



## Hydrologie souterraine

Vallée du Rhin

Octobre 2012

## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

L'application « **Vallée du Rhin** » ou « **plaine d'Alsace** » a été développée dans le cadre du projet ANR-Vulnar et de la thèse de Charlotte Thierion qui y était associée. Le fonctionnement de cette nappe est fortement contraint par les échanges nappe rivières qui constituent environ les 3/4 de la recharge de la nappe. Cependant, les caractéristiques du lit des rivières impliquées dans ces échanges sont extrêmement mal connues. Nous avons donc réalisé un ensemble de simulations avec différents jeux de paramètres (coefficient d'échange, débit limite, transmissivité...). Ces différentes simulations ont été évaluées via une comparaison avec les observations des niveaux piézométriques de plus de 190 stations à un pas de temps pouvant atteindre la journée. Les résultats montrent que la majorité des simulations sont difficiles à discriminer, et que vis-à-vis de la piézométrie, elles sont relativement équivalentes. Cela nous donne alors une idée de l'incertitude sur le fonctionnement du bassin à l'actuel (l'incertitude sur les volumes échangées entre la nappe et la rivière atteignant 14%). Les projections climatiques sur la période 2045-2065 indiquent un climat globalement plus chaud et globalement plus sec même si les incertitudes sur les précipitations sont fortes. Les conséquences sur l'hydrogéologie de la plaine alluviale sont une baisse modérée mais généralisée de la piézométrie de l'ordre de 35cm. Cela se traduit également par une modification des débits, avec une accentuation des débits hivernaux liés à la fois à des modifications du régime de pluie et à une tendance à la diminution du manteau neigeux, et une diminution des débits d'étiage, d'autant plus marquée que les pertes en rivières dans la plaine alluviale sont en augmentation avec un niveau piézométrique plus bas. La baisse du niveau piézométrique est cependant réduit lorsque l'on prend en compte l'évolution des prélèvements en nappe telle qu'estimée par le Bipe selon les deux scénarios d'étalement sans prendre en compte le changement climatique, et qui prévoient tous deux de fortes diminution des prélèvements.

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION : LA PLAINE D'ALSACE</b>	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>DEVELOPPEMENT DE L'APPLICATION HYDROGEOLOGIQUE SUR LA PLAINE D'ALSACE</b>	<b>8</b>
<b>2.1.</b>	<b>PRINCIPE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE MODCOU</b>	<b>8</b>
2.1.1.	MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE	8
2.1.2.	TRANSFERT DES LAMES D'EAU INFILTREES DANS LA ZONE NON SATUREE	9
2.1.3.	TRANSFERT DES ECOULEMENTS VERS LES RIVIERES	9
2.1.4.	ECOULEMENTS EN RIVIERES	10
2.1.5.	TRANSFERT DES ECOULEMENTS EN NAPPE	10
2.1.6.	ECHANGES ENTRE LE DOMAINE DE SURFACE ET LE DOMAINE SOUTERRAIN	11
<b>2.2.</b>	<b>CONCEPTION DU MODELE POUR L'HYDROSYSTEME RHENAN</b>	<b>12</b>
2.2.1.	OCCUPATION DU SOL ET CARACTERISTIQUES METEOROLOGIQUES	13
2.2.2.	PRELEVEMENTS ANTHROPIQUES	14
2.2.3.	CONDITIONS AUX LIMITES	15
2.2.4.	PARAMETRES DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE	15
<b>2.3.</b>	<b>RESULTATS OBTENUS EN TEMPS PRESENT</b>	<b>16</b>
2.3.1.	DONNEES HYDROGEOLOGIQUES DISPONIBLES	16
2.3.2.	EVALUATION DES SIMULATIONS EN TERMES DE DEBITS	18
2.3.3.	EVALUATION DES SIMULATIONS EN TERMES DE PIEZOMETRIE	18
2.3.4.	ETUDE DE SENSIBILITE ET ANALYSE DU BILAN HYDRIQUE	20
<b>3.</b>	<b>IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PLAINE ALLUVIAL DU RHIN</b>	<b>21</b>
<b>3.1.</b>	<b>ETAT DES CONNAISSANCE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DU RHIN</b>	<b>21</b>
3.1.1.	EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES VARIABLES METEOROLOGIQUES DANS LE BASSIN DU RHIN SUPERIEUR	22
3.1.2.	ETUDES DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'HYDROLOGIE DU RHIN	22
<b>3.2.</b>	<b>PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LA PLAINE ALLUVIALE DU RHIN</b>	<b>24</b>
<b>3.3.</b>	<b>IMPACTS HYDROGEOLOGIQUES SIMULES PAR MODCOU</b>	<b>28</b>

3.3.1.	PRISE EN COMPTE DE L'EVOLUTION DES DEBITS DU RHIN A BALE .....	28
3.3.2.	CONDITIONS AUX LIMITES SOUS CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	30
3.3.2.1.	<i>Niveaux imposés et prélèvements</i> .....	30
3.3.2.2.	<i>Initialisation des simulations discontinues</i> .....	30
3.3.3.	AUTRES EVOLUTIONS ENVIRONNEMENTALES .....	31
<b>3.4.</b>	<b>IMPACTS PROJETES SUR L'HYDROSYSTEME DU FOSSE RHENAN SUPERIEUR</b>	<b>31</b>
3.4.1.	IMPACTS SUR LES BILANS HYDRIQUES EN SURFACE.....	32
3.4.2.	IMPACTS SUR LES DEBITS DES COURS D'EAU .....	33
3.4.2.1.	<i>Débits moyens</i> .....	33
3.4.2.2.	<i>Débits extrêmes</i> .....	37
3.4.3.	IMPACTS SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES .....	39
3.4.4.	IMPACTS SUR LES BILANS DE L'AQUIFERE .....	43
<b>3.5.</b>	<b>ANALYSE DES INCERTITUDES SUR LA RECHARGE DE L'AQUIFERE</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6.</b>	<b>IMPACT DES MODIFICATIONS DES PRELEVEMENTS EN NAPPE</b> .....	<b>48</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONS</b> _____	<b>52</b>
<b>5.</b>	<b>REFERENCES</b> _____	<b>54</b>

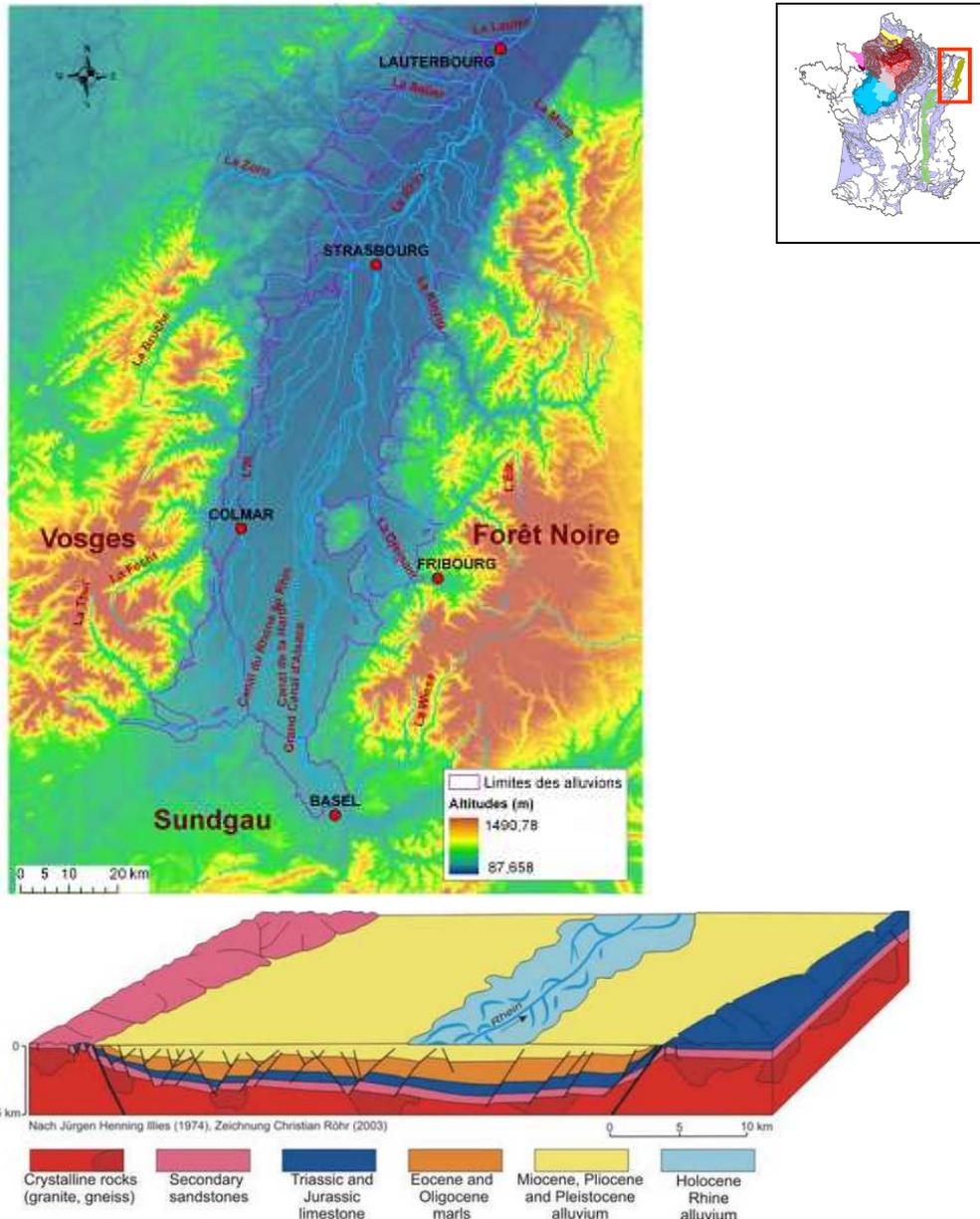
## Table des illustrations

<i>Illustration 1 Relief de la zone d'étude et coupe géologique Est-Ouest simplifiée</i> .....	7
<i>Illustration 2 : Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs.</i> .....	8
<i>Illustration 3: Principe du modèle en cascade de Nash.</i> .....	9
<i>Illustration 4: Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.</i> .....	12
<i>Illustration 5 Réseau hydrographique et maillages de surface et souterrain utilisés</i> .....	13
<i>Illustration 6 : Gauche : Occupation des sols et Droite : carte des précipitations annuels sur le bassin estimés par SAFRAN sur une grille spatiale raffinée afin de prendre en compte les contrastes d'altitude.</i> .....	14
<i>Illustration 7 Cartes des prélèvements exprimés en débits moyens annuels.</i> .....	14
<i>Illustration 8 : conditions aux limites utilisées dans le modèle</i> .....	15
<i>Illustration 9 : Cartes des transmissivités inversées par le LHYGES utilisées dans cette étude</i> 16	
<i>Illustration 10 : Emplacement des stations de débits (points jaunes) et de piézométrie (triangles rouges) disponibles sur le bassin</i> .....	17
<i>Illustration 11 : Distribution spatiale des critères de Nash calculés au pas de temps journalier pour les 12 simulations réalisées. Chaque symbole est un camembert représentant la valeur obtenue pour les 12 cas. Un critère de Nash proche de 1 indique de bons résultats alors que les valeurs inférieures à zéro sont de mauvaises qualités.</i> .....	18
<i>Illustration 12 : Comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés au pas de temps journalier par trois simulations variant uniquement par la valeur du coefficient d'échange nappe-rivière (Tp).</i> .....	19
<i>Illustration 13 : Distribution spatiale du biais moyen entre les niveaux piézométriques simulées et observés et de l'écart type entre simulation</i> .....	20
<i>Illustration 14 Répartition de la recharge de la nappe entre écoulement de sub-surface (en rouge), précipitations efficace (en vert) et infiltration des rivières (en bleu).</i> .....	21
<i>Illustration 15 - Débits mensuels moyens interannuels du Rhin à Bâle Débits simulés par l'ensemble des modèles du projet Rheinblick2050 pour trois périodes (présent et futur proche) (d'après Gørgen et al. (2010)). La courbe noire représente les débits simulés par le modèle hydrologique forcé avec les observations temps présent.</i> .....	24
<i>Illustration 16 - Evolution des températures moyennes, de l'évapotranspiration potentielle et des précipitations entre le temps présent et la période 2046-2065 d'après les résultats des sept modèles climatiques désagrégés. Les valeurs sont présentées pour quatre saisons : été (juin-juillet-août), automne (septembre-octobre- novembre), hiver (décembre-janvier-février) et printemps (mars-avril-mai), ainsi que pour l'année.</i> .....	25
<i>Illustration 17 Evolution mensuelle des précipitations (en haut) et de l'ETP (en bas) sur le temps présent (à gauche) et dans le futur (à droite)</i> .....	26
<i>Illustration 18 - Cartes des évolutions des précipitations annuelles(en haut) et de l'ETP (en bas) entre la période 1961-2000 (temps présent) et la période 2046-2065 pour les sept modèles climatiques utilisant le scénario SRES A1B, après désagrégation.</i> .....	27
<i>Illustration 19 - Moyennes glissantes sur dix années des débits journaliers du Rhin à Bâle simulés par le modèle HBV forcé par les projections climatiques ECHAM-REMO.</i> .....	29
<i>Illustration 20 - Chroniques piézométriques simulées en un point de la partie Sud de la plaine, avec des jeux de paramètres identiques mais des niveaux piézométriques initiaux différents.</i> .	31

<i>Illustration 21 - Evolution en % de l'infiltration annuelle sur l'aquifère (INF) et du ruissellement annuel en surface pour les sept modèles climatiques avec le scénario A1B, entre le temps présent et le futur proche (FP).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 22- Carte de situation des six stations hydrométriques pour lesquelles on présente les débits moyens mensuels interannuels simulés à l'illustration 24. ....</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 23 Débits moyens mensuels interannuels simulés à trois stations hydrométriques pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN .....</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 24 - Débits moyens mensuels interannuels simulés à trois stations hydrométriques pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN .....</i>	<i>36</i>
<i>Illustration 25 - Evolution des débits moyens annuels simulés aux stations hydrométriques entre la période temps présent et la période 2046-2065 avec les sept projections climatiques. ....</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 26 - Evolution des débits minimaux mensuels de période de retour 5 ans simulés aux stations hydrométriques entre le temps présent et les périodes 2046-2065 avec les sept projections climatiques utilisant le scénario SRES A1B.....</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 27 - Evolution des débits maximaux journaliers de période de retour 10 ans simulés aux stations hydrométriques entre le temps présent et la période 2046-2065 avec les sept modèles climatiques utilisant le scénario SRES A1B.....</i>	<i>39</i>
<i>Illustration 28 - Evolution des niveaux piézométriques moyens simulés aux 190 piézomètres entre les périodes temps présent et 2046-2065 avec les sept modèles climatiques utilisant le scénario SRES A1B. ....</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 29 - Carte de situation des huit piézomètres pour lesquelles on présente les débits moyens mensuels interannuels simulés à l'illustration 30 et Illustration 31 .....</i>	<i>41</i>
<i>Illustration 30 Niveaux piézométriques moyens mensuels interannuels simulés pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN .....</i>	<i>42</i>
<i>Illustration 31 Niveaux piézométriques moyens mensuels interannuels simulés pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN .....</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 32 - Bilans de la recharge de l'aquifère pour les différents modèles climatiques en temps présent (en haut) et en futur proche (en bas) obtenus avec les différentes projections climatiques et paramètres hydrodynamiques testés. ....</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 33 - Evolution des différentes composantes de la recharge en futur proche (en haut) par rapport au temps présent, obtenues pour les différents modèles climatiques et paramètres hydrodynamiques testés. ....</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 34 : Principe de l'estimation des variations des prélèvements en nappe sur la période 2045- 2065 à partir des données du BIPE en 2070 et 2006.....</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 35 : Evolution du niveau piézométrique mensuel aux huit piézomètres présentés Illustration 29 en temps présent (vert), sous changement climatique (bleu foncé), et sous changement climatique avec évolution des prélèvements selon les scénarios 1 (bleu clair) et 2 (rouge) du BIPE.....</i>	<i>50</i>

# 1. INTRODUCTION : LA PLAINE D'ALSACE

L'aquifère alluvial du Rhin Supérieur, entre Bâle au Sud et Karlsruhe au Nord, représente une réserve très importante d'eau souterraine, de l'ordre de 45 milliards de m<sup>3</sup> (Illustration 1).



**Illustration 1** Relief de la zone d'étude et coupe géologique Est-Ouest simplifiée

Cette ressource se trouve dans un milieu très perméable, et ne bénéficiant pas, sur la majorité de sa surface, d'une couverture perméable la protégeant des pollutions de surface. De plus le fonctionnement de cet aquifère est fortement couplé à celui du réseau hydrographique. Les rivières débouchant dans la plaine depuis les bassins versants montagneux infiltrent des

volumes d'eau importants vers la nappe, et dans la plaine elle-même des échanges surface-souterrain ont lieu dans les deux sens. Pour ces raisons les ressources en eau souterraine sont particulièrement vulnérables aux pollutions d'origine anthropique. De plus la forte dépendance de l'alimentation vis-à-vis du régime des cours d'eau en fait une ressource vulnérable vis-à-vis de possibles changements climatiques.

La description de l'application du Rhin s'appuie sur les travaux et rapports réalisés dans le cadre du projet ANR VULNAR et de la thèse de Charlotte Thierion qui s'est déroulée dans le cadre de ce projet. Les résultats sont discutés notamment dans l'article de Thierion et al., 2012.

## 2. DEVELOPPEMENT DE L'APPLICATION HYDROGEOLOGIQUE SUR LA PLAINE D'ALSACE

### 2.1. PRINCIPE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE MODCOU

Le logiciel MODCOU (Ledoux et al, 1989) permet de simuler de façon couplée les écoulements de surface et en nappes. Ce modèle utilise la méthode des différences finies sur des mailles carrées emboîtées pour la résolution des équations régissant les écoulements souterrains en milieu poreux..

#### 2.1.1. MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE

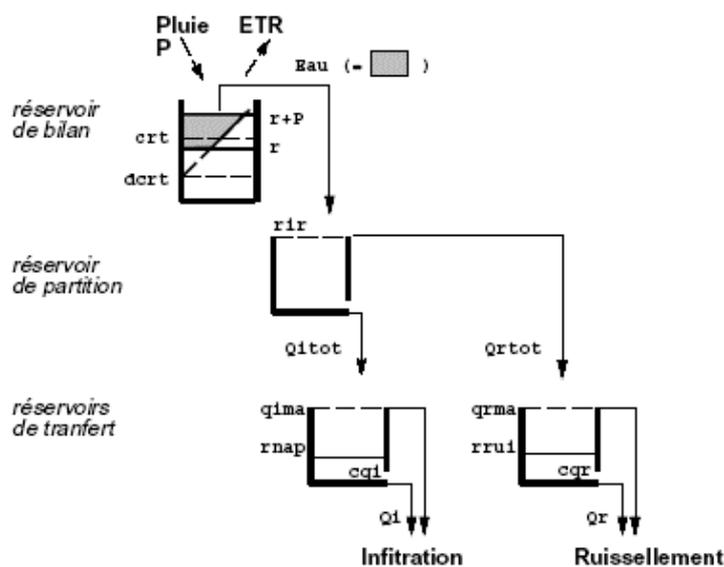


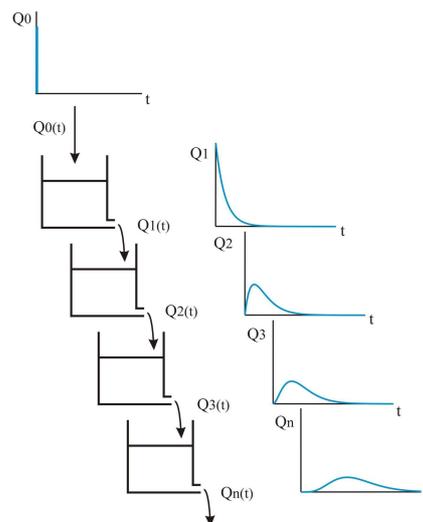
Illustration 2 : Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs.

Le bilan hydrique est estimé à partir d'un module conceptuel à réservoirs dénommé fonctions

de production (Illustration 2). Chaque unité de calcul reçoit une certaine quantité d'eau déduite des données météorologiques (précipitations et ETP) à chaque pas de temps (journalier). Cette lame d'eau disponible au sol est répartie entre une lame d'eau évapotranspirée et une lame d'eau disponible pour l'écoulement. Cette dernière est elle-même répartie entre infiltration et ruissellement, dans le réservoir de partition, schématisant les écoulements hortonien : les sols possèdent une certaine capacité d'infiltration qui lorsqu'elle est dépassée donne lieu à du ruissellement de surface.

