

Annexe Volet 2: Impacts du changement climatiques sur la ressource en eau

F. Habets, J. Boé, M. Déqué, A. Ducharne, S. Gascoin, L. Oudin,
E. Ledoux, E. Martin, C. Pagé, L. Terray, D. Thiéry et P. Viennot

June 25, 2009

Introduction

L'utilisation des méthodes de désagrégation pour débiaiser et raffiner spatialement les scénarii climatiques induit des changements dans l'analyse des impacts du changement climatique sur la ressource en eau par rapport aux études précédentes. En effet, on dispose maintenant de scénarii climatiques pour le temps présent et une ou plusieurs périodes futures. Cela nous permet de tester la capacité du couple [simulation du GCM sous scénario SRES, méthode de désagrégation] de bien représenter le temps présent, et de voir quels sont les biais générés par ces scénarios désagrégés lorsqu'ils sont utilisés par les modèles hydrologiques. Cela nous permet aussi de ne plus raisonner uniquement en terme de différence entre deux périodes, et de regarder les réponses brutes pour chaque période. Cependant, il est important de garder à l'esprit que ces résultats sont simulés en supposant que seul le climat est modifié. Pour tous les modèles, la végétation et les prélèvements ne sont pas modifiés par rapport aux observations du temps présent. Or, il est vraisemblable que l'occupation des terres et l'anthropisation vont évoluer également. Il s'agit donc bien ici d'une étude théorique, toutes choses étant égales par ailleurs.

Dans ce volet, nous disposons d'au moins 5 modèles hydrologiques calés sur les bassins de la Seine et de la Somme. Ces modèles hydrologiques sont relativement différents, et présentent un bon spectre de l'ensemble des possibles (section 1). Nous avons donc pu analyser les impacts du changement climatique sur la ressource en eau pour les différents modèles hydrologiques, les différentes méthodes de désagrégation, et les différents modèles de climat sous scénario SRES. Ces impacts sont étudiés sous trois niveaux: impact sur les composantes du bilan hydrique, sur les débits et sur la piézométrie. L'analyse de ces impacts est associée à une analyse des incertitudes. Les bassins de la Seine et de la Somme sont traités séparément. La première partie présente les résultats sur le bassin de la Seine, la deuxième sur le bassin de la Somme.

1 Présentation des modèles hydrologiques utilisés

Le tableau ci-dessous liste l'ensemble des modèles hydrologiques disponibles par bassin. En général, les modèles ont été calés sur ces bassins lors d'études précédentes (cf. références Tableau 1). Pour cela, ces modèles ont utilisé un forçage atmosphérique issue des analyses atmosphériques SAFRAN (Quintana Seguí et al., 2007) sur une période de 10 à 30 ans. La capacité des modèles à bien représenter les débits et la piézométrie en temps présent

Nom du modèle	Type de modèle	Spatialisation	Bassin	Références
CLSM	hydrométéorologique	semi-distribué	Seine Somme	Ducharne et al., 2007 Gascoïn et al., 2008
EROS	à réservoirs	semi-distribué	Seine	Thiéry et al., 1995
GARDENIA	à réservoirs; estimation possible d'un niveau piézométrique local	non distribué	Somme	Thiéry, 2003
GR4J	à réservoirs	non distribué	Seine Somme	Perrin et al., 2003
MARTHE	hydrogéologique	distribué	Somme	Thiéry et al., 1993
MODCOU	hydrogéologique	distribué	Seine Somme	Ledoux et al., 2007 Korkmaz et al., 2008
SIM	hydrogéo-météorologique	distribué	Seine Somme	Habets et al., 2008 Habets et al., 2009

Table 1: Résumé et caractéristiques des modèles hydrogéologiques disponibles sur chaque bassin. La couleur associée à chaque modèle est celle que l'on retrouvera dans les graphiques

ne fait pas l'objet de cette étude. Cependant, on retrouvera une forme d'évaluation dans le volet 3 (analyse des extrêmes), et une analyse plus détaillée dans les articles cités.

2 Présentation des scénarios climatiques désagrégés

On dispose de 8 simulations climatiques, désagrégées par au moins une des trois méthodes suivantes: anomalie, quantile quantile (Déqué 2007) et régime de temps (Boé et al., 2006, Pagé et al., 2008). L'analyse des simulations climatiques et des méthodes de désagrégation est présentée dans le volet 1, et ne sera donc pas détaillée ici. La liste de ces simulations et le label utilisé pour les identifier sont présentés dans le tableau 2.

3 Analyse des impacts sur le bassin de la Seine

Pour cette analyse, on se concentre principalement sur l'exutoire du bassin, qui correspond à la station de la Seine à Poses. Les résultats sont toutefois très comparables à ceux obtenus

label	Modèle de climat	scénario SRES	méthode de désagrégation
A1	Arpege V4	A1B	Anomalie
A2	Arpege V4	A2	Anomalie
RD1	Arpege V4	A1B	Quantile-Quantile
RD2	Arpege V4	A2	Quantile-Quantile
RC1	Arpege V3 continu	A1B	Régime de temps
RC2	Arpege V4	A2	Régime de temps
G0	GFDL_CM2_0	A1B	Régime de temps
G1	GFDL_CM2_1	A1B	Régime de temps
CC	CCMA_GCGMA3_1	A1B	Régime de temps
GM	GISS_MODEL_E_R	A1B	Régime de temps
MR	MRI_CGCM2_3_2A	A1B	Régime de temps
EC	MPI_ECHAM5	A1B	Régime de temps

Table 2: Simulations climatiques désagrégées disponibles et labels associés.

pour la Seine à Paris. Le tableau 3 résume l'ensemble des scénarii climatiques désagrégés simulé par les modèles hydrologiques sur le bassin de la Seine.

3.1 Analyse des réponses sur les débits

On s'intéresse dans un premier temps à l'évolution des débits annuels de la Seine entre le temps présent, l'horizon 2050 et l'horizon 2100, pour chaque modèle hydrologique et chaque scénario climatique désagrégé disponible. Ainsi, sur la Figure 1, une simulation (l'association d'un modèle hydrologique avec un scénario climatique désagrégé) est représentée par une courbe à trois points. Le premier point représente les débits annuels moyens en temps présent, le deuxième les débits annuels moyens en milieu de siècle lorsqu'ils sont disponibles, et le troisième les débits annuels moyens en fin de siècle.

On constate tout d'abord qu'il y a une assez forte dispersion des résultats pour le temps présent. Cela est lié au fait que les simulations temps présents sont forcées par des simulations de modèles de climat désagrégés, et non pas par des observations. On a donc la persistance de certains biais qui ne sont pas corrigés par les méthodes de désagrégation (cf analyse volet 1). Cependant, on retrouve dans ce graphique les résultats temps présent obtenus à partir des observations météorologiques, puisque cela correspond au temps présent des méthodes d'anomalies (labels A1 et A2). Dans tous les cas, les résultats temps présent sont proches des observations (trait noir sur la figure 1)

Une deuxième constatation importante est que la très grande majorité des simulations conduisent à une diminution des débits aux horizons 2050 et 2100. Cependant, l'intensité de ces diminutions est difficile à estimer sur cette figure du fait de la dispersion en temps présent.

scénario	periode	CLSM	GR4J	ERoS	MoDCoU	SIM
A1	TP	o	o	n	o	n
	FS	o	o	n	o	n
A2	TP	o	o	o	o	n
	FS	o	o	o	o	n
RD1	TP	o	o	n	o	o
	FS	o	o	n	o	o
RD2	TP	o	o	o	o	o
	FS	o	o	o	o	o
RC1	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	o	o	o
RC2	TP	o	o	o	o	o
	FS	o	o	o	o	o
G0	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	n	o	o
G1	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	n	o	o
CC	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	n	o	o
GM	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	n	o	o
MR	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	n	o	o
EC	TP	o	o	o	o	o
	MS	o	o	o	o	o
	FS	o	o	n	o	o

Table 3: Liste des scénarii climatiques désagrégés utilisés par chaque modèle hydrologique sur le bassin de la Seine. TP= Temps Présent, MS=Milieu de Siècle, FS= Fin de Siècle. Les labels des scénarii climatiques désagrégés correspondent à ceux du tableau 2

Débits mensuels de la Seine à Poses

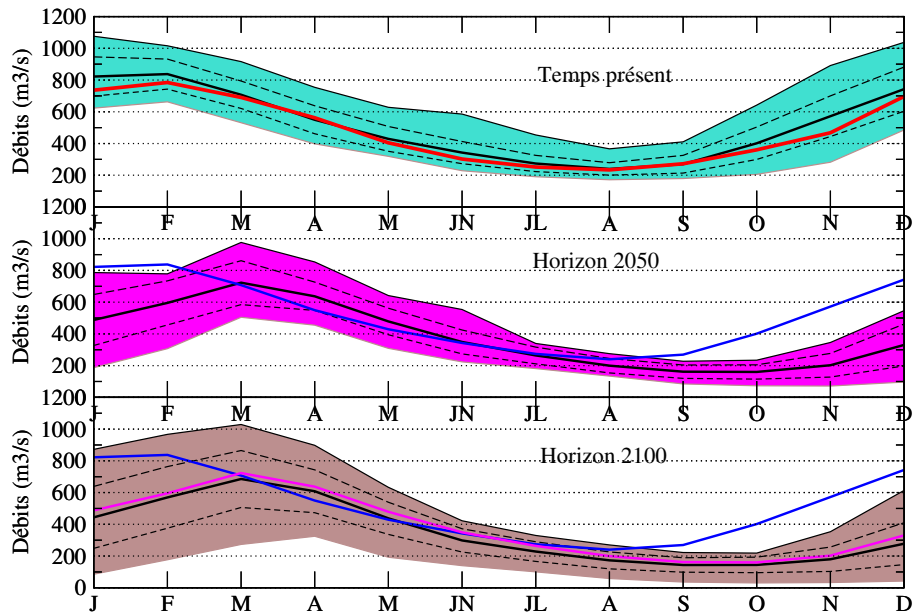


Figure 3: Simulation des débits mensuels de la Seine à Poses par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarii. L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. En haut: temps présent, la courbe rouge représente la moyenne mensuelle 1970-2003 observée. Au milieu Horizon 2050: la courbe bleue représente la moyenne temps présent. En bas Horizon 2100: les courbes bleues et roses représentent les simulations temps présent et milieu de siècle respectivement.

La figure 2 présente donc l'impact en débit par rapport aux valeurs simulées en temps présent. On constate une relative homogénéité des réponses entre les modèles hydrologiques, avec un impact moyen entre 0 et -200 m³/s. Seul le modèle CLSM simule des diminutions de débits beaucoup plus marquées. On constate également que deux scénarii (GM et CC) sont nettement moins pessimistes que les autres, avec des débits annuels moyens en fin de siècle très comparables à ceux du temps présents.

