calculer ces indicateurs.
- 2) Evaluer la fréquence d'un évènement et sa criticité. La fréquence est un critère clé de la définition de la vulnérabilité. La fréquence critique d'un évènement est très souvent déterminée par analogie à une situation opérationnelle connue. Comparer les projections en fréquence à la fréquence critique nécessite également de travailler sur des données corrigées.

Afin de ramener les valeurs des variables simulées au niveau des valeurs observées, différentes techniques de correction ont été développées. Toutes ces méthodes de correction sont basées sur une hypothèse dite de stationnarité. On considère que les biais (moyen et variabilité) du modèle pour la période actuelle resteront sensiblement les mêmes dans le futur. En d'autre terme, on fait confiance à la trajectoire simulée par les modèles.

Techniquement, on calcule une fonction de correction pour la période actuelle en comparant les données simulées et les données observées pour une période commune (1961-2000 par exemple). Puis on applique cette fonction de correction à l'ensemble des données simulées par le modèle climatique (périodes historique et future).

Différentes méthodes de correction ont été développées. La plupart des méthodes de correction sont des méthodes statistiques et ne sont pas basées sur la physique du climat. Certaines méthodes ne corrigent que le biais moyen des variables simulées. Elles déplacent donc l'ensemble de la distribution d'un même facteur équivalent à la différence entre la moyenne simulée et la moyenne corrigée. C'est le cas des méthodes dites du « delta » et du « débiaisage ». D'autres méthodes corrigent l'ensemble de la distribution. Ce type de correction entraîne en général une translation de la distribution (comme pour la correction de la moyenne) ainsi que le changement de la forme de la distribution (aplatissement, modification de la symétrie...). Il existe des méthodes plus ou moins compliquées et performantes en fonction de l'étude que l'on souhaite réaliser (régions et variables d'intérêt). Une troisième classe de méthodes de correction est fréquemment utilisée. Elles consistent à faire un lien statistique entre une variable grande échelle « fiable » et la variable d'intérêt. La méthode des analogues et celle de la classification en type de temps sont les plus connues. L'utilisation de ces méthodes est souvent liée à leur faible coût de mise en œuvre (temps et puissance de calcul). Elles comportent cependant leurs propres sources d'erreurs comme l'hypothèse du modèle statistique stationnaire ou l'absence d'analogues passés pour certaines situations futures. On peut finalement citer les générateurs de temps comme autre classe de correction de données.

b- Méthode quantile/quantile

Comme nous l'avons vu précédemment, l'ensemble de la distribution des variables climatiques d'intérêt (T_{\min} et T_{moyen}) est biaisée. Une simple correction de la moyenne ne suffirait pas, voire n'aurait aucun effet dans le cas de l'indicateur basé sur les anomalies de T_{moyen} .

L'utilisation de la méthode quantile/quantile va permettre de recalibrer l'ensemble des valeurs de T_{\min} et T_{moyen} sur les valeurs observées et ainsi améliorer la représentation des indicateurs climatiques : $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ ou $\Delta T_{\text{moyen}} < 0$. En revanche cette méthode de correction n'a aucun effet sur la chronologie des événements et ne pourra donc pas améliorer un critère de vulnérabilité tel que la persistance (indicateur GDF-Suez).

La correction a été effectuée suivant la méthodologie exposée dans Déqué et al., 2007.

Sélection du jeu de données de référence

Les résultats de la correction dépendent fortement du jeu d'observations utilisé. Il doit représenter avec une bonne fiabilité l'ensemble des variables climatiques d'intérêt (T_{\min} ou T_{moyen} dans notre cas) et doit couvrir au moins une période de 30 ans.

Idéalement, il faudrait disposer d'un jeu d'observations homogénéisées couvrant l'ensemble de l'Europe avec une densité régulière. A ce jour, ce jeu d'observations n'existe pas.

Pour l'étude de l'indicateur EDF, nous pouvons utiliser les séries de T_{\min} issues des observations EOBS et HADGHCND. Pour l'étude de cas GDF-Suez seul EOBS propose les séries de T_{moyen} .

La correction des données avec le jeu d'observation EOBS est en cours mais n'a pas pu aboutir dans la durée du projet INVULNERABLE-2. Elle sera finalisée au cours du projet ANR/SECIF dans lequel l'étude de cas sur les vagues de froid se poursuit avec les données régionales du projet ENSEMBLES.

Nous illustrerons donc l'effet de la correction quantile/quantile de la variable T_{\min} à partir des observations HADGHCND.

Illustration de l'effet de la correction quantile/quantile sur les distributions présentes et futures de T_{\min}

La comparaison sur la **figure L1.15** des données observées et simulées de la période 1971-2000 (ligne du haut) illustre l'efficacité de la méthode de correction. Après correction (courbes rouges hachurées) la distribution des données simulées se confond quasiment avec celle des observations (courbe noire) alors qu'elle était très différente avant correction (courbes rouges continues). Il reste un très léger biais sur la représentation principalement sur les valeurs de T_{\min} les plus élevées.

La correction modifie fortement la forme de la distribution (courbe rouge continue vs courbe rouge pointillés). L'aplatissement et l'asymétrie sont réajustés. La correction réduit la fréquence des valeurs de T_{\min} les plus faibles (modèle de l'IPSL) et réajuste la gamme de valeur de T_{\min} simulée par le modèle du CNRM.

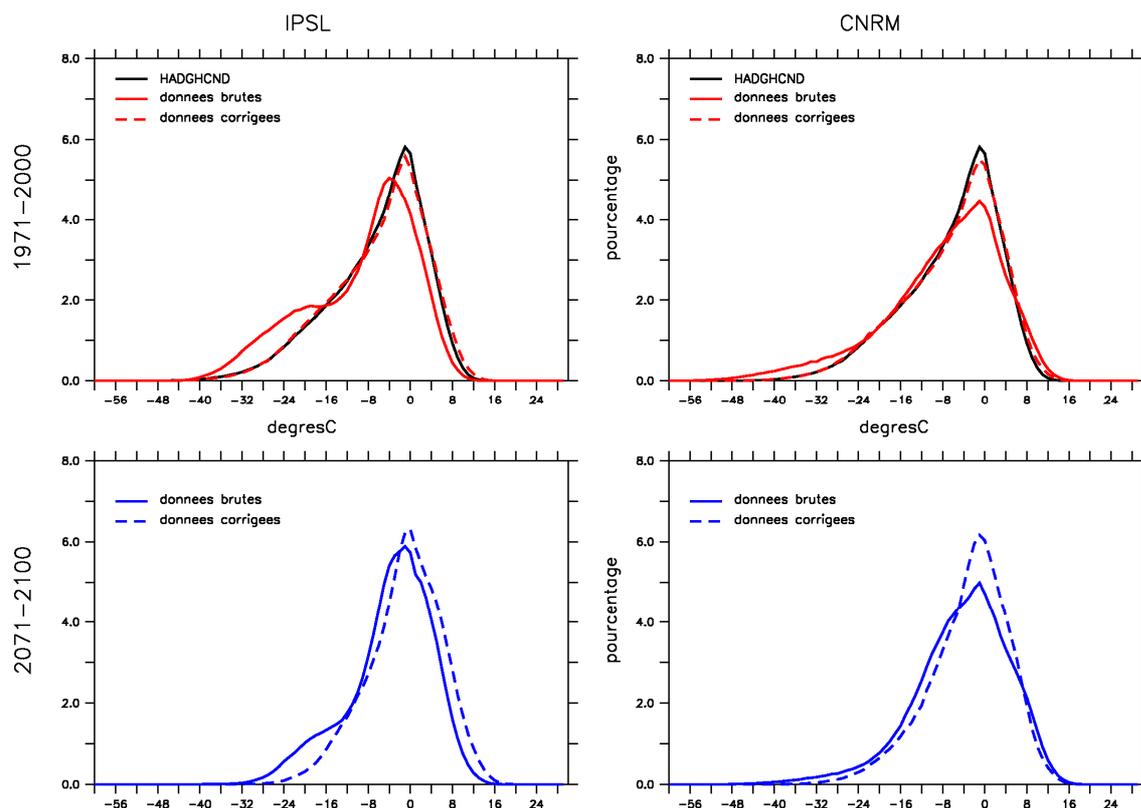


Figure L1.15 : Effet de la correction des températures minimales simulées par le modèle de l'IPSL (gauche) et le modèle du CNRM (droite) à partir de la méthode quantile/quantile et des observations du Hadley Center. Les distributions sur l'Europe pour les périodes 1971-2000 (courbes rouges) et 2071-2100 (courbes bleues) sont comparées avant (trait plein) et après (trait pointillé) correction. Pour la période 1971-2000 la distribution des observations du Hadley Center sont également présentées (courbes noires).

Les deux graphes du bas présentent les données simulées pour la période 2071-2100 avant (trait continu) et après (trait hachuré) correction. La correction modifie amplement la forme de la distribution des données futures simulées (et donc du nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$). On se rapproche de la forme de la distribution des données observées 1971-2000. On conserve cependant les principales tendances du signal non corrigé.

c- Utilisation des régimes de temps

La relation entre les températures en Europe et l'occurrence des différents régimes de temps, a été étudiée à de nombreuses reprises. Les variations intra-saisonniers et saisonniers des extrêmes de températures sont généralement associées à la persistance d'un régime de temps. Ainsi, les basses températures se font généralement ressentir lors de régimes persistants de NAO⁻ ou de blocage. Le régime d'Atlantic Ridge peut lui aussi être associé à des températures froides principalement dans l'Ouest de l'Europe. La **Figure L1.15** (source : Cattiaux et al., 2012) montre la dépendance des jours très froids ($T_{\min} < \text{Percentile } 10$) aux régimes de temps. Ainsi le régime NAO⁺, à l'origine de masse d'air chaude au-dessus de l'Europe, produit très peu de jours de températures inférieure au 10^{ème} quantile. En revanche les 3 autres régimes ont tendance à produire un nombre important de jours très froids au-

dessus de l'Europe du Nord pour le régime NAO-, au-dessus de l'Europe Centrale pour le régime de Blocage et dans l'Ouest de l'Europe pour le régime d'Atlantic Ridge.

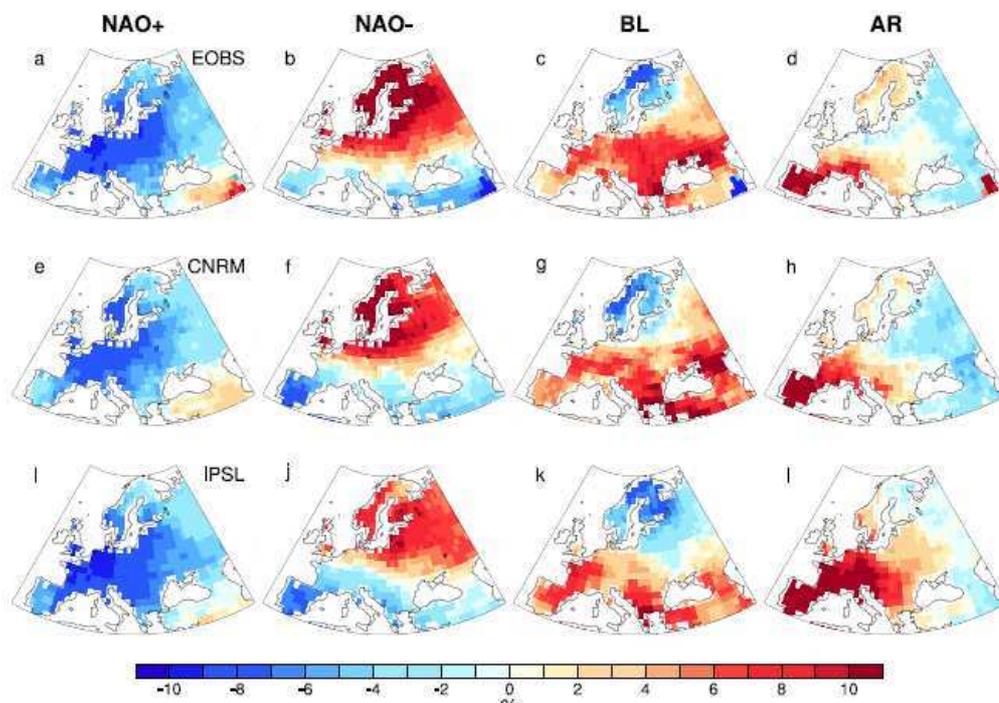


Figure L1.15 : Estimation du nombre de jours où $T_{\min} < Q_{10}$ par régimes de temps : NAO+, NAO-, Blocage (BL) et Atlantic Ridge (AR) ; pour les observations EOBS, le modèle du CNRM et le modèle de l'IPSL (conditions AMIP pour les modèles) ; et pour la période 1979-2008. Les valeurs correspondent aux écarts par rapport à la valeur de 10% (correspondant à la valeur attendue pour le quantile 10) une fois le biais moyen des modèles corrigés. Elles sont données en pourcentage. *Source : Cattiaux et al., 2012.*

Suite à la persistance accrue du régime NAO+ au cours des hivers 1980 et 1990, une hypothèse attribuait la tendance à l'accroissement des températures à un changement de fréquence d'occurrence des régimes de temps. Cependant le retour à des hivers moins marqués par la phase NAO+ n'a pas stoppé le réchauffement sur l'Europe, soulignant que la circulation grande échelle ne peut pas à elle seule expliquer l'amplitude des changements de températures passés et futurs.

Le cas de l'hiver 2009/2010 montre également les limites de l'utilisation des régimes de temps pour prévoir les températures hivernales. Une étude détaillée de l'hiver 2009/2010 réalisée au CNRM et à l'IPSL a montré que si la dynamique atmosphérique de cet hiver est proche de celle observée en 1963 ; il n'en est rien en terme de température (Cattiaux et al., 2011). En effet l'hiver 2009/2010 est marqué par un nombre très important de journées en phase NAO-. En revanche, les anomalies de température observées sur l'Europe n'ont pas été extrêmes par rapport à celles rencontrées au cours des 60 derniers hivers. La **Figure L1.16** issue de l'article de Ouzeau et al., 2011 illustre bien les différences de température observées au cours des hivers 2009/2010 et 1939/1940 alors qu'ils présentent des dynamiques atmosphériques analogues (fréquences comparables des régimes de temps marquées par une prédominance du régime NAO-). En particulier, les zones grisées présentant le nombre de jours où la température est inférieure au 10^{ème} quantile sont beaucoup plus nombreuses au cours de l'hiver 1939/1940.

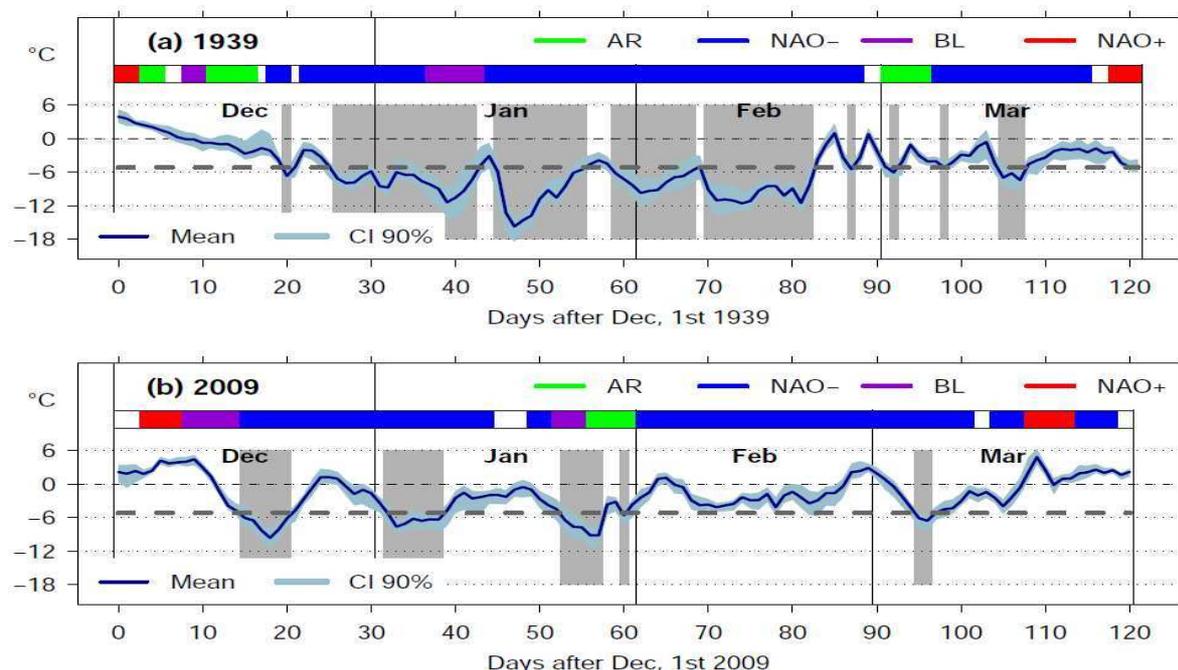


Figure L1.16 : Anomalies de T_{\min} journalières au-dessus de l'Europe pour l'hiver 1939/1940 (a) et l'hiver 2009/2010 (b). L'occurrence des régimes de temps a été calculée à partir des réanalyses 20CR : l'Atlantic Ridge (vert), le régime NAO- (bleu), les situations de blocage (jaune), le régime NAO+ (rouge). Les périodes dont la persistance dans un même régime de temps est inférieur à 3 jours n'ont pas été classé (blanc). Les zones de température grisées correspondent aux jours dont le T_{\min} est inférieur au 10^{ème} percentile de T_{\min} . *Source : Figure 2 de Ouzeau et al., 2011, GRL.*

Enfin, l'hiver 2005/2006 utilisé comme hiver de référence pour la construction de l'indicateur de vulnérabilité pour le secteur du gaz ne présente pas de comportement exceptionnel en terme de fréquence de jours en NAO- (fréquence = 21%) ou en régime de blocage (24%). En revanche, cet hiver est marqué par une fréquence relativement importante du régime de l'Atlantic Ridge (21%) par rapport aux autres années (*Figure L1.17*).

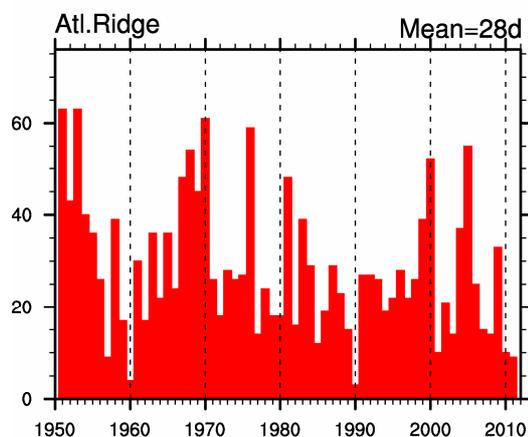


Figure 17 : Nombre de jours hivernaux associé au régime de temps Atlantic Ridge pour la période 1950 2011.

Cattiaux et al., 2012 met aussi l'accent sur la capacité des modèles à discriminer les événements froids en fonction des régimes de temps. En effet la figure 15 montre que les modèles, au-delà de leur biais moyen, capturent à peu près la répartition des jours froids entre les différents régimes de temps. Cependant, on constate que le modèle de l'IPSL tend à surestimer le nombre de jours froids associés au régime Atlantic Ridge et les 2 modèles tendent à sous-estimer ceux associés aux régimes NAO- au-dessus de l'Europe du Nord et ceux associés au régime de blocage au-dessus de l'Europe Centrale. La discrimination des jours froids serait donc moins performante dans les modèles que dans les observations.

Ces résultats montrent clairement que la dynamique atmosphérique ne permet pas à elle seule d'expliquer les variations des températures de surface en hiver. Il semble donc difficile de créer une méthode d'analyse basée uniquement sur les régimes de temps pour améliorer la représentation des vagues de froid et de leurs caractéristiques dans les modèles.

4- Projection future.

Aux moyennes latitudes, la variabilité interannuelle et intra-saisonnière des variables météorologiques locales est principalement contrôlée par les perturbations chaotiques de la dynamique atmosphérique. Ces perturbations résultent des instabilités baroclines qui sont à la base des gradients méridiens de température. En hiver, l'intensification de ces gradients accentue la variabilité intra-journalière des températures de surface. Ainsi, malgré le réchauffement climatique global, les vagues de froid vont perdurer tout au long du 21^{ème} siècle dans les moyennes latitudes [Kodra et al., 2011],] mais les changements climatiques pourraient en modifier les caractéristiques (fréquence, durée intensité). Il est donc d'intérêt pour les industriels du secteur énergétique d'avoir accès à de l'information de qualité sur les caractéristiques des vagues de froid dans le futur.

Nous présentons dans cette section les résultats préliminaires des projections futures issues des deux modèles français. Ces résultats seront étendus dans le cadre du projet ANR/SECIF à partir des données régionales corrigées ENSEMBLES et une étude détaillée des incertitudes.

a- Nombre de jour de $T_{min} < 0^{\circ}C$

La différence du nombre de jours où $T_{min} < 0^{\circ}C$ entre la fin du 21^{ème} siècle (2071-2100) et la fin du 20^{ème} siècle (1971-2000) est présentée sur la **Figure L1.18** pour les modèles de l'IPSL et du CNRM.

Les deux modèles s'accordent pour une réduction de cet indicateur dans le futur de façon généralisée sur l'Europe (à l'exception de l'extrême sud-ouest de l'Espagne dans le modèle du CNRM). Cette diminution est cependant beaucoup plus forte dans le modèle de l'IPSL (environ -30 jours par hiver) que dans le modèle du CNRM (environ -15 jours par hiver). Cette réduction est principalement due au décalage de la distribution des T_{min} vers des valeurs plus élevées dans le futur qui tend à réduire la fréquence des valeurs de T_{min} les plus faibles (**Figure L1.15**).

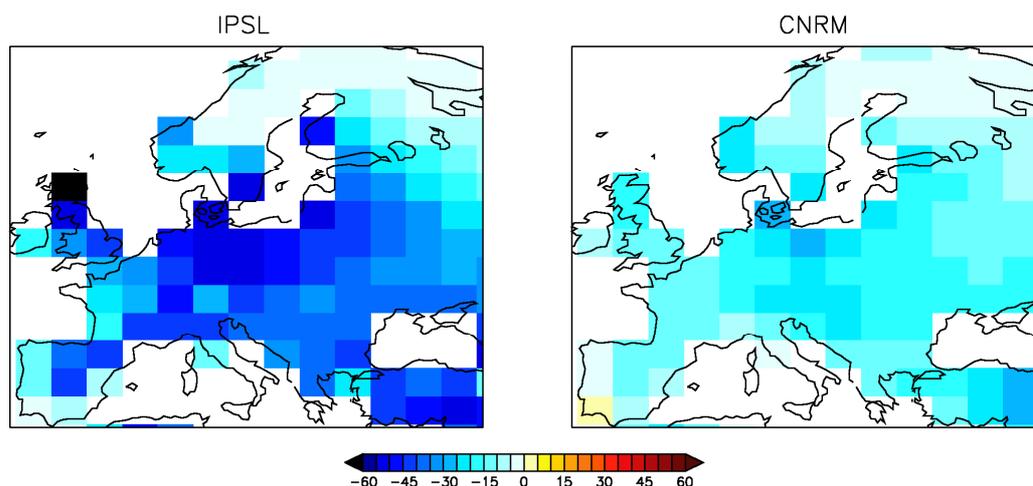


Figure L1.18 : Différence de nombre de jours où $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ entre la période 2071-2100 et la période 1971-2000 pour le modèle de l'IPSL et le modèle du CNRM.

L'effet de la correction quantile/quantile des données simulées par les modèles à partir des observations du Hadley Center a également été testé (**tableau L1.4**). La correction a un effet relativement faible sur l'évolution de l'indicateur entre le futur et le présent (-1.2 jours pour le modèle de l'IPSL et -1.1 jours pour celui du CNRM). La distribution spatiale reste également la même avec ou sans corrections des données simulées par les modèles. Ce faible impact est dû à une compensation de l'effet de la correction sur les données de la période historique et sur celles des données futures. En effet la correction tend à réduire d'une valeur quasi-identique la valeur de l'indicateur au présent et au futur : moins 21 jours pour le modèle de l'IPSL et moins 7 jours pour le modèle du CNRM.

	Données brutes		Données corrigées		Effet correction	
	IPSL	CNRM	IPSL	CNRM	IPSL	CNRM
1971-2000	109.5	96.7	89.1	90.0	-20.4	-6.8
2071-2100	80.4	83.3	58.9	75.4	-21.6	-7.9
delta	-29.1	-13.5	-30.2	-14.6	-1.2	-1.1

Tableau L1.4 : effet de la correction quantile/quantile sur l'estimation du nombre de jours où $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ par les modèles de l'IPSL et du CNRM pour les périodes 1971-2000 et 2071-2100

b- Nombre de jours $\Delta T_{moyen} < 0^{\circ}\text{C}$

L'évolution du nombre de jours où $\Delta T_{moyen} < 0^{\circ}\text{C}$ entre la période 2071-2100 et la période 1971-2000 est présentée sur la **Figure L1.19** pour les modèles de l'IPSL et du CNRM. Comme pour l'indicateur précédent on constate une forte réduction du nombre de jour d'anomalies négatives et cela pour l'ensemble des régions de la zone considérée et pour les deux modèles français. La réduction est plus accentuée pour le modèle de l'IPSL avec une diminution de 46.1 jours (soit 67%) en moyenne par hiver entre les deux périodes contre une diminution de 30,2 jours (soit 42%) pour le modèle du CNRM.

Régionalement, c'est l'Europe du Nord qui connaît la plus forte diminution à l'inverse de ce qui avait été obtenu pour l'indicateur en T_{\min} .

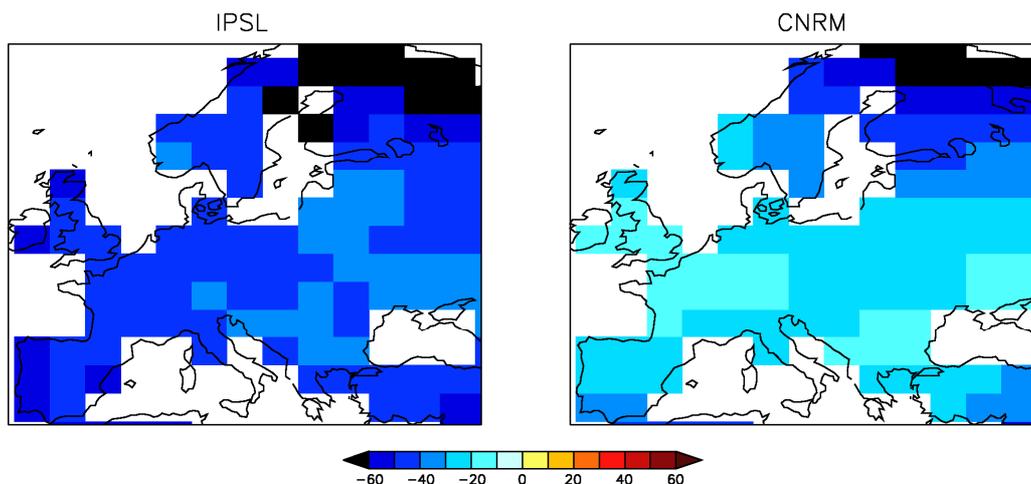


Figure L1.19 : Différence de nombre de jours où $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ entre la période 2071-2100 et la période 1971-2000 pour le modèle de l'IPSL et le modèle du CNRM. Les anomalies ont été calculées par rapport à la climatologie 1971-2000 pour les 2 périodes.

Seuil de persistance

Les deux seuils de persistance à 6 jours et à 15 jours ont été testés dans les projections futures. Les événements très persistants (seuils de 15 jours) disparaissent quasiment à l'horizon 2100 dans les 2 modèles. On compte ainsi à la fin du 21^{ème} siècle plus que 0.3 épisodes par hiver pour le modèle de l'IPSL et 0.1 pour celui du CNRM.

Le nombre d'épisodes comptant au moins 6 jours de persistance diminue aussi de façon importante avec plus que 1.7 épisodes par hiver pour le modèle de l'IPSL et un seul épisode pour le modèle du CNRM. La **Figure L1.20** présente l'évolution du nombre de jours associé à ces épisodes de persistance moyenne dans les 2 modèles. On constate que les régions d'Europe du Nord sont les plus touchées. Par contre à l'inverse des résultats obtenus pour l'indicateur climatique sans critère de persistance, le modèle du CNRM simule une réduction plus importante que celui de l'IPSL (77% contre 54%)

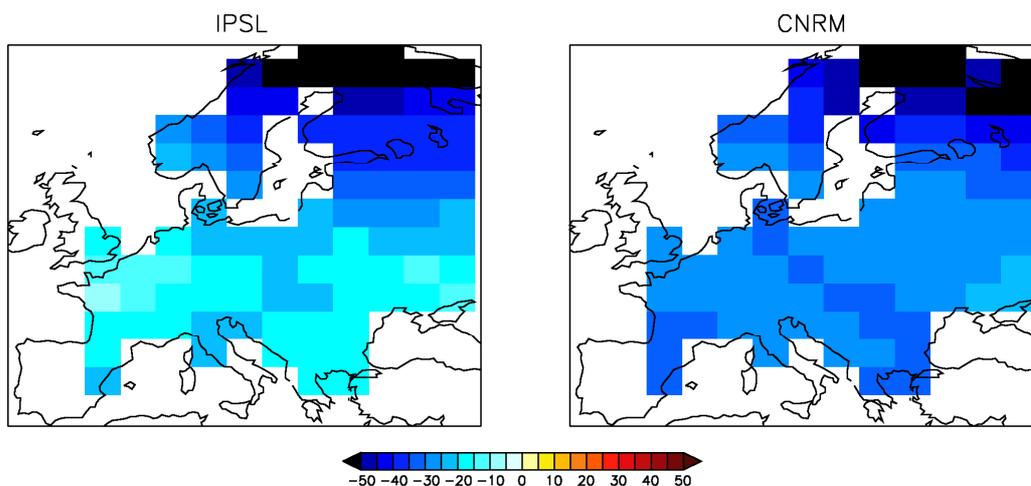


Figure L1.20 : Différence de nombre de jours moyen par hiver associés aux événements de $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ ayant une persistance d'au moins 15 jours pour les hivers de la période 2071-2100 et ceux de la période 1971-2000 pour le modèle de l'IPSL et le modèle du CNRM. Unité =jours/hiver.

4- Conclusion

Le travail réalisé sur la définition d'indicateurs de vulnérabilité dans INVULNERABLE-2 vient renforcer les conclusions dégagées au cours du projet INVULNERABLE-1 ; à savoir la difficulté des acteurs à s'accorder sur un indicateur commun. Pour le secteur énergétique, les spécificités des métiers du gaz et de l'électricité aboutissent sur 2 indicateurs très différents. Ces deux indicateurs sont associés à une vulnérabilité particulière, ils ne sont pas adaptés à un cadre d'étude différent (vulnérabilité, infrastructures, réseaux, régions d'intérêts, etc).

D'autre part, la coopération des communautés scientifiques et industrielles sur cette question de l'élaboration d'indicateurs a mis en évidence que les indicateurs climatiques couramment utilisés dans les études scientifiques pour comprendre un phénomène climatique et la capacité des modèles à le représenter ne correspondent pas aux besoins industriels. La définition d'indicateur de vulnérabilité nécessite des connaissances opérationnelles que seuls les spécialistes métiers peuvent apporter.

Les deux indicateurs industriels ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ pour l'électricité et $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ pour le gaz) ont été analysés dans les données simulées et comparées aux données observées. La répartition spatiale du nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ diffère considérablement de celle du nombre de jours où $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$. D'autre part, la capacité des modèles à représenter ces indicateurs varie également fortement d'un indicateur à l'autre et d'un modèle à l'autre. Ainsi sur la France, les deux modèles français sous-estiment le nombre de jour où $\Delta T_{\text{moyen}} < 0^{\circ}\text{C}$ alors qu'ils surestiment le nombre de jours où $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$. Au vu de ces résultats, il semble important de corriger les données simulées afin de réduire l'effet des biais des modèles. Ces résultats montrent aussi qu'il n'est pas évident de définir un indicateur générique permettant de déterminer la capacité d'un modèle à étudier les vagues de froid.

Le critère de persistance a été testé pour ces 2 indicateurs. Les deux modèles français donnent de bons résultats aussi bien pour les épisodes de moyenne durée (6 jours) que de longue durée (15 jours).

Les résultats de la comparaison modèles/observations obtenus dans cette étude diffèrent des résultats de la littérature. Ces différences sont dues d'une part au choix des indicateurs (indicateurs industriels vs indicateurs purement climatiques) et d'autre part aux versions de modèles utilisés (CMIP3, ENSEMBLES/STREAM2, CMIP5). Les premières analyses des données simulées pour CMIP5 montrent une réduction des biais moyens en température. Il serait donc utile d'évaluer si les nouvelles versions des modèles français permettent d'améliorer l'estimation des indicateurs industriels.

Si les modèles diffèrent dans leur capacité à représenter les indicateurs industriels, ils s'accordent quant à la tendance de ces indicateurs dans le futur. Une réduction du nombre de jours de vague de froid est à prévoir dans les hivers de la fin du 21^{ème} siècle par rapport à ceux du 20^{ème} siècle quelque soit l'indicateur considéré. En revanche le niveau de réduction varie d'un modèle à l'autre. Il serait donc intéressant de confirmer ces résultats avec un échantillon plus important de modèles.

Afin de limiter l'effet des biais des modèles, les données brutes des modèles ont été corrigées à l'aide de la méthode quantile/quantile. Une comparaison des résultats avec et sans correction a été réalisée pour l'indicateur $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$. L'effet de la correction est faible dans ce cas précis du fait de la compensation de l'effet de la correction sur les 2 périodes considérées (présent et futur). D'autre part, toujours pour ce cas, la correction ne permet pas d'améliorer l'incertitude inter-modèle.

Enfin en terme de vulnérabilité, ces résultats ne suffisent pas à affirmer une baisse du risque lié aux vagues de froid pour le secteur énergétique. En effet, l'analyse de l'occurrence des vagues de froid que nous avons réalisé au cours de ce projet doit être complété par une analyse de l'exposition des systèmes de production actuelle et future. Cette analyse dépasse le cadre de notre étude centrée sur l'aléa climatique.

6- Références

Cattiaux, J., R. Vautard, C. Cassou, P. Yiou, V. Masson-Delmotte, and F. Codron ; 2010: Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20704, doi:10.1029/2010GL044613

Cattiaux J., P. Yiou, and R. Vautard; 2011: Dynamics of future seasonal temperature trends and extremes in Europe: a multi-model analysis from CMIP3. *Climate Dynamics*, published online, doi: 10.1007/s00382-011-1211-1.

Cattiaux J., H. Douville, A. Ribes, F. Chauvin, and C. Plante ; 2012 :. Evaluating uncertainties in present and future wintertime cold extremes over Europe: A pilot study with CNRM and IPSL atmospheric models. *Climate Dynamics*, accepted.

Charlton A., et al.; 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part II: Evaluation of numerical model simulations, *J. Clim.*, 20, 470–487.

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planet. Change*, 57, 16-26.

Dufresne J.L. et al., 2011 : Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model with an emphasis on changes between CMIP3 and CMIP5. *Climate Dynamics*, submitted.

Haylock M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, and M. New; 2008: A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950. *Journal of Geophysical Research*, 113:20119. doi: 10.1029/2008JD10201.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.K. Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino, and G.L. Potter, 2002: NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (11),1631-1643. ISSN 1520-0477.

Kodra E. , K. Steinhaeuser, and A.R. Ganguly; 2011:. Persisting cold extremes under 21st-century warming scenarios. *Geophysical Research Letters*, 38, doi: 10.1029/2011GL047103.

Ouzeau G., J. Cattiaux, H. Douville, A. Ribes, and D. Saint-Martin ; 2011 : European cold winter of 2009/10: How unusual in the instrumental record and how reproducible in the Arpege-Climat model? *Geophysical Research Letters*, 38:L11706, doi: 10.1029/2011GL047667

Scaife, A., and J. Knight; 2008, Ensemble simulations of the cold European winter of 2005–2006, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 134, 1647–1659.

Uppala, S.M., Kållberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne,

R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J.; 2005: The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012

Uppala, S., D. Dee, S. Kobayashi, P. Berrisford, and A. Simmons; 2008, Towards a climate data assimilation system: Status update of ERA-Interim, *ECMWF Newsletter*, 115, 12–18.

Vavrus S., J.E. Walsh, W.L. Chapman, and D. Portis; 2006. The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *International Journal of Climatology*, 26(9):1133-1147 ; doi: 10.1002/joc.1301.

Voldoire A., E. Sanchez-Gomez, D. Salas y Melia, B. Decharme, C. Cassou, S. Senesi, S. Valcke, I. Beau, A. Alias, et al. ; 2011: The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-011-1259-y.