### 2.1.2. TRANSFERT DES LAMES D'EAU INFILTREES DANS LA ZONE NON SATURÉE

L'infiltration peut atteindre directement la nappe lorsque celle ci est proche de la surface. Autrement, il est nécessaire de prendre en compte les délais d'écoulement de l'infiltration vers la nappe. Pour cela, le module de transfert dans la zone non saturée est utilisé (c'est le cas notamment dans la partie Sud de la plaine d'Alsace). Ce module NONSAT représente les transferts dans la zone non saturée via une cascade de Nash qui introduit un retard à l'arrivée de ces lames d'eau dans la nappe (Illustration 3).



**Illustration 3: Principe du modèle en cascade de Nash.**

Ce modèle nécessite la définition de deux paramètres : le nombre de réservoirs  $N$ , qui est estimé en fonction de la profondeur de la nappe, et le temps de délai de ces réservoirs  $T$ , qui dépend de la nature lithologique de la zone non saturée.

Le débit en sortie du  $N$ ième réservoir au temps  $t$  résultant d'un débit d'infiltration  $dQ$  dans le premier réservoir au temps  $\tau$  inférieur à  $t$  est donné par la formule :

$$Q_N(t) = \frac{dQ(\tau)}{\tau * (N-1)!} * \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right) * \left(\frac{t-\tau}{T}\right)^{N-1}$$

### 2.1.3. TRANSFERT DES ECOULEMENTS VERS LES RIVIERES

Pour estimer le transfert des flux en surface vers la rivière, il est tout d'abord nécessaire de définir le réseau de drainage superficiel, qui est déterminé grâce aux pentes locales, c'est-à-dire grâce aux différences d'altitude entre mailles de surface voisines. Un réseau hydrographique est déduit de ce schéma de drainage.

Les lames d'eau ruisselées sont transférées au réseau hydrographique par isochronisme (Golaz et al., 1998) : chaque zone isochrone d'un sous bassin est caractérisée par le temps que met la lame d'eau ruisselée sur cette zone pour atteindre la maille rivière exutoire du sous-bassin.

La lame d'eau ruisselée arrivant à la maille de rivière  $i$  au temps  $t$  est donnée par la formule :

$$Qr_i(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left( \sum_{j=1}^{N_k} qr_j(t - kdt) \right)$$

Où  $K$  est le nombre de zones isochrone du sous-bassin,  $N_k$  le nombre de mailles de la zone isochrone  $k$ , et  $qr_j(t-kdt)$  la lame d'eau ruisselée sur la maille  $j$  au temps  $t-kdt$  avec  $dt$  le pas de temps de calcul.

#### **2.1.4. ECOULEMENTS EN RIVIERES**

Les écoulements en rivière sont estimés à partir d'un nouveau module de routage en rivière : RAPID (David et al., 2011) qui permet l'estimation des débits en tout point du réseau hydrographique. Le transfert par zones isochrones utilisé dans l'ancienne version est ainsi abandonné au profit d'un modèle calculant les volumes d'eau et les débits dans chaque tronçon de rivière en se basant sur la méthode classique de Muskingum (Cunge, 1969). Le volume  $V$  d'un tronçon en rivière  $j$  est ainsi calculé en fonction des débits entrants  $Q_{in}$  et des débits sortants  $Q_{out}$  de ce tronçon :

$$V(t) = k \times (x \times Q_{in}(t) + (1 - x) \times Q_{out}(t))$$

Avec  $k$  un paramètre représentant le temps de parcours du flux dans le tronçon et  $x$  un facteur d'atténuation du flux sortant. Un tronçon n'a pas uniquement des échanges d'eau avec l'amont et l'aval de la rivière. Des échanges avec son sous-bassin versant, avec la nappe et des échanges anthropiques forcés interviennent également. Ces flux extérieurs se combinent avec le flux amont pour former le débit entrant  $Q_{in}$ . Le volume d'eau calculé dans chaque maille rivière est donc différent de ce qui était effectué jusque-là dans l'ancienne version, et modifie en conséquences les échanges entre les rivières et les nappes.

#### **2.1.5. TRANSFERT DES ECOULEMENTS EN NAPPE**

Les écoulements en nappe modélisés sont purement horizontaux (hypothèse de Dupuit) et sont donc régis par l'équation de diffusivité

$$\text{div}(T \text{grad } h) = Q + S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Avec T la transmissivité du milieu poreux (m<sup>2</sup>/s), h la charge hydraulique (m), Q le débit surfacique prélevé (positif) ou injecté (négatif) (m/s) et S le coefficient d'emmagasinement (sans dimension).

Cette équation est valable pour les nappes captives, ainsi que pour les nappes libres lorsque la variabilité spatiale de la charge hydraulique n'est pas trop importante.

La résolution de cette équation par la méthode des différences finies consiste en une discrétisation de ses différents termes grâce à un découpage du domaine modélisé en mailles carrées.

Chaque maille du modèle possède des propriétés hydrodynamiques homogènes (T et S) et les valeurs de la fonction charge hydraulique (h) sont calculées en chacune de ces mailles.

L'équation discrétisée pour la maille i s'écrit :

$$T_N(H_N - H_i) + T_E(H_E - H_i) + T_S(H_S - H_i) + T_W(H_W - H_i) = Q_i + a^2 S_i \frac{\partial H_i}{\partial t}$$

Avec TN, TE, TS et TW les transmissivités des mailles adjacentes à la maille i et situées respectivement au Nord, à l'Est, au Sud et à l'Ouest de celle-ci, HN, HE, HS et HW les cotes piézométriques dans ces mailles adjacentes, Hi la cote piézométrique dans la maille i, Qi le débit surfacique entrant ou sortant à la maille i, Si le coefficient d'emmagasinement de la maille i et a la longueur du côté de la maille i.

La résolution de cette équation discrétisée s'appuie sur la connaissance des conditions aux limites (débits ou potentiels imposés). On obtient alors la hauteur piézométrique en chaque maille du modèle.

### **2.1.6. ECHANGES ENTRE LE DOMAINE DE SURFACE ET LE DOMAINE SOUTERRAIN**

Les échanges entre la surface et le souterrain ont lieu d'une part au niveau de toutes les mailles de surface connectées à une maille souterraine sous-jacente grâce au transfert des lames d'eau infiltrées de la surface vers le souterrain et au débordement des nappes en surface, et d'autre part au niveau des mailles rivières par la prise en compte des échanges nappe-rivière.

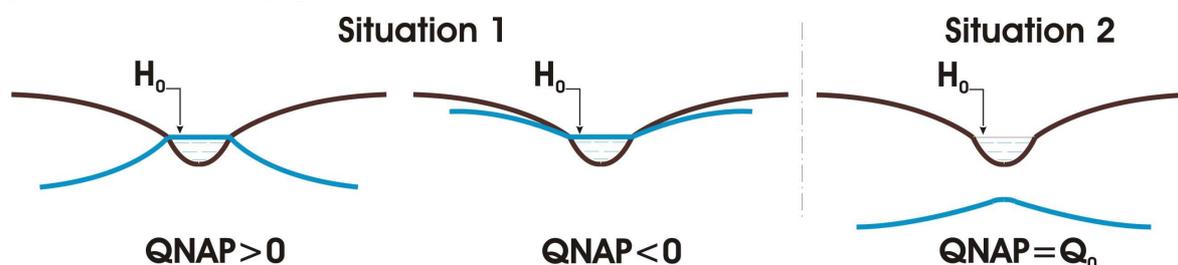
Ces échanges nappe-rivière peuvent s'effectuer dans les deux sens. Dans le cas où la nappe et la rivière sont connectées hydrauliquement, le débit passant de l'une à l'autre est :

$$Q = \max(T_p * (H - H_0), Q_{riv}, Q_{lim})$$

Avec H la cote piézométrique dans la nappe, H0 le niveau de l'eau dans la rivière, et Tp le coefficient de transfert nappe-rivière dépendant de la nature et de l'état du lit. Lorsque la nappe est alimentée par la rivière (H < H0), le débit est alors négatif, et limité à la fois par le

débit disponible en rivière ( $Q_{riv}$ ) estimé par RAPID, et le débit limite associé à la conductivité hydraulique du lit ( $Q_{lim}$ ).

Dans le cas où la nappe et la rivière sont déconnectées hydrauliquement (niveau de la nappe inférieur à la cote du fond du lit de la rivière), le débit s'infiltrant dans le lit de la rivière est égal au débit limite  $Q_0$  pouvant s'infiltrer (Illustration 4).



**Illustration 4:** Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.

Lorsque la nappe alimente la rivière, le débit échangé est limité par la capacité d'infiltration du lit de la rivière, ainsi que par le volume d'eau disponible dans la maille rivière.

Les volumes échangés sont également conditionnés par le niveau de la rivière qui est cependant considéré comme constant sur l'ensemble des rivières, ce qui constitue une approximation certainement très limitante.

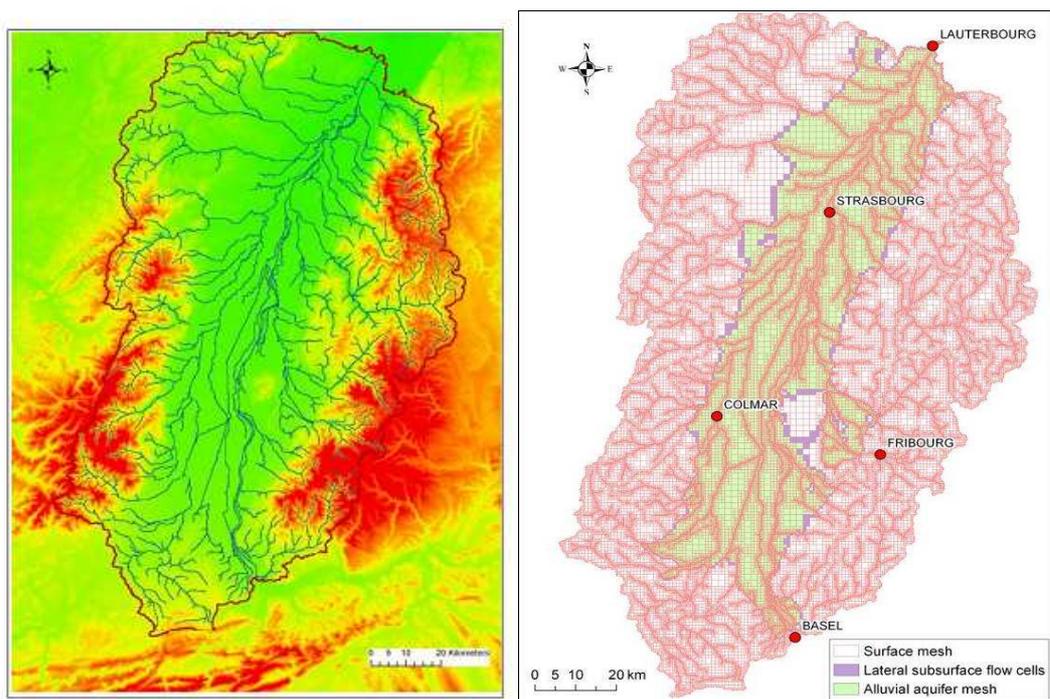
Un effort particulier a été mené pour prendre en compte les variations des hauteurs d'eau du Rhin. A défaut d'avoir pu utiliser les données observées<sup>1</sup>, les hauteurs d'eau du Rhin issu du projet MONIT sont utilisées pour le temps présent. Un travail particulier a été mené pour être capable d'estimer les hauteurs du Rhin en fonction du débit pour pouvoir utiliser cette relation sous changement climatique (Thierion, 2011).

## **2.2. CONCEPTION DU MODELE POUR L'HYDROSYSTEME RHENAN**

Le réseau hydrographique a été travaillé avec le logiciel HYDRODEM du Cemagref de Lyon. Le bassin étant caractérisé par la présence de nombreux canaux, un travail particulier a été mené afin de reproduire un réseau d'écoulement compatible avec le réseau hydrographique Carthage. Le réseau hydrographique à 200m de résolution résultant ainsi que le maillage de surface sont présentés Illustration 5.

---

<sup>1</sup> Les observations sont acquises par EDF, mais, nous n'avons pas pu accéder à ces données

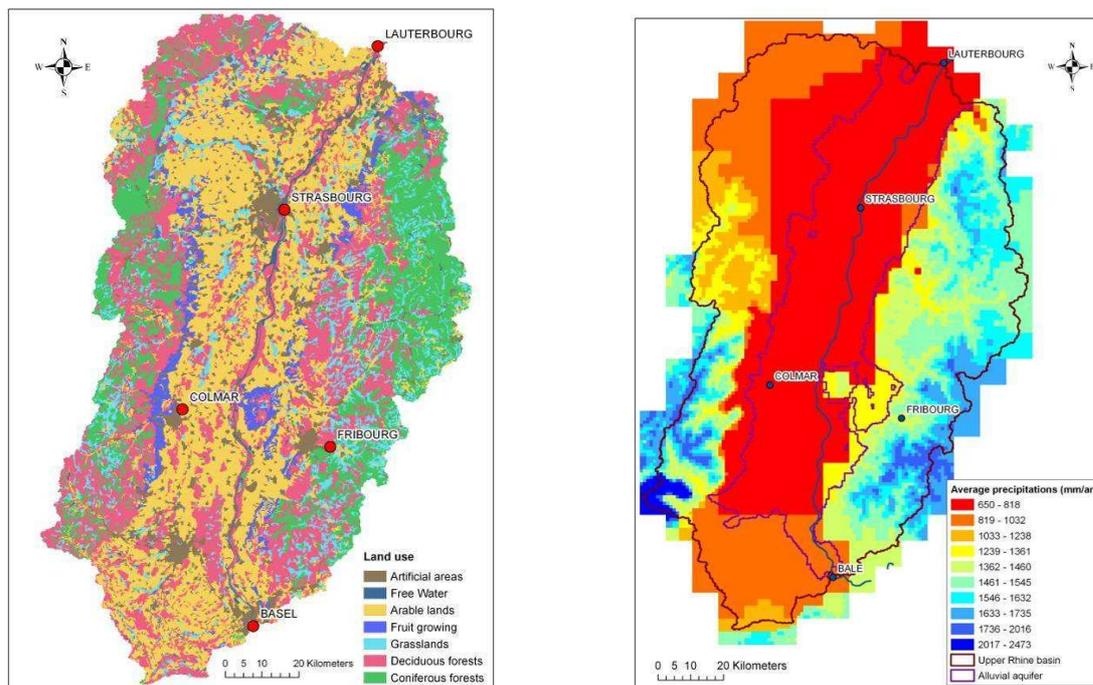


**Illustration 5** Réseau hydrographique et maillages de surface et souterrain utilisés

L'aquifère alluvial est considéré comme monocouche (en vert Illustration 5). Cet aquifère est alimenté par trois origines : 1/ par des écoulements sub-latéraux sur ces pourtours (mailles violettes), 2/ par les précipitations efficaces sur l'impluvium, qui est estimée à partir des fonctions de production de MODCOU, en fonction de l'occupation des sols et des caractéristiques météorologiques fournies par SAFRAN (Quintana Segui et al., 2008), et 3/ par les infiltrations des rivières estimées par MODCOU.

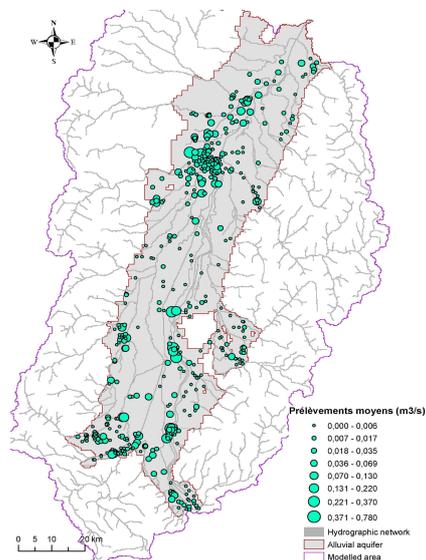
### 2.2.1. Occupation du sol et caractéristiques météorologiques

Le bassin est marqué par un contraste entre les zones montagneuses à l'Est et à l'Ouest et la plaine. Les montagnes sont très arrosées (plus de 2000mm/an), avec de fort gradient de précipitation avec l'altitude, et sont marquées par une forte composante nivale. Elles sont majoritairement couvertes de forêt. La plaine au centre est le siège la nappe alluviale, et bénéficie de conditions météorologiques beaucoup plus sèche (environ 600mm/an de précipitation). Elle est occupée majoritairement de cultures souvent irriguées. Sur les coteaux se situent les célèbres vignobles alsaciens (Illustration 6).



**Illustration 6 : Gauche : Occupation des sols et Droite : carte des précipitations annuelles sur le bassin estimés par SAFRAN sur une grille spatiale raffinée afin de prendre en compte les contrastes d'altitude**

### 2.2.2. Prélèvements anthropiques



**Illustration 7 Cartes des prélèvements exprimés en débits moyens annuels.**

Les prélèvements anthropiques d'origine industrielle, agricole ou AEP sont pris en compte dans le modèle. L'Illustration 7 montre l'emplacement des prélèvements et les débits moyens annuels associés. On constate que ces prélèvements sont plus nombreux autour des agglomérations. Ils représentent actuellement environ 500 millions de m<sup>3</sup>.

### 2.2.3. Conditions aux limites

La modélisation de la plaine alluviale du Rhin n'incluant pas l'ensemble du bassin versant du Rhin, il est nécessaire d'imposer des conditions aux limites amont et aval (Illustration 8). Les débits observés en amont du Rhin à Bâle sont imposés (environ 1040m<sup>3</sup>/s), ainsi que les débits des canaux d'irrigation (0.5 m<sup>3</sup>/s et 2m<sup>3</sup>/s). Pour la nappe, les charges hydrauliques sont imposées à partir des observations sur les limites Sud (quelques mailles) et Nord.(sur une douzaine de kilomètres). Enfin, sur les flancs Est et Ouest, la possibilité d'infiltrer les flux sublatéraux est prise en compte.

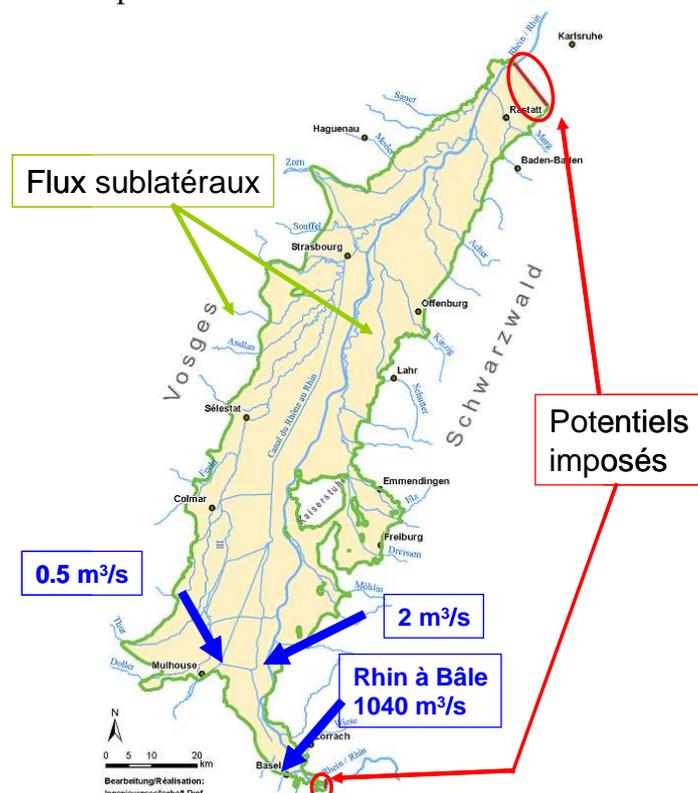
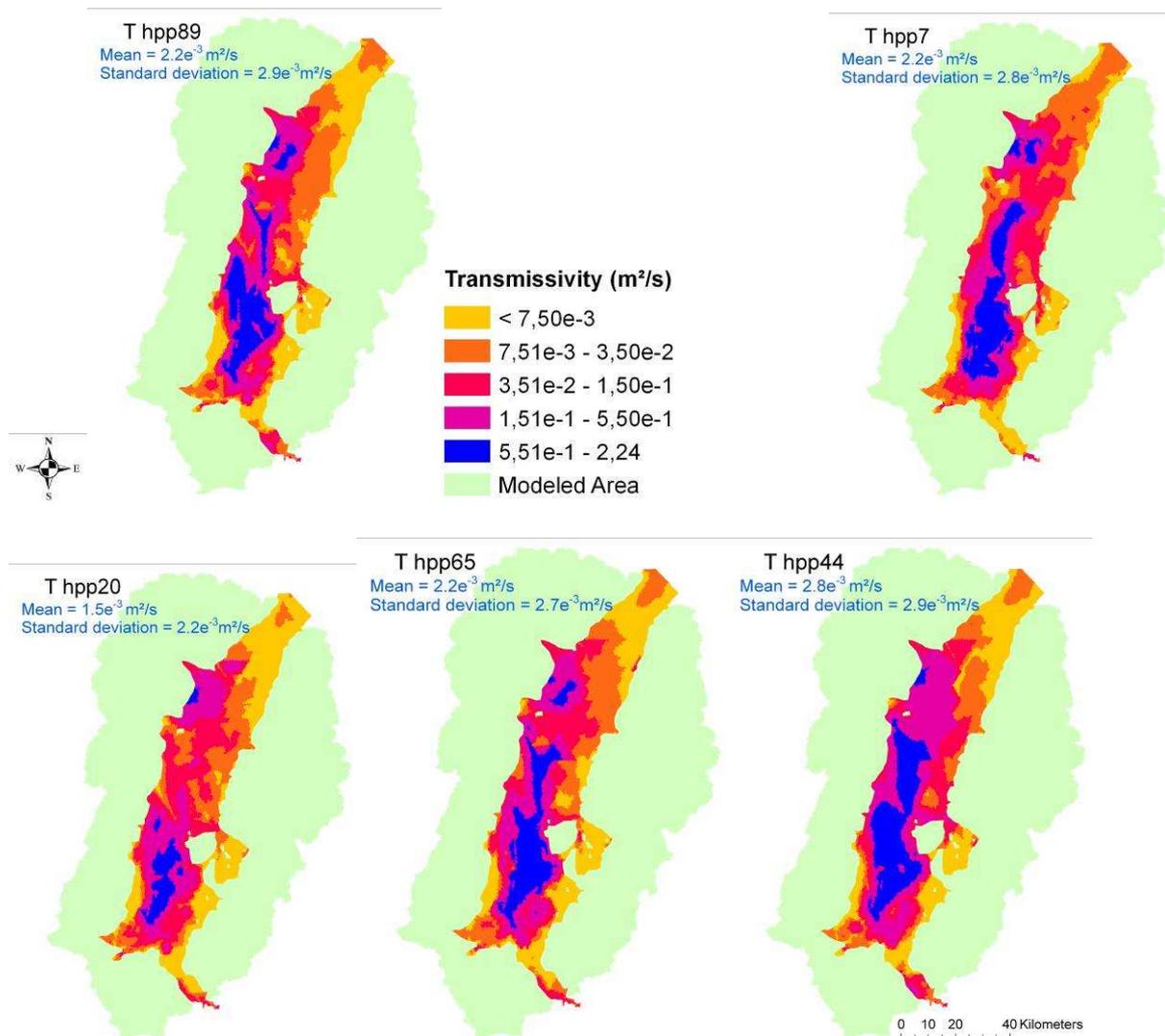


Illustration 8 : conditions aux limites utilisées dans le modèle

### 2.2.4. Paramètres du modèle hydrogéologique

Certains paramètres du modèle hydrogéologique ont pu être estimés par calage. Il s'agit essentiellement des paramètres des fonctions de production, pour le calcul du bilan hydrique. Ces paramètres ont été calés en se basant sur la comparaison des débits observés et simulés en zone de montagne, ie, sans interaction avec la nappe.

