



Hydrologie souterraine

Bassin de la Seine

Octobre 2012

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Le modèle hydrogéologique du bassin de la Seine a été initié dans le programme de recherche PIREN-Seine par la thèse d'E. Gomez (2002). L'application du volet purement « hydrogéologique » de ce modèle a été, ces dernières années, utilisée, valorisée et sans cesse améliorée dans le cadre d'études commanditées, entre autres, par la DRIEE Île de France. Elle a également servi, à deux reprises, dans le cadre du programme GICC (Gestion et Impact du Changement Climatique) du Ministère de l'Environnement dans les projets « GICC Seine » et « RExHySS ».

Sur ce bassin, les projections climatiques sur la période 2045-2065 indiquent un climat globalement plus chaud et globalement plus sec même si l'incertitude sur les précipitations reste forte. Les conséquences sur l'hydrogéologie du bassin sont une diminution sensible de l'alimentation des formations aquifères par les pluies météoriques (de l'ordre d'une vingtaine de pourcents en moyenne) qui se traduit par une baisse marquée du niveau piézométrique des formations aquifères (à pression anthropique – prélèvements en nappe – constante). Cette baisse du niveau piézométrique induit une diminution sensible des débits d'étiage des cours d'eau du bassin, débits d'étiage assurés en grande partie par l'alimentation des aquifères aux cours d'eau. En hiver et même si l'incertitude sur l'intensité des précipitations reste forte, les débits moyens des grands cours d'eau restent peu impactés..

La prise en compte de l'évolution des prélèvements, telle qu'estimée par la société d'études et de conseil en stratégie BIPE, selon deux scénarios d'évolution démographique, ne modifie que de manière marginale (à l'échelle du bassin) l'évolution du niveau moyen des formations aquifères et n'impacte, de ce fait, que très peu les débits des grands cours d'eau.

SOMMAIRE

1.	HYDROGEOLOGIE GENERALE DU BASSIN DE LA SEINE	11
1.1.	HYDROLOGIE DE SURFACE	14
1.2.	HYDROGEOLOGIE DU BASSIN	16
2.	PRINCIPE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE MODCOU	17
2.1.	MODELISATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS EN NAPPE	17
2.2.	MODELISATION DES ECOULEMENTS SUPERFICIELS	18
2.3.	ECHANGES ENTRE LE DOMAINE DE SURFACE ET LE DOMAINE SOUTERRAIN	20
2.3.1.	TRANSFERT DES LAMES D'EAU INFILTREES DANS LA ZONE NON SATUREE	21
3.	MISE EN PLACE DU MODELE MODCOU SUR LE BASSIN DE LA SEINE	22
3.1.	CONCEPTUALISATION DU SYSTEME MODELISE	22
3.1.1.	COUCHE DE SURFACE	22
3.1.2.	DOMAINE SOUTERRAIN	23
3.1.2.1.	<i>Formations tertiaires du bassin de la Seine : nappe de l'Oligocène</i>	23
3.1.2.2.	<i>Formations tertiaires du bassin de la Seine : Nappe de l'Éocène supérieur</i>	26
3.1.2.3.	<i>Nappe de l'Éocène moyen et inférieur</i>	27
3.1.2.4.	<i>Nappe du Crétacé supérieur</i>	29
3.1.2.5.	<i>Cartes structurales des formations tertiaires</i>	31
3.1.3.	PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE	32
3.1.3.1.	<i>Pluviométrie – évapotranspiration</i>	32
3.1.3.2.	<i>Paramètres des fonctions de production du module de surface</i>	33
3.1.3.3.	<i>Paramètres du souterrain</i>	33
3.1.4.	BASE DE DONNEES « PRELEVEMENTS »	34
3.1.4.1.	<i>Prélèvements A.E.P. en nappe</i>	34
3.1.4.2.	<i>Prélèvements industriels en nappe</i>	35
3.1.4.3.	<i>Prélèvements agricoles en nappe</i>	36
3.1.5.	PRISE EN COMPTE DES PRELEVEMENTS DANS LES MODELISATIONS	37

3.1.5.1.	<i>Volumes journaliers prélevés</i>	38
3.1.5.2.	<i>Formations aquifères captées</i>	38
3.2.	CALCUL DE L'IMPACT DES PRELEVEMENTS EN REGIME PERMANENT	38
3.3.	CALCUL EN REGIME TRANSITOIRE	42
3.3.1.	EVOLUTION DES NIVEAUX CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE	44
3.3.2.	EVOLUTION DES NIVEAUX CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE CHAMPIGNY	45
3.3.3.	EVOLUTION DES NIVEAUX CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DE LA CRAIE	46
3.3.4.	DEBITS CALCULES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES	48
3.4.	EXPLOITATION DU MODELE	50
4.	EXPLOITATION DU MODELE SOUS CHANGEMENTS CLIMATIQUES _	52
4.1.	METHODOLOGIE GENERALE	52
4.1.1.	SCENARIOS D'EMISSION.....	53
4.1.2.	MODELES DE CLIMAT ET METHODE DE DESAGREGATION.....	53
4.1.3.	EVALUATION DES SCENARIOS CLIMATIQUES DESAGREGES.....	54
4.1.4.	EVOLUTION POSSIBLE DU CLIMAT	55
4.2.	PRINCIPE GENERAL DES SIMULATIONS	62
4.3.	EVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE	62
4.4.	EVOLUTION DE LA PIEZOMETRIE DU BASSIN	66
4.5.	EVOLUTION DU DEBIT DES COURS D'EAU	74
4.6.	INTEGRATION DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS EN FORMATIONS AQUIFERES	82
4.7.	PRISE EN COMPTE DES SCENARIOS BIPE DANS LES SIMULATIONS	82
4.7.1.	VARIABILITE SPATIALE DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS ANTHROPIQUES SUR LE BASSIN DE LA SEINE.	83
4.7.2.	INFLUENCE DES SCENARIOS DE PRELEVEMENTS SUR LA PIEZOMETRIE DES FORMATIONS AQUIFERES DU BASSIN	86
4.7.3.	INFLUENCE DES SCENARIOS DE PRELEVEMENTS SUR LE DEBIT DES GRANDS COURS D'EAU DU BASSIN	90
5.	CONCLUSIONS	92

Table des illustrations

<i>Illustration 1 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Seine (BRGM Albinet – 1967)</i>	<i>11</i>
<i>Illustration 2 : Coupe générale transversale du bassin de la Seine (AESN, 1974).....</i>	<i>12</i>
<i>Illustration 3 : Topographie du bassin de la Seine.....</i>	<i>13</i>
<i>Illustration 4 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle (ETP) journalière moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine</i>	<i>14</i>
<i>Illustration 5 : Réseau hydrographique du bassin de la Seine et localisation des stations de mesures hydrométriques.</i>	<i>15</i>
<i>Illustration 6 : Principe général des fonctions de production</i>	<i>19</i>
<i>Illustration 7 : Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.....</i>	<i>21</i>
<i>Illustration 8 : Principe du modèle en cascade de Nash.</i>	<i>22</i>
<i>Illustration 9 : Extension du domaine, réseau hydrologique simulé et maillage de la couche de surface (la discrétisation en petites mailles permet de reproduire le réseau hydrographique principal ainsi que les limites de ces bassins versants)</i>	<i>23</i>
<i>Illustration 10 : Extension de la couche aquifère représentant les Calcaires de Beauce.....</i>	<i>26</i>
<i>Illustration 11 : Extension du maillage de la couche aquifère représentant les Sables de Fontainebleau et les Calcaires de Brie.....</i>	<i>26</i>
<i>Illustration 12 : Extension du maillage de la formation du Champigny.....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 13 : Extension du maillage de la formation aquifère du Lutétien/Yprésien.....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 14 : Extension du maillage de la formation aquifère du Thanétien.....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 15 : Extension du maillage de la formation aquifère de la Craie</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 16 : Superposition de l'ensemble des formations aquifères représentées dans le modèle</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 17 : Carte structurale du toit des Calcaires de Champigny.....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 18 : Pluviométrie moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 19 : Situation géographiques des captages A.E.P. en nappe.....</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 20 : Localisation de l'ensemble des forages industriels de prélèvement en nappe</i>	<i>36</i>
<i>Illustration 21 : Prélèvements agricoles en nappe moyens annuels entre 1994 et 2006</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 22 : Volumes prélevés en nappe à des fins agricoles en 2006</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 23 : Bilan hydrique global des formations aquifères en régime permanent (période moyenne 1985-2008) avec prise en compte des prélèvements.....</i>	<i>39</i>
<i>Illustration 24 : Piézométrie de la formation aquifère des Calcaires de Beauce calculée en régime permanent d'écoulement.....</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 25 : Piézométrie de la formation aquifère des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau calculée en régime permanent d'écoulement.....</i>	<i>40</i>