WIREs Clim Change 2011. doi: 10.1002/wcc.147

SECTION 2

Lot de travail n°2 : Étude des précipitations extrêmes avec Veolia-Eau Valence

1. DESCRIPTION DE L'ÉTUDE

Cette étude de cas s'appuie sur le questionnement de notre partenaire industriel à propos de l'existence d'un lien entre l'intensité des précipitations et les débordements sur le réseau d'eau. Dans la première phase du projet, l'analyse des données de la station d'épuration et les ré-analyses SAFRAN (Le Moigne, 2002), avaient permis de mettre en évidence le lien très fort entre le volume de débordement et le cumul journalier de précipitations. Ce premier volet du projet INVULNERABLE n'a pas permis de définir un indicateur simple pour traiter cette vulnérabilité. En effet le lien entre les précipitations et les débordements sur le réseau d'eau est fortement non linéaire. Ici, nous proposons de réaliser une étude amont permettant d'acquérir une connaissance plus fine et actualisée des régimes de précipitations sur la région, d'évaluer leur représentation dans les modèles et identifier comment utiliser les résultats de simulation pour répondre à la question initiale. L'étude d'impact est hors champ de ce projet, mais nous identifierons les outils et le partenariat nécessaire à sa mise en place.

2. PERSONNES IMPLIQUÉES

Les personnes ayant contribué à cette étude sont listées ci-dessous. Elles sont issues principalement des laboratoires de recherche. Les industriels ont eu principalement un rôle de suivi des travaux.

IPSL : Y. Sané; P. Braconnot (IPSL / LSCE)

CNRM-GAME : C. Déandreis, S. Planton

CERFACS : C. pagé

Veolia-Eau : J. Malandain, N. Drut

3. DÉROULEMENT DU TRAVAIL

Le programme de ce travail est articulé autour de 6 tâches décrites dans l'annexe technique:

- synthèse des projets existants sur la méditerranéen: objectifs, méthodologie, données et modèles utilisés
- synthèse sur la caractérisation des précipitations historiques des stations de Météo France
- synthèse sur les précipitations futures avec le bilan existant des projets
- caractérisation des événements pluvieux dans la région de Valence et le lien avec les débordements
- identification des critères ou indicateurs appropriés avec les partenaires: lien avec le modèle hydrologique de Véolia, méthode de descente d'échelle, méthode de correction et analyse des pluies.
- analyse indicateur

a) Réalisation

Le **tableau 2** fait état de ce qui a été réalisé dans le projet.

Taches	Réalisées	Perspectives
Tache n°1: État de l'art des études similaires effectuées dans d'autres projets	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Évolution des précipitations et les régimes précipitants dans la région Valence ◆ Différents types de méthodologie pour traiter les événements extrêmes et les précipitations horaires ◆ Capacité des modèles à représenter les différents régimes précipitant 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ État des connaissances sur l'évolution et la caractérisation de ces événements sur le 20 ème siècle
Tache n°2: Analyse des précipitations intenses dans les données historiques et dans les simulations de modèles	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Validation des scenarios SCRATCH10 sur la période actuelle et futur autour de Romans 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Calcul indicateurs STARDEX ◆ Analyse évolution des indicateurs dans SCRATCH10
Tache n°3: Étude des liens entre événements intenses ou peu intenses et les débordements de la station	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Caractérisation des événements pluvieux ◆ Lien avec les débordements 	

Tache n°4: Application des outils issus d'autres projets	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Synthèse des méthodes de descente d'échelle ◆ CDF-t ajustement des données ◆ Méthode SHYPRE du CEMAGREF pour la génération stochastique des pluies 	
Tache n°5: Définition d'indicateurs en interaction avec les partenaires		◆ lien avec modèle hydrologique de Véolia
Tache n°6: Analyse de ces indicateurs période actuelle / futur (SCRATCH10)	◆ Analyse des indicateurs période actuelle / futur (SCRATCH10)	

Tableau 2: Tâches réalisées dans le lot 2

b) Difficultés rencontrées

Une première des difficultés rencontrées au cours du projet est associée au choix de la méthode de downscaling à appliquer. En effet, l'analyse de précipitations horaires est peu courante dans les études de climat et n'a été que très rarement appliquée. Les méthodes existantes sont imparfaites voire non adaptées à cet objectif. Il a donc été nécessaire de rencontrer un nombre important de chercheurs et tenter de faire un point sur les avantages et les inconvénients des méthodes proposées dans les différents laboratoires français (CEMAGREF, CERFACS, LSCE, IPSL, ...).

La deuxième principale difficulté consiste dans le retard de plus de 6 mois des simulations CMIP5 qui nous a obligé à démarrer avec le jeu de données régionalisées produit au Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (SCRATCH10) qui est basé sur des simulations CMIP3 (Meehl et al., 2009) et sur une méthode de désagrégation par type de temp (Boé, 2007; Boé et Terray, 2008a,b, Boé et al., 2006).

c) Séminaires et réunions

La participation à différents séminaires et les collaborations avec différentes personnes ont sous-tendu le travail. Il s'agit en particulier de :

- Participation au séminaire de restitution et d'avancement des projets ANR sur les « changements Environnementaux » du 22 au 24 Mars 2011 à Montpellier. Cette participation a permis de rencontrer des personnes qui ont travaillé dans différents projets au niveau de la méditerranée. Par exemple, la discussion approfondie avec Benoit Hingray (LTHE) présentant le projet RIWER 2030 (VMCS 2008) nous a

permis d'évoquer leur méthode de descente d'échelle pour l'étude du climat régional et les incertitudes. Cela a permis d'avoir une idée des méthodologies utilisées et des résultats déjà acquis dans ces différents projets.

- École d'été à Valsavarenche, Vallée d'Aosta (Italie) du 20-29 Juin, 2011, intitulée "Regional Climate Dynamics in the Mediterranean and beyond: An Earth System perspective". L'objectif de cette école d'été était la formation aux techniques de descente d'échelle dynamique.
- Atelier de travail sur les précipitations à Valence le 17 juin 2011 à la station de Romans. L'objectif de cette réunion était de rencontrer l'ensemble des partenaires impliqués dans l'étude des précipitations extrêmes avec Véolia Valence pour leur présenter les études en cours et faire un point sur la méthodologie sur les jeux de données et les méthodes d'analyse.
- Visite et collaboration avec le CEMAGREF. Une réunion présentant le générateur stochastique de pluies horaires SHYPRE s'est tenue le 28 septembre 2011 au CEMAGREF à Aix-en-Provence. L'objectif de cette réunion était de voir la possibilité d'appliquer le générateur de pluies horaires à notre cas d'étude (données sur des grilles de 8km à 25km); adaptation de la structure du modèle, différence de sensibilité du climat présent et futur, de la pluie horaire et journalière; la difficulté de la prise en main et d'utilisation du modèle SHYPRE ainsi que le temps et la puissance de calcul nécessaire à la génération des chroniques horaires.

4. LIVRABLES

Il était initialement prévu de fournir 2 livrables distincts :

L2.1 : dossier comprenant les fiches de synthèses à destination des industriels incluant :

L2.2 : bilan des besoins identifiés au cours de la discussion avec les industriels et des besoins de collaboration – Zoom sur les indicateurs de vulnérabilité.

Le livrable L2.1 comprend un ensemble de 4 fiches de synthèses :

- fiche bibliographique sur les régimes précipitants en région Drôme/Ardèche.
- Caractérisation des précipitations autour de la station de Romans-sur-Isère et du lien précipitation/débordements à partir de données horaires de précipitations
- Analyse des précipitations intenses dans les données historiques et dans les simulations de modèles
- Forces et faiblesses des différentes méthodes de downscaling (regionales et temporelles) permettant de relier les résultats des modèles globaux à la donnée horaire sur la région Valence

Un résumé de ces différentes fiches est fourni dans les sections 3.1 à 3.4. Les fiches sont annexées en fin de cette section.

L'identification d'indicateurs de vulnérabilité spécifiques pour cette étude de cas n'a, en revanche, pas abouti. En effet, le lien entre précipitation et débordements en station est complexe et ne peut être pleinement décrit par un indicateur climatique. Il est donc nécessaire de passer par un modèle hydrologique permettant de décrire pleinement la transformation des précipitations dans le bassin versant de Romans-sur-Isère. Ce modèle de réseau d'eaux est en cours de développement dans le projet SECIF. Une collaboration entre Veolia-Valence et l'INSA de Lyon a été mise en place pour la mise au point du modèle. Le modèle est basé sur le logiciel CANOE (Sogreah, Insavalor, 2005) et nécessite en entrée des chroniques de précipitations horaires ou des profils Intensité-Durée-Fréquence.

a) Bibliographie des projets existants en région méditerranéenne

La fiche « Précipitations intenses en région Méditerranéenne : origines et caractéristiques » présente la synthèse des principaux résultats issus des projets CYPRIM (CYclogenèses et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne), MedUP (Mediterranean intense events: Uncertainties and Propagation on environment), HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment) et PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeAN Climate change risks and Effets) qui ont pour objet l'étude des précipitations intenses en région méditerranéenne. Le **tableau 3** récapitule les objectifs et les principaux résultats de ces différents projets.

Projets	Objectifs	Réalisations
PRUDENCE (2001-2004) http://prudence.dmi.dk/	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Fournir un jeu de projections climatiques régionalisées complet ◆ Quantifier les incertitudes dans ces projections climatiques – zoom sur les impacts ◆ Interprétation des résultats par rapport aux politiques européennes d'adaptation ou d'atténuation. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Réalisation d'un jeu de scénarios de changement climatique haute résolution pour 2071-2100 sur l'Europe ◆ Évaluation quantitative du risque résultant du changement régional de temps ◆ Examen des incertitudes sur les impacts potentiels du changement climatique dans les scénarios
CYPRIM (2005-2007) http://www.cnrm.meteo.fr/cyprim/	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Identifier les précurseurs des cyclogenèses et des précipitations intenses ◆ Caractériser l'évolution des phénomènes de pluies intenses ◆ Rassembler des résultats touchant à la prévisibilité des événements précipitant intenses 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Analyses des éléments météorologiques précurseurs de cyclogenèse à différentes échelles en vue de concevoir un système d'observation ◆ Evolution de la fréquence et des caractéristiques de certains de ces événements sous l'hypothèse du scénario A2 du

		GIEC
MedUP (2008-2011) http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article167	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Identification, quantification des sources d'incertitudes inhérentes à la prévision et aux projections climatiques des événements météorologiques intenses produites par les systèmes de modélisation actuels ou en développement. ◆ Étudier la propagation de ces incertitudes dans les modèles d'impact hydrologiques et la chaîne d'alerte. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Ensemble de simulations à fine échelle ◆ Scénarios avec ALADIN-climat et LMDZ-MED ◆ Bilan hydrique et d'énergétique forcés par scénarios climatiques
HyMeX (2009-2012) http://www.cnrm.meteo.fr/cyprim/global/index.html	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Variabilité des composantes du cycle de l'eau ◆ Ingrédients et mécanismes nécessaires ◆ Évolution des événements intenses ◆ Vulnérabilité des régions et leurs capacités à s'adapter 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Améliorer la modélisation et la compréhension du cycle de l'eau en Méditerranéen avec un intérêt particulier porté sur la prévisibilité et l'évolution des événements intenses associés au cycle de l'eau.

Tableau 3: Objectifs et principaux résultats des différents projets en région Méditerranéenne

b) Synthèse sur les méthodes de descente d'échelle

La fiche « Techniques de descente d'échelle climatique en région Méditerranéenne » propose un résumé des différentes méthodes de descente d'échelle existant et pouvant être utilisé pour l'étude de cas traité dans ce lot de travail. Une partie de cette fiche est dédiée au choix que nous avons effectué et présente la chaîne de downscaling qui a été sélectionnée pour désagrégée les données de précipitations sur Romans-sur Isère.

En effet les simulations réalisées à partir des modèles climatiques globaux fournissent des données à des résolutions spatiale et temporelle insuffisantes pour répondre à la question industrielle au cœur de ce lot de travail (bassin versant de Romans-sur-Isère). Ces modèles ont une représentation de l'orographie et des caractéristiques de surface de la terre très simplifiée en comparaison à la réalité Ils ne permettent pas de représenter correctement leur influence sur le climat régional.

La régionalisation consiste à raffiner spatialement les données climatiques en essayant de prendre en compte les hétérogénéités spatiales non ou mal résolues par les modèles climatiques globaux. De nombreuses méthodes de régionalisation existent (Wilby et Wigley, 1997). On distingue deux grandes familles de techniques de désagrégation, statistique et

dynamique. L'approche dynamique repose sur l'utilisation de modèles climatiques régionaux à résolution spatiale plus fine que celle des modèles climatiques globaux. Ces modèles régionaux ont une représentation plus réaliste des hétérogénéités spatiales: en particulier, le relief y est mieux représenté que dans les modèles globaux. Les données régionalisées dynamiquement conservent les biais des modèles régionaux et globaux. Elles doivent être corrigées avant leur utilisation pour les études d'impact. Les approches statistiques incluent des méthodes basées sur les fonctions de transfert; des générateurs de temps; des méthodes d'analogues; des méthodes basées sur les régimes de temps. Il faut également souligner que les méthodes statistiques ont toutes une fonction de correction des projections climatiques.

Le **tableau 4** présente les avantages et inconvénients des différentes méthodes de descente d'échelle. Cette synthèse est basée sur l'annexe 1 du projet ACCLIMATE.

Méthodes	Modèles	Avantages	Inconvénients
Dynamique	Modèles climatiques régionaux (RCM)	<ul style="list-style-type: none"> - Haute résolution - Scénarios réalistes - Bonne représentation météorologique de la région considérée - Description des mécanismes climatiques à l'échelle régionale 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût de calcul élevé - Erreurs systématiques du champ de grande échelle - Manque d'interaction « two-way » entre le modèle régional et global
Statistique	Types de temps	<ul style="list-style-type: none"> - Approche basée sur la connaissance de la situation dynamique affectant la météorologie et le climat - Adapter à de nombreuses variables - Traitements multivariés et spatiaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Lourd travail de classification - Trouver un ou plusieurs prédicteurs de grande échelle discriminants - Certains schémas basés sur les types de temps peuvent être insensibles au forçage climatique futur
	Modèle de régression	<ul style="list-style-type: none"> - Relativement simple à utiliser - Grande variété de prédicteurs disponibles - Disponibilité des logiciels - Permet de reconstruire facilement des séries 	<ul style="list-style-type: none"> - Sous-estime la variance temporelle - Actuellement mal adapté aux problèmes multivariés - Mauvaise reconstitution des phénomènes extrêmes
	Générateur de séries	<ul style="list-style-type: none"> - Produire de larges ensembles de simulations - Quantification des incertitudes - Interpolation spatiale des paramètres du modèle - Information à l'échelle sub-quotidienne 	<ul style="list-style-type: none"> - Modification des paramètres en climat futur - Risque d'interaction inattendue entre variables - Ajustement arbitraire des paramètres du générateur pour le climat futur
Statistico-	dynamique/	- Implémentation opérationnelle	- Limitation et biais du GCM

dynamique	statistique	assez facile - Élimination des biais - Correction de la sous-estimation de la dispersion des états futurs prévus par les GCM ou RCM. - Combiner les sorties de plusieurs GCM ou RCM	- Score artificiels possibles et problème de robustesse - Impacts de CGE (Conditions de Grandes Échelles) complexes - Échantillonnage de l'incertitude - Prédicteurs potentiels basés sur la physique
-----------	-------------	--	--

Tableau 4 : Synthèse des techniques de descente d'échelle

c) Analyse des stations

L'objectif de cette analyse est de caractériser les événements pluvieux (durée, intensité, maximum) dans la région Valence et de ressortir les informations pertinentes sur les relations entre les événements pluvieux et les débordements en station d'épuration.

Dans la fiche « Caractérisation des événements pluvieux en région Méditerranéenne », les 18 séries de précipitations horaires fournies par Météo-France ont été analysées. Une classification de ces stations a été réalisée suivant leur nombre, l'intensité et la durée des événements pluvieux à partir des méthodes du Kmeans et de classification hiérarchique. Les caractérisation des événements pluvieux a été réalisée suivant la méthode du CEMAGREF (Arnaud et al., 2007) et par une méthode classique de détermination d'événements pluvieux (Sane et al., 2011).

Cette étude souligne l'hétérogénéité spatiale des stations et la synchronisation des événements pluvieux. D'autre part, l'étude du lien entre les événements pluvieux et les débordements en station montre que les débordements sont plus fortement corrélés à l'intensité totale de l'événement pluvieux qu'au maximum des intensités horaires enregistré durant la journée.

d) Analyse des données simulées

La fiche « Analyse des précipitations intenses dans les données historiques et dans les simulations de modèles : les scénarii SCRATCH10 » contient l'analyse des précipitations du jeu de données régionalisées SCRATCH10. Les résultats montrent que les modèles sous estiment l'intensité des pluies. En revanche la durée des pluies simulées est du même ordre que celle enregistrée en stations. Il ressort de cette étude préliminaire le besoin de faire des corrections sur les maximums de précipitations pour pouvoir exploiter les projections climatiques.

e) Références

Arnaud, P., J. Fine, and J. Lavabre, 2007 : An hourly rainfall generation model adapted to all types of climate. *Accepted in Atmospheric Research*

Boé, J., 2007: « Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France ». Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 256 pp.

Boé, j. et L. Terray, 2008a : « A Weather-Type Approach to Analyzing Winter Precipitation in France : Twentieth-Century Trends and the Role of Anthropogenic Forcing ». *J. Climate*, 21 (13), 3118.

--, 2008b : « Régimes de temps et désagrégation d'échelle ». *La Houille Blanche*, 2, doi : 10.1051/lhb :2008016L05702.

Boé, J., L. Terray, F. Habets, et E. Martin, 2006 : « A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling ». *J. Geophys. Res.*, 111, D21106.

Le Moigne, P., 2002: "Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN". Note de centre CNRM-GAME 77.

Meehl, G.A., A. Hu, and B.D. Santer, 2009: The mid-1970s climate shift in the Pacific and the relative roles of forced versus inherent decadal variability. *J. Clim.*, 22, 780–792, doi: [10.1175/2008JCLI2552.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2552.1).

Pagé, C., 2008 : Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS. Technical Report TR/CMGC/08/27, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS).

Sane, Y., Bonazzola, M., Rio, C., Chambon, P., Fiolleau, T., Musat, I., Hourdin, H., Roca, R., Grandpeix, J-Y., and Diedhiou, A., 2011 : An analysis of the diurnal cycle of precipitation over Dakar using local rain gauge data and a general circulation model. *Accepted in Q. J. R. Met. Soc.*

Sogreah, Insavalor, 2005. Manuel d'utilisation de CANOE, Tech. Report

Wilby, R. L. and T. M. L. Wigley, 2007 : « Downscaling general circulation model output: A review of Methods and Limitations. *Physical Geography*, 21, 530-548.

FICHE DE SYNTHÈSE N°1

Précipitations intenses en région Méditerranée : origines et caractéristiques

Auteurs :
Y. Sané (IPSL);
P. Braconnot (IPSL / LSCE) ; S. Planton (CRM-GAME)

Cette fiche a pour objectif d'identifier les origines et les caractéristiques des précipitations intenses en région méditerranéenne. Nous ferons une synthèse des principaux résultats issus des projets sur les précipitations intenses en région méditerranéenne. Cette fiche a été rédigée dans le cadre du projet INVULNERABLE, et s'inscrit plus particulièrement dans l'étude sur les précipitations pour Veolia Eau - Agence Drôme Ardèche.

1.1– Projet PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effets)

(Pour plus de détails sur le projet PRUDENCE, se référer au site <http://prudence.dmi.dk/>)

Le projet PRUDENCE s'est déroulé sur la période 2001 - 2004 avec comme coordonnateur [Jens Christensen Hesselbjerg du DMI \(Institut Météorologique Danois\)](#). Ce projet était une étude européenne avec les objectifs :

- ◆ de traiter et de réduire les carences dans les projections du changement climatique futur.
- ◆ de quantifier notre confiance et les incertitudes dans les prédictions du climat futur et ses impacts.
- ◆ d'interpréter ces résultats en relation avec les politiques européennes d'adaptation ou d'atténuation du changement climatique.

L'objectif principal du projet PRUDENCE est de fournir des scénarios à haute résolution du changement climatique pour l'Europe à la fin du 21^e siècle utilisant des méthodes de descente d'échelle dynamiques avec des modèles climatiques.

Les objectifs spécifiques de PRUDENCE sont :

- ◆ Fournir une série de scénarios de changement climatique haute résolution pour 2071-2100 pour l'Europe;
- ◆ En termes pratiques, caractériser le niveau de confiance de ces scénarios climatiques;
- ◆ Évaluer l'incertitude dans des scénarios climatiques régionaux européens résultant de la formulation du modèle;
- ◆ Évaluer quantitativement les risques d'augmentation des changements du temps régional et du climat sur toute l'Europe et évaluez des changements futurs d'événements extrêmes comme l'inondation, en fournissant une évaluation robuste de la probabilité et de l'ampleur des changements;
- ◆ Démontrer la valeur des scénarios de changement climatique étendus en les appliquant aux modèles d'impacts climatiques se concentrant sur des effets des stratégies de réduction et d'adaptation;
- ◆ Évaluation socio-économique et politique des décisions liées pour lesquelles de tels scénarios améliorés pourraient être avantageux;
- ◆ Disséminer largement les résultats de PRUDENCE et fournir un résumé de projet visé aux décideurs et des parties non techniques intéressées.

Les résultats indiquent que le changement climatique affectera la fréquence et l'ampleur d'événements extrêmes par un cycle hydrologique intensifié. Des limitations majeures aux

études à base de modèle de ces phénomènes dans le passé ont été le manque de résolution spatiale appropriée d'événements à fine échelle, le manque de longues simulations (qui réduit la signification statistique des projections) et le manque de coordination entre les différents groupes de modélisation (qui a mené aux différences non résolues entre des études différentes). Ces trois questions ont toutes été mieux traitées dans le projet PRUDENCE.

Le projet PRUDENCE a contribué directement à l'action 2 du « Global Change, climate and biodiversity » spécifiquement au premier objectif intitulé « pour comprendre, détecter, évaluer et prévoir le changement climatique global ». Il est le premier projet à fournir un grand nombre de scénarios climatiques haute résolution pour l'Europe, systématiquement évalués pour déterminer le niveau de fiabilité et ensuite appliqués dans une série d'exemple de modèles d'impact climatique. Un autre résultat du projet montre qu'un climat changeant peut avoir des conséquences pour la qualité de la vie, de la santé, la sécurité, l'emploi et l'environnement. Ce projet a fourni de nouveaux outils permettant aux décideurs européens de quantifier le risque provoqué par le changement climatique. En outre, des résultats à base de modèle produits dans le projet PRUDENCE ont déjà fourni des informations scientifiques pertinentes pour quelques événements météorologiques extrêmes récemment expérimentés en Europe (par exemple, Beniston et al, 2007; Christensen and Christensen, 2003; Schär et al., 2004).

1.2 – Le projet ENSEMBLES

(Pour plus de détails sur le projet ENSEMBLES, se référer au site <http://www.ensembles-eu.org/>)

Le projet ENSEMBLES a été financé par la Commission Européenne de 2004 à 2009. Ce projet a été mené par le UK Met Office et comprenait un consortium de 66 instituts de 20 pays, surtout de l'Europe, bien que des associés à travers le monde soient aussi impliqués. De plus, 30 autres organisations, surtout de l'Europe, ont rejoint le projet comme des filiales.

Le but global du projet ENSEMBLES était de maintenir et d'étendre la prééminence européenne dans la fourniture de politique d'informations pertinentes sur le changement climatique et ses interactions avec la société. Le projet visait à :

- ◆ Développer un système de prédiction d'ensemble pour le changement climatique basé sur l'état de l'art, la haute résolution, des modèles globaux et régionaux développés en Europe.
- ◆ Produire pour la première fois, une évaluation probabiliste objective d'incertitude dans le climat futur.
- ◆ Quantifier et réduire l'incertitude dans la représentation des retours d'information physiques, chimiques, biologiques et concernant l'homme dans le Système de La terre (incluant la ressource en eau, l'utilisation de la terre et des questions de qualité de l'air).
- ◆ Maximiser l'exploitation des résultats en liant les productions du système de prédiction d'ensemble à une gamme d'applications, y compris l'agriculture, la santé, la sécurité alimentaire, l'énergie, des ressources en eau, l'assurance et la gestion des risques météorologiques.

Le bassin Méditerranéen constitue une région clef sur le plan climatique parce qu'il se situe au cœur de la zone de transition très marquée qui sépare les régions subtropicales semi-arides et les régions douces et humides de moyenne latitude. En tant que zone de transition, le bassin méditerranéen est sensible et vulnérable aux variations climatiques, naturelles ou anthropiques. Les scénarios d'évolution du climat dans cette région mettent en évidence un risque accru de sécheresses associé au climat global.

Les objectifs scientifiques à partir des différentes contributions sont donc de:

- ◆ comprendre les processus physiques et dynamiques contrôlant le cycle couplé océan/atmosphère/hydrologie/écosystèmes à l'échelle du bassin méditerranéen,
- ◆ comprendre les impacts de ce système couplé sur l'environnement, les activités humaines et l'économie,
- ◆ développer des scénarios et indices sur le changement climatique et les fournir à la communauté utilisatrice d'informations climatiques.

Ces objectifs impliquent une approche multi-échelles spatiales et temporelles des mécanismes en jeu dans la région et à leur possible évolutions dans des scénarios de changement climatique. Cette thématique des incertitudes et de leur prise en compte a commencé à être traité dans le projet européen **PRUDENCE** (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effets) de 2001 à 2004 et a continué dans **ENSEMBLES** (2004-2009).

Les résultats du projet **ENSEMBLES** montrent comment les impacts résultant de ces changements climatiques, y compris des changements du climat moyen, la variabilité et des extrêmes, affectent tous les systèmes et des secteurs étudiés. Des impacts défavorables augmentent en ampleur, excédant souvent le seuil critique. Les exemples incluent des impacts sur la santé, des ressources en eau, l'agriculture, l'approvisionnement en énergie. Beaucoup de ces nouveaux résultats renforcent les conclusions des études précédentes de projections de changement climatique et des impacts. Ce qui est nouveau des résultats du projet **ENSEMBLES** est qu'ils décrivent dans le détail comment on s'attend à ce que le climat change sous les scénarios standard d'émissions futures. Ils incluent aussi, pour la première fois, des projections climatiques multi-modèles pour un scénario de réduction de gaz à effet de serre menant aux émissions et la stabilisation de température conformément aux politiques européennes mais à grande échelle seulement. En effet, ce scénario n'a pas été régionalisé à l'échelle de l'Europe. Les résultats ont été utilisés comme une base pour un jeu de nouveaux outils et des ensembles de données pour informer des utilisateurs potentiels du climat présent et futur et ont été liés avec de nouvelles techniques pour évaluer le changement d'impacts du climat en Europe en termes de risque.

1.3 - Projet CYPRIM (Cyclogenèse et PRécipitations Intenses en région Méditerranéenne)

(Pour plus de détails sur le projet CYPRIM, se référer au site <http://www.cnrm.meteo.fr/cyprim/>)

Une approche pluri-disciplinaire a été mise en œuvre dans ce projet CYPRIM en vue de caractériser les systèmes météorologiques à l'origine de vents violents ou de précipitations intenses à partir de sources de données diverses (radars, sondages et imagerie satellite, ré-analyses, modèles couplés océan-atmosphère pour le climat, modèles couplés à maille très fine atmosphère - océan superficiel - hydrologie).

Le projet CYPRIM (2005-2007) était soutenu par le programme d'actions concertées incitatives du Fonds national de la science « Aléas et changements globaux » du ministère de l'Enseignement et de la Recherche. Il comportait trois volets;

- Identifier les précurseurs des cyclogénèses et des précipitations intenses en région méditerranéenne
- Caractériser, dans le contexte du changement climatique, l'évolution des phénomènes de pluie intense en région méditerranéenne
- Rassembler des résultats touchant la question de la prévisibilité des événements précipitant intenses de la méditerranée, mais aussi celle, plus générale, du temps dans cette région.

Il avait comme objectifs de;

- Concevoir un dispositif d'observation en partie flexible susceptible d'améliorer la qualité d'un système de prévision de ce type d'évènement, ou d'être mis en œuvre dans un cadre expérimental futur autour des réseaux opérationnels ou d'observatoires pour la recherche à l'horizon 2010 en Méditerranée
- Documenter l'évolution des fréquences d'occurrences d'une partie de ces phénomènes ou de leur environnement caractéristique
- Tenter d'obtenir une première idée des conséquences pluviométriques et hydrologiques d'échelle très fine d'un évènement paroxysmique fictif survenant dans l'atmosphère et la mer plus chaudes des automnes de la fin de ce 21ème siècle anticipé par les simulations de climat avec scénario d'émission de gaz à effet de serre A2 du GIEC.

1.3.2 – Résultats du projet CYPRIM

1.3.2.1 - Le climat méditerranéen

Le climat méditerranéen est un type de climat tempéré, qui se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les régions du pourtour méditerranéen sont régulièrement soumises à des épisodes de vents violents et de pluies intenses. Associés à une topographie accidentée, ils peuvent engendrer des crues éclair dévastatrices (Ricard, 2005). Cette zone méditerranéenne a la particularité d'apparaître comme l'un des principaux "points chauds" régionaux du changement climatique (Giorgi, 2006) car les modèles climatiques globaux et régionaux (IPCC, 2007) s'accordent à montrer un réchauffement plus important que dans beaucoup d'autres régions. Durant l'été et en moyenne annuelle, ce réchauffement s'accompagne d'un assèchement, ainsi que d'une augmentation de la variabilité inter-annuelle. De plus, certaines études montrent que les précipitations intenses pourraient augmenter dans la région malgré la diminution des précipitations en moyenne (Boberg et al., 2008).

Le projet CYPRIM (Ducrocq et al., 2008) avait pour ambition de caractériser à différentes échelles ces événements intenses ainsi que leurs signes précurseurs. Il était dédié à l'étude des cyclogénèses et précipitations intenses sur la région méditerranée et a mis en place de nombreux outils pouvant servir à l'étude de ces précipitations. En particulier une

caractérisation des événements intenses (cumul de plus de 500 mm/jour; analyses des événements très extrêmes) ayant eu lieu sur la période 1967-2006 a été réalisée; les types de temps (à l'échelle synoptique) associés à ces événements de précipitations intenses ont été déterminés et enfin un modèle à très haute résolution a été couplé à un modèle régional pour réaliser des scénarios climatiques.

Une des originalités de l'étude présentée dans le projet CYPRIM est l'analyse des structures cohérentes d'altitudes liées à l'occurrence des pluies intenses. Des méthodes nouvelles ont été développées pour les identifier, les caractériser et tirer parti de leur observation pour améliorer la prévision.

En effet, les modèles de climat, bien qu'ayant beaucoup progressé au cours des dernières années, tant en résolution qu'en représentation des processus, ont encore beaucoup de difficultés à rendre compte avec un niveau de réalisme et de confiance suffisant des événements convectifs intenses. Pour palier cette déficience, des méthodes de descente d'échelle des simulations climatiques sont développées. Dans le cadre du projet CYPRIM, une méthode originale de descente d'échelle statistico-dynamique a été élaborée. Elle tire profit des connaissances acquises et des outils de modélisation à haute résolution. D'autres méthodes statistiques de descente d'échelle ont aussi été appliquées à des sorties de modèles de climat et ont traité jusqu'à l'impact hydrologique, fournissant ainsi un autre moyen de critique et de comparaison.

Cette étude cherche à poser les bases méthodologiques permettant d'étudier l'évolution possible des événements de pluie intense dans leur fréquence, leur saisonnalité, leur intensité, leur positionnement géographique, leur durée et leur impact hydrologique. Et pour cela, une méthodologie innovante fondée sur l'association de méthodes de descente d'échelle dynamique et statistique a été mise en place et testée (*Figure F1.1*).

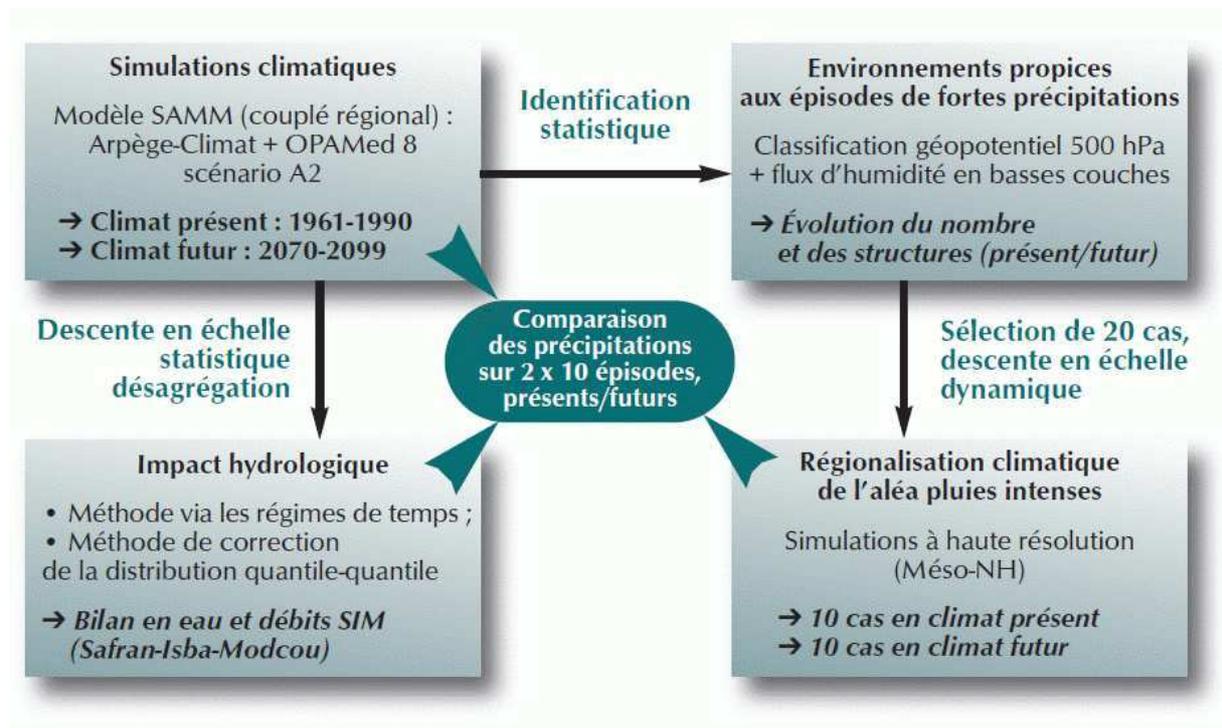


Figure F1.1 – Schéma présentant les différents modules de la méthode proposée dans CYPRIM (Ricard et al, 2009)

1.3.2.2 - Impact du changement climatique sur les événements intenses en Méditerranée

Pour caractériser l'évolution des phénomènes de pluie intense en région méditerranéenne, dans le contexte du changement climatique, une simulation climatique de 1960 à 2099 a été réalisée à l'aide d'un modèle régional couplé océan-atmosphère sous le scénario d'émissions A2 du GIEC. En termes d'impact moyen du changement climatique, on examine l'évolution des paramètres moyens sur la saison automnale entre deux périodes de 30 ans que l'on désigne par la suite par climat présent (1961 – 1990) et climat futur (2070 – 2099). Ainsi pour analyser l'impact du changement climatique sur les extrêmes de pluie en automne au sud-est de la France, les champs de précipitations issus de l'analyse Safran et de la simulation CYPRIM sont comparés à la même échelle spatiale, en moyennant les précipitations de Safran sur des pavés de 50 km. Les résultats sont les suivants:

- Par rapport à l'analyse Safran, la simulation climatique CYPRIM simule correctement la valeur moyenne des précipitations sur la zone d'étude, mais sous-estime fortement les extrêmes (quantile 99 et au-delà). Le modèle climatique régional ayant des difficultés à représenter les événements précipitant intenses en Méditerranée, le choix de l'application de la méthode de descente d'échelle statistico-dynamique est pleinement justifié.
- Les précipitations sur la zone diminuent en moyenne à la fin du XXI^e siècle.
- Les précipitations extrêmes augmentent légèrement à la fin du XXI^e siècle confirmant ainsi les résultats obtenus dans le projet PRUDENCE (Boberg et al., 2008).

Ces résultats ne rendent pas compte de la structure spatiale des différences entre simulations couplée/non couplée et entre climat futur/présent. La comparaison du quantile 99% pour l'analyse Safran et pour la simulation CYPRIM en climat présent a montré que la structure spatiale du quantile 99 est particulièrement bien représentée par la modèle couplé en climat présent. Cependant, les extrêmes ne réagissent pas comme la moyenne dans la région méditerranéenne. Ainsi, pour augmenter la robustesse des conclusions sur l'évolution des précipitations intenses en Méditerranée ou tout au moins quantifier leurs incertitudes, des simulations d'ensembles ont été réalisées et pris en compte dans le projet MedUP (<http://www.cnrm.meteo.fr/medup/>).