La figure 3 présente l'ensemble des simulations de la Seine à Poses au pas de temps mensuel. De nouveau, on constate que même pour le temps présent, la dispersion est assez importante. Cependant, la moyenne de l'ensemble est assez proche de la moyenne observée. A l'horizon 2050, la diminution des débits est surtout marquée à l'automne et en hiver. A l'horizon 2100, la moyenne des débits suit un cycle assez proche de celui simulé en moyenne en 2050, mais légèrement plus faible. Cependant, la dispersion a nettement augmenté en hiver et à l'automne, où les débits minimums peuvent être très faibles.

Impact sur la piézométrie

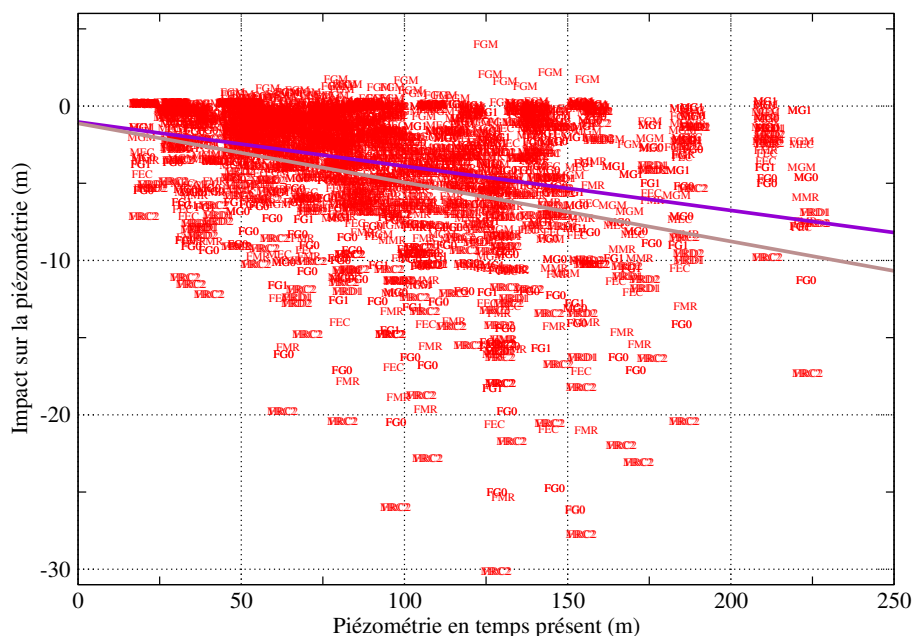


Figure 4: Impact sur les niveaux piézométriques simulés par MODCOU sur les 137 stations simulées. Les labels font références aux scénarios climatiques désagrégés, le préfix M indiquant les résultats en milieu de siècle et F en fin de siècle. Les droites violette et marron représentent les droites de régression en milieu et fin de siècle respectivement.

3.2 Analyse des réponses sur les niveaux piézométriques

Sur le bassin de la Seine, seuls les modèles MODCOU et SIM simulent la piézométrie. Mais, seul le modèle MODCOU a fourni les résultats des simulations pour 137 piézomètres. L'impact sur les nappes de la Seine est analysé en détail dans le volet 5 (cf rapport). On propose ici une simple estimation des impacts sur ces piézomètres. L'impact est massivement négatif (baisse du niveau piézométrique), sauf pour quelques scénarii climatiques (notamment le GISS-MODEL-ER). Le rabattement est généralement inférieur à 10m, mais, peut dépasser 20m. La pente des droites de régression est assez similaire : environ -3% pour l'horizon 2050 et -4% pour l'horizon 2100. L'ordonnée à l'origine est de -1m et atteint -1.12m en fin de siècle. Cela indique donc en première approximation un rabattement de l'ordre d'un mètre proche de l'exutoire et de 5m pour un piézomètre dont le niveau temps présent est à 100m.

3.3 Analyse du bilan hydrique

Afin de mieux comprendre l'origine des dispersions des résultats, nous nous intéressons aux différentes composantes du bilan hydrique.

Les figures 5 et 6 montrent à l'échelle du bassin versant, les relations entre les impacts

	Precip	ETR	QTOT	QI	QIRZFLW	QR	Perte	Apport nappe
Temps présent								
CLSM	2.13	1.42	0.71	0.83	0.62	0.13	-0.04	0.20
EROS	2.13	1.45	0.71	0.22		0.49	0.0	
GR4J	2.17	1.33	0.68				0.13	
SIM	2.16	1.54	0.62	0.45		0.18		
MODCOU	2.15	1.44	0.71	0.45		0.25		
Milieu de siècle								
CLSM	1.92	1.54	0.37	0.69	0.32	0.08	-0.03	0.36
EROS	1.86	1.38	0.51	0.17		0.34	0.0	
GR4J	1.92	1.24	0.54				0.11	
SIM	1.97	1.50	0.54	0.33		0.14		
MODCOU	1.88	1.35	0.53	0.33		0.20		
Fin de siècle								
CLSM	1.89	1.56	0.32	0.66	0.28	0.07	-0.03	0.38
EROS	1.75	1.39	0.38	0.14		0.25	0.0	
GR4J	1.90	1.25	0.53				0.11	
SIM	1.92	1.48	0.44	0.30		0.13		
MODCOU	1.88	1.36	0.52	0.32		0.2		

Table 4: Bilan hydrique simulé par les différents modèles en moyenne sur le bassin et sur l'ensemble des simulations disponibles (Attention, le nombre de simulations disponibles varie d'un modèle à l'autre). Les valeurs sont en mm/jour. Precip: précipitations totales; ETR: évapotranspiration; QTOT: écoulement total; QI: infiltration vers la nappe (pour CLSM:QIRZFLW>0); QIRZFLW: uniquement pour CLSM (Bilan échange surface-nappe); Perte: perte ou gain vers l'extérieur du bassin (pour CLSM=QTOT-QR-QIRZFLW). Apport nappe: apport de l'eau de la nappe vers le réservoir sol (calculé par CLSM= QIRZFLW <0

sur les précipitations d'une part et l'évaporation et l'écoulement total d'autre part en moyenne sur les périodes. Ce dernier terme peut être perçu comme les débits à l'exutoire du bassin versant. L'impact sur les précipitations varie entre +2 % et -27 % en fonction des scénarii climatiques désagrégés et des périodes étudiées, sur l'ensemble du bassin. On notera que pour un même scénario climatique désagrégé, les précipitations ne sont pas tout à fait les mêmes pour chaque modèle hydrologique. Cela peut être dû à deux choses: soit le bassin versant simulé n'est pas exactement le même (restriction au bassin topographique ou inclusion de l'extension des nappes), soit la période simulée diffère quelque peu d'un modèle à l'autre du fait des périodes d'initialisation.

L'impact sur l'écoulement (et donc sur les débits) est environ deux fois plus forts que l'impact sur les précipitations (ie, une diminution des précipitations de 10% induit une diminution des débits de 20%). Les scénarii G1 milieu de siècle et GM fin de siècle sont

Impact sur l'Écoulement vs impact sur les Précipitations

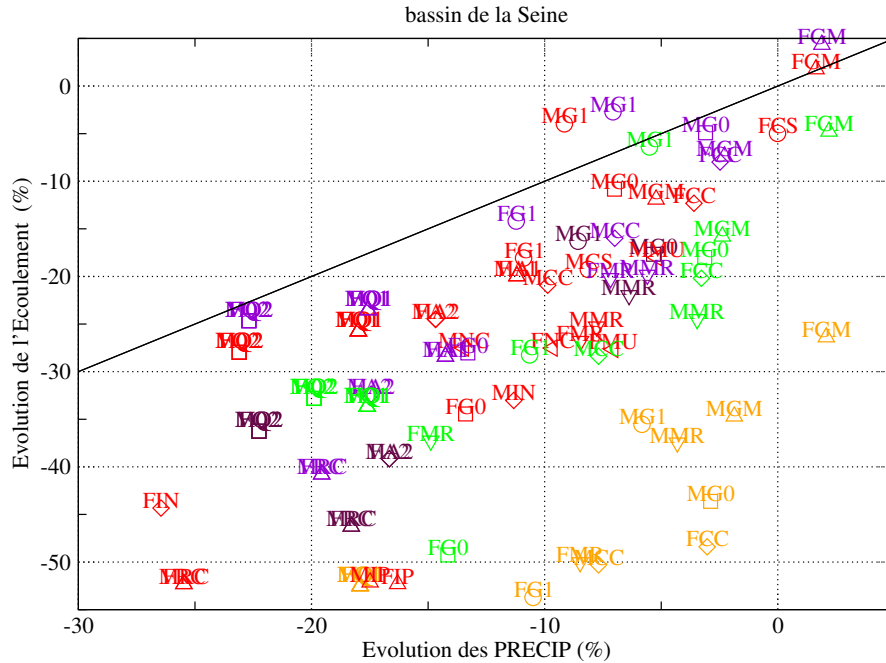


Figure 5: Evolution de l'écoulement total par rapport à l'évolution des précipitations en moyenne sur l'ensemble du bassin versant de la Seine par rapport au temps présent en pourcent. La ligne noire correspond à la droite 1:1. Chaque couleur correspond à un modèle hydro, et les labels à une simulation (cf tableaux 1 et 2). La lettre M indique le milieu de siècle et la lettre F la fin de siècle.

les moins pessimistes, avec une faible variation des débits. Le modèle hydrologique CLSM se distingue clairement des autres modèles, avec une diminution des débits de l'ordre de 30 % plus faible.

De façon cohérente, le modèle hydrologique CLSM simule une augmentation de l'évaporation pour tous les scénarii climatiques. Cette augmentation, autour de 10%, ne semble pas très liée aux évolutions des précipitations. Pour les autres modèles, il semble y avoir une relation assez linéaire entre l'impact sur l'évaporation et l'impact sur les précipitations, l'impact sur l'évaporation étant environ de 5% supérieur à celui des pluies (ie, si les pluies diminuent de 10% la diminution de l'évaporation est de l'ordre de 5%).