<i>Illustration 26 : Piézométrie de la formation aquifère des Calcaires de Champigny calculée en régime permanent d'écoulement.....</i>	<i>41</i>
<i>Illustration 27 : Piézométrie de la formation aquifère du Lutétien/Yprésien calculée en régime permanent d'écoulement</i>	<i>41</i>
<i>Illustration 28 : Piézométrie de la formation aquifère du Thanétien calculée en régime permanent d'écoulement</i>	<i>42</i>
<i>Illustration 29 : Piézométrie de la formation aquifère de la Craie calculée en régime permanent d'écoulement</i>	<i>42</i>
<i>Illustration 30 : Localisation des piézomètres utilisés pour le calage et l'exploitation du modèle</i>	<i>43</i>
<i>Illustration 31 : Localisation des stations hydrométriques utilisés pour le calage et l'exploitation du modèle</i>	<i>44</i>
<i>Illustration 32 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Mainvilliers (Loiret).....</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 33 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre d'Engenville (Loiret).....</i>	<i>45</i>
<i>Illustration 34 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Montereau sur le Jard (Seine et Marne).....</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 35 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Brie-Comte-Robert (Seine et Marne).....</i>	<i>46</i>
<i>Illustration 36 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Rocquemont (Seine-Maritime).....</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 37 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre d'Estrée-Saint-Denis (Oise)</i>	<i>47</i>
<i>Illustration 38 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Farceaux (Eure).....</i>	<i>48</i>
<i>Illustration 39 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Pont-Ste-Maxence</i>	<i>48</i>
<i>Illustration 40 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur la Marne à la station de Noisiel (Gournay)</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 41 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Paris-Pont d'Austerlitz</i>	<i>49</i>
<i>Illustration 42 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Poses</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 43 : Estimation du débit de base de la Seine à Paris en l'absence totale de précipitations</i>	<i>51</i>
<i>Illustration 44 : Estimation du débit de base de la Marne à Gournay en l'absence totale de précipitations</i>	<i>51</i>
<i>Illustration 45 : Principe général d'une étude d'impact du changement climatique (J. Boé 2007).....</i>	<i>52</i>
<i>Illustration 46 : Émissions mondiales de GES (en gigatonnes équivalent CO2 par an) en l'absence de politiques climatiques additionnelles (source : 4ième rapport du GIEC).....</i>	<i>53</i>
<i>Illustration 47 : Evolution des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle moyennée par rapport à la moyenne des observations sur la période 1970-2000 (données SAFRAN).....</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 48 : Evolution des précipitations et de l'ETP entre 1950 et 2100 selon le modèle ARPEGE sous scénario</i>	

<i>A1B et désagrégation par la méthode des régimes de temps</i>	56
<i>Illustration 49 : Evolution mensuelle moyenne de l'évapotranspiration potentielle (les valeurs mesurées actuelles sont reproduites sur la courbe en noir (données SAFRAN))</i>	56
<i>Illustration 50 : Evolution mensuelle moyenne des précipitations (les valeurs mesurées actuelles sont reproduites sur la courbe en noir (données SAFRAN)</i>	57
<i>Illustration 51 : Evolution relative des précipitations à l'horizon 2046-2065 selon quatre des sept modèles de climat utilisés</i>	58
<i>Illustration 52 : Evolution relative des précipitations à l'horizon 2046-2065 selon trois des sept modèles de climat utilisés</i>	59
<i>Illustration 53 : Evolution relative de l'évapotranspiration potentielle à l'horizon 2046-2065 selon quatre des sept modèles de climat utilisés</i>	60
<i>Illustration 54 : Evolution relative de l'évapotranspiration potentielle à l'horizon 2046-2065 selon trois des sept modèles de climats utilisés</i>	61
<i>Illustration 55 : Evolution comparée des bilans hydriques sous temps présent et futur</i>	63
<i>Illustration 56 : Alimentation moyenne annuelle des formations aquifères en temps présent</i>	64
<i>Illustration 57 : Alimentation moyenne annuelle des formations aquifères en temps futur</i>	65
<i>Illustration 58 : Variations relatives de l'alimentation moyenne annuelle des formations aquifères</i>	65
<i>Illustration 59 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des Calcaires de Beauce (moyenne des sept modèles de climat)</i>	66
<i>Illustration 60 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des Calcaires de Beauce (moyenne des sept modèles de climat)</i>	67
<i>Illustration 61 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des Calcaires de Champigny (moyenne des sept modèles de climat)</i>	67
<i>Illustration 62: Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des formations du Lutétien/Yprésien (moyenne des sept modèles de climat)</i>	68
<i>Illustration 63 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère du Thanétien (moyenne des sept modèles de climat)</i>	68
<i>Illustration 64 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère de la Craie (moyenne des sept modèles de climat)</i>	69
<i>Illustration 65 : Piézomètres de Batilly-en Gâtinais et Trancrainville, nappe des Calcaires de Beauce : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat</i>	70
<i>Illustration 66 : Piézomètres de Montereau-sur-le-Jard et Rupereux, nappe des Calcaires de Champigny : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat</i>	71
<i>Illustration 67 : Piézomètres de Fresnoy-le-Luat et de Lagny-le-Sec, nappe du Lutétien/Yprésien : évolution moyenne</i>	

<i>mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat.....</i>	<i>72</i>
<i>Illustration 68 : Piézomètres de Cheroy et Rocquemont, nappe de la Craie : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat</i>	<i>73</i>
<i>Illustration 69 : Localisation des stations présentées.....</i>	<i>74</i>
<i>Illustration 70 : L'Yonne à Courlon – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat.....</i>	<i>75</i>
<i>Illustration 71 : La Marne à Noisiel – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat.....</i>	<i>76</i>
<i>Illustration 72 : La Seine à Paris – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat.....</i>	<i>77</i>
<i>Illustration 73 : L'Eure à Charpont – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat.....</i>	<i>78</i>
<i>Illustration 74 : L'Oise à Creil – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat</i>	<i>79</i>
<i>Illustration 75 : La Seine à Poses – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat.....</i>	<i>80</i>
<i>Illustration 76 : Evolution relative des débits moyens mensuels à l'horizon 2046-2065 (moyenne des 7 modèles de climat).....</i>	<i>81</i>
<i>Illustration 77 : Prise en compte de l'évolution des prélèvements anthropiques dans les modélisation hydrogéologiques</i>	<i>83</i>
<i>Illustration 78 : Evolution relative des prélèvements sur le bassin de la Seine – scénario 1</i>	<i>84</i>
<i>Illustration 79 : Evolution relative des prélèvements sur le bassin de la Seine – scénario 2</i>	<i>85</i>
<i>Illustration 80 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe des Calcaires de Beauce</i>	<i>87</i>
<i>Illustration 81 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau.....</i>	<i>87</i>
<i>Illustration 82 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe des Calcaires de Champigny</i>	<i>88</i>

<i>Illustration 83 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe du Lutétien/Yprésien</i>	<i>88</i>
<i>Illustration 84 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe du Thanétien</i>	<i>89</i>
<i>Illustration 85 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe de la Craie</i>	<i>89</i>
<i>Illustration 86 : Scénario 1 d'évolution des prélèvements : variation relative du débit moyen mensuel des grands cours d'eau du bassin</i>	<i>90</i>
<i>Illustration 87 : Scénario 2 d'évolution des prélèvements : variation relative du débit moyen mensuel des grands cours d'eau du bassin</i>	<i>91</i>

1. HYDROGEOLOGIE GENERALE DU BASSIN DE LA SEINE

Le bassin versant de la Seine est presque entièrement situé dans le Bassin Parisien, unité géologique caractérisée par une structure en auréoles sédimentaires concentriques, s'étageant du début du Secondaire (Trias) au Tertiaire supérieur (Miocène) et s'appuyant sur des massifs anciens (illustration 1). Ce bassin sédimentaire est caractérisé par un empilement de formations à faible pendage convergent vers le centre (géométrie dite "en pile d'assiettes" (illustration 2), comprenant d'importantes formations aquifères séparées par des formations semi-perméables.