Dans la plaine alluviale, il est plus difficile de caler les paramètres, du fait de la très forte interaction entre la surface et la nappe. De ce fait, nous avons choisi de tester plusieurs jeux de paramètres possibles, ce qui nous permet d'estimer l'incertitude associée à la méconnaissance des paramètres hydrodynamiques. Ainsi, nous avons utilisé 5 jeux de transmissivité, qui ont été déterminés par le LHYGES via une méthode d'inversion des paramètres (Majdalani et Ackerer 2010, Illustration 9).



**Illustration 9 : Cartes des transmissivités inversées par le LHYGES utilisées dans cette étude**

Par ailleurs, nous avons utilisé plusieurs valeurs pour les paramètres décrivant les relations nappes-rivières. L'ensemble des simulations effectuées est résumé dans le tableau ci-dessous (Thierion et al. 2012).

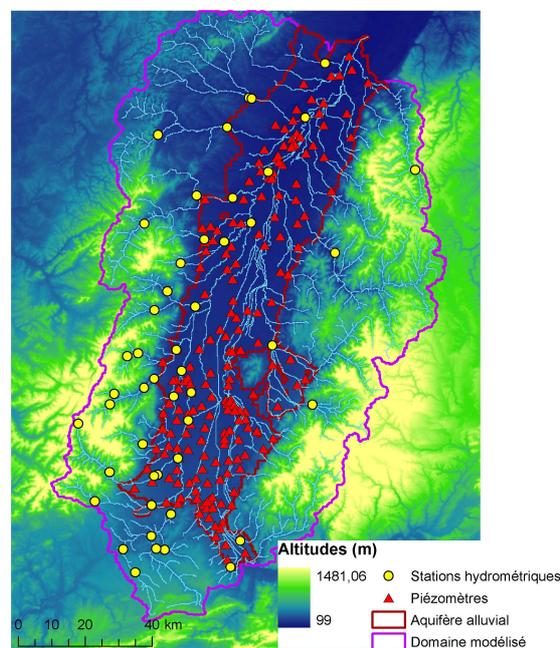
### **2.3. RESULTATS OBTENUS EN TEMPS PRESENT**

#### **2.3.1. Données hydrogéologiques disponibles**

Près de 200 postes piézométriques et une vingtaine de stations de mesures des débits sont disponibles sur l'ensemble du bassin franco-allemand de la nappe alluviale du Rhin

**Tableau 1 : Détails des paramètres utilisés dans les différentes simulations réalisées. La simulation notée SIM est réalisée en utilisant un flux d'infiltration comparable à celui estimée par SIM**

Nom de la simulation	Transmissivité	Débit maximal d'infiltration $Q_{lim}$	Coefficient de transfert nappe-rivière $T_p$	Simulation du flux d'infiltration par MODCOU ou SIM
Référence	Hpp7	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
T hpp20	Hpp20	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
T hpp44	Hpp44	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
T hpp65	Hpp65	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
T hpp89	Hpp89	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
$Q_{lim} = 0$	Hpp7	0 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
$Q_{lim} = -100$ L/s	Hpp7	-100 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
$Q_{lim} = -25$ L/s	Hpp7	-25 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
$T_p = 0.1$ m <sup>2</sup> /s	Hpp7	-50 L/s	0.1 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
$T_p = 0.5$ m <sup>2</sup> /s	Hpp7	-50 L/s	0.5 m <sup>2</sup> /s	MODCOU
SIM	Hpp7	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	SIM
Steady H & Q	Hpp7	-50 L/s	0.05 m <sup>2</sup> /s	MODCOU

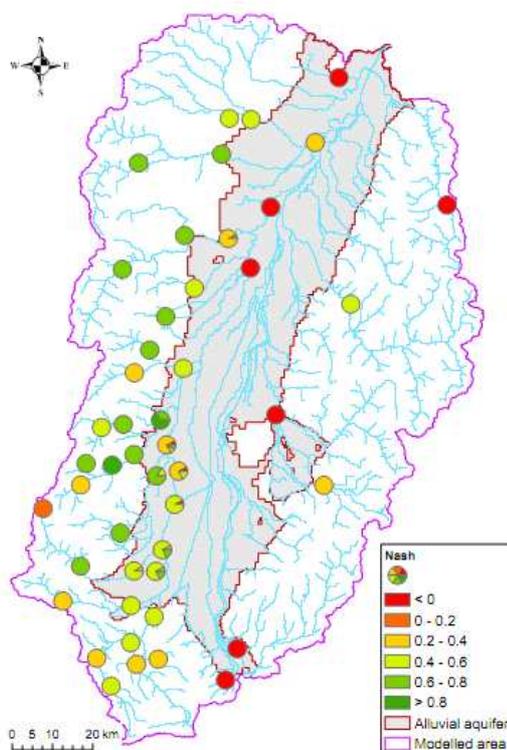


**Illustration 10 : Emplacement des stations de débits (points jaunes) et de piézométrie (triangles rouges) disponibles sur le bassin**

### 2.3.2. Evaluation des simulations en termes de débits

Pour illustrer la qualité de simulation des débits, on utilise le critère de Nash, estimé au pas de temps journalier. Le critère vaut 1 pour une simulation qui reproduit exactement les observations, et peut être négatif lorsque les débits simulés diffèrent fortement des observations. L'illustration 11 montre qu'il y a une meilleure adéquation sur les débits côtés français que côté allemand, ce qui s'explique en partie par la moindre qualité du forçage atmosphérique utilisé côté allemand.

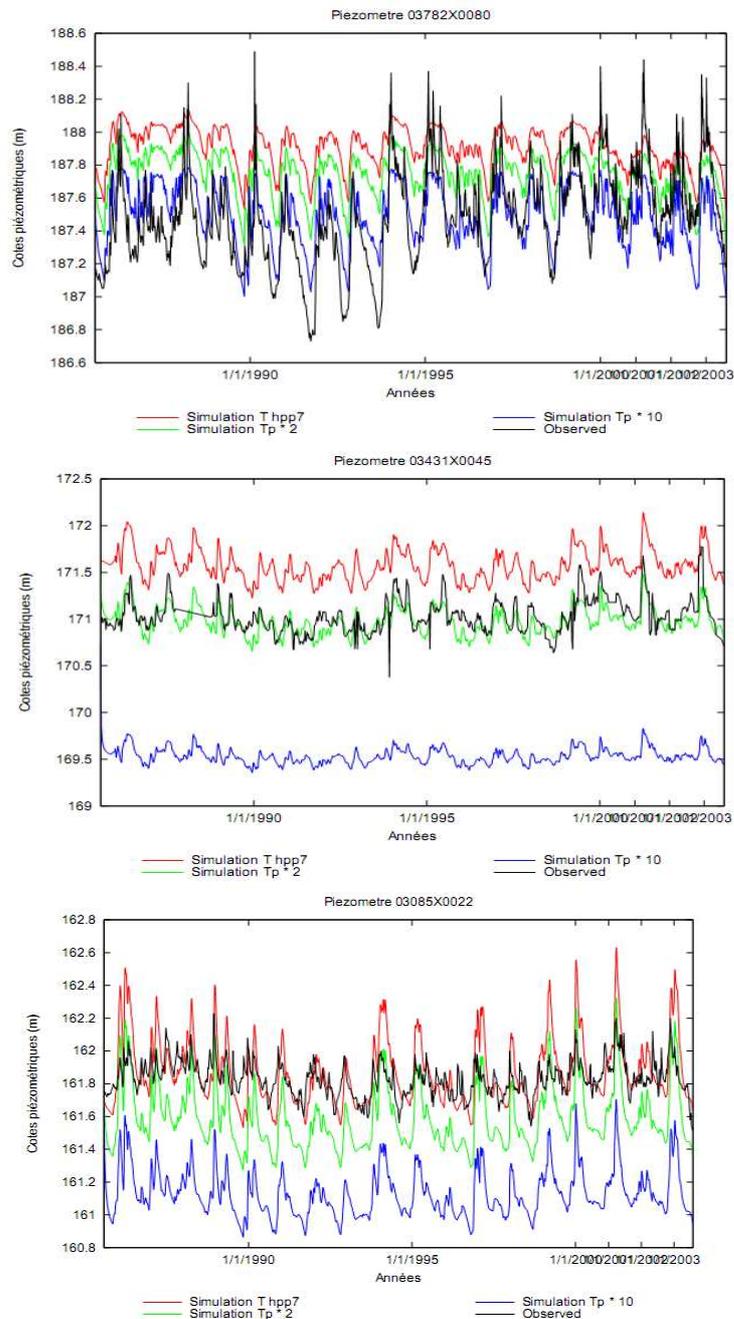
Par ailleurs, les fonctions de production ont été calées sur les stations de débits disponibles dans les zones montagneuses, afin de s'affranchir de l'influence de la nappe, et n'ont donc pas été calées sur la plaine. On retrouve un peu l'impact de ce choix avec une meilleure restitution des débits en montagne qu'en plaine.



**Illustration 11 :** *Distribution spatiale des critères de Nash calculés au pas de temps journalier pour les 12 simulations réalisées. Chaque symbole est un camembert représentant la valeur obtenue pour les 12 cas. Un critère de Nash proche de 1 indique de bons résultats alors que les valeurs inférieures à zéro sont de mauvaises qualités.*

### 2.3.3. Evaluation des simulations en termes de piézométrie

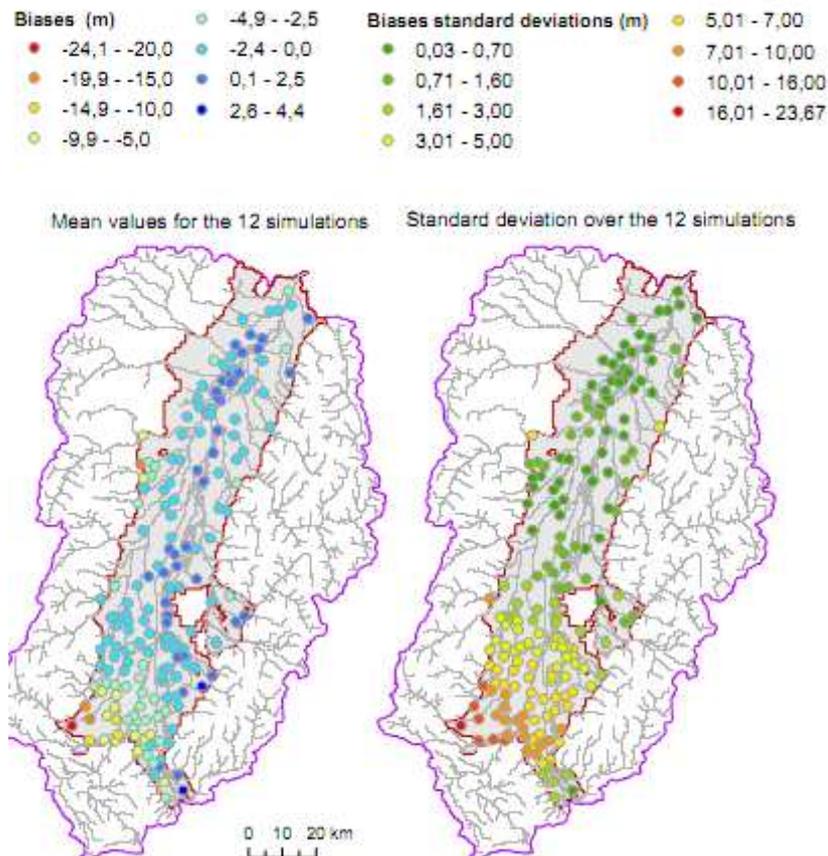
Afin d'illustrer la complexité de l'estimation des paramètres hydrodynamique, l'illustration 12 montre la comparaison sur 3 piézomètres entre les observations et 3 simulations différant uniquement par la valeur (constante dans l'espace) du coefficient d'échange nappe-rivière. On constate que chacun des 3 piézomètres est mieux représenté par une simulation différente.



**Illustration 12 : Comparaison entre les niveaux piézométriques observés et simulés au pas de temps journalier par trois simulations variant uniquement par la valeur du coefficient d'échange nappe-rivière ( $T_p$ ).**

Nous avons pu évaluer les simulations sur un total de 190 piézomètres sélectionnés sur le bassin. L'illustration 13 présente la carte des résultats obtenus en termes de comparaison entre les niveaux piézométriques simulés et observés (le pas de temps varie en fonction de la période et peut atteindre des valeurs journalières). On constate que les biais sont relativement faibles sur l'ensemble de la nappe à l'exception d'une région près du Sud. Cette région est

caractérisée par des pratiques d'irrigation alimentée soit par la nappe soit par des canaux. Cette irrigation influence le niveau phréatique soit par infiltration de l'eau irriguée, soit par une perte directement dans les canaux. Une information plus précise sur la gestion de l'irrigation serait nécessaire pour améliorer les résultats dans cette région.

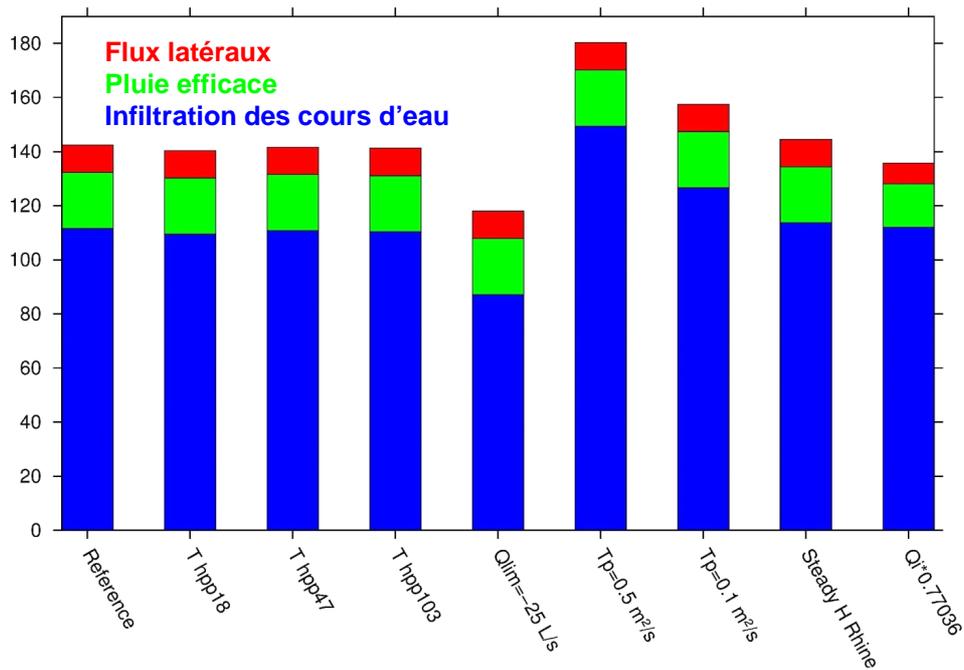


**Illustration 13 :** Distribution spatiale du biais moyen entre les niveaux piézométriques simulées et observés et de l'écart type entre simulation

#### 2.3.4. Etude de sensibilité et analyse du bilan hydrique

Afin de vérifier la pertinence des différents jeux de paramètres, nous avons utilisé une méthode statistique évoluée, la méthode de Karhunen Loeve (Longuevergne et al., 2007, Thierion et al., 2012). Nous avons pu ainsi mettre en évidence le rôle de l'irrigation (discuté ci-dessus), et déterminer que 3 des 12 simulations étaient moins réalistes que les autres.

Le bilan hydrique peut alors être estimé en prenant en compte de l'incertitude sur la caractérisation des paramètres (Illustration 14). On en déduit que l'infiltration des rivières correspond à  $115 \pm 16$  m<sup>3</sup>/s, soit une incertitude de 14%, et que cela correspond à 80% de la recharge totale de la nappe.



**Illustration 14** Répartition de la recharge de la nappe entre écoulement de sub-surface (en rouge), précipitations efficace (en vert) et infiltration des rivières (en bleu)

### **3. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PLAINE ALLUVIAL DU RHIN**

L'application de la modélisation hydrogéologique pour l'étude des impacts possibles du changement climatique dans le bassin du Rhin supérieur vise à estimer quelles peuvent être les modifications à venir dans le fonctionnement de l'hydrosystème compte tenu des évolutions projetées des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle, ainsi que de l'enneigement sur les massifs montagneux.

#### **3.1. ETAT DES CONNAISSANCE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DU RHIN**

Les impacts hydrologiques des changements climatiques sont étudiés depuis plusieurs années, à l'aide des sorties de modèles climatiques. Ces impacts concernent aussi bien les eaux de surface que les eaux souterraines en contact avec la surface de façon directe ou indirecte. Les incertitudes associées aux résultats de ce type d'étude sont grandes en raison de l'accumulation des incertitudes dans la chaîne de modélisation, depuis les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, jusqu'aux simulations utilisant les modèles hydrogéologiques régionaux.

Avant de nous intéresser aux études des impacts du changement climatique sur l'hydrologie du bassin du Rhin déjà réalisées, nous allons résumer les principales modifications du climat projetées par les modèles climatiques.

### **3.1.1. EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES VARIABLES METEOROLOGIQUES DANS LE BASSIN DU RHIN SUPERIEUR**

Les impacts du changement climatique tels que prévus par les modèles climatiques globaux utilisés dans le cadre du quatrième rapport d'évaluation du GIEC ont été analysés par Boé (2007), en terme de modifications des températures et des précipitations saisonnières entre les périodes 1961- 1990 et 2045-2065.

Concernant les températures, des augmentations sont prévues pour toute l'Europe et pour toutes les saisons. Elles sont particulièrement marquées pour les mois de décembre-janvier-février (environ 4 °C), en particulier pour la zone qui nous intéresse dans cette étude. Une bonne cohérence dans les signes des modifications entre les différents modèles climatiques est trouvée pour cette variable. Ces évolutions sur les températures auront un impact négatif sur l'enneigement et un impact positif sur l'évapotranspiration potentielle.