Il semble donc que le modèle CLSM subisse moins le stress hydrique généré par l'augmentation de la température et la diminution des précipitations. Cela peut être lié au formalisme du modèle qui gère trois types de surface: une surface stressée où il n'y a plus de transpiration de la végétation, une surface humide, et une surface saturée. Sur ces deux types de surface, la végétation n'est pas stressée. La notion de stress hydrique est alors fonction de la répartition entre ces trois types de surface, et ne joue donc pas directement comme un facteur réduisant la transpiration des plantes. Une autre particularité de CLSM est qu'il suppose la présence permanente d'une nappe (de type nappe perchée). La profondeur de

Impact sur l'Evaporation vs Impact sur les Précips

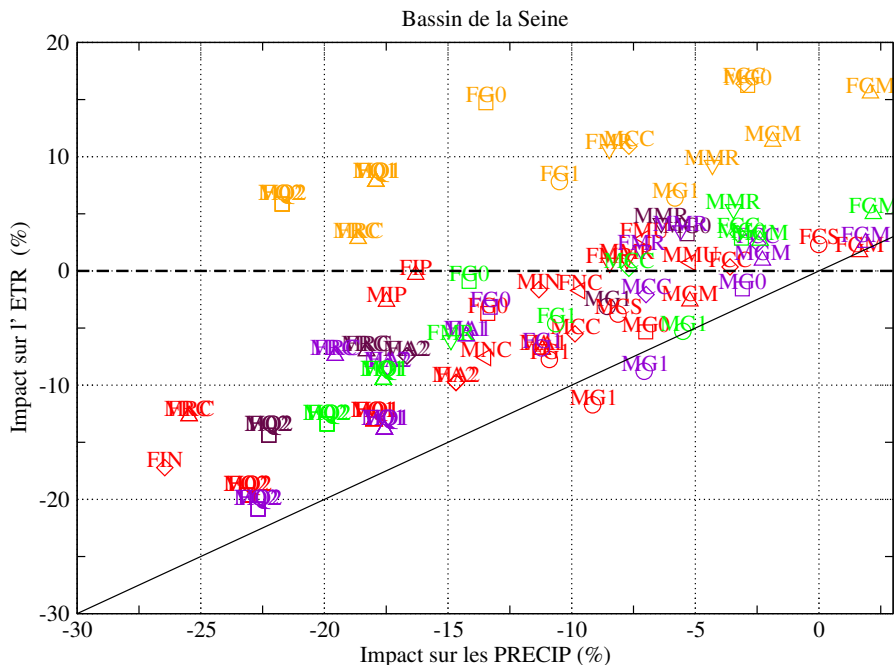


Figure 6: Même légende que Figure 5 mais pour l'évaporation

cette nappe varie, mais, elle reste constamment en contact avec la surface. Ainsi, la nappe peut alimenter le réservoir sol en eau (terme apport nappe dans le tableau 4), limitant ainsi fortement le stress hydrique, ce qui permet de soutenir l'évaporation en fin d'été.

Le tableau 4 résume le bilan hydrique simulé par chaque modèle pour les différentes périodes. Ce tableau ne donne qu'une indication partielle, car les valeurs sont moyennées sur l'ensemble des simulations climatiques disponibles. Or, ce nombre varie d'un modèle hydrologique à l'autre et d'une période à l'autre. Néanmoins, on peut apercevoir quelques caractéristiques. Notamment, on constate que le terme Apport de la nappe estimé uniquement par CLSM (voir discussion ci dessus) est relativement important par rapport à l'écoulement total, et que son rôle augmente nettement en milieu de siècle et en fin de siècle. Ce point peut sembler étonnant, car dans une phase où la recharge à la nappe diminue, celle-ci va certainement descendre, et se trouver plus souvent déconnecter de la surface. Ceci est un des arguments qui nous permet de prendre avec précaution les résultats de CLSM. Un autre point important est la prise en compte des pertes ou apports extérieurs. On constate que ceux-ci, lorsqu'ils sont estimés, sont soit négligeables, soit stables dans le temps.

3.4 Analyse des incertitudes

Afin de mieux quantifier les impacts sur les débits, il est nécessaire d'étudier les incertitudes, et d'estimer celles qui sont justifiées et celles qui ne le sont pas. Dans ce contexte, on

Analyse des impacts du CC selon 4 critères

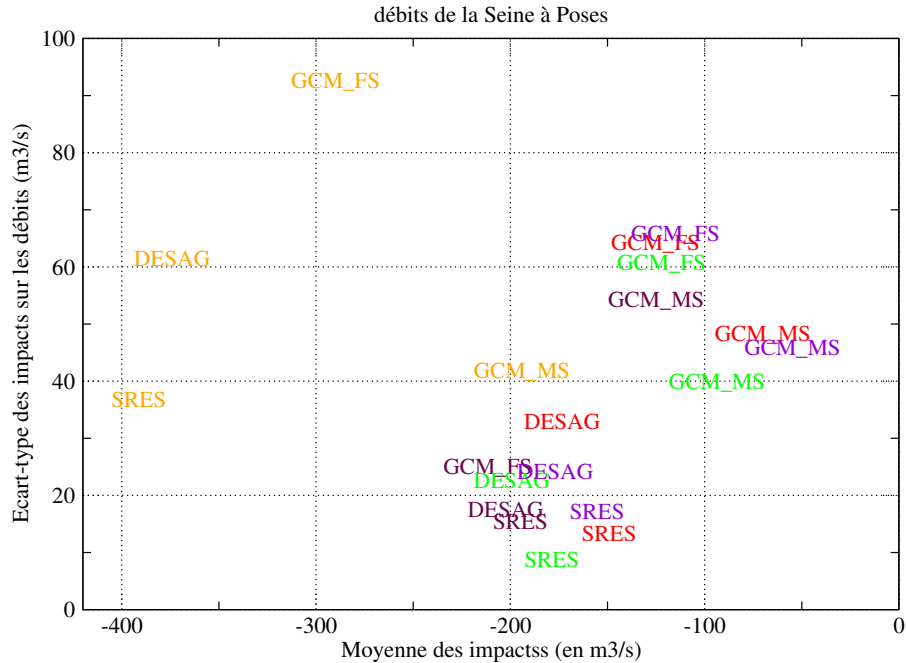


Figure 7: Moyennes et écart-types des impacts sur les débits de la Seine à Poses en fonction des méthodes de désagrégation (DESAG), des scénarii SRES (SRES), des modèles de climat en milieu et fin de siècle (GCM-MS et GCM-FS respectivement), pour chaque modèle hydrologique (cf couleurs).

Analyse des impacts et incertitudes

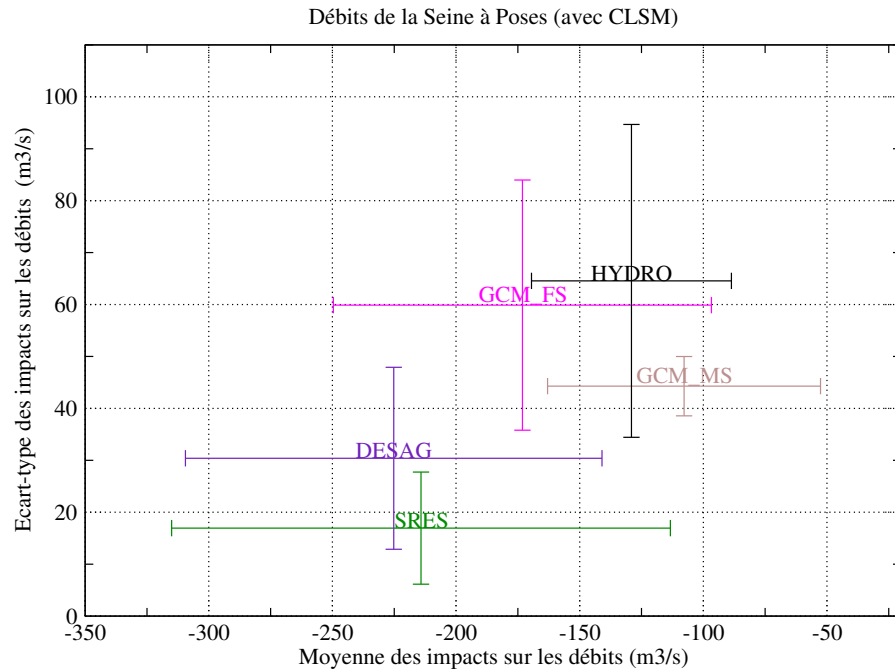


Figure 8: Moyennes et écart-types des impacts sur les débits de la Seine à Poses en fonction des méthodes de désagrégation (DESAG), des scénarii SRES (SRES), des modèles de climat en milieu et fin de siècle (GCM-MS et GCM-FS respectivement), et des modèles hydrologiques (HYDRO). Les barres d'erreurs sont associées aux moyennes sur le sous ensemble des modèles hydro.

suppose que les incertitudes sont assimilables aux dispersions que nous avons déjà vues. L'origine de cette dispersion est multiple. Elle provient tout d'abord de la prise en compte de différents scénarii SRES, de l'utilisation de plusieurs modèles de climat et méthodes de désagrégation, et enfin, de plusieurs modèles hydrologiques. Dans cette section, nous essayons d'analyser l'incertitude associée à ces différents éléments.

3.4.1 Analyse simpliste des incertitudes

Pour cette première analyse, on estime simplement les moyennes et écart-types des impacts selon les différents critères. La figure 7 présente la moyenne et l'écart type des impacts selon l'origine des incertitudes (méthodes de désagrégation, scénarii SRES, période, modèle de climat) obtenus pour chaque modèle hydrologique. On remarque que les résultats obtenus par CLSM ont non seulement en moyenne un impact plus marqué vers la diminution des débits, mais, également, les écart-types les plus forts pour un critère donné. Mis à part CLSM, on voit que l'incertitude la plus forte semble être associée aux simulations des modèles de climat en fin de siècle

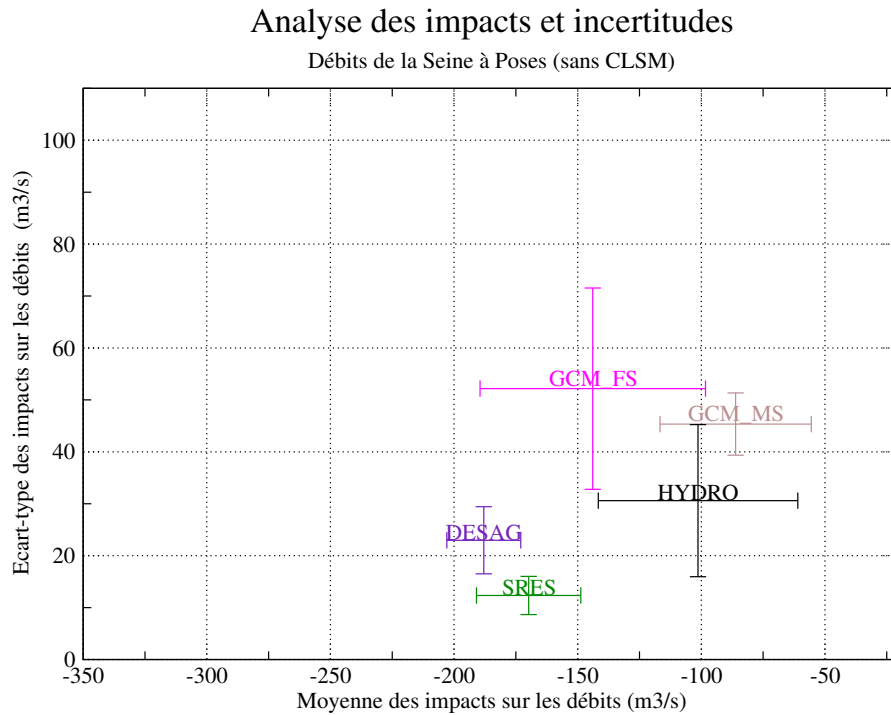


Figure 9: Même légende que la figure 8 mais sans le modèle CLSM

Lorsque l'on moyenne ces résultats sur l'ensemble des modèles hydrologiques, en associant cette fois-ci une barre d'erreur au sous-ensemble des modèles hydrologiques, on obtient à la fois des impacts moyens assez forts, et une incertitude maximale liées aux modèles hydrologiques (Figure 8). Or nous avons vu qu'une forte partie de cette dispersion semble liée aux résultats obtenus par le modèle CLSM, qui par ailleurs, peuvent sembler

douteux (cf section 3.3). Ainsi, on refait ce calcul en ne prenant pas en compte le modèle CLSM. Les résultats sont présentés figure 9.