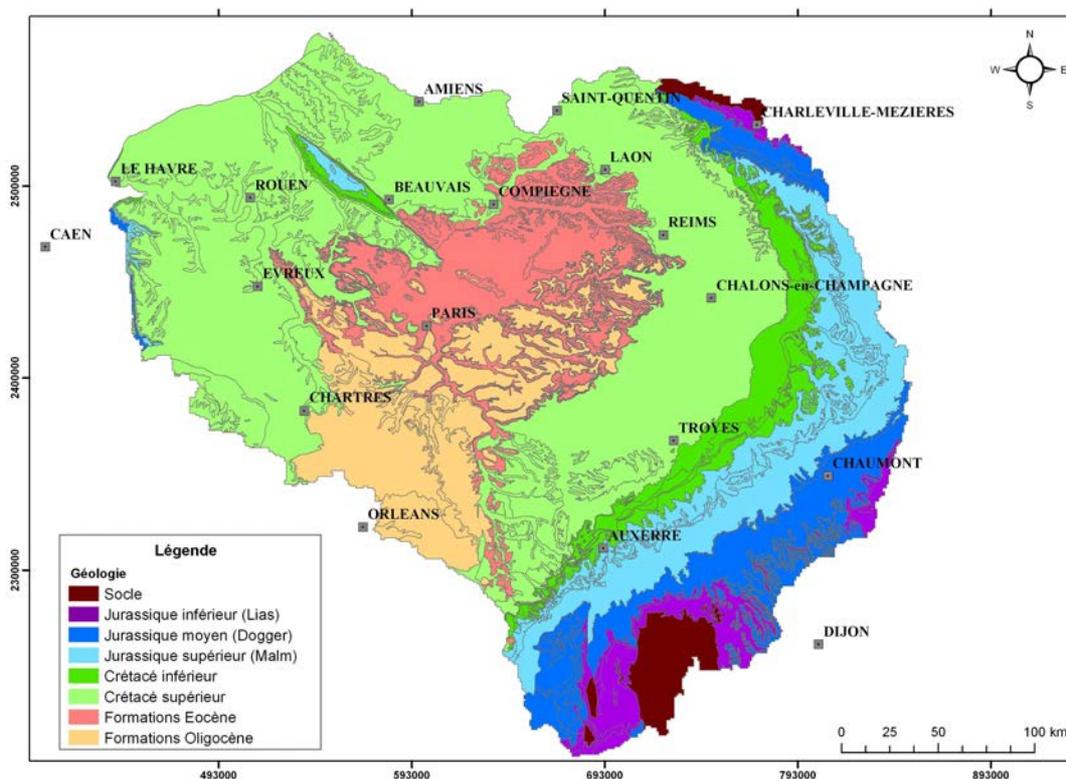


Illustration 1 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Seine (BRGM Albinet – 1967)

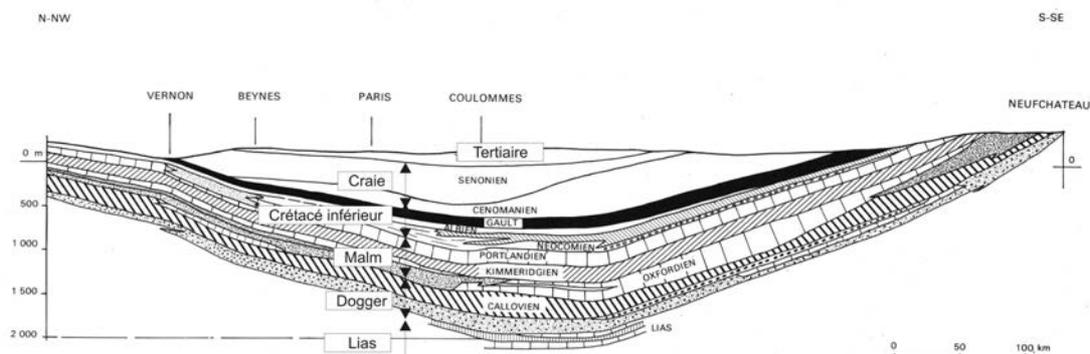


Illustration 2 : Coupe générale transversale du bassin de la Seine (AESN, 1974)

Les sources « officielles » de la Seine sont situées sur le plateau de Langres, à une altitude de 471 m. Le bassin versant du fleuve couvre 78600 km² (au Havre), soit 12 % de la surface de la France. Dans ce bassin, le socle correspond à environ 3% de la superficie et est représenté par les affleurements cristallins du Morvan au sud-est et par ceux, métamorphiques, des Ardennes, au nord-est. Les roches sédimentaires à l’affleurement sont composées de couches alternées de calcaires, craies, marnes et argiles, sables quartzeux et grès. Aux auréoles régulières du pourtour du bassin versant s’oppose l’empilement des couches tertiaires du centre où de nombreuses variations verticales de faciès sont enregistrées : des calcaires aux marnes et aux marnes gypseuses qui, bien que peu représentées à l’affleurement jouent un rôle important dans la chimie des eaux.

L’évolution morphotectonique du Bassin parisien conditionne l’agencement des reliefs et des paysages actuels ainsi que l’organisation du réseau hydrographique du bassin.

Le relief du bassin est peu accidenté, avec des altitudes généralement inférieures à 300 m, dépassant rarement 500 m sauf dans le Morvan où elles culminent à 900 m (illustration 3).

Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes des cours d'eau (0.01 à 0.03 m / 100m), qui coulent globalement vers l'ouest en incisant les cuestas orientales, puis les plateaux du centre du bassin (plaines de Beauce et de Picardie par exemple) avant de méandrer dans les plaines alluviales, notamment à l'aval de Paris

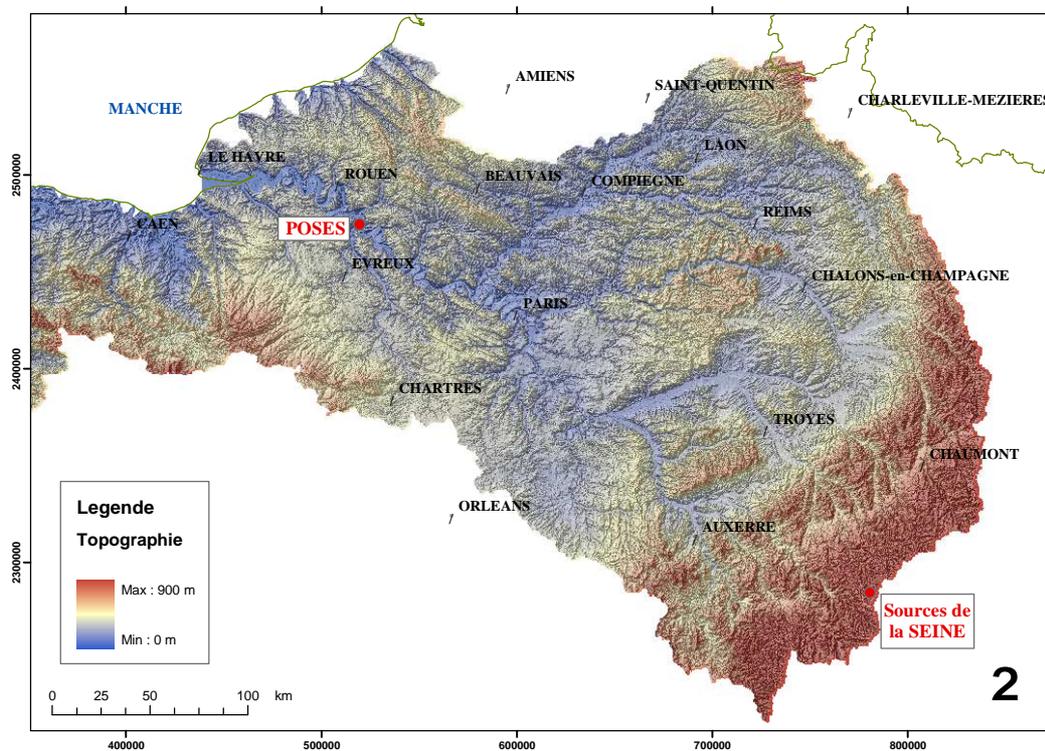


Illustration 3 : Topographie du bassin de la Seine

.La Seine se jette dans la Manche au Havre, après un parcours de 776 km, mais le domaine estuarien (eaux saumâtres et influence hydrodynamique de la marée) commence à Poses, en amont de Rouen, à 166 km du Havre.

Les sols actuellement présents sur le bassin de la Seine se sont formés à partir d'une couverture de limons et d'argiles quaternaires qui recouvrent les formations géologiques. Ils sont en général pourvus de bonnes capacités de rétention d'eau, qui contribuent à réguler le débit des rivières, en association avec une contribution importante des aquifères (dont le drainage vers les rivières constitue le débit de base de ces dernières) et une pluviométrie bien répartie au cours de l'année (illustration 4).