L'analyse des résultats de la simulation climatique CYPRIM sur la région sud-est de la France à la fin du XXI^e siècle révèle des changements différents sur les extrêmes de précipitations plutôt qu'à la moyenne. Ces extrêmes de pluie dans cette région de la France sont fortement sous-évalués par le modèle. Cette sous-estimation des modèles de climat, même régionaux, justifie la démarche de recourir à des méthodes de descente d'échelle spatiale statistiques ou statistico-dynamique pour apporter des éléments de réponse sur l'évolution des événements de pluie intense dans le climat futur.

L'impact du changement climatique sur l'hydrologie régionale a été évalué grâce à la chaîne Safran-Isba-Modou, SIM, (Habets et al., 2008). Même si le projet CYPRIM a utilisé des simulations climatiques à haute résolution (50 km), une étape supplémentaire de descente d'échelle est nécessaire pour passer du modèle général à l'échelle du modèle d'impact. Et dans ce projet, deux méthodes ont été utilisées:

- Une méthode statistique fondée sur les différents types de temps observés sur la France, développée par Boé et al., (2006).

- Une méthode de correction de biais quantile-quantile pour laquelle la distribution des variables simulées par le modèle dans le climat futur tient compte des erreurs sur les distributions statistiques de la période de référence 1970 – 2000 (Déqué, 2007).

L'utilisation de ces deux méthodes de descente d'échelle permet d'appréhender l'incertitude associée à ces dernières. Ces méthodes ont données des augmentations de débit pour certaines rivières malgré la baisse des débits moyens. A ce niveau, les incertitudes sont très grandes, à la fois sur la valeur de l'augmentation et sur la localisation précise des zones concernées. Ce résultat est important et montre que l'augmentation attendue de la variabilité du climat en région méditerranéenne peut se traduire par des crues éclair plus fortes qu'aujourd'hui. En effet, il faut noter que l'incertitude associée à la régionalisation des résultats de scénarios climatiques est très importante. Le signal apparaît peu clair sur les précipitations et débits forts (quantile 99), sur l'amplitude des changements et la localisation. Pour aller au-delà, il vaudrait mieux prendre en compte les incertitudes liées à la méthode de régionalisation et au scénario climatique en utilisant plusieurs modèles de circulation générale et plusieurs scénarios, cela afin d'évaluer la robustesse de ces résultats.

1.3.2.3 – Conclusion

Le premier volet du projet CYPRIM a mieux cerné les éléments météorologiques précurseurs caractéristiques d'événements de pluies intenses sur les régions méditerranéennes. Parmi les éléments communs ainsi mis en évidence, du synoptique à la méso-échelle, on peut citer : la présence de thalweg profond sur l'Europe de l'Ouest associé à une zone de forte barocline avec ou sans blocage à l'est, une situation à grande échelle d'évolution lente, des flux divergents en altitude, des flux convergents dans les basses couches avec apport d'humidité et d'instabilité depuis la mer. Il a également été mis en avant le lien entre la localisation des fortes précipitations avec les conditions synoptiques, mais aussi l'orientation des flux de basses couches. La localisation et la structure spatiale des précipitations est expliquée par l'interaction entre le flux de basses couches humide et instable et la topographie (ex: Massif central, Alpes et Pyrénées).

Ensuite, le deuxième volet du projet caractérise, dans le contexte du changement climatique, l'évolution des phénomènes de pluie intense en région méditerranéenne. Parmi les différentes méthodes mises en place, la méthode statistico-dynamique de descente d'échelle semble indiquer pour la fin du XXI^e siècle une diminution des précipitations sur le Massif central et les Alpes au profit d'une augmentation sur la région du Languedoc-Roussillon dues en particulier à une grande variabilité de la localisation des zones impactées par les fortes précipitations. Quant à la méthode de correction de biais quantile-quantile (Déqué, 2007), elle donne pour le composite des cas en climat présent une assez bonne représentation du maximum sur le Massif central; elle sous-estime néanmoins le maximum sur les Alpes Sud. En climat futur, elle prévoit une diminution des précipitations sur le Massif central et sur les Alpes et une augmentation sur le Languedoc-Roussillon.

Enfin le troisième volet rassemble les résultats touchant la question de la prévisibilité des événements précipitant intenses de Méditerranée, mais aussi celle, plus générale, du temps dans cette région. Une estimation partielle de la prévisibilité est proposée dans ce volet. Ainsi, la prévision d'ensemble se présente aujourd'hui comme l'approche préférée pour l'estimation

des incertitudes dans les prévisions, à toutes échelles. Quant à l'assimilation des données, elle est un moyen de contrôler les incertitudes liées aux conditions initiales.

Même si de nombreuses incertitudes persistent concernant la robustesse des résultats et leur significativité statistique, on peut retenir que toutes ces méthodes semblent indiquer dans le contexte du changement climatique une légère augmentation de la fréquence des événements fortement précipitant sur le sud-est de la France avec des phénomènes plus intenses, tant au niveau des maxima de précipitations que de l'intensité des crues éclair, avec en même temps une baisse significative des précipitations moyennes sur la région pour la période automnale. La localisation des crues éclairs les plus fortes dépend cependant des méthodes de descente d'échelle utilisées, illustrant ainsi les incertitudes sur la distribution géographique des changements qui leur sont associés.

Le projet CYPRIM a ainsi permis de mettre en place des outils statistico-dynamiques pour affiner les connaissances sur l'évolution des événements de forte pluie dans un contexte de changement climatique. Il démontre l'intérêt d'utiliser des méthodes de descente d'échelle permettant de mieux représenter certains processus physiques qui se révèlent indispensables pour caractériser au mieux l'évolution des phénomènes extrêmes.

1.4 – Projet MedUP (<http://www.cnrm.meteo.fr/medup/>)

Le projet MedUP porte sur l'identification et la quantification des sources d'incertitudes associées à la prévision numérique du temps et à la simulation climatique pour les situations d'évènements Méditerranéens intenses. La propagation de ces incertitudes sur la vulnérabilité des milieux est aussi considérée, en prenant en compte quand cela est possible les incertitudes inhérentes aux outils d'analyse économique et de risque.

Une originalité forte de MEDUP est de traiter au sein d'un même projet la prévision numérique du temps, la prévision saisonnière et les scénarios climatiques, en développant une approche de descente en échelle commune aux trois composantes et basés sur les régimes de temps Méditerranéens. Une autre particularité du projet est de considérer toute la chaîne des incertitudes allant de la simulation des évènements météorologiques intenses à la vulnérabilité des milieux à ces évènements. La propagation des incertitudes associées à la modélisation atmosphérique a été considérée dans l'estimation de la vulnérabilité des hydrosystèmes aux évènements extrêmes et interprétées en terme de coût économique et de conséquences sur la prise de décision des individus en situation de crise et la gestion du risque dans la région.

Les objectifs de MedUP étaient :

- ◆ d'identifier et quantifier les sources d'incertitudes inhérentes à la prévision et aux projections climatiques des évènements météorologiques intenses produites par les systèmes de modélisation actuels ou en cours de développement.
- ◆ d'étudier la propagation de ces incertitudes dans les modèles d'impact hydrologique et la chaîne d'alerte, en prenant en compte également les sources d'incertitudes associés aux outils d'analyse et de modélisation utilisés dans ces étapes.

1.4.1- Simulations hydrométéorologiques d'ensemble

Les méthodes de quantification des incertitudes en modélisation atmosphérique ou en modélisation hydrologique reposent sur la réalisation d'ensemble de simulations. Le projet MedUP a développé de nouvelles méthodes de perturbations pour générer ces ensembles afin d'échantillonner au mieux les différentes sources d'incertitudes aux différentes échelles de temps et d'espace. La quantification des incertitudes des projections climatiques et de leurs impacts prend en plus en compte différents scénarios d'émission, différents modèles de climat et différentes méthodes de descente en échelle. Les incertitudes sur l'évolution de la végétation avec le changement climatique sont aussi prises en compte dans l'évaluation des impacts sur les surfaces continentales que ce soit en terme de sécheresse ou crues. L'analyse de la propagation des incertitudes sur la vulnérabilité des milieux fait pour sa part appel à des outils d'analyse économique et de risque ainsi que des analyses de la chaîne d'alerte et des interviews de ces acteurs.

1.4.2 – Résultats majeurs du projet MedUP

Le projet MedUP a réalisé une qualification des modèles et méthodes de régionalisation climatique pour la représentation des extrêmes météorologiques et a montré que les incertitudes de tous les maillons de la chaîne d'évaluation des impacts devaient être considérées (scénario d'émission et modèle de climat mais aussi méthode de régionalisation et modèle d'impact).

Dans le domaine de la prévision des événements intenses, une chaîne complète de prévision d'ensemble hydrométéorologique des crues rapides pour quantifier les incertitudes associées aux prévisions météorologiques et hydrologiques a été développée. L'analyse du processus d'alerte aux crues rapides a montré l'importance d'une traduction des degrés d'incertitudes entre types d'acteurs.

Sur le plan de l'impact sociétal, le projet MedUP a permis de relativiser le rôle de l'incertitude au sein du processus de décision et de mieux comprendre la manière dont les différents acteurs impliqués dans le processus d'alerte aux crues gèrent les incertitudes attachés aux prévisions hydrologiques et météorologiques notamment. En terme de communication, l'analyse fait apparaître l'importance du rôle de la traduction des degrés d'incertitudes au sein de la chaîne d'acteurs impliqués dans l'alerte. Les résultats sur l'évolution des extrêmes avec le changement climatique sont aussi communicables au public, car l'étude est allée jusqu'aux conséquences économiques pour le risque inondation. Cependant, le résultat principal étant l'incertitude significative qui entoure la prospective du risque inondation sous changement climatique, ces résultats doivent être communiqués avec circonspection.

1.4.3 – Conclusion

En conclusion, les principales avancées et réalisations du projet MedUP sont:

- ◆ le développement d'une chaîne complète de prévision d'ensemble hydrométéorologique des crues rapides pour quantifier les incertitudes associées aux prévisions météorologiques et hydrologiques ainsi que la méthode originale d'évaluation de cette chaîne,
- ◆ la mise en évidence du rôle crucial de la traduction des degrés d'incertitudes entre

- types d'acteurs dans le processus d'alerte,
- ◆ la pertinence de l'approche par régime de temps pour extraire une information sur la prévisibilité de l'occurrence des pluies dans les prévisions saisonnières,
- ◆ une quantification des modèles régionaux de climat utilisés par la communauté française et des méthodes statistiques de descente en échelle pour la représentation des extrêmes météorologiques,
- ◆ les toutes premières études à l'échelle régionale sur l'impact de l'effet direct du CO₂, et des effets du changement d'occupation des sols sur le cycle hydrologique en Méditerranée ou encore sur l'analyse économique du risque inondation.

1.5 – Projet HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment)

(pour plus de détails se référer <http://www.cnrm.meteo.fr/hymex/>)

Le projet HyMeX lancé en 2008 s'appuyant largement sur les acquis du projet CYPRIM, cherche à documenter les différents compartiments atmosphère, océan, hydrologie et biogéochimie pour aborder le cycle de l'eau en Méditerranée dans sa globalité. Il cible l'étude du bilan hydrologique du bassin Méditerranéen. Une partie est dédiée à la compréhension, la prévision des précipitations extrêmes et l'impact du changement climatique sur ces processus.

Ce projet HyMeX du chantier méditerranée cherche à améliorer la compréhension et la modélisation du *cycle de l'eau* en Méditerranée, avec un intérêt particulier porté sur la prévisibilité et l'évolution des *événements intenses* associés au cycle de l'eau. Les questions structurantes affichées par le programme HyMeX concernent plus particulièrement:

- ◆ la variabilité des composantes du cycle de l'eau en région méditerranéenne, dans un contexte de changement climatique global et l'impact de cette variabilité sur les ressources en eau,
- ◆ les ingrédients et mécanismes nécessaires pour qu'un événement devienne extrême,
- ◆ l'évolution des événements intenses méditerranéens dans un contexte de changement climatique global,
- ◆ la vulnérabilité des régions aux événements intenses et leurs capacités à s'adapter.

Pour progresser sur ces questions, la stratégie proposée par HyMeX est de surveiller et modéliser le système couplé atmosphère-océan-hydrologie-écosystèmes à mésoéchelle, sa variabilité et ses caractéristiques sur une décennie (2010-2020) inscrite dans un contexte de changement climatique global. Cette amélioration du système couplé pour laquelle de nombreuses questions fondamentales existent est faite dans ce projet en :

- ◆ conduisant une analyse multi-échelles de la circulation atmosphérique et océanique, incluant les apports hydrologiques pour identifier les régimes de circulation typiques de la région méditerranéenne et la localisation de moyens additionnels d'observation dont le déploiement était nécessaire pendant l'EOP ("Extended Observing Period").
- ◆ décrivant la distribution statistique des événements extrêmes avec des méthodologies innovantes pour aider à l'identification des périodes et régions du déploiement de l'instrumentation additionnelle durant la SOP ("Special Observing Period").

- ◆ évaluant la prévisibilité des événements extrêmes et leurs impacts. Cela a inclut le développement et l'évaluation de systèmes d'observations adaptatives et d'assimilation de données à méso-échelle, le développement de modèles couplés pour l'estimation des incertitudes dans la région méditerranéenne.

Les questions scientifiques traitées dans HyMeX sont organisées autour de cinq thématiques principales. Les deux premières concernent l'étude de la variabilité et de la tendance de la composante «lente» du cycle de l'eau. Il s'agira de mieux quantifier et simuler (i) les termes du *bilan en eau de la mer Méditerranée* qui pilotent la circulation océanique du bassin et (ii) les composantes naturelles et anthropiques du *cycle hydrologique continental* à l'échelle régionale. Les deux thématiques suivantes portent sur les événements intenses : (i) les *pluies intenses et crues rapides* et (ii) les flux *océan-atmosphère intenses*, thématique qui inclut aussi bien les phénomènes atmosphériques responsables de ces flux (cyclogénèses méditerranéennes et vents régionaux) que leurs conséquences sur l'océan (formation de convection océanique et d'eaux denses). Enfin la cinquième thématique, qui relève plus particulièrement du domaine des Sciences Humaines et Sociales, concerne la *vulnérabilité et la capacité d'adaptation* des territoires et peuples méditerranéens aux événements intenses dans le contexte du changement climatique.

1.6 - Bibliographie

Beniston M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, K. Woth, 2007 : Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate projections, *Climatic Change* 81, 71–95.

Boberg F., P. Berg, P. Thejll, W. J. Gutowski et J. H. Christensen, 2008 : Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. *Clim. Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-008-0446-y.

Boé J., L. Terray, F. Habets et E. Martin, 2006 : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111, D23106, DOI: 10.1029/2005JD006889.

Christensen, J.H. and O.B. Christensen, 2003: Severe Summer Flooding in Europe, *Nature* , 421 , 805-806.

Déqué M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 1-2, 16-26.

Ducrocq, V., A. Joly, et al., 2008 : Cyclogénèse et précipitations intenses en région Méditerranéenne. Rapport final du projet ACI-FNS CYPRIM, convention n° 04210FNS, 57pp.

Giorgi F., 2006 : Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, DOI: 10.1029/2006GL025734.

Flecher C., 2009: Développement de méthodes statistiques pour la mise au point d'un générateur de climat adapté à l'utilisation des scénarii de changement climatique. Thèse à INRA PACA.

Habets F., A. Boone, J.-L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana-Segui, F. Rousset-Regimbeau et P. Viennot, 2008 : The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, DOI:10.1029/2007/JD008548.

IPCC, 2007 : Climate change 2007. Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.

Ricard D., 2005 : Modélisation à haute résolution des pluies intenses dans les Cévennes : le système convectif des 13 et 14 octobre 1995. *La Météorologie*, 8e série, 48, 28-38.

Ricard D., A.-L. Beaulant, J. Boé, M. Déqué, V. Ducrocq, A. Joly, B. Joly, E. Martin, O. Nuissier, P. Quintana Seguí, A. Ribes, F. Sevault, S. Somot, 2009 : Projet Cyprim partie 2 : Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin Méditerranéen. *La Météorologie*, Série 8, N° 67, Pages : 19-30, Novembre 2009.

Schär, C., P.L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger and C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability for European summer heat waves. *Nature* , 427 , 332-336; doi:10.1038/nature02300

FICHE DE SYNTHÈSE N°2

Techniques de descente d'échelle climatique en région Méditerranée

Auteurs :

Y. Sané (IPSL);

P. Braconnot (IPSL / LSCE) ; S. Planton (CRM-GAME)

2.1. Introduction

Le climat méditerranéen est un type de climat tempéré, qui se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Les régions du pourtour méditerranéen sont régulièrement soumises à des épisodes de vents violents et de pluies intenses. Associés à une topographie accidentée, ils peuvent engendrer des crues éclair dévastatrices (Ricard, 2005). Cette zone méditerranéenne a la particularité d'apparaître comme l'un des principaux "points chauds" régionaux du changement climatique (Giorgi, 2006) car les modèles climatiques globaux et régionaux (IPCC, 2007) s'accordent à montrer un réchauffement plus important que dans beaucoup d'autres régions. Durant l'été et en moyenne annuelle, ce réchauffement s'accompagne d'un assèchement, ainsi que d'une augmentation de la variabilité inter-annuelle. De plus, certaines études montrent que les précipitations intenses pourraient augmenter dans la région malgré la diminution des précipitations en moyenne (Boberg et al., 2008).

En effet, les modèles de climat, bien qu'ayant beaucoup progressé au cours des dernières années, tant en résolution qu'en représentation des processus, ont encore beaucoup de difficultés à rendre compte avec un niveau de réalisme et de confiance suffisant des événements convectifs intenses.

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, les différentes études du système climatique et des études économiques et démographiques. Ces modèles composent, non pas des prévisions, irréalisables à l'échelle de plusieurs décennies, mais des scénarios d'évolution du climat, supposés couvrir un large éventail d'évolution possibles.

Les études climatiques classiques se font à partir de modèles numériques appelés GCM (General Circulation Model) qui couvrent l'ensemble du globe, représentent la dynamique de l'atmosphère et ses lois physiques. Pour étudier le climat global de la planète, les modèles atmosphériques sont couplés à des modèles représentant les autres parties du système terre: l'océan, la végétation, les fleuves, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, le cycle du carbone.

Néanmoins, les modèles globaux du climat couplés océan-atmosphère, appelés AOGCMs dans la suite du document, ont une résolution spatiale trop faible (généralement supérieure à 100km) pour permettre une représentation réaliste de certains phénomènes d'échelle locale (pluies convectives intenses, cyclones, perturbations des paramètres météorologiques par le relief). De manière générale, la région Méditerranéenne est mal résolue dans la grille des AOGCMs. La mise en œuvre de techniques de descente d'échelle à partir des données des AOGCMs permet de corriger partiellement ces lacunes et de traduire certaines des tendances mises en évidence par les AOGCMs sur les paramètres locaux.

La mise en place de politiques d'adaptation en lien avec certains enjeux régionaux ou locaux nécessite la mise en œuvre de modèles d'impact qui supposent de disposer de projections de certaines variables météorologiques à des échelles spatiales plus fines que celles proposées par les AOGCMs. En effet, le climat peut, selon les caractéristiques physiographiques d'une zone géographique donnée, présenter une variabilité spatiale à des échelles très fines.

Ce document a pour objectif de réaliser une synthèse des méthodes de descente d'échelle disponibles, d'en analyser les avantages et inconvénients et de dresser un certain nombre de recommandations pour leur mise en œuvre.

2.2. Intérêt de la descente d'échelle

Une variable en point de grille issue d'un AOGCM représente une moyenne sur une maille dont la taille dépend de la résolution du modèle. Plus la résolution est faible, plus la valeur modèle s'éloigne des valeurs observées en un point précis. De plus les phénomènes physiques qui prennent place à des échelles spatiales plus fines que la maille du modèle ne sont pas explicitement résolus et doivent donc être approximés par une paramétrisation. Ces paramétrisations physiques n'étant pas parfaites, des biais plus ou moins importants apparaissent sur certains variables du modèle de climat. C'est plus particulièrement le cas pour les précipitations dont la nature convective dans les régions tropicales fait intervenir des processus de très fine échelle qui ne sont pas représentés de manière réaliste dans les AOGCMs.

Pour palier cette déficience, des méthodes de descente d'échelle des simulations climatiques sont développées. Dans le cadre du projet CYPRIM, une méthode originale de descente spatiale d'échelle statistico-dynamique est élaborée. Elle tire profit des connaissances acquises et des outils de modélisation à haute résolution. D'autres méthodes statistiques de descente temporelle d'échelle ont aussi été appliquées à des sorties de modèles de climat et ont traité jusqu'à l'impact hydrologique, fournissant ainsi un autre moyen de critique et de comparaison, comme le générateur stochastique de pluies horaires (Arnaud et al., 2007).

Les méthodes de descente d'échelle permettent donc d'exploiter l'information climatique de grande échelle disponible dans les scénarios proposés par les AOGCMs pour dériver des scénarios régionaux voir locaux pour la ou les variables météorologiques d'intérêt et pour la mise en œuvre d'un modèle d'impact. On parle également de désagrégation.

2.3. Les différents types de méthodes

Pour faire cette synthèse, nous nous sommes basé sur l'annexe 1 du projet ACCLIMATE qui a fait aussi une synthèse des techniques de descente d'échelle. Ainsi deux approches existent en matière de descente d'échelle:

- l'approche dynamique qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional;
- l'approche statistique qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables modèles de grande échelle.

Ces deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (méthodes statistico-dynamiques). L'approche dynamique est souvent plus couteuse en temps de calcul. L'approche statistique quant à elle nécessite de trouver une méthode adaptée au types d'impact que l'on souhaite étudier et de disposer de données historiques sur une période aussi longue que possible pour la construction d'un modèle statistique.

Mettre en œuvre plusieurs méthodes de descente d'échelle pour un même problème est un moyen de quantifier une partie de l'incertitude introduite par la descente d'échelle et d'évaluer le degré de confiance que l'on peut accorder aux résultats obtenus.

2.3.1 L'approche dynamique

Les méthodes de descente d'échelle dynamique permettent de simuler, à une résolution spatiale plus fine que celle permise par les GCMs, les effets des changements globaux sur des régions du globe choisies (Leung et al., 2004 ; Christensen et al., 2007). Elles consistent à utiliser un modèle atmosphérique global à haute résolution (les forçages externes étant fournis par les AOGCMs) ou un modèle atmosphérique régional dit à aire limitée couplée à un modèle de climat global (GCM ou AOGCM). Les modèles de descente d'échelle dynamique sont des outils prometteurs pour dériver les scénarios météorologiques nécessaires aux analyses d'impact. L'utilisation directe des données pour ces analyses est cependant délicate. La performance des modèles climatiques régionaux dépend d'abord fortement des biais hérités des modèles globaux, qui peuvent être importants (van Ulden et van Oldenborgh, 2006). Par ailleurs, leur capacité à représenter les forçages induits à l'échelle régionale par la topographie, l'hétérogénéité de la surface terrestre est encore réduite.

La première méthode consiste donc à utiliser un GCM à haute résolution et couvrant l'ensemble du globe. Des simulations de l'ordre de 100 km sont faisables avec les GCMs, ou de 20 km localement par des modèles à résolution variable. Ces modèles sont forcés par les températures surfaces de l'océan (plus connues sur le nom de « SST ») ou guidés par les AOGCMs hors domaine d'intérêt par circulation 3D. Les ressources de calcul nécessaires pour ce type de simulation peuvent être réduites en identifiant les périodes d'intérêt et en ne faisant tourner le GCM haute résolution que sur ces périodes, alors que le modèle de plus grande échelle (AOGCM) simule l'évolution générale du climat sur les phases transitoires. Les périodes d'intérêt doivent à la fois couvrir le climat actuel et le climat du futur et être suffisamment longues (au moins 30 ans) pour simuler les différents modes de variabilité (inter-annuelle, inter décennale). Ceci permet d'une part d'évaluer la capacité du modèle à reproduire le climat présent et de calculer les changements sur les variables climatiques pertinentes.

La deuxième solution est l'utilisation de modèles à aire limitée appelés modèles climatiques régionaux (RCMs). Ces modèles couvrent seulement une partie du globe. Ils permettent d'atteindre des hautes résolutions de l'ordre de 10 à 20 km. De la même manière que pour les GCMs haute résolution, ils se concentrent sur des périodes d'intérêt multi décennales. Ils sont capables de décrire les mécanismes climatiques d'interactions agissant à l'échelle régionale mais également de résoudre partiellement les effets du relief sur les paramètres locaux. Ces modèles sont forcés en données initiales et sur leurs limites géographiques par des simulations des AOGCMs. Les principales limitations théoriques de cette technique sont donc les effets des erreurs systématiques du champ de grande échelle, provenant du modèle global et le manque d'interaction « two-way » entre le climat régional et le climat global (les modifications de la circulation atmosphérique simulés par le modèle régional ne sont pas reportées dans le modèle global). En d'autres termes, le RCM est contraint par le modèle global coupleur au niveau de sa circulation de grande échelle et ne peut donc pas développer sa propre circulation. Les erreurs introduites par la représentation de grande échelle du GCM, sont donc transmises aux RCMs. Des simulations en mode « two-way » existent mais sont très coûteuses en temps de calcul et donc peu utilisées dans la pratique.

Il est également reconnu que les RCMs génèrent eux-mêmes des biais qui ne sont pas attribuables au biais transmis par les modèles coupleurs de grande échelle. L'exploitation des données en sortie des RCMs nécessite généralement de les corriger par des méthodes statistiques calibrées sur les observations d'une période du climat passé (ex: méthode « quantile-quantile », Déqué, 2007).

2.3.2 L'approche statistique

Les méthodes de descente d'échelle statistique reposent sur la détermination de relations quantitatives entre variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elles sont basées sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs: le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, types de surface, couverture du sol... Les méthodes statistiques permettent de mettre en évidence des relations physiquement interprétables entre les champs de grande échelle et les conditions climatiques de surface mais présentent parfois l'inconvénient d'une mauvaise représentation de la variance observée ou des phénomènes extrêmes.

L'information locale ou régionale est obtenue à partir d'un modèle statistique qui relie les variables de grande échelle (prédicteurs) aux variables locales ou régionales (prédicand).

Les méthodes statistiques ont pour avantage d'être en générale peu couteuse en temps de calcul et d'être capables d'apporter une information localisée (ponctuelle) sur un ou plusieurs sites.

La principale faiblesse est liée au fait que l'hypothèse de stationnarité ne peut être vérifiée (on suppose que les relations calculées sur le climat présent restent valides pour le climat futur). Une autre contrainte de l'approche statistique est de disposer de données homogènes sur la période observée pour permettre le calage du modèle statistique.

Les méthode de descente d'échelle statistique offrent donc de nouveau une alternative intéressante pour la production de scénarios météorologiques futurs adaptés aux études d'impact (Xu, 1999). Elles se basent et utilisent en pratique diverses relations empiriques établies pour la période de contrôle entre certaines variables atmosphériques, issues des ré-analyses météorologiques et simulées par ailleurs par les modèles climatiques, et les variables météorologiques locales souhaitées. Ces méthodes de descente d'échelle statistique sont multiples et variées.

Il existe 3 grandes catégories de méthodes statistiques que l'on peut combiner entre elles:

- classification par type de temps
- modèle de régression
- générateur de séries

2.3.2.1 Type de temps

L'idée de régimes ou types de temps a été introduite dans les années 1950 par la climatologie synoptique et repose sur une représentation conceptuelle de la dynamique atmosphérique des moyennes et hautes latitudes. Un régime ou type de temps se caractérise par l'apparition reconnaissable et récurrente, au-dessus d'un territoire géographique donné, d'une situation météorologique associée à des caractéristiques bien déterminées du temps sensible. Un autre aspect des types de temps est leur capacité à restituer une description fine des variables du climat sensible aux échelles régionales à locales.

Cette famille de méthode repose sur des techniques de classification objective de l'état de l'atmosphère sur un domaine géographique donné décrit à l'aide d'un ou plusieurs prédicteurs de grande échelle. Cette classification permet de mettre en évidence des types ou régimes de temps. L'hypothèse principale est que les types ou régimes de temps sont associés à une distribution spécifique des variables climatiques locales (prédictand) que l'on souhaite déterminer (température ou précipitations à petite échelle).

Plusieurs méthodes permettent de relier le prédictand aux différentes classes de type de temps. On peut par exemple reconstituer une variable locale à l'aide d'une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et/ou ré-analyses (champs de grande échelle) disponibles du climat passé. On peut également déterminer la ou les variables locales en s'appuyant sur des méthodes dites « des analogues » qui consistent à trouver dans le passé des dates dont le contexte de grande échelle est proche de celui de la situation considérée et de supposer que les paramètres seront proches des valeurs observées à cette date étalon. La mise en œuvre pour la prévision saisonnière de ce type de méthode montre cependant que des situations analogues en terme de circulation de grande échelle ne sont pas nécessairement analogues en terme d'impacts à l'échelle locale ce qui constitue en soit une limitation des méthodes.

- Avantages:
 - approche intuitive et puissance explicative,
 - peut s'adapter aussi bien aux températures qu'aux précipitations ou au vent et permet de traiter des problèmes multi variés et spatiaux,
 - la méthode peut être complétée par une approche en descente d'échelle dynamique (jusqu'à la méso-échelle) pour l'étude de certains événements extrêmes en choisissant des journées particulières.
- ◆ Contraintes ou inconvénients :
 - ◆ nécessite un lourd travail de classification,
 - ◆ nécessite de trouver un ou plusieurs prédicteurs de grande échelle discriminant pour le paramètre auquel on s'intéresse.
 - ◆ Certains schémas basés sur les types de temps peuvent être insensibles au forçage climatique futur.

2.3.2.2 Modèle de régression

Les modèles de régression permettent de relier une variable locale linéairement ou non-linéairement à des prédicteurs de grande échelle bien corrélés à la variable locale d'intérêt. Les modèles sont en général construits à partir d'un échantillon d'observation du climat passé pour la variable locale et des données de ré-analyses correspondant au même échantillon pour les paramètres de grande échelle. La validation du modèle se fait sur un échantillon utilisé lors de la construction du modèle.

On distingue dans cette catégorie, les méthodes de :

- ◆ régression linéaire multiple
- ◆ analyse canonique (les prédicteurs sont condensés par une analyse en composante principale)
- ◆ réseau de neurones (régression non linéaires).

- ◆ Avantages :
 - ◆ relativement simples à utiliser
 - ◆ grande variété de prédicteurs disponibles
 - ◆ solutions sur étagères et logiciels disponibles facilement
 - ◆ permet de reconstituer facilement des séries à l'échelle d'un point de mesure

- ◆ contraintes ou inconvénients :
 - ◆ sous-estime la variance temporelle
 - ◆ non adapté aux problèmes non linéaires, suppose souvent la linéarité ou la normalité de la distribution de la variable locale
 - ◆ mauvaise reconstitution des phénomènes extrêmes

2.3.2.3 Générateur de séries

Les générateurs de séries permettent de reproduire les caractéristiques statistiques d'une variable locale mais pas des événements observés. Ils permettent en particulier d'augmenter artificiellement les longueurs des séries en conservant les caractéristiques statistiques.

Bien que des générateurs météorologiques stochastiques soient plus largement utilisés dans la descente d'échelle temporelle, ils peuvent aussi être utilisés pour la descente d'échelle spatiale (Wilks, 1999a). La première étape d'utilisation d'un générateur météorologique stochastique est sa calibration utilisant des données météorologiques quotidiennes observées. Les fichiers des paramètres, qui contiennent des informations sur les caractéristiques statistiques des données observées, résultent du processus de calibration et sont utilisés pour simuler les données météorologiques artificielles qui ont les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées.

Pour la descente d'échelle spatiale, un générateur météorologique peut être calibré utilisant la combinaison des données météorologiques moyennées pour une région particulière et les données individuelles correspondant grossièrement à la taille d'une boîte de réseau GCM appropriée, et le fichier de paramètres résultant décrit les caractéristiques statistiques du temps de cette région. Ce temps moyen est calculé utilisant un certain nombre de stations à l'intérieur de la région appropriée. Le générateur météorologique est aussi exécuté à chacune de ces stations individuelles, aboutissant à une suite de jeux de paramètres de station individuels. Des données quotidiennes de GCM pour la boîte de réseau correspondant aux données météorologiques moyennes sont aussi utilisées dans le générateur météorologique. Ce processus est décrit plus en détail dans Wilks (1999a).

L'utilisation de générateurs météorologiques stochastiques dans la descente d'échelle spatiale n'est pas un processus direct. Il peut exiger l'accès au code de programme pour l'adapter au cas traité et exige aussi une grande quantité de données de station observées, qui peuvent ou ne peuvent pas être aisément disponibles. Ces méthodes ont été principalement utilisées pour les précipitations pour des applications hydrologiques. Elles peuvent être utilisées pour des études d'impact des changements climatiques en reliant les paramètres permettant de générer les séries à des prédicteurs de grande échelle, des types de temps ou aux caractéristiques de précipitations.

Ces méthodes permettent une désagrégation d'échelle temporelle, par exemple pour désagréger des quantités mensuelles de précipitations et de nombre de jours pluvieux en quantités quotidiennes de précipitations ou des quantités quotidiennes en quantités pour des périodes inférieures à 24h.

- ◆ Avantages :
 - ◆ production de larges ensembles pour le calcul d'incertitudes ou des simulations longues d'extrêmes
 - ◆ interpolation spatiale des paramètres du modèle utilisant les variables d'environnement ou des conditions de surface
 - ◆ peuvent générer de l'information à l'échelle sub-quotidienne
- ◆ Contraintes ou inconvénients :
 - ◆ en cas de modification des paramètres du générateur dans le climat futur simulé, risque d'interactions inattendues entre variables pouvant déboucher sur une amplification ou diminution artificielle de l'impact des changements climatiques
 - ◆ ajustement arbitraire des paramètres du générateur pour le climat futur

2.3.3 Combinaison des approches statistiques et dynamiques

La combinaison des approches statistique et dynamique peut se faire de deux façon :

- ◆ utilisation des sorties d'un modèle à méso-échelle pour raffiner encore la résolution ou corriger et produire des données haute fréquence (ex: 1 heure à partir du journalier)
- ◆ identification de périodes d'intérêt par des méthodes statistiques (types d temps correspondant à des phénomènes extrêmes déterminés à partir d'indicateur de grande échelle) pour réaliser des simulations à haute résolution ou à résolution variable, afin d'obtenir des détails spatiaux sur ces périodes d'intérêt.

Par exemple le projet CYPRIM cherche à poser les bases méthodologiques permettant d'étudier l'évolution possible des événements de pluie intense dans leur fréquence, leur saisonnalité, leur intensité, leur positionnement géographique, leur durée et leur impact hydrologique. Et pour cela, une méthodologie innovante fondée sur l'association de méthodes de descente d'échelle dynamique et statistique a été mise en place et testée (*Figure F2.1*).

Tout d'abord, des simulations climatiques ont été réalisées avec un modèle régional couplé selon le scénario A2 du GIEC (Somot et al., 2008). Ensuite, l'impact hydrologique a été estimé en utilisant deux méthodes statistiques de descente d'échelle (Boé et al., 2006 ; Déqué, 2007). Puis une méthode de descente d'échelle statistico-dynamique a été mise en œuvre pour étudier l'évolution de l'intensité des événements fortement précipitant en Méditerranée, en particulier dans le sud de la France, dans le contexte du climat futur de la fin de ce siècle. Cette méthode commence par l'identification, puis la sélection de situations choisies dans des classes d'environnements synoptiques favorables au déclenchement d'épisodes de pluies intenses (Joly et al., 2007), à la fois dans le climat présent (1961 – 1990) et dans le climat futur (2070 – 2099). Ensuite, ces cas sont simulés à l'aide d'un modèle à haute résolution capable de représenter de façon détaillée les mécanismes conduisant à la formation d'événements précipitant. La sélection d'un ensemble limité de simulations à simuler avec le modèle à haute résolution est nécessaire compte tenu du cout numérique élevé de telles simulations. En revanche, avec un modèle à résolution kilométrique, on a bien une meilleure

représentation des processus convectifs et donc l'intensité des événements de pluie intense. L'évolution de la fréquence est pour sa part évaluée à travers celle des environnements propices aux événements de pluie intense.

