



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE



Hydrologie de surface

B2a – Hydrologie de la Métropole

Octobre 2012



Présent
pour
l'avenir



Le rapport final du lot Hydrologie de Surface du projet Explore 2070 comporte les documents suivants.

A - Synthèse des travaux

- A0 Note de synthèse de 4 pages
 - A1 Rapport de synthèse
 - A2 Graphiques et Cartes de présentation des résultats
-

B - Rapports thématiques détaillés

- B1 Rapport détaillé Climatologie Métropole
- B2a Rapport détaillé Hydrologie Métropole**
- B2b Rapport détaillé Hydrologie Métropole - Zooms
- B3 Rapport détaillé DOM
- B4 Rapport Thermie**
- B5 Synthèse Bibliographique

Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Il présente les méthodes mises en œuvre pour la modélisation hydrologique sur la métropole.

Les résultats finaux des travaux du lot Hydrologie de Surface sont présentés dans le document A1 – *Rapport de synthèse*.

B2A - RAPPORT DETAILLE HYDROLOGIE METROPOLE

1. RESUME DU PRESENT RAPPORT	1
1.1 Rappel de la démarche générale	1
1.2 Principaux résultats	1
2. INTRODUCTION GENERALE.....	3
2.1 Objectifs	3
2.2 Démarche generale	3
2.3 Méthodologie	4
2.4 Contenu du rapport	8
3. CHOIX DE LA PERIODE DE REFERENCE	9
3.1 Présentation des choix possibles	9
3.1.1 Etat de l'art	9
3.1.2 Proposition 1 : 1961-1990	10
3.1.3 Proposition 2 : 1970-1999	11
3.2 Disponibilité des donnees d'observations de debits	11
3.3 Conclusion	12
4. CHOIX DES POINTS DE CALCUL.....	13
4.1 Introduction	13
4.1.1 Objectifs	13
4.1.2 Rappels du cadre général de l'établissement de la base de données hydrologique	13
4.1.3 Eléments constitutifs de la base de donnée hydrologique	13
4.2 La constitution de la base de données hydrologique	13
4.2.1 Définition du besoin	13
4.2.2 Contraintes liées au projet global	14
4.2.3 Contraintes spécifiques à la modélisation hydrologique	14
4.2.4 Rappel des objectifs initiaux	15
4.3 Disponibilité et qualité des mesures de débit	15
4.3.1 La banque HYDRO du Ministère de l'Ecologie	15
4.3.2 Eligibilité des stations hydrométriques de la banque HYDRO	16
4.3.3 Les points SIM	18
4.4 Prise en compte des enjeux	19
4.4.1 Les points de repères dits points nodaux	19
4.4.2 Les points aux droits des principales métropoles françaises	21
4.4.3 Une base de données particulière pour le suivi des étiages	21
4.4.4 Les points du réseau de vigilance VIGICRUES	22

4.5	methodologie suivie pour la constitution de la base de données hydrologique	23
4.5.1	Stratégie générale	23
4.5.2	Constitution de la base de données hydrologique	23
4.6	Résultats	25
4.6.1	France continentale	25
4.6.2	Corse	28
4.7	Conclusion	29
5.	UTILISATION DES MODELES HYDROLOGIQUES ET MODES DE CALAGE	31
5.1	Présentation simplifiée des modèles	31
5.1.1	Le modele GR4J	31
5.1.2	Le modele Safran-Isba-Modcou	32
5.2	Présentation détaillée du modele GR4J	32
5.2.1	Description	32
5.2.2	Calage	34
5.3	Présentation détaillée du modele Isba-Modcou	35
5.3.1	Description	35
5.3.2	Calage	37
6.	EVALUATION COMPARATIVE DES MODELES HYDROLOGIQUES EN TEMPS PRESENT	39
6.1	Objectifs	39
6.2	Donnes d'entree utilisees	39
6.3	Methodologie	40
6.3.1	Modalités d'application	40
6.3.2	Critères d'évaluation	40
6.4	Résultats	41
6.4.1	GR4J	41
6.4.2	ISBA-MODCOU	45
6.4.3	Analyse comparée des performances des deux modèles hydrologiques	47
6.5	Lien entre performance et surface du bassin versant	50
6.6	Exemples de Chroniques	51
6.7	conclusion	52
7.	CALCUL D'INDICATEURS ET ANALYSE STATISTIQUE	53
8.	CONCLUSIONS ET PRODUCTIONS FINALES	53
9.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES	53

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour cinq grands bassins versants (à gauche : GR4J ; à droite : Isba-Modcou).....	2
Figure 2 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements	3
Figure 3 : Vue globale de la démarche adoptée par le lot Hydrologie de Surface	5
Figure 4 : Schéma de la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface	7
Figure 5 - Extension de la période de référence retenue dans les travaux liés aux effets du changement climatique (cf. synthèse bibliographique du Lot Hydrologie de surface).....	10
Figure 6 : Localisation des stations hydrologiques retenues avec la proposition 1 : 1961-1990.....	12
Figure 7 : Localisation de toutes les stations de la banque HYDRO en France métropolitaine	16
Figure 8 : Localisation des points de jaugeage SIM.....	19
Figure 9 : Localisation des points nodaux.....	20
Figure 10 :- Localisation des stations sélectionnées par Giuntoli et Renard (2009) pour le suivi des étiages	22
Figure 11 : Localisation des stations hydrométriques du réseau VIGICRUES.....	22
Figure 12 : Localisation des stations hydrométriques retenues dans la base de données hydrologique – Proposition 1. En rond bleu, tous les points de l'étape 1; en rouge, les points SIM.	26
Figure 13 : Localisation des stations hydrométriques retenues dans la base de données hydrologique – Proposition 2. En rond bleu, tous les points de l'étape 1; en rouge, les points SIM.	27
Figure 14 : Contours des bassins versants présélectionnés dans la base de données hydrologiques.....	29
Figure 15 : Localisation des 1522 points de calcul retenus pour Explore 2070	30
Figure 16 : Structure schématique du modèle GR4J	31
Figure 17 : Schéma de principe de MODCOU : l'eau est transférée vers la rivière, puis dans la rivière avec un pas de temps de 3h. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière	32
Figure 18 : Structure schématique du modèle GR4J	34
Figure 19 : Schéma de principe de MODCOU : l'eau est transférée vers la rivière, puis dans la rivière avec un pas de temps de 3h. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière	36
Figure 20 : Points de jaugeage Modcou	36
Figure 21 : Carte du paramètre WD sur la France	38
Figure 22 : Relation entre le critère de Nash et le critère borne C2M	41
Figure 23 : Performances en validation du modèle GR4J avec <i>module neige Cemaneige</i> – Critère C2MQ.....	43
Figure 24 : Performances en validation du modèle GR4J avec <i>module neige Cemaneige</i> – Critère C2MLQ.....	43
Figure 25 : Performances moyennes du modèle GR4J selon le découpage hydrologique proposé – C2MQ.....	44
Figure 26 : Performances moyennes du modèle GR4J selon le découpage hydrologique proposé – C2MLQ.....	44
Figure 27 : Performances du modèle ISBA-MODCOU – critère C2MQ	45
Figure 28 : Performances du modèle ISBA-MODCOU – critère C2MLQ	46
Figure 29 : Performances moyennes du modèle ISBA-MODCOU selon le découpage hydrologique proposé– C2MQ.....	46
Figure 30 : Performances moyennes du modèle ISBA-MODCOU selon le découpage hydrologique proposé– C2MLQ.....	47

Figure 31 : Comparaison des performances (critère C2MQ) des deux modèles. Les points verts correspondent à une performance supérieure du modèle GR4J.....	48
Figure 32 : Performances comparées de GR4J et de SIM sur 451 bassins.....	49
Figure 33 : Distribution des critères de performances par bassin pour le modèle GR4J.....	50
Figure 34 : Distribution des critères de performances par bassin pour le modèle ISBA-MODCOU	50
Figure 35 : Relation entre performances et surface du bassin versant	51
Figure 36 : Exemple de chroniques obtenues sur la Seine à Paris Austerlitz. En bleu, le débit observé, en vert le débit simulé par GR4J, en gris le débit simulé par ISBA-MODCOU. En jaune, le stock de neige modélisé par GR4J.....	51
Figure 37 : Exemple de chroniques obtenues sur la Loire à Montjean sur Loire. En bleu, le débit observé, en vert le débit simulé par GR4J, en gris le débit simulé par ISBA-MODCOU. En jaune, le stock de neige modélisé par GR4J.	52

TABLEAUX

Tableau 1- Description des métadonnées de la banque HYDRO	17
Tableau 2 - Liste provisoire des points métropoles	21
Tableau 3 - Caractéristiques des stations hydrométriques de la banque HYDRO pour la constitution de la base de données.	23
Tableau 4 - Tableau récapitulatif des caractéristiques des propositions 1 et 2 (Métropole).....	28
Tableau 5 - Récapitulatif des résultats pour les 2 propositions en termes de comparaison inter-modèles	30
Tableau 6 : Moyennes, max, min et quantiles 10, 50 et 90 des performances pour les deux modèles et les trois critères sur les 451 BV communs	49

1. RESUME DU PRESENT RAPPORT

La tâche principale attendue du Lot Hydrologie de surface est une évaluation de l'impact possible du changement climatique à l'horizon 2070 sur les ressources en eau superficielles en France métropolitaine et sur les départements d'Outre-mer.

Une partie des travaux réalisés a porté spécifiquement sur la quantification des évolutions des eaux de surface. Le présent rapport détaille les travaux réalisés sur la métropole, les résultats finaux étant présentés dans le rapport général A1.

Nous présenterons dans ce qui suit la démarche générale de modélisation adoptée, la nature des résultats obtenus, ainsi que la façon dont les incertitudes ont été appréhendées.

1.1 RAPPEL DE LA DEMARCHE GENERALE

Le Lot Hydrologie de surface a mis en place une chaîne de modélisation afin de produire des simulations de débits journaliers en temps présent (1962-1991) et en temps futur (2046-2065) au droit de 1522 points de calcul sur la métropole.

Cette chaîne de calcul est construite selon l'idée suivante :

- ▶ Des modèles climatiques sont utilisés pour simuler le climat présent et le climat futur au droit des points de calcul, sous la forme de séries de précipitation, température et évapotranspiration potentielle (ETP). Il s'agit de sept modèles de circulation générale (GCMs) forcés par le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B, et désagrégés par une méthode de descente d'échelle statistique.
- ▶ Ces données de sorties des modèles climatiques sont utilisées en entrée de deux modèles hydrologiques afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des bassins, et donc d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points.

Cette chaîne de calcul fait intervenir plusieurs modèles, dans le but de cerner une part de l'incertitude inhérente à ce type d'approche. Cette chaîne de calcul produit et utilise des chroniques simulées de précipitation, évapotranspiration potentielle et débit au pas de temps journalier, sur deux périodes : 1962-1991 et 2046-2065. Les différences entre les résultats des simulations sur ces deux périodes permettent d'identifier des évolutions climatiques et hydrologiques possibles.

Les résultats ne constituent pas des prévisions mais des projections visant à donner une image des états possibles des cours d'eau français à l'horizon 2050-2070. Il sera essentiel de garder à l'esprit que de nombreuses incertitudes sont attachées à tous les résultats produits. Le lecteur est invité à la plus grande prudence quant à leur utilisation.

1.2 PRINCIPAUX RESULTATS

Tous les modèles étudiés projettent une hausse des températures assez uniforme sur le territoire, comprise entre 1.4°C et 3°C en moyenne annuelle.

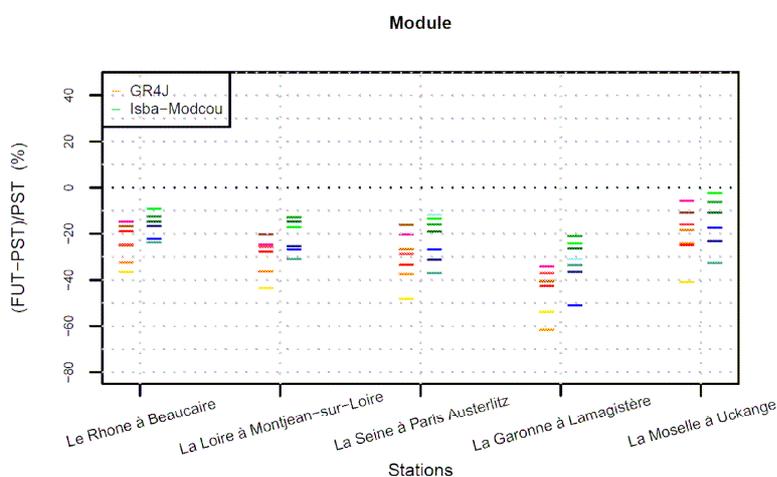
En revanche, une grande disparité entre modèles apparaît sur les tendances des précipitations saisonnières. La plupart des modèles s'accordent cependant sur une tendance à la baisse des précipitations en été sur l'ensemble du territoire, de l'ordre de -16% à -23%. L'extrême Sud-Ouest est déficitaire dans la majorité des cas.

L'estimation de l'évolution des précipitations et donc du cycle hydrologique à l'horizon 2050-2070 est donc soumise à de fortes incertitudes.

En terme d'impacts hydrologiques de ces évolutions climatiques, les résultats des simulations conduites sur la métropole montrent une diminution significative globale de la ressource à l'échelle du territoire, qui pourrait être de l'ordre de 10% à 40% selon les simulations. Pour une majorité des cours d'eau, les modèles projettent une accentuation des étiages encore plus marquée. Les évolutions sur les crues, elles, sont plus hétérogènes.

Ces tendances et leur quantification sont soumises à de fortes incertitudes, notamment pour les extrêmes hydrologiques. L'analyse multimodèle mise en œuvre montre que les sources principales d'incertitudes varient selon l'indicateur hydrologique considéré. Les modèles climatiques et hydrologiques constituent deux sources d'incertitudes prépondérantes. Cette analyse invite à la prudence quant à l'utilisation des résultats, d'autant que l'incertitude n'est pas appréhendée de manière exhaustive : ces résultats reposent sur un ensemble d'hypothèses fortes sur les conditions futures et les capacités des modèles à reproduire le fonctionnement naturel des bassins.

Figure 1: Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats des 14 projections pour cinq grands bassins versants (à gauche : GR4J ; à droite : Isba-Modcou)



Ces tendances sont en accord avec les résultats des études antérieures menées sur la France, bien que l'amplitude des changements projetés diffère sensiblement pour certaines études, en raison d'hypothèses et de choix de modélisations différents.

Les incertitudes énoncées et la variabilité des résultats ne doivent cependant pas empêcher d'agir. Les convergences de résultats (entre projection au sein du projet lui-même et avec des projections issues de projets en cours ou précédents) sur les grandes tendances constituent une base déjà solide pour initier des politiques d'adaptation.

2. INTRODUCTION GENERALE

2.1 OBJECTIFS

Objectif principal

La tâche principale attendue du Lot Hydrologie de surface est une évaluation de l'impact possible du changement climatique à l'horizon 2070 sur les ressources en eau superficielles à l'échelle nationale.

Un bassin versant est un système ouvert qui transforme les signaux climatiques en un signal de sortie « écoulement » en intégrant son état de surface, les échanges avec les eaux souterraines, les prélèvements, les rejets et la gestion des ouvrages de transfert et/ou de régulation. La question clé posée au Lot Hydrologie de surface est : **Comment des changements sur les signaux d'entrée climatiques (précipitations et températures) peuvent ils impacter le signal de sortie « ruissellement » ?**

Autres objectifs

Le Lot Hydrologie de surface est également chargé de caractériser, à l'échelle nationale, les évolutions climatiques possibles à l'horizon 2070 (données d'entrée pour ce Lot) et de participer aux réflexions sur les mesures d'adaptation. Enfin, le Lot s'est vu confié la réalisation de modélisations de la température de l'eau pour estimer son évolution future probable.

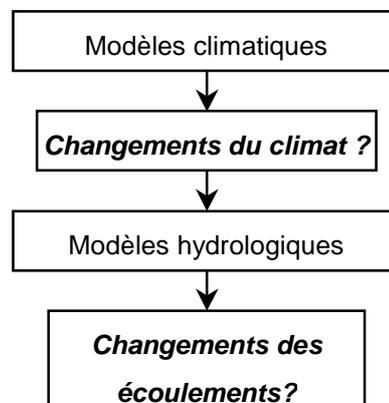
2.2 DEMARCHE GENERALE

Pour répondre à cette question, le lot met en place une chaîne de calcul au droit de **1522 bassins versants en Métropole et 35 bassins versants dans les départements d'Outre-mer**, afin d'établir de **projections de débits à l'horizon 2070**.

Cette chaîne de calcul est construite selon l'idée suivante :

- ▶ Des **modèles climatiques** permettent de simuler le climat présent et le climat futur au droit des 1522 points de calcul, sous la forme de signaux de précipitations, températures et évapotranspiration potentielle.
- ▶ Ces signaux sont utilisés en entrée des **modèles hydrologiques** afin de simuler les débits présents et futurs possibles aux exutoires des 1522 bassins, et donc **d'appréhender les changements hydrologiques possibles en ces points**.

Figure 2 : Principe de la démarche du lot hydrologie de surface pour la simulation des écoulements



Cette chaîne de calcul fait intervenir plusieurs modèles climatiques et hydrologiques afin de prendre en compte l'incertitude inhérente aux résultats.

Elle produit et utilise des chroniques simulées de précipitation, évapotranspiration et débit au pas de temps journalier, sur deux périodes : 1962-1991 et 2046-2065. Les différences entre les simulations sur ces deux périodes permettent d'identifier des évolutions climatiques et hydrologiques possibles.

A l'issue de ces simulations, un travail d'analyse statistique de ces simulations fournit des éléments de réponse aux interrogations suivantes : ***Quels pourront être les impacts du changement climatique sur la ressource en eau ? sur le risque de crues ?***

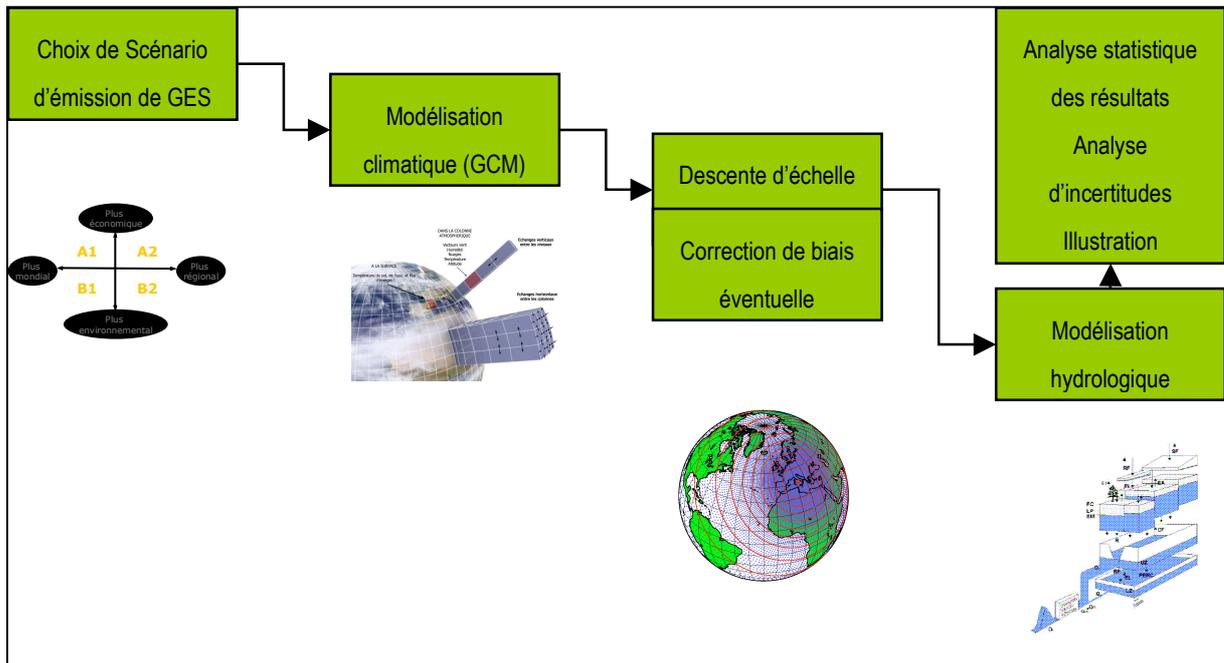
Il est essentiel de garder à l'esprit que de nombreuses incertitudes sont attachées à tous les résultats produits.

2.3 METHODOLOGIE

METHODOLOGIE GENERALE

La méthodologie générale adoptée par le lot hydrologie de Surface suit l'organisation schématisée ci-dessous.