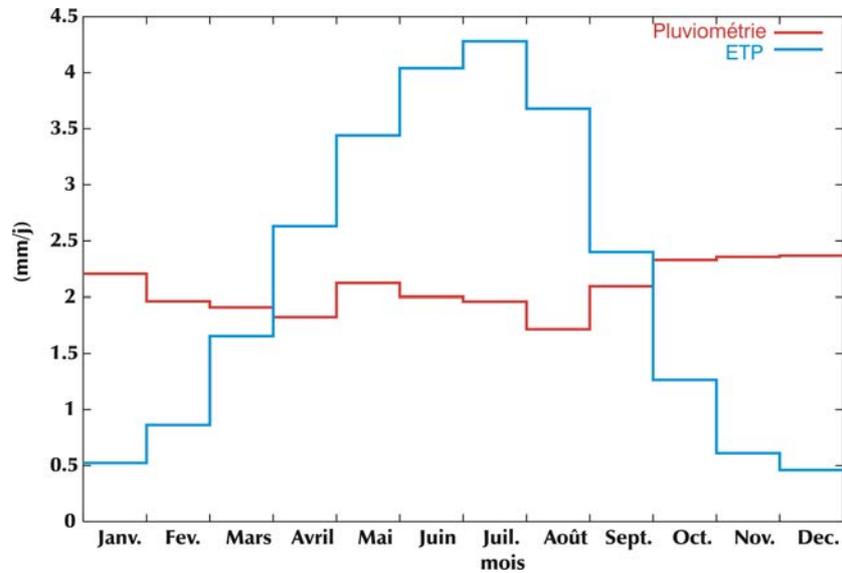


Illustration 4 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle (ETP) journalière moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine

Celle-ci s'explique par un apport assez constant d'humidité par les vents d'ouest issus de l'Océan Atlantique (climat océanique). Cette humidité précipite abondamment sur les régions côtières du nord-ouest (Normandie, avec une pluviométrie de 800 à 1100 mm/an) puis sur les reliefs sud-est du bassin (pluviométrie supérieure à 800 mm/an pouvant atteindre 1300 mm dans le Morvan). Les plateaux du centre du bassin sont moins bien arrosés (pluviométrie de 550 à 850 mm/an) car les vents d'ouest humides n'y rencontrent pas d'obstacle orographique (les altitudes maximales ne dépassent pas 200 mètres en Île de France) favorisant les précipitations.

La Seine est le fleuve français où l'influence de la neige est la plus faible : le nombre de jours de neige est très limité, à l'exception du Morvan où il peut atteindre 40 jours. L'influence nivale sur le régime hydrologique des rivières est donc négligeable. Ce régime est dit " pluvial océanique ", avec un débit maximal en hiver quand l'évapotranspiration est faible, et minimal en été quand l'évapotranspiration est forte.

1.1. HYDROLOGIE DE SURFACE

Les déformations tectoniques, consécutives à l'orogénèse alpine, contrôlent largement le tracé du réseau hydrographique. Ces déformations expliquent d'une part la convergence générale du réseau vers l'Île de France et d'autre part, l'encaissement du réseau dans les plateaux (méandres encaissés de la Marne, de la Seine aval, ...).

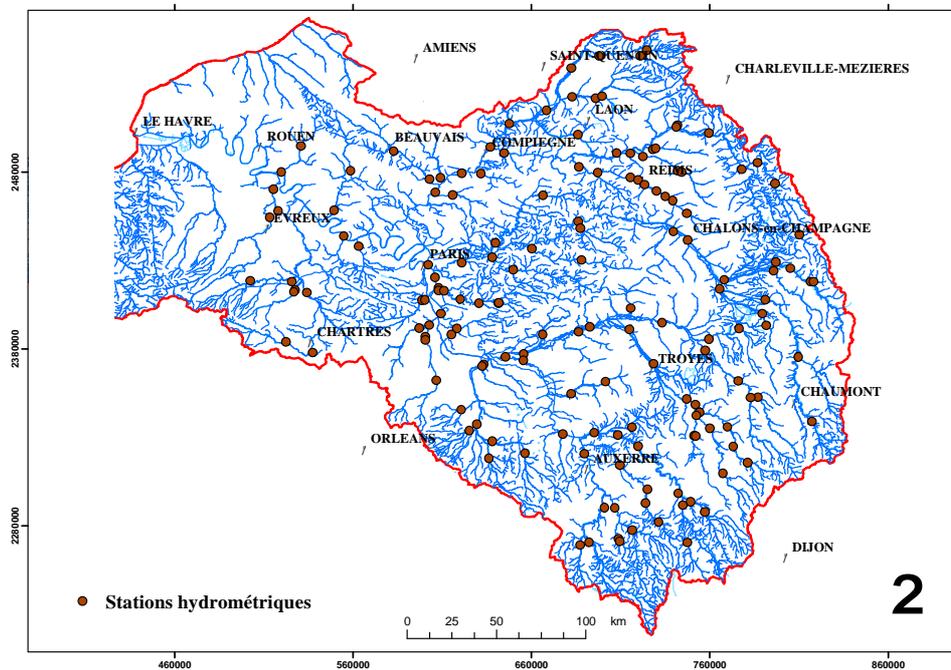


Illustration 5 : Réseau hydrographique du bassin de la Seine et localisation des stations de mesures hydrométriques.

On remarque l'influence marquée de la géologie sur la densité du réseau hydrographique : forte sur les formations du socle (Morvan) ou du Crétacé inférieur (auréole concentrique Auxerre-Troyes-St Dizier) et très faible sur la Craie affleurante ou l'Oligocène au sud de la Seine (Beauce par exemple).

On retrouve l'influence de la structure géologique sur les caractéristiques hydrologiques comme les écoulements spécifiques. La distribution spatiale de ces écoulements spécifiques (d'après l'atlas de la Seine et des cours d'eau normands de G. Bédriot, AESN 1973-1978) présente en effet une organisation auréolaire. Les valeurs de l'écoulement spécifique sont inférieures à $4 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ en Beauce, tandis qu'elles sont supérieures à $10 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ sur toute la bordure est et sud-est du bassin, en relation avec les variations pluviométriques. Le maximum dépasse $20 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ aux sources de l'Yonne.

Du fait des faibles contrastes de relief et de climat et de la distribution de la lithologie, les cours d'eau du bassin de la Seine présentent aussi une grande similarité de régime hydrologique entre les différents principaux tributaires (Aube, Marne, Oise, ...). Pour l'ensemble de ces tributaires, les

années hydrologiques débutent en septembre et les débits maximum et minimum sont observés aux mêmes mois (respectivement janvier et août).

1.2. HYDROGEOLOGIE DU BASSIN

Mise à part les 2000 km² correspondants à la haute vallée de l'Yonne dans le Morvan cristallin, le reste du bassin de la Seine se situe dans l'ensemble sédimentaire du Bassin Parisien caractérisé par un empilement de couches à faible pendage de différentes roches. Les aquifères les plus importants sont situés dans les roches carbonatées (calcaires et craie) ou détritiques (sables et grès).

Les couches sédimentaires du Trias jusqu'au Crétacé affleurent en auréoles autour d'une vaste zone centrale Tertiaire transgressive. La faible pente des assises vers le centre de la cuvette (environ 1,5 %) et l'augmentation simultanée de l'épaisseur des dépôts, conséquence d'une lente subsidence, entraîne une puissance maximale globale des couches de l'ordre de 3000 mètres sous la Brie.

Les formations aquifères sont séparées par des niveaux moins perméables, sans toutefois être complètement isolées les unes des autres. Il s'agit donc, en général, d'aquifères complexes ou multicouches.

Neuf formations aquifères principales ont été répertoriées dans le bassin, des plus anciennes, les plus profondes, au plus récentes :

- le Lias inférieur (Sinémurien, Héttangien, Rhétien) ;
- le Dogger (Bathonien, Bajocien sous la formation du Callovien) dont les calcaires forment la Côte de Moselle et qui est exploité en région parisienne à des fins géothermiques ;
- le Lusitanien (Oxfordien) qui forme la Côte de Meuse à l'est du bassin ;
- le Portlandien, peu connu du point de vue hydrogéologique ;
- l'Albien, constitué d'un ensemble sableux, qui représente une des ressources en eau stratégique du bassin ;
- la Craie au sens large, constituée essentiellement par les formations du Cénomaniens et du Sénonien : de surface totale d'environ 110 000 km², sa surface occupe près de 65 000 km² dans le bassin de la Seine et ses ressources en eau estimées à 12 10⁹ m³/an ;

les formations tertiaires de :

- l'Eocène moyen et inférieur. (Lutétien, Yprésien, Thanétien, Montien) encore appelée nappe du Soissonais, s'écoule du nord vers le sud et se met progressivement en charge en direction de Paris ou il est exploité ;

- l'Eocène supérieur (Ludien, Marinésien, Auversien et Lutétien) qui correspond à la nappe du Champigny ;
- l'Oligocène (Chattien et Stampien) encore appelée nappe de Beauce et des Sables de Fontainebleau qui possède un bassin d'alimentation qui s'étend largement au sud de la région parisienne. Cet aquifère est très exploité à des fins d'irrigation.