Les résultats sont alors beaucoup moins bruités. On retrouve une incertitude plus marquée pour les GCMs en fin de siècle. Avec cette méthode simpliste, on peut en déduire que la diminution des débits de la Seine à Poses est de l'ordre de 150 ± 50 m³/s, ce qui correspond à un peu moins de 25 % des débits observés en temps présent.

Cependant, ces résultats sont relativement subjectifs, puisque on a attribué le même poids à des échantillons qui n'ont pas du tout le même nombre d'éléments, voir, dont les éléments sont incomplets. Ainsi, on ne dispose pas des simulations ARPEGE en milieu de siècle, et donc, pas des méthodes Quantile-Quantile et anomalie en milieu de siècle. De même, tous les modèles hydrologiques n'ont pas fait tourner toutes les simulations climatiques disponibles (cf. tableau 3).

Pour traiter ce problème plus proprement, on utilise une méthode statistique permettant de combler les échantillons manquants, et de calculer les dépendances entre les éléments.

3.4.2 Analyse statistique des incertitudes

Cette méthode consiste à reconstituer les valeurs manquantes pour disposer de l'ensemble des cas possibles. Une première étape consiste donc à identifier l'ensemble des critères disponibles. Dans notre cas, nous disposons de 5 modèles hydrologiques, 3 méthodes de désagrégation, 7 modèles de climats, 2 scénarii SRES, et 2 périodes de calcul. On a au total $420 = 5 \times 3 \times 7 \times 2 \times 2$ cas possibles, dont seulement 83 cas sont disponibles. Afin de limiter le nombre de variables à reconstituer, on réduit le nombre de cas possibles, en supposant que les deux scénarii SRES uniquement explorés dans notre cas par ARPEGE, ne forme pas un nouvel ensemble possible, mais constitue une donnée associée à celle du GCM. On a donc alors 8 GCMs disponibles, et un nombre de cas réduit à $240 = 5 \times 3 \times 8 \times 2$. Pour reconstituer les données, on se base sur la méthode des décompositions de Kendall et Stuart (1977), selon une méthodologie détaillée par Déqué et al., 2007. Les tableaux 5 et 6 illustrent l'échantillon des impacts sur les débits de la Seine à Poses avant et après reconstitution des données. Pour reconstituer les données, on se base sur l'estimation des moyennes. Ici, nous avons une variable qui dépend de 4 paramètres X_{ijkl} où i représente par exemple les 5 modèles hydrologiques disponibles, j les 3 méthodes de désagrégation, k les 8 GCMs et l les 2 périodes. En symbolisant la moyenne sur un critère par un point, la moyenne pour un modèle hydrologique donné de tous les cas possibles s'écrit $X_{i...}$. On suppose alors l'approximation suivante:

$$X_{ij..} = X_{i...} + X_{.j..} - X_{....}$$

En généralisant, on voit que l'on peut obtenir la valeur X_{ijkl} à partir de différentes moyennes, et reconstituer alors les valeurs manquantes. Ce procédé est itératif, et converge assez rapidement.

La variance totale dépend alors de simplet, doublet et triplet, et s'écrit

$$V = H + D + G + P + HD + HG + HP + DG + DP + GP + HDG + HDP + DGP$$

hydr	peri	desa	AA2	G0	G1	MPI	MRI	CCMA	GSER	AA1B
EROS	Ms	QQ	N	N	N	N	N	N	N	N
EROS	Ms	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
EROS	Ms	RT	N	-110.22	-92.82	-76.32	-136.34	N	N	-210.44
EROS	Fs	QQ	-205.11	N	N	N	N	N	N	N
EROS	Fs	AN	-185.11	N	N	N	N	N	N	N
EROS	Fs	RT	-216.96	N	N	N	N	N	N	-240.80
GR4J	Ms	QQ	N	N	N	N	N	N	N	N
GR4J	Ms	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
GR4J	Ms	RT	N	-16.78	-14.24	-24.57	-108.97	-72.23	-31.56	-117.15
GR4J	Fs	QQ	-154.39	N	N	N	N	N	N	-137.87
GR4J	Fs	AN	-176.47	N	N	N	N	N	N	-154.00
GR4J	Fs	RT	-200.06	-151.03	-78.47	-116.37	-119.04	-51.11	17.69	-124.32
MODC	Ms	QQ	N	N	N	N	N	N	N	N
MODC	Ms	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
MODC	Ms	RT	N	-40.51	-18.40	-34.01	-123.77	-84.69	-51.77	-138.98
MODC	Fs	QQ	-154.21	N	N	N	N	N	N	-156.34
MODC	Fs	AN	-155.91	N	N	N	N	N	N	-131.61
MODC	Fs	RT	-209.86	-175.40	-90.63	-123.39	-143.13	-59.73	5.74	-150.40
SIM	Ms	QQ	N	N	N	N	N	N	N	N
SIM	Ms	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
SIM	Ms	RT	N	-88.35	-50.40	-68.40	-129.22	-116.68	-56.22	-148.17
SIM	Fs	QQ	-184.19	N	N	N	N	N	N	-173.79
SIM	Fs	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
SIM	Fs	RT	-214.27	-217.54	-134.20	-150.20	-183.29	-101.54	-18.78	-99.59
CLSM	Ms	QQ	N	N	N	N	N	N	N	N
CLSM	Ms	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
CLSM	Ms	RT	N	-225.70	-172.20	-151.87	-191.20	-257.76	-167.76	N
CLSM	Fs	QQ	-416.59	N	N	N	N	N	N	-366.55
CLSM	Fs	AN	N	N	N	N	N	N	N	N
CLSM	Fs	RT	-331.60	-389.99	-260.68	-288.96	-256.16	-250.24	-127.66	N

Table 5: Valeurs disponibles des impacts simulés sur les débits de la Seine à Poses. Fs: fin de siècle; Ms: Milieu de siècle; AN: méthode des anomalies; QQ: méthode Quantile-Quantile; RT: méthode des régimes de temps; N: valeurs non disponibles

hydr	peri	desa	AA2	G0	G1	MPI	MRI	CCMA	GSER	AA1B
EROS	Ms	QQ	-175.74	-92.25	-192.85	-158.65	-123.05	-154.05	-185.67	-128.16
EROS	Ms	AN	-155.90	-127.62	-228.22	-194.02	-158.42	-189.42	-221.04	-167.32
EROS	Ms	RT	-168.80	-110.22	-92.82	-76.32	-136.34	-207.37	-165.88	-210.44
EROS	Fs	QQ	-205.11	-144.36	-208.41	-189.38	-119.79	-111.64	-114.37	-133.78
EROS	Fs	AN	-185.11	-180.86	-244.91	-225.88	-156.29	-148.14	-150.87	-166.49
EROS	Fs	RT	-216.96	-229.98	-176.03	-174.71	-200.73	-232.51	-162.12	-240.80
GR4J	Ms	QQ	-111.22	-10.03	-125.48	-118.10	-106.89	-83.26	-130.22	-115.32
GR4J	Ms	AN	-132.87	-84.20	-199.65	-192.27	-181.06	-157.43	-204.39	-137.13
GR4J	Ms	RT	-178.76	-16.78	-14.24	-24.57	-108.97	-72.23	-31.56	-117.15
GR4J	Fs	QQ	-154.39	-117.42	-162.86	-183.04	-90.11	-35.35	-54.18	-137.87
GR4J	Fs	AN	-176.47	-193.34	-238.78	-258.96	-166.03	-111.27	-130.10	-154.00
GR4J	Fs	RT	-200.06	-151.03	-78.47	-116.37	-119.04	-51.11	17.69	-124.32
MODC	Ms	QQ	-114.44	-33.98	-129.86	-127.77	-121.91	-95.95	-150.66	-134.05
MODC	Ms	AN	-115.70	-77.53	-173.41	-171.32	-165.46	-139.50	-194.21	-115.01
MODC	Ms	RT	-190.40	-40.51	-18.40	-34.01	-123.77	-84.69	-51.77	-138.98
MODC	Fs	QQ	-154.21	-140.72	-173.95	-189.00	-113.12	-42.90	-65.07	-156.34
MODC	Fs	AN	-155.91	-186.02	-219.25	-234.30	-158.42	-88.20	-110.37	-131.61
MODC	Fs	RT	-209.86	-175.40	-90.63	-123.39	-143.13	-59.73	5.74	-150.40
SIM	Ms	QQ	-142.90	-82.95	-162.99	-163.29	-128.50	-129.06	-156.24	-196.58
SIM	Ms	AN	-172.59	-102.41	-182.46	-182.75	-147.96	-148.53	-175.71	-107.94
SIM	Ms	RT	-201.51	-88.35	-50.40	-68.40	-129.22	-116.68	-56.22	-148.17
SIM	Fs	QQ	-184.19	-191.78	-226.45	-224.73	-162.21	-93.64	-98.52	-173.79
SIM	Fs	AN	-208.52	-207.04	-241.71	-239.99	-177.47	-108.90	-113.77	-72.57
SIM	Fs	RT	-214.27	-217.54	-134.20	-150.20	-183.29	-101.54	-18.78	-99.59
CLSM	Ms	QQ	-359.20	-299.96	-364.46	-326.42	-270.14	-349.81	-347.44	-338.56
CLSM	Ms	AN	-317.05	-241.07	-305.57	-267.53	-211.24	-290.92	-288.55	-280.64
CLSM	Ms	RT	-286.15	-225.70	-172.20	-151.87	-191.20	-257.76	-167.76	-266.80
CLSM	Fs	QQ	-416.59	-427.35	-416.04	-426.60	-298.19	-305.44	-270.50	-366.55
CLSM	Fs	AN	-382.86	-378.19	-366.88	-377.44	-249.04	-256.29	-221.34	-310.80
CLSM	Fs	RT	-331.60	-389.99	-260.68	-288.96	-256.16	-250.24	-127.66	-289.07

Table 6: Même légende que précédemment, mais, une fois les valeurs reconstituées (ce tableau illustre la méthode de reconstitution. Les valeurs reconstituées doivent être prises avec précaution)

avec par exemple $H = \sum_{i=1,5} (X_{i...} - X_{...})^2$ et $HD = \sum_{i=1,5} \sum_{j=1,3} (X_{ij..} - X_{i...} - X_{..j.} + X_{...})^2$

Une fois l'ensemble du tableau 6 complété, on peut alors d'une part calculer la moyenne et l'écart type de l'impact sur les débits, et analyser l'origine des incertitudes. La moyenne des impacts sur les débits de la Seine à Poses est, en prenant en compte les résultats du modèle CLSM, de -172 ± 86 m³/s. Sans surprise, on constate tableaux 7 et 8 que l'origine majeure des incertitudes provient des modèles hydrologiques. Cela reste cependant suspect, et est principalement dû aux résultats douteux du modèle CLSM (cf discussion bilan hydrique).