Figure 3 : Vue globale de la démarche adoptée par le lot Hydrologie de Surface



A partir d'une hypothèse d'émission de gaz à effet de serre, on mobilise des modèles climatiques (modèles de circulation général GCM) qui produisent des simulations de pluie et température sur un large maillage (de l'ordre de 300km). Une méthode de descente d'échelle et un débiaisage de ces simulations permet l'obtention de simulation climatiques sur un maillage plus fin (8km x 8km) et donc, après agrégation, à l'échelle des bassins versants étudiés. Ces données servent de données d'entrée aux modèles hydrologiques qui produisent des séries de débits journaliers à partir desquels on réalise des analyses statistiques. Chacune de ces étapes repose sur un ensemble d'hypothèses et de choix méthodologiques importants, qui induisent des incertitudes de différentes natures.

Les trois premières étapes, c'est à dire :

- ▶ le choix de scénario d'émission de GES ;
- ▶ la modélisation climatique ;
- ▶ la descente d'échelle et la correction des projections climatiques ;

sont détaillées dans le document B1 – Rapport détaillé Climatologie Métropole.

Le présent rapport détaille les méthodes mises en œuvre pour la modélisation hydrologique.

METHODOLOGIE POUR LES PROJECTIONS HYDROLOGIQUES

Pour cette étape, **deux modèles hydrologiques sont mobilisés : le modèle conceptuel GR4J de l'IRSTEA (ex Cemagref) et le modèle à bases physiques Safran-Isba-Modcou de Météo-France.** Cette approche multi-modèle permet de prendre en compte une part des incertitudes liées aux modélisations.

La mesure de l'impact se fait en comparant les sorties des modèles pour une période représentant le climat de référence (on injecte dans le modèle les précipitations et évapotranspirations de la période de référence) et une période de temps représentant un climat futur possible (on injecte dans le modèle les précipitations et évapotranspirations possibles de la période future). La comparaison est faite à partir des sorties des modèles pour différentes grandeurs statistiques calculées sur ces périodes respectives. Il s'agit par exemple du débit moyen (module), des débits moyens mensuels, de descripteurs d'étiages (par exemple QMNA5) ou de crue (par exemple QJX10), etc ...

La méthodologie pour les projections hydrologiques suit donc les **4 grandes étapes** suivantes :

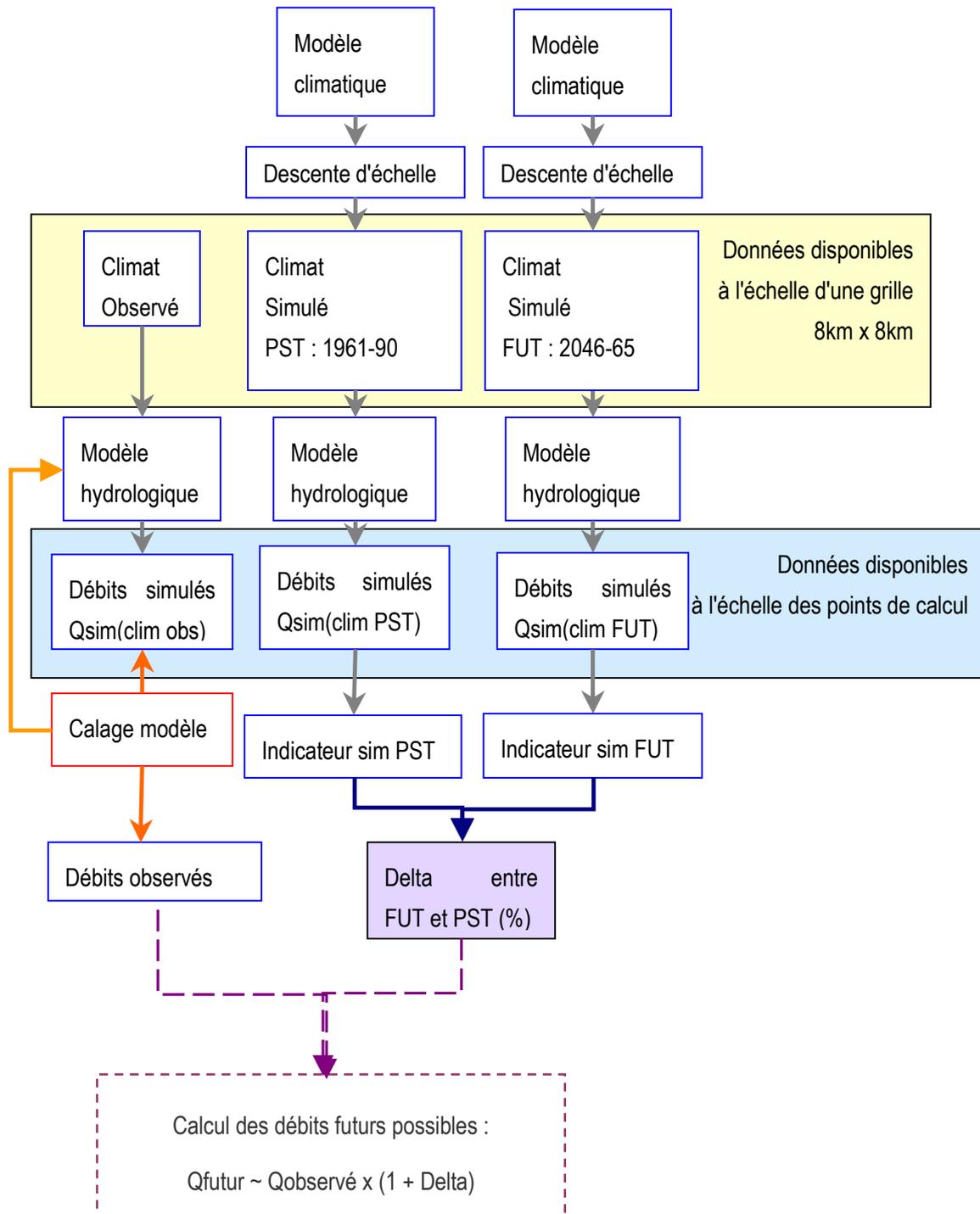
- ▶ **Etude de fiabilité des modèles** : Il s'agit d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les débits passés. Cela fournira une première quantification de l'incertitude associée aux modèles hydrologiques.
- ▶ **Calage des modèles** : Des données d'observations météorologiques et hydrologiques passées permettent de caler ou ajuster les modèles hydrologiques. Pour le modèle GR4J, ce calage permet de paramétrer le modèle au droit de chaque bassin versant, paramétrage qui est ensuite réutilisé en temps futur.
- ▶ **Simulations des débits passés et futurs par les 2 modèles** : En chaque point d'étude, pour chaque modèle hydrologique et chaque modèle climatique, on effectue les simulations des débits passés (1962-1990) et futurs (2047-2065), au pas de temps journalier. **On génère donc, pour chaque point de calcul, 7 ou 14 chroniques de débits journaliers en temps passé et 7 ou 14 chroniques de débits journaliers en temps futur.**
- ▶ **Calcul d'indicateurs et analyse statistique** :
Afin de caractériser les évolutions hydrologiques entre la période de référence et la période future, un ensemble de descripteurs ont été calculés à partir des simulations de débits journaliers. Ils s'agit d'une quinzaine d'indicateurs qui rendent compte :
 - des régimes hydrologiques (Module, débits mensuels, débit annuel quinquennal sec,...) ;
 - des étiages (QMNA5, VCN30, ...) ;
 - des crues (QJXA10, ...).

On calcule pour chaque indicateur à chaque bassin versant, la variation entre période de référence et période future : ces deltas rendent compte des évolutions hydrologiques possibles.

Une analyse statistique des résultats permet de dégager les grandes tendances et les incertitudes associées.

Le schéma ci-dessous résume la démarche effectuée pour les projections hydrologiques en chaque point de calcul et pour chaque modèle.

Figure 4 : Schéma de la démarche générale adoptée par le lot Hydrologie de Surface



2.4 CONTENU DU RAPPORT

Après une présentation des deux modèles hydrologiques mobilisés pour les travaux du lot 3, nous détaillons les méthodes mises en œuvre pour la modélisation hydrologique, c'est-à-dire :

- ▶ le choix de la période de référence ;
- ▶ le choix des points de calculs sélectionnés pour les modélisations hydrologiques ;
- ▶ l'évaluation de la fiabilité des modèles hydrologiques en temps présent sur les points du réseau hydrographique ;
- ▶ le calcul d'indicateurs et le traitement statistique des résultats de simulation ;
- ▶ la production des rendus finaux, rendant compte des tendances hydrologiques futures et des incertitudes associées.

3. CHOIX DE LA PERIODE DE REFERENCE

Le choix de cette période a des implications pour d'autres lots utilisant les résultats du Lot Hydrologie de surface. La période 1961-1990 est souvent retenue comme période de référence dans les études d'impacts des changements climatiques, mais elle implique un certain nombre de contraintes sur la disponibilité des données hydrologiques. Il est donc intéressant de regarder les avantages à considérer une autre période de référence plus récente, avant d'arrêter ce choix.

Dans le cadre général des études d'impact des changements climatiques, la période de référence désigne la période de temps utilisée comme point de comparaison avec les périodes futures sur lesquelles seront établies les projections. Les évolutions des variables étudiées sont donc calculées entre cette période de référence et les périodes ciblées dans le futur.

La période de référence correspond à une période de temps passé, sur laquelle on dispose d'observations (typiquement température, précipitation, écoulement, etc.) et de simulations issues des modèles utilisés ensuite pour établir les projections. Les observations permettent d'évaluer la qualité des modèles dans le passé et, le cas échéant, de les caler. Il est donc intéressant de disposer d'une période de référence suffisamment longue pour qu'elle soit représentative de la variabilité naturelle des conditions hydroclimatiques. Une période de 30 ans est souvent choisie.

Bien souvent considérée comme représentant les conditions "actuelles" ou le "temps présent", la période de référence peut en fait faire référence à une période assez lointaine dans le passé, alors que des évolutions ont déjà pu être constatées depuis. Les termes "actuel" et "temps présent" peuvent donc ne pas être synonyme d' "aujourd'hui". Pour éviter les confusions, il est donc préférable de préciser la période de référence utilisée lorsque l'on quantifie des évolutions.

Dans le cadre du Lot Hydrologie de surface du projet Explore 2070, la période de référence est la période sur laquelle on évaluera les propriétés statistiques des variables étudiées (climatiques et hydrologiques) en "temps présent", qui seront ensuite confrontées à celles des projections en climat futur. Le différentiel pourrait être réalisé entre observations passées et projections futures. Cependant, si le modèle est biaisé en conditions passées, cette approche peut conduire à des résultats erronés (sur- ou sous-estimation des évolutions). On préfère donc souvent comparer les projections futures aux simulations sur le passé, en faisant l'hypothèse que le biais du modèle reste constant, ce qui n'est pas forcément une hypothèse vérifiée. Il n'est donc pas indispensable d'avoir des données observées sur toute la période de référence, mais une sous-période peut être suffisante pour rendre compte des qualités du modèle et évaluer ses paramètres.

3.1 PRESENTATION DES CHOIX POSSIBLES

3.1.1 Etat de l'art

Par définition, la période de référence doit donc être représentative de ce que l'on considère être une condition initiale pertinente pour évaluer les changements. Il s'agirait donc typiquement d'une période avant changement. Dans le cas de changements brutaux des conditions environnementales (par ex. éruption volcanique), cela est facile à choisir. Dans le cas des changements climatiques qui s'étalent sur plusieurs décennies, le choix est plus délicat.

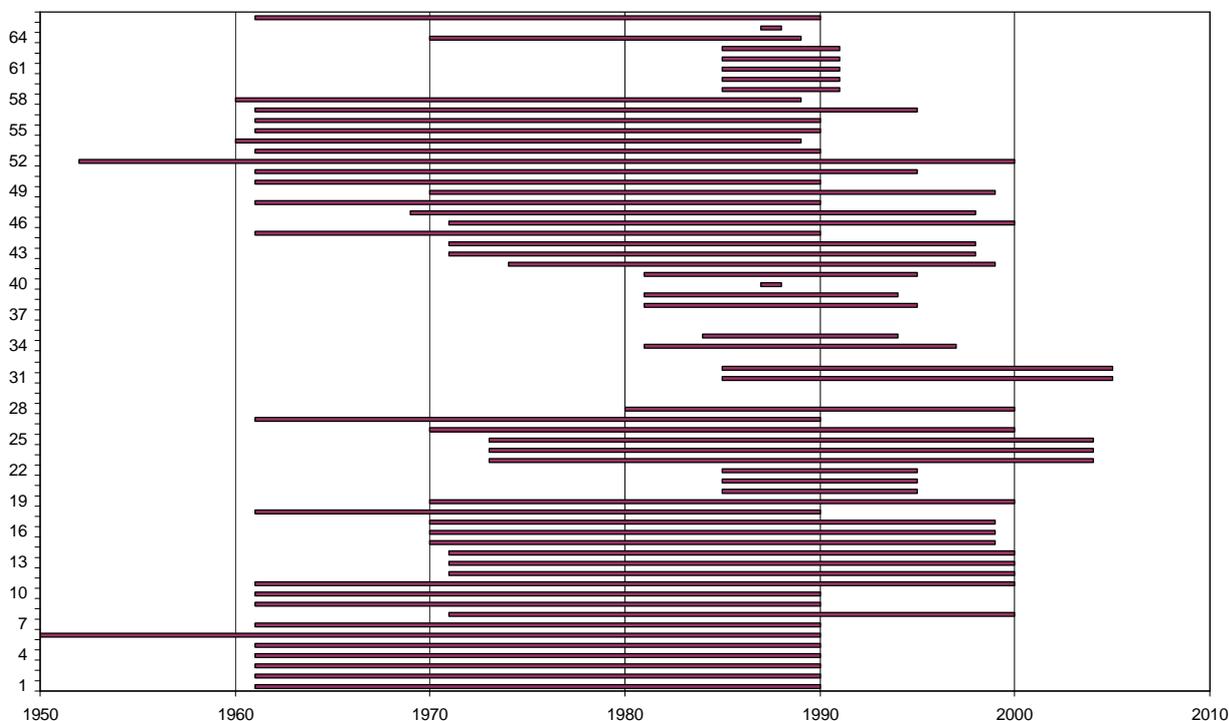
D'un point de vue strictement climatique, la communauté scientifique a retenu la période 1961-1990 comme période de référence. Ce choix repose principalement sur le fait que les conditions climatiques sur cette période sont relativement stables (voir précisions plus bas). En hydrologie, on ne retrouve pas un tel consensus sur le choix d'une période de référence. Dans la littérature, les conditions climatiques et hydrologiques temps présent sont calculées sur des périodes de référence d'extensions variables. Bien qu'elles soient majoritairement centrées sur 1961-1990, bon nombre peuvent correspondre à des périodes plus récentes, certaines pouvant aller jusqu'en 2005 (Figure 5). Deux éléments principaux peuvent expliquer cet état de fait :

- ▶ la contrainte liée à la disponibilité des données d'observations, indispensables au calage des modèles hydrologiques ;
- ▶ la volonté de rendre compte dans la période de référence des éventuelles modifications rapides des conditions hydrologiques observées ces dernières années et donc de choisir un état initial plus proche des conditions d'aujourd'hui.

Dans le cadre de notre étude, nous sommes confrontés aux mêmes difficultés quant au choix de la période de référence. Nous présentons dans la suite deux propositions alternatives de période de référence, en précisant à chaque fois leurs avantages et inconvénients :

- ▶ la période 1961-1990 correspondant au choix le plus couramment fait dans les études d'impacts ;
- ▶ la période 1970-1999, qui pourrait être la période la plus récente envisagée compte tenu de la disponibilité des données climatiques.

Figure 5 - Extension de la période de référence retenue dans les travaux liés aux effets du changement climatique (cf. synthèse bibliographique du Lot Hydrologie de surface).



3.1.2 Proposition 1 : 1961-1990

La période 1961-1990 est la période de référence en climatologie. Elle correspond donc au choix de la majorité des études d'impact du changement climatique. Elle n'empiète que de 5 à 10 ans sur la période à partir de laquelle on note une rapide augmentation des températures globales (observées à partir des années 1980). Il est ainsi légitime de lui attribuer un caractère relativement stationnaire, ce qui devient faux lorsqu'on étend la période aux années 1990. Or, en toute rigueur, le caractère stationnaire est une condition nécessaire aux calculs de moyenne sur la période concernée.

C'est une proposition contraignante au niveau de la disponibilité des données d'observations de débits. En effet, en France, de nombreuses stations ont été implantées à la fin des années 1960 ou dans les années 1970. Elle présente cependant l'avantage de garantir une homogénéité temporelle de l'analyse climatique et hydrologique, ainsi qu'une bonne cohérence avec les travaux réalisés au niveau international. Enfin, retenir l'année 1990 comme année limite de la période "temps présent" a une dimension symbolique, puisque c'est l'année de référence retenue par le protocole de Kyoto pour la diminution des émissions de gaz à effets de serre. Les simulations de climat temps présent fournies par Météo-France sont disponibles sur cette période (jeu de simulations AR4 désagrégées par méthode CERFACS dsclim).

3.1.3 Proposition 2 : 1970-1999

Le choix de cette période permettrait une plus grande disponibilité des données d'observations de débits. De plus, en termes de communication, cette période plus contemporaine correspond mieux à l'image que l'on a des conditions "actuelles". Dans une optique d'adaptation, il peut sembler plus pertinent d'évaluer les changements de comportements (gestion de l'eau) nécessaires par rapport à la situation présente, plutôt qu'à une situation passée. Cependant, les simulations climatiques sur la période 1991-1999 ne sont actuellement pas disponibles et il faudrait du côté de Météo-France procéder à des calculs supplémentaires. Enfin, on peut reprocher le caractère non-stationnaire du climat sur cette période dû à l'augmentation rapide des températures globales observées à partir des années 1980.

3.2 DISPONIBILITE DES DONNEES D'OBSERVATIONS DE DEBITS

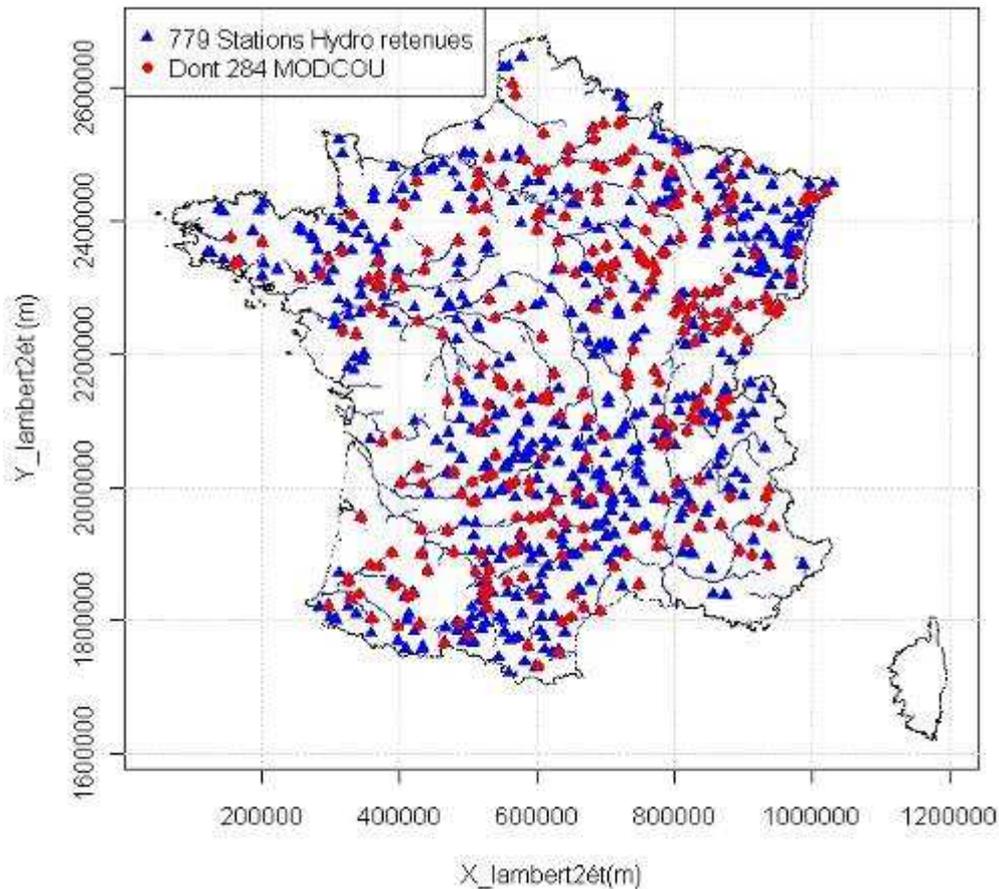
Nous présentons dans cette partie les résultats en termes de disponibilité des données d'observations de débit pour les deux propositions. L'Irstea dispose d'une version de la banque Hydro livrée au printemps 2010 et contenant les chroniques d'observations d'environ 4 000 stations hydrologiques. Une procédure de sélection a été mise en place pour extraire de cette base de données les stations hydrologiques remplissant un certain nombre de critères définis par l'utilisateur. Cela fera l'objet de travaux ultérieurs. Nous nous contentons ici de présenter les résultats de cette extraction pour les deux propositions de période de référence, tout autre critère de sélection étant par ailleurs pris à l'identique.