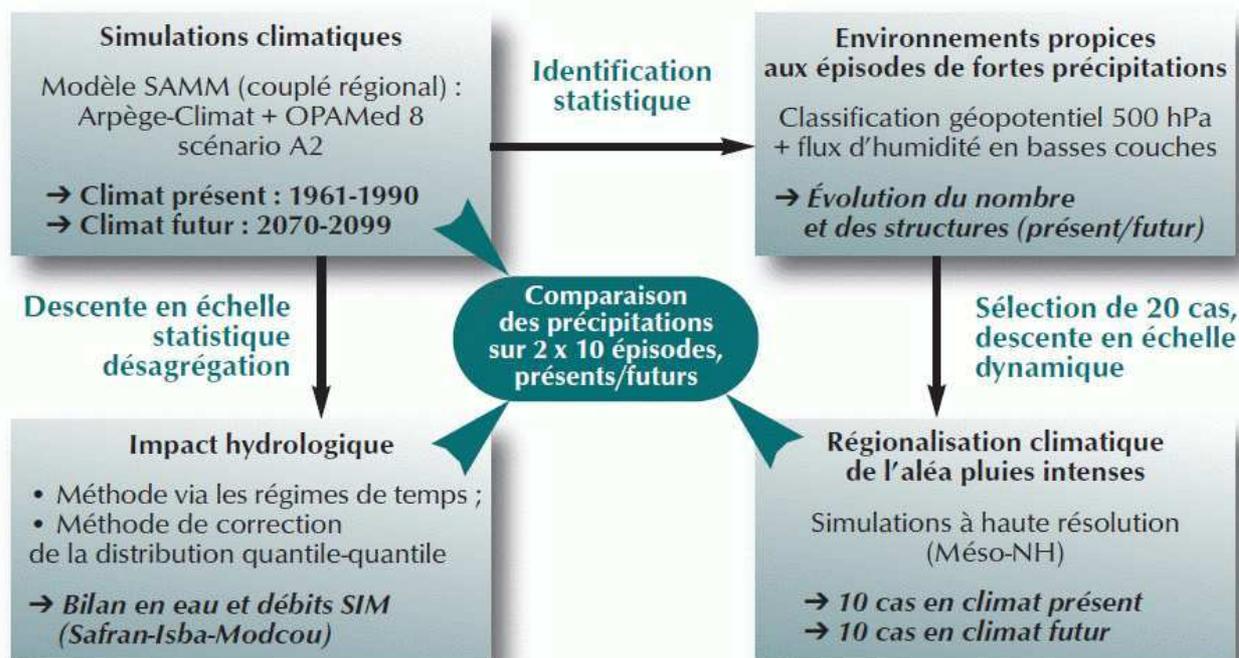


Figure F2.1 – Schéma présentant les différents modules de la méthode présentée (cf Projet Cyprim partie II, La Météorologie, n°67-novembre 2009, 19-20)

2.3.4 Exemples de descente d'échelle déjà mises en œuvre utilisés pour notre étude

Cette partie récapitule les méthodes mises en œuvre dans le projet INVULNERABLE.

2.3.4.1 Générateur de pluies horaires SHYPRE

Le modèle de génération de pluie développé dans la méthode SHYPRE appartient à la famille des modèles stochastiques dits à « approche directe », basés sur une description géométrique du signal temporel de pluies. Inspiré des travaux de TOURASSE (1981) puis LEBEL (1984), le modèle présenté ici a été développé par CERNESSON (1993) et ARNAUD (1997). Ce modèle part du principe que la pluie est un processus aléatoire et intermittent fait d'une succession d'états secs et pluvieux, dont l'évolution est décrite par des lois de nature stochastique. La génération du signal temporel de pluie est alors réalisée en deux étapes (ARNAUD et al., 1999). La première étape est l'étude descriptive du phénomène. Elle amène au choix des variables qui vont représenter au mieux la structure temporelle interne des hyétogrammes observés. Par hypothèse chaque variable descriptive sera indépendante des autres, et sera représentée par une loi de probabilité théorique ajustée sur les valeurs observées. La seconde étape est la restitution de chroniques de pluie par les variables descriptives générées de façon aléatoire par une méthode de Monte

Carlo, après inversion de leur loi de probabilité. Le calage du modèle porte sur l'analyse d'épisodes pluvieux au pas de temps horaire, identifiés par une succession de cumuls journaliers de pluie supérieurs à 4 mm et présentant un cumul journalier supérieur à 20 mm. On extrait alors de ces épisodes, les valeurs des huit variables servant à les décrire (CERNESSON et al., 1996) : le nombre d'épisodes par année, le nombre de périodes pluvieuses (groupes d'averses sans période sèche) par épisode, le nombre d'averses (hyétogramme élémentaire ayant un seul maximum) par période pluvieuse et pour chaque averse sa durée, son intensité moyenne, la position relative de l'intensité maximale, le rapport entre l'intensité maximale et l'intensité moyenne, et enfin la durée sèche qui la sépare de l'averse suivante et qui vaut zéro pour deux averses groupées.

L'étude des données d'une cinquantaine de stations de pluviographes situées sur le pourtour méditerranéen français (figure 2), a permis de définir un type de loi de probabilité théorique pour chaque variable, qui caractérise au mieux leur distribution de fréquences (ARNAUD, 1997 ; CERNESSON, 1993 ; CERNESSON et al., 1996) : la loi de Poisson est utilisée pour le nombre d'épisodes par an et la durée des averses ; la loi géométrique est utilisée pour le nombre de périodes pluvieuses, le nombre d'averses et la durée sèche ; la loi normale tronquée entre 0 et 1 est utilisée pour la position du maximum et la loi exponentielle est utilisée pour le rapport des intensités maximale et moyenne, et pour la variable intensité moyenne. Le même type de loi est donc utilisé pour une variable donnée, pour ajuster chaque échantillon de valeurs associées aux données de pluviographes.

L'ajustement de ces lois de probabilité est réalisé pour chaque variable et chaque poste. Au total, le modèle de génération de pluie horaire nécessite 21 paramètres déterminés à partir des chroniques de pluies horaires observées, pour les deux saisons considérées : l'hiver de décembre à mai et l'été de juin à novembre. Ce nombre de paramètres peut paraître important, mais une étude de sensibilité, réalisée en vue de régionaliser le modèle, a montré que seulement 5 paramètres suffisent pour couvrir la plage de variabilité pluviographique importante de la région méditerranéenne française (ARNAUD, 1997). Les autres paramètres peuvent être fixés à une valeur régionale soit parce qu'ils sont peu variables, soit parce que le modèle est peu sensible à leur fluctuation. Ces paramètres que l'on peut fixer dans le cadre d'une régionalisation sont surtout des paramètres influant sur la géométrie des hyétogrammes. Les hyétogrammes horaires synthétiques sont ensuite construits à partir des variables descriptives générées par un tirage aléatoire dans leur loi de probabilité suivant une méthode de Monte Carlo et suivant un ordre précis. La génération des variables se fait indépendamment au fur et à mesure des besoins sauf en ce qui concerne la durée et l'intensité moyenne des averses. Ces deux variables sont alors générées de façon conditionnelle afin de respecter leur liaison (Arnaud et al., 1999; Cantet, 2009). On obtient ainsi de multiples scénarios de pluies horaires générés sur de très longues périodes de simulation.

Le générateur de pluies horaires développé dans la méthode SHYPRE permet d'estimer l'aléa pluviographique par une approche originale. Les avantages de cette approche sont:

- ◆ approche robuste face à l'échantillonnage des valeurs extrêmes, grâce à l'analyse d'un grand nombre d'événements et une paramétrisation basée sur des valeurs moyennes;
- ◆ approche prenant en compte différentes durées de pluies, de 1 heure à plusieurs jours, de façon implicite et cohérente;
- ◆ approche régionalisée permettant d'estimer le risque pluvial à l'échelle du km², grâce à la prise en compte de la quasi-totalité de l'information pluviométrique disponible;

Outre ses avantages indéniables, l'originalité de l'approche réside dans la modélisation de chroniques de pluies. L'analyse des chroniques de pluies observées, structurées en succession d'averses et de périodes sèches, conduit à leur modélisation, permettant ainsi de créer des scénarios pluvieux statistiquement équivalents aux observations. La représentativité climatique des variables étudiées et l'information temporelle générée présente un intérêt supplémentaire à cette approche.

2.3.4.2 Méthode de désagrégation quantile-quantile conditionnelle (Déqué, 2007)

Cette méthode est plus une méthode de correction que de descente d'échelle, car s'appuie sur des simulations numériques à résolution 50 km, telles qu'obtenues avec ARPEGE étiré (Gibelin et Déqué, 2003). On ne cherche pas à reconstituer des structures cohérentes de petite échelle, mais juste à conserver les caractéristiques climatologiques de la petite échelle.

Cette méthode a été utilisée dans le projet IMFREX, où sur chaque variable séparément, à savoir température minimale diurne, température maximale diurne et précipitations. Si $F_m()$ est la fonction de répartition d'une variable X simulée par le modèle en un point de grille et pour une saison, et si $F_o()$ est la fonction de répartition de la variable observée à une station proche de ce point, $Y=1/F_o(F_m(X))$ est une variable qui a la même fonction de densité probabiliste que les observations. Cette technique revient à considérer que le modèle ne simule pas une variable physique mais un rang dans sa propre échelle de valeurs. Dans la pratique les deux fonctions de répartition sont obtenues en triant les séries et en gardant les deux extrêmes et les 99 centiles. Au delà des extremum, les valeurs sont extrapolées en conservant la même correction additive que pour l'extremum correspondant. Dans certains cas (précipitations, humidité relative) on n'a pas d'extrapolation puisqu'il existe un extremum absolu d'un ou des deux côtés de la fonction.

2.3.4.3 Méthode CDF-t

L'approche choisie ici est la transformation de la fonction de distribution cumulative (CDF-t) offrant l'avantage de fournir et de traiter directement des fonctions de distribution cumulative (Michelangeli et al., 2009). Un autre intérêt de cette méthode consiste dans le fait qu'il ne fait pas de supposition sur la forme ou la famille de distribution et peut ainsi être appliqué tant à l'averse qu'aux températures superficielles dans le contexte de cette étude. La méthode est basée sur l'hypothèse qu'il existe une transformation mathématique T permettant de traduire la fonction de distribution cumulative F_G d'une variable d'un modèle de circulation générale à la fonction de distribution cumulative F_S représentant la variable climatique d'échelle locale au niveau de la station météorologique donnée (predictand). Cette approche a logiquement été nommée « Cumulative Distribution Function - transform » (CDF-t).

Plus précisément, si F_{Gh} et F_{Sh} représentent les CDFs des intensités de précipitations modélisées à un point de grille du GCM et à une station contenue dans ce point de grille, pour une période historique h de calibration. Michelangeli et al., 2009 supposent que la transformation T permet de passer de F_{Gh} à F_{Sh} suivant l'équation:

$$T(F_{Gh}(x)) = F_{Sh}(x); \quad (3.1)$$

pour tout x dans le domaine des valeurs possibles de la variable à représenter.

La transformation T est supposée stationnaire dans le temps et peut donc être appliquée à F_{Gf} , la CDF de la variable grande échelle pour une période future ou de validation, pour générer F_{Sf} , la CDF au niveau de la station pour la même période :

$$T(F_{Gf}(x)) = F_{Sf}(x). \quad (3.2)$$

Pour plus de détails sur la méthode CDF-t, se référer à (Vrac, 2012).

L'approche CDF-t peut être perçue comme une extension de la méthode de correction de biais dite par « quantile-quantile » (QQ) (cf *section 2.3.4.2*) connue depuis plus de 50 ans en statistiques (Haddad and Rosenfeld, 1997) mais appliquée au climat uniquement depuis quelques années (Déqué, 2007).

2.3.4.4 SDSM (Modèle de réduction d'échelle statistique)

Le Modèle de descente d'échelle statistique (SDSM) représenté sur la *Figure F2.2*, est un outil d'aide à la décision conçu par les Wilby et al, 2002 afin d'évaluer les répercussions des changements climatiques locaux au moyen d'une technique robuste de réduction d'échelle statistique. C'est un hybride entre un générateur stochastique de données météorologiques et une méthode de régression linéaire multiple qui facilite le développement rapide de multiples scénarios (i.e. faible coût de calcul) en un seul site pour les variables météorologiques quotidiennes dans des conditions de forçages climatiques actuels et futurs. SDSM a été conçu pour aider l'utilisateur à identifier les variables climatiques globales (les variables *prédicteurs*) qui expliquent la majeure partie de la variabilité climatique (du *prédicteand*) en un lieu particulier, et des modèles statistiques sont alors construits à partir de ces informations. Les modèles statistiques sont construits au moyen des données quotidiennes observées, les données climatiques locales à propos d'un lieu particulier pour le *prédicteand*, et les données à grande échelle de NCEP pour les variables *prédicteurs*; et ces modèles sont ensuite utilisés avec les variables *prédicteurs* issues des Modèles de Circulation Générale pour obtenir les données météorologiques quotidiennes à l'endroit en question pour une période future.

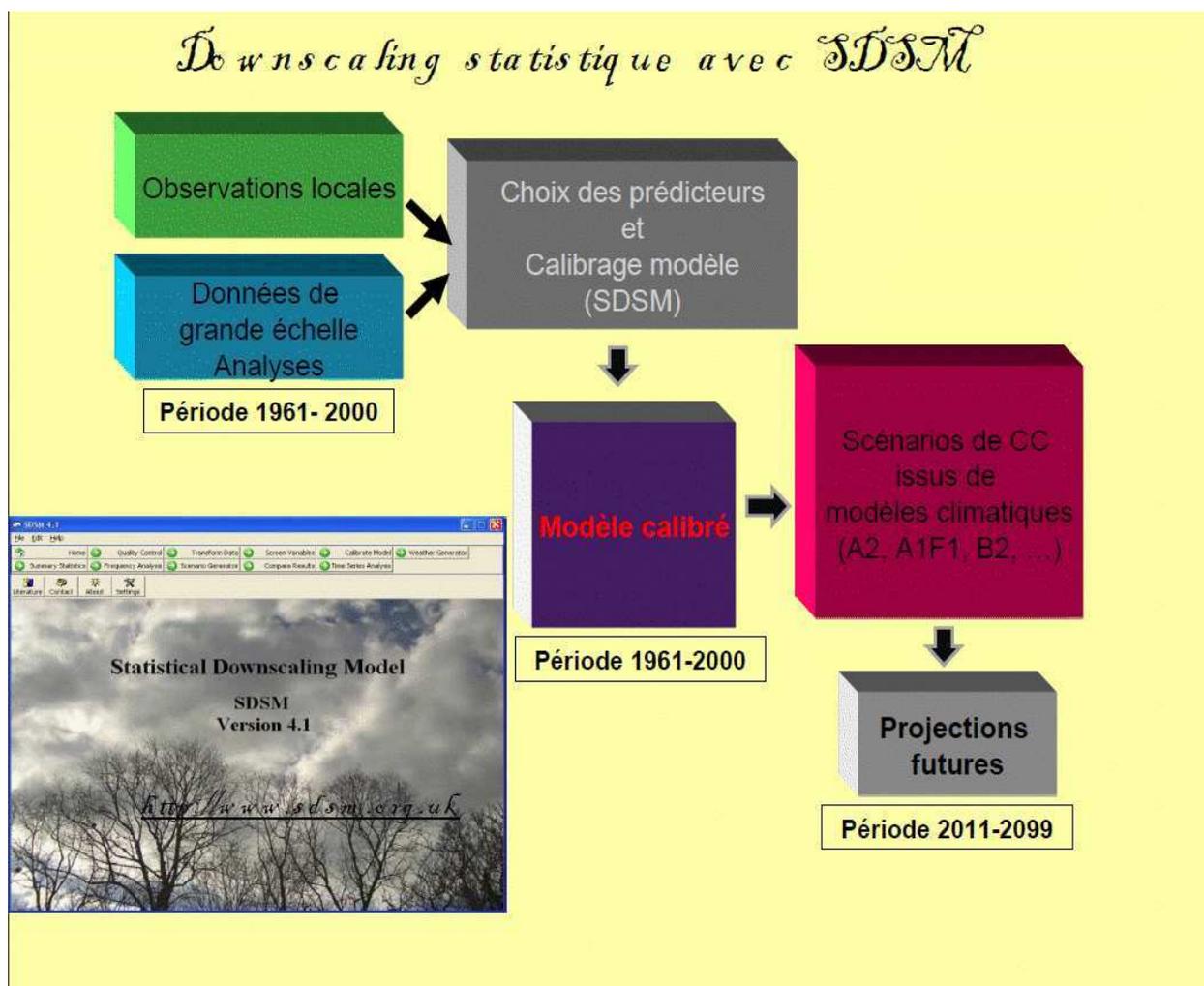


Figure F2.2: Schéma représentant la descente d'échelle statistiques (SDSM)

2.3.5 Schéma récapitulatif: les différentes étapes de descente d'échelle mises en œuvre

Comme dans le projet Cyprim (cf *fiche de synthèse n°1*), une méthodologie innovante fondée sur l'association de méthodes de descente d'échelle dynamique et statistique (*Figure F2.3*) a été mise en place et sera comparée avec SCRATCH10 (cf *fiche de synthèse n°4*). Tout d'abord, nous récupérons les simulations ENSEMBLES et les scénarii SCRATCH10 (Boé et al., 2006 ; pagé, 2008). Ensuite, deux méthodes CDF-t (Michelangeli et al., 2009) et SDMS (Wilby et al., 2002) permettant de descendre jusqu'à l'échelle de la station, sont mises en oeuvre. Puis nous avons utilisé une méthode de génération de pluies horaires pour fournir les données à haute fréquence comme entrée du modèle hydrologique de Véolia Eau Valence..

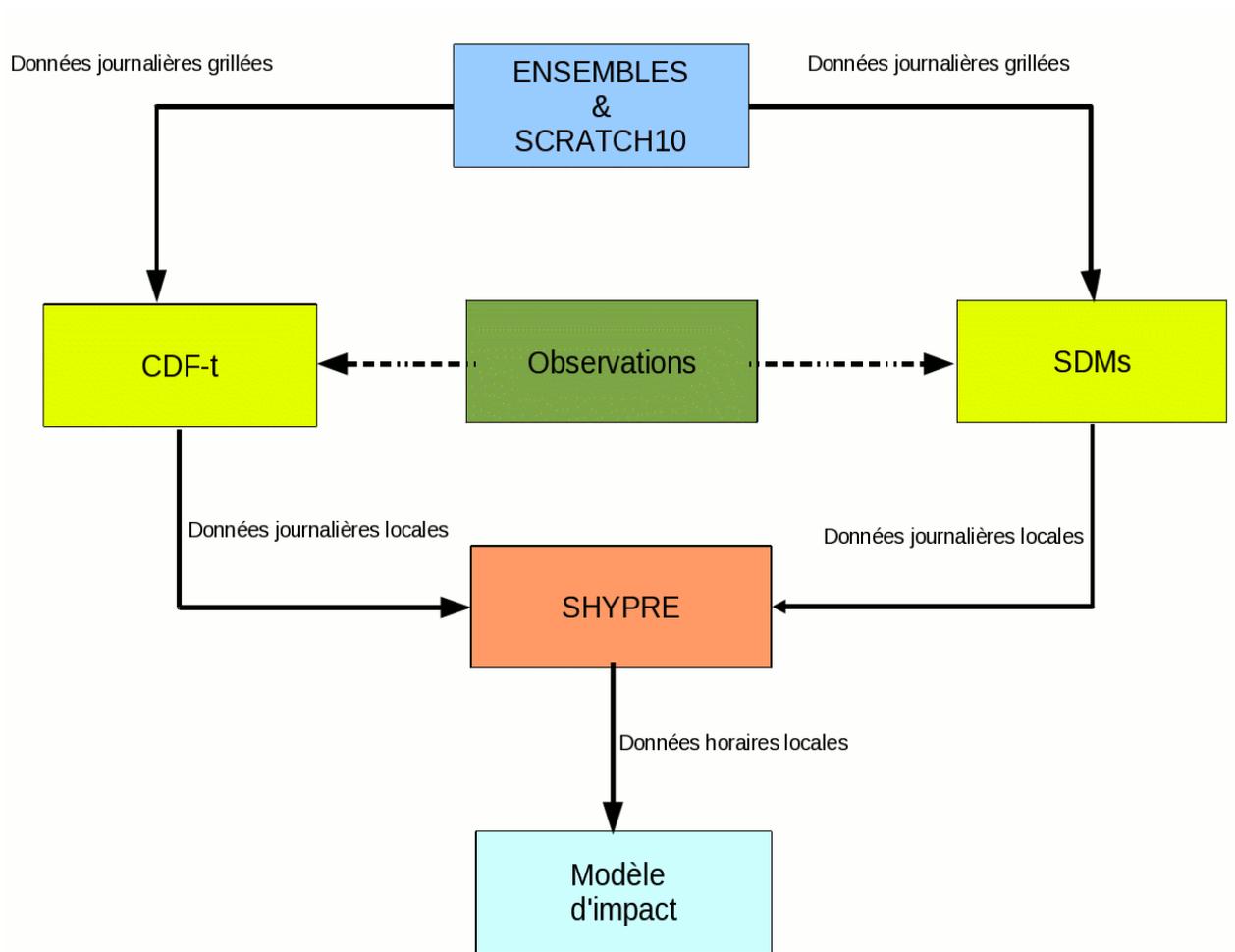


Figure F2.3: Différentes étapes de descente d'échelle mise en oeuvre dans INVULNERABLE

Bibliographie

Arnaud, P., J. Lavabre, B. Sol and C. Desouches, 2009 : Regionalization of an hourly rainfall generating model over metropolitan France for flood hazard estimation, *hydrological sciences journal*, 53:1, 34-47

Boberg F., P. Berg, P. Thejll, W. J. Gutowski et J. H. Christensen, 2008 : Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. *Clim. Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-008-0446-y.

Boé J., L. Terray, F. Habets et E. Martin, 2006 : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111, D23106, DOI: 10.1029/2005JD006889.

Cantet, P., 2009 : Impacts du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation d'un générateur stochastique de pluies. *Thèse de l'Université de Montpellier II*, 27-34

Déqué M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 1-2, 16-26.

Gibelin A. L. and Déqué M. (2003): Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, 20, 327-339.

Giorgi F., 2006 : Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, DOI: 10.1029/2006GL025734.

Haddad, Z. S. and D. Rosenfeld, 1997 : Optimality of empirical z-r relations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 123 : 1283-1293.

Habets F., A. Boone, J.-L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana-Segui, F. Rousset-Regimbeau et P. Viennot, 2008 : The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, DOI:10.1029/2007/JD008548.

Hess, P. and Brezowsky, H. (1977): Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-1976). In: *Berichte des Deutschen Wetterdienst* Band 15, Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienst.

Hingray, B. et Mezghani, A., 2009: A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *Journal of Hydrology*, 377, 245-260

IPCC, 2007 : Climate change 2007. Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.

Jones, P.D., Hulme, M. and Briffa, K.R. (1993): A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *International Journal of Climatology* 13, 655-663.

Lamb, H.H. (1972): British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861-1971. *Geophysical Memoir* 116, HMSO, London.

Michelangeli, P., M. Vrac, and H. Loukos (2009), Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions, *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi:10.1029/2009GL038401.

Pagé, C., 2008 : Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS. Technical Report TR/CMGC/08/27, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS).

Ricard D., 2005 : Modélisation à haute résolution des pluies intenses dans les Cévennes : le système convectif des 13 et 14 octobre 1995. *La Météorologie*, 8e série, 48, 28-38.

Vrac, M., 2012 : Modélisations statistiques à différentes échelles climatiques et environnementales. *Habilitation à Diriger des Recherches*, 79-82

Wilby, R.L. (1997): Non-stationarity in daily precipitation series: implications for GCM downscaling using atmospheric circulation indices. *International Journal of Climatology* 17, 439-454.

Wilby, R., C. Dowson, and E. Barrow (2002), SDMS – A decision support tool for the assesment of regional climate change impacts, *Environ. Model. Software*, 17, 147 – 159.

Wilks, D.S. (1999a): Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. *Climate Research* 11, 125-136.

Wilks, D.S. (1999b): Simultaneous stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation at multiple sites in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 96, 85-101.

Wilks, D.S. and Wilby, R.L. (1999): The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography* 23, 329-357.

Zorita, E. and Storch, H. V., 1998: The analog Method as a Simple Statistical Dowsaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. *J. of Climate*, 12, 2474-2489

FICHE DE SYNTHÈSE N°3

Caractérisation des événements pluvieux en région Méditerranée

Auteurs :

Y. Sané (IPSL);

P. Braconnot (IPSL / LSCE) ; S. Planton (CRM-GAME)

3.1 Introduction

L'un des buts de notre projet INVULNERABLE est de construire des dispositifs efficaces de gestions des réseaux d'assainissement fondés sur une approche scientifique fine des précipitations. L'acquisition de connaissances sur les événements pluvieux, qui se situent en amont des processus, constitue un souci essentiel de l'action engagée (Chocat, 1989). Dans ce cadre, cette fiche a pour objectif de faire une synthèse des principaux résultats issus de la caractérisation des événements pluvieux dans la région méditerranéenne. Elle est rédigée dans le cadre du projet INVULNERABLE, et s'inscrit plus particulièrement dans la comparaison des événements pluvieux aux débordements de la station d'épuration de Romans (Véolia).

3.2 Zone d'étude

La zone géographique d'étude 44N-45.2N ; 4E-5.5E est incluse dans la zone méditerranéenne. La station d'épuration de Romans (carré le plus grand dans la figure 3.1 a pour coordonnées 45N ;5E et se situe dans la vallée du Rhone délimitée par le massif central et les Alpes. Les petits carrés numérotés représentent les stations.

3.3 Objectifs

L'objectif de cette analyse est de caractériser les événements pluvieux (intensité, fréquence, durée) autour de ROMANS et ensuite de faire le lien avec le débordement. Cette analyse de la distribution spatiale des pluies est fondée sur l'utilisation des observations des stations de Météo-France. Une autre approche dynamique, recoupe les facteurs de toutes échelles locale ou globale avec des données et des outils de l'analyse synoptique. L'objectif du partenaire Veolia Eau est l'amélioration de la connaissance des phénomènes à des fins d'anticipation pour alerte et de meilleure gestion et régulation du réseau d'assainissement.

3.4 Moyens d'étude

Nous disposons des données de précipitations horaires sur 18 stations (tab.3.1) autour de Romans pour différentes périodes de 1992 à 2009. Sur la figure 3.2 est représentée le maximum de précipitations horaires enregistré

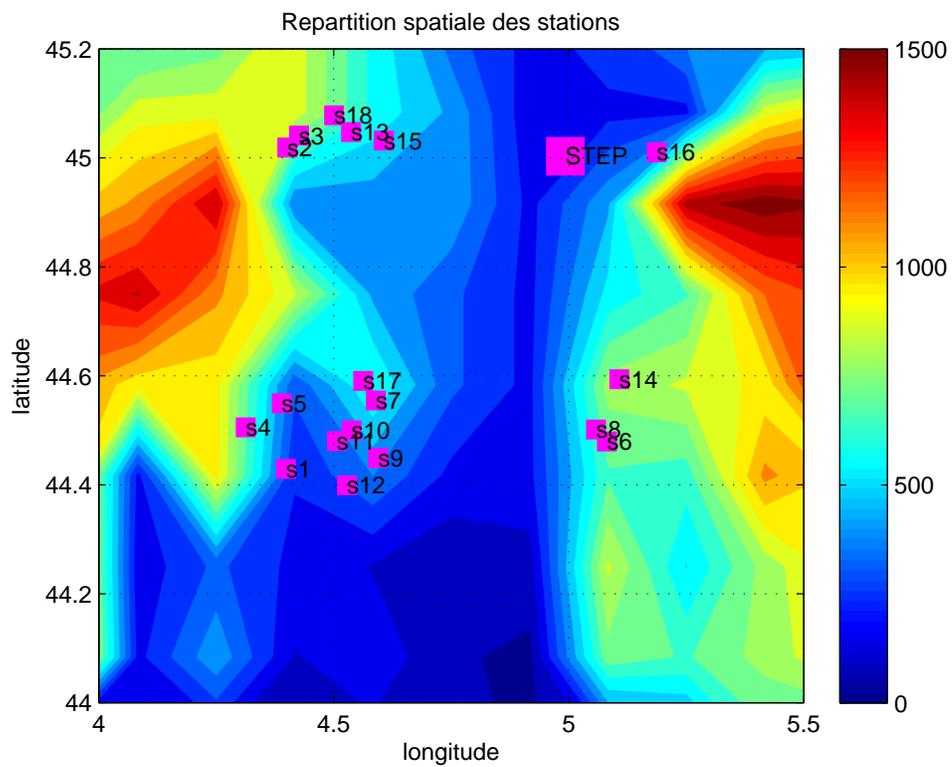


FIG. 3.1 – Zone d'étude avec le relief

Stations	Code	Nom stations	Coord. stations	Début-fin
1	07066001	CHOMERAC	44.42N ; 4.39E	1993022800-2009123123
2	070.5001	COLOMBIER-LE-JEUNE	45.01N ; 4.40E	1993010100-2009123123
3	07069001	COLOMBIER-LE-VIEUX	45.04N ; 4.42E	1999050200-2009123123
4	07096001	GLUIRAS	44.50N ; 4.31E	2004120300-2009123123
5	07338005	VERNOUX-EN-VIVARIS	44.54N ; 4.38E	1995050900-2009123123
6	26035001	BEAUFORT-SUR-GERVANNE	44.47N ; 5.08E	1993021600-2009123123
7	26064001	CHABEUIL	44.55N ; 4.58E	1997090100-2009123123
8	26100001	COMBOVIN	44.50N ; 5.05E	1992102300-2009123123
9	26115001	DIVAJEU	44.44N ; 4.59E	1992102300-2009123123
10	26124001	ETOILE-SUR-RHONE	44.49N ; 4.53E	1994092600-2009123123
11	26165001	LIVRON-SUR-DROME	44.48N ; 4.50E	1999033000-2009123123
12	26176001	MARSANNE	44.39N ; 4.52E	1992102300-2009123123
13	26179001	MERCUROL	45.04N ; 4.53E	1993101100-2009123123
14	26273002	ROCHFORT-SAMSON	44.59N ; 5.10E	1999033000-2009123123
15	26281001	ROMANS-SUR-ISERE	45.03N ; 4.60E	1992100100-2009123123
16	26307001	SAINT-JEAN-EN-ROYANS	45.01N ; 5.18E	1994112900-2009123123
17	26313001	SAINT-MARCEL-LES-VALENCE	44.59N ; 4.56E	1992102300-2009123123
18	26380002	GERVANS	45.07N ; 4.50E	2009033000-2009123123

TAB. 3.1 – Stations de Météo-France autour de Romans-sur-Isère

par les stations sur l'ensemble des événements pluvieux. On note ainsi une variabilité des précipitations dans cette région. La répartition des événements pluvieux est non homogène.

3.5 Caractérisations des événements pluvieux

Dans cette partie, nous allons mettre à profit les données issues du réseau de mesure pour caractériser le plus finement possible la distribution des événements pluvieux et analyser la récurrence spatiale des phénomènes et évaluer leur lien avec les débordements. Le calcul en été et en hiver du nombre d'événements pluvieux, intensité et durée est fait avec une méthode classique de détermination d'événement pluvieux (Sane et al., 2011) et avec la méthode du CEMAGREF (Arnaud et al., 2007). Les stations seront classées suivant leur nombre d'événements pluvieux, intensité et durée en utilisant deux méthodes de classification ; la méthode K-means et la classification hiérarchique.

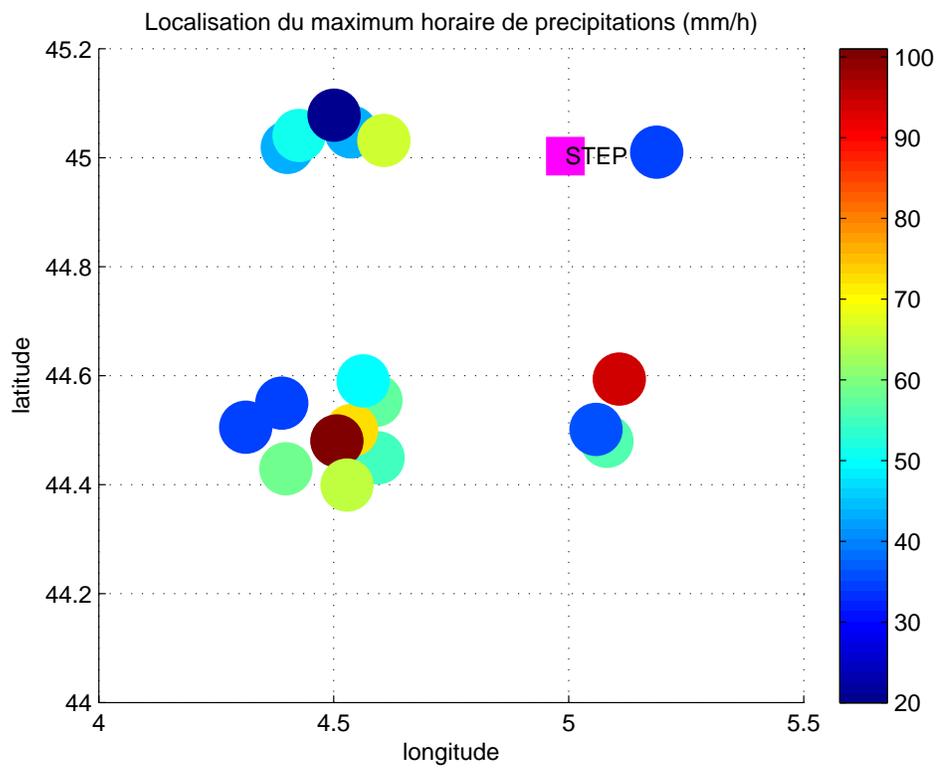


FIG. 3.2 – Maximum de précipitations journalière (mm/h) sur les stations

3.5.1 Méthode classique (sane et al., 2011)

A partir des enregistrements d'un pluviographe, on définit le début d'un événement pluvieux par le moment où le taux horaire de précipitation enregistré par le pluviographe devient strictement positif, et sa fin lorsque le taux de pluie horaire redevient nul. L'intensité de l'événement est le cumul des précipitations enregistré du début à la fin de l'événement pluvieux. La durée est définie par la différence entre la fin et le début de l'événement.

3.5.2 Méthode du CEMAGREF (arnaud et al., 2007)

Dans cette méthode, l'événement pluvieux est caractérisé par une succession de pluies journalières supérieures à 4 mm comprenant au moins un cumul journalier supérieur à 20 mm. A partir de ces événements on définit trois variables issues de l'information journalière :

- NE (occurrence des événements) est le nombre moyen d'événements par année,
 - μPJ_{max} (intensité des événements) est la moyenne, sur tous les événements, de la pluie maximale en un jour,
 - DTOT (durée des événements) est la durée moyenne (en jours) d'un événement.
- De plus on distingue deux saisons : l'été de juin à novembre et l'hiver de décembre à mai.

3.5.3 Classification des stations

Les figures 3.3, 3.4 et 3.5 montrent respectivement l'occurrence d'événements pluvieux, la durée et l'intensité en été et en hiver. Les cercles montrent l'ordre de grandeur et le niveau de couleur indique le relief de la région. La couleur rouge montre les zones montagneuses et celle bleue les zones creuses.

Pour faire la classification des stations à partir de la caractérisation des événements pluvieux, nous avons utilisé deux techniques de classification ; K-means et la classification hiérarchique.

3.5.3.1 K-means

Une des techniques de classification non supervisée (clustering) les plus utilisées.

Etant donné un entier K , K-means partitionne les données en K groupes, ou "clusters", ou "classes" ne se chevauchant pas. Ce résultat est obtenu en positionnant K "prototypes", ou "centroïdes" dans les régions de l'espace les plus peuplées. Chaque observation est alors affectée au prototype le plus proche (règle dite "de la

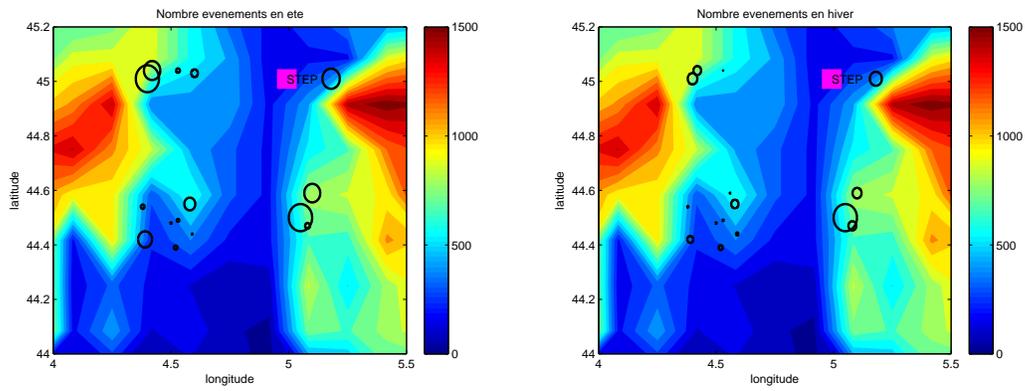


FIG. 3.3 – Nombre d'événements pluvieux

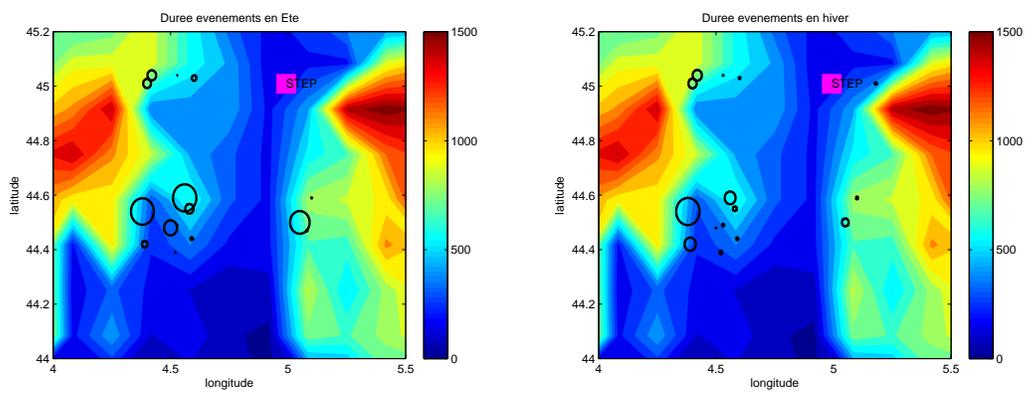


FIG. 3.4 – Durée d'événements pluvieux

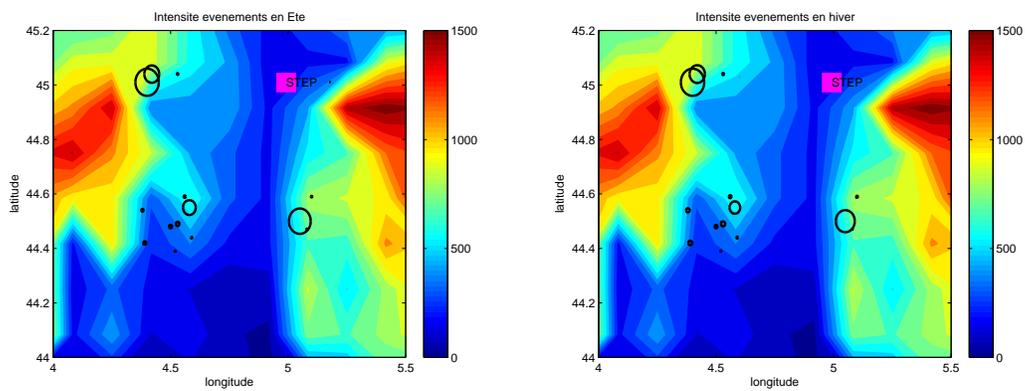


FIG. 3.5 – Intensité d'événements pluvieux

Distance Minimale"). Chaque classe contient donc les observations qui sont plus proches d'un certain prototype que de tout autre prototype. Les prototypes sont positionnés par une procédure itérative qui les amène progressivement dans leur position finale stable.