Les résultats pour les précipitations sont moins clairs, avec une moins bonne cohérence de signe entre les différents modèles. Pour toutes les saisons, une augmentation des précipitations est prévue sur le Nord de l'Europe et une diminution sur le Sud, mais la localisation de la limite varie selon les saisons. Le bassin du Rhin supérieur se retrouve alors le plus souvent dans la zone d'incertitude entre augmentation et réduction. Cependant, une augmentation pour les mois de décembre-janvier-février et une diminution pour juin-juillet-août apparaît clairement. Dans les deux cas la variation est de l'ordre de 10 à 20 %. Ces analyses concernent l'évolution des variables météorologiques à grande échelle et peuvent bien sûr masquer des évolutions contrastées à plus fine échelle, qui dépendent des caractéristiques climatiques régionales.

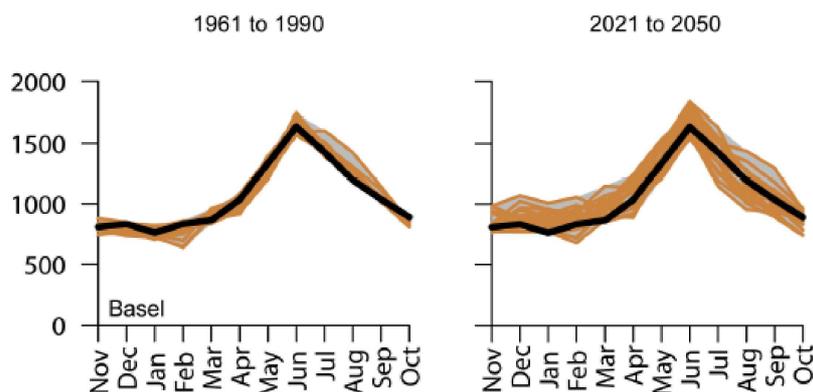
### **3.1.2. ETUDES DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'HYDROLOGIE DU RHIN**

Sous l'impulsion de la Commission Internationale pour l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR) (Grabs et al., 1997), plusieurs études sur l'impact du changement climatique dans le bassin international du Rhin ont déjà été menées (Kwadijk, 1993; Middelkoop et al., 2001; Shabalova et al., 2003; Menzel et al., 2006; Lenderink et al., 2007), complétées récemment par le projet Rheinblick 2050 (Görgen et al., 2010).

Middelkoop et al. (2001) ont utilisé un modèle hydrologique global (RHINEFLOW) pour le bassin du Rhin, et des modèles plus détaillés pour des sous-bassins représentatifs des différentes régions alimentant les débits du Rhin. Shabalova et al. (2003) ont repris le modèle RHINE- FLOW mais en utilisant des forçages climatiques différents, régionalisés par une méthode plus fine. Les conclusions sont cependant les mêmes, avec une augmentation des débits du Rhin en hiver, en lien avec une augmentation des précipitations et de la fonte précoce des neiges, et une diminution des débits en été liée à un plus faible stockage neigeux, et à une augmentation de l'évapotranspiration. Des résultats similaires sont obtenus par Lenderink et al. (2007). Menzel et al. (2006) ont utilisé le modèle hydrologique HBV sur 23 sous-bassins du Rhin en Allemagne pour estimer les impacts du changement climatique. Ils en déduisent une augmentation du débit annuel moyen du Rhin, mais dans cette étude les fortes incertitudes qui subsistent tout au long de la chaîne de modélisation sont mises en avant, et les résultats interprétés avec précaution. Middelkoop et al. (2001) soulignent également les conséquences socio-économiques des changements attendus sur le bassin du Rhin. En particulier la fréquence des crues pourrait augmenter, alors que les périodes d'étiage pourraient s'allonger, diminuant ainsi le nombre de jours dans l'année où le fleuve serait entièrement navigable.

Dans le cadre du projet Rheinblick2050 (Görge et al., 2010), une méthodologie multi-modèle a été utilisée pour estimer l'impact du changement climatique sur les débits dans le bassin du Rhin. Cette démarche permet de prendre en compte les incertitudes liées à la chaîne de modélisation. Plusieurs modèles hydrologiques ont ainsi été utilisés, parmi lesquels le modèle HBV (Lindström et al., 1997) et plusieurs modèles globaux. Les résultats obtenus en termes de débit à Bâle ont été réutilisés dans le travail présenté dans ce mémoire, comme conditions aux limites du modèle hydrogéologique. Une augmentation des débits moyens annuels est projetée pour le futur proche (2021-2050), ainsi que pour la période hivernale (novembre à avril, de 0 à 25 %). Dans les parties amont du bassin, sur le Rhin supérieur notamment, il y a un décalage temporel des plus hauts débits de juin à mai, et également des étiages, qui deviennent plus précoces et sont prolongés par rapport au temps présent.

L'illustration 15 montre les effets de ces changements sur les débits du Rhin à Bâle tels que simulés dans le projet Rheinblick2050. On voit sur l'ensemble des modèles utilisés un décalage dans le temps des plus hauts débits annuels qui deviennent plus précoces. Les débits augmentent en hiver et au printemps et diminuent en été et en automne pour la période 2071-2100.



**Illustration 15 - Débits mensuels moyens interannuels du Rhin à Bâle** Débits simulés par l'ensemble des modèles du projet Rheinblick2050 pour trois périodes (présent et futur proche) (d'après Görger et al. (2010)). La courbe noire représente les débits simulés par le modèle hydrologique forcé avec les observations temps présent.

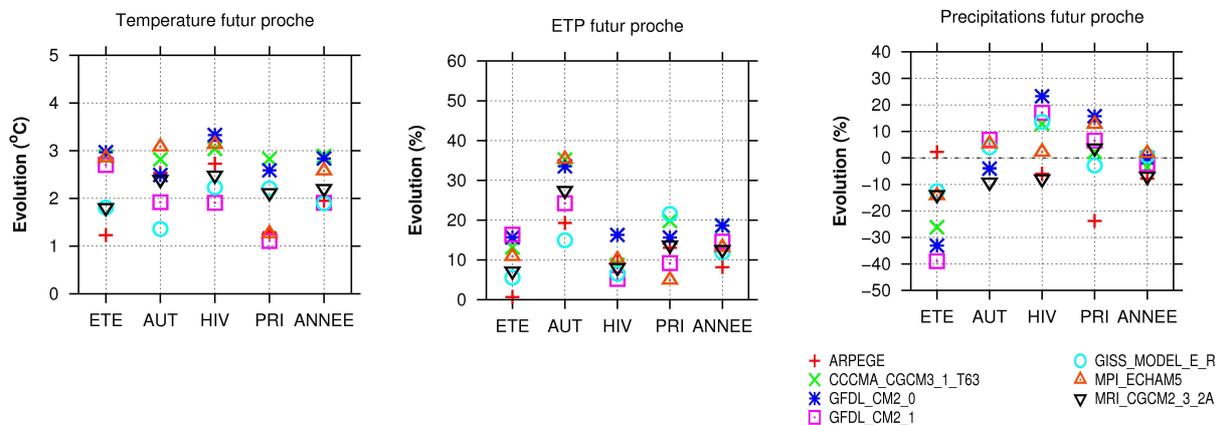
### **3.2. PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR LA PLAINE ALLUVIALE DU RHIN**

Dans le cadre du projet Explore 2070, on dispose de 7 projections climatiques sous scénario d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosol A1B désagrégées par la méthode DSCLIM. Pagé et al. (2010).

Le Tableau 2 présente une comparaison des précipitations, de l'évapotranspiration potentielle et des températures issues de SAFRAN avec celles obtenues par les sept projections climatiques utilisées, pour le temps présent. Les noms des six modèles sont abrégés dans le texte par commodité. Les précipitations SAFRAN sont légèrement surestimées par tous les modèles (de 1.7 à 3.5 %), à l'exception de GFDL0 et GFDL1. L'ETP et les températures sont surestimées par l'ensemble des modèles, de 2.8 à 4.5 % pour l'ETP et de 3 à 7 % pour les températures. L'évolution saisonnière est présentée Illustration 16 et l'évolution mensuelle est présentée Illustration 17. Pour la période 2046-2065, presque tous les modèles donnent une augmentation des précipitations hivernales, sauf deux modèles qui donnent des diminutions de l'ordre de 7 %. A l'échelle annuelle, certains modèles projettent des augmentations modérées des précipitations, de l'ordre de 1 à 2 %, tandis que la plupart donnent des baisses de 5 à 10 %.

**Tableau 2 Précipitations et évapotranspiration annuelles et températures moyennes issues de l'analyse SAFRAN et des sorties des six modèles climatiques discontinus pour le scénario SRES A1B, pour le temps présent. Les noms abrégés des modèles climatiques utilisés dans le texte sont indiqués.**

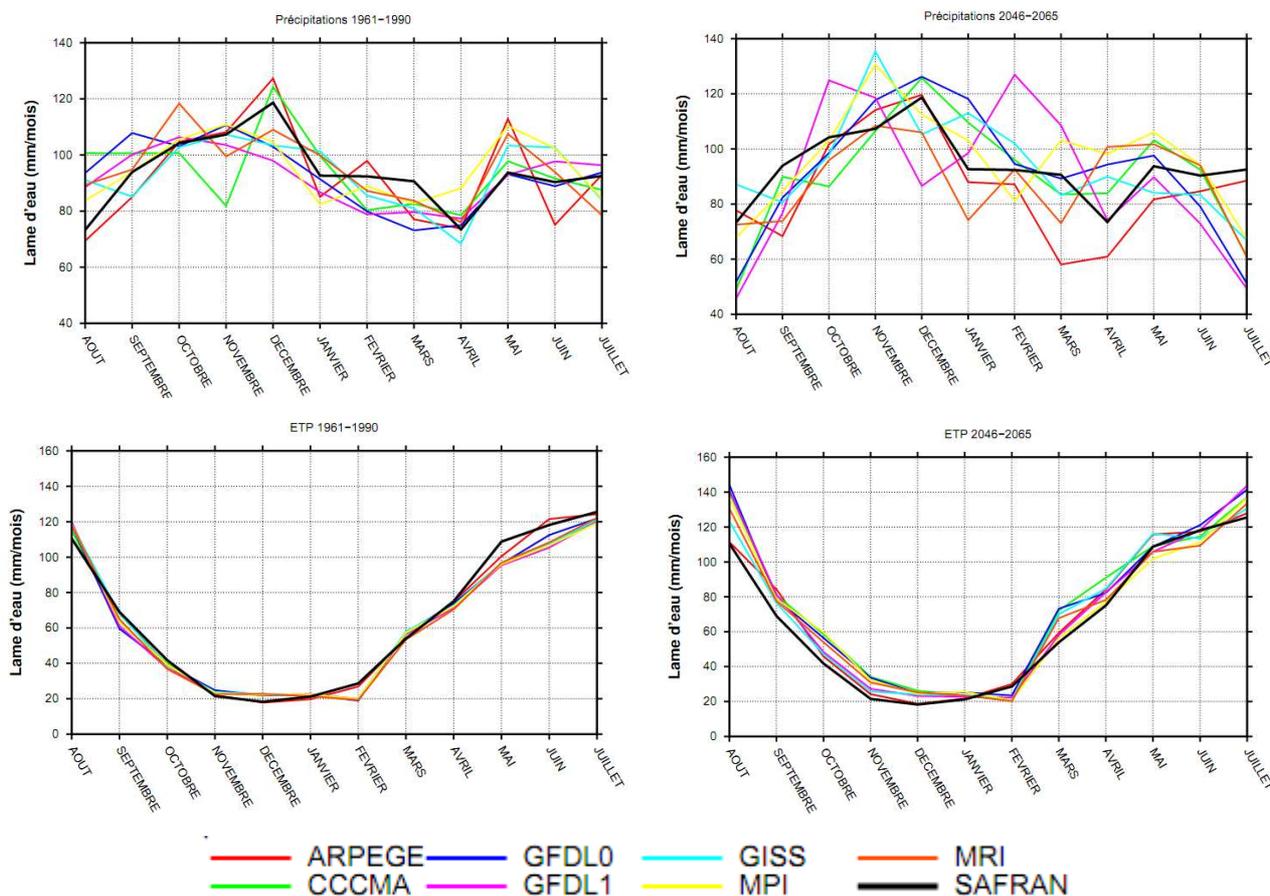
Projection	Nom abrégé	Précipitation (mm/an)	E'TP (mm/an)	Température (C°)
	SAFRAN	1073	745	8.95
ARPEGE	ARPEGE	1109	779	9.48
CCCMA_CGM3_1_T63	CCCMA	1126	756	9.24
GFDL_CM2_0	GFDL0	1113	766	9.58
GFDL_CM2_1	GFDL1	1106	755	9.30
GISS_MODEL_E_R	GISS	1116	769	9.47
MPI_ECHAM5	MPI	1138	760	9.22
MRI_CGCM2_3_2A	MRI	1138	757	9.48



**Illustration 16 - Evolution des températures moyennes, de l'évapotranspiration potentielle et des précipitations entre le temps présent et la période 2046-2065 d'après les résultats des sept modèles climatiques désagrégés. Les valeurs sont présentées pour quatre saisons : été (juin-juillet-août), automne (septembre-octobre- novembre), hiver (décembre-janvier-février) et printemps (mars-avril-mai), ainsi que pour l'année.**

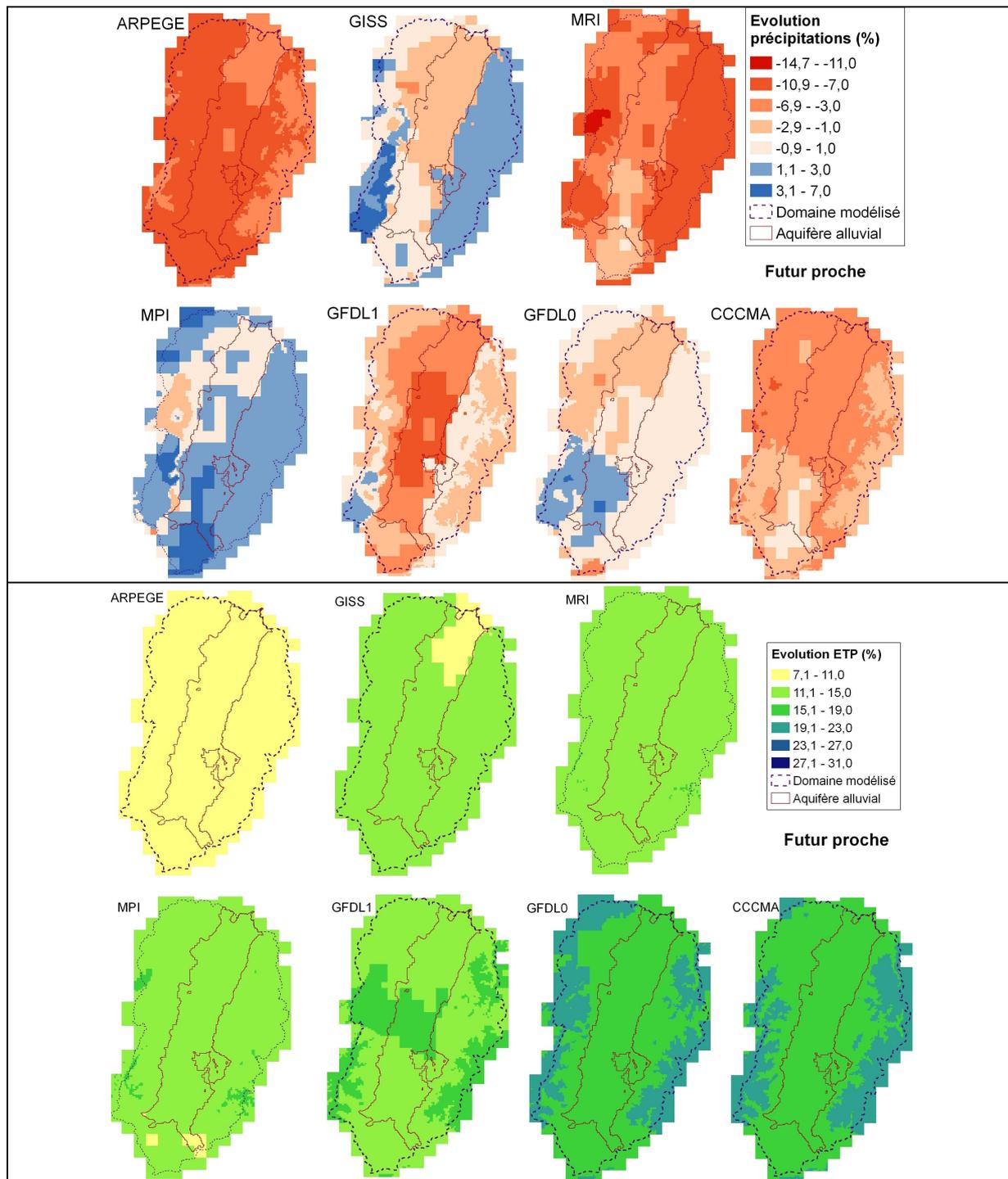
Concernant l'évolution de l'évapotranspiration potentielle, tous les modèles projettent une augmentation pour toutes les saisons. L'augmentation est particulièrement marquée en automne, où elle atteint 35 %. Pour l'été et l'hiver, l'augmentation de l'E'TP s'échelonne entre 5 et 20 % en fonction des modèles. Cette augmentation est un peu plus forte en automne. Le modèle ARPEGE se démarque particulièrement en simulant une diminution des précipitations

printanières de -20 % en futur proche.



**Illustration 17** Evolution mensuelle des précipitations (en haut) et de l'ETP (en bas) sur le temps présent (à gauche) et dans le futur (à droite)

L'illustration 18 permet d'appréhender la distribution spatiale des évolutions annuelles de précipitations et d'ETP sur le domaine modélisé des sept projections climatiques désagrégés. Les évolutions sont contrastées entre ces modèles. ARPEGE et MRI donnent sur la période 2046-2065 des diminutions des précipitations annuelles plus importantes sur les massifs montagneux que dans la plaine. Le modèle GISS indique une augmentation des précipitations en montagne, et une diminution dans la plaine. GFDL1 simule une diminution plus importante en plaine qu'en montagne, avec une légère augmentation au Sud des Vosges, alors que le modèle MPI indique une augmentation presque partout, plus marquée dans la partie Sud que dans la partie Nord du domaine. GFDL0 indique plutôt une diminution au Nord et une augmentation au Sud, ainsi que sur les sommets de la Forêt Noire. CCCMA projette une diminution partout, mais plus marquée au Nord qu'au Sud ou sur les sommets de la Forêt Noire



**Illustration 18 - Cartes des évolutions des précipitations annuelles(en haut) et de l'ETP (en bas) entre la période 1961-2000 (temps présent) et la période 2046-2065 pour les sept modèles climatiques utilisant le scénario SRES A1B, après désagrégation.**

Concernant l'ETP, tous les modèles projettent une augmentation plus forte sur les montagnes que sur la plaine. Le modèle ARPEGE se distingue par une augmentation plus modérée

En conclusion, l'ensemble des projections climatiques désagrégées conduisent globalement à

une baisse des précipitations annuelles, avec des évolutions contrastées pour les différentes saisons, plutôt une baisse importante en été, une augmentation marquée en hiver et plus faible au printemps. L'augmentation de l'ETP couplée à ces évolutions, particulièrement marquée en été, fait craindre des étiages plus sévères. Cependant le calcul de l'ETP dans ces projections est fait comme pour le temps présent, alors que les effets de l'augmentation de CO<sub>2</sub> sur les plantes pourraient conduire à une modification du calcul de l'ETP en fonction des variables météorologiques dans le futur.

La hausse des températures a pour conséquence de réduire de façon importante le stockage des précipitations hivernales sous forme de neige, ce qui pourrait aller dans le sens de crues de plus grande intensité en cette saison. Ceci est renforcé par le fait que les modèles projettent en général des diminutions moins importantes, voire des augmentations pour certains, des précipitations sur les massifs montagneux, qui représentent déjà aujourd'hui deux à trois fois les valeurs des précipitations en plaine. L'application du modèle hydrogéologique couplé MODCOU doit nous permettre d'évaluer plus précisément quelles évolutions peuvent être attendues pour les variables hydrologiques de l'hydrosystème du fossé rhénan supérieur. Pour ce faire, on doit cependant renseigner certaines conditions aux limites, dont l'évolution future n'est pas connue, mais peut seulement être estimée à travers d'autres modèles.