Avec la proposition 1 (1961-1990), le nombre de stations hydrologiques retenu pour analyse dans le projet s'élève à 779.

Avec la proposition 2 (1970-1999), le nombre de stations hydrologiques retenu s'élève à 894.

Dans une situation de sélection vraisemblable, le déplacement de la période de référence de 1961-1990 à 1971-1999 permet donc d'augmenter la disponibilité des données d'environ 10%. Notons également que même dans le cas le moins favorable, le nombre de stations hydrologiques retenues ainsi que leur répartition géographique (Figure 6) sont assez satisfaisants pour les objectifs du projet.

Figure 6 : Localisation des stations hydrologiques retenues avec la proposition 1 : 1961-1990



3.3 CONCLUSION

Nous avons présenté les éléments nécessaires à la décision du choix de la période de référence. Nous avons exposé les avantages et inconvénients des deux propositions avancées. La moindre disponibilité des données d'observations de débits dans le cadre de la proposition 1 (1961-1990) ne semble pas être limitant pour les analyses prévues dans le cadre du projet et ne justifie donc pas le décalage de la période de référence vers une période plus récente.

Nous avons donc préconisé de retenir la période 1961-1990 comme période de référence pour les travaux du Lot Hydrologie de surface. Cette proposition a été retenue par le Ministère.

4. CHOIX DES POINTS DE CALCUL

4.1 INTRODUCTION

4.1.1 Objectifs

Ce chapitre présente la méthodologie suivie pour le choix des points de calcul et la constitution de la base de données hydrologiques utilisée par le lot Hydrologie de Surface.

Cette base de données correspond à des données *d'observations*. Elle permet d'une part de caler et d'évaluer la qualité des modèles hydrologiques sur la période de référence au droit de chaque bassin versant étudié. D'autre part elle sert à quantifier la ressource en eau sur la période de référence en chaque bassin versant.

4.1.2 Rappels du cadre général de l'établissement de la base de données hydrologique

La réalisation pratique de cette Isba-Modcou de modélisation requiert la constitution d'une base de données hydrométéorologique sur une période de référence. Cette dernière résulte du croisement d'une base de données météorologique (précipitation, évapotranspiration potentielle, température) avec une base de données hydrométrique (débit de surface).

4.1.3 Eléments constitutifs de la base de donnée hydrologique

Les données météorologiques ont été fournies et analysées par Météo-France dans le cadre des travaux du Lot Hydrologie de surface. Elles ne seront pas l'objet d'une attention particulière ici. Elles sont fournies sur la totalité du territoire sur une grille de maille 8x8 km, sur une période allant d'août 1958 à juillet 2009. Elles n'induisent donc pas de fortes contraintes pour les travaux du Lot Hydrologie de surface, excepté le fait que le pas d'espace de ces données conduira à préférer des bassins d'une taille supérieure à celle de la maille météorologique.

Les entités mises en jeu dans la base de données hydrométrique sont des points de mesures de l'écoulement (stations hydrométriques) auxquels sont attachées une surface drainée (bassins versants) et une chronique de mesures d'une variable hydrologique (hauteurs d'eau ou débits) à un certain pas de temps (ici journalier). Les entités se déclinent de plus en un certain nombre d'attributs, comme par exemple les coordonnées géographiques d'une station, l'aire de la surface drainée, ou l'étendue et la qualité de mesures de la chronique d'observations.

4.2 LA CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES HYDROLOGIQUE

4.2.1 Définition du besoin

Dans le cadre du travail du Lot Hydrologie de surface, il s'agit donc de constituer une base de données hydrométrique, au sens défini ci-dessus, sur laquelle réaliser la modélisation hydrologique. Cette base de données doit satisfaire à la fois les contraintes liées aux travaux de modélisations et les attentes des décideurs. La disponibilité des données d'observations de débits est nécessaire pour évaluer la qualité des modèles hydrologiques utilisés et caler leurs paramètres.

4.2.2 Contraintes liées au projet global

Le choix des points d'observations retenus pour constituer la base de données hydrologique a des conséquences directes sur la nature des résultats et des livrables produits par le Lot Hydrologie de surface et qui seront utilisés pour partie par d'autres Lots. Il est donc indispensable à ce stade de tenir compte des attentes de ces Lots situés "à l'aval" afin de produire des résultats pertinents et exploitables en termes de réponses aux enjeux soulevés par le lot intégrateur. Ceci implique notamment une attention particulière relative aux échelles de restitution que nous nous proposons d'utiliser, à la couverture du territoire ou encore à certaines zones d'intérêt particulier.

4.2.3 Contraintes spécifiques à la modélisation hydrologique

Comme déjà explicité plus haut, on rappelle ici que les travaux de modélisation du Lot Hydrologie de surface reposent sur deux modèles hydrologiques distincts : le modèle GR4J de l'Irstea et le modèle Isba-Modcou qui est la composante hydrologique de la Isba-Modcou de calcul SIM (Safran-Isba-Modcou) utilisée par Météo-France notamment. On utilisera désormais la terminologie "SIM" pour désigner les sorties de modélisation selon la Isba-Modcou de calcul Isba-Modcou. L'utilisation de deux modèles différents doit permettre de quantifier les incertitudes associées à la structure des modèles. Sans rentrer à ce stade dans le détail de ces deux modèles, il faut préciser que ces outils de modélisation hydrologique requièrent un certain nombre de conditions de fonctionnement que nous allons brièvement présenter ici.

4.2.3.1 SIM

Concernant les simulations SIM, l'emplacement des points de sorties de la simulation (1163 points), c'est-à-dire les points du réseau hydrographique où seront simulés les écoulements sur les deux périodes de temps "temps présent" et "temps futur". Notons seulement que ces points ne correspondent pas forcément à des stations hydrométriques ou peuvent correspondre à des stations où les chroniques sont limitées ou de faible qualité. Cette sélection de stations n'est donc pas forcément optimale pour évaluer les modèles sur la période de référence. Il faut désormais garder à l'esprit que les résultats de la simulation hydrologique SIM sont contraints dans l'espace, nous ne pouvons pas revenir sur les points de sortie de cette simulation. Par conséquent, ce qui est présenté dans ce qui suit à propos du choix des points de sortie de simulation concerne la seule simulation GR4J.

Remarque importante: la Isba-Modcou de calcul SIM ignore les influences anthropiques (barrages, transferts, prélèvements). Le calage est réalisé avec des débits observés potentiellement influencés. Il convient donc pour certains points d'être prudent dans l'interprétation des résultats de simulation présentés comme des débits naturels.

4.2.3.2 GR4J

Le modèle GR4J est, contrairement à SIM, un modèle global et peut être applicable, sans besoin de beaucoup de données (quelques années de débit suffisent). Outre la disponibilité des données, les limites de l'utilisation du modèle GR4J se restreignent au cas des bassins versants au comportement spécifique, comme le fonctionnement karstique ou glaciaire, ou des échanges nappe-rivière particulièrement intenses. Un module neige sera utilisé en tête du modèle hydrologique pour le cas des bassins versants subissant des influences nivales.

L'idéal serait d'appliquer ce modèle sur la même sélection de stations que celle imposée par SIM. Cependant, le modèle GR4J nécessite un minimum de données de débit pour caler ses paramètres et reste délicat d'utilisation sur les bassins non jaugés. Il est difficile d'appliquer le modèle sur l'intégralité de l'échantillon de stations SIM. On peut donc chercher à établir une sélection de bassins, complémentaire de celle de SIM, sur laquelle sera appliqué le modèle GR4J, et qui réponde au mieux aux diverses contraintes et attentes du projet.

Remarque importante: La remarque précédente à propos de l'influence des débits est également applicable ici.

4.2.4 Rappel des objectifs initiaux

En résumé, il s'agit donc de déterminer un ensemble de points du réseau hydrographique sur lequel portera la simulation hydrologique GR4J. Ce choix, en premier lieu contraint par la faisabilité effective et la qualité de la simulation, doit permettre de :

- ▶ Fournir aux autres Lots des résultats pertinents dans le cadre des objectifs globaux du projet Explore 2070 ;
- ▶ Garantir une couverture relativement homogène du territoire ;
- ▶ Intercepter du mieux possible l'ensemble des points de simulation SIM, qui est un ensemble fixe, pour permettre une quantification des incertitudes associées au choix de l'outil de modélisation hydrologique.

Deux aspects principaux seront considérés pour établir cette sélection de bassins :

- ▶ La disponibilité et la qualité des mesures de débit ;
- ▶ Les enjeux associés à certaines problématiques importantes pour le projet (évolution de la ressource et des risques).

4.3 DISPONIBILITE ET QUALITE DES MESURES DE DEBIT

Comme la détermination des points de simulations hydrologiques est principalement contrainte par l'existence et la disponibilité d'une chronique d'observations de débit, le point de départ de la constitution de la base de données hydrologique sera la banque nationale de données hydrométriques, à savoir la banque HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr>). Elle présente le double avantage d'offrir une couverture nationale et de mettre à disposition pour chaque entité (chaque station hydrologique) une chronique d'observation de l'écoulement dans un format homogène.

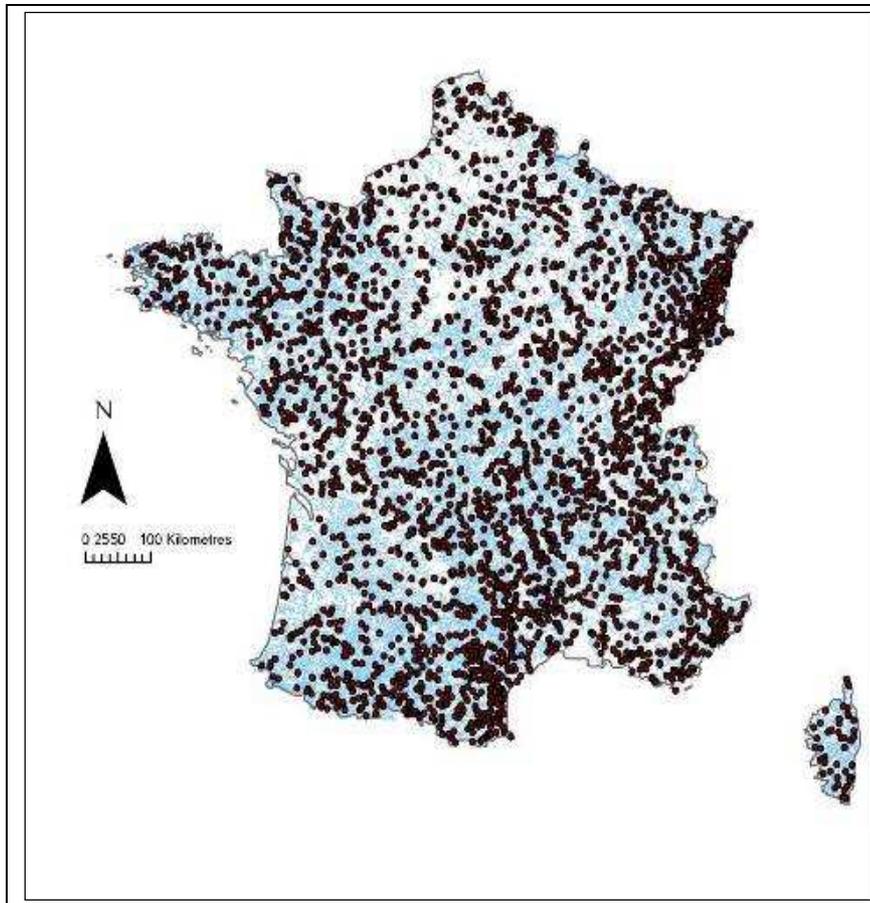
4.3.1 La banque HYDRO du Ministère de l'Ecologie

L'Irstea dispose d'une livraison de la banque HYDRO du MEDDTL datant du mois de mars 2010. L'étendue des chroniques et la qualité de la mesure sont très variables d'une station à l'autre. Les débits disponibles sont considérés comme représentatifs du fonctionnement du bassin, bien que celui-ci ne puisse pas être considéré comme naturel dans un certain nombre de cas. 4024 points d'observations au pas de temps journalier en France métropolitaine et sur l'île de la Réunion sont référencés (voir Figure 7). Outre le cas particulier des Départements d'Outre-mer (DOM), il ne semble pas nécessaire d'utiliser d'autres sources de données d'observations de débits. Deux limites principales à l'utilisation de la banque HYDRO sont identifiées :

- ▶ La présence d'une station hydrométrique dans la banque HYDRO ne garantit pas l'existence effective d'une chronique d'observations. Ainsi, une station peut être recensée dans la banque HYDRO mais inutilisable car sans chroniques de débits ;
- ▶ La fourniture des données dans la banque HYDRO est assurée par les gestionnaires des stations hydrométriques (principalement les DREAL, les Services de Prévision des Crues (SPC), ...). Si la mesure en elle-même est globalement de qualité, les métadonnées associées à la station doivent être dans certains cas prises avec précaution. En particulier, pour les stations les plus anciennes, la détermination des coordonnées géographiques, et surtout la précision de la surface drainée est approximative. Enfin, dans certains cas, ces éléments sont tout simplement non renseignés, ce qui peut rendre incertaine l'utilisation de ces points.

Malgré ces limites, la banque HYDRO constitue le réservoir de données hydrologiques, au sens des chroniques temporelles, dans lequel on ira puiser les informations nécessaires. La localisation des stations hydrométriques référencées est présentée à la Figure 7.

Figure 7 : Localisation de toutes les stations de la banque HYDRO en France métropolitaine



4.3.2 Eligibilité des stations hydrométriques de la banque HYDRO

Nous présentons dans cette partie les critères relatifs à la disponibilité et la qualité des mesures, utilisés pour la sélection des stations. L'objectif est de sélectionner les stations pour lesquelles l'information disponible ne doit pas être un obstacle a priori pour produire une simulation avec un bon niveau de confiance. En pratique, cela implique une bonne disponibilité et une bonne qualité de mesures sur la période de référence.

4.3.2.1 Période de référence et disponibilité des données

Le choix de la période de référence est une question prépondérante. Il n'est pas indispensable d'avoir des données hydrologiques observées sur toute la période de référence, mais une sous-période peut être suffisante pour rendre compte des qualités du modèle et évaluer ses paramètres. Nous ne revenons pas ici sur le choix de la période de référence, fixée à la période 1961-1990. Par la suite, les chroniques d'observations seront donc bornées à cette période de référence et la disponibilité des données évaluées sur cette période. La question de la disponibilité des données d'observations est un problème récurrent de l'analyse statistique et de la modélisation en hydrologie. Par ailleurs, c'est un élément discriminatoire de premier ordre. En effet, les premiers tests montrent que le résultat du processus de sélection est principalement sensible au critère de disponibilité des données sur la période retenue. En s'appuyant sur des travaux antérieurs de l'Irstea, en particulier ceux portant sur la robustesse des analyses statistiques de chroniques (B. Renard, E. Sauquet, J-P. Vidal), une disponibilité minimale de 15 années d'observations sur la période de référence semble une condition à minima permettant d'évaluer la variabilité interannuelle des débits, à l'exclusion des événements extrêmes.

La disponibilité des données sera appréciée en termes de taux de lacunes sur la période considérée. Ce dernier est de plus décliné en taux de lacunes mensuels, ce qui permet de contrôler la répartition saisonnière des lacunes et ainsi exclure par exemple les stations présentant des problèmes de mesures en étiages.

Sur la période 1961-1990, la disponibilité moyenne des observations des stations de la banque HYDRO est de 10,4 années.

4.3.2.2 Critères de qualité dans la Banque HYDRO

Les métadonnées fournies par la banque HYDRO permettent l'évaluation de la qualité des mesures puisqu'un code de validité est associé à chaque mesure. On peut ainsi calculer sur la série de données le taux de données jugées satisfaisantes ou non. De plus, une appréciation globale de la qualité des basses eaux (BE), moyennes eaux (ME) et hautes eaux (HE), ainsi que du niveau d'influence du débit, est fournie dans les métadonnées de chaque station.

Tableau 1- Description des métadonnées de la banque HYDRO

	Validité de la mesure	Qualité en basses eaux (BE) / moyennes eaux (ME) / hautes eaux (HE)	Influence	Finalité
Valeurs possibles	Estimé, Inconnu fort, Inconnu faible, Reconstitué bon, Bon	Inconnue, Douteuse, Bonne	Inconnue, Nulle ou faible, En étiages seulement, Forte en toute saison	Hydrométrie Générale, Alerte de Crues, Hydrométrie générale+alerte de crues, Gestion d'ouvrages, Police des eaux, Suivi d'étiages, Bassin expérimental, Drainage

La question de l'influence est complexe, puisque certaines stations influencées, pour lesquelles la simulation des débits naturels est difficilement comparable aux débits réels observés, sont pourtant incontournables et présentent de forts enjeux. En particulier, les stations hydrométriques situées sur les grands fleuves aux débits largement régulés sont quasiment systématiquement qualifiées d'influencées. Par ailleurs, l'indice de qualité des basses, moyennes et hautes eaux est, par défaut, égal à 1, c'est-à-dire une bonne qualité, et n'a pas été systématiquement renseigné pour toutes les stations. L'incertitude qui existe ici ne permet donc pas de se fier seulement à ces indicateurs pour la qualité des mesures.

Notons également que la finalité de la station est également un indicateur intéressant. Les stations correspondant à une finalité de gestion d'ouvrage sont clairement des stations qu'il faudra éviter dans notre sélection, car signe d'une influence notable.

Enfin, nous précisons que les bassins versants ciblés sont ceux de tailles supérieures à 2000 km². Le niveau de la surface drainée minimale doit être revu et régionalisé, au risque de ne pas couvrir certains ensembles territoriaux. *La surface moyenne des 4024 bassins versants de la banque HYDRO est de 1400 km². Environ 10% de ces bassins présentent une surface drainée supérieure à 2000 km².*

4.3.2.3 Le niveau d'influence

En plus de l'information donnée par la banque HYDRO, le niveau d'influence des stations hydrométriques sera évalué grâce une base de données "ouvrages" disponibles à l'Irstea et mise à disposition du Lot Hydrologie de surface. L'analyse (routine de calcul) consiste, pour chaque station d'un ensemble défini par l'utilisateur, à remonter le réseau hydrologique, comptabiliser les ouvrages de retenue rencontrés, et comparer le volume total retenu au débit annuel observé à la station. Le ratio "volume total retenu" sur "débit observé" est une mesure du niveau d'influence. Plus il est grand, plus la station est influencée.

La principale limite de cette analyse est la base de données "ouvrages" elle-même, puisque cette base de données n'est pas exhaustive. 285 ouvrages de capacité connue de 0,2 à 1272 millions de mètres cube sont référencés. Les réserves les plus significatives (Serre-Ponçon, Sainte-Croix, Grands lacs de Seine) sont cependant renseignées.