La grande popularité de K-means vient de :

- Sa simplicité conceptuelle.
- Sa rapidité et ses faibles exigences en taille mémoire.

Mais elle souffre également de certains défauts :

- L'utilisateur doit choisir a priori la valeur de K, le nombre de classes. Ce choix peut se faire par simple examen visuel dans le cas de données bidimensionnelles, mais il n'en est pas de même pour des données de dimension supérieure. Il n'existe en général pas d'indication claire sur le nombre approprié de classes, et un "mauvais choix" pour la valeur de K conduira alors à une typologie sans rapport avec la réalité.

- Pour une valeur donnée de K, les classes obtenues dépendent beaucoup de la configuration initiale des prototypes, ce qui rend l'interprétation des classes difficile.

- K-means est une technique objective, ce qui veut dire qu'elle minimise la valeur d'un certain critère numérique. C'est donc une technique d'optimisation. Comme c'est souvent le cas en optimisation, l'algorithme K-means s'arrête lorsqu'il ne peut plus faire baisser la valeur du critère. Cependant, il est tout à fait possible qu'une autre configuration des prototypes conduise à des valeurs encore plus faibles du critère. Dans le vocabulaire de l'optimisation, on dit que K-means atteint un minimum local, mais ne peut pas garantir d'atteindre le minimum global du critère (valeur la plus faible possible).

3.5.3.2 Classification hiérarchique

L'objectif de cette méthode de classification hiérarchique est de classer des individus en groupes ayant un comportement similaire sur un ensemble de variables. On commence par agréger les 2 individus les plus proches. Puis, on continue en agrégeant les éléments (individus ou groupes d'individus) les plus semblables. Ces agrégations sont effectuées 2 à 2.

L'algorithme continue jusqu'à ce que l'ensemble des individus se retrouve dans une

Classification	Méthode	Saison	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4	Gr5
Kmeans	SHYPRE	Ete	5,11,17	1,6,9	3,7	2	8
			5,11,17	10,12,13			
			5,11,17	14,15,16			
Kmeans	SHYPRE	Hiver	6,14,16	9,10,11 12,13,16	2,3,7	1,5,17	8
Kmeans	SHYPRE	Toute	1,14,16	6,9,10 11,12,13 15	2,3,7	5,17	8
Kmeans	classique	Toute	3,7,8	9,10,12 13,14,15 17	6,16	1,5,11	2
Hiérarchique	SHYPRE	Ete	5,17,11	12,13,6 10,9,15	1,14,16	3,7	2,8
Hiérarchique	SHYPRE	Hiver	1,17	11,13,10 15,9,12 6,14,16	2,3,7	5	8
Hiérarchique	SHYPRE	Toute	5,17	9,12,10 13,15,6 11	1,14,16	2,3,7	8
Hiérarchique	classique	Toute	1,11	13,17,9 10,15,14 12,5	3,7,6,16	2	8

TAB. 3.2 – Classification des stations Météo-France autour de la station d'épuration de ROMANS sur Isère

unique classe. Les individus sont donc regroupés de façon hiérarchique.

C'est parce que cette technique part du particulier pour remonter au général qu'elle est dite «ascendante». Chaque classe d'une partition est incluse dans une classe de la partition suivante.

Le principal problème de cette méthode hiérarchique consiste à définir le bon critère de regroupement de deux classes, c'est-à-dire trouver une bonne méthode de calcul des distances entre classes.

3.5.3.3 Résultats de la classification

Quelque soit la classification (tab.3.2), les groupes des stations (Colombier-le-vieux, Chabeuil) et (Dijaveu, Etoile-sur-Rhone, Marsanne, Mercurol) restent inchangés. Ces stations représentent les mêmes nombres d'événements, intensité

événements et durée suivant différentes méthodes de classification et de définition d'événement pluvieux. Les autres groupes de stations (Vernoux-en-vivarais, Saint-marcel-les-valence) et (Beaufort-sur-gervanne, Saint-jean-en-royans) représentent aussi les mêmes caractéristiques sur la majeure partie des méthodes de classification utilisées. Par contre la station Combovin est différente de presque toutes les stations. Elle représente un groupe à part sur toutes les méthodes de classification.

En récapitulant toutes les méthodes, la classification permet de dégager cinq groupes différents. La répartition de ces groupes est représentée sur la figure 3.6 où chaque couleur indique un groupe. Ces groupes sont :

Groupe 1 (Vernoux-en-vivarais, Livron-sur-drome, Saint-marcel-les-valence), caractérisé par un faible nombre d'événements en été et en hiver avec de faibles intensités qui durent longtemps.

Groupe 2 (Dijaveu, Etoile-sur-rhone, Marsanne, Mercuriol, romans-sur-isère), caractérisé par un nombre d'événements faible en été et en hiver avec de faibles intensités qui ne durent pas.

Groupe 3 (Chomerac, Beaufort-sur-gervanne, Rochefort-samson, Saint-jean-en-royans), caractérisé par un nombre d'événement moyen en été et en hiver avec de faibles intensités qui ne durent pas.

Groupe 4 (Colombier-le-jeune, Colombier-le-vieux, Chabeuil), caractérisé par un nombre événement important en été avec de fortes intensités d'une durée moyenne. En hiver, le nombre d'événements est moyen avec de fortes intensités d'une durée moyenne.

Groupe 5 (Combovin), cette station est particulière, elle a un nombre d'événements élevé en été et en hiver avec de fortes intensités et qui durent plus longtemps en été qu'en hiver.

On note sur la figure 3.6 que les classes de stations répondent à une certaine disposition du relief. Ainsi le groupe 1 correspond à un niveau inférieur à 100 m d'altitude, le groupe 2 à un niveau environ de 250 m, le groupe 3 environ 500 m et le groupe 4 et 5 vers 1000 m. On remarque que les stations se trouvant vers les altitudes de 1000 m ont des événements importants avec des intensités fortes qui durent.

3.6 Rôle des facteurs locaux dans la distribution des précipitations

L'étude a porté sur l'analyse de la distribution des intensités d'événements pluvieux ainsi que leur durée. Cette analyse montre qu'il n'existe pas de répartition

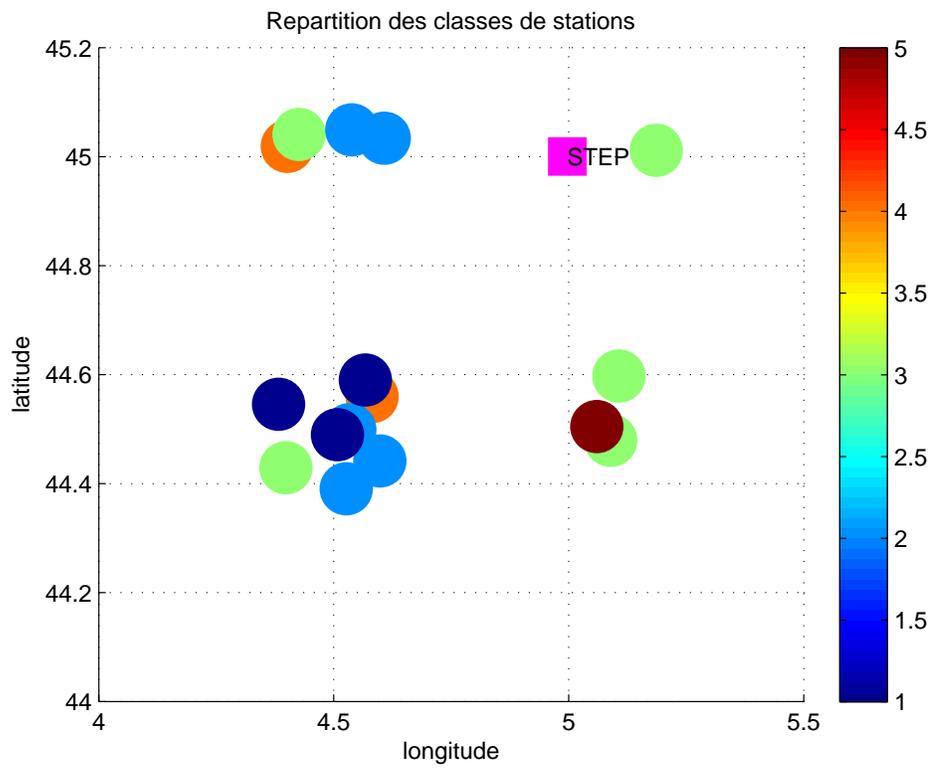


FIG. 3.6 – Groupe des stations

spatiale très stable et/ou homogène des événements pluvieux, d'un épisode à un autre. Au delà de ce constat général, dans le détail, on observe cependant quelques nuances plus ou moins marquées entre les types d'épisodes retenus.

Le tableau 3.3 montre les épisodes d'événements pluvieux sélectionnés pour un débordement de plus de $20000 m^3$. Dans 30% des cas, les précipitations sont réparties de façon relativement uniforme (fig.3.7) autour du réseau d'assainissement de Romans sur Isère. Les 70% des événements pluvieux, semblent donc se distribuer de façon a priori aléatoire (fig.3.8) sur la zone de Valence. Cela est une conséquence probabiliste liée à des mécanismes pluviogènes différents.

En résumé, nous pouvons dire qu'il existe une correspondance systématique entre la localisation des événements pluvieux et la topographie des secteurs affectés. Cependant, l'influence des facteurs locaux et en particulier de la topographie dont on a vu qu'elle est très contrastée sur la distribution spatiale des pluies, reste donc encore à évaluer et à valider.

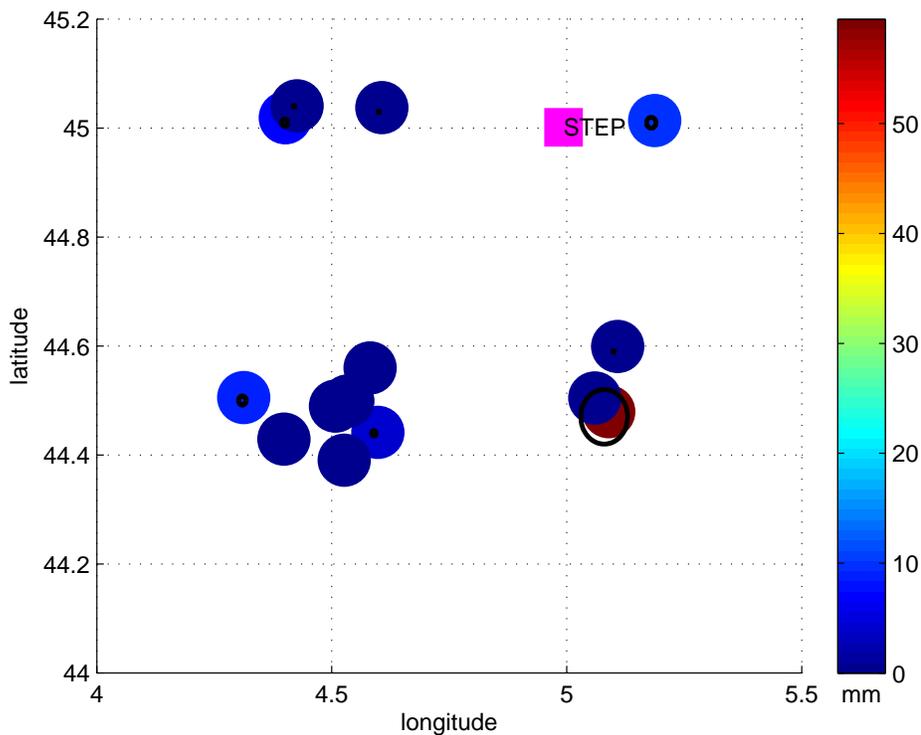


FIG. 3.7 – Distribution spatiale des précipitations du 27 octobre 2008 : intensité (mm) en niveau de couleur et durée en cercle

Episodes pluvieux	Secteur présentant les plus fort cumuls pluvieux
07/09/2003	Non homogène
28/09/2003	Non homogène
31/10/2003	Sud-Ouest
27/11/2003	Non homogène
01/12/2003	Homogène
28/12/2003	Non homogène
22/02/2004	Sud-Ouest
13/03/2004	Non homogène
10/08/2004	Sud-Ouest
17/08/2004	Homogène
25/10/2004	Homogène
26/10/2004	Non homogène
15/04/2005	Non homogène
16/04/2005	Non homogène
17/04/2005	Sud-Ouest
21/10/2005	Nord-Est
04/11/2005	Non homogène
08/05/2006	Homogène
15/09/2006	Non homogène
17/11/2006	Sud-Est
08/12/2006	Homogène
31/05/2007	Non homogène
14/06/2007	Homogène
22/11/2007	Non homogène
11/01/2008	Non homogène
12/08/2008	Est
03/09/2008	Non homogène
04/09/2008	Homogène
06/09/2008	Sud
07/09/2008	Homogène
27/10/2008	Homogène

TAB. 3.3 – Episodes d'événements pluvieux sélectionnés pour un débordement de plus de 20000 m^3

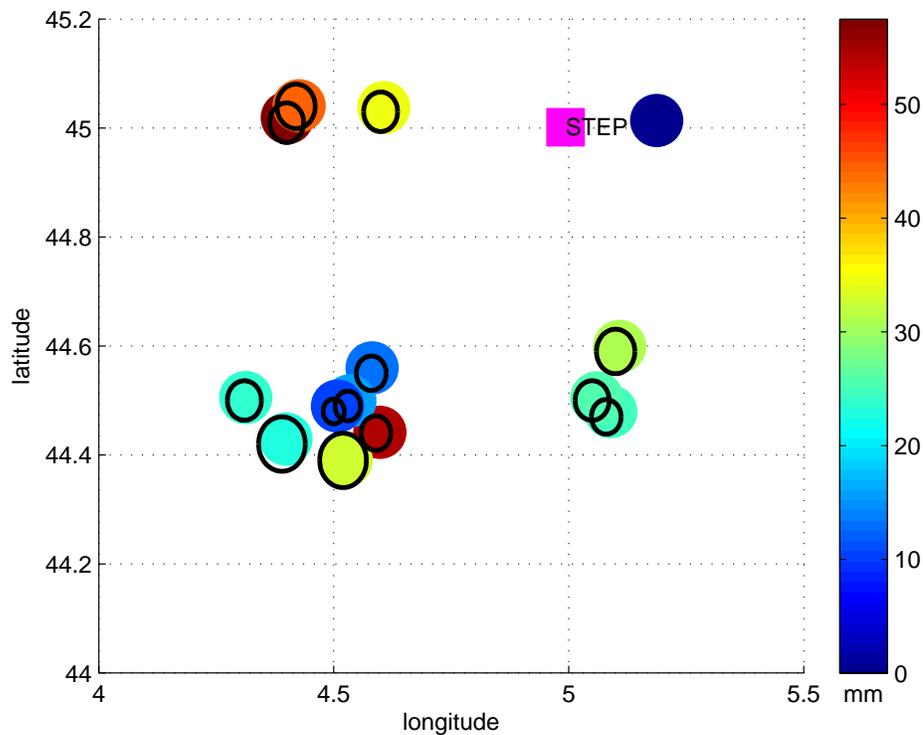


FIG. 3.8 – Distribution spatiale des précipitations du 7 septembre 2003 : intensité (mm) en niveau de couleur et durée en cercle

3.7 Comparaison intensité événement et débordement

La zone étant non homogène, nous avons choisie la station la plus proche du réseau d'eau usée pour faire le lien entre les précipitations et le débordement. Pour simplifier l'étude, les débordements de plus de 20 000 m³ ont été choisie. Au total, 31 épisodes ont donc été retenus entre 2003 et 2008. Ce choix discriminant, peut paraître subjectif. Il a été, pour partie, conditionné par des objectifs opérationnels. Tous les épisodes sélectionnés sont en effet corrélés avec les événements pluvieux. Par ailleurs, l'ensemble des pluies mesurées par les stations de Météo-France sont aussi analysées. L'étude sur l'analyse de la distribution des intensités maximales des événements pluvieux, montre qu'il n'existe pas de répartition spatiale très stable ou homogène.

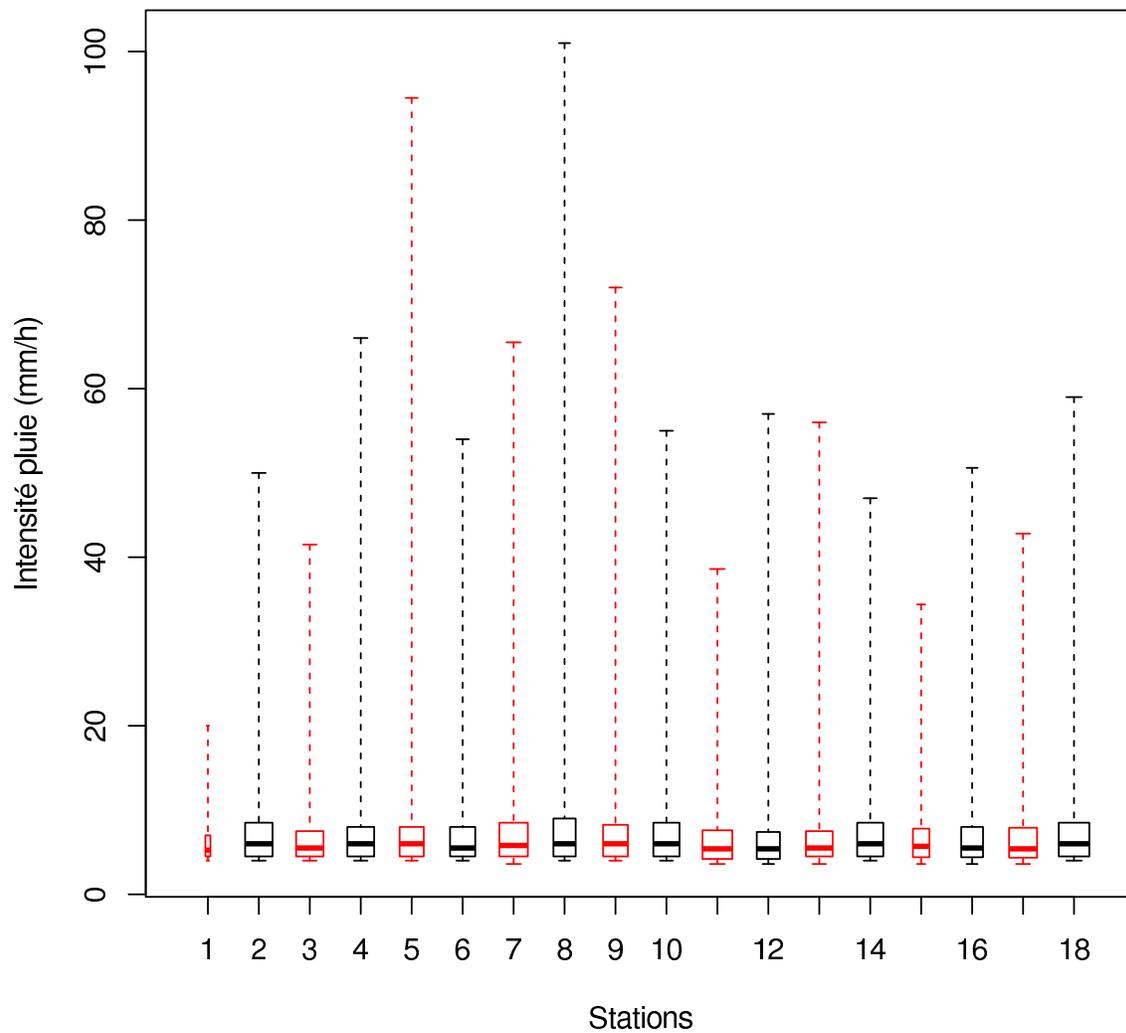
Distribution q99 des précipitations autour de ROMANS sur Isère

FIG. 3.9 – Distributions du 99 percentile des précipitations autour de ROMANS sur Isère

La figure 3.9 montre la distribution du 99 percentile des données des stations. On note que la distribution des données est différente au niveau des stations. Ceci montre une variabilité des précipitations au niveau de cette zone. Par exemple, cinq stations ont pu recueillir des précipitations horaires de plus de 60 mm/h. Les deux figures fig.3.10 et fig.3.11 se ressemblent, mais diffèrent du fait qu'on trace sur la fig.3.10 le maximum de l'intensité de l'événement d'une journée ainsi que l'indice max de la même journée alors que dans la fig.3.11, nous avons tracé la somme pour une journée des intensités d'événements et aussi la somme des indices d'une journée. On prend en compte pour la figure fig.3.11 tous les événements du jour. Nous observons sur ces deux figures que le débordement est lié à l'intensité de l'événement pluvieux; plus l'intensité de l'événement pluvieux est abondante, plus le débordement est grand.

Et sur la figure 3.12, nous constatons qu'il n'y a pas une relation directe entre l'intensité maximale horaire et le débordement au niveau de la station d'épuration. En regardant en terme d'événement pluvieux sur la figure 3.13, nous n'avons pas une relation linéaire entre l'intensité totale de l'événement et le maximum de l'événement avec une corrélation de 0.76, ni avec la durée de l'événement avec une corrélation de 0.61. Nous notons sur cette même figure 3.13 que tous les événements pluvieux avec un maximum d'intensité de l'événement supérieur à 15 mm/h ne dure pas plus de 10h. Par contre, aucune corrélation est notée entre le débordement et l'indice de l'événement qui est l'intensité de l'événement sur la durée (corrélation de 0.06) mais aussi avec l'intensité maximale de l'événement (corrélation égale à 0.02).

En regardant le lien entre l'intensité de l'événement et le débordement par saison (fig.3.14 pour janvier, février, mars; fig.3.15 pour avril, mai, juin; fig.3.16 pour juillet, août, septembre; fig.3.17 pour octobre, novembre, décembre), nous retrouvons les bonnes corrélations. En résumé, l'intensité de l'événement pluvieux explique en partie les débordements (76%).

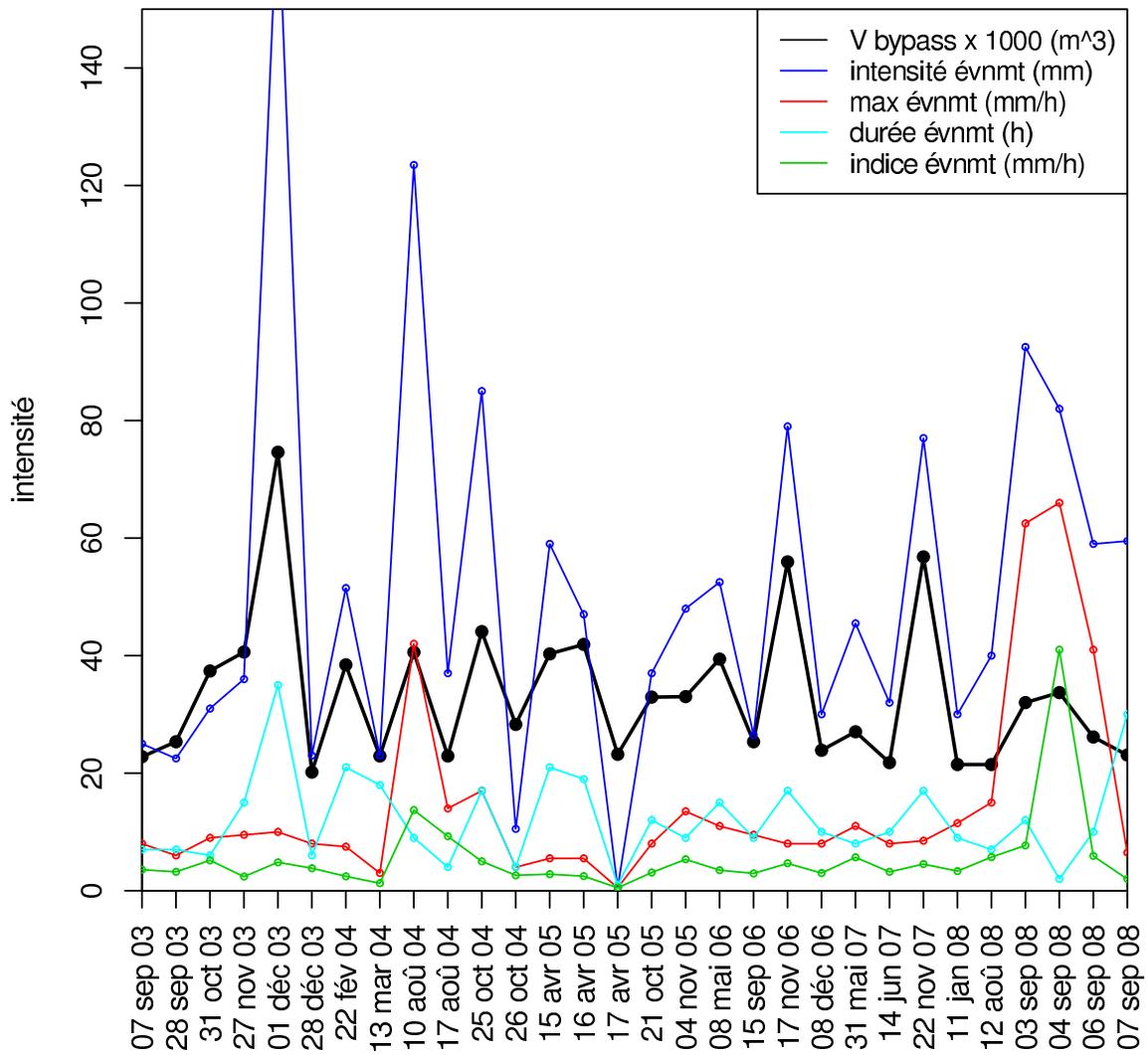


FIG. 3.10 – intensité, maximum, durré, indice vs. volume* $10^{-3} m^3$) de débordement

Comparaison événement pluvieux et Volume bypass STEP

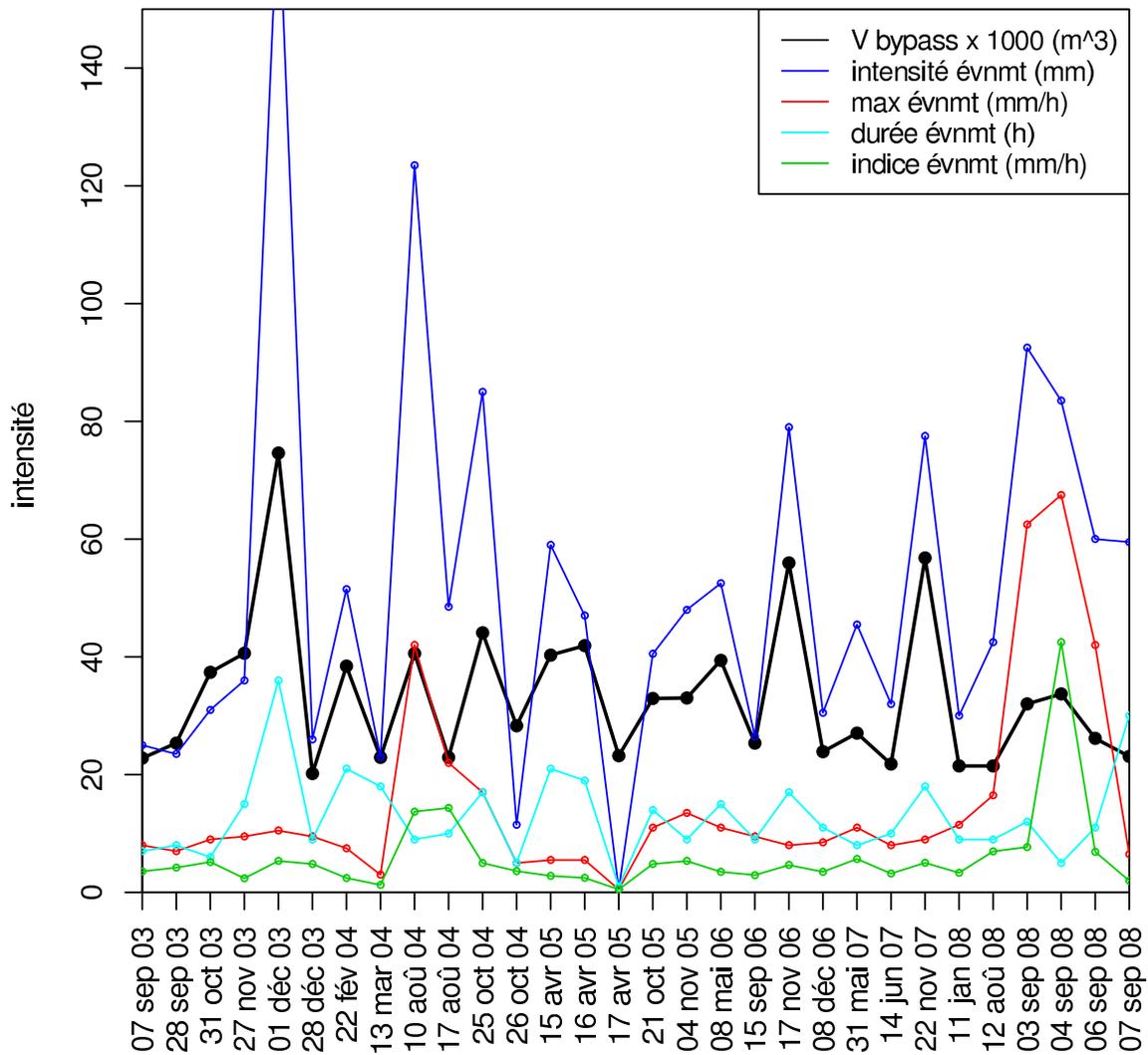


FIG. 3.11 – intensité, maximum, durré, indice vs. volume* $10^{-3} m^3$) de débordement

Comparaison intensité maximale et Volume bypass STEP

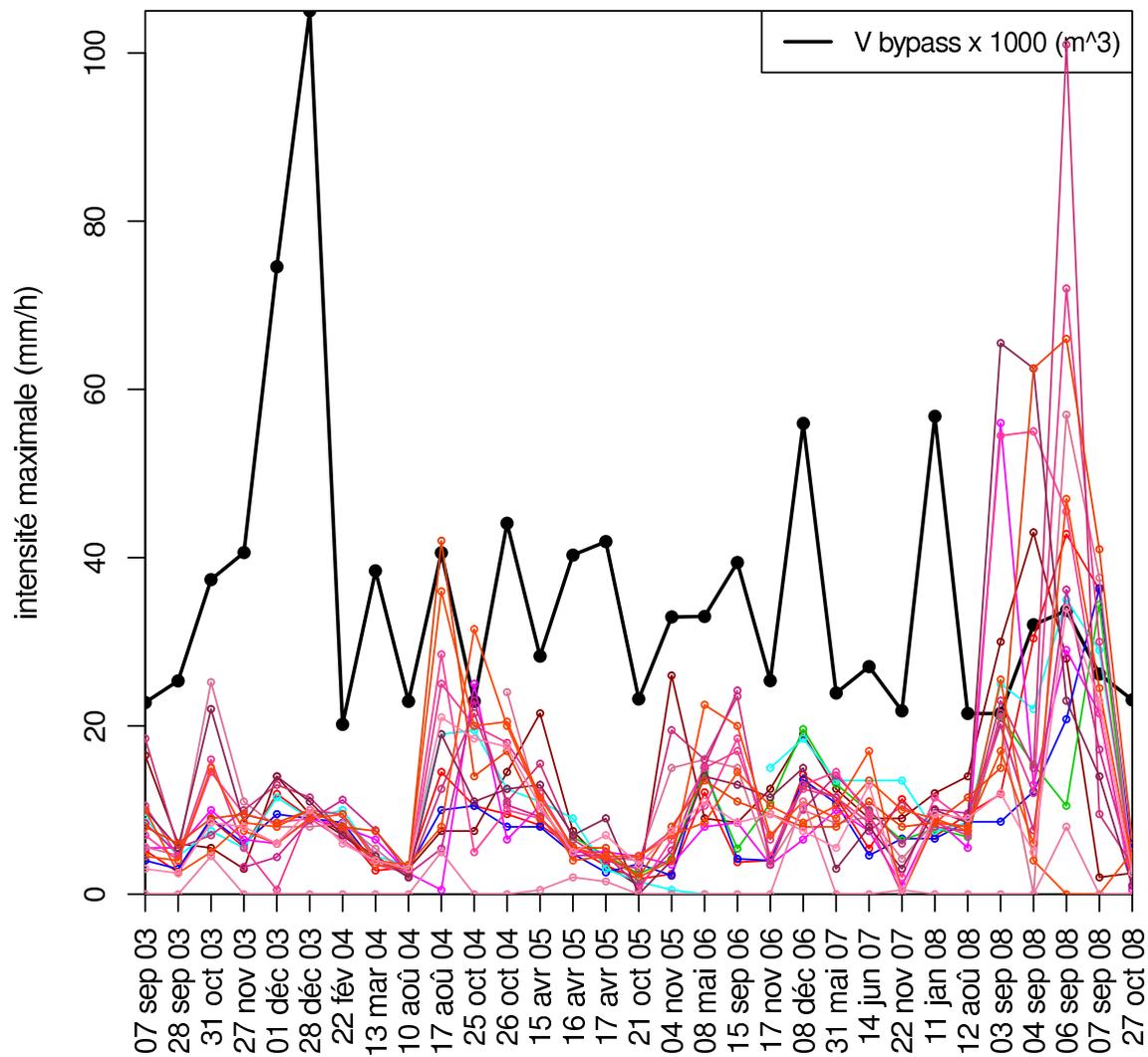


FIG. 3.12 – Intensité (mm/h) maximale journalière vs. volume* 10^{-3} m³) de débordement