Le réseau hydrographique de surface est directement lié aux nappes souterraines : les thalwegs peuvent atteindre l'aquifère le plus superficiel situé en position de nappe libre. En régime naturel et en période de basses eaux estivales, la rivière est alors alimentée par la nappe, en période de hautes eaux, cela peut être l'inverse.

Enfin, la nappe des alluvions, bien développée dans les vallées des principaux cours d'eau, constitue la dixième formation aquifère rencontrée dans le bassin. Peu épaisse (< 10m), elle est très productive car alimentée tantôt par le cours d'eau, tantôt par l'aquifère. Lorsqu'on exploite les granulats dans le lit majeur des rivières, les dépressions ainsi formées se remplissent d'eau provenant de l'aquifère des alluvions au fur et à mesure du creusement.

2. 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. Développé au centre de Géosciences de MINES ParisTech (Ecole des mines de Paris), 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. Les écoulements superficiels sont quant à eux simulés grâce à une modélisation paramétrique.

2.1. MODELISATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS EN NAPPE

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

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

Avec T la transmissivité du milieu poreux (m²/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 T_N , T_E , T_S et T_W 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, H_N , H_E , H_S et H_W les cotes piézométriques dans ces mailles adjacentes, H_i la cote piézométrique dans la maille i, Q_i le débit surfacique entrant ou sortant à la maille i, S_i 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.

2.2. MODELISATION DES ECOULEMENTS SUPERFICIELS

En premier lieu, le réseau de drainage superficiel 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.

Chaque maille reçoit une certaine quantité d'eau déduite des données météorologiques (précipitations) à chaque pas de temps. Cette lame d'eau disponible au sol est répartie entre une lame d'eau évapo-transpirée et une lame d'eau disponible pour l'écoulement. Cette dernière est elle-même répartie entre infiltration et ruissellement grâce à un modèle à réservoirs paramétré par les fonctions de production (illustration 6)).

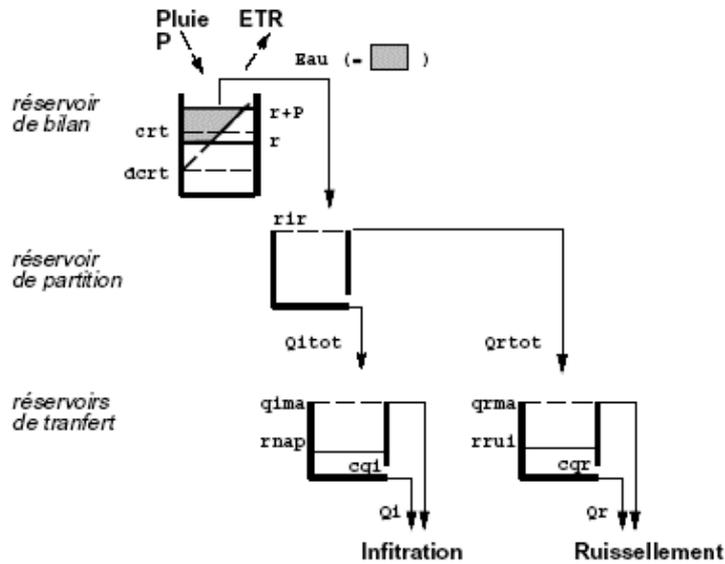


Illustration 6 : Principe général des fonctions de production

Ce modèle à réservoir correspond à la représentation d'écoulements hortonien : les sols possèdent une certaine capacité d'infiltration qui lorsqu'elle est dépassée donne lieu à du ruissellement de surface.

En sortie de ce modèle on dispose pour chaque maille de surface de la lame d'eau ruisselée sur cette maille ainsi que de la lame d'eau infiltrée.

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.

Le transfert des lames d'eau au sein du réseau hydrographique est assuré par un découpage en biefs de ce réseau. Chaque bief est constitué d'une zone isochrone, c'est-à-dire d'un ensemble de mailles rivières dont la lame d'eau va mettre le même temps à atteindre l'exutoire du bassin. A un instant donné, le volume d'eau s'écoulant d'un bief vers le bief aval est donné par l'expression $x_{kb} \times V$ avec

x_{kb} le coefficient de vidange du bief et V le volume d'eau contenu dans le bief.

Le volume d'eau dans un bief i au temps $t+dt$ est donc égal au volume dans ce bief au temps t moins le volume vidangé entre t et $t+dt$, auquel il faut ajouter les volumes vidangés au niveau des biefs situés en amont direct de i . Ce volume est donné par la formule :

$$V_i(t + dt) = (1 - x_{kbi}) * (V_i(t) + Q_{ri}(t) + Q_{nap_i}(t)) + \sum_{j=1}^N (x_{kbj} * (V_j(t) + Q_{rj}(t) + Q_{nap_j}(t)))$$

Avec $V_k(t)$ le volume d'eau contenu dans le bief k au temps t , $Q_{rk}(t)$ la lame d'eau ruisselée parvenant au bief k entre t et $t+dt$, et $Q_{nap k}(t)$ la lame d'eau échangée avec le domaine souterrain sur le bief k entre t et $t+dt$.

2.3. 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 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, H_0 le niveau de l'eau dans la rivière, et T_p le coefficient de transfert nappe-rivière dépendant de la nature et de l'état du lit. Lorsque la nappe est alimentée par la rivière ($H < H_0$), le débit est alors négatif, est limité à la fois par le débit disponible en rivière (Q_{riv}), 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 7).

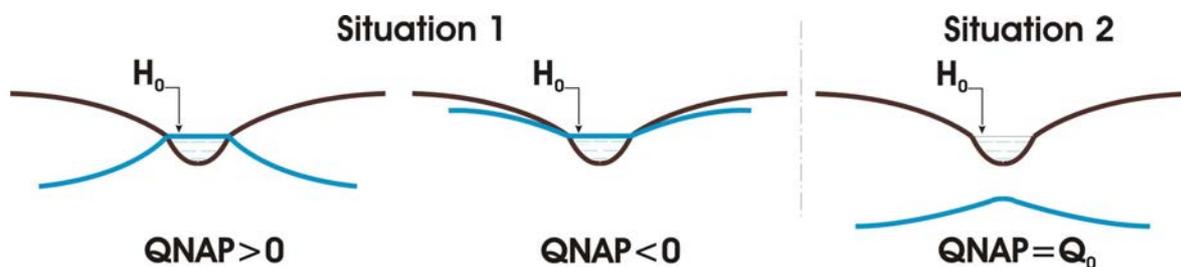


Illustration 7 : Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.

Dans tous les cas 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.

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

Un module supplémentaire peut être utilisé lors de la modélisation dans le cas où des épaisseurs de zone non saturée non négligeables existent. Ce module NONSAT utilise en entrée les données d'infiltration calculées par le module de surface, et leur applique un modèle en cascade de Nash qui introduit un retard à l'arrivée de ces lames d'eau dans la nappe (illustration 8).

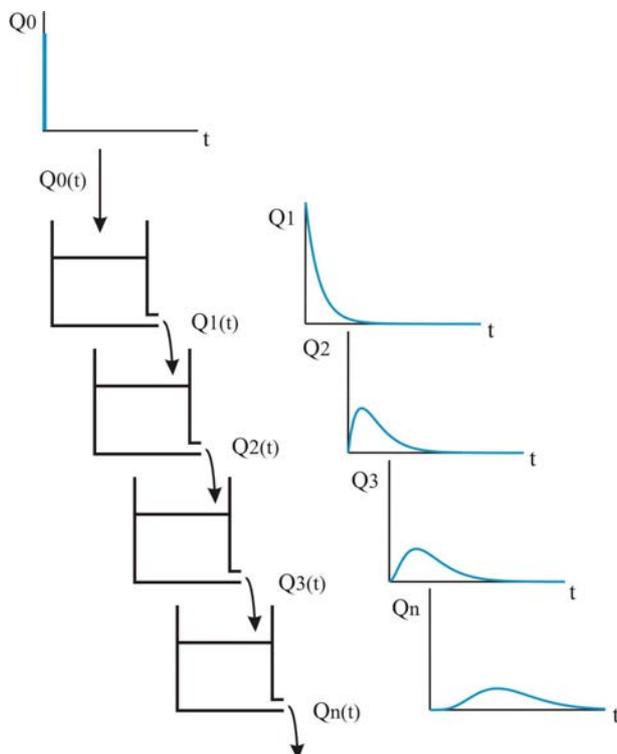


Illustration 8 : Principe du modèle en cascade de Nash.