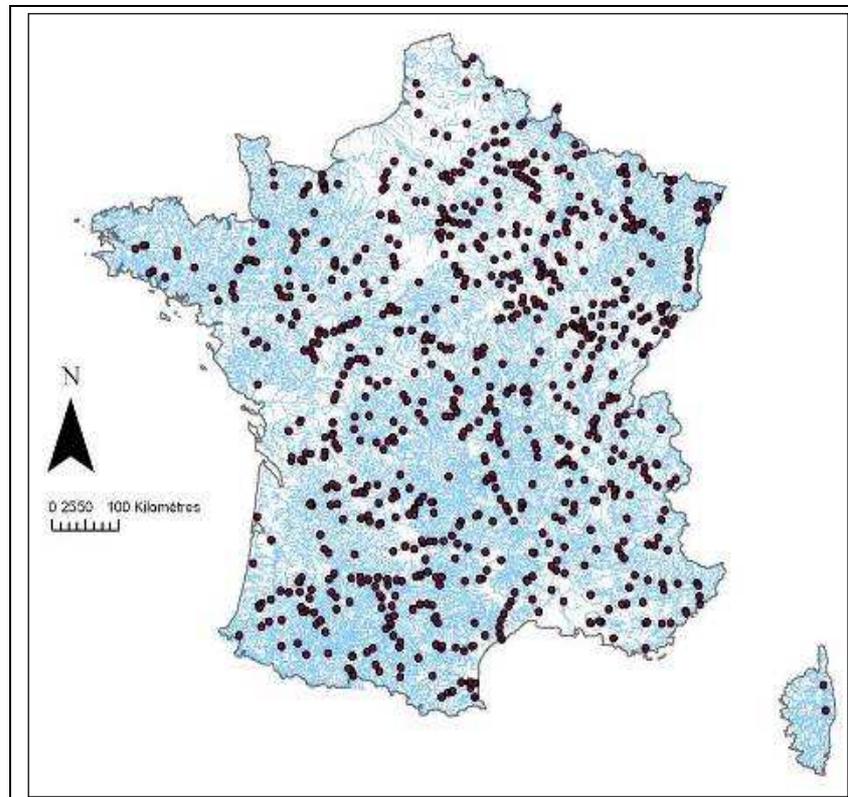
4.3.3 Les points SIM

Nous avons mentionné précédemment que le modèle SIM fournit des simulations sur des points prédéfinis, ce qui constitue une contrainte forte. Les 1163 points de simulation SIM sont de deux natures :

- ▶ **256 points exutoires** : ils sont situés à l'exutoire maritime des bassins versants du réseau de drainage de la chaîne de modélisation SIM. Ce sont des points de contrôle du bilan hydrique calculé sur le bassin versant qui ne correspondent pas à des stations de jaugeage réelles. Il n'existe donc pas de données d'observations en ces points ;
- ▶ **907 "stations SIM"** (ou points de jaugeage) : ils sont situés sur le réseau hydrographique (réseau de drainage) de la chaîne de modélisation SIM. Ils correspondent a priori à une station hydrologique réelle, donc à des observations et sont alors associés et identifiés par un code (code station hydrologique base de données Carthage (idem base HYDRO) (et son nom). Il existe néanmoins un certain nombre de points de jaugeage SIM non identifiables (28 au total) dans la banque HYDRO. Une hypothèse plausible pour expliquer ces points orphelins pourrait être que le point ne tombe pas correctement sur le plan de drainage de SIM, c'est-à-dire sur un point bas ou encore une maille rivière selon la terminologie SIM. Par ailleurs, 21 points doublons ont été identifiés. La signification de ces points doublons est incertaine. Des précisions concernant ces deux derniers points sont attendues de la part du fournisseur des données.

La Figure 8 présente la localisation des 851 points stations SIM "valides" où les simulations SIM sont disponibles en temps présent et en temps futur.

Figure 8 : Localisation des points de jaugeage SIM



4.4 PRISE EN COMPTE DES ENJEUX

La sélection des points sur lesquels seront produites les simulations ne peut pas se limiter à des critères de disponibilité ou de qualité. Il faut aussi que ces stations correspondent au mieux à un certain nombre d'enjeux de gestion ou d'attentes dans le projet. Nous présentons ici quelques sélections de bassins correspondant à des enjeux particuliers, dont on pourra tenir compte dans l'élaboration de notre échantillon de bassins.

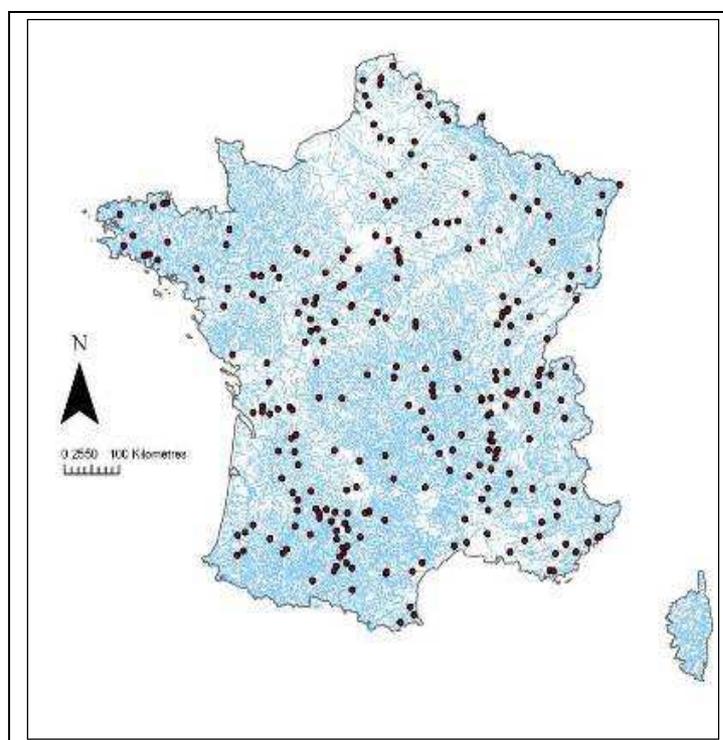
4.4.1 Les points de repères dits points nodaux

Un point de départ intéressant concernant la recherche des points de simulations pertinents en termes d'enjeux est la liste des points de repères, appelés également points nodaux, définie par les comités de bassin dans le cadre des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Dans une optique de suivi et de contrôle multi-objectifs qualitatif, quantitatif (étiages principalement), les points nodaux sont situés:

- ▶ **Aux principaux points de confluence** : ils permettent alors d'établir la résultante globale des phénomènes et éventuelles actions mises en œuvre sur l'ensemble du bassin versant ;
- ▶ **Aux autres points stratégiques** : par exemple dans des bassins présentant un déficit chronique constaté.

Un premier recensement des points nodaux pour les six districts hydrographiques (au sens de la Directive Cadre sur l'Eau) de la France métropolitaine a été réalisé sur la base des SDAGE pour la période 2010-2015. Pour le district hydrographique Corse, le SDAGE définit des objectifs précis concernant le suivi et le contrôle des masses d'eau, mais sans décrire les moyens concrets de cette surveillance. En particulier, aucun recensement, sous quelque forme que ce soit, de points de suivi des écoulements de surface n'est donné. Pour les autres districts hydrographiques, une liste des points nodaux est fournie. Sauf pour le cas du district Adour-Garonne où des codes hydrologiques sont explicitement associés aux points nodaux, cette liste se présente sous la forme d'une liste de stations hydrométriques identifiées par un nom seul, non associé à un code hydrologique. Une étape préliminaire a donc consisté à identifier pour chacune de ces stations le code hydrologique associé. Dans la quasi-totalité des cas (hormis les stations "à équiper" ou "à créer"), l'identification a été possible. Les stations inconnues dans la banque HYDRO sont : la Marne à Vitry-en-Perthois, la Seine à Saint-Assise, la Rance à l'amont immédiat de la confluence Rance-Linon, Volvic (bassin hydrogéologique de Volvic), la Vendée au droit du pont routier entre Chaix et Auzay.

Figure 9 : Localisation des points nodaux



Au total, 281 points nodaux sur les districts hydrographiques de la France métropolitaine (Corse exclue) ont pu être associés à un code de la banque HYDRO et sont représentés sur la Figure 9.

Remarque : Par nature, ces points d'intérêt seront pour partie situés à l'exutoire de bassins versants aménagés et influencés. En dehors des zooms où une approche plus détaillée sera réalisée, il n'est pas question dans le cadre du Lot Hydrologie de surface de faire une étude détaillée des influences (prise en compte des prélèvements, dépendances et impacts depuis l'amont, transfert hydraulique, etc.) en chaque point. En particulier, les débits simulés sont calés sur des débits influencés et peuvent donc être assez différents des débits naturels.

4.4.2 Les points aux droits des principales métropoles françaises

Dans la note présentant le modèle systémique intégrateur, il est fait référence à 15 agglomérations françaises retenues comme échelle de restitution. Il apparaît essentiel de produire des résultats de simulation de débits aux droits de ces agglomérations, l'enjeu étant principalement le risque inondation. Une liste de stations hydrométriques référencées dans la banque HYDRO et correspondant à ces agglomérations a ainsi été établie (voir Tableau 2).

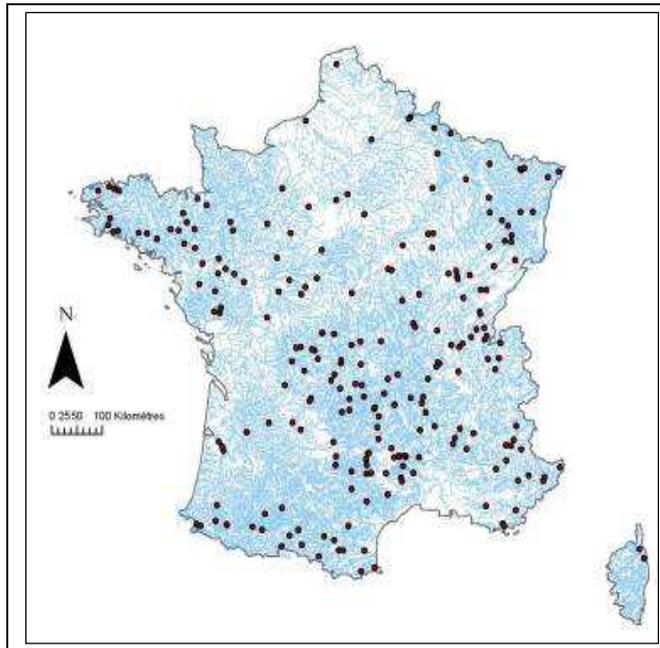
Tableau 2 - Liste provisoire des points métropoles

Code	Nom	Ville	Disponibilité Période Référence	Disponibilité Banque HYDRO
E3102110	La Deûle à Don	Lille	0	2005-2010
H5841010	La Marne à Noisiel [après création grand lac]	Paris	17	
H5920010	La Seine à Paris [Austerlitz après création lacs]	Paris	17	
H9900010	La Seine à Rouen [amont]	Rouen	18	
H9999990	La Seine à Paris [Austerlitz]	Paris	30	
J7090610	La Vilaine à Cesson-Sévigné [Cesson]	Rennes	5	
J7123010	L'Ille à Saint-Grégoire [écluse de Saint Grégoire]	Rennes	0	2000-2000
M6240010	La Loire [Totale] à Nantes [Saint Félix]	Nantes	22	
O1900010	La Garonne à Portet-sur-Garonne	Toulouse	30	
O1984310	Le Touch à Toulouse [St-Martin-du-Touch]	Toulouse	23	
O2222510	L'Hers Mort à Toulouse [Pont de Périole]	Toulouse	21	
O9060010	La Garonne au Mas-d'Agenais	Bordeaux	27	
U4720010	La Saône à Lyon [Saint-Georges]	Lyon	0	néant
U4710010	La Saône à Couzon-au-Mont-d'Or [2]	Lyon	17	
V3000010	Le Rhône à Caluire-et-Cuire [St-Clair]	Lyon	30	
V3000015	Le Rhône à Lyon [Perrache]	Lyon	0	1992-2009
Y6442010	Le Var à Nice [Pont Napoléon III]	Nice	9	
W1410010	L'Isère à Grenoble	Grenoble	26	
W2832010	Le Drac au Pont-de-Claix	Grenoble	11	
Y4414030	L'Huveaune à Roquevaire [2]	Marseille	0	1994-2010
Y3204030	Le Lez à Montpellier [Pont Garigliano]	Montpellier	0	1998-2010
A2280350	L'III à Strasbourg [Chasseur Froid]	Strasbourg	17	
	Sans objet	Saint-Etienne		
	Sans objet	Toulon		

4.4.3 Une base de données particulière pour le suivi des étiages

Dans le cadre de travaux pour l'ONEMA, Giuntoli et Renard (2009) ont établi un réseau de stations hydrométriques de référence pour le suivi des étiages. Les stations hydrométriques retenues dans cette base de données ont été sélectionnées pour le caractère non influencée sur la période de disponibilité, leur excellente qualité et la disponibilité des observations. Cela représente une sélection de 238 stations (Figure 4). L'utilisation de cette sélection dans le cadre de la constitution de la base de données pour Explore 2070 est donc pertinente.

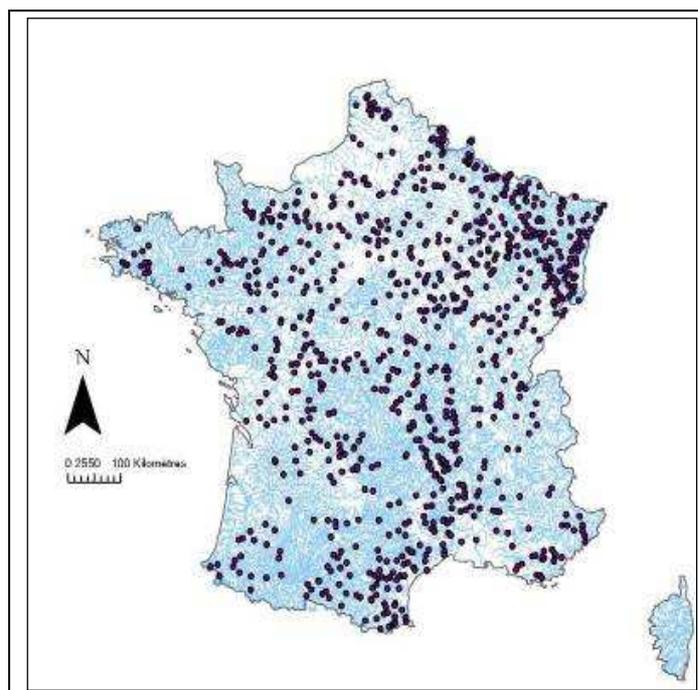
Figure 10 :- Localisation des stations sélectionnées par Giuntoli et Renard (2009) pour le suivi des étiages



4.4.4 Les points du réseau de vigilance VIGICRUES

Enfin, la liste des stations hydrométriques du réseau réglementaire de vigilance aux crues (VIGICRUES) a été obtenue auprès de Rémi Lamblin du SCHAPI. Il s'agit du réseau de stations utilisées pour l'alerte au risque inondation dans les services de prévision des crues (Figure 5). A nouveau, l'utilisation de cette sélection dans le cadre du projet Explore 2070 est donc pertinente.

Figure 11 : Localisation des stations hydrométriques du réseau VIGICRUES



4.5 METHODOLOGIE SUIVIE POUR LA CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES HYDROLOGIQUE

4.5.1 Stratégie générale

La stratégie générale adoptée pour la constitution de la base de données doit permettre de répondre aux objectifs rappelés précédemment par la confrontation du besoin et de la faisabilité.

Le point de départ de la constitution de la base de données repose sur les points SIM. Les seuls points SIM ne permettent cependant pas de remplir les exigences du cahier des charges (limitations sur la disponibilité des données, la couverture et la représentativité de l'ensemble du territoire). En effet, **seule la moitié environ des stations de jaugeage correspondant à un point SIM présentent une bonne disponibilité de données, supérieure à 15 années sur la période de référence.**

Il est donc nécessaire d'étoffer ce premier échantillon constitué de points SIM par un certain nombre de stations hydrométriques pertinentes issues des listes présentées dans la partie précédente et présentant une bonne disponibilité de données. Dans le même temps, il est intéressant de produire des simulations de débits sur un maximum de points d'intérêts (SIM pour la comparaison des deux modèles hydrologiques utilisés et points nodaux, "métropoles" et VIGICRUES). La plupart de ces points seront donc retenus dans la base de données hydrométrique, malgré une disponibilité des données d'observations plus faible. Il faudra bien sûr garder dans la base de données la mémoire de cette exception, au risque de mauvaises interprétations dans la lecture et l'analyse des simulations produites.

4.5.2 Constitution de la base de données hydrologique

4.5.2.1 Caractéristiques pertinentes disponibles pour les stations hydrométrique de la banque HYDRO

Nous disposons, sous la forme d'un tableur Excel, et pour chaque station hydrométrique de la banque HYDRO, des caractéristiques détaillées dans le Tableau 3. Elles correspondent en partie à certaines métadonnées de la banque HYDRO et en partie à une analyse automatique réalisée sur les séries de données.

Tableau 3 - Caractéristiques des stations hydrométriques de la banque HYDRO pour la constitution de la base de données.

Attribut	Description
Code	Code banque HYDRO
Coordonnées X,Y,Z Banque HYDRO	Coordonnées en Lambert 2 étendu de la station telles que renseignées dans la banque HYDRO
Surface drainée Banque HYDRO	Surface drainée par la station hydrométrique telle que renseignée dans la banque HYDRO
Coordonnées X,Y,Z Irstea	Coordonnées en Lambert 2 étendu de la station. Ce sont les coordonnées du point bas d'un plan de drainage de l'Irstea correspondant à la station. Lorsque la station n'a pas pu être correctement placée sur le plan de drainage, les coordonnées sont renseignées à -999.
Surface drainée Irstea	Surface drainée par la station calculée à partir d'un plan de drainage de l'Irstea

Attribut	Description
Date Début	Date du début des mesures de débit. Lorsque l'enregistrement est antérieur au début de la période de référence (01/07/1961) ou supérieur à la date de fin de cette période, la date est fixée au début de la période de référence (=01/07/1961).
Date Fin	Date de fin des mesures de débit.
Nombre d'années disponibles	Nombre d'années d'observations disponibles. En réalité, un nombre de jours non nécessairement consécutifs ramené à un nombre d'année.
Taux de lacunes global	Taux de lacune calculé sur la période de référence (si chronique plus étendue) ou la période de mesures incluse dans la période de référence.
Taux de validité des mesures	Taux de validité (ou qualité) des mesures tels que renseignée dans la banque HYDRO. C'est le pourcentage de mesures renseignées "bonnes"
Taux de lacunes mensuelles maximum	Le maximum des 12 taux de lacunes mensuels. Imposer un taux maximal acceptable revient à s'assurer d'une répartition des lacunes relativement homogène au cours de l'année.
Finalité	Caractéristique renseignée par la banque HYDRO
Influence, QBE, QME, QHE	Les caractéristiques renseignées par la banque HYDRO
Id_BDD	L'identifiant station dans la base HYDRO livrée au printemps 2010 à l'Irstea.
Nom	Le nom de la station hydrologique
Est_SIM	Booléen si la station hydrométrique est un point de jaugeage SIM
Est_NODAL	Booléen si la station hydrométrique est un point nodal
Est_VIGICRUES	Booléen si la station hydrométrique est un point du réseau VIGICRUES
Est_RENARD	Booléen si la station hydrométrique est un point de la liste de B. Renard pour le suivi des étiages
Est_METROPOLE	Booléen si la station hydrométrique est un point de la liste des stations hydrométriques "Métropole"
Influence Ouvrage	En pourcentage, l'influençement de la station hydrométrique tel que déterminé par la méthode présentée en 3.2.3

4.5.2.2 Schéma de constitution de la base de données hydrométrique

Nous proposons de suivre le schéma systémique suivant :

- **Etape 1** : Retenir parmi les points d'intérêts (SIM, nodaux, Vigicrues, étiages (Giuntoli et Renard, 2009)) toutes les stations hydrométriques remplissant le jeu de critères suivants (jeu intitulé "critère bas") : nombre d'années disponibles supérieur ou égal à 6 années sur la période de référence (on analyse plus loin l'influence d'un nombre d'années supérieur), taux de lacune mensuel maximum égal à 0,5, taux de validité des mesures supérieur ou égal à 0,8 ;

- ▶ **Etape 2:** Contrôler les résultats. Eventuellement éliminer certaines stations hydrométriques (redondances, critère d'influence ouvrage).

4.5.2.3 Le traitement de la Corse

Avant de présenter les résultats préliminaires de la constitution de la base de données hydrologiques, il faut préciser que dans les travaux de modélisation, la Corse sera traitée de façon indépendante. Le croisement des bases de données hydrométrique et météorologique est traité de façon générique sur le territoire de la France continentale alors qu'il est réalisé à part pour la Corse. En effet, ce croisement permet d'agrèger les variables météorologiques initialement à l'échelle de la maille SAFRAN (8x8km) à l'échelle du bassin versant. L'équipe hydrologie de l'Irstea d'Antony a développé un outil de calcul automatique d'agrégation spatiale qui repose sur un plan de drainage calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 75 mètres. Comme ce MNT ne couvre que la France continentale, la procédure automatique exclut la Corse, qui sera donc traitée de façon spécifique dans la suite.