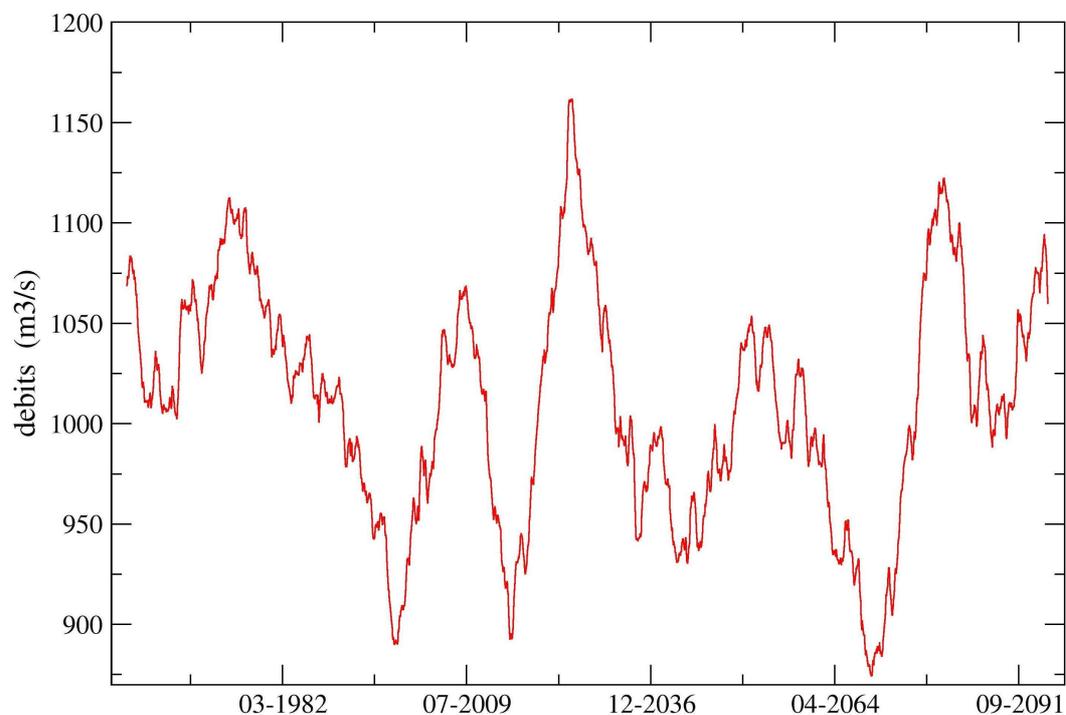
### **3.3. IMPACTS HYDROGEOLOGIQUES SIMULES PAR MODCOU**

On présente ici la façon dont ont été menées les simulations hydrogéologiques couplées avec MODCOU sous changement climatique. Ces simulations se basent sur l'utilisation des paramétrisations testées en temps présent et dont les performances ont été évaluées section 2.3 par comparaison avec des données piézométriques et hydrométriques mesurées. Certaines conditions à la limite doivent cependant être imposées en entrée de MODCOU, et en l'absence de données observées on se base sur les sorties d'autres modélisations, par exemple pour les débits du Rhin à l'entrée de la plaine alluviale.

#### **3.3.1. PRISE EN COMPTE DE L'EVOLUTION DES DEBITS DU RHIN A BALE**

Les débits du Rhin à Bâle utilisés pour cette étude de l'impact du changement climatique sont issus du projet Rheinblick2050. Ils ont été fournis par l'Institut Fédéral d'Hydrologie allemand (BfG) qui a mené, dans le cadre de ce projet, des simulations avec le modèle hydrologique HBV (Lindström et al., 1997). HBV est un modèle conceptuel semi-distribué qui simule le bassin versant du Rhin grâce à un découpage en sous-bassins versants. Dans le cadre de Rheinblick2050 il a été calibré au pas de temps journalier, avec des données météorologiques et hydrométriques observées en temps présent (Görgen et al., 2010).

Les résultats issus de HBV en termes de débits du Rhin à Bâle nous ont été fournis par le BfG pour trois modèles climatiques distincts. Les valeurs journalières des débits diffèrent grandement entre ces trois simulations. Pour cette raison nous avons choisi de ne conserver que les résultats de la simulation utilisant le modèle climatique ECHAM, qui donnait la plus longue chronique de débits simulés, de 1954 à 2100. Dans le cadre de Rheinblick2050, la désagrégation des sorties des modèles climatiques a été faite par une méthode dynamique, utilisant des modèles climatiques régionaux et une correction des biais (Görgen et al., 2010). Dans le cas de la simulation que nous avons utilisée, le modèle régional employé est le modèle REMO. L'illustration 19 présente les débits du Rhin à Bâle simulés par le modèle HBV forcé par les sorties climatiques de ECHAM-REMO, en moyenne glissante sur dix années. Aucune tendance claire n'apparaît d'ici la fin du 21ème siècle, à l'exception de la période allant de 2035 à 2075 environ, au cours de laquelle les débits moyens sont relativement plus faibles que pour les autres périodes de cette durée.



**Illustration 19 - Moyennes glissantes sur dix années des débits journaliers du Rhin à Bâle simulés par le modèle HBV forcé par les projections climatiques ECHAM-REMO.**

Ces débits simulés à Bâle ont en fait été imposés dans MODCOU au niveau du barrage de Kembs, à la séparation entre le Vieux Rhin et le Grand Canal d'Alsace, afin de prendre en compte la répartition des débits entre ces deux branches du Rhin. Ceci constitue une inexactitude qui peut avoir une influence sur le comportement de la nappe près du Rhin dans la partie la plus amont de la plaine, mais il nous a néanmoins paru important de considérer des débits dans ces deux branches, ce qui n'était pas possible en imposant les débits à Bâle sans modifications importantes dans le code de MODCOU. Le barrage de Kembs se trouve à

environ 7 km en aval de Bâle sur le Rhin. Les principales différences de débits sont dues aux apports de la Wiese en rive droite dont le débit moyen est de l'ordre de 10 m<sup>3</sup>/s, et à la présence de la prise d'eau du canal de Huningue en rive gauche, qui soustrait environ 10 m<sup>3</sup>/s aux débits du Rhin. Les interactions avec la nappe alluviale entre Bâle et Kembs peuvent également influencer les débits du Rhin, mais elles ne sont pas quantifiées et sont probablement négligeables comparées aux débits écoulés dans le Rhin.

### **3.3.2. CONDITIONS AUX LIMITES SOUS CHANGEMENT CLIMATIQUE**

#### *3.3.2.1. NIVEAUX IMPOSES ET PRELEVEMENTS*

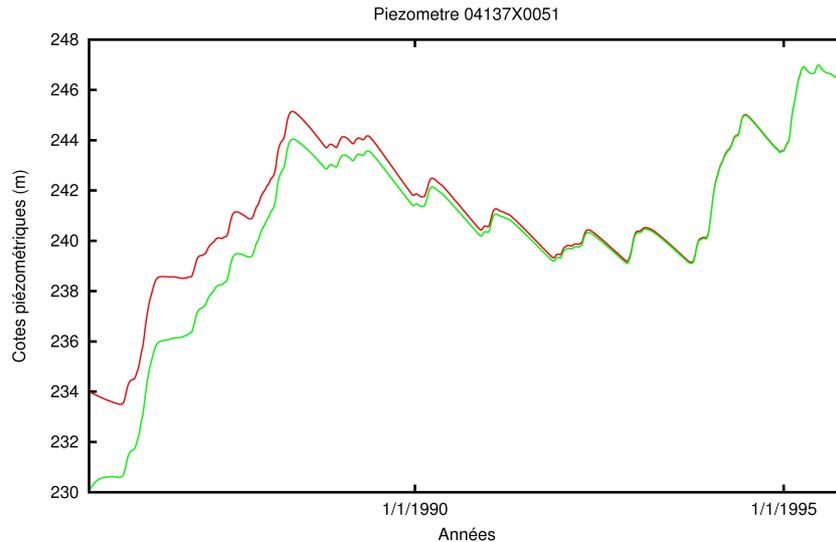
Au niveau des limites Nord et Sud de l'aquifère alluvial (cf Illustration 8), on a gardé les mêmes niveaux piézométriques imposés qu'en temps présent, car il est difficile d'anticiper l'évolution de ces niveaux avant toute simulation. Cependant, des tests de sensibilité ont été réalisés afin de quantifier l'impact de ces conditions sur les simulations. Cet impact n'est important qu'à proximité des limites (en particulier au Sud), et est négligeable sur les bilans.

Concernant les prélèvements industriels et pour l'alimentation en eau potable, on utilise tout d'abord les mêmes valeurs qu'à l'actuel. En conséquence on a conservé pour ces prélèvements les valeurs moyennes par mailles utilisées sur la période 1986-2002, et issues du projet Monit.

De même, les débits imposés des canaux d'irrigation sont supposés inchangés dans le futur.

#### *3.3.2.2. INITIALISATION DES SIMULATIONS DISCONTINUES*

Les projections climatiques ne sont disponibles que sur des périodes discontinues (1961-2000 et 2046-2065). Lorsqu'on effectue des simulations hydrogéologiques en temps futur avec les sorties de ces modèles, il faut donc initialiser les niveaux piézométriques avec des valeurs probables pour la date de début de la période considérée. Ces valeurs peuvent éventuellement être assez différentes de la piézométrie mesurée en temps présent. Dans notre cas, des tests sur la piézométrie simulée en temps présent, effectués en utilisant plusieurs initialisations des niveaux, ont montré que pour tous les piézomètres simulés, quel que soit le niveau initial utilisé, dans une fourchette raisonnable autour des niveaux mesurés, les niveaux simulés obtenus étaient les mêmes au bout de 5 ans environ.



**Illustration 20 - Chroniques piézométriques simulées** en un point de la partie Sud de la plaine, avec des jeux de paramètres identiques mais des niveaux piézométriques initiaux différents.

Les piézomètres pour lesquels la durée nécessaire pour retrouver des niveaux simulés identiques est la plus longue se trouvent proches de la limite Sud de l'aquifère, là où la nappe est la plus profonde. En effet dans cette zone le temps de réponse de la nappe à une sollicitation provenant de la surface est allongé du fait du temps de transfert à travers la zone non saturée. Cependant même dans cette zone les niveaux simulés avec des niveaux initiaux différents sont très proches au bout de 5 ans, avec des différences de l'ordre du mètre (cf. Illustration 20). Afin d'initialiser les niveaux de la nappe alluviale pour le temps futur, on a donc utilisé des périodes d'initialisation d'une durée de 5 ans, au cours desquelles les forçages météorologiques sont pris identiques à ceux des cinq premières années de la période. On se place ainsi dans des conditions climatiques similaires à celles du début de la période.

### **3.3.3. AUTRES EVOLUTIONS ENVIRONNEMENTALES**

Dans l'étude d'impact du changement climatique conduite ici, nous n'avons évalué que les impacts de modifications dans les variables météorologiques induites par l'évolution du climat. Les autres évolutions induites par cette évolution ne sont pas prises en compte ici, notamment les changements de végétation qui sont fortement susceptibles d'avoir lieu.

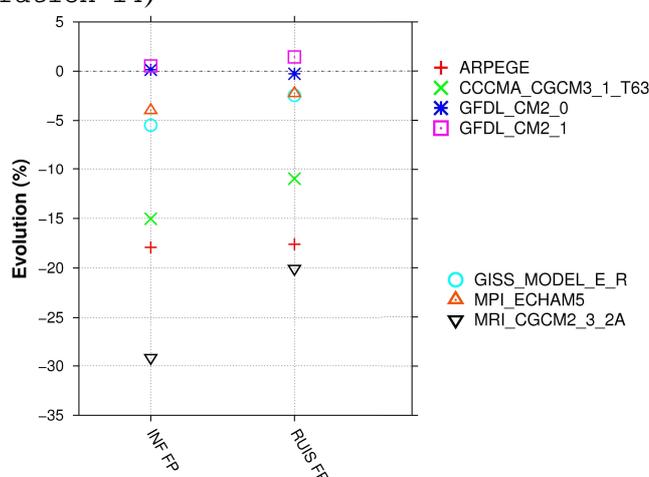
### **3.4. IMPACTS PROJETES SUR L'HYDROSYSTEME DU FOSSE RHENAN SUPERIEUR**

On présente dans cette partie les impacts simulés par la chaîne de modélisation modèle climatique-désagrégation statistique-modèle hydrogéologique sur différentes variables clés de

l'hydrosystème de surface et souterrain. Ces impacts sont présentés sous la forme d'une évolution entre le temps présent tel que simulé avec les modèles climatiques (période 1961-1990), et le temps futur 2046-2065. On adopte ici une approche multi-modèle pour ce qui est des modèles climatiques, ce qui nous permet d'appréhender l'incertitude sur ces évolutions et la variabilité des projections qui peuvent être faites. Les analyses des impacts hydrologiques sont faites de manière distribuée sur le bassin, et non pas seulement à son exutoire, car les écoulements à l'exutoire sont plus fortement influencés par le bassin amont du Rhin (haut Rhin et Rhin alpin), dont les débits sont ici imposés. Il existe de plus des contrastes spatiaux importants au sein du bassin, liés à sa topographie et à sa géologie, dont il est intéressant d'appréhender les évolutions différentielles.

### 3.4.1. IMPACTS SUR LES BILANS HYDRIQUES EN SURFACE

L'illustration 21 présente pour les sept modèles climatiques utilisés avec le scénario SRES A1B, l'évolution de l'infiltration vers l'aquifère et du ruissellement total en surface simulés par le module de bilan hydrique de MODCOU, entre le temps présent et les futurs proche. De manière générale une tendance à la baisse est simulée pour ces deux flux. On notera cependant encore une fois que l'infiltration des précipitations constitue une faible part de la recharge (cf Illustration 14)



**Illustration 21 - Evolution en % de l'infiltration annuelle sur l'aquifère (INF) et du ruissellement annuel en surface pour les sept modèles climatiques avec le scénario A1B, entre le temps présent et le futur proche (FP)**

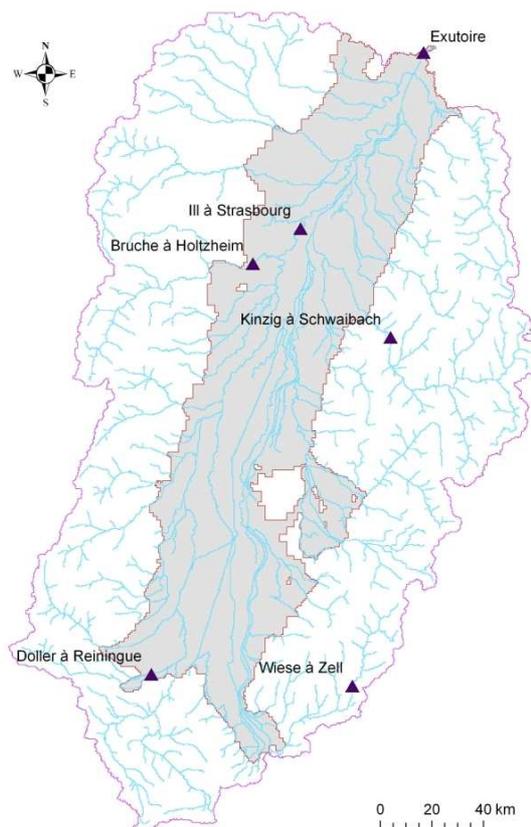
Les modèles GFDL0 et GFDL1 donnent des évolutions quasiment nulles de l'infiltration et du ruissellement, malgré une augmentation marquée de l'ETP et une légère diminution des précipitations. Ceci est peut être lié à la saisonnalité de l'évolution des précipitations qui augmentent au printemps et en hiver, alors que la part de la neige dans ces précipitations hivernales diminue et que les stocks de neige sont moins durables avec l'augmentation des températures

Le modèle ARPEGE simule des évolutions marquées de l'infiltration et du ruissellement en futur proche, en lien avec une diminution des précipitations à toutes les saisons. Le modèle GISS simule quant à lui des diminutions modérées de 5.5 et 2.5 % de l'infiltration et du ruissellement. Le modèle MRI projette des évolutions marquées des deux variables en futur proche en particulier pour l'infiltration qui diminue de 30 %, en lien avec une diminution marquée des précipitations.

### **3.4.2. IMPACTS SUR LES DEBITS DES COURS D'EAU**

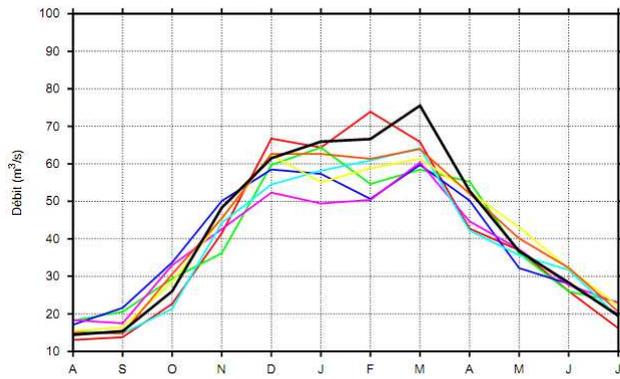
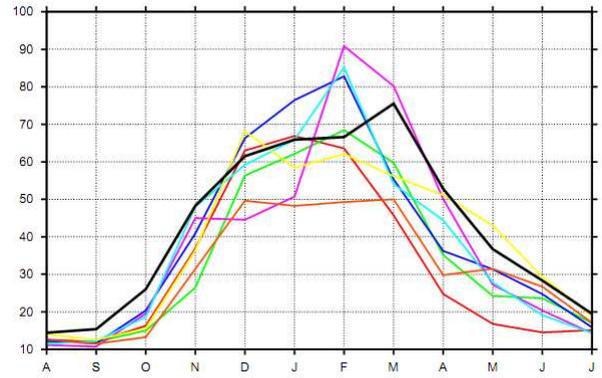
#### **3.4.2.1. DEBITS MOYENS**

L'illustration 23 et illustration 24 présentent les débits moyens mensuels interannuels simulés pour les périodes temps présent et l'horizon 2046-2065 à six stations hydrométriques, dont la répartition spatiale est présentée sur la carte de l'illustration 22.

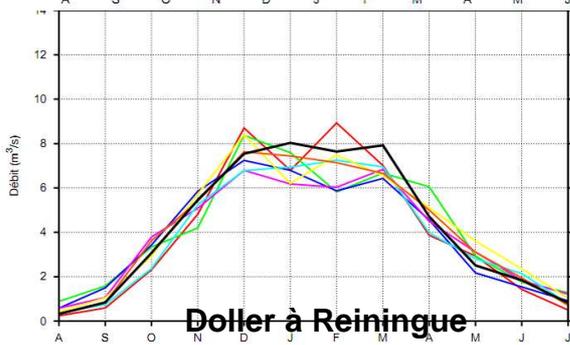
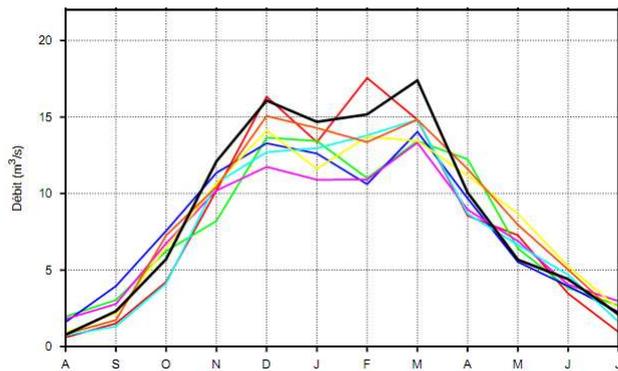
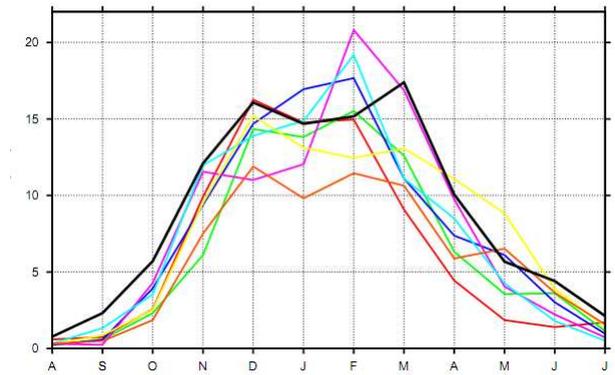


**Illustration 22-** Carte de situation des six stations hydrométriques pour lesquelles on présente les débits moyens mensuels interannuels simulés à l'illustration 24.