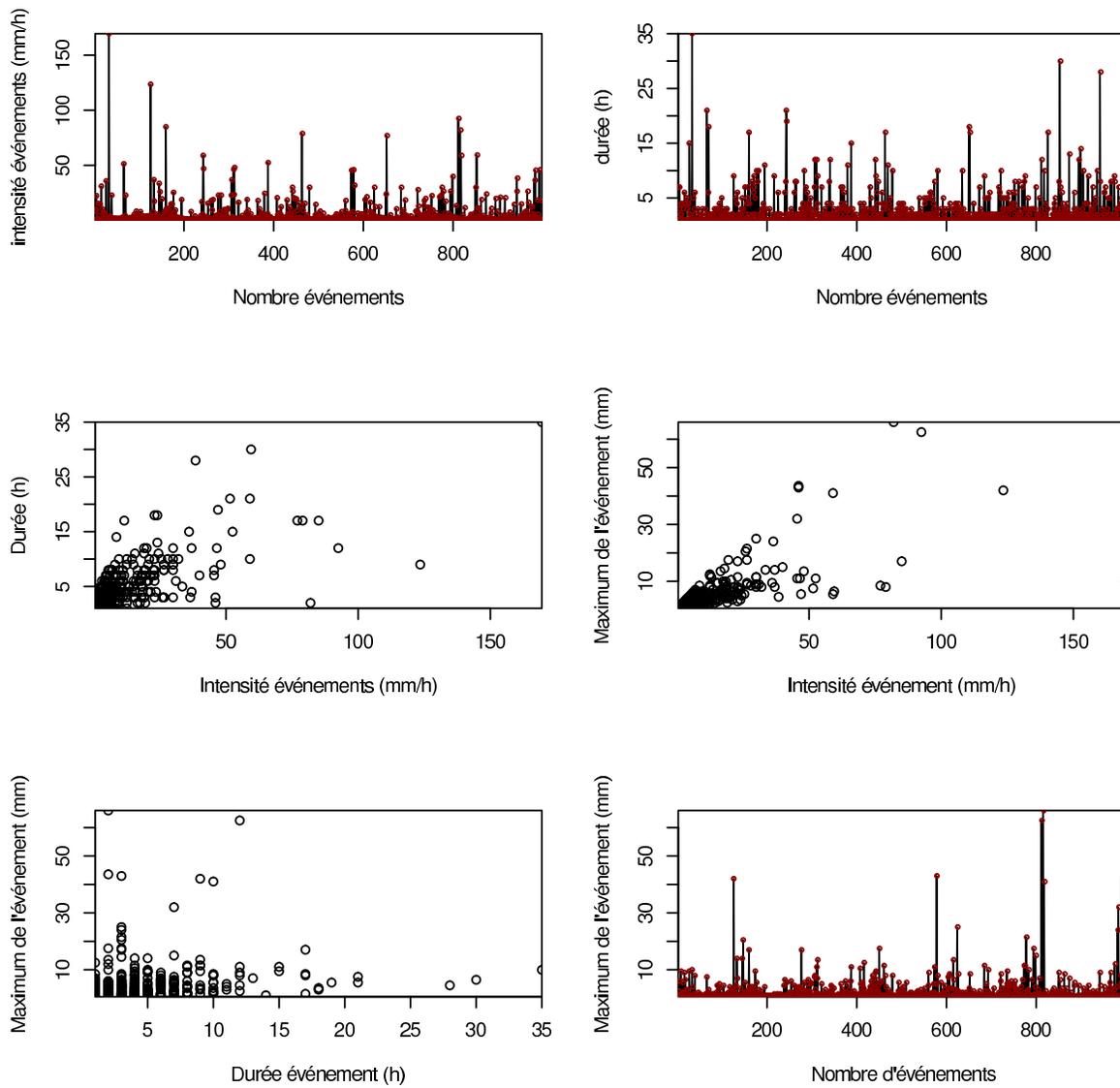


FIG. 3.13 – Caractérisation des événements pluvieux au niveau de ROMANS SUR ISERE

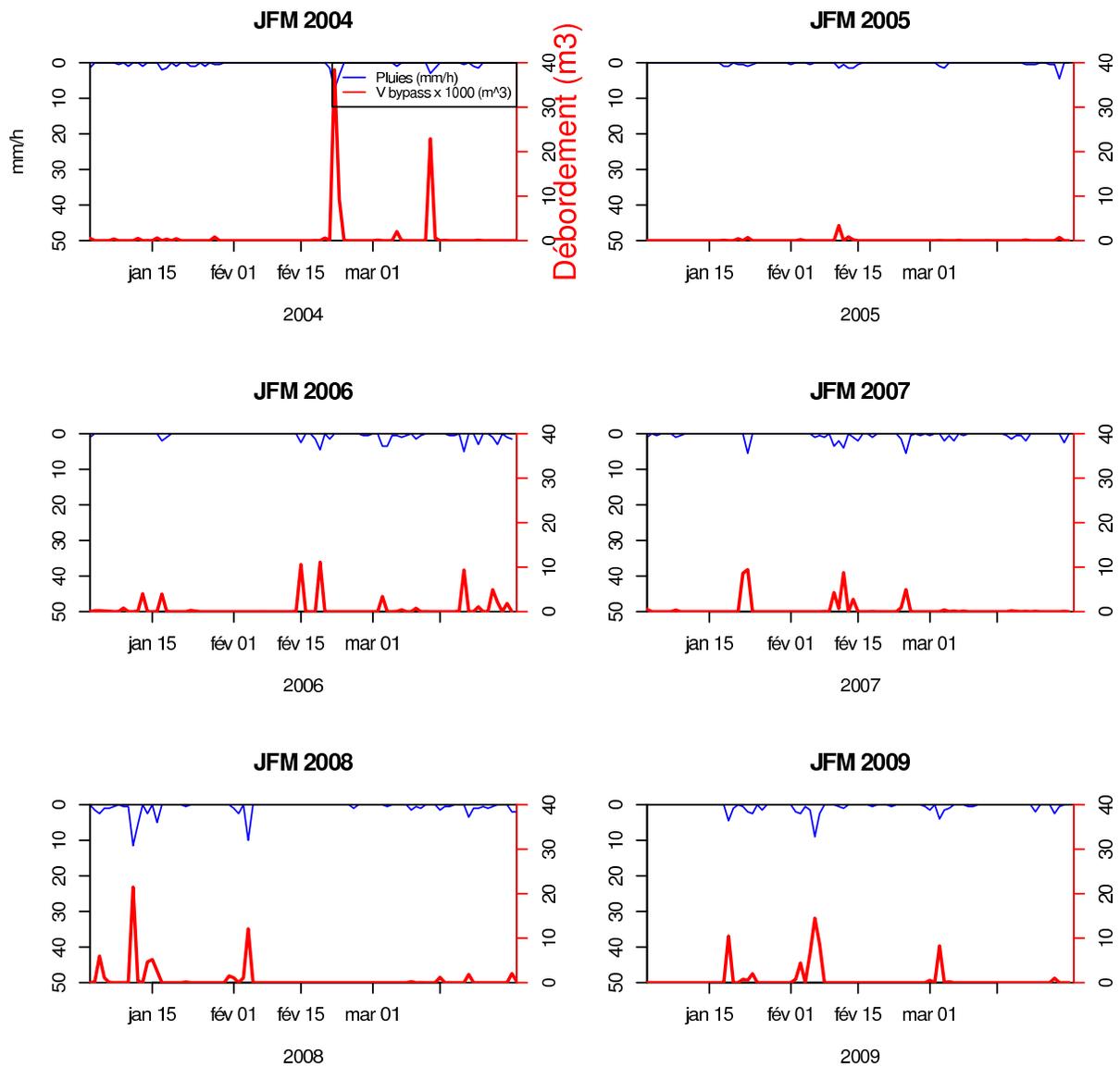


FIG. 3.14 – Intensité (mm/h) maximale journalière (en rouge) et volume ($1000 \cdot m^3$) de débordement (en bleu) en fonction du temps de 2003 à 2009

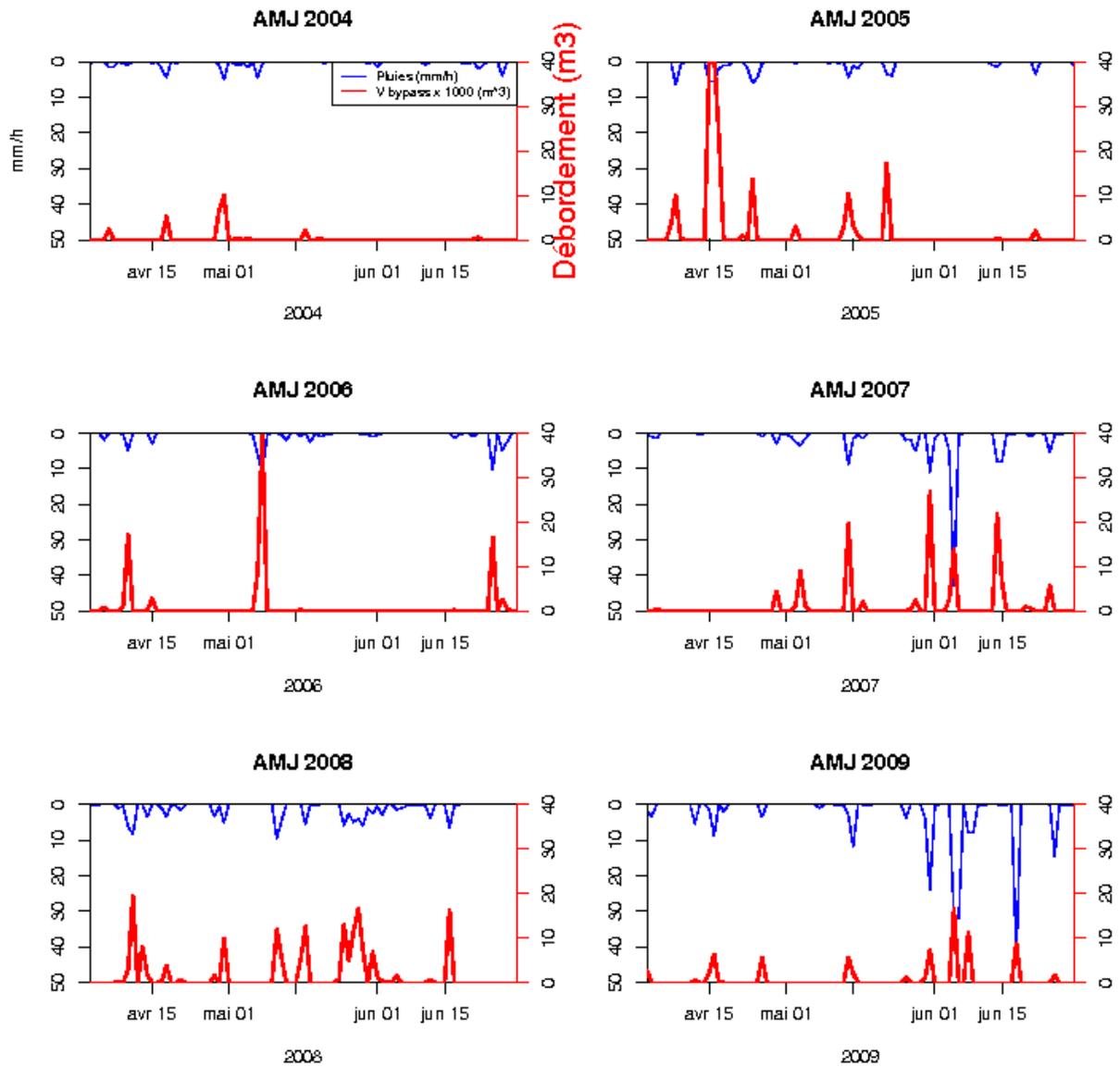


FIG. 3.15 – Intensité (mm/h) maximale journalière (en rouge) et volume ($1000 \cdot m^3$) de débordement (en bleu) en fonction du temps de 2004 à 2009

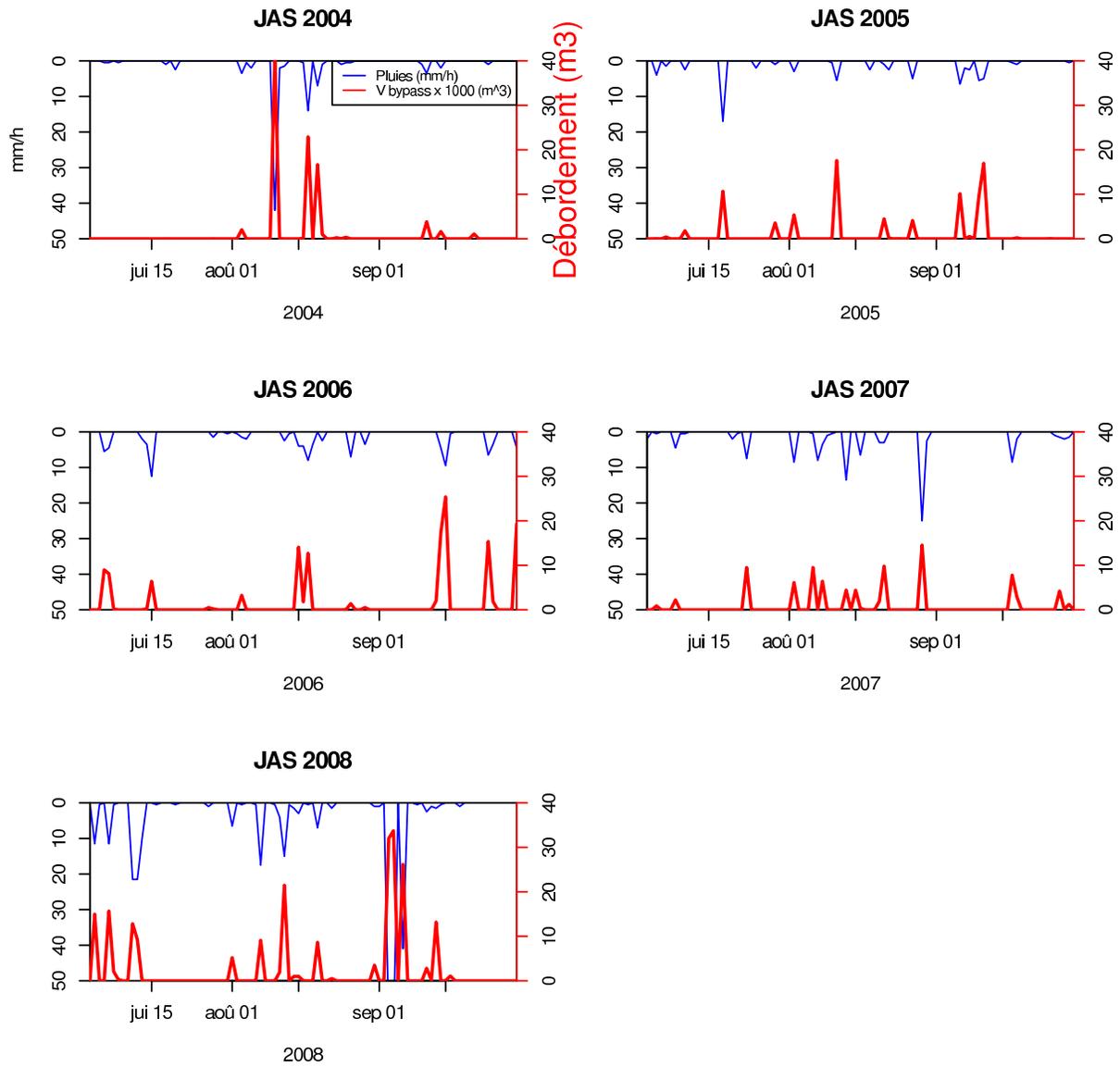


FIG. 3.16 – Intensité (mm/h) maximale journalière (en rouge) et volume ($1000 \cdot m^3$) de débordement (en bleu) en fonction du temps de 2004 à 2009

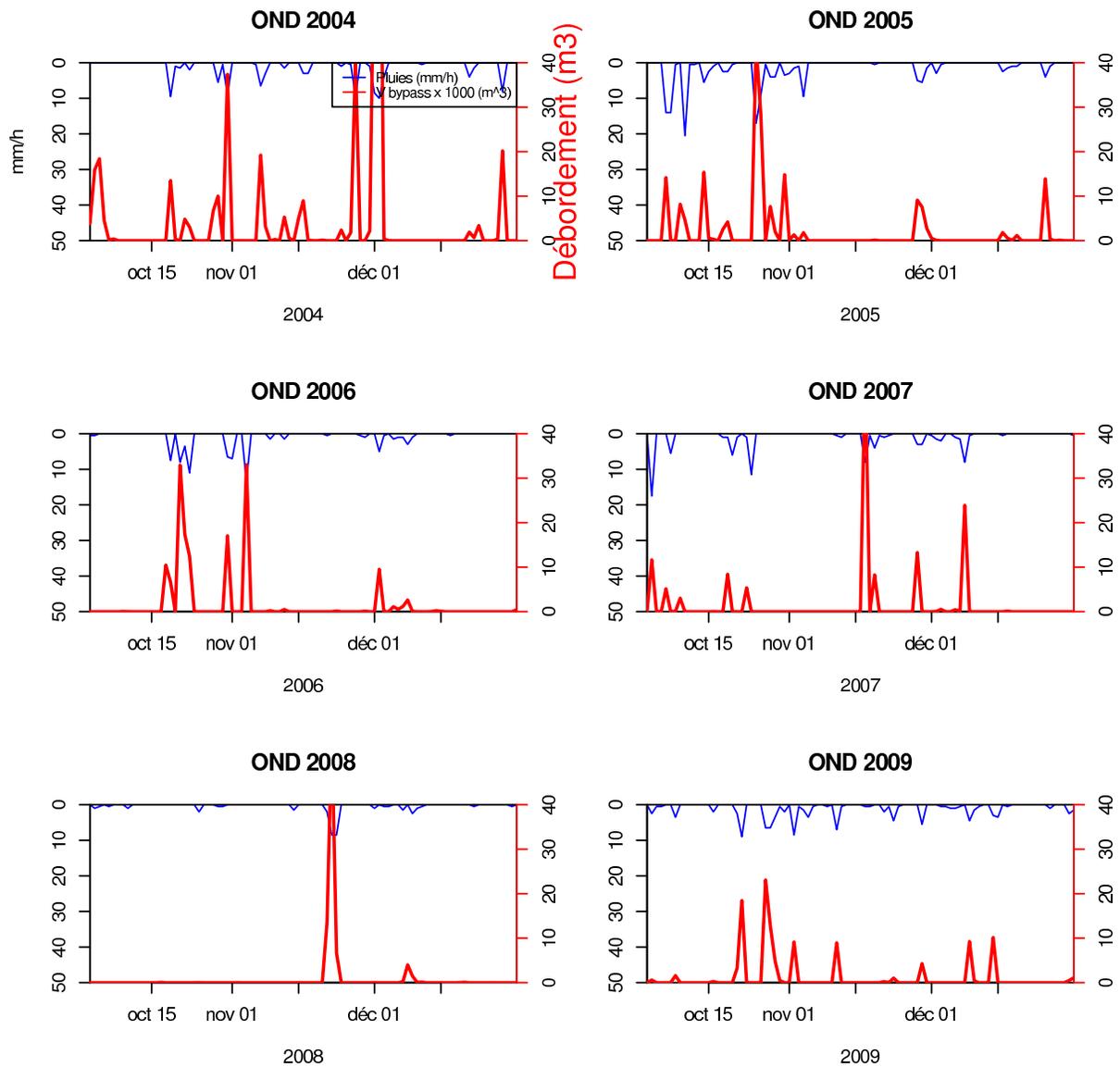


FIG. 3.17 – Intensité (mm/h) maximale journalière (en rouge) et volume ($1000 \cdot m^3$) de débordement (en bleu) en fonction du temps de 2004 à 2009

3.8 Conclusion

Dans le cadre du projet INVULNERABLE (Industrial Vulnerability), initié par l'Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI), l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) et le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), nous sommes chargés de la caractérisation fine des aléas pluviométriques à risque sur le réseau d'eau usée de Veolia Eau de Valence. Les premiers résultats obtenus à partir de la caractérisation des événements pluvieux, leur variabilité et leur mise en corrélation avec les débordements observés du réseau d'assainissement ont traduit une grande variabilité spatiale des précipitations dans cette zone et une non linéarité entre les événements pluvieux et les débordements. Néanmoins, nous avons noté une corrélation significative entre l'intensité des événements pluvieux et les débordements au niveau du réseau d'assainissement. Ces premiers résultats obtenus ouvrent des perspectives très encourageantes, tant sur le plan scientifique (caractérisation des événements pluvieux et évolution des phénomènes), que sur le plan opérationnel (amélioration de la gestion du réseau d'assainissement, anticipation des phénomènes, procédure d'alerte).

Bibliographie

- Arnaud, P., Fine, J., and Lavabre, J. (2007). An hourly rainfall generation model adapted to all types of climate. *Accepted in Atmospheric Research*.
- Chocat, B. (1989). Urbanisation et inondation : phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation. *Aménagement et nature*, 95 :13–15.
- Sane, Y., Bonazzola, M., Rio, C., Chambon, P., Fiolleau, T., Musat, I., Hourdin, F., Roca, R., Grandpeix, J.-Y., and Diedhiou, A. (2011). An analysis of the diurnal cycle of precipitation over dakar using local rain gauge data and a general circulation model. *Accepted in Q. J. R. Meteorol.Soc.*



FICHE DE SYNTHÈSE N°4

Analyse des précipitations intenses dans les données historiques et dans les simulations de modèles : les scénarii SCRATCH10

Auteurs :

Y. Sané (IPSL);

P. Braconnot (IPSL / LSCE) ; S. Planton (CRM-GAME)

4.1 Les scénarios SCRATCH10

Cette partie de l'étude est directement issue de (Pagé and Terray, 2008).

Des scénarios climatiques globaux réalisés dans le cadre de l'exercice d'inter-comparaison de modèles couplés CMIP3 et régionaux réalisés par le CERFACS et Météo-France ont été désagrégés à petite échelle sur la France par le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). Les scénarios régionaux résultant sont dénommés ci-après SCRATCH08. Ceux-ci sont disponibles aux usagers internes et externes à des fins de recherche. La résolution spatiale des scénarios SCRATCH08 est de 8 km sur une région couvrant la France et la Suisse.

Dans cette partie, nous présentons une brève description de la méthodologie utilisée pour désagréger les simulations climatiques, les données utilisées comme base pour la désagrégation, ainsi qu'une description des scénarios désagrégés disponibles. Les limites scientifiques d'utilisation de ces données de même que leurs sources d'incertitude sont discutées.

4.1.1 Méthodologie

Les échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de fine échelle diffèrent fortement de celles résolues par les modèles climatiques. Par conséquent, de nombreuses techniques dynamique et/ou statistique ont été développées pour effectuer ce transfert d'échelle. Parmi ces techniques, il existe des méthodologies de désagrégation d'échelle statistique basées sur l'utilisation du concept de type de temps. Dans ces dernières, les propriétés climatiques régionales sont utilisées afin d'établir des types de temps discriminants pour une variable locale donnée. L'hypothèse principale s'énonce comme suit : chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de grande échelle : le/les prédicteur(s)) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (par exemple la température et les précipitations à petite échelle : le/les prédictant(s)). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et réanalyses disponibles. La méthodologie de désagrégation d'échelle utilisée ici est celle développée par Julien Boé du CERFACS (Boe et al., 2006). Cette méthodologie est une méthode de désagrégation d'échelle statistique multivariée. Les propriétés régionales climatiques sont utilisées afin d'établir des régimes de temps discriminants pour une variable locale donnée, soit la précipitation dans ce cas-ci. Les variations intra-types (régimes de temps) des paramètres appropriés pour un forçage donné sont tenues en compte par des régression multivariées qui utilisent les distances aux

prédicteurs des régimes de temps d'un jour donné. C'est, en quelque sorte, une méthode d'analogie basée sur les types de temps et une approche multivariée. La méthodologie s'appuie sur des séries d'observations homogénéisées. Dans ce cas-ci, la base de données d'observations utilisée a été générée par Météo-France, et est dénommée SAFRAN (analyse météorologique à méso-échelle). Celle-ci couvre la France sur une période allant de 1970 à 2005 à une résolution spatiale de 8 km (zones climatiques cohérentes) sur une grille régulière en projection Lambert-II étendue. Elle comporte 7 paramètres, soient : les précipitations solide et liquide, la température à 2 m, le module du vent à 10 m, la radiation infra-rouge et visible incidente en surface, l'humidité spécifique à 2 m.

Une fois la période d'apprentissage traitée, le déroulement de l'algorithme de cette méthodologie se présente synthétiquement comme suit. Pour un jour j donné où les prédicteurs à grande échelle sont disponibles : Chercher le régime de temps le plus proche (données journalières) ; Distance euclidienne sur les 10 premières composantes principales ; Tous les jours R_i de ce régime de temps sont sélectionnés ; La pression au niveau moyen de la mer et la température à 2 m sont utilisés comme prédicteurs ; Reconstruire la précipitation selon les régressions calculées avec la période d'apprentissage, en utilisant la pression au niveau moyen de la mer comme prédicteur ; Rechercher 15 jours analogues parmi les R_i jours ; Les plus proches en terme de précipitations et température ; Choix de 1 jour parmi ces 15 jours de façon aléatoire ; Récupérer les observations SAFRAN du jour analogue choisi ; Appliquer une correction de température si, en valeur absolue, $T_{modele} - T_{NCEP} > 2C$; Dans le cas d'une correction de température, la radiation infra-rouge et la partition liquide/solide de la précipitation sont ajustés.

4.1.2 Description des scénarios désagrégés

Pour SCRATCH10, la même méthodologie utilisée dans SCRATCH08 a été recodée dans un logiciel avec licence open-source CeCILL (CEA - CNRS - INRIA, 2008). Ce logiciel est dénommé dsclim, et est décrit en détails dans (Page, 2009). Cette implémentation a permis de modifier la méthodologie et sa configuration afin de l'optimiser et d'améliorer ses performances. Les scénarios SCRATCH08 ont été générés avec la méthodologie telle que configurée et implémentée par Julien Boé, tandis que les scénarios SCRATCH10 ont été générés avec dsclim, ce qui a permis de modifier certains aspects de la méthodologie et de la configuration.

Quinze simulations GIEC ont été désagrégées, en plus de 4 simulations en continu ARPEGE V3+ CERFACS A1B, une simulation fin de siècle A2 ARPEGE V4 de Météo-France, une simulation de référence ARPEGE V4 ainsi que trois simulations ARPEGE V4 A2, A1B et B2, toutes réalisées par Michel Déqué (Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo-France). Nous disposons

Modèle	Scénario CO2	Période
CCCMA CGCM3.1 T63	A1B	01/01/1961 - 31/12/2000 01/01/2046 - 31/12/2065 01/01/1961 - 31/12/2000 01/01/2081 - 31/12/2100
CNRM-CM3		
CSIRO-MK3.0		
GFDL-CM2.1		
GISS-AOM		
GISS-ER		
IPSL CM4		
MPI-ECHAM5		
NCAR CCSM3		
ARPEGE	REF	01/01/1950 - 31/12/2000
ARPEGE	A1B	01/01/2081 - 31/12/2100
ARPEGE	A2	01/01/2081 - 31/12/2100
ARPEGE	B1	01/01/2081 - 31/12/2100
NCEP	REF	01/01/1948 - 31/12/2006

TAB. 4.1 – Caractéristiques des simulations désagrégées au CERFACS

pour cette étude de 9 simulations GIEC et de 4 simulations ARPEGE. Les réanalyses NCEP ont aussi été désagrégées. Les variables désagrégées correspondent à celles de la base d'observations SAFRAN.

Le tableau 4.1 résume les caractéristiques des simulations qui ont été désagrégées et fournis par le CERFACS.

Les nouveaux scénarios dénommés SCRATCH10 remplacent SCRATCH08. Ils sont une amélioration de la configuration de la méthodologie utilisée dans SCRATCH08 et surtout utilisée dans le cadre du projet ANR-SCAMPEI sur l'impact des changements climatiques sur les régions des montagnes. Sa résolution spatiale est de 8 km sur une région couvrant la France.

4.2 Critique des données pluviométriques observées et simulées

La performance des différents modèles climatiques à reproduire le régime pluviométrique au niveau de la Méditerranée est évaluée sur les périodes historiques (1961-1980 et 1981-2000) et futures (2046-2065 et 2081-2100) à travers une comparaison entre la statistique des données pluviométriques simulées et la statistiques des données pluviométriques observées. L'analyse critique des simulations pluviométriques consiste à évaluer leur représentativité sur l'ensemble du bassin versant au niveau de Valence en comparaison avec les données enregistrées au niveau des stations de Météo-France dans cette même zone. Cette analyse est faite par rapport aux principales caractéristiques des événements pluvieux qui impactent le débordement au niveau de la station d'épuration de Véolia Eau de Valence. La méthodologie développée vise à évaluer l'amplitude des différents écarts ou des similarités entre les caractéristiques issues des données observées et celles issues des données simulées.

4.2.1 Tests statistiques de comparaison des caractéristiques des événements pluvieux en région méditerranéenne

La représentativité des simulations pluviométriques est évaluée à travers une détermination des amplitudes et de la variabilité spatiale des types de données pluviométriques. La première formule d'estimation de l'écart entre deux séries de données est la différence entre ces données pour chaque rang. Si toutes les différences sont nulles, alors les deux séries de données sont dites identiques. Malheureusement, dans le cas des données climatiques, ces différences sont rarement toutes nulles. D'où l'élaboration d'une série de procédures pour l'estimation des écarts et de leur significativité statistique. Ainsi quatre principaux tests statistiques non paramétriques sont utilisés au cours de cette étude pour évaluer le niveau de la différence entre les jeux de données.

4.2.1.1 L'écart moyen absolu (MAE) et l'écart quadratique moyen (RMSE) (Willmott and Matsuura, 2005)

L'écart moyen absolu est la moyenne des écarts en valeur absolue entre les données des deux séries prises deux à deux. Soit $(X_i \leq i \leq N)$ la série des observations et $(Y_{i,1 \leq i \leq N})$ la série des simulations avec N le nombre de données, posons $e_i = X_i - Y_i$ l'écart entre les deux données au rang i :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ||e_i|| \quad (4.1)$$

Le MAE est d'autant proche de zéro que les deux séries de données sont similaires.

La deuxième caractéristique de calcul des écarts entre deux séries de données, est l'écart quadratique moyen, qui représente la distance entre les moyennes des deux séries. Tout comme la MAE, la RMSE est d'autant plus proche de zéro que les deux séries sont similaires.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

Willmott and Matsuura (2005) à partir d'une analyse de la pertinence des deux indicateurs d'écart, MAE et RMSE, montrent que pour une analyse des données climatiques, la MAE est plus robuste que la RMSE. Car la MAE est fonction de trois caractéristiques d'un ensemble d'écart (MAE, distribution des e_i^2 et $N^{1/2}$), plutôt que l'écart moyen seul.

En plus, de ces deux évaluations de l'amplitude des écarts, le test de Wilcoxon (Ansari and Bradley, 1960) est utilisé pour déterminer la significativité de la différence entre deux séries.

4.2.1.2 Le test non paramétrique de Pearson (Milot, 2009)

Le test non paramétrique de Pearson (Milot, 2009) évalue le degré de ressemblance de la variabilité temporelle ou spatiale de deux séries de données. L'hypothèse nulle du test de Pearson est un coefficient de corrélation nul, $\rho = 0$. Cette hypothèse est acceptée si la pvalue du test est supérieure au seuil de 5%. Le coefficient de corrélation entre les deux séries est :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4.3)$$

avec \bar{X} et \bar{Y} moyenne respective des séries. La variable test est :

$$t_r = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{N-2}}} \quad (4.4)$$

t_r suit la loi de Student de degré de liberté $df = N - 2 (N > 6)$. La p-value associée au test est la probabilité de t_r déterminée sur la table de Student (Rice, 1989).

4.2.1.3 Le test non paramétrique de Fligner (Fligner and Killeen, 1976)

Le test de Fligner (Fligner and Killen, 1976) évalue la ressemblance de la dispersion des données autour de la valeur moyenne. Ce test est nécessaire lorsque la corrélation entre les deux données est non significative car deux séries de même variabilité temporelle présentent nécessairement la même variance.

Le test permet d'évaluer l'homogénéité de variance dans les k séries de données ($X_{i,j}$ avec $1 \leq i \leq n_j$ et $1 \leq j \leq k$). $k = 2$ pour notre analyse car nous avons deux séries à comparer, la série des données observées et la série des données simulées (ou bien la série des données simulées historiques et celles du future); et $n_j = N$ pour tout j . La procédure est basée sur le rang des données dans un classement par ordre croissant de toutes les données et le calcul du score moyen de chacune des séries.

La variable test est :

$$x_0^2 = \frac{N \sum_{j=1}^2 (\bar{A}_j + \bar{a})^2}{V^2} \quad (4.5)$$

avec \bar{A}_j le score moyen des données de la série j , \bar{a} le score moyen des deux séries, et V^2 est la variance des scores des séries.

La variable test x_0^2 suit la loi de probabilité de Chi-carré. Si les deux séries ont des variances similaires, la p-value du test est inférieure au seuil de risque de 5%.

4.2.2 Analyse des données climatiques observées et simulées autour de Valence sur la période 1990-2010

L'analyse des précipitations est décrite à travers des caractéristiques liées aux intensités, la fréquence et la durée des événements pluvieux. Ces caractéristiques sont déterminées dans chacun des deux types de données pluviométriques (observées et simulées). Les résultats de cette analyse sont présentés dans cette étude.

Ainsi, la figure 4.1 compare les scénarios SCRATCH10 autour de Valence et les données observées de Météo-France. Nous remarquons en haut et droite de la figure 4.1, que les nombres d'événements pluvieux sont enregistrés en premier dans SCRATCH10 sur une même période. Et sur la même figure 4.1, en haut à gauche, la durée des événements dans SCRATCH10 est du même ordre que celle dans les pluviomètres. Les maximum de l'événement et l'intensité total des événements sont sous-estimés dans SCRATCH10 par rapport aux observations. Il serait alors nécessaire de faire une correction du maximum des événements dans SCRATCH10.

Sur la figure 4.2 est représentée l'anomalie des précipitations simulées dans la région de Valence par rapport aux observations enregistrées par les stations de

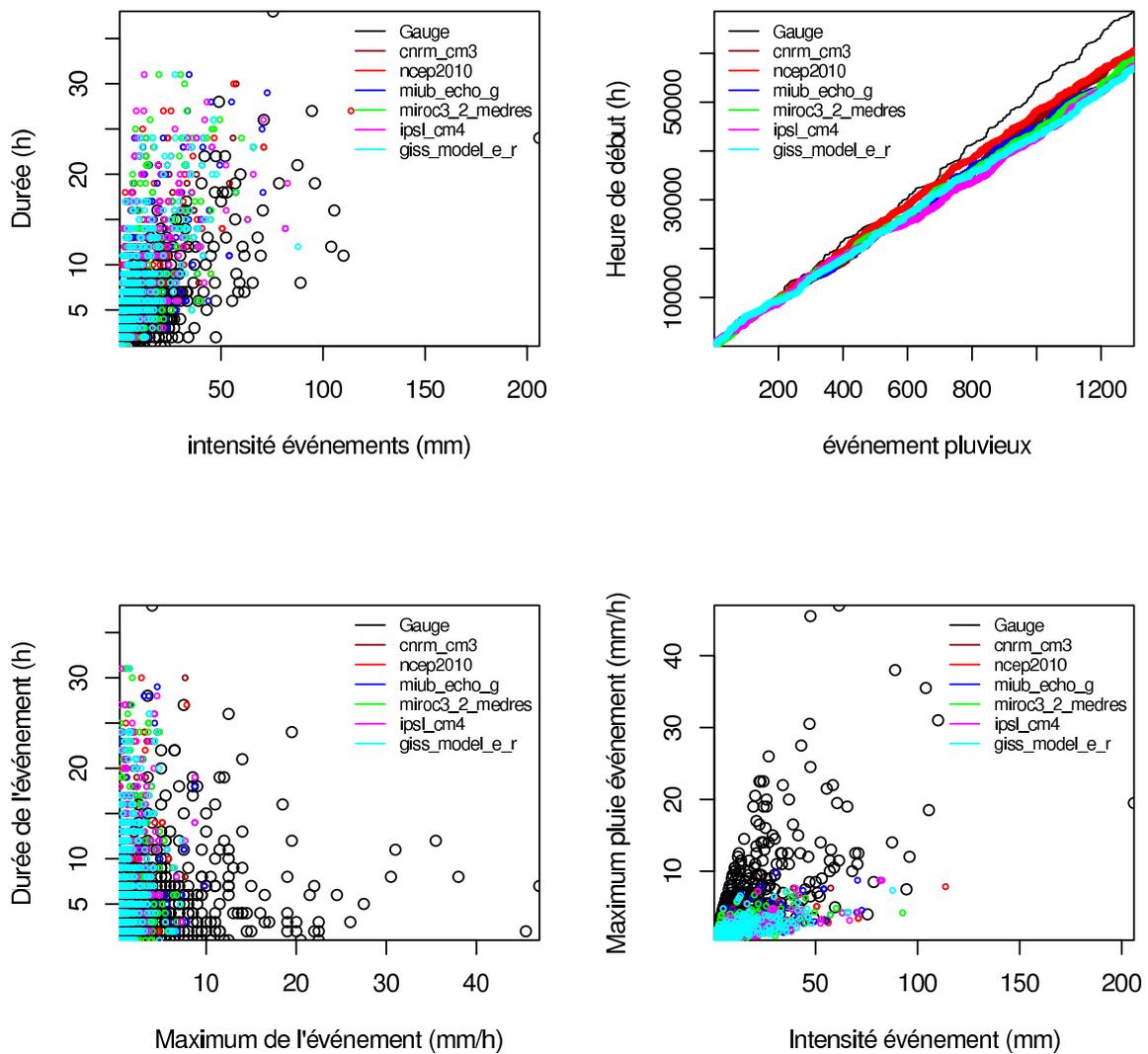


FIG. 4.1 – Comparaison SCRATCH10 et données mesurées par les stations de Météo-France

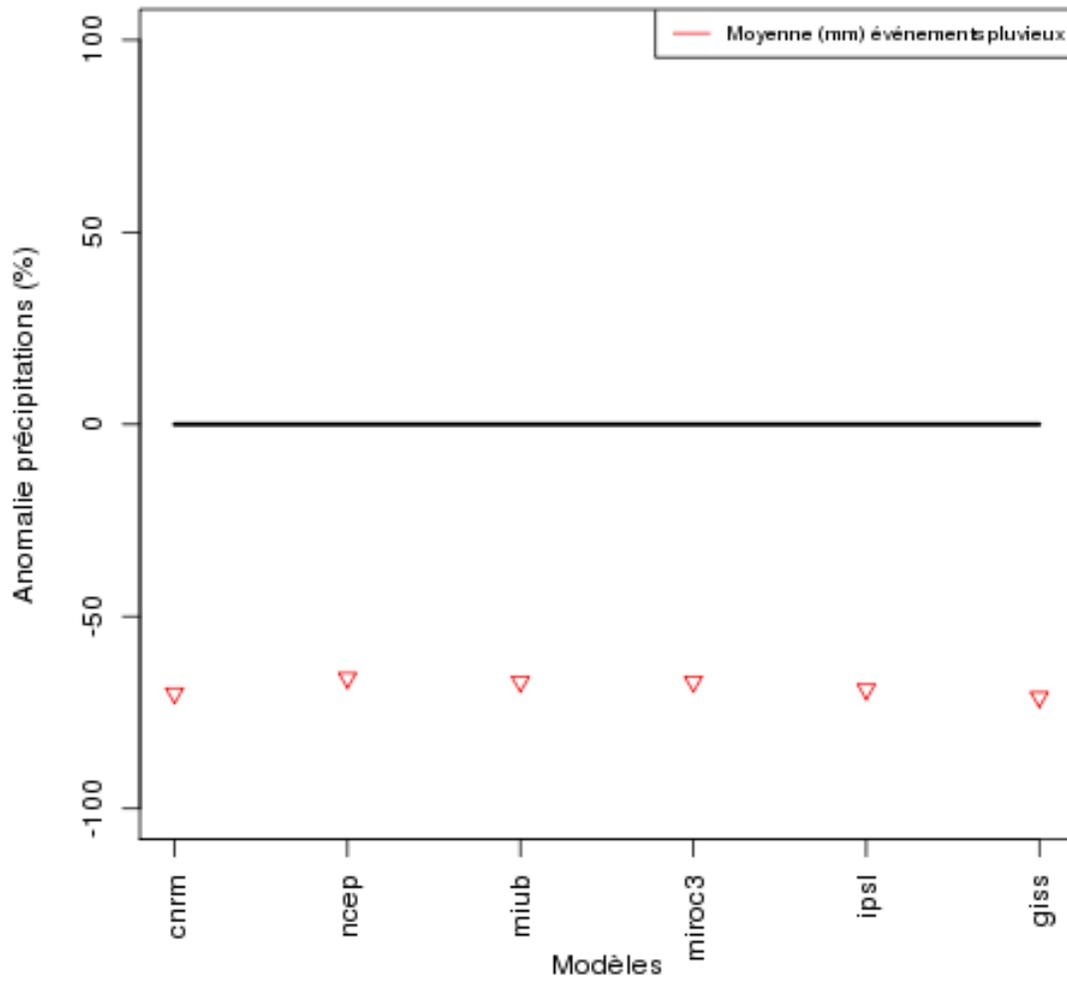


FIG. 4.2 – Anomalies des précipitations simulées autour de Valence par rapport aux observations de Météo-France

Météo-France sur la période 1990-2010. On note que tous les 6 modèles choisis sous-estiment l'intensité des précipitations dans la zone sur la même période choisie. Les modèles sous-estiment environ 70% de l'intensité des précipitations par rapport aux observations. Il est donc nécessaire de faire une correction sur l'intensité pluvieuse avant une quelconque utilisation des simulations des modèles des scénarios SCRATCH10.