4.6 RESULTATS

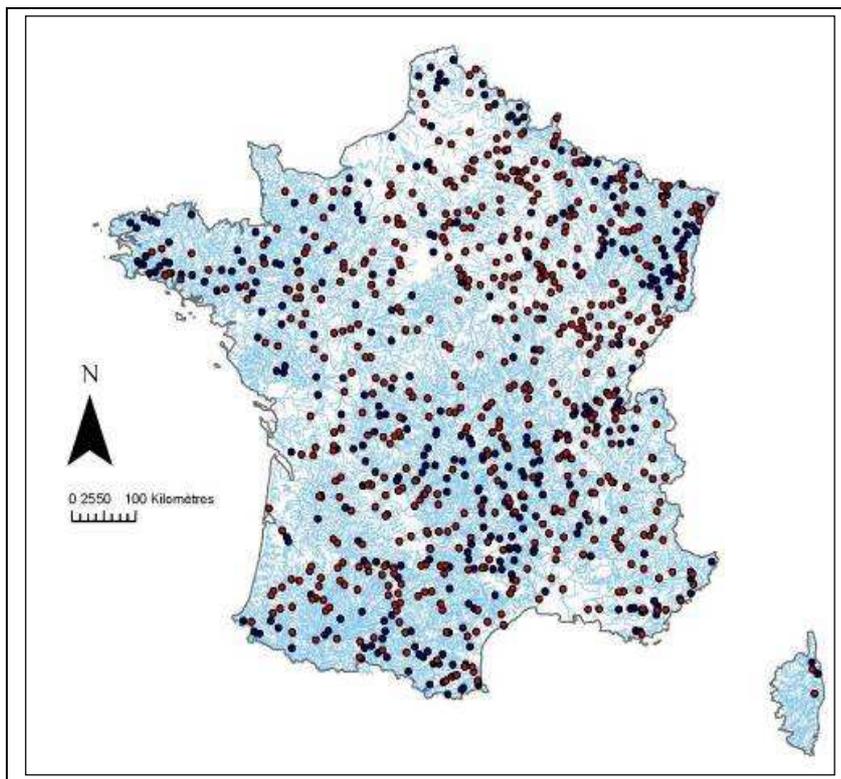
4.6.1 France continentale

4.6.1.1 Proposition 1

Les stations hydrométriques retenues sont présentées sur la Figure 12. On dénombre 564 points SIM, 184 points nodaux, 228 points étiages et 473 points VIGICRUES répondant aux critères. Certaines stations sont redondantes puisqu'elles sont à la fois SIM et points nodaux (par exemple). On a donc après élimination des doublons un échantillon d'environ 930 points de sortie de simulation au niveau de l'étape 1.

La superficie moyenne des bassins versants est de 2400 km², la disponibilité de 21 ans, le taux de validité des mesures de 96% et le maximum des taux de lacunes mensuelles de 5%.

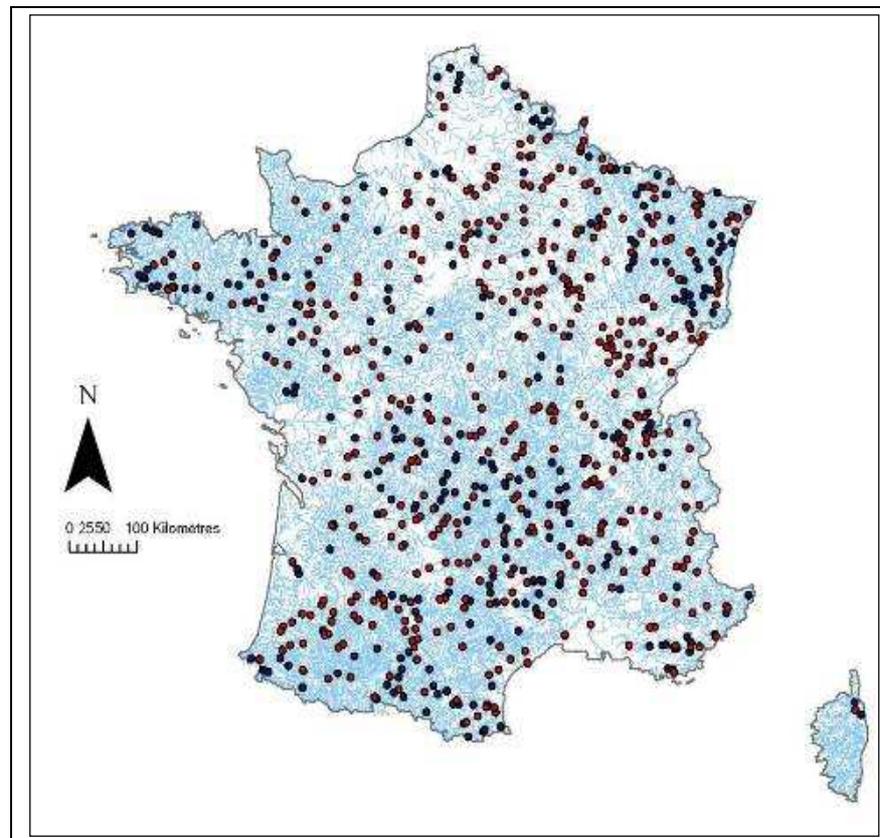
Figure 12 : Localisation des stations hydrométriques retenues dans la base de données hydrologique - Proposition 1. En rond bleu, tous les points de l'étape 1; en rouge, les points SIM.



4.6.1.2 Proposition 2

Il est intéressant de voir comment évolue la base de données hydrométrique en modifiant à la hausse les critères de sélection de l'étape 1. On propose ci-dessous la description d'une seconde proposition. Le processus de sélection est rigoureusement identique, mais applique désormais des critères plus restrictifs à l'étape 1 : nombre d'années disponibles supérieur ou égal à 15 sur la période de référence, taux de lacune mensuel maximum égal à 0,5, taux de validité des mesures supérieur ou égal à 0,8. On recense alors 460 points SIM, 155 points nodaux, 228 points étiages et 386 points VIGICRUES. Après suppression des doublons, on obtient ainsi au total un échantillon de 760 stations. La localisation des stations hydrométriques est présentée à la Figure 13. La superficie moyenne des bassins versants est de 2500 km², la disponibilité de 24 ans, le taux de validité des mesures de 96% et le maximum des taux de lacunes mensuelles de 5%.

Figure 13 : Localisation des stations hydrométriques retenues dans la base de données hydrologique - Proposition 2. En rond bleu, tous les points de l'étape 1; en rouge, les points SIM.



4.6.1.3 Conclusion

La présentation des résultats des deux propositions permet d'évaluer comment le niveau d'exigence sur la disponibilité des données influence la constitution de la base de donnée hydrologique. En particulier, entre les deux propositions, on perd environ 100 points de sorties communs avec SIM, mais le niveau de confiance des travaux de modélisation est amélioré. Les deux propositions offrent une couverture assez homogène du territoire. Les caractéristiques des sélections issues des propositions 1 et 2 sont récapitulées dans le Tableau 4.

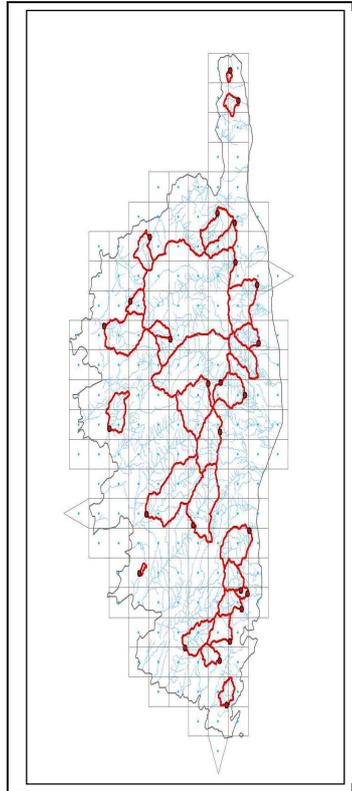
Tableau 4 - Tableau récapitulatif des caractéristiques des propositions 1 et 2 (Métropole)

			<i>Proposition1</i>	<i>Proposition 2</i>
Choix des critères de sélection	Etape 1	Nombre d'années d'observations	6	15
		Taux de lacunes mensuelles maximum	50%	50%
		Taux de validité	80%	80%
	Caractéristiques intrinsèques	Nombre total de stations	927	760
		Disponibilité moyenne	21	24
Analyse de la sélection	Croisements Listes Points d'intérêts	SIM	564	460
		Points Nodaux	184	155
		Points Etiages (Giuntoli et Renard, 2009)	228	228
		Points Vigicrues	420	359
Nombre total de stations (sans doublon et avant filtre de l'étape 2) qui pourront faire l'objet d'une simulation GR4J			930	760

4.6.2 Corse

Une cinquantaine de stations hydrométriques situées en Corse sont disponibles dans la banque HYDRO. La majorité dispose d'une chronique d'observations d'au moins six années sur la période de référence. La représentativité du territoire sur la Corse ne pose pas de problèmes particuliers. En prenant les mêmes critères de sélection que pour la proposition 1, on parvient à une sélection d'une trentaine de bassins versants corses (voir carte Figure 14). L'intersection avec le maillage SIM permet de déterminer pour chaque bassin la surface relative occupée par les mailles. Ainsi, on détermine les coefficients de pondération à affecter pour le calcul des variables climatiques agrégées: Pluie, ETP et Température journalière moyenne de bassin.

Figure 14 : Contours des bassins versants présélectionnés dans la base de données hydrologiques



4.7 CONCLUSION

Nous avons cherché ici à rendre compte des difficultés posées par la constitution de la base de données hydrologiques. Le cœur du problème repose dans le consensus entre la satisfaction des attentes et ce qui est effectivement réalisable en termes de modélisation hydrologique. En particulier, rappelons que l'ensemble des points de simulation SIM ne peut pas être retenu pour la simulation avec le modèle GR4J pour les raisons suivantes :

- ▶ D'abord, les 256 points exutoires SIM ne correspondent pas à une station hydrométrique en fonctionnement. Sans observations, la modélisation hydrologique sous GR4J n'est pas envisageable dans le cadre du projet Explore 2070. En effet, la modélisation hydrologique des bassins versants non jaugés est possible sous certaines conditions, mais les méthodes nécessaires dépassent alors largement le cadre de travail du Lot Hydrologie de surface tel que défini dans l'offre initiale.
- ▶ Un certain nombre de points de jaugeage SIM correspondent à une station hydrométrique sur laquelle la disponibilité des données sur la période de référence est insuffisante pour que la modélisation hydrologique soit possible. Environ 300 points de jaugeage SIM (sur 851) sont ainsi absents de la base de données constituée dans la proposition 1. Cette restriction ne semble cependant pas affecter trop sévèrement les conditions exigées par le cahier des charges de la base de données.

Tableau 5 - Récapitulatif des résultats pour les 2 propositions en termes de comparaison inter-modèles

	Proposition 1	Proposition 2
SIM seul	256 exutoires + 257 jaugeages	256 exutoires + 361 jaugeages
GR4J seul	363	300
SIM+GR4J	564	460
Nombre total de points (SIM et/ou GR4J) avant étape 2 (*)	1 440	1 377

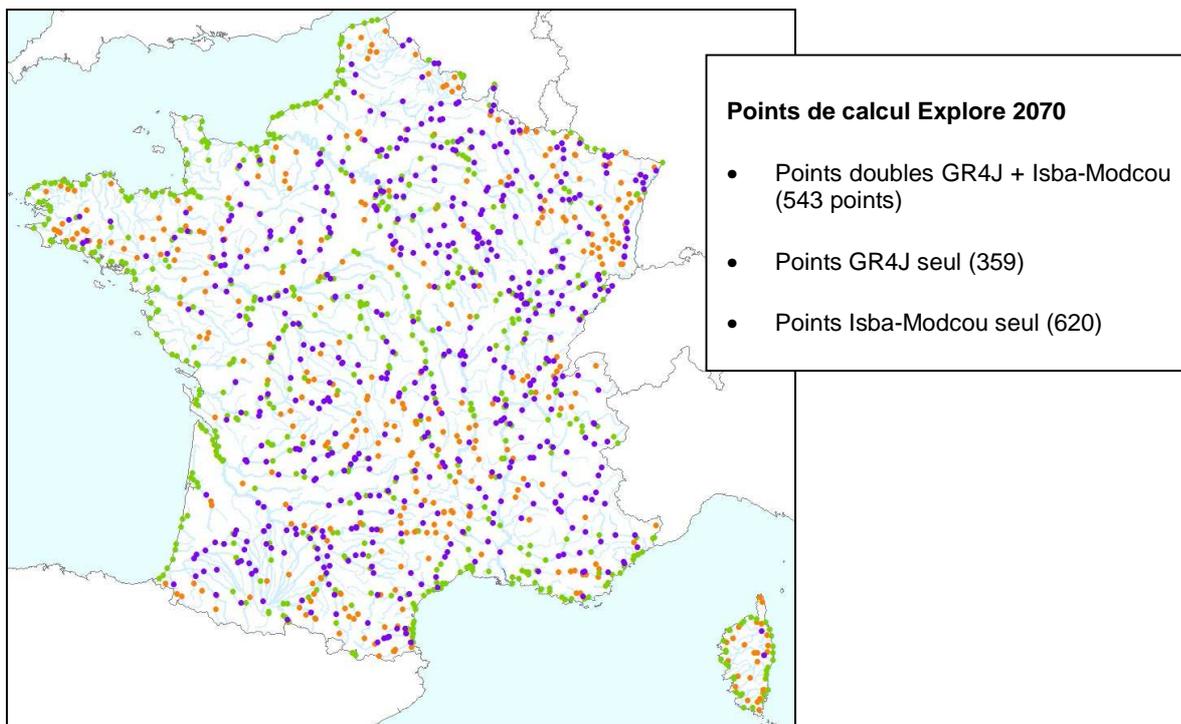
(*) Enfin, rappelons pour finir que les résultats présentés sont les résultats de l'étape 1. Autrement dit, l'échantillon final des points de sortie de simulation GR4J (après étape 2) est susceptible d'être un peu plus restreint que ce qui vient d'être présenté. Il faut s'attendre à environ 5% de stations hydrométriques exclues lors de l'étape 2. Par ailleurs, il est probable que des nouvelles stations hydrométriques situées en Corse soient incluses de manière exceptionnelle.

La proposition 1 a été finalement retenue par le ministère.

Suite aux travaux de calage et de modélisation, certains points ont dus être éliminés par manque de données. L'ensemble définitif des points de calcul pour la métropole est le suivant :

- ▶ 543 points GR4J+Isba-Modcou ;
- ▶ 359 points GR4J seul ;
- ▶ 620 points Isba-Modcou seul.

Figure 15 : Localisation des 1522 points de calcul retenus pour Explore 2070



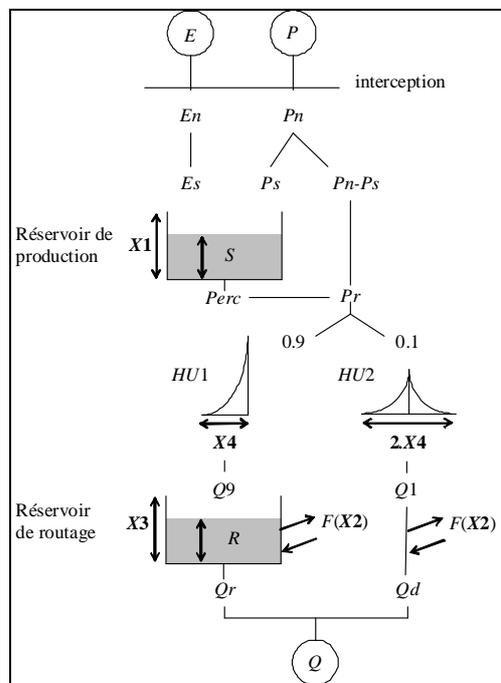
5. UTILISATION DES MODELES HYDROLOGIQUES ET MODES DE CALAGE

5.1 PRESENTATION SIMPLIFIEE DES MODELES

Le **modèle GR4J** est un modèle global, apparenté aux modèles conceptuels. Le **Isba-Modcou Safran-Isba-Modcou** est un modèle distribué (il fonctionne avec un découpage de l'espace en mailles élémentaires de 8 km x 8 km) à bases physiques. Cela correspond à des approches de modélisation très différentes. Dans le premier cas, l'approche est qualifiée de descendant : on cherche à avoir une description systémique du fonctionnement du bassin versant. Dans le second cas, elle est qualifiée d'ascendante : on cherche à modéliser des composants "élémentaires" du système et ensuite à les assembler.

5.1.1 Le modèle GR4J

Figure 16 : Structure schématique du modèle GR4J



Il s'agit d'un modèle construit pour reproduire le comportement hydrologique global d'un bassin versant : il fait le lien entre la lame d'eau précipitée et l'évapotranspiration sur le bassin et son débit à l'exutoire.

C'est un modèle empirique à réservoirs : un ensemble de réservoirs interconnectés qui se vident et se remplissent au cours du temps traduisent la transformation de la pluie en débit.

Il fonctionne au pas de temps journalier et possède 4 paramètres, qui n'ont pas de signification physique directe et sont déterminés grâce à une phase de calage. Cela nécessite de disposer d'une chronique de débits observés suffisamment longue (idéalement de plus de 15 ans).

5.1.2 Le modèle Safran-Isba-Modcou

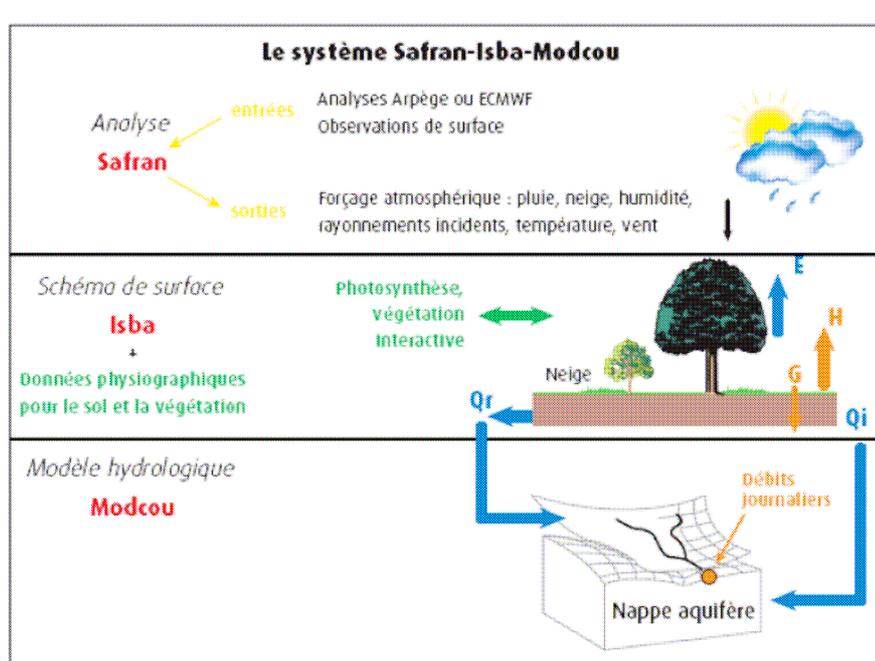
Il s'agit en fait d'une chaîne de trois modèles à bases physiques.

Isba (Intercation Surface Biosphere Atmosphere) est le schéma de surface du modèle climatique Arpège-Climat. Il simule les échanges d'eau et d'énergie entre le sol, la végétation et les basses couches de l'atmosphère.

MODCOU est un modèle hydrogéologique, qui intègre les informations de ruissellement de surface produits par ISBA et assure les différents transferts d'eau (dans et vers les rivières, dans et vers une nappe aquifère, et nappe-rivière). C'est un modèle distribué à mailles emboîtées (l'espace est représenté par l'agrégation d'unités élémentaires : des mailles carrées de 8 km de côté).

Cette chaîne est complétée par SARAN pour afin d'intégrer l'analyse des paramètres météorologiques.

Figure 17 : Schéma de principe de MODCOU : l'eau est transférée vers la rivière, puis dans la rivière avec un pas de temps de 3h. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière



5.2 PRESENTATION DETAILLEE DU MODELE GR4J

5.2.1 Description

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un **modèle hydrologique global à réservoirs** (voir Figure 18). Nous donnons dans ce qui suit une brève description mathématique du modèle, des informations plus détaillées étant fournies par Perrin et al. (2003).

On désigne par P (mm) la pluie moyenne de bassin et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les étapes successives suivantes permettent de calculer le débit.

1.Neutralisation

La première opération est la neutralisation de la pluie P par l'évapotranspiration potentielle E pour déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En calculée par :

Si $P \geq E$, alors $Pn = P - E$ et $En = 0$

Si $P < E$, alors $Pn = 0$ et $En = E - P$

2.Fonction de rendement

Dans le cas où Pn est différente de zéro, une partie Ps de Pn alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$Ps = \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{Pn}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{Pn}{X_1}\right)}$$

où X_1 (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et S le contenu du réservoir de production en début de pas de temps. Dans le cas contraire, lorsque En est différent de zéro, une quantité d'évaporation Es est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$Es = \frac{S \cdot \left(2 - \frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{En}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{En}{X_1}\right)}$$

Après actualisation du niveau du réservoir, une percolation $Perc$ issue du réservoir de production est alors calculée et alimentera ensuite l'écoulement.