Ce modèle utilise pour chaque maille où se produit l'infiltration deux paramètres : le nombre de réservoirs N et le temps de délai de ces réservoirs T.

Le débit en sortie du Nième réservoir au temps t résultant d'un débit d'infiltration dQ dans le premier réservoir au temps τ inférieur à t est donné par la formule :

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

Le nombre de réservoirs utilisés est fonction de l'épaisseur de la zone non saturée, et le temps de délai dépend de la nature lithologique de la zone non saturée.

En sortie de ce module on dispose d'un fichier d'entrée MODCOU contenant les lames d'eau ruisselées inchangées et les lames d'eau infiltrées parvenant au domaine souterrain saturé à chaque pas de temps prenant en compte le transfert en domaine non saturé.

3. MISE EN PLACE DU MODELE MODCOU SUR LE BASSIN DE LA SEINE

L'École des mines de Paris (MINES ParisTech)/ARMINES, par le biais de son Centre de Géosciences a développé, dans le cadre du programme PIREN-Seine et depuis de nombreuses années, un modèle mathématique du fonctionnement hydrogéologique du Bassin de la Seine. Ce modèle a évolué en 2009 pour inclure une meilleure discrétisation verticale des couches aquifères et pour mieux prendre en compte l'anthropisation et plus particulièrement les prélèvements en formations aquifères.

3.1. CONCEPTUALISATION DU SYSTEME MODELISE

3.1.1. COUCHE DE SURFACE

Les directions de drainage de chaque maille sont définies à partir d'un modèle numérique de terrain au pas de 100 mètres grâce à un logiciel développé au CEMAGREF de Lyon : Hydrodem (E. Leblois).

La prise en compte des écoulements souterrains dans la modélisation du système Seine implique d'étendre le domaine modélisé au-delà du bassin hydrologique stricto sensu de la Seine. Ainsi les conditions aux limites du système hydrologique sont définies, dans la mesure du possible, par les charges à cotes imposées situées hors du bassin et figurées par les cours d'eau principaux des bassins adjacents (Somme, Meuse, Loire, Loir et Touques). La couche de surface du « modèle Seine » couvre une surface totale de 95 560 km² constituée de 35 198 mailles de taille variable (de 1 à 8 kilomètres de coté).

L'illustration 9 présente le maillage de surface et le réseau hydrographique simulés.

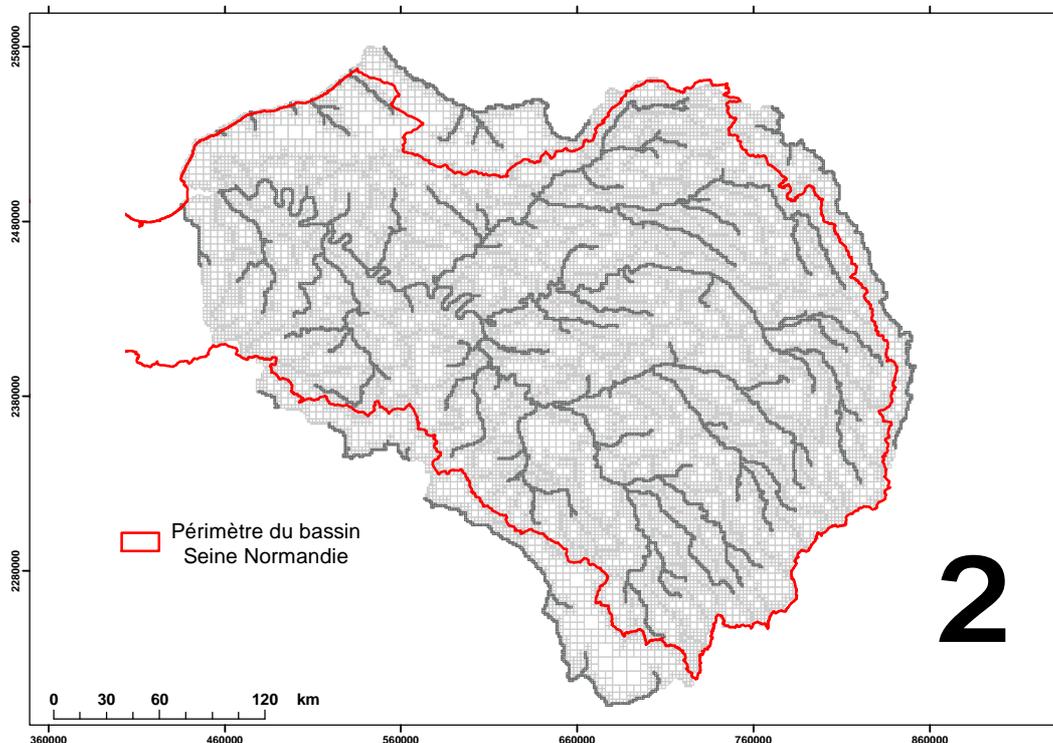


Illustration 9 : Extension du domaine, réseau hydrologique simulé et maillage de la couche de surface (la discrétisation en petites mailles permet de reproduire le réseau hydrographique principal ainsi que les limites de ces bassins versants)

3.1.2. DOMAINE SOUTERRAIN

3.1.2.1. Formations tertiaires du bassin de la Seine : nappe de l'Oligocène

La nappe de l'Oligocène est surtout importante dans le secteur sud-ouest de la région parisienne où elle intéresse principalement les couches calcaires de Brie et de Beauce, enserrant la formation des Sables de Fontainebleau. Elle est exploitée principalement pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation.

Du haut en bas, nous trouverons donc :

- Les calcaires de Beauce : bien que séparés par une lentille peu perméable correspondant à la Molasse du Gâtinais, ils constituent un ensemble aquifère calcaire de type karstique. Les limites naturelles sont celles imposées par l'érosion.
- Les Sables de Fontainebleau : à perméabilité d'interstices, ils atteignent leur puissance maximale en bordure de la Beauce puis à mesure de leur enfoncement structural, ils se réduisent progressivement. La carte des extensions montre leur limite à proximité de la vallée du Loing.
- Les calcaires de Brie : Ils ont des faciès très variés. Dans la région de Méréville-Malesherbes s'étendant sous les niveaux supérieurs (Aquitaniens - Chattien- Stampien), le Calcaire de Brie se présente comme un calcaire lacustre jaunâtre ou grisâtre, vermiculé, compact avec des passées marneuses blanchâtres. Il affleure, partiellement silicifié, dans la région de Brie-Comte-Robert et celle de Rozay-en-Brie. S'étendant aux environs de Corbeil. Melun, Mormant et au Sud de Mantes-la-Jolie, les meulières forment la masse la plus importante du Calcaire de Brie. Elles sont souvent cavernueuses, en bancs discontinus ou en blocs enrobés dans une argile sableuse jaunâtre ou rougâtre. Dans la région est : Coulommiers, Montmirail. Villiers-Saint-Georges, le Calcaire de Brie perd son faciès meulier et calcaire pour devenir marne ou calcaire marneux comme en bordure de l'anticlinal de la Remarde (Arpajon-Palaiseau). Ces faciès lacustres font place à un faciès laguno-marin-gypseux, dolomitique au Sud-Ouest de Paris : Buc, Saclay, Châteaufort et au Nord, Montmartre. Cormeilles, Sannois, Pierrefitte. Au Nord-Ouest de Versailles et sur les buttes-moines du Nord de la région parisienne, le Calcaire de Brie devient souvent argileux. Il est ainsi très difficile de le distinguer des niveaux argileux sous jacents. En bordure de la cuesta sud de l'Ile-de-France et vers Nemours, le Calcaire de Brie n'est plus reconnaissable en tant que niveau individualisé, il se confond alors dans les Calcaires lacustres de Château-Landon dont il prend le faciès.

Les niveaux imperméables ou peu perméables sont constitués de haut en bas par :

- La Molasse du Gâtinais : elle ne joue qu'un rôle secondaire, car son imperméabilité est relative et son extension assez limitée. Elle produit un cloisonnement dans la nappe des Calcaires de Beauce et peut donner naissance à quelques lignes de sources.