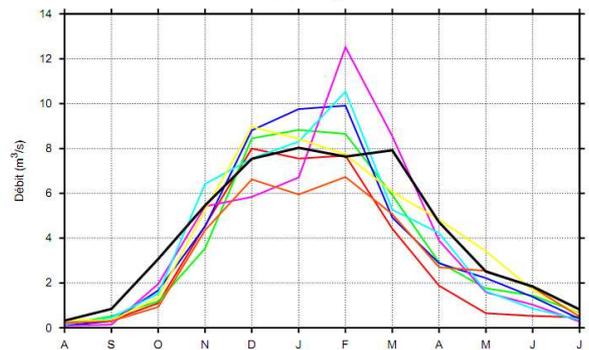
### III à Strasbourg



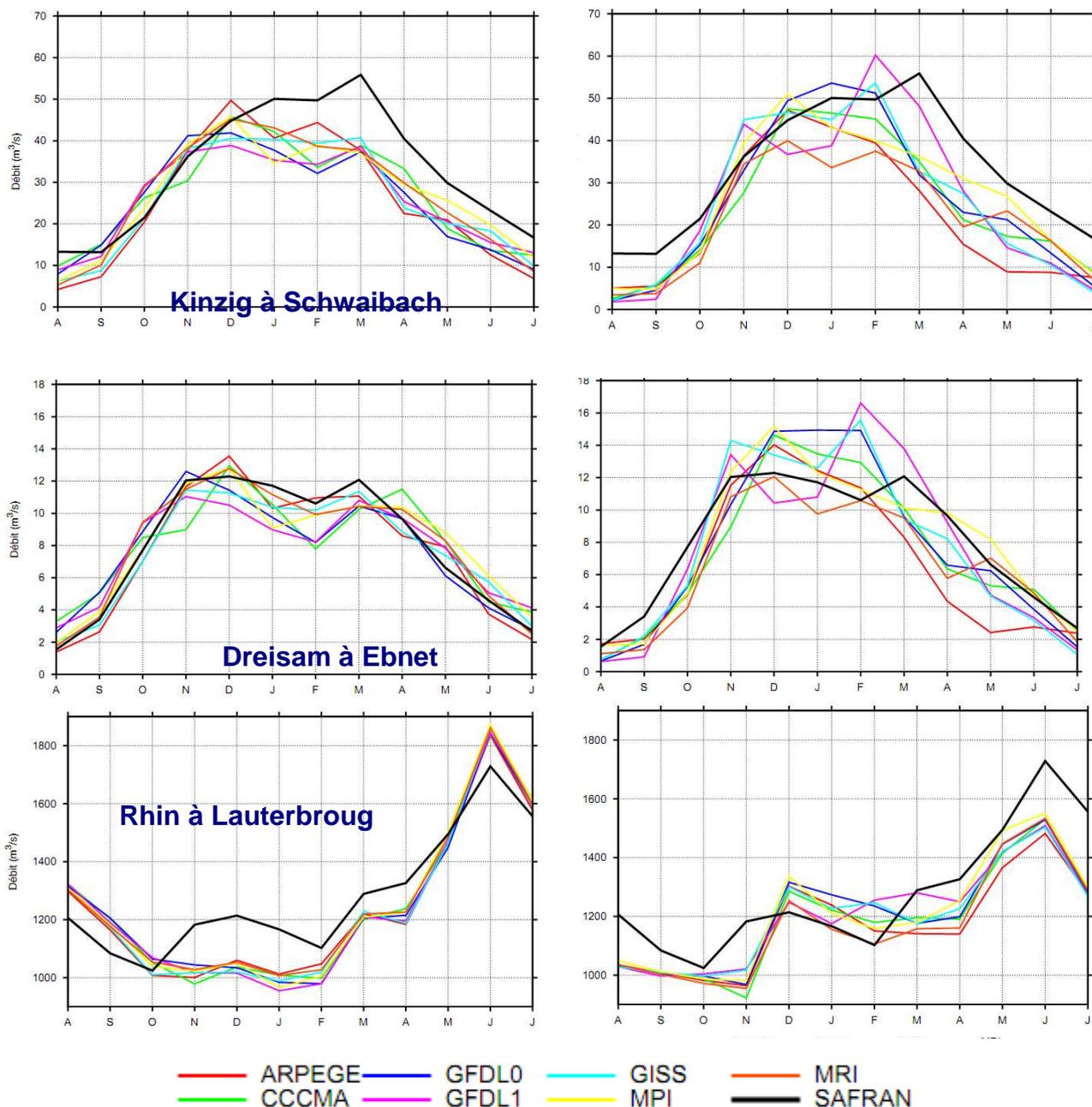
## Bruche à Holtzheim



## Doller à Reiningue



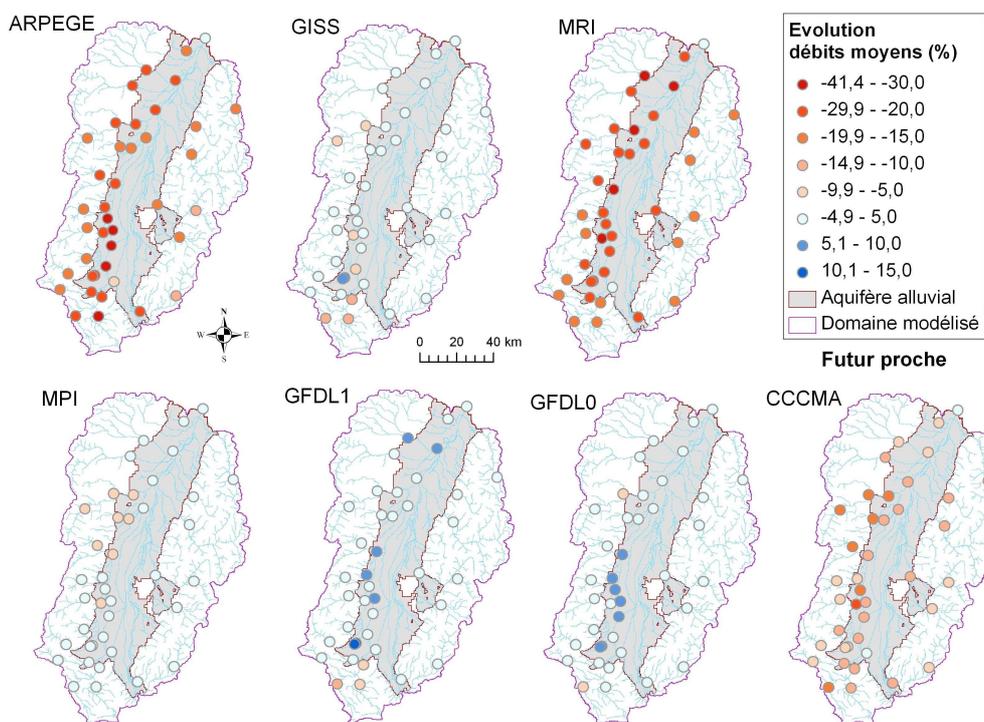
**Illustration 23 Débits moyens mensuels interannuels simulés à trois stations hydrométriques pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN**



**Illustration 24 - Débits moyens mensuels interannuels simulés à trois stations hydrométriques pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN**

On présente à la fois les sept projections climatiques sur le présent et pour la période 2046-2065. Pour les cinq stations situées à l'intérieur du bassin, on observe un changement dans la saisonnalité des débits, avec une concentration des plus forts débits sur les mois de janvier et février, et une augmentation des débits mensuels maximum. A l'exutoire, l'évolution par rapport au temps présent des moyennes multi-modèles des débits du Rhin est très marquée, avec une forte augmentation des débits hivernaux et une diminution importante des débits

estivaux pour lesquels on obtient des valeurs identiques à celles de la période hivernale. On voit que l'incertitude liée au modèle climatique utilisé pour la simulation du bassin du Rhin Supérieur est faible, ce qui montre que l'évolution des débits du Rhin à Lauterbourg est surtout déterminée par les évolutions sur son bassin en amont de Bâle.



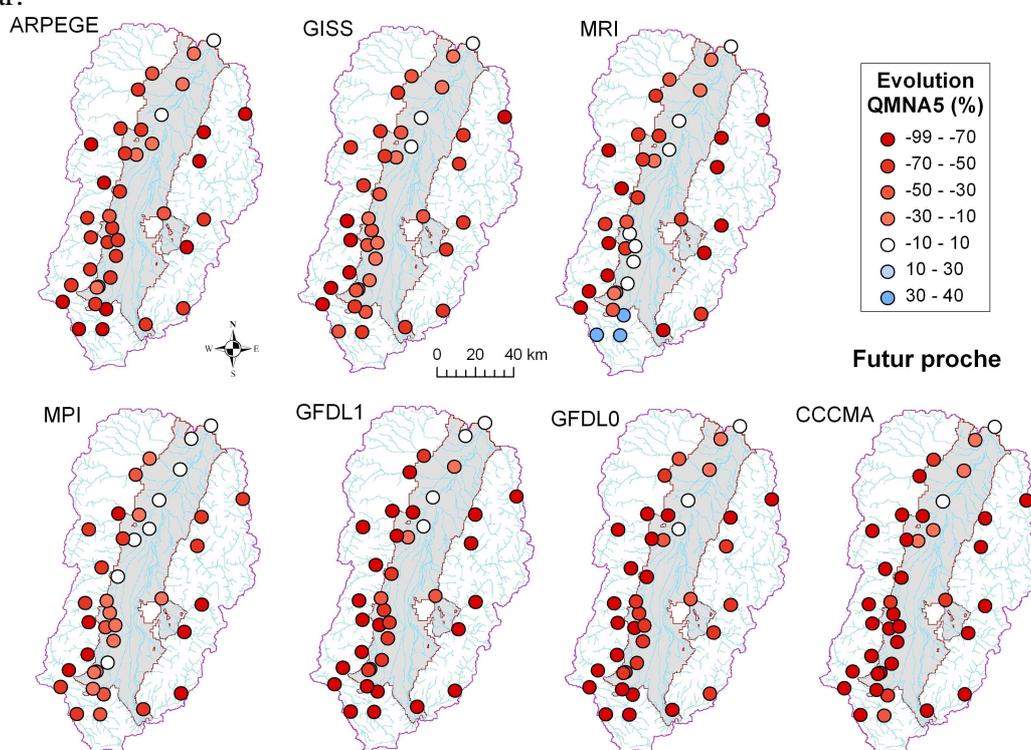
**Illustration 25 - Evolution des débits moyens annuels simulés aux stations hydrométriques entre la période temps présent et la période 2046-2065 avec les sept projections climatiques**

L'illustration 25 présente les cartes d'évolution des débits en 2046-2065 par rapport au temps présent pour les 7 projections climatiques. Les résultats sont contrastées entre les sept modèles : sur la période 2046-2065 les modèles GFDL0, GFDL1 et GISS simulent des augmentations des débits à certaines stations de la plaine et des bassins montagneux, et des diminutions modérées pour les autres stations. Le modèle MPI projette des diminutions modérées, inférieures à 10 % à toutes les stations, sauf dans le Sundgau où il y a quelques faibles augmentations. Le modèle CCCMA projette des diminutions un peu plus marquées, jusqu'à -22 % environ et les modèles ARPEGE et MRI donnent les diminutions les plus fortes, jusqu'à -35 % dans la plaine. Pour ARPEGE les plus fortes diminutions se trouvent plutôt dans la partie Sud tandis que pour MRI elles se situent plutôt dans la partie Nord.

#### 3.4.2.2. DEBITS EXTREMES

On s'est également intéressé aux impacts simulés sur les faibles débits par l'intermédiaire du calcul du QMNA5, correspondant au débit mensuel minimal de période de retour 5 ans. L'évolution de ce débit nous permet d'avoir une idée sur les évolutions projetées concernant la sévérité des étiages sur les cours d'eau.

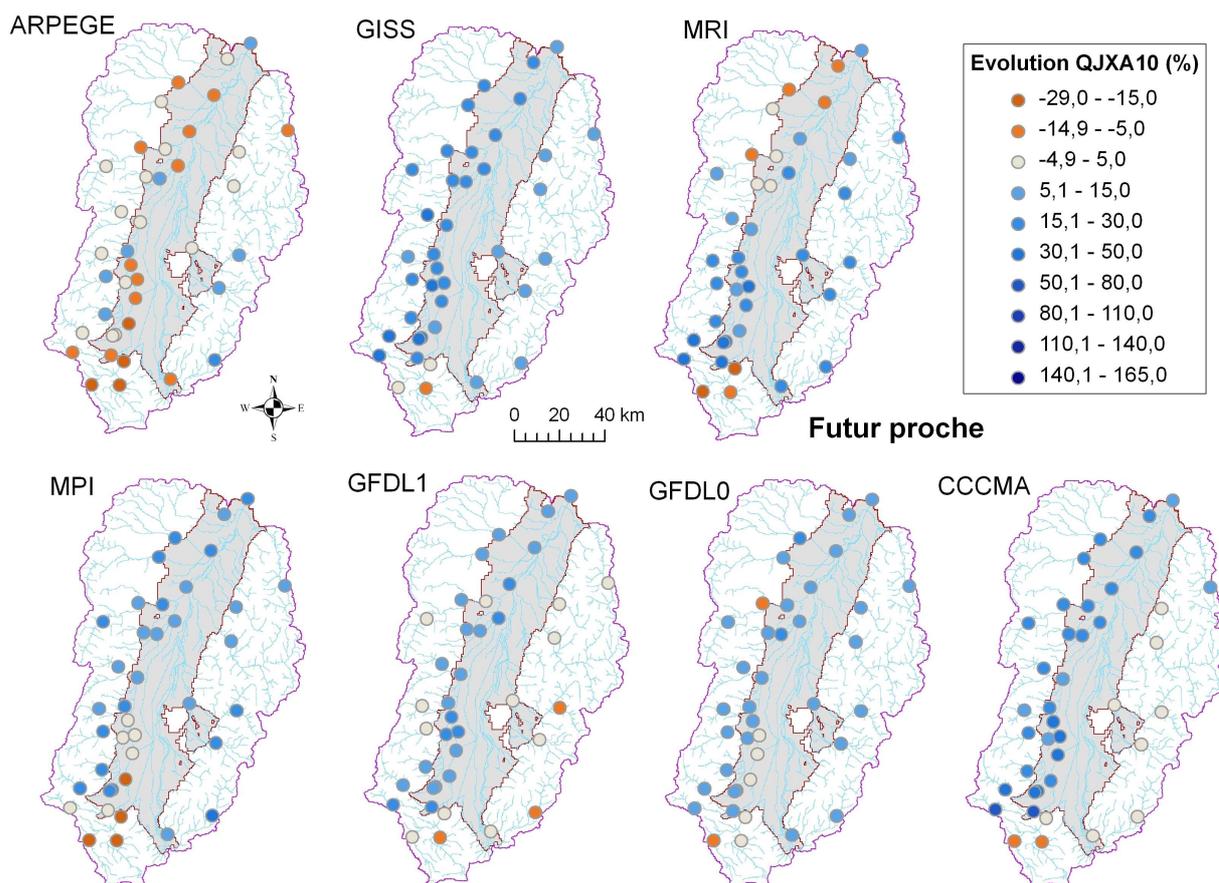
L'illustration 26 présente l'évolution des QMNA5 calculés aux stations hydrométriques entre les périodes temps présent et 2046-2065. Le QMNA5 montre une tendance marquée à la baisse, les diminutions les plus importantes ont lieu sur les bassins montagneux, mais aussi dans la plaine, en particulier dans les zones de forte infiltration des cours d'eau à l'actuel. Les baisses les plus modérées sont projetées dans la partie Nord de la plaine pour tous les modèles. Seule le modèle MRI projette des augmentations des QMNA5 assez importantes sur la Largue et l'Ill dans le Sundgau et des augmentations plus modérées pour l'Ill en amont de Colmar.



**Illustration 26 - Evolution des débits minimaux mensuels de période de retour 5 ans simulés aux stations hydrométriques entre le temps présent et les périodes 2046-2065 avec les sept projections climatiques utilisant le scénario SRES A1B.**

Les impacts sur les débits de crue sont estimés grâce au calcul des QJXA10, correspondant au débit journalier maximum de période de retour 10 ans. L'illustration 27 présente l'évolution des QJXA10 calculés aux stations hydrométriques entre le temps présent et la période 2046-2065. Globalement, ces débits augmentent pour la plupart des stations hydrométriques et la plupart des sept modèles climatiques de 15 à 30%. Le modèle ARPEGE

se distingue par des diminutions sur la plupart des stations plus marquées sur le Sundgau et le Sud de la plaine. Ceci peut être lié à la diminution des précipitations printanières et hivernales (cf. Illustration 16). Il faut cependant préciser que ces résultats sont donnés à titre indicatifs, et ne peuvent pas être vraiment représentatifs étant donné que les statistiques pour établir ces valeurs ont été calculées avec des séries de débits simulés courtes devant les périodes de retour considérées.

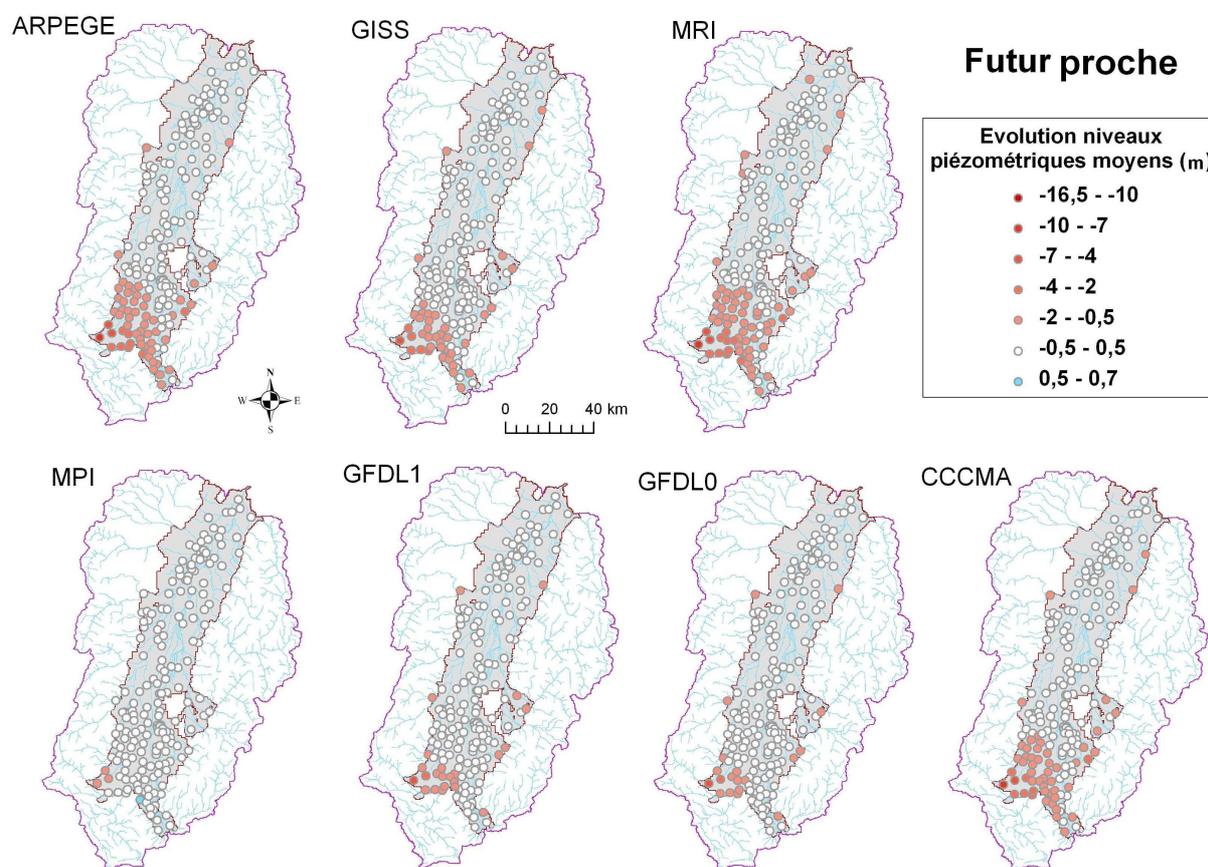


**Illustration 27 - Evolution des débits maximaux journaliers de période de retour 10 ans simulés aux stations hydrométriques entre le temps présent et la période 2046-2065 avec les sept modèles climatiques utilisant le scénario SRES A1B.**

### 3.4.3. IMPACTS SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

L'illustration 28 présente l'évolution du niveau piézométrique moyen aux 190 piézomètres simulés par rapport au temps présent (1961-2000), pour la période futur proche (2046-2065). Pour la plupart des piézomètres, les projections indiquent de façon homogène une tendance à la baisse. En effet les niveaux simulés diminuent très légèrement, avec une baisse inférieure à 0.7 m en futur proche. Les niveaux simulés diminuent un peu plus fortement dans la partie

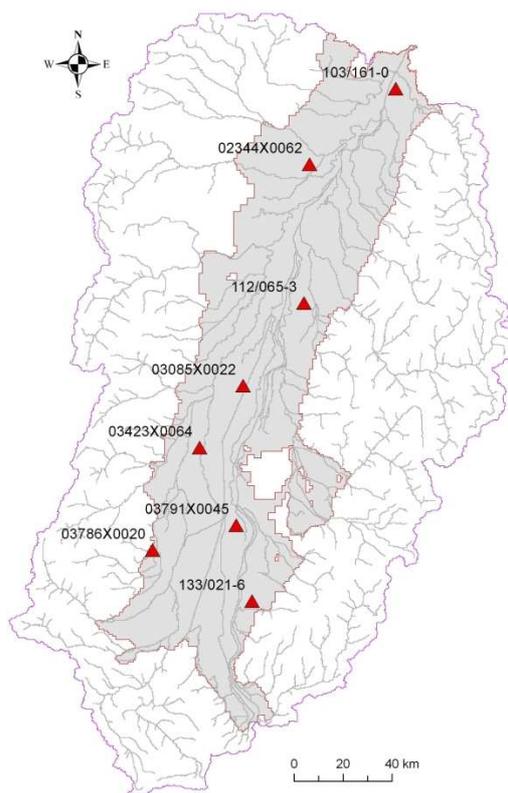
Sud de l'aquifère, au Sud de Colmar, les diminutions les plus fortes se trouvant à l'extrémité Sud-Ouest de l'aquifère. Or on a vu que l'infiltration des rivières est très importante dans cette zone, mais aussi que les niveaux piézométriques simulés à l'actuel sont nettement sous-estimés. On peut donc penser que certains processus sont mal pris en compte par le modèle dans cette zone. Les projections en temps futur sont donc d'autant plus à considérer avec prudence pour les piézomètres concernés. Pour certains modèles, en futur proche les niveaux piézométriques augmentent très légèrement le long de la bordure Est du Sundgau. Ceux-ci correspondent aux modèles pour lesquels une augmentation des précipitations est projetée sur le Sundgau. Dans la partie Nord de l'aquifère les niveaux piézométriques augmentent aussi très légèrement pour certains modèles.