3.Hydrogramme unitaire

La pluie efficace totale est ensuite routée par un hydrogramme unitaire $HU2$ dépendant du temps de base X_4 , puis séparée en deux composantes, de proportions volumétriques fixes (90 % / 10 %)

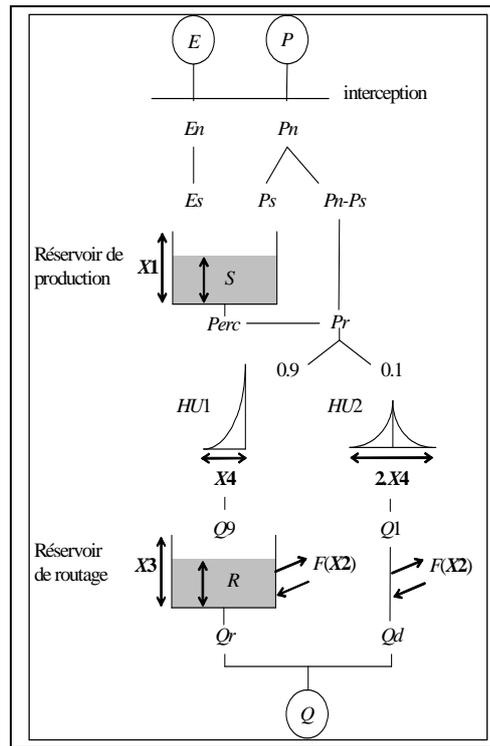
4.Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R}{X_3}\right)^{3.5}$$

où R est le niveau dans le réservoir de routage en début de pas de temps, X_3 la capacité à un jour du réservoir, X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Figure 18 : Structure schématique du modèle GR4J



5. Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie Q_9 de l'hydrogramme unitaire et F , puis sa vidange est calculée de la façon suivante :

$$Q_r = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Le débit total correspond à la somme des deux composantes d'écoulement.

Le modèle comporte au final quatre paramètres optimisables :

- | | |
|--|------|
| X1 : capacité du réservoir de production | (mm) |
| X2 : coefficient d'échanges souterrains | (mm) |
| X3 : capacité à un jour du réservoir de routage | (mm) |
| X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 | (j) |

5.2.2 Calage

Les paramètres du modèle GR4J n'ayant pas de signification physique a priori, leurs valeurs sont déterminées par calage sur des séries observées. Par ce calage, on cherche à minimiser l'écart entre les séries de débit observées et simulées. On cherche donc les valeurs des paramètres qui conduisent à la différence la plus faible possible entre les sorties du modèle et les débits observés.

La procédure de calage utilisée est une procédure dite "locale", c'est-à-dire qu'elle part d'un point de l'espace des paramètres et en explore le voisinage pour converger vers une valeur optimale. On utilise ici la méthode "pas-à-pas" développée à l'Irstea et qui a montré son efficacité pour ce modèle hydrologique.

En pratique, on utilise un critère d'efficacité basé sur les erreurs du modèle. Ici, il s'agit de l'erreur quadratique calculée sur les racines carrées des débits et mise sous la forme adimensionnelle du critère de Nash et Sutcliffe (1970). Le critère de calage est donc défini par :

$$NSErq = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\hat{Q}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\bar{Q}})^2}$$

où Q_i et \hat{Q}_i sont respectivement les débits observés et simulés durant la période de calage; et où \bar{Q} est la moyenne des débits observés. Si le critère de Nash est de 1, l'ajustement est parfait, par contre s'il est négatif, le débit calculé par le modèle est une plus mauvaise estimation que le simple débit constant égal au débit observé.

Le calage sur les racines des débits permet de ne pas donner trop d'influence aux forts débits lors du calage. Le choix de la forme adimensionnelle du critère de Nash-Sutcliffe permet d'avoir des critères relativement comparables entre bassins.

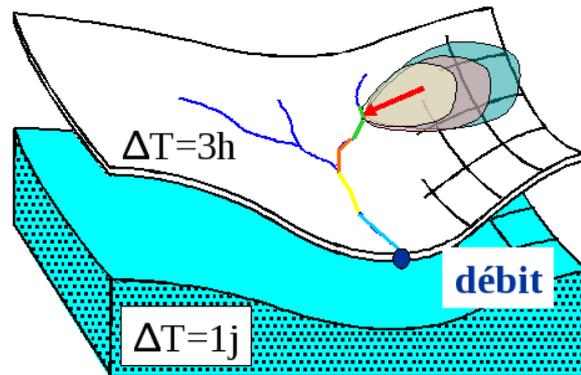
5.3 PRESENTATION DETAILLEE DU MODELE ISBA-MODCOU

5.3.1 Description

Le modèle hydrogéologique **MODCOU** est un modèle développé par le Centre de géosciences de Mines ParisTech. Le CNRM-GAME collabore avec le Centre de géosciences pour améliorer la version du modèle sur l'ensemble de la France. Cette version est utilisée dans le cadre de la Isba-Modcou Safran-Isba-Modcou.

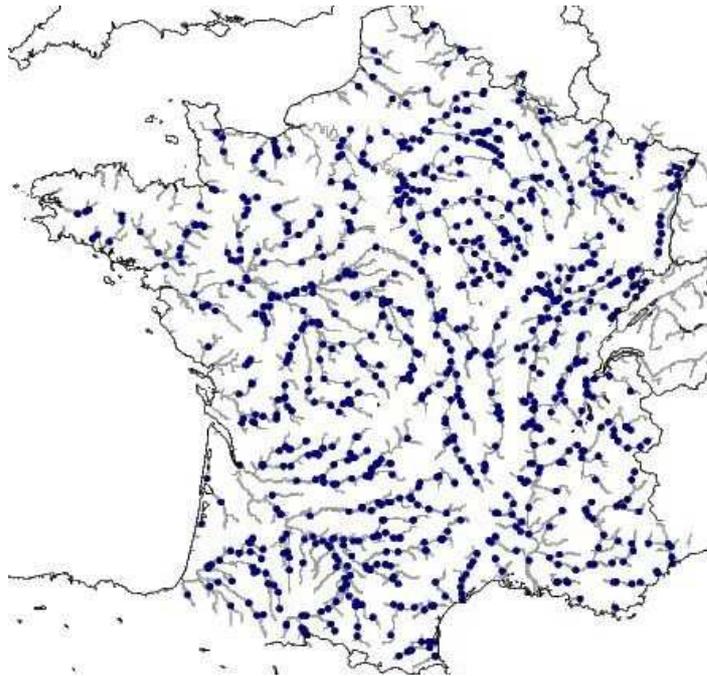
Le modèle hydrogéologique MODCOU couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de simuler les débits des rivières et les niveaux piézométriques des aquifères représentés. L'eau est transportée vers les rivières ou alimente les aquifères. MODCOU simule l'évolution des aquifères et des nappes, ainsi que leurs interactions.

Figure 19 : Schéma de principe de MODCOU : l'eau est transférée vers la rivière, puis dans la rivière avec un pas de temps de 3h. L'eau peut également s'infiltrer vers la nappe qui interagit avec la rivière



Dans la chaîne de calcul Safran-Isba-Modcou, les débits sont calculés à un pas de temps de trois heures et l'évolution des hauteurs des nappes au pas de temps quotidien. Au niveau national, 42 000 km de cours d'eau sont pris en compte et les calculs de débit sont disponibles sur plus de neuf cents points du réseau hydrographique (bassins versants entre 240 km² et 112 000 km²).

Figure 20 : Points de jaugeage Modcou



Pour l'ensemble de ces stations, les débits moyens quotidiens ont été fournis au projet Explore 2070, sur 907 stations et 256 exutoires soit pour 1163 points.

5.3.2 Calage

ISBA

Les paramètres physiographiques d'ISBA sont fournis par :

- ▶ La base de données de surface ECOCLIMAP qui décrit les principaux paramètres de la végétation (type, surface spécifique des feuilles) et des paramètres liés (albédo, rugosité, profondeur du sol) Masson et al. 2003, modifiée par Habets et al. 2008 pour tenir compte de la distinction entre cultures d'hiver et cultures d'été .
- ▶ Des cartes pédologiques fournissant les pourcentages de sable et d'argile du sol permettant de calculer les lois de pédotransfert d'ISBA. Source : Base de données géographique des Sols de France (BDGSF) .

La résolution de 8 km impose de décrire de manière paramétrée les processus hydrologiques à une échelle inférieure à celle de la maille. Un ruissellement sous maille et un drainage sous maille (nécessitant une calibration) ont été introduits dans ISBA.

Ruissellement sous maille

Le ruissellement sous maille repose sur l'approche VIC (Variable infiltration capacity, Zhao, 1992; Wood et al., 1992; Dümenil and Todini, 1992). Il tient compte des hétérogénéités de la végétation, de la topographie, du sol sur le ruissellement. Au sein d'une maille, on considère qu'il existe toujours une fraction de la surface de la maille qui est saturée. La pluie tombant sur cette partie va produire un ruissellement de surface. La fraction de la maille saturée est une fonction croissante du contenu en eau moyen de la zone racinaire dans la maille. La forme de la fonction dépend d'un seul paramètre (B). La valeur par défaut (0.5) n'a pas été modifiée. Il n'y a pas donc eu de calibration sur ce paramètre. La calibration de ce paramètre a un effet faible sur le bilan d'eau annuel, par contre, il peut améliorer la bonne reproduction des pics de crue, comme l'a montré récemment Quintana Seguí (2009).

Drainage sous maille

Un terme de drainage résiduel a dû être ajouté au drainage gravitationnel dans le cas d'aquifères non simulés par Modcou, mais identifiés comme aquifère par le BRGM (BDRHF,). Il a pour but de soutenir les débits d'étiages. Dans ISBA, il intervient pour maintenir un drainage, même lorsque celui-ci doit devenir nul (capacité aux champs), comme le montre l'équation suivante :

$$K_3 = \frac{C_3}{\tau(d_3 - d_2)} \max(WD, (W3 - WFC))$$

où :

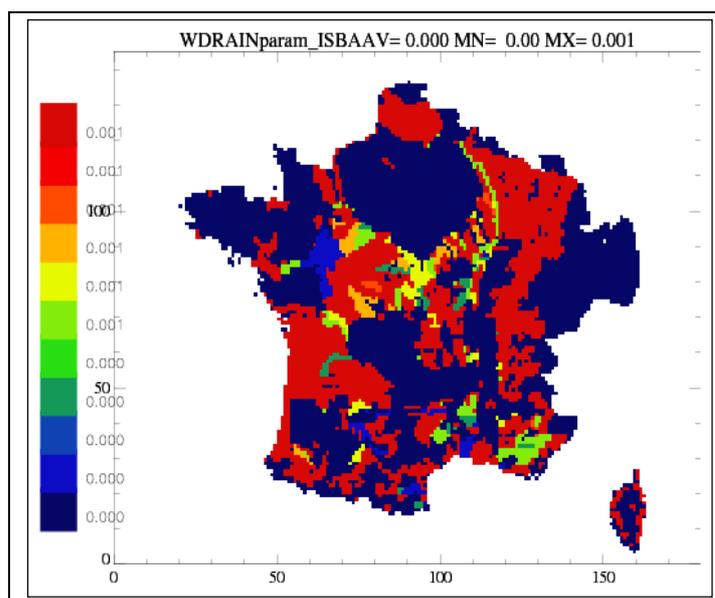
- ▶ W3 : contenu en eau du réservoir sous racinaire
- ▶ WFC : contenu en eau à la capacité au champs
- ▶ WD : terme de drainage sous-maille
- ▶ C3, t, (d3-d2) : coefficient de drainage, temps caractéristique et épaisseur du réservoir sous racinaire.
- ▶ K3 : drainage profond transféré au modèle hydrologique.

WD s'exprime en m3/m3.

La calibration de WD s'est faite analytiquement par bassin, en supposant WD uniforme sur le bassin. La valeur de WD est celle qui permet de soutenir le Q10 (origine Banque hydro) lorsque que le sol est à la capacité aux champs en utilisant l'équation ci-dessous. Il n'y a donc pas besoin de définir une période de calibration et de vérification pour la calibration de ce paramètre (Caballero et al., 2007, Habets et al., 2008).

Afin de ne pas assécher de manière irréaliste le sol, la valeur de WD est tout d'abord seuillée à 0.001 m³/m³. En outre, WD décroît de manière linéaire en fonction du contenu en eau du sol, entre la capacité aux champs et 0 (cas théorique où le sol est complètement sec). La Figure 21 représente la répartition spatiale de WD à la capacité au champ. On remarque que WD=0 pour les zones sans nappes significatives (Bretagne, etc.), et au dessus des nappes simulées explicitement par Modcou (Seine et Rhône)

Figure 21 : Carte du paramètre WD sur la France



CALIBRATIONS LIEES A MODCOU

Les modèles de nappe de Modcou ont été développées par ailleurs (GEWEX-Rhône pour le Rhône, travaux antérieurs du Centre de géoscience pour la Seine) et ont été intégrés sans modifications.

Le routage en surface est calculé en fonction de paramètres géographiques (surface, pente) qui permettent de calculer un temps de transfert relatif au sein d'un bassin. Le temps de concentration du bassin, exprimé en jours, doit être calé. Il représente le temps maximal nécessaire pour que l'eau tombée sur le bassin soit acheminé vers l'exutoire. Ce calage a été effectué à l'échelle des grands bassins, en comparant les chroniques de débit observés et simulés sur quelques années en divers points du bassin.

On se référera à la publication de d'Habets et al. (2008) pour plus de détails sur les contenus scientifiques et les validations effectuées.

6. EVALUATION COMPARATIVE DES MODELES HYDROLOGIQUES EN TEMPS PRESENT

6.1 OBJECTIFS

Nous présentons ici l'analyse des performances des deux modèles hydrologiques (GR4J et ISBA-MODCOU) utilisés dans le cadre du Lot Hydrologie de surface. Rappelons que dans le déroulement des travaux de modélisation du Lot Hydrologie de surface, l'analyse des performances de simulations hydrologiques en temps présent a lieu en amont des simulations qui seront réalisées avec les sorties des modèles climatiques (en temps présent et futur).

L'objectif de cette évaluation est de qualifier la capacité des modèles hydrologiques à représenter la relation pluie-débit en conditions actuelles, et donc le niveau de confiance que l'on peut leur accorder à leur "compréhension" du fonctionnement hydrologique des bassins étudiés. Un fonctionnement satisfaisant en conditions actuelles est souhaitable, car il est peu probable qu'un modèle en échec en conditions actuelles donne des résultats fiables en conditions futures. Une évaluation des performances sur des données observées est donc une étape indispensable et préalable à l'utilisation des projections, et permet une première quantification des incertitudes associées aux simulations hydrologiques. Cependant, un fonctionnement satisfaisant en climat présent n'est clairement pas une condition suffisante pour s'assurer d'un bon fonctionnement en conditions futures : un très bon modèle en conditions actuelles peut se révéler incapable de donner des résultats fiables dans des conditions futures très différentes des conditions actuelles. Il faut donc en plus s'assurer que le modèle a une bonne sensibilité à des variations de conditions climatiques et qu'il est capable de s'adapter à des conditions très différentes (fonctionnement en extrapolation par rapport aux conditions actuelles). Cette capacité d'adaptation des modèles est plus délicate à évaluer et ne sera pas détaillée dans ce rapport.

Nous nous concentrons donc dans la suite sur l'évaluation de la capacité des deux modèles hydrologiques à reproduire les débits observés en temps présent.

6.2 DONNES D'ENTREE UTILISEES

Nous avons mené l'évaluation des modèles hydrologiques sur la période de référence : 1961-1990. L'ensemble des stations hydrométriques est celui de la proposition 2 (cf. proposition de points de calcul pour la modélisation hydrologique).

L'évaluation en temps présent requiert des forçages climatiques observés en entrée des modèles hydrologiques, ainsi que des observations de débits afin de pouvoir comparer les débits simulés aux débits observés. Les bases de données ont été mises en place au pas de temps journalier:

- ▶ au niveau des forçages climatiques, les réanalyses SAFRAN fournies par Météo-France ont été utilisées. Elles sont disponibles sur l'intégralité de la période de référence 1961-1990 et sur l'intégralité du territoire. Notons que les réanalyses utilisées pour le modèle GR4J diffèrent légèrement de celles utilisées par le modèle ISBA-MODCOU, car elles intègrent une correction sur l'Alsace, qui affecte quelques bassins versants de l'échantillon. Il ne faudra donc pas accorder d'importance aux différences observées sur ces bassins ;
- ▶ au niveau des données hydrométriques, les données issues de la banque HYDRO ont été utilisées. Les périodes disponibles sont variables d'une station à l'autre.

6.3 METHODOLOGIE

6.3.1 Modalités d'application

Les modalités d'application des deux modèles sont différentes :

- ▶ Pour le modèle GR4J, une procédure en calage-contrôle est utilisée. En effet, les paramètres du modèle doivent être déterminés par calage. Deux sous-périodes sont identifiées dans la chronique des observations. Elles sont désignées ci-après par période 1 et période 2. Ces deux sous-périodes sont constituées d'un minimum de 5 années consécutives et sont sélectionnées sur des critères de disponibilité des données de débits observés. Le calage des paramètres du modèle est réalisé sur la période 1. La fonction objective est un critère quadratique sur les racines des débits. Le jeu de paramètre optimal est ensuite utilisé pour contrôler le modèle sur la période 2. Enfin, le rôle des deux sous-périodes est inversé. On obtient ainsi une évaluation du modèle en contrôle (c'est-à-dire indépendamment du calage) sur toutes les données disponibles (on fait la moyenne des critères obtenus sur les deux périodes). Ce sont ces résultats en contrôle qui sont présentés par la suite. Rappelons que le modèle GR4J est utilisé avec le module de prise en compte de la neige Cemaneige développé par Valéry (2010).
- ▶ Par construction, les calages nécessaires pour ISBA-MODCOU sont minimaux (cf. la note écrite à ce sujet) car il se réfère le plus possible à des modèles validés par ailleurs ou des bases de données déjà existantes. ISBA-MODCOU n'a donc pas été appliqué en calage-contrôle comme GR4J.

6.3.2 Critères d'évaluation

Les critères de performance retenus sont :

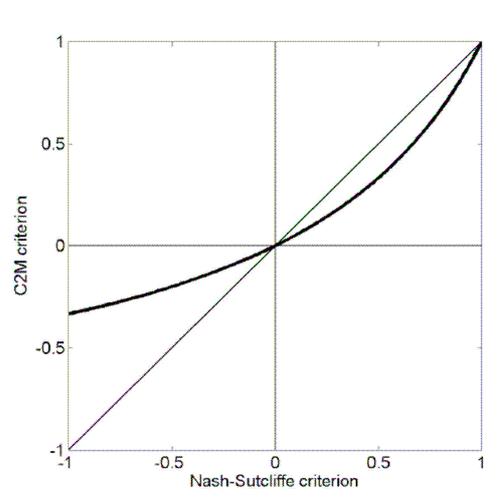
- ▶ le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits, sous forme d'un critère borné noté C2MQ (Mathevet et al., 2006). Ce critère donne une importance relative plus importante à la restitution des forts débits.
- ▶ le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits (sous forme C2MLQ). Ce critère confère un poids relatif plus important aux reconstitutions de périodes de basses eaux (étiages).
- ▶ le biais sur les volumes totaux écoulés.

Rappelons pour la lecture des résultats que le critère C2M évolue entre -1 et 1. Sa formulation est donnée par :

$$C2M = \frac{NSE}{2 - NSE}$$
. Le score égal à 1 traduit une reproduction parfaite des débits observés, tandis

que le score 0 signifie des performances équivalentes à un modèle naïf de simulation (donnant un débit constant égal au débit moyen observé). Enfin, les scores négatifs sanctionnent des performances de simulation moins bonnes que celles de ce même modèle naïf. La Figure 22 représente la relation entre le critère de Nash-Sutcliffe et le critère borné C2M (trait épais).

Figure 22 : Relation entre le critère de Nash et le critère borne C2M



6.4 RESULTATS

Dans la suite, nous présentons :

- ▶ les résultats du modèle GR4J sur l'échantillon des 850 bassins sur lesquels il a été appliqué ;
- ▶ les résultats du modèle ISBA-MODCOU sur l'échantillon des 499 bassins sur lesquels il a été appliqué ;
- ▶ la comparaison des résultats des deux modèles sur les 451 bassins sur lesquels ils ont été appliqués tous les deux.

NB : les échantillons analysés ici diffèrent légèrement (en nombre de points) des échantillons retenus pour les modélisations finales mais l'analyse conserve cependant toute sa pertinence.

6.4.1 GR4J

Les cartes de la Figure 23 et la Figure 24 présentent les performances du modèle GR4J (avec le module neige Cemaneige) pour les critères C2MQ et C2MLQ. Le test porte sur 850 bassins versants français. Les résultats sont globalement assez satisfaisants. On note des difficultés sur la Corse, ce qui rejoint des résultats antérieurs obtenus à l'Irstea dans le cadre d'autres travaux.