- Les Marnes à Huîtres : elles forment en général un bon écran à la base des Sables de Fontainebleau. La carte des limites d'extension montre que ces marnes sont cependant cantonnées à la région parisienne immédiate. Elles donnent lieu à une ligne de sources, mais ceci n'exclut pas les possibilités aquifères du Calcaire sannoisien sous-jacent.
- Les Marnes vertes de Romainville : elles représentent en fait le niveau de base le plus constant de la nappe oligocène. Elles sont relativement étendues mais ont une limite d'extension. Cette limite peut représenter aussi bien une limite latérale de faciès, comme en Beauce où ces marnes passent insensiblement à des marnes blanches de plus en plus calcaires. Au-delà de cette limite, l'absence de niveau imperméable à la base du réservoir permet donc la communication de ce réservoir avec celui qui est sous-jacent. Ainsi, suivant la région, la communication se fait avec le réservoir constitué par les Calcaires de Champigny et de Saint-Ouen (Sud de la Brie, vallée du Loing) ou par les Sables et argiles sparnaciens (vallée de la Remarde. de l'Orge) ou encore par la craie (vallée de la Remarde - région de Rochefort-en-Yvelines, vallée de l'Eure). L'épaisseur de l'ensemble imperméable de la base du réservoir (« Marnes vertes » et « Marnes supragypseuses ») varie de 0 à 10 m dans les Yvelines, de 0 à 15 m en Beauce et dans les Buttes de Marly et de l'Île-de-France, de 15 à 20 m en Bière et en forêt de Fontainebleau, de 20 à 25 m en Brie.

Au final, au niveau du modèle, deux formations aquifères représentant les formations Oligocène ont été retenues : une couche représentant les Calcaires de Beauce (illustration 10) et une seconde représentant les Sables de Fontainebleau en continuité hydraulique avec les Calcaires de Brie (illustration 11).

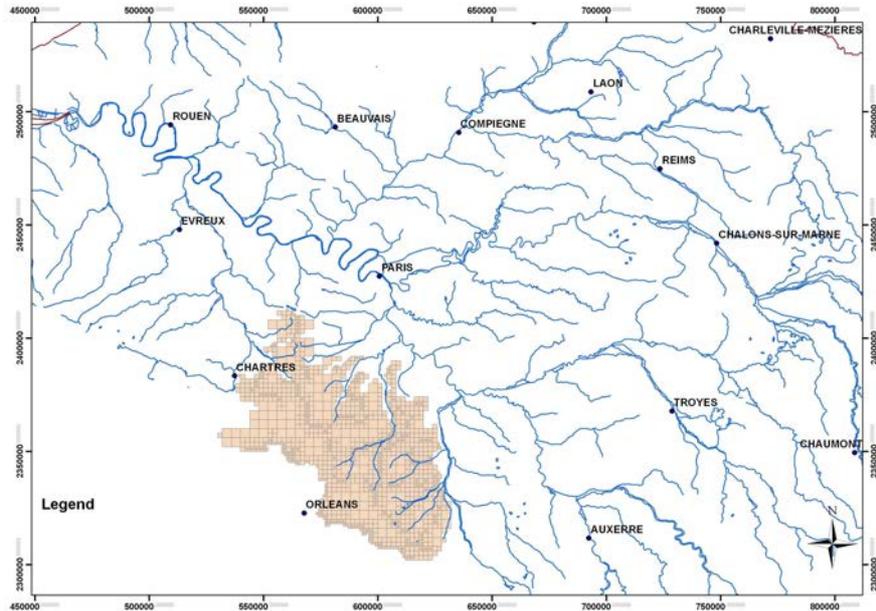


Illustration 10 : Extension de la couche aquifère représentant les Calcaires de Beauce

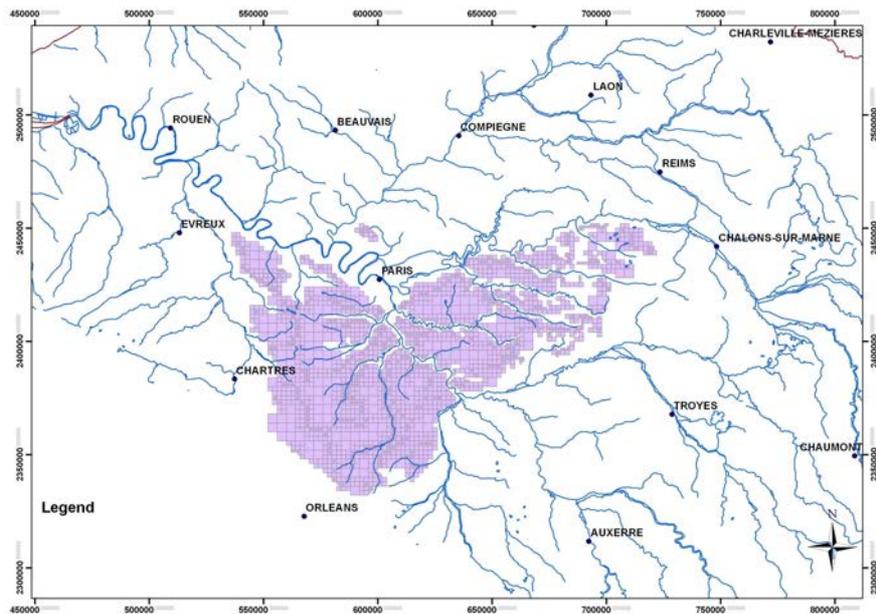


Illustration 11 : Extension du maillage de la couche aquifère représentant les Sables de Fontainebleau et les Calcaires de Brie

3.1.2.2. Formations tertiaires du bassin de la Seine : Nappe de l'Éocène supérieur

L'Éocène supérieur est non seulement cloisonné verticalement par des niveaux stratigraphiques, il l'est aussi horizontalement par ses variations latérales de faciès. Ces différentes présentations

entraînent des qualités hydrologiques différentes. Il n'existe pas de nappe couvrant tout le secteur et gardant constamment les mêmes qualités. Ainsi

- la nappe du Calcaire de Champigny n'est exploitable que dans le secteur de ce faciès du Ludien, c'est-à-dire dans le sud et le sud-est;
- la nappe des Sables de Beauchamp n'est exploitable que dans le secteur où ces sables se présentent vraiment sous le faciès sableux, c'est-à-dire au Nord. Il existe même des zones comme la région de Wissous, Longjumeau, Jouy-en-Josas dans lesquelles on ne rencontre, dans l'Éocène supérieur, que de l'eau très fortement minéralisée puisque tous les niveaux stratigraphiques contiennent du gypse.

A l'échelle régionale, la nappe la plus importante en termes de ressource en eau dans les formations du tertiaire est donc celle comprise dans le Calcaire de Champigny ; elle se limite donc au territoire de ce faciès du Ludien, c'est-à-dire en Brie et en Bière. En effet, dans le Nord de l'Île-de-France et dans la région comprise entre Paris et Longjumeau, le gypse rend les eaux inutilisables. A l'Ouest, les faciès marneux prédominant et la faible épaisseur du réservoir diminuent considérablement l'intérêt de cette nappe. L'illustration 12 précise l'extension retenue de la formation du Champigny au sens large dans le modèle.

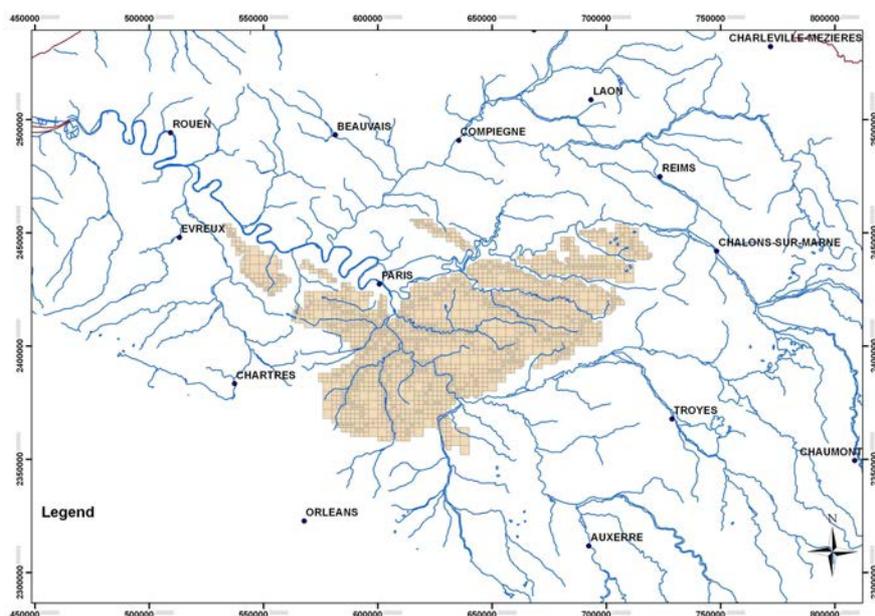


Illustration 12 : Extension du maillage de la formation du Champigny

3.1.2.3. Nappe de l'Éocène moyen et inférieur

La nappe de l'Éocène moyen et inférieur contenue dans les sables dits du Soissonnais et dans le Calcaire grossier intéresse particulièrement la partie nord de la région parisienne. Ces formations constituent en effet le réservoir principal d'eau souterraine, situé à moyenne profondeur au nord de la Marne et de la Seine. Plus au sud, s'enfonçant progressivement sous les formations de l'Eocène supérieur, elle est beaucoup moins connue.