Type de variance	variance avec CLSM (%)	variance sans CLSM (%)
Hydro (H)	46.03	8.74
Période (P)	2.01	3.12
Désagrégation (D)	4.06	4.63
GCM (G)	4.98	12.93
H-P	0.23	0.03
H-D	4.61	4.00
H-G	2.74	3.07
P-D	0.36	0.78
P-G	7.73	14.59
D-G	8.07	15.29
H-P-D	0.17	0.45
H-P-G	0.52	1.29
H-D-G	18.25	30.66
P-D-G	0.22	0.44

Table 7: Pourcentage de variance lié aux différentes composantes. Les lettres des doublets et triplets sont données pour chaque critère

Ainsi, nous refaisons cette analyse en ne prenant pas en compte les résultats de CLSM. La reconstitution des données converge alors vers des résultats moins pessimistes. L'analyse de ces résultats est donnée dans les tableaux 7 et 8. On obtient alors un impact moyen sur les débits de la Seine à Poses de -129 ± 45 m³/s à l'horizon 2050 et -152 ± 59 m³/s à l'horizon 2100, soit de -24 à -28% par rapport aux débits en temps présent. Ces résultats sont relativement cohérents avec les résultats obtenus avec la méthode simpliste. La principale source d'incertitude est associée à la dispersion des résultats des modèles de climat que ça soit pour leur rôle en simplet (13%) ou en association en doublet avec les méthodes de désagrégation (15%), et en triplet avec les modèles hydrologiques et les méthodes de désagrégation (30.66%) qui est le terme dominant de la variance. Quand on calcule la variance complète de chaque élément en prenant en compte doublets et triplets selon les équations du types $V(H) = H + HD + HG + HP + HDG + HDP + HGP + HDGP$ on voit que les sources de variations (et donc d'incertitude) dominantes sont celles associées aux GCMs, suivi par celles associées aux méthodes de désagrégation. On constate

que cet aspect qui était négligé dans les précédentes études GICC joue un rôle important. La troisième source d'incertitude est celle associée aux modèles hydrologiques, et la quatrième, celle associée à la période d'intérêt. Ce dernier point ne paraît pas étonnant, car nous avons vu dans les précédents résultats que la plus grande partie de l'impact est déjà subit à l'horizon 2050.

variance	Variance Hydro	Variance Période	Variance désagrégation	Variance GCM
avec CLSM	72.56	11.25	35.75	42.52
sans CLSM	48.24	20.68	56.24	78.26

Table 8: Variance par critère en prenant en compte les parts des incertitudes liées aux simplets, doublets et triplets

4 Analyse des impacts sur le bassin de la Somme

Sur le bassin de la Somme, nous avons 6 modèles disponibles, mais, suite à différents problèmes, le nombre de simulation disponible est relativement limité. In fine, seuls 2 modèles ont réalisés l'ensemble des simulations: GR4J et MODCOU. Le tableau 9 résume l'ensemble des scenarii climatiques désagrégés simulé par les modèles hydrologiques sur le bassin de la Somme. A ce jour, les simulations de SIM en terme de débits et de piézométrie n'ont pas pu être exploitées fautes de fichiers corrompus. On s'intéresse encore une fois à l'ensemble du bassin, représenté par la station de la Somme à Abbeville.

4.1 Analyse des réponses sur les débits

Dans un premier temps, on s'intéresse aux débits annuels bruts. La figure 4.1 présente l'ensemble des résultats disponibles pour les 3 périodes (temps présent, milieu et fin de siècle). Comme pour le cas de la Seine, on constate une assez forte dispersion même sur le temps présent. Vu le nombre réduit de simulation, on distingue mieux les différences entre les résultats obtenus avec les simulations ARPEGE-A2 désagrégées avec la méthode quantile-quantile (RD2) et régime de temps (RC2), et ceux pour tous les modèles hydrologiques. Or la seule différence entre ces deux simulations climatiques est la façon dont elles ont été désagrégées. Cette dispersion est plus importante sur le bassin de la Somme que sur celui de la Seine. Elle est en partie liée au rôle très important joué par la nappe de la craie. Or certains modèles simulent explicitement cette nappe, d'autres implicitement. Pour les modèles qui simulent explicitement la nappe, le niveau initial est estimé à partir d'un régime permanent calculé en prenant en compte les premières années disponibles. Les différences sur le niveau initial peuvent atteindre 1m en temps présent, et plus de 2m en fin de siècle en moyenne sur l'ensemble du bassin. Les écarts sont importants sur les 3 périodes, mais, ils sont également relativement important en terme d'écart par rapport au temps présent (Figure 10). Comme pour la Seine on constate que les impacts simulés par

scénario	periode	CLSM	GR4J	GARDENIA	MARTHE	MODCOU	SIM
A1	TP	N	O	N	N	O	N
	FS	N	O	N	N	O	N
A2	TP	N	O	O	N	O	N
	FS	N	O	O	N	O	N
RD1	TP	N	O	N	N	O	O
	FS	O	O	N	O	O	O
RD2	TP	O	O	O	O	O	O
	FS	O	O	O	O	O	O
RC1	TP	O	O	O	O	O	O
	MS	O	O	O	N	O	O
	FS	O	O	O	N	O	O
RC2	TP	O	O	O	N	O	O
	FS	O	O	O	O	O	O
G0	TP	N	O	O	O	O	O
	MS	N	O	O	N	O	O
	FS	N	O	N	N	O	O
G1	TP	N	O	O	N	O	O
	MS	N	O	O	N	O	O
	FS	N	O	N	N	O	O
CC	TP	N	O	O	N	O	O
	MS	N	O	O	N	O	O
	FS	N	O	N	N	O	O
GM	TP	N	O	O	N	O	O
	MS	N	O	O	N	O	O
	FS	N	O	N	N	O	O
MR	TP	N	O	O	N	O	O
	MS	N	O	O	N	O	O
	FS	N	O	N	N	O	O
EC	TP	N	O	O	N	O	O
	MS	N	O	O	N	O	O
	FS	N	O	N	N	O	O

Table 9: Liste des scénarii climatiques désagrégés utilisés par chaque modèle hydrologique sur le bassin de la Somme. TP= Temps Présent, MS=Milieu de Siècle, FS= Fin de Siècle. Les labels des scénarii climatiques désagrégés correspondent à ceux du tableau 2

Débits de la Somme à Abbeville

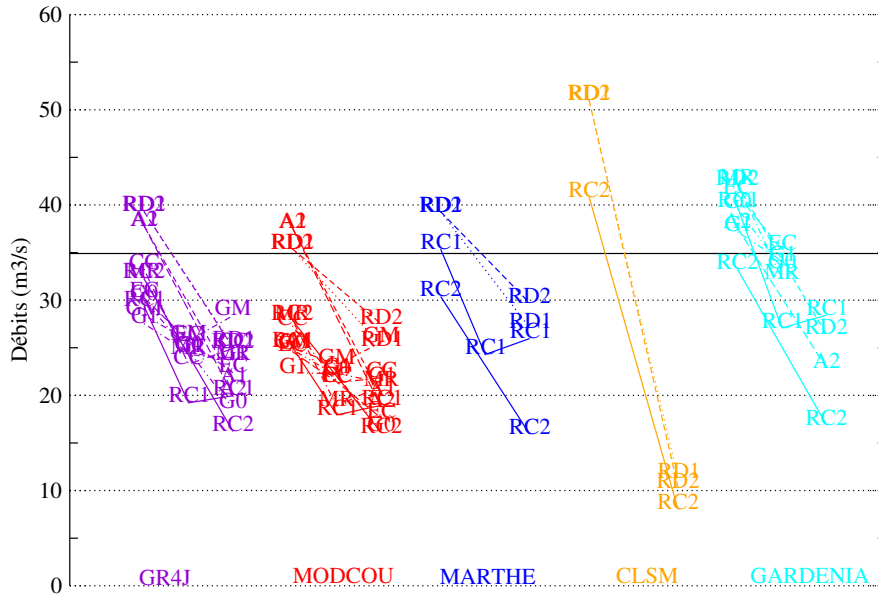


Figure 10: Evolutions des débits annuels moyens de la Somme à Abbeville simulés par les modèles hydrologiques (couleurs) pour les différents scénarii climatiques (label). Le trait noir correspond aux observations temps présent. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent, la deuxième au milieu de siècle, et la troisième, à la fin de siècle.

Impacts sur les débits de la Somme à Abbeville

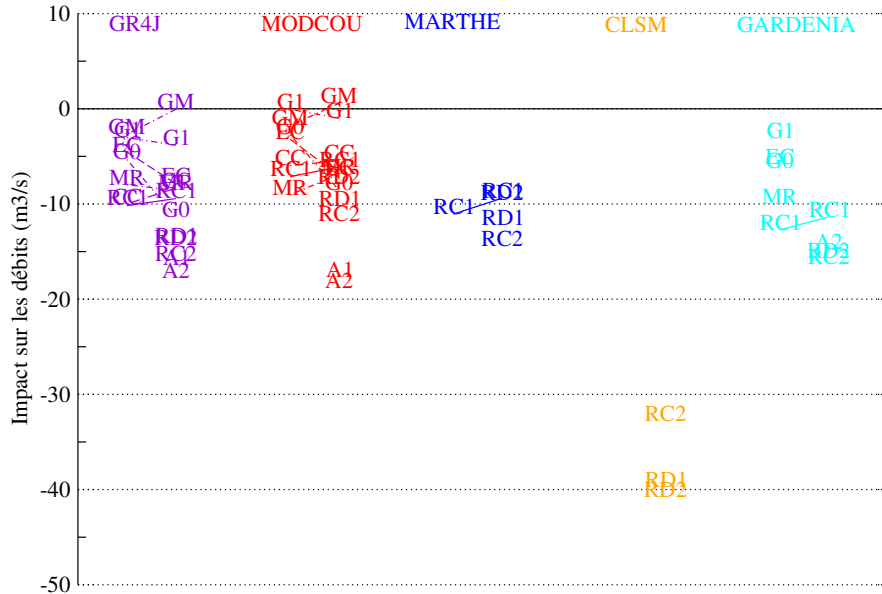


Figure 11: Evolutions des débits annuels moyens de la Somme à Abbeville par rapport aux temps présents simulés, pour chaque scénario climatique désagrégé. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux écarts entre milieu de siècle et temps présent, la deuxième aux écarts entre fin de siècle et temps présent.

le modèle CLSM sont nettement plus importants que ceux estimés par les autres modèles, avec une diminution des débits de l'ordre de 30 m³/s alors que pour les autres modèles, la diminution est plutôt de l'ordre de 10m³/s.