Dans la suite de cette étude, nous allons faire une comparaison entre modèles des scénarios SCRATCH10 en sachant que ces données sous-estiment l'intensité d'environ 70% par rapport aux observations.

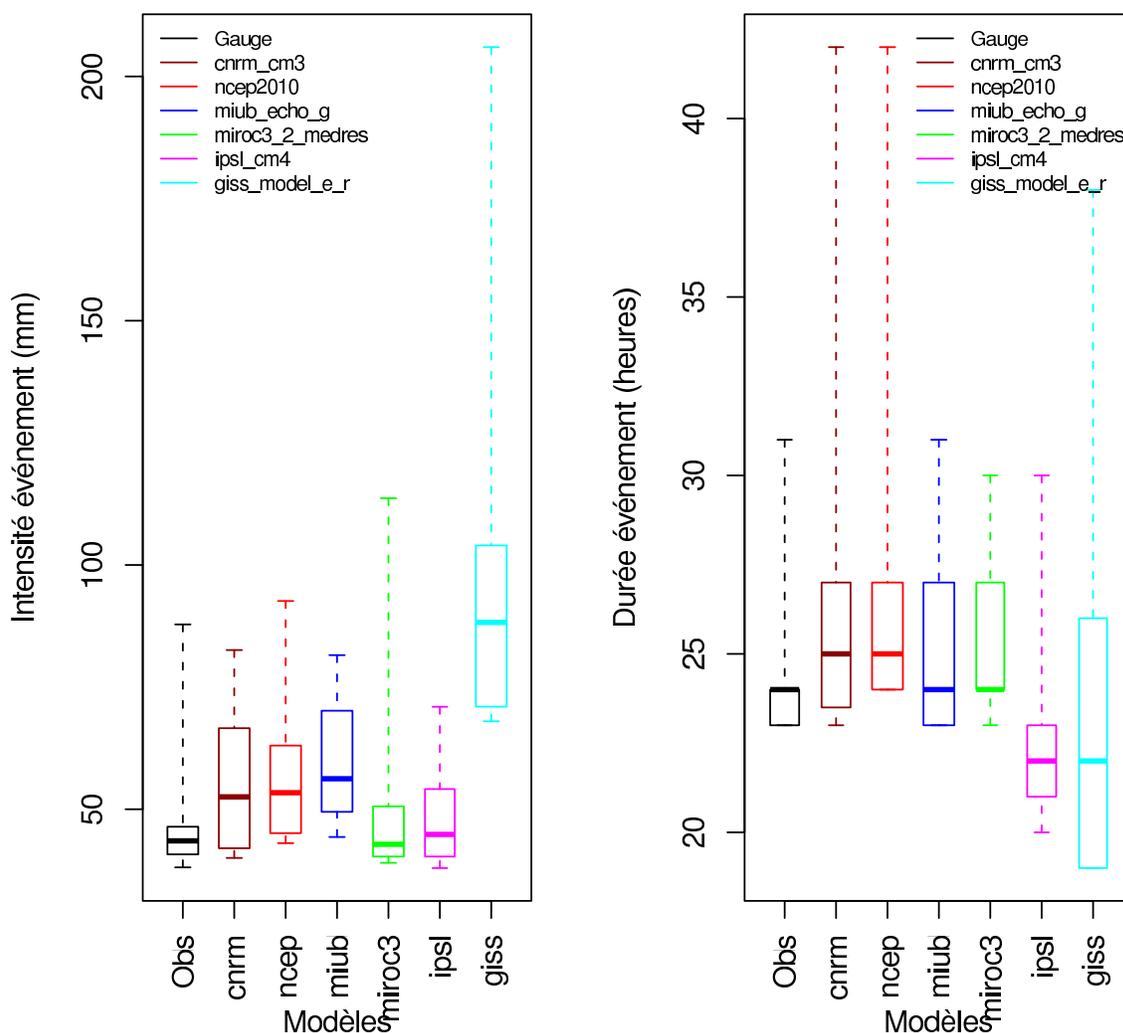


FIG. 4.3 – Distribution q99 des intensité événements pluvieux autour de Valence

La représentativité des événements extrêmes sur les scénarios SCRATCH10 et les observations Météo-France est évaluée à travers une comparaison de deux ca-

ractéristiques des événements pluvieux (intensité événement pluvieux et durée événement pluvieux) sur la période 1990-2010. Pour ces caractéristiques, nous avons constaté sur la droite de la figure 4.3 où est représentée l'intensité des événements pluvieux que la plupart des modèles sur-estiment l'intensité pluvieuse des événements extrêmes par rapport aux observations de Météo-France. On note que deux modèles sont cohérents avec les observations sur la moyenne des intensités. En regardant sur la droite de cette même figure 4.3 où est représentée la durée des événements pluvieux des différents modèles ainsi que les observations, nous avons 3 cas de figures ; un même pourcentage de modèles représentés (33%) sur-estiment la durée des événements pluvieux, 33% autres sous-estiment cette durée et le reste est en accord avec les observations de Météo-France. Nous pouvons noter qu'en moyenne, les modèles représentent mieux la durée que l'intensité des événements pluvieux par rapport aux observations.

4.2.3 Analyse des données pluviométriques simulées sur les périodes futures (2046-2065 et 2081-2100) par rapport aux périodes de références (1961-1980 et 1981-2000)

La figure 4.4 et la figure 4.5 montrent la dispersion entre les différents scénarios en représentant la différence des précipitations sur les périodes 2046-2065 et 2081-2100 par rapport à deux périodes références 1961-1980 et 1981-2000, respectivement. Ici, nous avons choisi de montrer les résultats moyennés sur toute l'année. Le principal aspect qui ressort sur ces figure 4.4 et figure 4.5 est une nette tendance à un assèchement marqué au niveau des quantités de précipitations pour les différentes simulations durant les période 2046-2065 et 2081-2100.

Le tableau 4.2 (Climatology 1961-1980) et le tableau 4.3 (Climatology 1981-2000) récapitulent la moyenne, l'écart-type et l'amplitude du changement climatique.

Un autre aspect important à analyser est celui de la comparaison des moyennes, des médianes et des variances. Pour la comparaison des moyennes, nous avons utilisé le test t de Student. Pour ce test, l'hypothèse H_0 (la différence entre la moyenne de l'échantillon de référence et celle simulée n'est pas significative), ne peut être rejetée au seuil $\alpha = 5\%$. D'après l'échantillon, 78 % des modèles utilisés, montrent que la différence entre les moyennes n'est pas significative pour la climatologie 1961-1980 et pour la période 2046-2065, mais seulement 56 % pour la période 2081-2000. Concernant la climatologie 1981-200, 56 % des modèles utilisés, montrent que la différence entre les moyennes n'est pas significative pour les périodes 2046-2065 et 2081-2000.

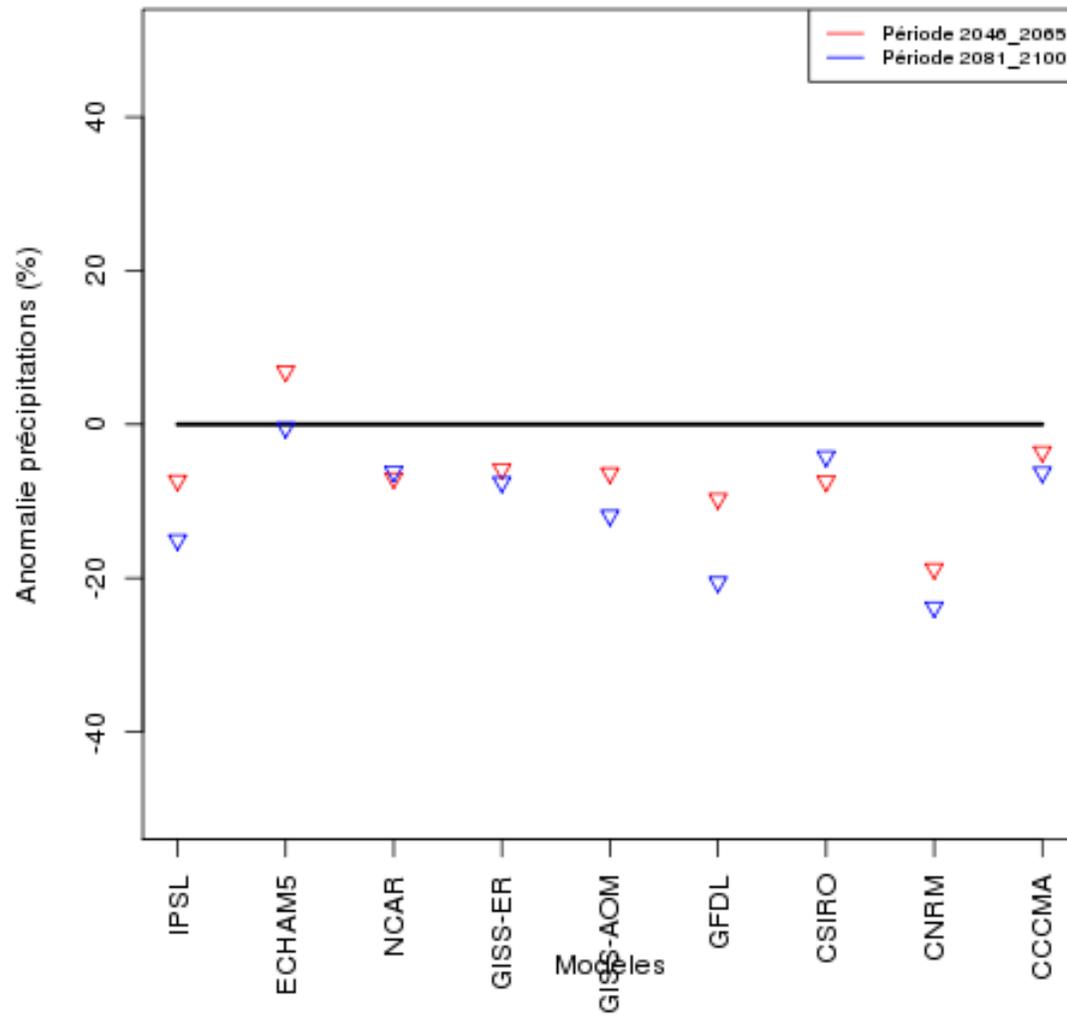


FIG. 4.4 – Anomalies des précipitations autour de Valence par rapport à la climatologie 1961-1980

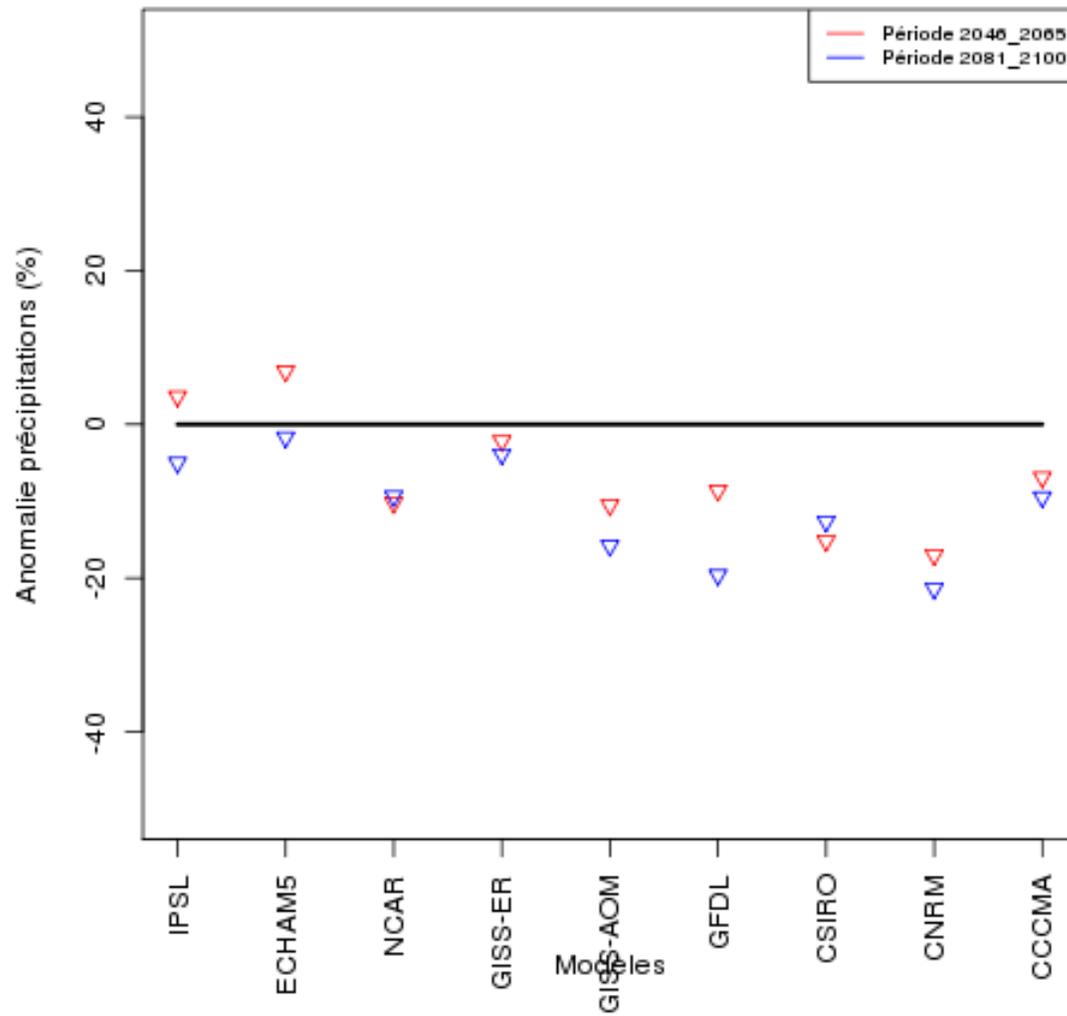


FIG. 4.5 – Anomalies des précipitations autour de Valence par rapport à la climatologie 1981-2000

Modèles	2046-2065 Climatology 1961-1980			2081-2100 Climatology 1961-1980		
	mean	sd	amplitude changement	mean	sd	amplitude changement
IPSL CM4	2.28	6.89	-7.32%	2.09	6.26	-15.04%
MPI-ECHAM5	2.48	7.24	6.89%	2.31	7.1	-0.43%
NCAR CCSM3	2.11	6.41	-7%	2.13	6.74	-6.17%
GISS-ER	2.25	6.65	-5.85%	2.21	6.54	-7.53%
GISS-AOM	2.21	6.89	-6.35%	2.08	6.4	-11.86%
GFDL-CM2.0	2.33	6.84	-9.69%	2.05	6.13	-20.54%
CSIRO-MK3.0	2.01	6.12	-7.41%	2.07	5.97	-4.17%
CNRM-CM3	1.9	5.81	-18.8%	1.8	5.95	-23.8%
CCCMA T63	2.16	6.58	-3.57%	2.10	5.95	-6.25%

TAB. 4.2 – Amplitude du changement climatique autour de Valence (Climatology 1961-1980)

Modèles	2046-2065 Climatology 1981-2000			2081-2100 Climatology 1981-2000		
	mean	sd	amplitude changement	mean	sd	amplitude changement
IPSL CM4	2.28	6.89	3.63%	2.09	6.26	-5%
MPI-ECHAM5	2.48	5.5	6.89%	2.31	7.1	-1.7%
NCAR CCSM3	2.11	6.41	-10.21%	2.13	6.74	-9.36%
GISS-ER	2.25	6.65	-2.17%	2.21	6.54	-3.91%
GISS-AOM	2.21	6.89	-10.53%	2.08	6.4	-15.8%
GFDL-CM2.0	2.33	6.84	-8.63%	2.05	6.13	-19.61%
CSIRO-MK3.0	2.01	6.12	-15.19%	2.07	5.97	-12.66%
CNRM-CM3	1.9	5.81	-17.03%	1.8	5.95	-21.4%
CCCMA T63	2.16	6.58	-6.9%	2.10	5.95	-9.48%

TAB. 4.3 – Amplitude du changement climatique autour de Valence (Climatology 1981-2000)

Modèles	2046-2065 Climatology 1961-1980			2081-2100 Climatology 1961-1980		
	Wilcoxon	Fligner	Student	Wilcoxon	Fligner	Student
IPSL CM4	0.3%	94.57%	11.89%	0.0002%	11.27%	0.07%
MPI-ECHAM5	3.7%	34.22%	17.49%	0.0002%	52.86%	91.96%
NCAR CCSM3	0.005%	82.3%	14.64%	0.003%	10.09%	21.9%
GISS-ER	0.21%	60.1%	19.71%	0.002%	34.91%	10.12%
GISS-AOM	0%	9.95%	17.36%	0%	83.17%	0.86%
GFDL-CM2.0	0%	50.07%	3%	0%	26.53%	0%
CSIRO-MK3.0	0.14%	95.43%	15.21%	52.61%	24.06%	40.81%
CNRM-CM3	0%	67.1%	0.001%	0%	99.9%	0%
CCCMA T63	0.05%	36.68%	47.41%	18.56%	76.88%	18.76%

TAB. 4.4 – Evaluation du changement climatiques autour de Valence (Climatology 1961-1980)

Pour la comparaison des médianes, nous avons utilisé le test de Wilcoxon avec comme hypothèse H_0 ; pas de décalage entre les deux distributions dans les échantillons visés, les valeurs sont du même ordre. Cette hypothèse ne peut être rejetée au seuil $\alpha = 5\%$. Pour la climatologie 1961-1980, tous les modèles montrent une différence des médianes pour la période 2046-2065 et 78 % pour la période 2081-2100. Et pour la climatologie 1981-2000, 67 % pour la période 2046-2065 et 100 % de rejet de H_0 pour la période 2081-2100.

Concernant la comparaison des variances, le test de Fligner est choisi avec comme hypothèse H_0 ; la différence entre les variances n'est pas significative. Cette hypothèse ne peut être rejetée au seuil $\alpha = 5\%$. Ici, tous les modèles sont unanimes, l'hypothèse H_0 ne peut être rejetée car la différence entre les variances n'est pas significative et cela pour les périodes 2046-2065 et 2081-2000 de la climatologie 1961-1980. Nous retrouvons les mêmes résultats pour la climatologie 1981-2000 avec cette fois-ci 89 % pour les deux périodes.

Tous ces résultats sont synthétisés dans les tableaux 4.4 (Climatology 1961-1980) et 4.5 (Climatology 1981-2000).

4.3 Conclusion

Les résultats de l'analyse de cette étude ont montré que les simulations pluviométriques présentent des écarts significatifs par rapport aux observations. L'ensemble des modèles choisi sous-estime l'intensité des événements pluvieux de 70% par rapport aux observations de Météo-France. Il est donc nécessaire de pro-

Modèles	2046-2065 Climatology 1981-2000			2081-2100 Climatology 1981-2000		
	Wilcoxon	Fligner	Student	Wilcoxon	Fligner	Student
IPSL CM4	7.25%	61.37%	48.21%	0.03%	86.2%	27.68%
MPI-ECHAM5	13.79%	2.38%	27.98%	0.0004%	73.62%	72.33%
NCAR CCSM3	0.0006%	88.58%	3.01%	0.0003%	29.93%	5.34.9%
GISS-ER	10.27%	66.81%	59.42%	0.52%	78.5%	37.78%
GISS-AOM	0%	43.93%	2.45%	0%	95.59%	0.04%
GFDL-CM2.0	0%	68.59%	6.23%	0%	1.51%	0%
CSIRO-MK3.0	0%	38.42%	0.06%	4.53%	66.2%	0.43%
CNRM-CM3	0%	38.48%	0.01%	0%	84.23%	0%
CCCMA T63	0%	99.39%	14.24%	0.82%	91.44%	36.13%

TAB. 4.5 – Evaluation du changement climatiques autour de Valence (Climatology 1981-2000)

céder à une correction des différentes biais afin de transformer la statistique des données simulées similaires à la statistique des données issues des observations (Hashimo et al. (2006); Déqué (2007)). Ce traitement de biais des données simulées est incontournable pour une perspective de simulation hydrologique des bassins versants.

En comparant les données simulées historiques et futures, nous avons noté que les projections des modèles dans le futur prévoient une nette tendance à un assèchement marqué au niveau des quantités de précipitations pour les différentes simulations durant les période 2046-2065 et 2081-2100.

Bibliographie

- Ansari, A. and Bradley, R. (1960). Rank-sum tests for dispersions. *The Annals of Mathematical Statistics*, 31(4) :1174–1189.
- Boe, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E. (2006). A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111 :D21106.
- Déqué, M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over france in an anthropogenic scenario : model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57(1-2) :16–26.
- Fligner, M. and Killen, T. (1976). Distribution-free two-sample tests for scale. *Journal of the American Statistical Association*, 71(353) :210–213.
- Hashimo, T., Bradley, A., and Schwartz, S. (2006). Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(2) :561–594.
- Millot, G. (2009). Comprendre et réaliser les tests statistiques avec r. *Manuel pour les débutants, De Boeck*.
- Page, C. (2009). dsclim : A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. technical report tr/cmgc/09/21. *Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)*.
- Pagé, C. and Terray, T. (2008). Projections climatiques à échelle fine sur la france pour le 21ème siècle : les scénarii scratch10. *Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/10/58*.
- Rice, W. (1989). Analyzing tables of statistical tests. *Evolution*, 43(1) :223–225.
- Willmott, C. and Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (mae) over the root mean square error (rmse) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1) :79–82.

SECTION 3

Lot de travail n°3 : Analyse des incertitudes des projections climatiques régionales et globales sur la France. Impact sur les analyses mises à dispositions des industriels.

1. DESCRIPTION DU LOT DE TRAVAIL

Ce lot de travail vise à définir les principales sources d'incertitudes des scénarios climatiques sur les deux questions de vulnérabilité traitées en faisant ressortir l'impact des biais des modèles sur les résultats et les méthodologies employées sur les résultats.

2. PERSONNES IMPLIQUÉES

Les personnes ayant contribué à ce lot de travail sont listées ci-dessous :

IPSL : Y. Sané; P. Braconnot (IPSL / LSCE)

CNRM-GAME : C. Déandreis

3. DÉROULEMENT DU TRAVAIL

Ce lot de travail s'est concentré autour des 2 tâches suivantes :

Tâche 1 : Analyse des simulations climatiques – zoom sur la circulation météorologique synoptique à l'échelle de la France et de l'Europe.

Tâche 2 : Impact des incertitudes des scénarios climatiques sur l'analyse d'indicateurs de vulnérabilité - Analyse des critères de vulnérabilité définis dans les lots 1 et 2.

a) Réalisation

Le **tableau 5** fait état des réalisations de ce lot de travail.



Appel d'Offre GICC 2010 – INVULNERABLE Phase 2

Rapport final du projet - Juillet 2012

Rédigé par C. Déandreis ; cdeipsl@ipsl.jussieu.fr

Tâches	Réalisé	Non réalisé / Perspectives
Tâche 1 Analyse de la circulation météorologique synoptique à l'échelle de la France et de l'Europe dans les simulations climatiques	<ul style="list-style-type: none"> ◆ caractériser les principaux biais des modèles sur la période actuelle ◆ estimer l'impact de ces biais sur les projections climatiques 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ estimer l'apport de l'analyse multi-modèle sur l'estimation de l'incertitude liée à ces biais
Tâche 2 Impact des incertitudes des scénarios climatiques sur l'analyse d'indicateurs de vulnérabilité	<ul style="list-style-type: none"> ◆ apport des nouvelles simulations globales et/ ou régionale ◆ complémentarité entre les simulations globales et régionales 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ apport de nouvelles simulations à l'échelle décennale

Tableau 5 : État des réalisations du lot de travail n°3

b) Difficultés rencontrées

Le retard de plus de 6 mois des simulations réalisées dans le cadre de CMIP5 ne nous a pas permis de comparer de façon systématique les résultats de ce nouveau jeu de données à celui des données du projet ENSEMBLES ou CMIP3 sur l'ensemble des analyses conduites. Il en est de même avec les données des prédictions décennales. D'autre part le manque de recul sur la qualité des données décennales et leur fiabilité nous a incité à ne pas les utiliser dans ce projet.

c) Réunions

Voir les réunions des lots de travail 1 et 2.

4. LIVRABLES ET RÉSULTATS

Afin de faciliter la lecture des résultats des deux études de cas, nous avons préféré regrouper les analyses effectuées pour chacune d'entre elles en un seul bloc. Les résultats des analyses du lot 3 sont donc distillés au sein des rapports et fiches de synthèses des lots 1 et 2.



SECTION 4

Bilan du colloque « Services Climatiques et Industrie »

1. PRÉSENTATION DE LA JOURNÉE ET OBJECTIFS

Le colloque « Services Climatiques et Industrie » s'est tenu le 10 janvier 2012 à la Maison de l'Amérique Latine à Paris. Organisé par l'IPSL, l'IDDRI et le CNRM dans le cadre des projets INVULNERABLE-1, INVULNERABLE-2 et SECIF, cette journée de conférences et de tables rondes avait pour objectif de faire avancer la réflexion sur la question des services climatiques. Cette journée a réuni des intervenants de différents pays ayant travaillé sur le sujet dans le but de faire part de leurs expériences et de leurs difficultés, des représentants du monde industriel qui ont présenté leur vision des services climatiques, des scientifiques ainsi que des représentants de la société civile. Sur les 143 personnes présentes au cours de cette journée, environ soixante étaient issues du monde de l'entreprise et une cinquantaine du secteur académique et de la recherche. Une dizaine de représentants de pays étrangers comme l'Allemagne, le Canada, le Royaume-Uni, le Maroc ou encore l'Espagne ont aussi assisté à cette journée. Le reste des participants était composé de représentants de l'Etat, de collectivités locales, d'associations ou encore de chambres d'agriculture.

Une série de question était au cœur de la journée : quels sont les besoins des industriels en matière d'information sur le climat futur ? Comment est-il possible d'y répondre ? Comment organiser cette réponse ? Quelles difficultés est-il possible d'anticiper ?

Le programme détaillé de la journée est fourni dans l'*annexe 1*.

2. ENSEIGNEMENTS

Un compte rendu de la journée a été rédigé (CR_colloque_10-01-2012.doc). Il inclut les principaux enseignements que les discussions au cours de cette journée nous ont appris sur le besoin et la mise en service de services climatiques pour le secteur industriel.



Parmi toutes les approches qui ont été présentées, la notion de vulnérabilité au changement climatique et le besoin d'y répondre efficacement semblent être au cœur des préoccupations de toutes les personnes ayant participé à cette journée.

Les différentes interventions ont permis de mettre en évidence le rôle d'intermédiaire que devraient jouer les services climatiques. Que ce soit les traducteurs du Met Office ou l'équipe *impacts* d'OURANOS, ceux-ci permettent de créer des synergies essentielles entre le monde scientifique et les utilisateurs en faisant émerger les questions et besoins des uns, et en évaluant les capacités de réponse des autres. Ainsi la nécessité d'une approche ouverte aux questions posées est indispensable. Il ne s'agit pas de voir simplement comment un climatologue perçoit une question posée mais aussi de comprendre pourquoi un utilisateur la pose, quels peuvent être les impacts sur son activité ou encore quels sont les autres domaines touchés (aspect économique, sociologique, comportemental...).

Le besoin d'accéder à des données fiables et précises, tout en explicitant de manière compréhensible les incertitudes qui les entourent, semble aussi indispensable au bon fonctionnement de ces services. Cependant, l'accès à ces données ne suffit pas et un simple système de transfert d'informations n'est pas suffisant. Il s'agit plutôt de développer des compétences sur ce thème qui est à cheval entre la sphère scientifique et le monde industriel via une formation de qualité. Ceci permettrait d'enrayer des processus d'accompagnement des utilisateurs afin de les aider dans leurs prises de décision. L'important pour l'utilisateur n'est pas seulement d'avoir des estimations des changements auxquels il devra faire face mais plutôt de comprendre comment ils vont influencer son activité.

Le besoin d'adapter le service fourni à la demande exprimée est aussi apparu. La plupart des demandes formulées concernent par exemple des échelles régionales ou locales et il s'agit de déterminer dans quelles mesures on peut avoir des résultats sur le climat à de telles échelles. De nombreuses questions ont de plus été formulées au cours de cette journée. Tout d'abord le type d'organisation de ces services qui pourrait être mis en place reste encore à définir. En effet les différents systèmes de services climatiques qui nous ont été présentés avaient tous un mode d'organisation différent. Dans certains cas, il s'agissait d'une structure financée par des fonds publics (Hadley centre) et dans d'autres cas des structures privées au service d'autres organismes (CLIMPACT, ARIA...). Il pouvait s'agir d'organisations indépendantes fonctionnant grâce à des capitaux privés et publics (OURANOS) ou encore des services incorporés au sein même de grandes entreprises (département R&D d'EDF, service développement durable de la SNCF...). Il semblerait donc qu'une grande diversité de modes d'organisation existe et que cette question nécessite une approche diversifiée dans la perspective de développer les services climatiques en France.

La question de l'accès aux données climatiques ainsi qu'aux résultats fournis par les services climatiques fut aussi un sujet important de discussions : Doit-on permettre l'accès libre à ses données ou bien contrôler leur utilisation afin qu'elles ne soient pas mal utilisées ? Les résultats obtenus sont-ils transposables à d'autres situations ?

Cependant, en dépit de toutes les questions auxquelles il reste à répondre, cette journée a permis de mettre en évidence l'émergence de la question de l'adaptation au changement climatique dans la société civile et des besoins croissants d'informations sur ce sujet.

3. COMPTE-RENDU DÉTAILLÉ

Rédigé par Frédéric Cauvin (IPSL / IDDRI)

La journée a débuté par un bref rappel du contexte. Jean Jouzel¹ a ainsi évoqué la mise en place de la KIC (Knowledge and Innovation Community) Climat comme une initiative visant, à l'échelle européenne, à assurer un partage des informations et une meilleure coordination des différents acteurs concernés afin de promouvoir l'innovation sur le thème du changement climatique. Il a de plus rappeler que le prochain rapport du GIEC permettrait d'apporter de nouveaux éléments à la compréhension de ce phénomène (nouveaux scenarii, résolution spatiale plus fine...) et permettrait à tous les acteurs de mieux prendre en compte les défis auxquels ils seront potentiellement confrontés. Pascale Braconnot² a ensuite pris la parole en rappelant que les notions qui devaient être au cœur de toute démarche de mise en place de services climatiques étaient les questions de l'adaptation au changement climatique et de la gestion des incertitudes. Le projet SECIF (Vers un Service Climatique pour le Secteur Industriel Français) qui regroupe plusieurs partenaires industriels et scientifiques a ensuite été présenté en insistant sur les difficultés de la mise en place des services climatiques.

1^{ère} partie de la matinée

La première partie de la matinée fut consacrée à la présentation d'expériences de mise en place de services climatiques. Ainsi, les différentes interventions ont eu pour but de permettre à des fournisseurs de services climatiques dans différents pays (France, Royaume-Uni et Canada) de présenter comment ils concevaient le fonctionnement opérationnel de ces services, de témoigner de leurs expériences au travers d'exemples et de faire part des difficultés qu'ils ont éprouvées. Ces interventions ont été suivies d'une séance de discussion entre la salle et les intervenants.

Le Projet INVULNERABLE³ (France)

Le projet INVULNERABLE-1 qui fut lancé en 2007 et financé par l'IDDRI, partait du constat que, d'une part, les activités industrielles étaient vulnérables aux aléas climatiques et que, d'autre part, les informations sur l'évolution du climat disponibles dans les laboratoires et pouvant aider à répondre aux questions de vulnérabilité industrielle étaient sous-exploitées. Ce projet qui fut par la suite suivi des projets INVULNERABLE-2⁴ et SECIF⁵, avait ainsi pour but de promouvoir l'utilisation des résultats des projections climatiques afin d'établir des diagnostics de vulnérabilité pour le secteur industriel. Pour ce faire le projet

¹ Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), IPSL

² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, IPSL

³ Présentation réalisée par C.Déandris, chef de projet GICC invulnérable et ANR SECIF ; co-affiliée IPSL et CNRM

⁴ Financé par le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC)

⁵ Financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR)



INVULNERABLE a mis en place une plate-forme de discussion grâce à laquelle les industriels ont pu faire part de leurs attentes aux scientifiques, les scientifiques jugeant directement de la faisabilité des demandes au vu des capacités des modèles et des outils d'analyses disponibles.

Différentes pistes de réflexion ont été abordées comme l'effet des changements climatiques sur la demande de biens et services, la résistance des infrastructures aux aléas climatiques, la gestion de l'outil industriel... Des difficultés sont rapidement apparues concernant l'expression du besoin industriel et la façon d'y répondre. Il semble tout d'abord nécessaire de recentrer la demande des industriels sur des questions qui peuvent effectivement être traitées par les scientifiques du climat (par exemple l'analyse basée sur l'évolution des champs de température est généralement plus fiable que celles basées sur les précipitations ou les vents). Ensuite, il semble important que les scientifiques fournissent des résultats et des indices qui soient compréhensibles par des non-experts et directement exploitables par les utilisateurs.

Plusieurs pistes de travail ont donc été explorées. La première consistait à mettre à disposition du monde industriel des fiches synthétiques permettant aux différents acteurs de prendre la mesure des grands enjeux du changement climatique dans les différentes régions du globe. La seconde idée consistait à établir une série d'indices génériques qui pourraient être utilisés par l'ensemble des acteurs industriels. La dernière piste étudiée visait à fournir des études de cas spécifiques à chaque utilisateur et qui répondaient à des questions précises. Des études ont ainsi été réalisées pour des groupes industriels tels que Dalkia, GDF-Suez ou encore Veolia Eau.