La

Figure 25 et la Figure 26 représentent les performances (respectivement C2MQ et C2MLQ) du modèle GR4J à l'échelle des entités hydrographiques issues du découpage proposé par le Lot Hydrologie de surface pour la confrontation besoin/ressource. Sur chaque entité, les valeurs correspondent à la moyenne des critères obtenus sur les stations présentes sur la zone. Quatre entités ne recourent aucun exutoire de bassin : Cotentin, Marais Poitevin, Landes et Durance aval. Elles apparaissent en blanc sur les cartes ci-dessous.

On constate une difficulté plus grande du modèle sur le pourtour méditerranéen, la Seine moyenne et aval et le Nord de la France. La modélisation des faibles débits apparaît globalement moins satisfaisante que celle des forts débits.

Rappelons que, si une partie de ces difficultés provient vraisemblablement de défauts de modélisation, les modélisations proposées ici sont évalués sur des débits observés et potentiellement influencés. La non prise en compte des influences dans la modélisation peut être une source importante d'erreur (par exemple en cas de présence de grands ouvrages, notamment dans les zones de relief).

Figure 23 : Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige - Critère C2MQ

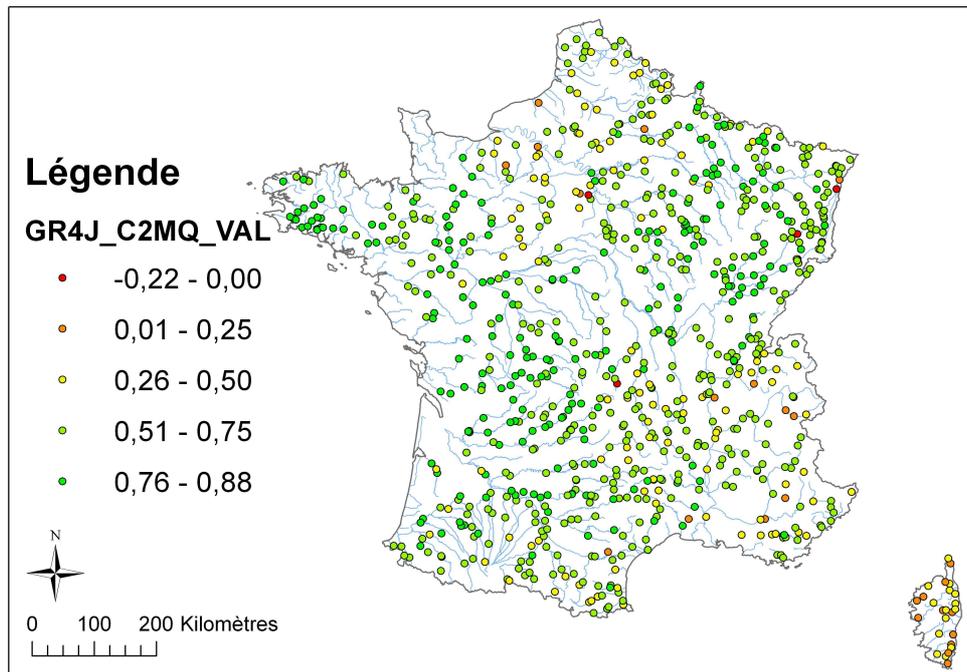


Figure 24 : Performances en validation du modèle GR4J avec module neige Cemaneige - Critère C2MLQ

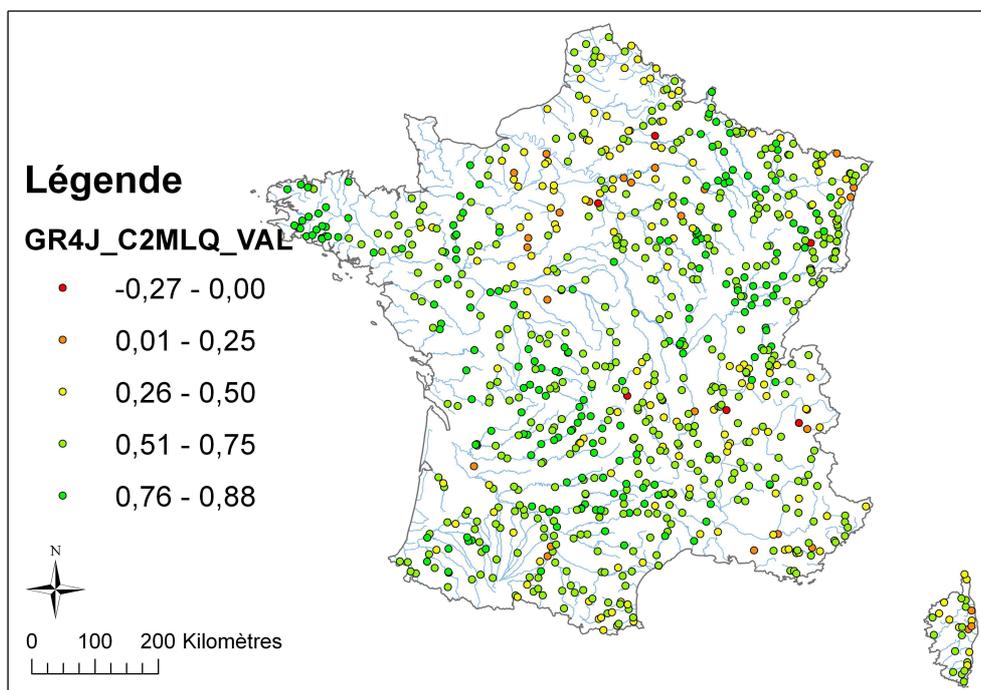


Figure 25 : Performances moyennes du modèle GR4J selon le découpage hydrologique proposé - C2MQ

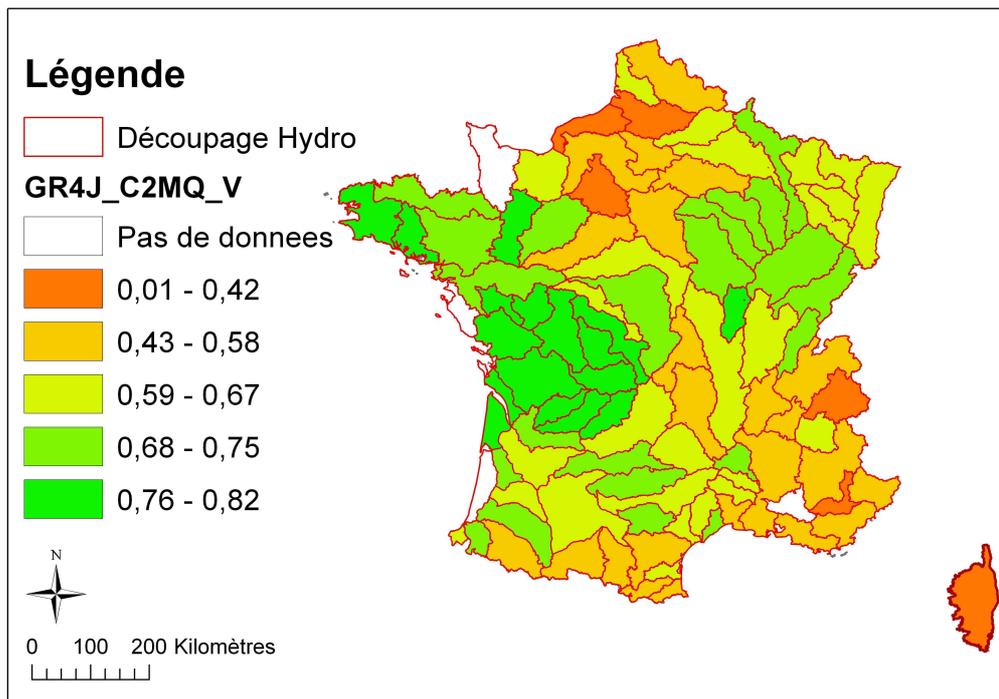
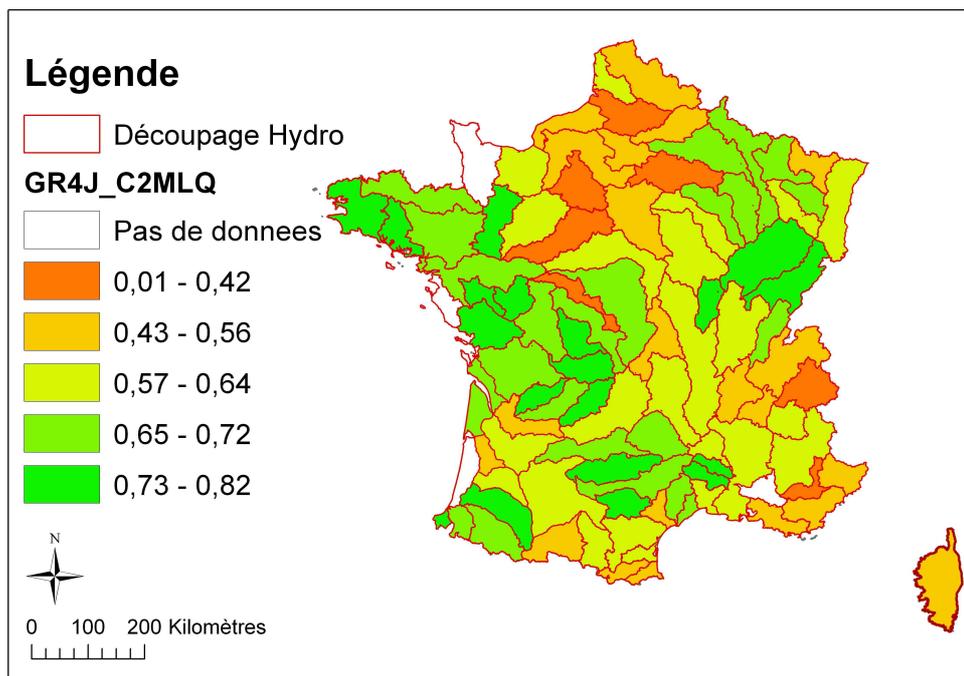


Figure 26 : Performances moyennes du modèle GR4J selon le découpage hydrologique proposé - C2MLQ



En conclusion, le modèle GR4J donne des performances de modélisation globalement assez satisfaisantes, mais avec une certaine variabilité spatiale et des différences entre hautes et basses eaux. Le modèle est clairement en difficulté sur certaines zones, alors que d'autres (façade océanique par exemple), semblent poser moins de difficultés. L'introduction du module neige Cemaneige permet d'assurer des performances acceptables dans les zones de montagne, sans que cela n'entraîne de pertes de performances pour les bassins versants non influencés par la neige.

6.4.2 ISBA-MODCOU

Les cartes de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présentent les résultats des performances du modèle ISBA-MODCOU pour les mêmes critères C2MQ et C2MLQ. Le test porte sur 441 bassins français. Les échelles de restitution des performances sont identiques à celles des figures précédentes.

Les performances sont globalement moyennes. Comme GR4J, le modèle semble avoir plus de difficultés dans la simulation des basses eaux que des hautes eaux (critère C2MLQ, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). De manière intéressante, comme pour GR4J, on retrouve pour ISBA-MODCOU des difficultés de modélisation accrue sur certaines zones du territoire, certaines étant communes à GR4J (Alpes, Seine aval).

Figure 27 : Performances du modèle ISBA-MODCOU - critère C2MQ

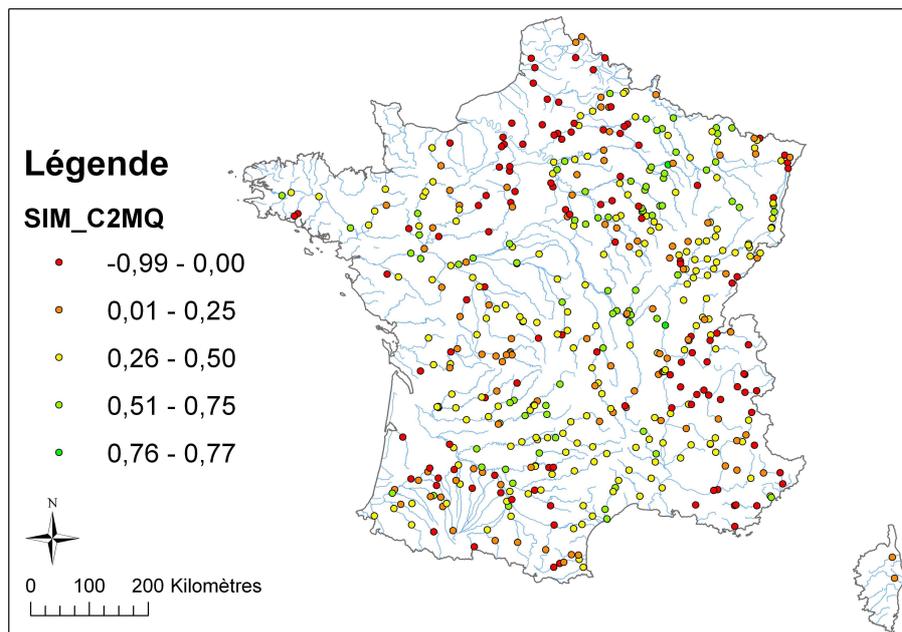


Figure 28 : Performances du modèle ISBA-MODCOU - critère C2MLQ

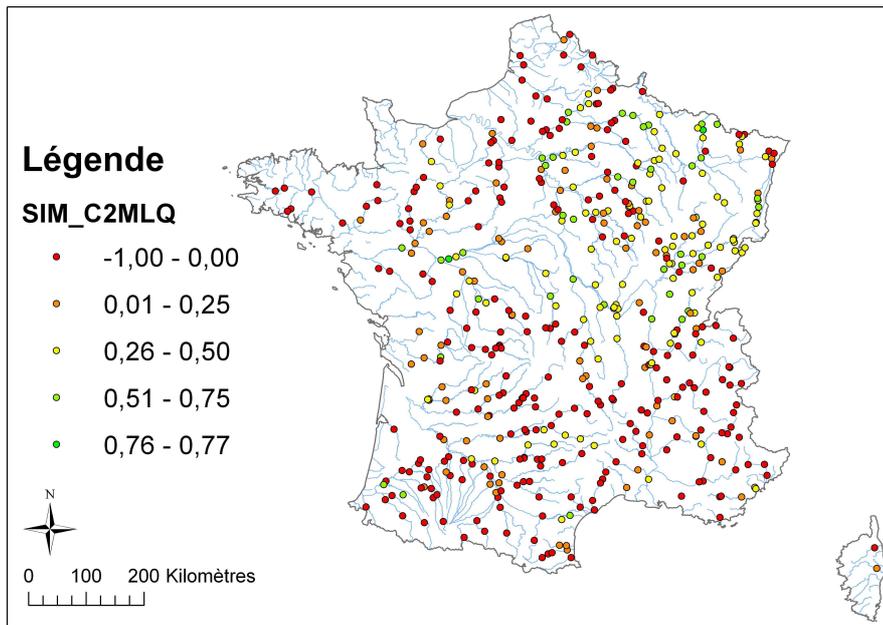


Figure 29 : Performances moyennes du modèle ISBA-MODCOU selon le découpage hydrologique proposé- C2MQ

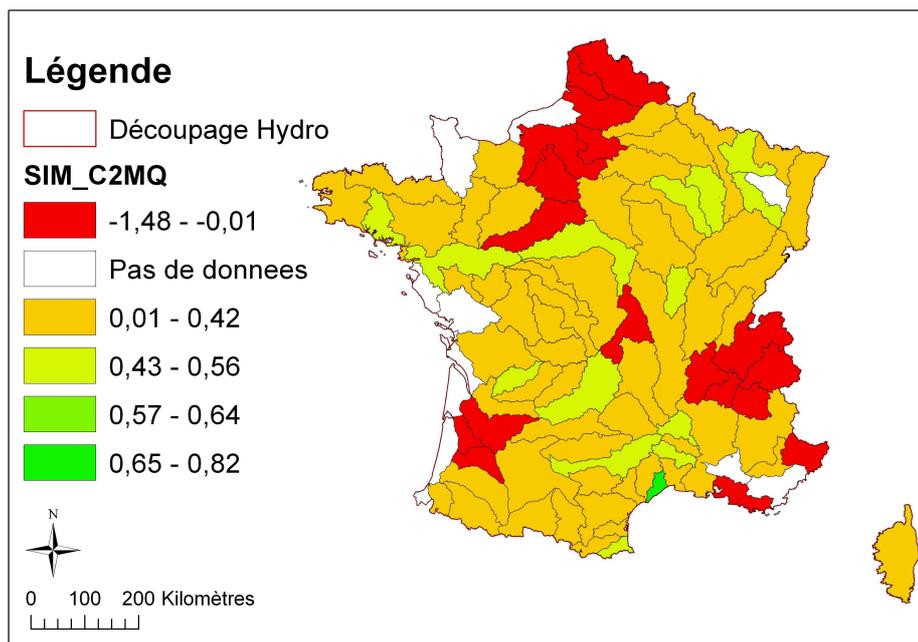
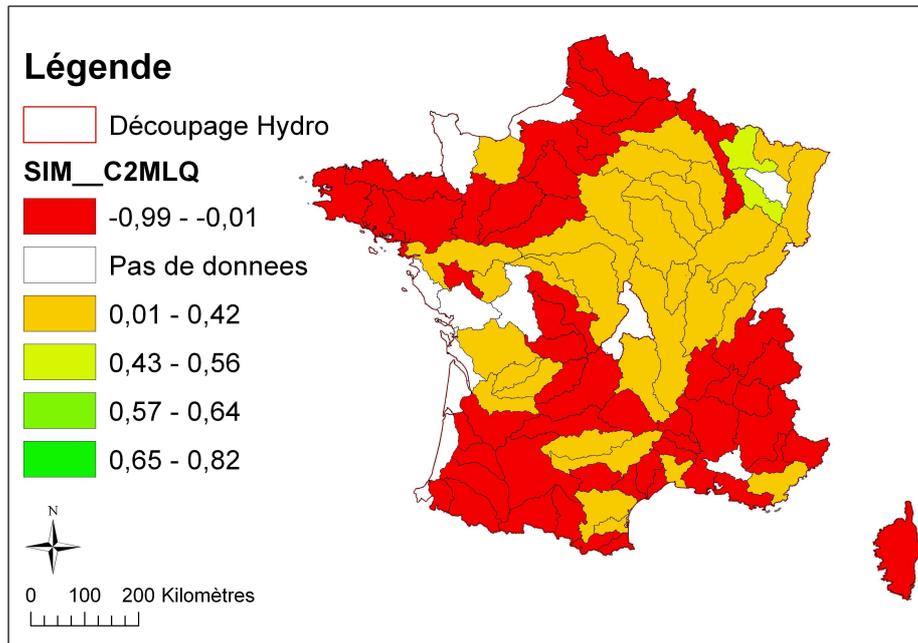


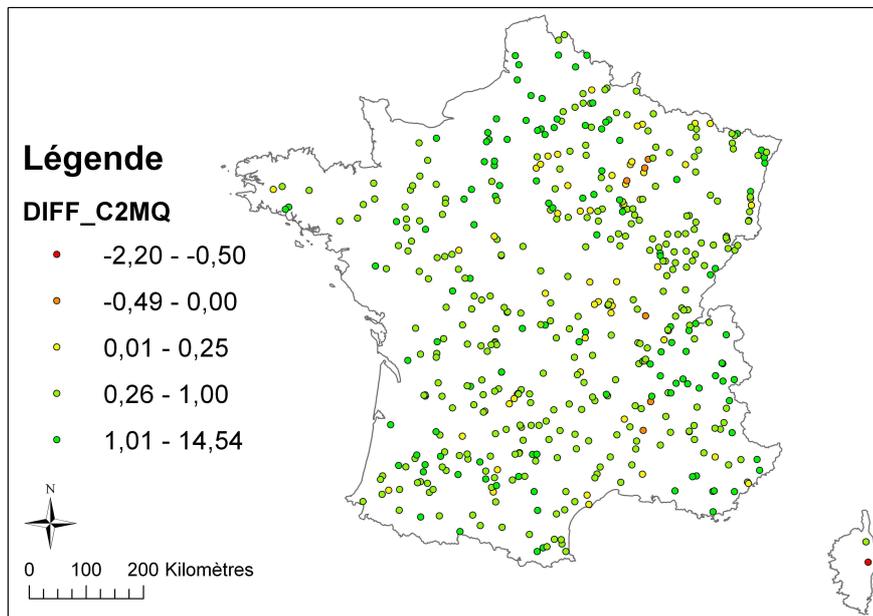
Figure 30 : Performances moyennes du modèle ISBA-MODCOU selon le découpage hydrologique proposé- C2MLQ



6.4.3 Analyse comparée des performances des deux modèles hydrologiques

La comparaison des deux modèles hydrologiques requiert l'évaluation des performances des modèles sur le même ensemble de points et sur les mêmes périodes de temps. Compte-tenu de ce qui a été présenté précédemment, la méthodologie retenue ici consiste, pour chaque bassin versant commun aux deux modèles, à calculer les performances du modèle SIM sur les mêmes périodes de temps que celles utilisées pour l'évaluation de GR4J. On obtient alors de la même façon une valeur unique de performance sur les trois critères pour le modèle SIM et la comparaison inter-modèle est alors possible. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** représente cartographiquement les différences de performances entre les deux modèles sur les 451 points communs. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les résultats comparés des deux modèles. Le Tableau 6 synthétise les résultats statistiques des distributions des critères de performances obtenus pour les deux modèles. La Figure 33 et la Figure 34 représentent les distributions des critères par bassins pour les deux modèles.