La figure 12 présente les débits mensuels de la Somme à Abbeville pour les 3 périodes. On constate tout d'abord la très forte dispersion des débits estimés en temps présent. Cela est en partie lié au problème discuté précédemment, mais aussi, à des problèmes de dynamique notamment du modèle CLSM. Ainsi, si on ne prend pas en compte le modèle CLSM, la dispersion temps présent est fortement réduite (figure 13). Dans les deux cas, la moyenne mensuelle de l'ensemble reste néanmoins proche des observations (courbe rouge). En milieu de siècle, la dispersion est nettement plus réduite. Cela est en partie lié au faible nombre de simulations disponibles. La diminution des débits est relativement homogène tout le long de l'année, mais reste un peu plus marquée en automne et en hiver. En fin de siècle, la dispersion est plus forte. En moyenne, les débits diminuent peu par rapport à 2050, mais, l'enveloppe des débits possibles atteint des valeurs extrêmement faibles, surtout lorsqu'on regarde les résultats avec CLSM.

4.2 Analyse des réponses sur la piézométrie

La figure 14 présente l'impact du changement climatique sur le niveau piézométrique d'une cinquantaine de piézomètres simulés par MODCOU et GARDENIA. L'abscisse correspond au niveau piézométrique moyen simulé en temps présent pour chaque station. L'ordonnée est l'évolution entre les niveaux moyens en milieu de siècle et le temps présent (préfixe M), et entre les niveaux moyens en fin de siècle et le temps présent (préfixe F). Pour Gardenia, les simulations ARPEGE représentent les impacts en fin de siècle alors que tous les autres correspondent à l'horizon 2050. Les stations choisies par les deux modèles ne sont pas exactement les mêmes. On note que la grande majorité des simulations conduisent à une diminution du niveau piézométrique. Cette diminution est relativement limitée pour les piézomètres dont le niveau est inférieur en temps présent à 25 m, et qui se situe majoritairement en plaine près d'une rivière. Pour les piézomètres situés sur les plateaux (avec un niveau en temps présent élevé), l'impact est nettement plus fort (jusqu'à -15 m). En moyenne, la droite de régression a une pente très comparable à celle de la Seine (-3% pour l'horizon 2050 et -4% pour l'horizon 2100). Mais, l'ordonnée à l'origine est un peu différente : plus haute à l'horizon 2050 -0.85m sur la Somme au lieu de -1m sur la Seine, et plus basse en 2100 : -1.31m au lieu de -1.12 sur la Seine. Cependant, on constate sur le bassin de la Somme que les estimations de GARDENIA sont moins pessimistes que celles de MODCOU. Il est difficile à ce stade de savoir si le fait que le modèle MODCOU soit distribué et pas le modèle GARDENIA puisse être à l'origine de ces écarts.

4.3 Analyse du bilan hydrique

Comme pour le bassin de la Seine, on retrouve un impact sur les précipitations variant selon les simulations climatiques de 0 à -30 % pour les différents scénarii climatiques désagrégés et les différentes périodes (figure 15). L'impact sur l'écoulement (et donc les débits) est

Débits mensuels de la Somme à Abbeville

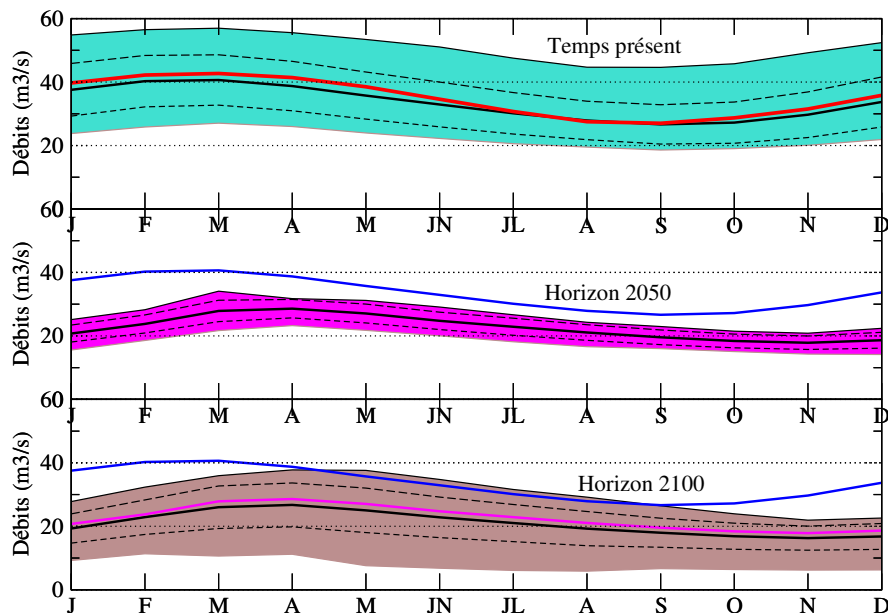


Figure 12: Simulation des débits mensuels de la Somme à Abbeville par l'ensemble des modèles hydros et sur l'ensemble des scénarios. L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. En haut: temps présent, la courbe rouge représente la moyenne mensuelle observée. Au milieu Horizon 2050: la courbe bleue représente la moyenne temps présent. En bas Horizon 2100: les courbes bleues et roses représentent les simulations temps présent et milieu de siècle respectivement.

Débits mensuels de la Somme à Abbeville

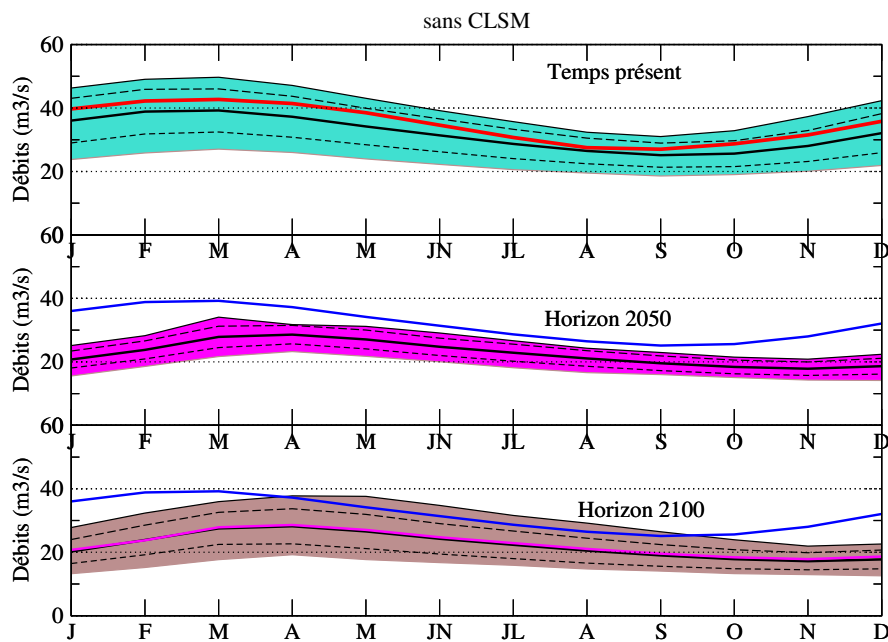


Figure 13: Même légende que précédemment mais sans le modèle CLSM

Evolution des niveaux piézométriques

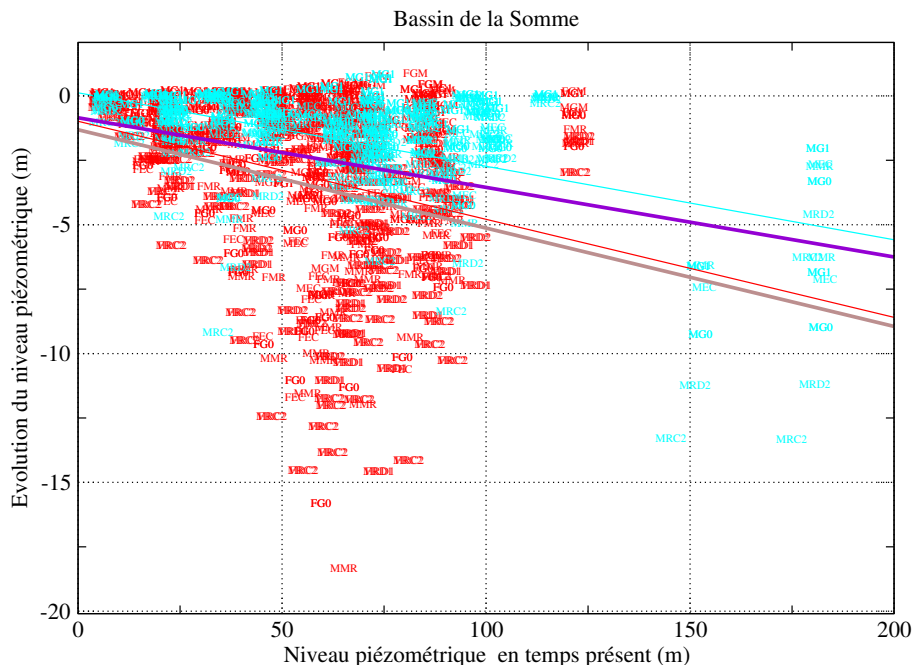


Figure 14: Impact sur les niveaux piézométriques simulés par MODCOU et GARDENIA sur les stations simulées. Le nombre et l'emplacement des stations diffèrent quelque peu entre les modèles. Les labels font référence aux scénarii climatiques désagrégés, le préfix M indiquant les résultats en milieu de siècle et F en fin de siècle. Les droites violettes et marron représente les droites de regression pour le milieu et fin de siècle respectivement. On distingue également en milieu de siècle les droites de regression calculées uniquement avec les sorties de GARDENIA (cyan) et de MODCOU (rouge).

également environ deux fois plus forts que celui sur les précipitations, avec une moyenne autour des -30%.