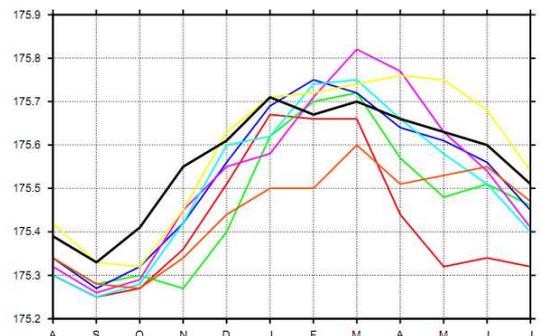
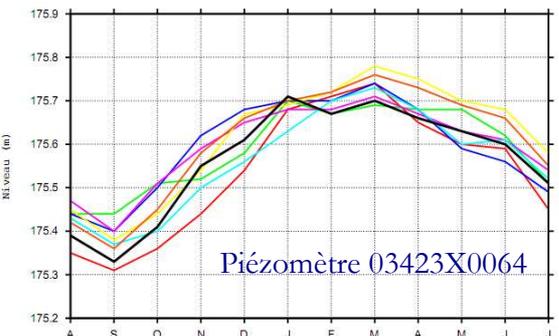
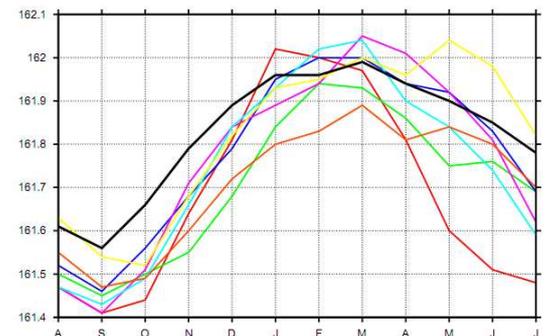
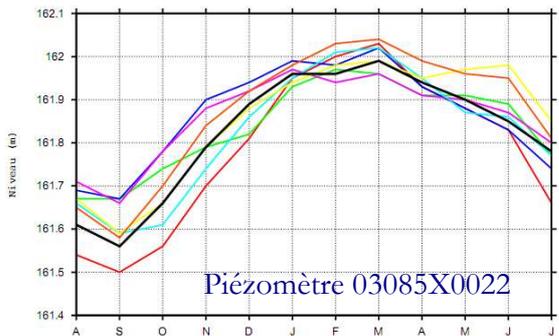
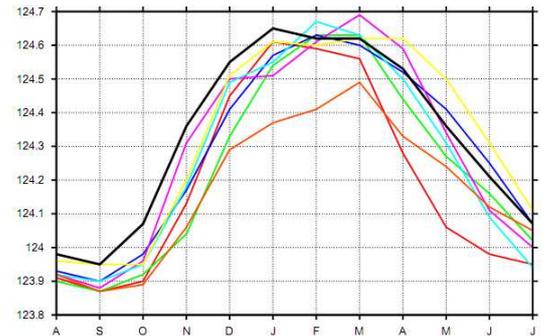
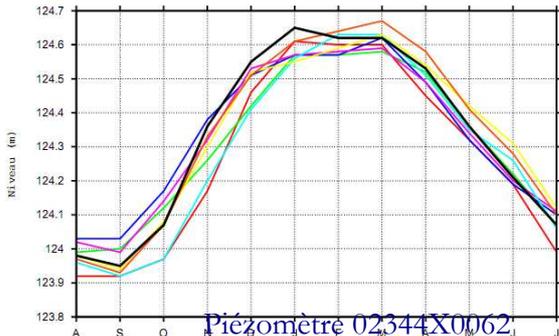
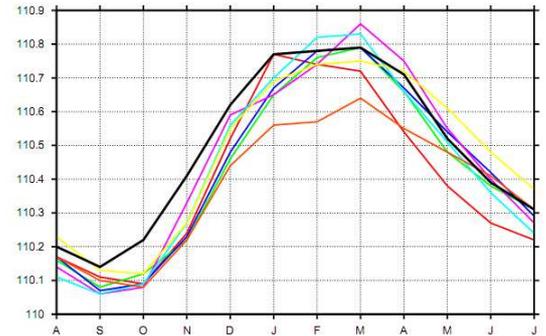
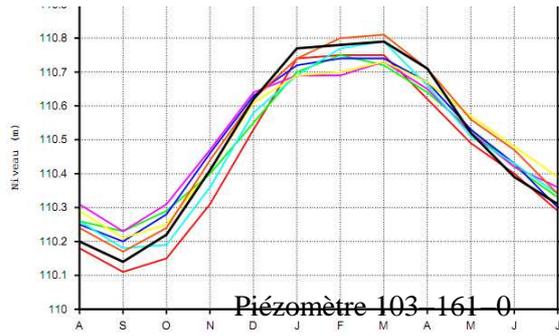
**Illustration 28 - Evolution des niveaux piézométriques moyens simulés aux 190 piézomètres entre les périodes temps présent et 2046-2065 avec les sept modèles climatiques utilisant le scénario SRES A1B.**

Les Illustration 30 et Illustration 31 représentent les niveaux piézométriques mensuels moyens interannuels simulés en huit points de la nappe alluviale pour les deux périodes temps présent et futur proche, avec les sorties des sept modèles climatiques utilisant le scénario A1B. La localisation de ces huit piézomètres est présentée Illustration 29. On voit

que les cycles annuels varient en fonction de cette localisation, les points situés dans la partie Sud de la plaine ayant un maximum de niveau piézométrique décalé vers les mois d'été par rapport à ceux situés au Nord. Ce décalage est particulièrement marqué pour le piézomètre situé dans la plaine de la Hardt, qui est le plus influencé par la saisonnalité des débits du Rhin. Pour tous ces points, la baisse du niveau en temps futur reste modérée, cependant on distingue deux tendances. Pour les points situés dans la partie Sud le niveau piézométrique diminue pour tous les mois, avec une baisse un peu plus marquée en automne. Pour les points situés dans la partie Nord, on trouve une baisse des niveaux en été et en automne, mais pas en hiver où les niveaux annuels maximum varient très peu par rapport à l'actuel. On note aussi que pour les piézomètres situés dans la partie Sud, la fourchette d'incertitude générée par l'utilisation de plusieurs modèles climatiques est plus large que pour les autres. Ceci est lié à la plus grande profondeur de la nappe au Sud, dont le niveau est ainsi moins contrôlé par les échanges nappes rivières. Dans la partie Nord où la nappe est sub-affleurante, une intensification des échanges permet d'amortir les variations de niveaux piézométriques.

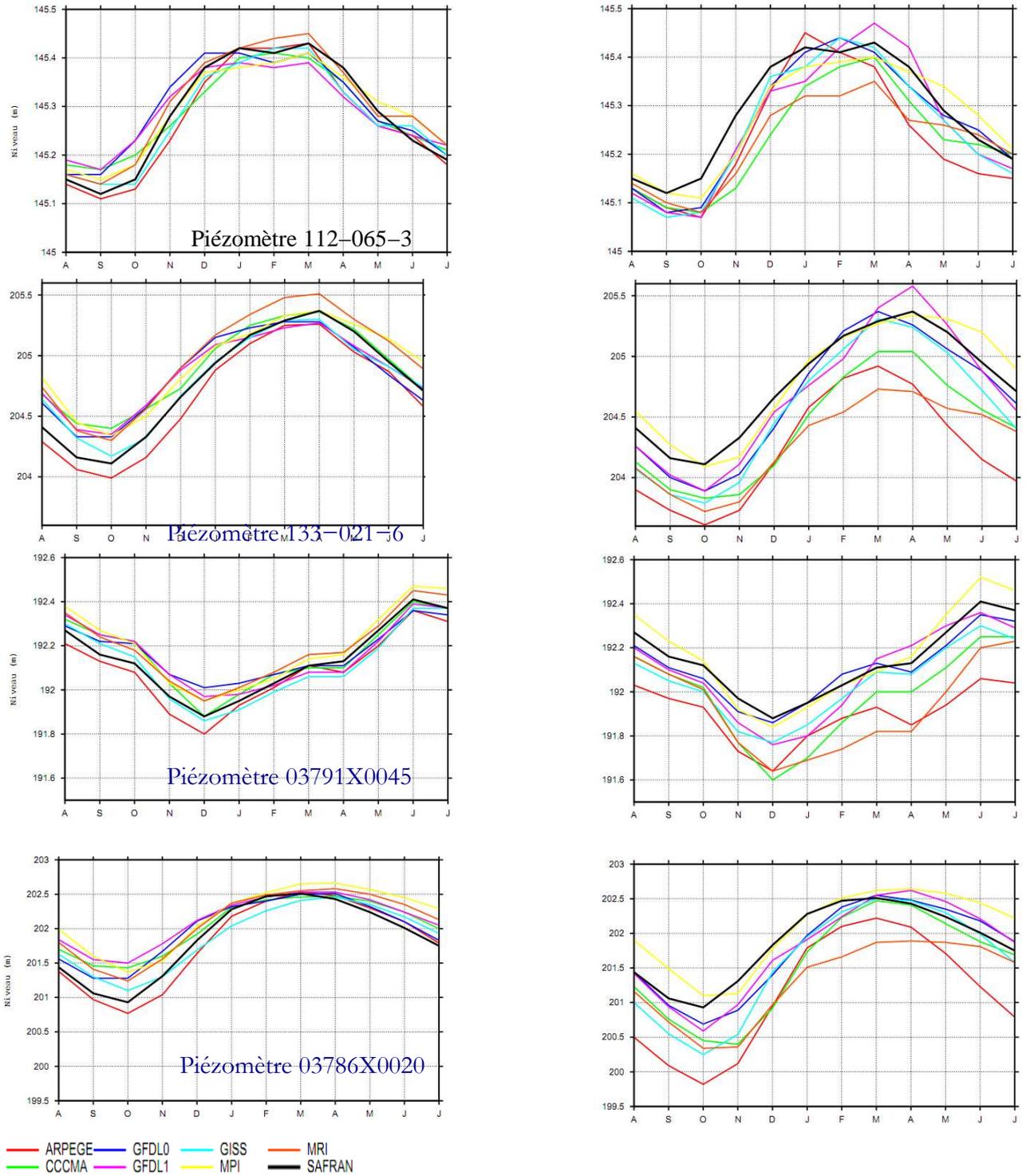


**Illustration 29 - Carte de situation des huit piézomètres pour lesquelles on présente les débits moyens mensuels interannuels simulés à l' Illustration 30 et Illustration 31**



- ARPEGE    GFDL0    GISS    MRI
- CCCMA    GFDL1    MPI    SAFRAN

**Illustration 30 Niveaux piézométriques moyens mensuels interannuels simulés pour les périodes temps présent (gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN**

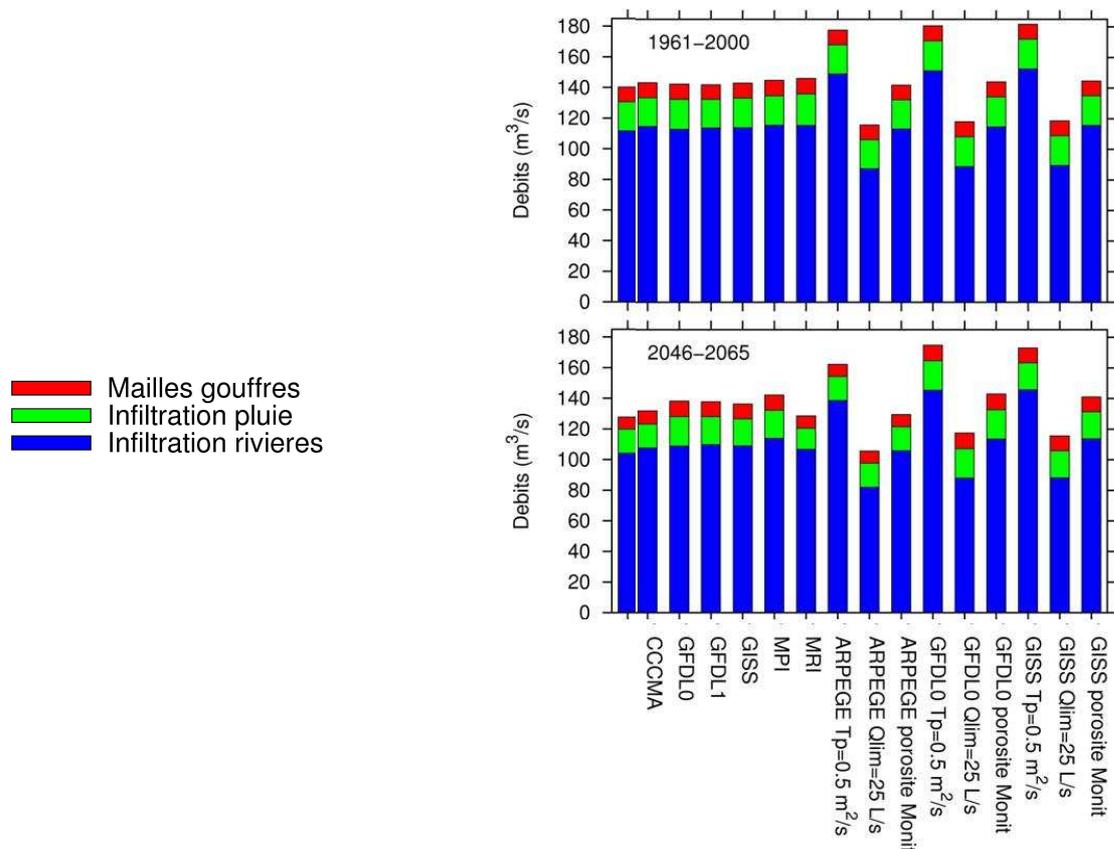


**Illustration 31 Niveaux piézométriques moyens mensuels interannuels simulés pour les périodes temps présent (à gauche), et futur proche (à droite). La courbe en noir présente les résultats du modèle forcé par les analyses SAFRAN**

### 3.4.4. IMPACTS SUR LES BILANS DE L'AQUIFERE

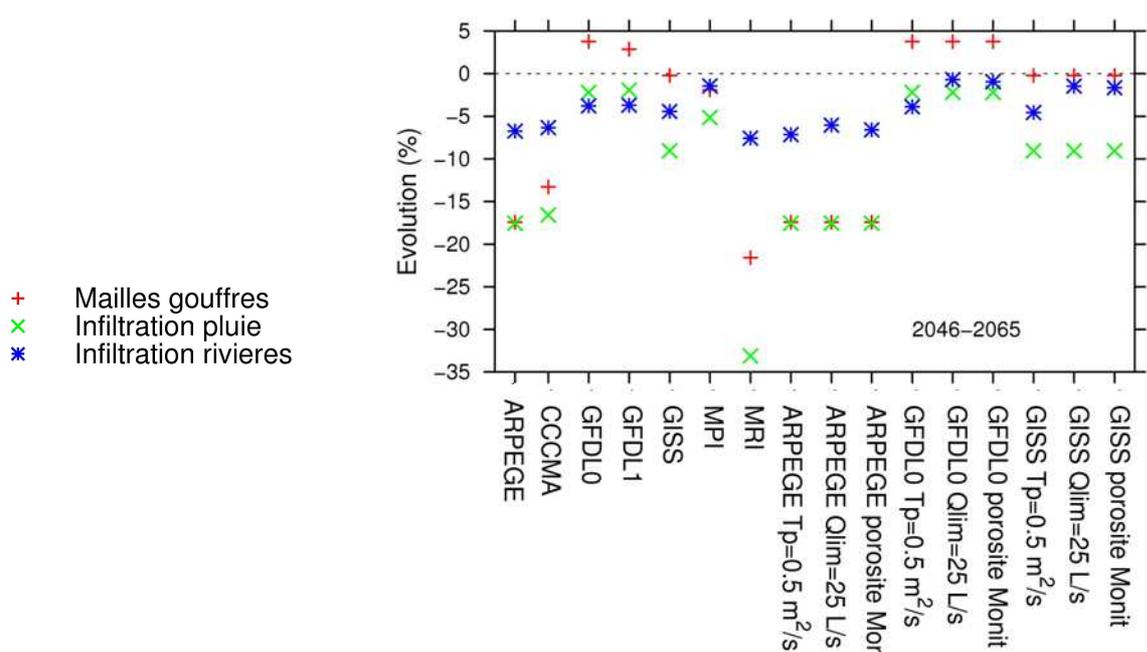
On a également évalué les impacts des différents modèles et scénarios climatiques sur la recharge de l'aquifère. Comme on l'a vu section 2.3.4, les principales composantes de la recharge sont l'infiltration depuis les cours d'eau, l'infiltration de la pluie efficace et les flux latéraux depuis les bassins montagneux représentés par les mailles gouffres dans le modèle hydrogéologique. De plus, certains paramètres des échanges nappe-rivières ou hydrodynamiques influencent fortement l'intensité de l'infiltration des cours d'eau et donc de la recharge. On a donc testé ici l'influence de ces paramètres sur l'évolution de la recharge de l'aquifère sous changement climatique. Pour cela, des simulations forcées par les sorties de plusieurs modèles climatiques ont été menées en temps présent et futur en modifiant les valeurs de plusieurs paramètres. On a choisi pour cela les valeurs de paramètres qui modifiaient le plus le bilan de l'aquifère en temps présent, c'est-à-dire  $= 25 \text{ L/s}$  et  $= 0.5 \text{ m/s}$ . On a également testé la distribution de porosités MoNit puisqu'on a vu que cette répartition permettait d'améliorer certains aspects de la piézométrie en temps présent. Ces différents paramètres ont été testés avec les sorties de trois modèles climatiques seulement, sous scénario A1B : le modèle ARPEGE, qui présente des diminutions marquées des précipitations et une augmentation modérée de l'ETP, le modèle GFDL0 qui présente de fortes diminutions de précipitations et également de fortes augmentations de l'ETP, et qui constitue donc un extrême sec, et le modèle GISS qui présente au contraire des augmentations des précipitations sur les montagnes et une augmentation assez modérée de l'ETP, et constitue donc un extrême humide. Les résultats sont présentés à l'illustration 32 et l'illustration 33. L'illustration 32 représente pour chacun des modèles testés (modèles climatiques et paramétrisation du modèle hydrogéologique) l'intensité des trois composantes de la recharge en temps présent et en futur proche (2046-2065). Cette illustration montre que la recharge diminue pour la plupart des modèles, mais que l'infiltration des rivières reste malgré tout largement prédominante dans tous les cas. L'illustration 33 indique l'évolution relative de ces composantes entre le temps présent et le futur proche (2046-2065). Cette illustration montre que le terme d'infiltration des cours d'eau, qui diminue dans tous les cas, présente l'évolution la moins variable entre les différents modèles. De plus sa diminution est limitée dans tous les cas à  $-7 \%$  en futur proche. L'évolution du terme de recharge par les précipitations est beaucoup plus variable entre les différents modèles. Ce terme diminue dans tous les cas, mais cette diminution varie de  $-2 \%$  pour les modèles GFDL0 et GFDL1 à  $-33 \%$  pour le modèle MRI en futur proche. Le terme de recharge par les mailles gouffres évolue aussi de façon assez différente entre les modèles, montrant une augmentation jusqu'à  $4 \%$  pour certains modèles, et une diminution jusqu'à  $-20 \%$  pour d'autres. La diminution du stock de neige est favorable à l'augmentation de la recharge de l'aquifère par ces flux latéraux. On voit donc que la part de l'infiltration des cours d'eau dans la recharge totale augmente dans ces projections sous changement climatique. Ceci est cohérent avec une baisse globale des niveaux piézométriques qui induit une plus grande

infiltration de l'eau des rivières à volume d'eau disponible en rivière équivalent. Ce phénomène a pour effet de limiter la baisse du niveau piézométrique par rapport à ce qu'elle aurait pu être sans ce rôle tampon des échanges nappe- rivières.



**Illustration 32 - Bilans de la recharge de l'aquifère pour les différents modèles climatiques** en temps présent (en haut) et en futur proche (en bas) obtenus avec les différentes projections climatiques et paramètres hydrodynamiques testés.