Plusieurs leçons ont ainsi pu être tirées de ces expériences. Il est tout d'abord apparu que les industriels avaient eux-mêmes du mal à définir leur vulnérabilité vis-à-vis du changement climatique (enjeux éloignés de leurs priorités quotidiennes, manque de connaissance sur le sujet...). De plus, des difficultés à concilier les attentes des utilisateurs avec ce que pouvaient réellement fournir les scientifiques sont apparues (échelle spatiale insuffisamment fine, échéances trop lointaines, incertitudes...). La capacité des scientifiques à répondre à ce type de question est ainsi relativement limitée en raison d'un niveau d'incertitude parfois trop important et car le monde scientifique ne possède pas forcément les ressources (matérielles et humaines) suffisantes pour répondre aux demandes. Un véritable besoin d'intermédiaires compétents permettant le dialogue entre le monde industriel et les scientifiques et pouvant réaliser des études au cas par cas est alors apparu. Enfin, il est important de rappeler que les scientifiques ne disposent pas de toutes les réponses aux questions qui peuvent être formulées et que de nombreuses demandes qui leur sont adressées nécessitent, en amont, un travail approfondi de recherche fondamentale.

Met Office, Hadley Center (Royaume-Uni)

Après une rapide présentation du Met Office (service météorologique nationale du Royaume-Uni), M Chris Hewitt, directeur du développement des services climatiques au Met Office, a décrit le fonctionnement des services climatiques au Royaume-Uni. Le Met Office fournit actuellement des services climatiques à des secteurs d'activité très variés (gouvernement, industries, communauté internationale, grand public...) à des échelles diverses (régionales, nationales et mondiales).

La fourniture de ces services est assurée grâce à de fortes interactions entre la communauté scientifique et les utilisateurs via des consultants « translators » qui font le lien entre ces deux mondes. Selon M Hewitt, ces *traducteurs* jouent un rôle indispensable dans la fourniture de



services climatiques et sont approximativement une vingtaine à travailler sur ce sujet au Met Office. Toujours selon M Hewitt, la nécessité de développer ce type de service résulte de plusieurs attentes : fournir un support d'aide à la décision dans un contexte d'adaptation au changement climatique, caractériser les dangers climatiques et leurs impacts sur la société, fournir des informations et conseils pertinents sur le climat. Il est aussi important de noter que la plupart des demandes formulées au Met Office concernent des échelles locales ou régionales pour des prévisions sur quelques mois. Les services climatiques peuvent ainsi prendre plusieurs formes. Le Met Office peut fournir des résultats de modèles et des prévisions directement aux utilisateurs, il développe des modèles à l'échelle globale, fournit de l'information sur les extrêmes climatiques et leurs dangers potentiels... Ainsi il a permis à la ville de Londres d'établir un plan de gestion des inondations ou encore d'établir la capacité de résilience du réseau électrique anglais aux risques liés au changement climatique. Certains projets sont aussi réalisés en collaboration avec des partenaires étrangers. Le Met Office a ainsi répondu à un appel d'offre du PNUE et travaillé avec le gouvernement égyptien afin d'évaluer les conséquences éventuelles du changement climatique sur le débit du Nil.

Cependant, le Met Office a identifié certaines difficultés récurrentes au développement de ces services. La première est le manque de ressources (en personnel ou en temps) pour fournir ces services dans de bonnes conditions. Ensuite, M Hewitt a insisté sur la difficulté à faire admettre les limites des résultats fournis (en termes d'incertitude notamment) sans pour autant sous-évaluer ces résultats. Enfin, une des principales difficultés rencontrées est de faire en sorte que le dialogue entre fournisseurs et utilisateurs soit le plus facile possible afin que chacun comprenne bien les besoins et limites rencontrés par l'autre.

En conclusion, le point essentiel à la mise en place de services climatiques est le développement des interactions entre la communauté scientifique et les utilisateurs via, dans le cas du Met Office, le rôle des « translators ».

OURANOS (Canada)

Le consortium québécois OURANOS regroupe 14 membres (ministères et universités), 4 membres affiliés (des industriels tels que Rio Tinto Alcan) et près de 250 partenaires scientifiques canadiens et internationaux tels que Météo-France. La mission qui lui a été confiée par les élus québécois est d'informer et de conseiller les décideurs et usagers afin d'identifier, promouvoir et mettre en œuvre les meilleures stratégies d'adaptation au changement climatique à l'échelle locale et régionale. L'objectif de ce consortium est d'approfondir la connaissance scientifique sur la climatologie à échelle régionale sur le territoire canadien afin de développer une expertise sur l'évaluation d'impact, la vulnérabilité et les stratégies et méthodes d'adaptation au changement climatique.

Les équipes d'OURANOS travaillent actuellement sur une centaine de projets répondant à des enjeux du type *approvisionnement énergétique, sécurité des biens et personnes, etc...* Le travail sur les différents projets se réalise globalement selon trois phases distinctes. A la base de chaque projet, une étape d'étude scientifique et d'acquisition de connaissance est toujours nécessaire. Ensuite une équipe est chargée d'établir des scénarios socio-économiques et environnementaux en lien avec le sujet traité. Finalement une dernière phase consiste à déterminer quels sont les impacts de ces scénarios et quelles mesures d'adaptation sont envisageables. Ainsi qu'en fonction des besoins énoncés par les utilisateurs (collectivités, industriels, gouvernement...), les équipes d'OURANOS mobilisent plus ou moins de ressources. Ils ont ainsi pu établir des estimations des modifications d'intensité du cycle de



l'eau dans une partie du Québec et par conséquent déterminer dans quelle mesure ceci entraînait des modifications dans la conception des centrales hydroélectriques québécoises. Un des aspects sur lequel M Baril, directeur général d'OURANOS, a insisté est que le temps de travail fourni se répartissait de manière quasi égale entre la recherche des résultats et la définition des incertitudes. De plus les résultats obtenus par les équipes d'OURANOS ne sont pas systématiquement libre d'accès dans la mesure où, selon M Baril, des mauvaises interprétations et des utilisations inadaptées de ceux-ci ont été remarquées dans le passé. Les projets sur lesquels les experts d'OURANOS travaillent ont tout d'abord été majoritairement lancés par des organismes publics tels les collectivités locales ou le gouvernement. Mais les demandes émanant du secteur privé sont aujourd'hui de plus en plus nombreuses. De plus, selon Mr Baril, les personnes travaillant directement au contact des utilisateurs finaux jouent un rôle essentiel dans la mesure où ce fut grâce à eux, au moins au début du projet, que les demandes des industriels ont pu émerger et être traitées par les scientifiques d'OURANOS.

2nde partie de la matinée

Dans la seconde partie de la matinée, différents représentants d'opérateurs industriels français ont présenté la vision de leur groupe vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique. Ils ont aussi fait part de leurs éventuels besoins en termes de services climatiques.

Egis

Le groupe Egis est un groupe d'ingénierie et de conseils en infrastructure. Il travaille notamment dans les domaines des transports, du bâtiment, de l'environnement, de la ville, de l'industrie, de l'eau et de l'énergie. Après avoir présenté son groupe, M Ennesser, Coordinateur Adaptation au Changement Climatique d'Egis, a expliqué quels étaient les besoins de son groupe, et plus généralement des gestionnaires de réseaux d'infrastructure, concernant les processus d'adaptation au changement climatique.

Selon-lui les sociétés telles qu'Egis se posent tout d'abord des questions vis-à-vis de l'accès aux données sur le climat. Elles souhaitent en effet savoir à quels changements elles devront faire face, lesquels seront les plus importants, à quelles échéances et dans quelle mesure on peut avoir confiance en ces estimations. Il semble ainsi important d'établir des outils de collaboration entre les scientifiques du climat et les industriels afin d'optimiser le processus de décision en utilisant par exemple des indicateurs précis et facilement exploitables par les utilisateurs. Les questions de la résolution spatiale des prévisions actuelles et futures ainsi que des intervalles de confiance est aussi au cœur de leurs préoccupations. En effet les besoins d'informations dépendent de l'échelle spatiale considérée et il doit être possible de fournir des résultats pour chacune de ces échelles (locale, départementale, régionale). De plus les temps considérés dans ce secteur d'activité sont généralement long (plusieurs décennies) et il convient donc de fournir des informations sur des temps très long (100 ans) mais aussi pour les décennies à venir afin de pouvoir prendre des décisions sur des investissements à plus court terme tels que des programmes de réhabilitation d'infrastructures existantes. Les processus de conception et d'exploitation des infrastructures font intervenir un nombre de plus en plus important d'acteurs (collectivités, exploitants, services de l'Etat...) et il semble

ainsi important que les services climatiques mis à disposition soient utilisables par toutes ces parties prenantes.

Dans la deuxième partie de sa présentation M Ennesser a présenté comment le groupe Egis prenait en compte, en interne, la problématique des risques climatiques. Dans un premier temps, le groupe cherche à avoir une approche en amont du problème en faisant l'état de préparation du secteur des transports face aux risques climatiques et météorologiques. Ensuite, il cherche à intégrer ces problématiques dans la conception même des infrastructures afin de limiter leur vulnérabilité. Au Pérou, le groupe Egis a par exemple dimensionné tout une partie du réseau routier côtier afin qu'il soit moins vulnérable aux phénomènes El Nino. L'outil GERICI (via un Système d'Information Géographique) permet ensuite de déterminer les infrastructures potentiellement vulnérables. Egis dispose aussi d'outils lui permettant de prévoir et de gérer en temps réel les événements climatiques extrêmes (outil ESPADA) ce qui permet de mettre en œuvre une série de dispositifs d'alerte précoce. La crise est alors gérée selon un système dénommé RIMAROCC permettant, entre autres, de capitaliser les retours d'expérience.

SNCF

L'intervention de M Jourdan, directeur du développement durable à la SNCF, fut centrée sur les questions de vulnérabilité et d'adaptation du système ferroviaire aux phénomènes climatiques. En effet que ce soit au niveau du matériel roulant, des gares ou encore des lignes ferroviaires, une grande partie des investissements de la SNCF sont des investissements de long terme (plusieurs dizaines d'années) et sont donc potentiellement concernés par les effets du changement climatique. De plus, la SNCF est aussi concernée par cette problématique dans la mesure où elle éprouve un réel besoin d'anticiper tout risque éventuel (nécessité d'assurer la continuité du service) et car elle estime que les évolutions climatiques futures s'accompagneront de modifications dans les habitudes de transports. Le principal danger pour cette société est le risque de connaître des périodes de canicule prolongée telles que celle rencontrée en 2003 et qui fut responsable de la déformation de plusieurs kilomètres de rails. De plus le changement climatique peut avoir des effets sur la mobilité des personnes, l'attractivité des territoires ou encore le confort dans les bâtiments ce qui peut avoir des impacts directs ou indirects sur les activités de la SNCF.

Ainsi ces potentiels effets du changement climatique ont amené la SNCF à se poser de nouvelles questions : les normes de construction sont-elles suffisamment exigeantes ? Faut-il créer de nouveaux services en gare ? Faut-il végétaliser d'avantage l'univers des gares ? Les aménagements actuels doivent-ils prendre en compte les risques futurs ? Quels sont ces risques ? C'est dans le but de répondre à ces questions que la société a ainsi décidé de mettre en place un Plan d'Adaptation au Changement Climatique de la SNCF : *Climat D-Rail*. La réflexion qui sera conduite dans le cadre de cette démarche concernera ainsi l'établissement de nouvelles normes de construction pour la SNCF, la mise en place de nouvelles stratégies d'exploitation, l'adaptation des investissements ainsi que la politique de développement du réseau. C'est dans ce cadre que la SNCF a établi une série de pistes de réflexion et a identifié ses besoins en termes de services climatiques. Ces pistes concernent tous les domaines d'activités de la SNCF et touchent à des problématiques qui dépassent le cadre des sciences du climat. Le plan de la SNCF traite par exemple les aspects socio-économiques de la question climatique et fait appel à des communautés d'experts très variées tout en les mettant en interaction. Ce processus devra aboutir au printemps 2012 et regrouper des représentants de



tous les *métiers* de la SNCF, des partenaires extérieurs et s'inspirera des différentes politiques d'adaptation des entreprises ferroviaires européennes.

GDF-Suez / Safege

Après une présentation du groupe GDF-Suez et de Safege, filiale de Suez-Environnement spécialisée dans l'ingénierie et le conseil, M Renaudet, directeur de la recherche, de l'innovation et du développement durable du groupe, a présenté ce qu'étaient les enjeux des services climatiques pour sa société. Suez-Environnement étant spécialisé dans la conception et la gestion de services d'eau et d'assainissement, une grande partie de ses activités dépend des conditions climatiques. Ainsi des modifications importantes du climat telles qu'une montée du niveau de la mer, une augmentation des précipitations ou encore une hausse des températures peuvent avoir des impacts importants sur la sécurité d'approvisionnement en eau, la qualité ou le coût de cette eau.

Pour répondre à ces nouveaux défis, Safege a lancé plusieurs projets et programmes de recherche sur, par exemple, la disponibilité des ressources en eau pour les prochaines décennies. Un autre exemple de projet est la mise en place d'un diagnostic de vulnérabilité d'un système d'eau potable. Pour établir un tel diagnostic, les experts de Safege s'appuient sur les données climatiques disponibles afin de déterminer les différentes tendances, l'exposition des systèmes aux aléas climatiques et des ordres de grandeurs des variations climatiques. Ils établissent ensuite une grille d'analyse qui permet de décrire qualitativement la sensibilité de chaque élément de la chaîne industrielle vis-à-vis des évolutions climatiques futures. Le groupe apporte aussi son expertise à différents acteurs tels que les services de l'Etat ou les collectivités afin de mettre en place des mesures d'adaptation appropriées. Il participe par exemple à la réflexion sur les Plans Climat Energie Territoriaux en étudiant, pour un territoire donné, quelles vulnérabilités actuelles et futures doivent être prises en compte et le type d'indicateurs utile pour les évaluer.

Les services climatiques représentent ainsi des enjeux importants pour Safege dans la mesure où ils permettent de décrire des tendances, de préciser les enjeux, de sensibiliser les acteurs et de prendre des mesures opérationnelles adaptées (notion de mesures sans regret). Ils présentent cependant certaines limites. Par exemple, les modèles climatiques ne sont pas directement exploitables et doivent être couplés avec d'autres modèles pour évaluer les impacts sur les activités industrielles. Les incertitudes liées à l'utilisation de ce type d'outil représentent aussi un frein important à l'utilisation de ces services.

Plusieurs pistes d'évolution ont ainsi pu être identifiées. M Renaudet a tout d'abord insisté sur la nécessité d'accroître les interactions entre le monde de la recherche et le monde industriel. Ensuite, il a souligné la nécessité d'homogénéiser et de standardiser les données de référence sur le climat. Il a de plus insisté sur le fait que les services climatiques proposés devaient être adaptés à la spécificité du problème traité (par exemple la question de la ressource en eau) et à l'échelle spatiale considérée. D'un autre côté, le développement de méthodes d'évaluation d'impacts qui soient transposables et exploitables par une grande diversité d'utilisateurs semble être une nécessité pour les praticiens.

EDF

La présentation de M Caneill, de la Direction du Développement Durable d'EDF, a eu pour objectif principal de présenter dans quelle mesure le groupe EDF met en place des politiques d'adaptation au Changement Climatique. Dans un premier temps M Caneill a listé une série d'actions entreprises par EDF en matière de changement climatique avec notamment la mise en place en 2010 d'une stratégie d'adaptation au changement climatique. Il a de plus rappelé que le département recherche et développement de l'entreprise participait activement dans différents projets de recherche sur le sujet. Ensuite, différents éléments impliquant la nécessité d'adopter une politique d'adaptation au changement climatique ont été énoncés. Il a en effet été rappelé que l'offre et la demande dans le domaine de l'énergie étaient très dépendants des aléas climatiques, que la conception, la construction et l'entretien des infrastructures électriques s'étalaient sur des échelles de temps relativement longues (plusieurs dizaines d'années) mais aussi que ces constructions pouvaient être vulnérables à des événements climatiques extrêmes.

La sécurité des personnes et des biens ainsi que la garantie d'un approvisionnement suffisant en énergie comptent donc parmi les principaux défis auxquels devra faire face EDF dans un contexte de changement climatique. C'est dans cette optique et en s'appuyant sur ses expériences passées qu'EDF a pu mettre en place une Stratégie de Lutte contre les Dangers Climatiques. Cependant afin de répondre convenablement aux enjeux futurs et afin d'anticiper les situations potentiellement problématique, EDF a aussi décidé de mettre en œuvre une stratégie d'Adaptation au Changement Climatique. Les objectifs d'une telle stratégie sont multiples : adapter les infrastructures et les procédés actuels afin d'assurer leur pérennité, prendre en compte les besoins futurs en terme d'énergie afin de réaliser les investissements les plus judicieux, réduire la vulnérabilité des installations aux événements extrêmes, mobiliser la R&D sur ces problématiques. Cette stratégie concerne non seulement les installations d'EDF sur le territoire national mais aussi les différents projets menés à travers le monde. Pour atteindre ces objectifs EDF souhaite promouvoir l'accès à des informations de qualité et pertinentes sur le climat, adapter son fonctionnement interne à ces futures enjeux et renforcer la communication entre l'entreprise et les pouvoirs publics.

Dans ce contexte les services climatiques auraient pour but de faciliter l'accès aux sorties de modèles climatiques, de mettre à jour les connaissances sur le sujet (tendances, évolutions régionales...) mais aussi de fournir des guides méthodologiques permettant d'expliquer les différents scénarios, les échelles considérées, les incertitudes, etc...

Compte-Rendu de la 1ère Table Ronde : Besoins de services climatiques et réponses apportées, pratiques actuelles.

Mme S.Parey (EDF R&D) a assuré la présidence de cette première table ronde. Celle-ci a commencé par une rapide présentation de chaque intervenant.



Les intervenants

*P.Ruti*⁶

ENEA est un institut italien de recherche sur les thèmes du développement durable et de l'énergie. Cet institut travaille aussi sur la modélisation climatique à échelle régionale. L'idée de ce type de modélisation est de fournir un service climatique pour la Méditerranée dans les domaines de l'énergie et du tourisme. La démarche est du type bottom-up avec des idées et des pistes de travail qui émergent aux cours d'ateliers faisant intervenir des acteurs locaux, des professionnels de l'industrie ainsi que des scientifiques. Des activités de formation et de sensibilisation sur le sujet sont aussi organisées. Selon M Ruti, les principaux besoins auxquels doit répondre son organisation concernent les données actuelles et saisonnières pour développer et gérer la plus grande partie des infrastructures énergétiques, et non pas des simulations à des échelles de temps longues pour des infrastructures à plus longue durée de vie.

*J.Malandain*⁷

Pour M Malandain, les collectivités ont aujourd'hui des difficultés à traiter les questions liées au changement climatique dans la mesure où elles éprouvent déjà des difficultés à s'adapter aux contraintes actuelles. Pour l'instant, le dimensionnement des infrastructures est plutôt réalisé rétrospectivement par la prise en compte d'évènements passés. Mettre en place des indicateurs simples du type *intensité des pluies* à échelle locale permettrait d'avancer sur ce type de problème.

*T.Fuchs*⁸

DWD est le service météorologique allemand. M Fuchs a tout d'abord souligné la nécessité de bien prendre en compte certains éléments liés aux services climatiques. Tout d'abord il faut rappeler que le « *magic number* » ou plutôt la donnée climatique *parfaite* n'existe pas et que les utilisateurs de ces données doivent en avoir conscience. Un autre aspect central à la problématique des services climatiques est la question de l'échelle spatiale traitée et de la nécessité de réaliser des descentes d'échelle pour s'adapter à des besoins locaux. Ensuite, M.Fuchs a rappelé à quelles questions principales devaient répondre les services climatiques : Où trouver des données ? Quels impacts sur ma région ? Y aura-t-il des changements dans les tendances et l'occurrence d'évènements extrêmes ? Quelles sont les conséquences ? Les simulations sont-elles fiables ? C'est pour répondre à ces interrogations que DWD a développé ses propres services climatiques avec, par exemple, le lancement d'une plateforme en ligne où chacun peut regarder l'évolution à venir des grandeurs climatiques dans la région qui le concerne.

*H.Loukos*⁹

CLIMPACT est une entreprise dont le but est d'aider les différents acteurs de la société civile à adapter leurs services au changement climatique et aux aléas météorologiques. Aujourd'hui, l'activité *service météorologique* de CLIMPACT est la plus importante alors que l'activité *service climatique* ne représente qu'une faible partie de son chiffre d'affaire. Selon M Loukos le propre d'un service climatique est d'apporter de la valeur ajoutée par rapport aux données

⁶ ENEA: Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia y lo Sviluppo Economico Sostenibile.

⁷ Veolia-eau

⁸ DWD : Deutscher Wetterdienst

⁹ CLIMPACT



brutes. Ce rôle ne serait donc pas simplement de faire des prévisions sur le climat mais aussi de voir quels en seront les effets sur la demande, sur le comportement de la société... Le niveau minimum de service qui doit aujourd'hui être fourni doit répondre à la question « que va-t-il se passer sur ce territoire ? ». Ainsi l'idée de créer une plateforme où, par zone géographique, on pourrait avoir ces renseignements permettrait d'initier la réflexion sur les vulnérabilités climatiques futures.

La phase de questions

Une des premières questions qui a été posée concernait la définition même du terme *service climatique*. Les intervenants étaient d'accord pour dire qu'un service climatique devait traiter les questions des dangers et impacts du changement climatique, mais aussi proposer des mesures stratégiques d'adaptation en accompagnant les utilisateurs.

La question du coût de l'adaptation et des coûts liés aux dangers du climat et de la météo a aussi été soulevée.

Un aspect sur lequel M Loukos a insisté est que, pour l'instant, il était difficile de prendre en compte tous les dangers du changement climatique. Pour lui, il est indispensable de partir d'évènements qui se sont déjà produits et ensuite de prendre des mesures pour aider les utilisateurs à travailler sur leur résilience (et non pas leur adaptation) aux évènements climatiques futurs.

Le besoin de créer et de mettre à disposition des bases de données fiables est aussi apparu. Ainsi, certains intervenants ont lancé l'idée de mettre à disposition des données homogénéisées sur, par exemple, des évènements climatiques extrêmes *standardisés* ou des études de cas idéalisées.

Le besoin de développer le dialogue sur les incertitudes scientifiques et de communiquer sur celles-ci est aussi apparu comme indispensable.

La formation des personnes travaillant sur ce sujet a aussi été évoquée. Les professionnels travaillant dans le domaine des services climatiques sont censés en effet avoir reçu une formation suffisante leur permettant de comprendre les résultats scientifiques et de les exploiter.

Des difficultés ont de plus été rencontrées par les différents acteurs sur les outils pratiques à mettre en œuvre. En effet, il semble difficile de mettre en place des outils génériques utilisables par tous mais la création d'un portail où les personnes pourraient avoir accès au minimum de données sur la région qui les concerne pourrait amorcer la réflexion et entraîner d'autres demandes. Ce dispositif pourrait être accompagné de fiches de vulgarisation destinées au grand public.

Compte-Rendu de la 2^{de} Table Ronde : Quelle future organisation au niveau national ?

Les objectifs principaux de cette table ronde ont été introduits par M H.Kieken (Stratégies Durables Conseil) qui a proposé quatre pistes de réflexion : Quel périmètre d'action pour les



services climatiques : quels enjeux, quels types de services ? Quelle organisation opérationnelle pour ces services ? Quels liens avec la recherche ? Quel type de financement ?

Les intervenants

*M C.Derognat*¹⁰

Aria est un groupe de conseil spécialisé dans l'étude de l'environnement atmosphérique. Le but des services climatiques selon ARIA est d'analyser l'aléa climatique et de le traduire dans des termes scientifiques exploitables par les utilisateurs. Cet aléa croisé avec la caractérisation de la vulnérabilité des installations au changement climatique, réalisée à partir des données métier de l'industriel, devrait permettre d'estimer le risque de l'impact des changements climatiques. Cependant des questions restent à poser : Quelles données utiliser et comment prendre en compte les incertitudes ? Est-il possible de mettre en place des dispositifs de certification des résultats étant donné les incertitudes qui les accompagnent ? Comment prendre en compte aujourd'hui des échelles de temps de plusieurs dizaines d'années ?

*M E.Buisson*¹¹

NUMTECH est une société spécialisée dans la modélisation de dispersions et de pollutions dans l'air à l'échelle locale et régionale. Le constat fait par M Buisson est qu'aujourd'hui leurs clients n'expriment pas véritablement de besoins en ce qui concerne l'adaptation au changement climatique. Cependant les industriels cherchent de plus en plus à prendre des mesures *sans regret* ce qui implique des besoins de traduction et d'accompagnement vis-à-vis de la prise en compte des enjeux climatiques. Selon lui, ce sont des entreprises du type NUMTECH ou ARIA qui peuvent remplir ce rôle. Cependant si aujourd'hui ces entreprises sont spécialisées dans des questions sur la qualité de l'air, le transfert de compétence vers le domaine du changement climatique n'a pas encore été complètement réalisé. Ceci implique donc un développement de la formation sur le sujet et la mise en place d'une réglementation spécifique. Les enjeux liés au changement climatique restent cependant plus flous, plus incertains et sur du plus long terme ce qui ne facilite pas la prise en compte de ces questions dans les débats actuels.

*Mme A.Ged*¹²

A la suite de son Plan Climat Energie Territorial, la ville de Paris a décidé la création de l'Agence Parisienne du Climat qui est spécialisée dans les questions liées au changement climatique. Une grande partie de son activité consiste en une approche prospective sur la base de scénarios qui permettent de prendre en compte les enjeux climatiques et de rassembler les décideurs pour élaborer une stratégie d'actions partagée. Les questions que cette association est amenée à se poser sont de différents types : Quel est le socle commun de connaissance ? Quelles sont les parties prenantes ? Comment diffuser et partager le socle de connaissance ? Comment inciter les acteurs à l'action ?

¹⁰ ARIA

¹¹ NUMTECH

¹² Agence Parisienne du Climat

*M.P.Dandin*¹³

Selon M Dandin le cœur des activités destinées aux usagers de Météo-France concerne la météorologie. Cependant des travaux qui couvrent également le domaine de la climatologie sont entrepris avec notamment des travaux d'homogénéisation des séries climatiques. D'autres travaux visent à expliciter les incertitudes liées à ces séries et à donner toutes les informations possibles sur ces données. Le projet DRIAS a aussi été évoqué pour donner l'accès aux scénarios régionalisés et fournir des données *simplifiées* aux utilisateurs. Une réflexion sur les incertitudes doit cependant être menée afin de ne fournir que ce qui est *raisonnable* pour ne pas commettre d'erreur lorsque ces données sont utilisées. Ce projet continuera sur la période 2012-2016 et sera même complété d'études sur les événements extrêmes. Cependant M Dandin a aussi insisté sur la nécessité de savoir former les différents partenaires publics ou privés qui utiliseront ces données.

La phase de questions

Une large partie de cette phase fut consacrée à la question de l'accès aux données météorologiques et climatiques. En effet, les représentants des PME souhaitent que l'accès à ce type de données soit simplifié et gratuit ce qui, d'après eux, n'est pas le cas aujourd'hui. La problématique du prix des données étant une question politique, le rôle de la puissance publique dans la mise en place des services climatiques sera sans doute un élément déterminant. La question des ressources du monde de la recherche et des difficultés des chercheurs à fournir toutes les informations disponibles a aussi été évoquée. Cependant des projets tels que le projet DRIAS, le système GMES climat ou encore la directive INSPIRE visent à améliorer le transfert d'informations entre le monde de la recherche et les différents acteurs de la société civile.

La question de la certification des informations fournies par les services climatiques a aussi été abordée. Cependant, le niveau d'incertitude auquel nous sommes actuellement confrontés représente un frein important à la mise en place du processus. La formation des acteurs travaillant au sein de ces services climatiques ainsi que l'adaptation du type d'informations fournies au public visé semblent aussi au cœur des préoccupations des différents intervenants.

Conclusion

M.Colombier¹⁴ a conclu la journée en rappelant certaines pistes importantes de réflexion. Tout d'abord, il a souligné que la question de la mise en place de services climatiques était la conséquence d'un besoin de comprendre et de réduire les vulnérabilités de notre société vis-à-vis du changement climatique. Un des rôles des services climatiques serait ainsi d'aider les industriels à exprimer cette vulnérabilité qui est parfois implicite.

¹³ Météo-France

¹⁴ Institut du Développement Durable et des Relations Internationales

Ce processus touche de plus à un ensemble très large d'activités. Le besoin d'adapter les résultats fournis, en termes de raffinement des données ou encore d'échelles considérées, à l'utilisateur est donc apparu comme essentiel. La difficulté à prendre en compte aujourd'hui des enjeux qui concernent des échelles de temps longues (plusieurs décennies) a aussi été évoquée comme une difficulté majeure. Ainsi le processus qui conduit de l'expression d'un besoin à la prise de décision reste encore complexe.

Si différents modes d'organisation des services climatiques ont été présentés au cours de la journée, la nécessité de faire appel à une grande diversité d'acteurs (ingénieurs, chercheurs, économistes, sociologues...) a néanmoins été soulignée par tous les intervenants. Enfin, M Colombier a insisté sur l'idée que les sciences du climat, et la science en général, ainsi que la vie d'une entreprise étaient en permanente évolution et que les services climatiques devaient nécessairement faire l'objet de renouvellements permanents permettant de s'adapter à ces changements.

Annexe 1 : Programme du colloque

- 9h00 **Accueil des participants**
- 9h10 **Introduction** (P. Braconnot, J. Jouzel, IPSL)
- 9h30 **Fournitures de services climatiques aux industriels, un tour d’horizon**
 Modérateur : S. Joussaume
 Cette session présentera différentes expériences de services climatiques fournis à des groupes ou des activités industrielles, du point de vue des fournisseurs. Les exposés seront descriptifs, se basant sur des exemples concrets pour présenter leur activité, leur organisation et les difficultés rencontrées.
- [20min] France: INVULNERABLE (C. Déandreis)
 - [20min] UK : Met Office (C. Hewitt)
 - [20min] Canada : Ouranos (P. Baril)
 - [20min] Discussion avec la salle
- 10h50 **Pause**
- 11h10 **Stratégies d’adaptation industrielles**
 Modérateur : P. Delecluse
 Cette session sera l’occasion de présenter l’approche stratégique de certains groupes industriels ainsi que leurs éventuels besoins en services climatiques type SECIF à partir d’exemples concrets.
- [20min] Egis (Y. Enesser)
 - [20min] SNCF (J.L. Jourdan)
 - [20min] GDF-Suez / Safège (D. Renaudet)
 - [20min] EDF (J.Y. Caneill)
- 12h30 **Pause déjeuner**
- 14h00 **Table ronde A : Besoins de services climatiques et réponses apportées, pratiques actuelles et futures** (cf. propositions de discussion page suivante)
 Modérateur: S. Parey (EDF R&D)
 Intervenants: P. Ruti (ENEA); J. Malandain (Veolia-Eau); H. Loukos (CLIMPACT); T. Fuchs (DWD)
- 15h45 **Pause**
- 16h10 **Table ronde B : Quelle future organisation au niveau national ?** (cf. propositions page suivante)
 Modérateur: H. Kieken (Stratégies Durables Conseil)
 Intervenants: P. Dandin (Météo-France); E. Buisson (NUMTECH); A. Ged (Agence Parisienne du Climat); C. Derognat (ARIA)
- 17h50 **Conclusion** (M. Colombier, IDDRI)

18h00 **Fin du séminaire**

Table ronde A : Besoins de services climatiques et réponses apportées, pratiques actuelles et futures

Identification des besoins :

La fourniture actuelle de services climatiques aux industries permet déjà d'identifier une diversité de besoins en la matière. Quels sont-ils ? Quelles informations sont pertinentes : données brutes, produits plus élaborés, bonnes pratiques, etc. ?

Peut-on définir des besoins génériques, c'est-à-dire qui ne dépendent pas d'une demande spécifique dans un cadre spécifique ? Et quelles sont les implications en termes de formation (besoin, demande, sujets) ?

Peut-on déjà établir une liste de besoins ? De quels secteurs, acteurs proviennent-ils ? Quels en sont les objectifs ? Des nouveaux besoins risquent d'émerger : comment les anticiper ?

De nombreux industriels restent peu convaincus par la question de l'adaptation au changement climatique. Quels sont les freins, les obstacles, les réticences des industriels ? Comment aider les industriels à formuler leurs demandes en la matière ?

Traitement des besoins :

Comment aider les industriels dans l'utilisation des données, des méthodes d'analyse et l'interprétation des résultats ? Par exemple, comment encourager l'approche multi-modèles plutôt que l'utilisation d'un seul scénario de référence ? Plus généralement comment adapter l'analyse des incertitudes sur les tendances climatiques et leurs impacts pour le public industriel ?

Comment gérer le flux incessant de nouveaux jeux de données, de nouvelles méthodes d'analyse dans les études passées, en cours et à venir ?

Transparence et bonnes pratiques. Comment organiser la multitude de jeux de données et de méthodes d'analyse ? Comment mieux communiquer sur les produits existants ?

Difficultés régulièrement rencontrées :

Les besoins exprimés par les industriels en matière d'échelles de temps et d'espace (e.g. relatif court terme et impacts très localisés) correspondent-ils aux possibilités actuelles en matière de modélisation ? Sont-ils formulés de manière suffisamment claire pour que les climatologues puissent y apporter des réponses ? Ne caractérisent-ils pas un manque d'information sur l'ensemble des impacts potentiels du changement climatique ?

De nombreuses demandes renvoient à des questions de recherche fondamentale. On constate très souvent que les demandes de services climatiques dépassent les capacités des modèles climatiques. Quel comportement faut-il alors adopter face à ce type de demandes ?



Les nombreuses incertitudes associées à l'étude du climat rendent difficile la prise de position des scientifiques, frilosité qui n'encourage pas la prise de décision et les investissements dans les entreprises. Que faut-il faire ?

Table ronde B : Quelle future organisation au niveau national ?

L'organisation d'un tel service a pour objectif de faire face à la demande croissante des utilisateurs en utilisant les laboratoires de recherche sans que cela étouffe leur capacité à développer de nouvelles recherches. Un autre enjeu clef est de garantir une qualité maximale des produits fournis et études réalisées.

Contour des services climatiques :

De nombreuses questions dépassent le domaine spécifique de la climatologie et nécessitent d'intégrer les connaissances d'autres disciplines (hydrologie, écologie, chimie, économie...). Peut-on limiter les services climatiques à l'étude des simples variables climatiques et ne répondre qu'à un bout de la question en laissant l'utilisateur s'entourer des experts pour les autres disciplines ? Intégrer la notion de multidisciplinarité au sein des services climatiques complique fortement la structure à mettre en place, mais assure par ailleurs l'adéquation des réponses apportées, et donc la qualité du service en lui-même. Jusqu'où faut-il aller dans la multidisciplinarité et comment le faire ?

Gestion opérationnelle du service :

Les centres de recherche sur le climat sont indispensables pour fournir une assurance qualité et une interprétation des données climatiques amont dont ils participent à la production. Mais leur vocation est de faire de la recherche et non de produire un service fonctionnel vers l'aval. La partie fonctionnelle du service pourra être fournie par d'autres structures qui joueront le rôle d'interface entre la recherche et l'industrie. Quels types d'acteurs peuvent jouer ce rôle ?

La mise en place de cette interface implique d'autres enjeux :

- Certification de l'information/des données, formation des intermédiaires, gestion de la concurrence et de ses biais (en particulier en ce qui concerne les incertitudes, les modèles). Y aura-t-il un besoin de centralisation (coordination, surveillance, régulation) ?
- Coordination des activités, pour à la fois éviter les répétitions et aiguiller les demandes : cartographie actualisée des activités et des fournisseurs de service, collecte et partage des travaux à caractère générique, surveillance de la concurrence, certification, etc.

Enfin, l'étude du climat nécessite la mise en commun de données développées au niveau international. Quelle coordination à cette échelle pour faciliter l'accès aux données et autres produits ?

Lien avec la recherche fondamentale :

Les sciences du climat sont encore en forte évolution. On constate chaque année des avancées importantes en termes de méthodologies d'analyse et de connaissances du système physique.



Comment intégrer les progrès de la recherche dans un service fonctionnel ? Quel sont les moyens pour faciliter le transfert de connaissance de la recherche vers les intermédiaires et utilisateurs finaux ?

A l'inverse, comment établir le retour d'expérience des utilisateurs finaux vers la recherche afin d'informer des limites des produits fournis et ceux à améliorer en priorité ? Comment gérer les demandes « atypiques » nécessitant l'appui de la recherche fondamentale ? Quelle priorité doit-on leur donner ? Qui doit les traiter ? Qui doit les financer ?

L'accès aux services, le financement :

Peut-on distinguer différentes tranches au sein des services ? (ex. tranche publique = fourniture de données génériques, tranche privée expertise = interprétation, tranche privée Bureau d'Etudes = affinage de la demande). Quel modèle de coût est le plus adapté pour garantir un service adapté, portant des garanties ?