Le modèle CLSM se distingue encore nettement, avec des impacts sur les débits de l'ordre de -80% en fin de siècle, alors que cet impact ne dépasse pas -50% pour les autres modèles. Encore une fois, cela s'explique par une évaporation nettement plus forte dans CLSM, supérieur à +15% quelque soit l'impact sur les précipitations (figure 16). Pour les autres modèles hydrologiques, on retrouve des résultats proches de ceux obtenus sur le bassin de la Seine, ie, un impact sur l'évaporation de l'ordre de 5% plus fort que l'impact sur les précipitations.

Nous ne disposons pas sur le bassin de la Somme de l'ensemble des termes du bilan hydrique pour tous les modèles hydrologiques. Néanmoins, le tableau 10 résume les bilans hydriques obtenus par les 6 modèles hydrologiques en moyenne sur l'ensemble des scénarii climatiques désagrégés simulés. On rappelle que seuls GR4J et MODCOU ont effectué l'ensemble des simulations disponibles. MARTHE et CLSM n'ont simulé que les scénarios ARPEGE, et n'ont pas de résultats pour l'horizon 2050.

	Precip	ETR	QTOT	QI	QIT	QR	Perte ou Gain	Apport nappe
Temps présent								
CLSM	1.96	1.24	0.74	0.79	0.60	0.03	0.51	0.19
GARDENIA	1.96	1.35	0.61	0.32		0.29	-0.01	
GR4J	1.93	1.45	0.53	?		?	0.03	
MARTHE	2.10	1.39	0.77	0.61		0.06		
MODCOU	1.94	1.47	0.46	0.45		0.01		
SIM	1.97	1.48	0.49	0.48		0.01		
Horizon 2050								
CLSM								
GARDENIA	1.66	1.24	0.43	0.25		0.18	-0.01	
GR4J	1.64	1.36	0.36	?		?	0.02	
MARTHE								
MODCOU	1.63	1.29	0.34	0.33		0.01		
SIM	1.86	1.49	0.37	0.36		0.01		
Horizon 2100								
CLSM	1.52	1.45	0.15	0.16	0.03	0.02	0.12	0.13
GARDENIA	1.61	1.24	0.37	0.22		0.15	-0.01	
GR4J	1.64	1.36	0.41	?		?	0.02	
MARTHE	1.65	1.17	0.48	0.44		0.04		
MODCOU	1.63	1.29	0.34	0.33		0.01		
SIM	1.70	1.36	0.34	0.33		0.01		

Table 10: Bilan hydrique simulé par les différents modèles en moyenne sur le bassin de la Somme et sur l'ensemble des simulations disponibles (Attention, le nombre de simulation disponible varie d'un modèle à l'autre). Les valeurs sont en mm/jour. Precip: précipitations totales; ETR: évapotranspiration; QTOT: écoulement total; QI: infiltration vers la nappe (pour CLSM:QIRZFLW>0); QIRZFLW: uniquement pour CLSM (Bilan échange surface-nappe); Perte: perte ou gain vers l'extérieur du bassin (pour CLSM=QTOT-QR-QIRZFLW). Apport nappe: apport de l'eau de la nappe vers le réservoir sol (calculé par CLSM= QIRZFLW <0

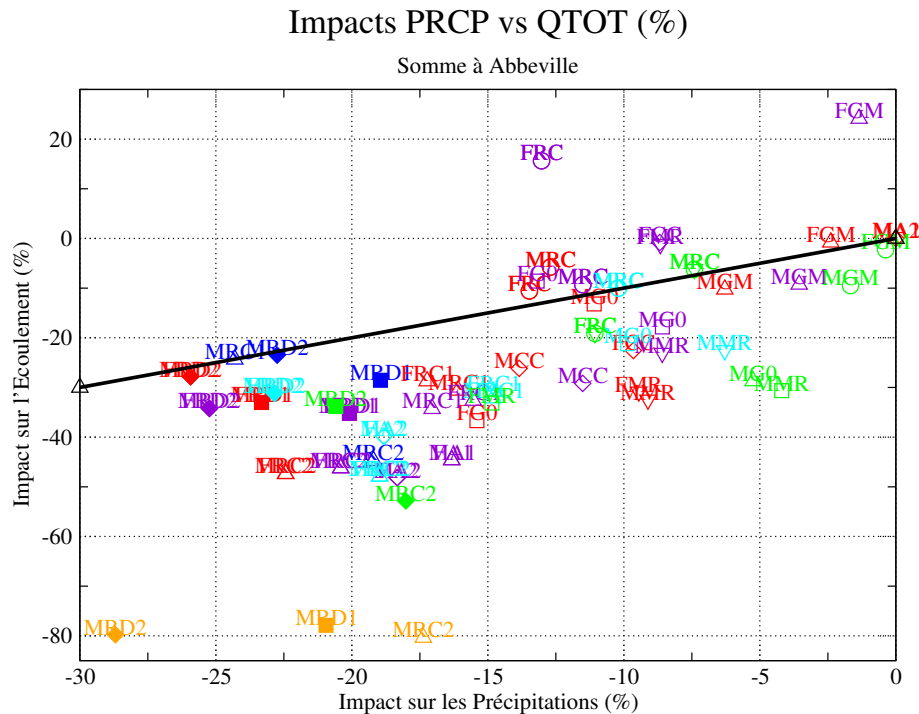


Figure 15: Impacts sur les précipitations versus impacts sur l'écoulement total en pourcent pour le bassin de la Somme à Abbeville. Les couleurs correspondent à un modèle hydrologique (??) et les labels à un scénario climatique désagrégé (2)

Pour CLSM, on constate que si sur ce bassin les apports de la nappe baisse en fin de siècle par rapport au temps présent, leur importance relative augmente nettement. Ces apports représentent 25% des débits en temps présent, et 86% en fin de siècle. Les pertes (ici un gain) sont également importantes, et correspondent a priori à une vidange du réservoir profond. Pour les autres modèles, ce terme est négligeable.

La répartition entre écoulement rapide (QR) et écoulement lent (QI) varie fortement d'un modèle à l'autre, ce qui est en partie lié au fait que ces termes ne signifient pas exactement la même chose pour ces modèles. Pour Marthe, Modcou et SIM, le terme QI est la quantité d'eau qui recharge la nappe. Pour les autres, la définition est moins évidente.

4.4 Analyse des incertitudes

Nous procédons sur le bassin de la Somme comme pour celui de la Seine, avec une méthode simpliste et une méthode plus statistique. Encore une fois, on considère ici que la dispersion des résultats, lorsqu'elle est justifiée, est représentative de l'incertitude.

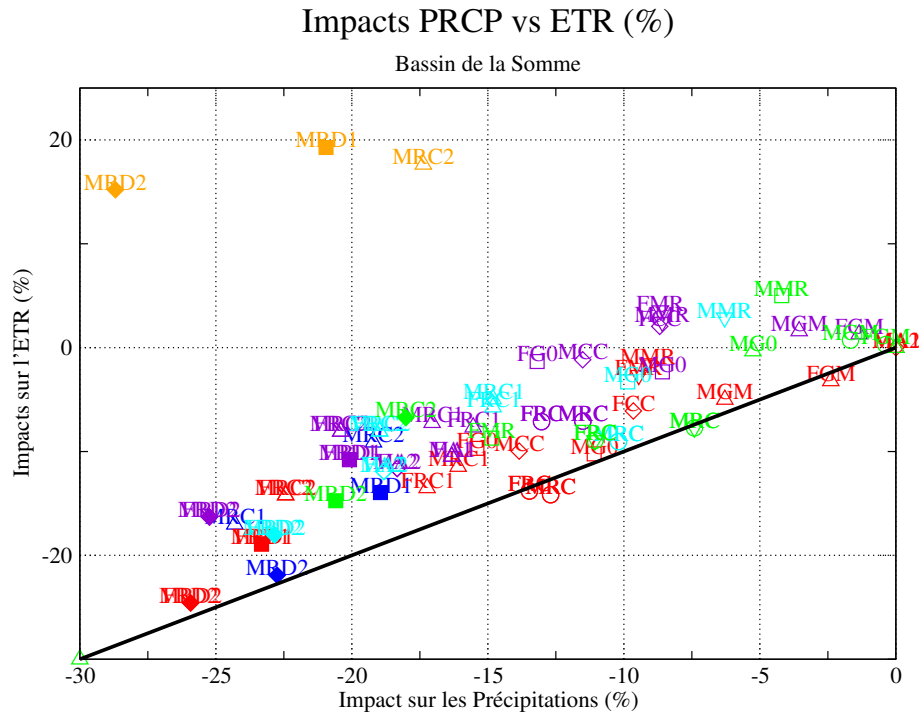


Figure 16: Même légende que précédemment mais pour les impacts de l'ETR vs Précipitation.

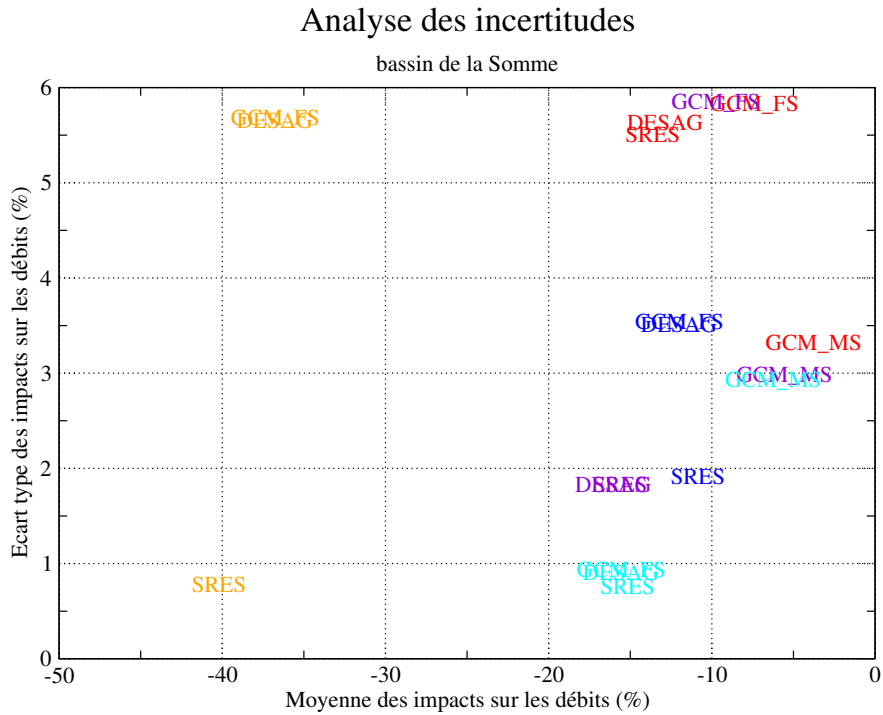


Figure 17: Analyse des impacts par origine des incertitudes pour chaque modèle hydrologique