On remarque à l'inverse que les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ont peu d'influence sur l'évolution des termes de la recharge. En effet le seul terme influencé par ces paramètres est l'infiltration des cours d'eau, qui évolue peu pour les modèles testés. On voit cependant que pour les modèles ARPEGE, GFDL0 et GISS la valeur = 25 L/s limite la diminution de cette composante de la recharge. Pour GFDL0 et GISS les porosités MoNit limitent aussi cette diminution.



**Illustration 33 - Evolution des différentes composantes de la recharge en futur proche (en haut) par rapport au temps présent, obtenues pour les différents modèles climatiques et paramètres hydrodynamiques testés.**

### 3.5. ANALYSE DES INCERTITUDES SUR LA RECHARGE DE L'AQUIFERE

Dans cette partie on cherche à déterminer au sein de la chaîne de modélisation utilisée les éléments sources de l'incertitude sur la recharge de l'aquifère projetée pour le temps futur. Pour analyser l'importance relative de chaque élément de la chaîne scénario d'émissions-modèle climatique-paramétrisation hydrodynamique, il faut disposer des résultats pour toutes les combinaisons possibles de ces deux éléments, soit un total de 28 cas. Or l'ensemble des simulations n'a pas pu être réalisé en raison du coût en calcul important des simulations climatiques. Dans notre cas on dispose de sept modèles climatiques sous scénario d'émission A1B et quatre jeux de paramètres hydrodynamiques sur la période 2046-2065. Le Tableau 3 présente les valeurs de l'évolution de la recharge projetées en futur proche pour les cas testés. La méthode employée pour évaluer les sources d'incertitude consiste à reconstituer les valeurs du flux de recharge pour les simulations qui n'ont pas été menées, c'est-à-dire ici pour les combinaisons scénario d'émissions-modèle climatique-paramétrisation hydrodynamique non testées, à partir des valeurs obtenues pour les cas testés. La méthodologie utilisée est détaillée par Déqué et al. (2007) et se base sur la méthode des décompositions de Kendall et al. (1977).

**Tableau 3 Valeurs disponibles de l'évolution de la recharge de la nappe en futur proche, en pourcentage par rapport au temps présent, telle qu'estimées par les différentes**

projections et avec différent jeux de paramètres. La recharge de la nappe inclut l'infiltration des précipitations efficaces, les écoulements de subsurface latéraux, les flux entrant par les potentiels imposés et l'infiltration des rivières. nd signifie valeur non disponible.

SRES	GCM	Paramètres hydrodynamiques			
		REF	$T_P$	$Q_{lim}$	Porosité
A1B	ARP	-8.903	-8.774	-8.848	-8.770
A1B	GFDL0	-3.003	-3.234	-0.591	-0.809
A1B	GFDL1	-3.007	nd	nd	nd
A1B	MPI	-1.974	nd	nd	nd
A1B	MRI	-12.124	nd	nd	nd
A1B	CCCMA	-8.122	nd	nd	nd
A1B	GISS	-4.748	-4.760	-2.359	-2.343

On utilise l'estimation des moyennes pour une variable, qui est ici l'évolution de la recharge de l'aquifère. Cette variable est notée  $X_{ij}$ , l'indice  $i$  correspondant au jeu de paramètres hydrodynamiques,  $j$  aux sept modèles de climat disponibles. La moyenne de tous les cas possibles pour un indice (ou jeu de paramètres hydrodynamiques) donné est notée  $X_i$ . On fait alors l'approximation suivante :  $X_{ij} = X_i + X_j - X_{..}$ .

Chaque valeur  $X_{ijk}$  manquante peut être reconstituée à partir des moyennes disponibles. Ce procédé itératif converge assez rapidement. En notant  $V_p$ , et  $V_g$ , et les variances associées respectivement aux paramètres hydrodynamiques et aux modèles de circulation générale, la variance totale s'écrit

$$V = V_p + V_g + V_{pg}, \text{ avec } V_p = \sum_{i=1,3} (X_i - X_{..})^2 \text{ et } V_{pg} = \sum_{i=1,3} (X_{ij} - X_i - X_j + X_{..})^2$$

**Tableau 4 : Même légende que le tableau 3.3, mais, une fois les valeurs manquantes reconstituées.**

SRES	GCM	Paramètres hydrodynamiques			
		REF	$T_P$	$Q_{lim}$	Porosité
A1B	ARP	-8.903	-8.774	-8.848	-8.770
A1B	GFDL0	-3.003	-3.234	-0.591	-0.809
A1B	GFDL1	-3.007	-3.448	-1.792	-1.833
A1B	MPI	-1.974	-2.415	-0.759	-0.800
A1B	MRI	-12.124	-12.565	-10.909	-10.950
A1B	CCCMA	-8.122	-8.563	-6.907	-6.948
A1B	GISS	-4.748	-4.760	-2.359	-2.343

**Une fois les valeurs manquantes complétées (cf.**

Tableau 4) on peut calculer l'évolution moyenne pour tous les cas de la recharge de

l'aquifère, ainsi que l'écart type de cette évolution, et on peut également analyser l'origine des principales incertitudes. On obtient ainsi une diminution de la recharge de la nappe de -5.4 +/- 3.8 % pour la période 2046-2065. L'analyse des variances (Tableau 5) montre que la part de la variance associée aux paramètres hydrodynamiques est très faible, et que l'incertitude provient essentiellement de la dispersion des projections climatiques.

**Tableau 5 Pourcentage de la variance totale lié aux différentes composantes.**

Type de variance	Futur proche
Paramètres	4.02
GCM	94.97
Paramètres-GCM	1.01

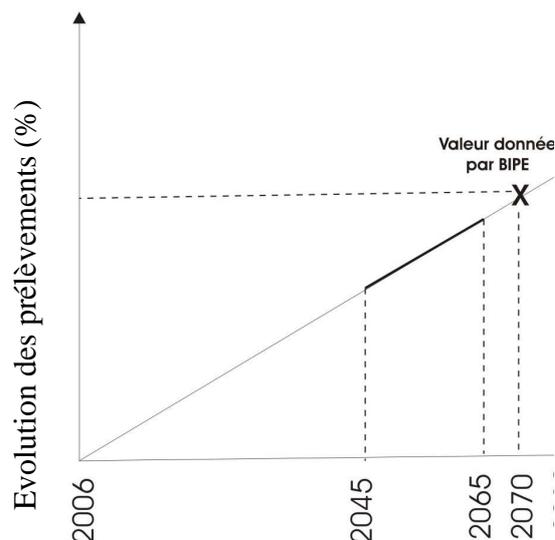
Les résultats projettent donc une diminution de la recharge de la nappe de -5% +/- 4%. L'incertitude sur l'amplitude de cette réduction est conséquente, cependant le signe de cet impact est homogène pour tous les cas testés. Par ailleurs l'incertitude sur certains paramètres hydrodynamiques semble avoir peu d'impact sur cette évolution.

### **3.6. IMPACT DES MODIFICATIONS DES PRELEVEMENTS EN NAPPE**

Nous avons utilisé les scénarios de prélèvement fournis par le BIPE. Ces scénarios prennent en compte l'évolution des prélèvements pour l'alimentation en eau potable et l'industrie (en particulier, pour la production d'énergie), ainsi que l'évolution de la population avec deux scénarios d'étalement. Cependant, ces scénarios ne prennent pas encore en compte à ce stade l'impact du changement climatique, et de ce fait, impliquent peu de modifications sur les prélèvements pour irrigation.

Seuls les prélèvements en nappe sont pris en compte dans notre modèle. A la différence des prélèvements en rivière dont l'impact peut être limité par des rejets conséquents en aval, les prélèvements en nappe constituent une perte nette pour la nappe, car si une partie de l'eau est rejetée, ce rejet se fait en rivière et non en nappe.

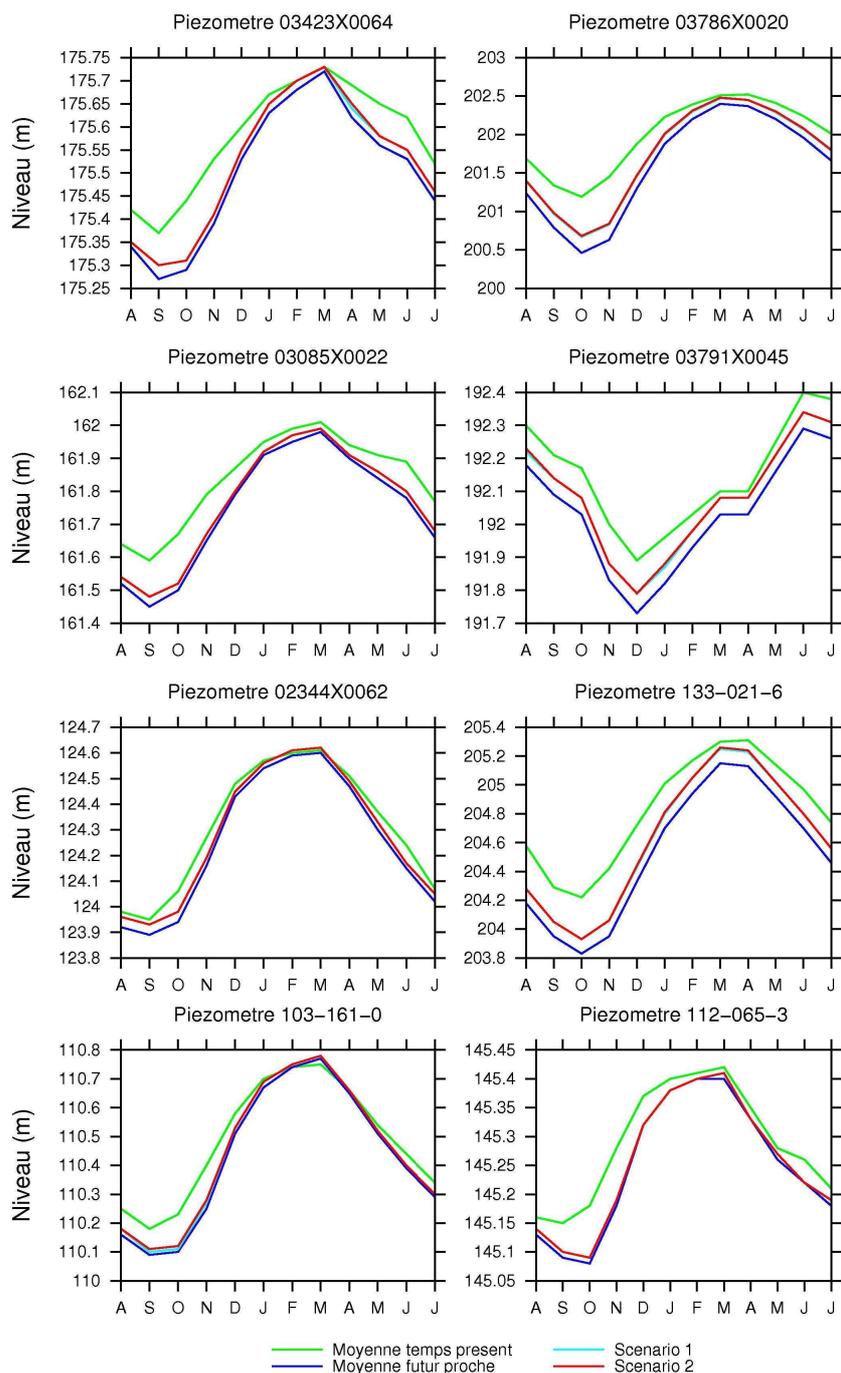
Les modifications des prélèvements sont calculées en appliquant aux prélèvements actuels pris en compte dans le modèle un facteur d'évolution calculé selon le schéma présenté Illustration 34 .



**Illustration 34 : Principe de l'estimation des variations des prélèvements en nappe sur la période 2045-2065 à partir des données du BIPE en 2070 et 2006.**

Cependant, l'origine des pompages actuels pris en compte dans le modèle n'étant pas déterminé, il n'a pas été possible d'appliquer une évolution différente pour les pompages AEP, industrie et irrigation, et l'ensemble des prélèvements ont été modifiés de façon homogène sur le bassin avec le taux d'évolution moyen estimé par le Bipe. Cela conduit à une forte réduction des prélèvements, allant de -38% à -40 % selon le scénario d'étalement.

La réduction des prélèvements conduit à limiter le rabattement du niveau piézométrique lié au changement climatique. L'illustration 35 présente les impacts mensuels sur 8 piézomètres, en moyenne sur les 7 projections, tandis que le Tableau 6 présente l'impact sur l'ensemble de la nappe alluviale.



**Illustration 35 : Evolution du niveau piézométrique mensuel aux huit piézomètres présentés Illustration 29 en temps présent (vert), sous changement climatique (bleu foncé), et sous changement climatique avec évolution des prélèvements selon les scénarios 1 (bleu clair) et 2 (rouge) du BIPE**

Les deux scénarios du Bipe donnent des résultats très similaires. La diminution des pompages permet de réduire le rabattement de 36cm à 28cm en moyenne sur l'ensemble de la nappe.

**Tableau 6 Impact combiné du changement climatique et des évolutions des prélèvements sur le niveau piézométrique moyen de la nappe alluviale du Rhin**

	Prélèvement en nappe en 2070	Evolution piezo
Prélèvements égaux à l'actuel	500 000 000m <sup>3</sup> /an	-0.36+/-0.18
Evolution des prélèvements scénario 1 du Bipe	-38%	-0.289+/-0.17
Evolution des prélèvements scénario 2 du Bipe	-40%	-0.276+/-0.17

## 4. CONCLUSIONS

Les simulations menées grâce aux projections des modèles climatiques nous permettent de dégager quelques grandes tendances pour l'évolution future de l'hydrosystème du fossé rhénan supérieur. Les projections climatiques désagrégées indiquent des évolutions contrastées des précipitations sur le domaine étudié, avec cependant globalement une augmentation marquée des précipitations hivernales, et une diminution marquée des précipitations estivales. Les précipitations annuelles sont caractérisées par une légère baisse. Pour tous les modèles climatiques, l'ETP et les températures augmentent en toutes saisons, et surtout en automne pour l'ETP.

Ces évolutions météorologiques sont traduites en termes d'écoulement par le modèle MODCOU, par une diminution de l'infiltration vers l'aquifère et du ruissellement de surface. Certains modèles plus humides projettent cependant une évolution quasi-nulle de ces écoulements. On constate aussi une évolution de leurs cycles annuels avec une concentration des plus forts écoulements sur les mois d'hiver, et une baisse pour les autres mois. Ceci peut faire craindre des étiages plus sévères et des crues ou des remontées de nappe plus importantes. Les cycles annuels des débits mensuels des cours d'eau suivent des évolutions similaires, les forts débits se trouvant plus concentrés sur les mois d'hiver par rapport à l'actuel. Les débits moyens simulés aux stations hydrométriques ont globalement tendance à la diminution, même si les modèles climatiques les plus humides projettent des augmentations de ces débits. De plus ces diminutions sont assez fortes dans la plaine, où l'infiltration des cours d'eau vers la nappe constitue un processus de recharge important de celle-ci.

Concernant l'évolution de la nappe alluviale, toutes les projections climatiques conduisent à une baisse de la recharge et des baisses assez limitées des niveaux piézométriques, inférieures au mètre. Ces baisses sont un peu plus marquées dans la partie extrême Sud-Ouest de la plaine, mais la piézométrie de cette zone était déjà mal reproduite à l'actuel avec les données météorologiques observées. Il faut noter que même si la baisse de la piézométrie est faible, cette évolution peut avoir un impact négatif pour l'équilibre de zones humides entretenues par la proximité du toit de la nappe au sol. De plus la reprise évaporative directe d'eau de la nappe, qui peut être significative dans les zones où celle-ci est sub-affleurante, n'est pas prise en compte dans le modèle hydrogéologique. Celle-ci pourrait accentuer les impacts négatifs du changement climatique sur les niveaux piézométriques, mais à terme elle devrait diminuer en raison de la plus grande profondeur moyenne du toit de la nappe.

Une autre conclusion sur ces impacts est une importance accrue de l'infiltration des cours

d'eau pour la recharge de l'aquifère : même si les volumes infiltrés diminuent globalement, ils diminuent moins que la recharge issue des précipitations effectives et représentent donc une part encore plus grande qu'à l'actuel de la recharge totale. Ce résultat va dans le sens d'une plus grande vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions des cours d'eau de surface, et donc d'une dégradation possible de la qualité de cette importante ressource en eau potable.

Les résultats obtenus sur les débits de crue et d'étiage indiquent une plus grande sévérité des étiages, ainsi que des crues de plus forte intensité, mais ces statistiques doivent être considérées avec précaution, étant donné que les séries de valeurs utilisées pour les établir sont assez courtes.

Les scénarios du BIPE conduisent à une réduction marquée des prélèvements en nappe, qui permet de réduire l'impact du changement climatique sur le rabattement de la nappe d'environ 25%, cependant, ces scénarios ne prennent pas en compte l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation.

## 5. REFERENCES

- Besbes, M. et de Marsily, G. : From infiltration to recharge : use of a parametric transfer function, *Journal of Hydrology*, 74, 271 – 293, doi :10.1016/0022-1694(84)90019-2, 1984
- Boé, J. : Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2007.
- David C, Maidment D.R, Niu G-Y, Yang Z-L, F. Habets, V. Eijkhout 2011 River network routing on the NHDPlus dataset, 2011, *J. Hydromet.*, 12, 913-934 DOI: 10.1175/2011JHM1345
- Déqué, M., Rowell, D., Luthi, D., Giorgi, F., Christensen, J., Rockel, B., Jacob, D., Kjellstrom, E., de Castro, M., et van den Hurk, B. : An intercomparison of regional climate simulations for Europe : assessing uncertainties in model projections, *Climatic Change*, 81, 53-70, 2007.
- Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., et Volken, D. : Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine river basin : Results of the RheinBlick2050 project, Rapport technique, Commission internationale pour l'Hydrologie du bassin du Rhin, 2010.
- Grabs, W., Daamen, K., Gellens, D., Kwadijk, J., Lang, H., Middelkoop, H., Parmet, B., Schärdler, B., Schulla, J., et Wilke, K. : Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin, Rapport technique, Commission internationale pour l'Hydrologie du bassin du Rhin, 1997.
- Kendall, M., Stuart, A., et Ord, J. : The advanced theory of statistics. Vol 3 : design and analysis, and time series, 4th edition, Charles Griffin and Co Ltd, 1977.
- Kwadijk, J. : The impact of climate change on the discharge of the river Rhine, Thèse de doctorat, Universiteit Utrecht, 1993.
- Ledoux, E. : Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - Université Pierre et Marie Curie, 1980.
- Ledoux, E., Girard, G., et Villeneuve, J. P. : Suggestion for a coupled model of surface and groundwater simulation on a watershed, *La Houille Blanche*, 1/2, 1984.
- LfU : Monit : développement des outils de prévision, Rapport technique, LfU, 2005.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., et Bergström, S. : Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model, *Journal of Hydrology*, 201, 272 – 288, doi :10.1016/S0022-1694(97)00041-3, 1997.
- Longuevergne, L., Florsch, N., et Elsass, P. : Extracting coherent regional information from local measurements with Karhunen-Loève transform : case study of an alluvial aquifer (Rhine Valley and France and Germany), *Water Resources Research*, 43, 13, 2007.

- LUBW : Projet INTERREG III Monit : Modélisation hydrodynamique et transport des nitrates, Rapport technique, LUBW, 2006a.
- LUBW : Projet INTERREG III Monit : Structure hydrogéologique et caractéristiques hydrauliques, Rapport technique, LUBW, 2006b.
- Majdalani, S. et Ackerer, P. : Identification of groundwater parameters using an Adaptive Multiscale method, *Ground Water*, doi :10.1111/j.1745-6584.2010.00750.x, 2010.
- Menzel, L., Thieken, A. H., Schwandt, D., et Bärgel, G. : Impact of Climate Change on the Regional Hydrology Scenario-Based Modelling Studies in the German Rhine Catchment, *Natural Hazards*, 38, 45–61, 2006.
- Middelkoop, H., Daamen, K., Dellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J., Lang, H., Parmentier, B., Schuller, B., Schulla, J., et Wilke, K. : Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin, *Climatic change*, 49, 105–128, 2001.
- Pagé, C., Terray, L., et Boé, J. : dsclim : A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology, Rapport technique, CERFACS, 2010.
- Quintana-Seguí, P., LeMoigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., et Morel, S. : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN analysis over France, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47, 92–107, 2008.
- Shabalova, M. V., van Deursen, W. P. A., et Buishand, T. A. : Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model, *Climate Research*, 23, 233–246, 2003.
- Thierion C., 2011, L'aquifère alluvial du fossé rhénan supérieur : fonctionnement, vulnérabilités actuelles et prévisibles sous l'impact du changement climatique. Thèse de Mines-Paristech.
- Thierion C., Longuevergne L., Habets F., Ledoux E., Ackerer P., Majdalani S., Leblois E., Lecluse S., Martin E., Queguiner S., Viennot P., 2012 Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem, *Journal of Hydrol*, 424–425, p68–83 doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.028