Figure 31 : Comparaison des performances (critère C2MQ) des deux modèles. Les points verts correspondent à une performance supérieure du modèle GR4J



Sur ces points de modélisation communs, les performances de modélisation sont globalement meilleures pour le modèle GR4J, même si ce n'est pas systématique. Les différences semblent plus grandes sur les étiages que sur les hautes eaux. Les écarts sont moins marqués sur les bilans en eau, les deux modèles réussissant en moyenne à donner des bilans acceptables (moins de 10% d'erreur).

Cela indique qu'en conditions actuelles, l'incertitude de simulation du comportement hydrologique des bassins est globalement plus faible avec GR4J qu'avec ISBA-MODCOU. Comme nous l'avons rappelé en introduction, cela ne préjuge cependant pas de leur niveau de performance en conditions futures.

Figure 32 : Performances comparées de GR4J et de SIM sur 451 bassins

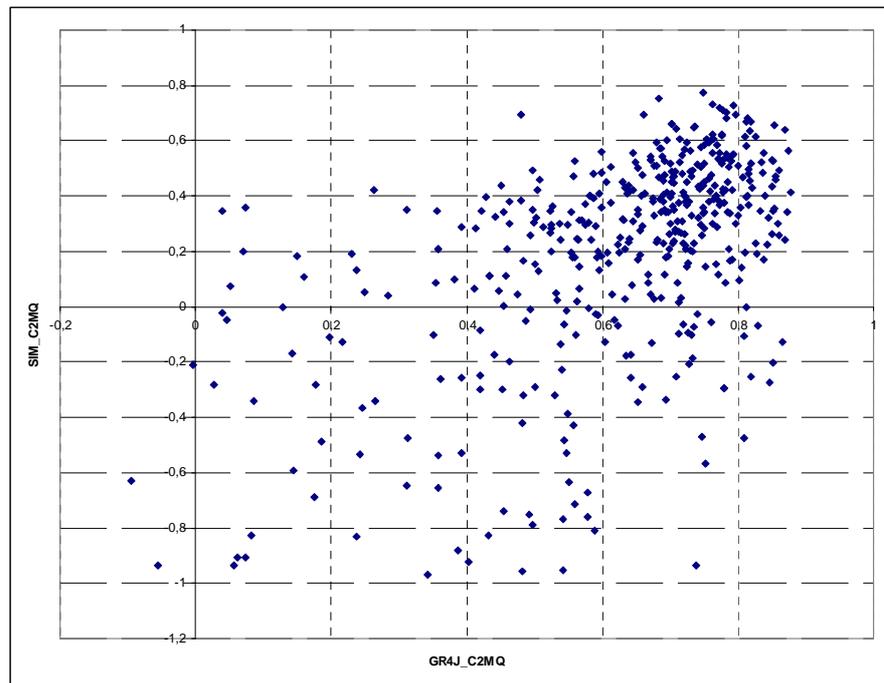


Tableau 6 : Moyennes, max, min et quantiles 10, 50 et 90 des performances pour les deux modèles et les trois critères sur les 451 BV communs

	C2MQ		C2MLQ		BIAIS	
	GR4J	SIM	GR4J	SIM	GR4J	SIM
Moyenne	0,63	0,20	0,59	-0,06	0,96	1,10
Max	0,88	0,77	0,86	0,77	1,05	6,63
Min	-0,10	-0,97	-0,11	-1,00	0,79	0,31
Q10	0,36	-0,32	0,31	-0,71	0,93	0,78
Q50	0,69	0,30	0,64	-0,02	0,96	1,06
Q90	0,81	0,56	0,79	0,49	1,00	1,39

Figure 33 : Distribution des critères de performances par bassin pour le modèle GR4J

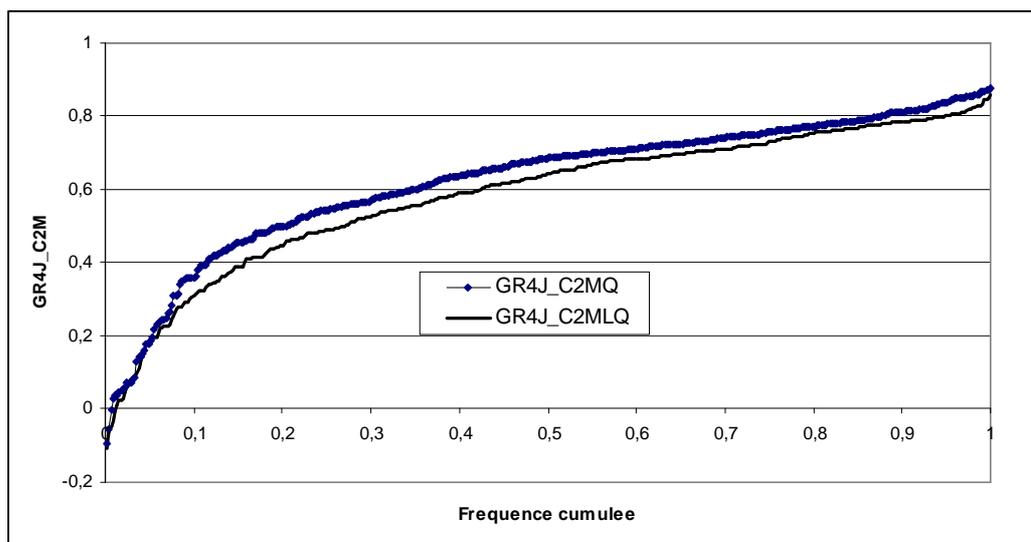
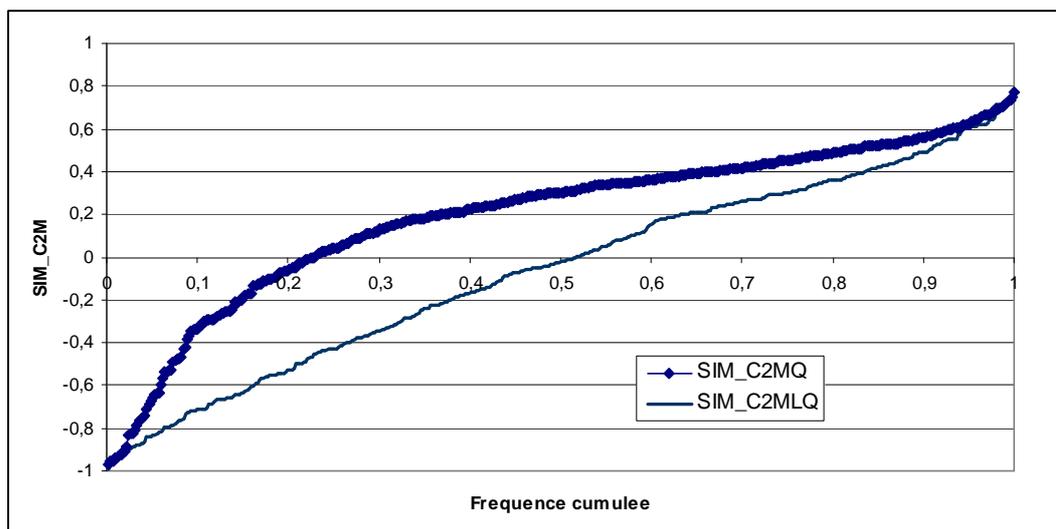


Figure 34 : Distribution des critères de performances par bassin pour le modèle ISBA-MODCOU

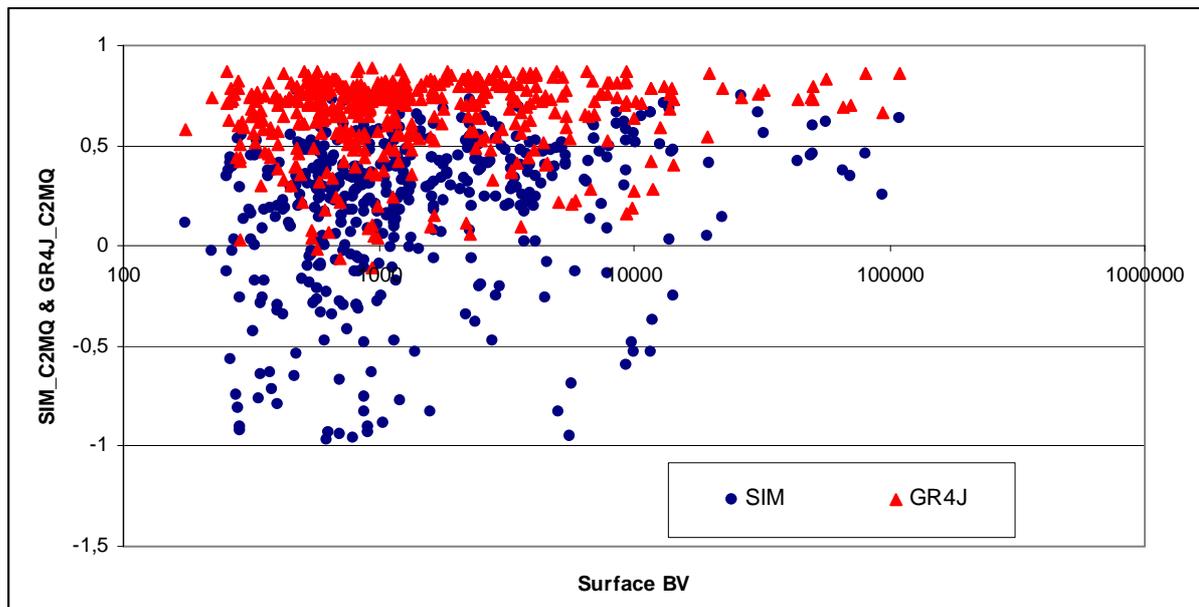


6.5 LIEN ENTRE PERFORMANCE ET SURFACE DU BASSIN VERSANT

Il est intéressant de tester le lien entre la taille des bassins versants et la faculté des modèles hydrologiques à reproduire les débits observés. La Figure 35 présente les performances des modèles GR4J (triangle rouge) et SIM (rond bleu) en fonction des surfaces des bassins versants.

De façon intéressante, on constate que plus la superficie du bassin versant augmente, plus le risque d'obtenir de faibles performances diminue. Cela est vrai pour les deux modèles. Or les modèles hydrologiques globaux comme le modèle GR4J sont souvent considérés comme moins bien adaptés aux grands bassins, de fait qu'il ne prennent pas en compte explicitement l'hétérogénéité sur le bassin. Les résultats présentés ici montrent que cette idée est clairement fautive. Ce résultat n'est en fait pas surprenant : le signal débit étant généralement plus lissé, il est plus facile à modéliser sur des grands bassins que sur des petits ; par ailleurs les forçages moyens sont généralement mieux connus sur les grands bassins que sur les petits. Cela rejoint les résultats de Merz et al. (2009).

Figure 35 : Relation entre performances et surface du bassin versant



6.6 EXEMPLES DE CHRONIQUES

A titre d'illustration, nous donnons avec la Figure 36 et la Figure 37 deux exemples de simulation fournies par les modèles, sur le bassin de la Seine à Paris Austerlitz et sur le bassin de la Loire à Montjean. Sur ces deux bassins, les modèles fournissent des résultats relativement proches.

Figure 36 : Exemple de chroniques obtenues sur la Seine à Paris Austerlitz. En bleu, le débit observé, en vert le débit simulé par GR4J, en gris le débit simulé par ISBA-MODCOU. En jaune, le stock de neige modélisé par GR4J.

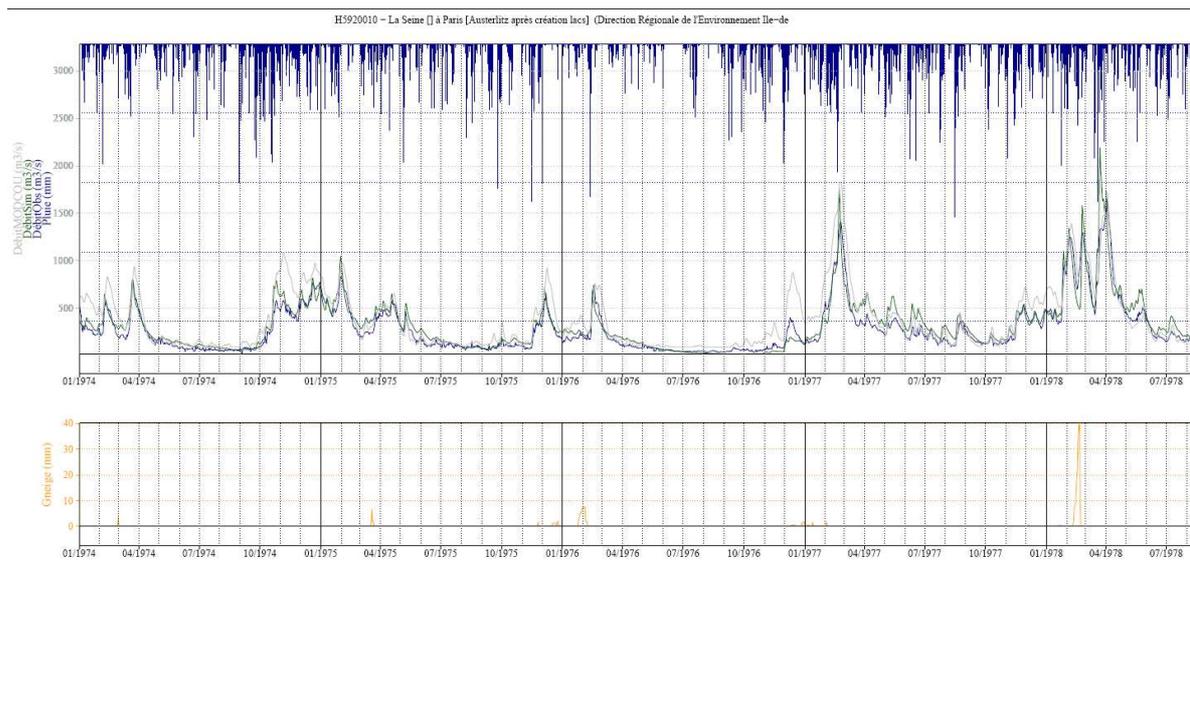
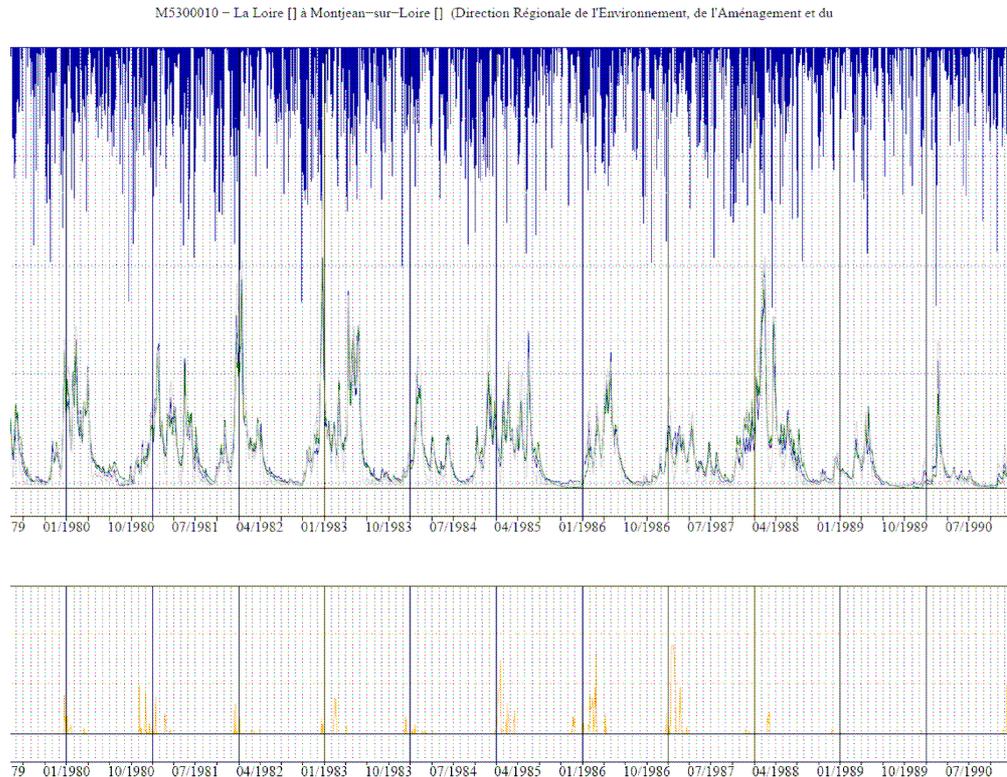


Figure 37 : Exemple de chroniques obtenues sur la Loire à Montjean sur Loire. En bleu, le débit observé, en vert le débit simulé par GR4J, en gris le débit simulé par ISBA-MODCOU. En jaune, le stock de neige modélisé par GR4J.



6.7 CONCLUSION

Les travaux présentés ci-dessus sont un préalable indispensable à la simulation hydrologique des débits en temps futur, car ils permettent de quantifier le niveau d'incertitude auquel on peut s'attendre avec les deux modèles sélectionnés. Il devra être mis en regard des évolutions hydrologiques qui seront simulées.

Nous avons montré que le modèle hydrologique GR4J avec module neige Cemaneige et le modèle SIM reproduisaient la relation pluie-débit sous climat observé, avec des niveaux de fiabilité différents. Ces différences proviennent en partie du fait qu'un modèle (GR4J) est calé sur chaque station, alors que l'autre (SIM) ne l'est pas.

La comparaison des deux modèles montre qu'il n'y a pas un avantage systématique pour l'un des deux, indiquant un certain niveau de complémentarité. Certaines zones du territoire demeurent problématiques pour les deux modèles, ce qui s'explique en partie par les limites inhérentes des modèles et par le fait que les deux modèles ne prennent pas en compte les influences humaines. Ces moindres performances permettront de tempérer la confiance que l'on accordera aux résultats des projections sur ces bassins.

Une évaluation plus complète des modèles consisterait à des tests en conditions volontairement contrastées, pour évaluer leur sensibilité au climat, mais cela sort du cadre de la présente comparaison.

Pour la suite de l'étude, il faut donc garder à l'esprit que si les performances limitées sur certains bassins incitent à la prudence, de bonnes performances ne préjugent cependant pas de bonnes performances en conditions futures.

Toujours pour la suite, les paramètres du modèle hydrologique GR4J seront calés sur toute la période de référence. Ces jeux de paramètres seront utilisés pour produire des simulations en temps présent et futur comparables à celles déjà disponibles pour SIM. Les variations des sorties entre "temps présent" et "temps futur" serviront alors à évaluer quantitativement les changements hydrologiques attendus.

7. CALCUL D'INDICATEURS ET ANALYSE STATISTIQUE

L'ensemble des ces éléments sont explicités dans le document *A1 – Rapport de synthèse* et dans le chapitre 2 du document *A2 – Résultats – Fiches, Cartes et Graphes*.

8. CONCLUSIONS ET PRODUCTIONS FINALES

Le document *A1 – rapport de Synthèse* présente une analyse de l'ensemble des résultats produits en termes d'évolutions climatiques et hydrologiques possibles, et une analyse des incertitudes.

A l'issue des travaux explicités dans ce rapport, cinq productions viennent alimenter et supporter l'analyse des résultats finaux :

- ▶ L'ensemble des indicateurs calculés pour les observations et pour toutes les simulations sont rassemblés dans des fichiers .csv ;
- ▶ Les fiches de synthèse présentent ces résultats pour les 1522 points du projet ;
- ▶ Des cartes produites à l'échelle de la métropole rendent compte de la répartition spatiale des évolutions possibles. Il sont rassemblés dans le document *A2 – Résultats – Fiches, Cartes et Graphes* ;
- ▶ Un ensemble de graphes a été produit, afin d'analyser plus finement les résultats et les incertitudes. Il sont rassemblés dans le document *A2 – Résultats – Fiches, Cartes et Graphes*.

9. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SOURCES

Merz, R., Parajka, J. and Blöschl, G., 2009. Scale effects in conceptual hydrological modeling. *Water Resources Research*, 45: W09405.

Mathevet, T., Michel, C., Andréassian, V. and Perrin, C., 2006. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *IAHS Red Books Series n°307*, pp. 211-219.

Valéry, A., 2010: Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.