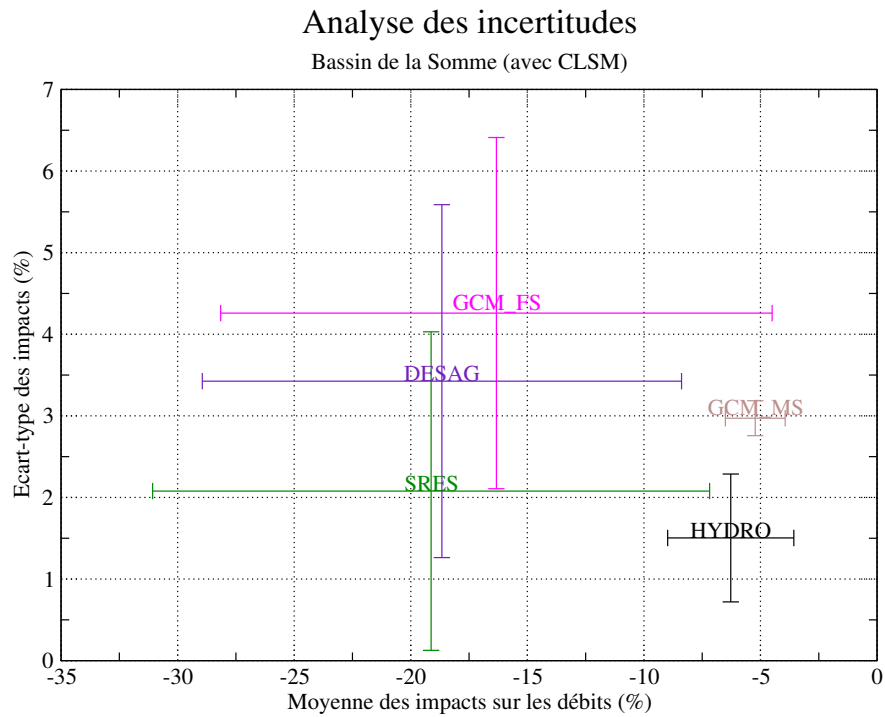


Figure 18: Analyse des impacts par origine des incertitudes en moyenne sur les modèles hydrologiques, en incluant le modèle CLSM.

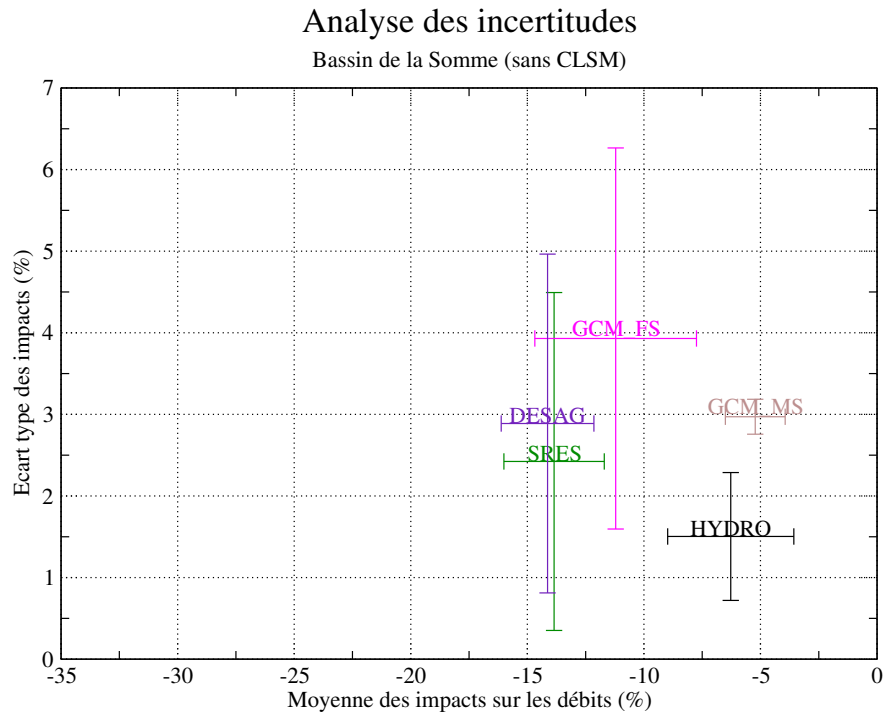


Figure 19: Analyse des impacts par origine des incertitudes en moyenne sur les modèles hydrologiques, sans le modèle CLSM.

4.4.1 Analyse simpliste des incertitudes

La figure 17 représente la moyenne et écart type des impacts en moyenne pour chaque modèle hydrologique, pour les différentes origines des incertitudes (scénarii SRES, méthode de désagrégation, modèle de climat en milieu et fin de siècle). Encore une fois, on se rend compte que le modèle CLSM a un comportement singulier, avec des impacts très forts en moyenne. Pour les autres modèles, les impacts sont relativement similaires, mais, les écart-types varient fortement. Cela peut être lié en partie au nombre de simulations disponibles, qui varie fortement d'un modèle hydrologique à l'autre sur ce bassin. En moyenne sur l'ensemble des modèles hydrologiques (figure 18), on retrouve une forte variabilité des impacts selon l'origine des incertitudes, comme pour le bassin de la Seine. Mais, ce coup ci, les écart-types les plus importants sont associés aux modèles de climat en fin de siècle, l'incertitude associée aux modèles hydrologiques semblent assez réduite. Cependant, la confiance dans les simulations du modèle CLSM étant réduite, nous refaisons cette analyse sans le prendre en compte. Les impacts moyens par type d'incertitude sont alors beaucoup plus cohérents, et les écarts types nettement réduits. On peut considérer que l'impact sur les débits de la Somme est d'environ -10 ± 3 m³/s.

4.4.2 Analyse statistique des incertitudes

Type de variance	variance avec CLSM (%)	variance sans CLSM (%)
Hydro (H)	73.16	4.28
Période (P)	0.18	0.06
Désagrégation (D)	1.20	0.57
GCM (G)	6.88	22.75
H-P	0.67	1.00
H-D	3.70	14.34
H-G	1.33	5.69
P-D	0.17	0.60
P-G	1.22	3.92
D-G	1.31	4.08
H-P-D	0.15	0.44
H-P-G	0.13	0.47
H-D-G	9.94	41.21
P-D-G	0.17	0.59

Table 11: Pourcentage de variance lié aux différentes composantes. Les lettres des doublets et triplets sont données pour chaque critère

Pour analyser plus finement nos résultats, et en particulier pour prendre en compte le fait que seul 55 cas sur 240 possibles sont disponibles, on utilise la méthode statistique permettant de reconstituer les valeurs manquantes et de calculer les variances pour chaque

variance	Variance Hydro	Variance Période	Variance désagrégation	Variance GCM
avec CLSM	88.88	2.49	16.63	20.98
sans CLSM	67.43	7.08	61.82	78.71

Table 12: Variance par critère en prenant en compte les parts des incertitudes liées aux simplets, doublets et triplets

origine des incertitudes. Les résultats sont donnés dans les tableaux 11 et 12 avec et sans prendre en compte les résultats de CLSM. Comme sur le bassin de la Seine, on retrouve comme source d'incertitude dominante les modèles de climat. L'association des incertitudes associées aux modèles climatiques et aux méthodes de désagrégation est également importantes (14%). Le terme dominant étant l'association des trois sources d'incertitudes [modèle de climat, méthode de désagrégation, modèle hydrologique]. La variance des termes associées aux modèles de climat est dominante (79 %, tableau 12). Celle associée à la période est faible, car les principaux impacts sont déjà subis à l'horizon 2050.

Avec cette analyse, on peut estimer clairement l'impact moyen sur les débits de la Somme à Abbeville: nous obtenons une baisse des débits de -10.3 ± 5 m³/s à l'horizon 2050 et de -10.0 ± 6 m³/s à l'horizon 2100, soit environ -29% par rapport au temps présent.

References

- [1] Boé J., L. Terray, F. Habets et E. Martin : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, 111:D23106, 2006.
- [2] Déqué M., Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57:16-26, 2007.
- [3] Déqué M, D. P. Rowel, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, B. van den Hurk, 2007, An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections, *Climatic Change* 81:53-70 DOI 10.1007/s10584-006-9228-x
- [4] Ducharne A, Baubion C, Beaudoin N, Benoit M, Billen G, Brisson N, et al. Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *SciTotal Environ* 2007;375:292-311 (this issue). doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.011.
- [5] Gascoïn S., A. Ducharne, P. Ribstein, M. Carli, F. Habets, Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France), *Journal of Hydrology*, Volume 368, Issues 1-4, 30 April 2009, Pages 105-116, ISSN 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.01.039.

- [6] Habets, F., A. Boone, J.L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchisteguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana-Segui, F. Rousset-Regimbeau and P. Viennot (2008): The SIM hydrometeorological model over France, *J. Geoph. Res.* , 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.
- [7] Habets F., S. Gascoin, S. Korkmaz, D. Thiéry, M. Zribi, N. Amraoui, M. Carli, A. Ducharne, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, J. Noilhan, C. Ottlé and P. Viennot, 2009, Multi-model comparison of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France), to be submitted to HESS
- [8] Kendall M, Stuart A, Ord JK (1977) The advanced theory of statistics. Vol 3: design and analysis, and time series, 4th edition, Charles Griffin and Co Ltd, 780 pp
- [9] Korkmaz, S., E. Ledoux, H. Onder, Application of the coupled model to the Somme river basin. *J. Hydrol.* (2009), doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.008
- [10] Ledoux, E., E. Gomez, J.M. Monget, C. Viavattene, P. Viennot, A. Ducharne, M. Benoit, C. Mignolet, C. Schott and B. Mary (2007) Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain, *Science Tot. Env.*, 375, 1-3, 33-47
- [11] Pagé, C., L. Terray et J. Boé, 2008: Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report TR/CMGC/08/64, CERFACS, Toulouse, France.
- [12] Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4): 275-289.
- [13] Quintana- Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, L. Franchisteguy, S. Morel and J. Noilhan (2008): The SAFRAN atmospheric analysis: Description and validation. *J. Applied Meteorol. and Climatology*, 47, 92-107
- [14] Thiéry D. (2003) Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation. Rapport public BRGM n° RP52832. (<http://www.brgm.fr/publication/pubDetailRapportSP.jsp?id=RSP-BRGM/RP-52832-FR>)
- [15] Thiéry, D. et Moutzopoulos, C., 1995 - Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM "Régionalisation en hydrologie, application au développement". In Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions, pp. 285 295.
- [16] Thiéry, D., Lucas, C., Diagana, B. 1993.- Modelling the aquifer recovery after a long duration drought in Burkina Faso proceedings of the IAHS/IAMAP International Symposium on "extreme hydrological events: precipitation, floods and drought" Yokohama, Japon, Juill. 1993. Publication AIHS 213 pp 43-50.