Sous le terme Éocène moyen, on trouve l'étage stratigraphique du Lutétien et sous le terme Éocène inférieur, l'Yprésien le Thanétien et le Montien.

- Lutétien : cet étage est constitué de différentes formations que l'on peut regrouper de bas en haut par des marnes et caillasses puis une succession de bancs de calcaires grossiers, plus ou moins sableux séparés par des « entre-bancs » marneux.
- Yprésien : la nappe de l'Yprésien représente, à la limite de la région parisienne, entre l'Oise et la Marne, un réservoir aquifère très important du fait d'épaisseurs utiles maximales (~70 m). Cette épaisseur reste intéressante jusqu'à la Seine (20 à 30 m dans la fosse de St Denis). Au sud de la Seine et de la Marne, l'épaisseur décroît fortement et ne dépasse pas 20 mètres cumulés.

Du fait de l'impossibilité de distinguer spatialement les différents étages, la nappe de l'Eocène moyen et inférieur sera modélisée sous la forme d'une couche représentant l'Yprésien et le Lutétien (illustration 13) et d'une autre représentant le Thanétien (illustration 14).

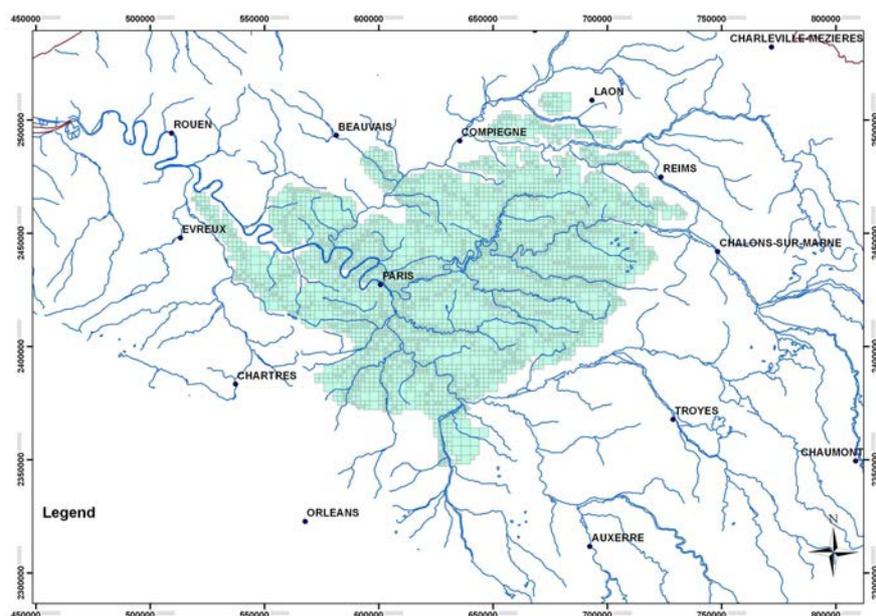


Illustration 13 : Extension du maillage de la formation aquifère du Lutétien/Yprésien

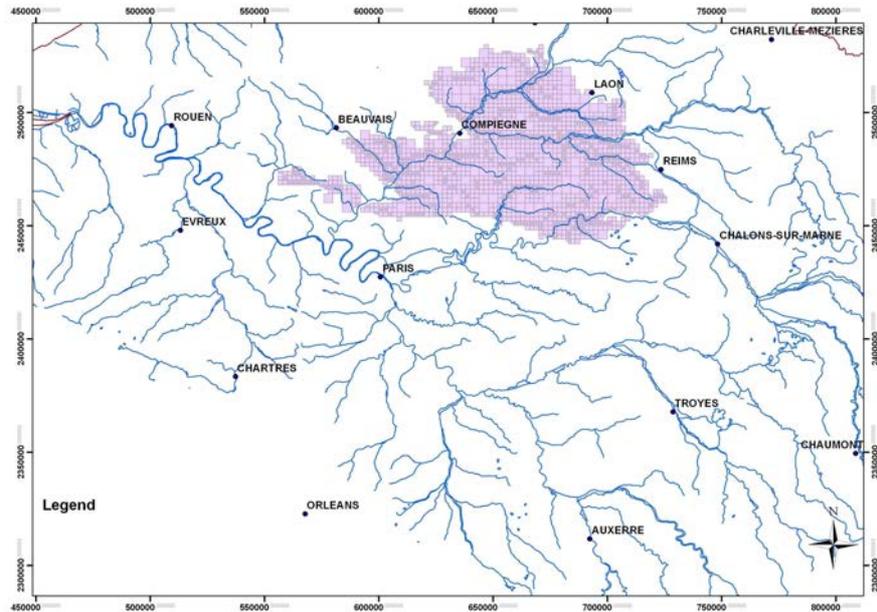


Illustration 14 : Extension du maillage de la formation aquifère du Thanétien

3.1.2.4. Nappe du Crétacé supérieur

La craie sénonienne s'étend sous les formations tertiaires au centre de l'Île-de-France à une profondeur de 150 à 250 m et apparaît à l'affleurement au sud-est et nord-ouest de l'Ile-de-France, dans la vallée de la Seine et au nord, dans la vallée de l'Oise avec une surface d'environ 500 km². La craie représente le premier aquifère libre du Bassin Parisien par sa surface d'affleurement et de son épaisseur importante. Par contre, sous les formations tertiaires dans l'Ile-de-France, la nappe devient captive et peu productive.

Le maillage de cette formation (illustration 15) s'étend des affleurements à l'est et à l'ouest et jusqu'à la Somme au nord et la Loire au sud qui représente des limites hydrauliques de la nappe.

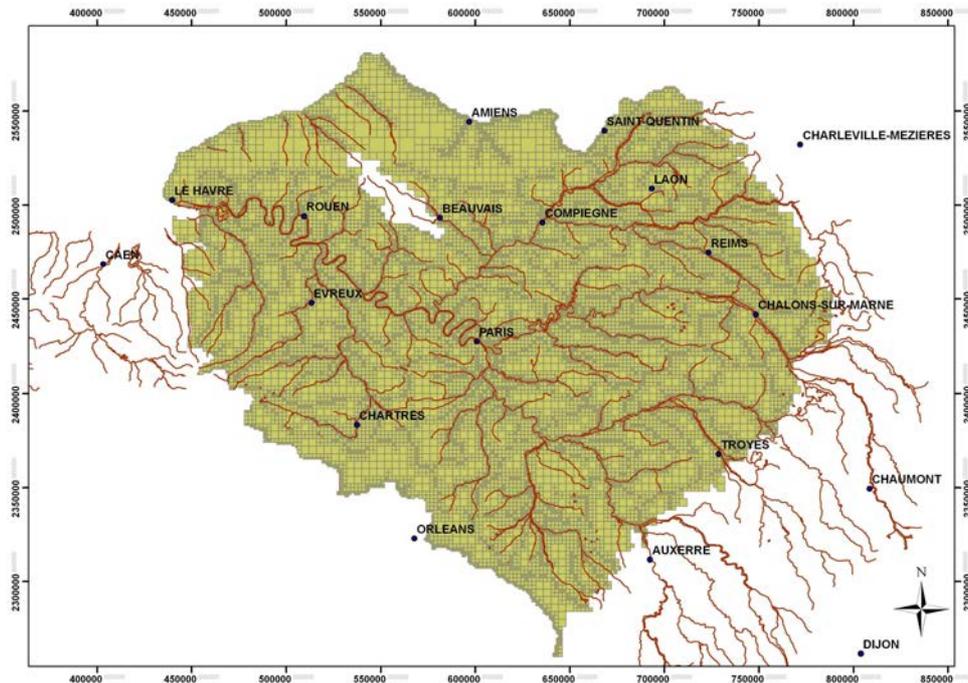


Illustration 15 : Extension du maillage de la formation aquifère de la Craie

Au final, l'extension géographique et l'empilement de l'ensemble des couches du modèle sont précisés sur l'illustration 16.

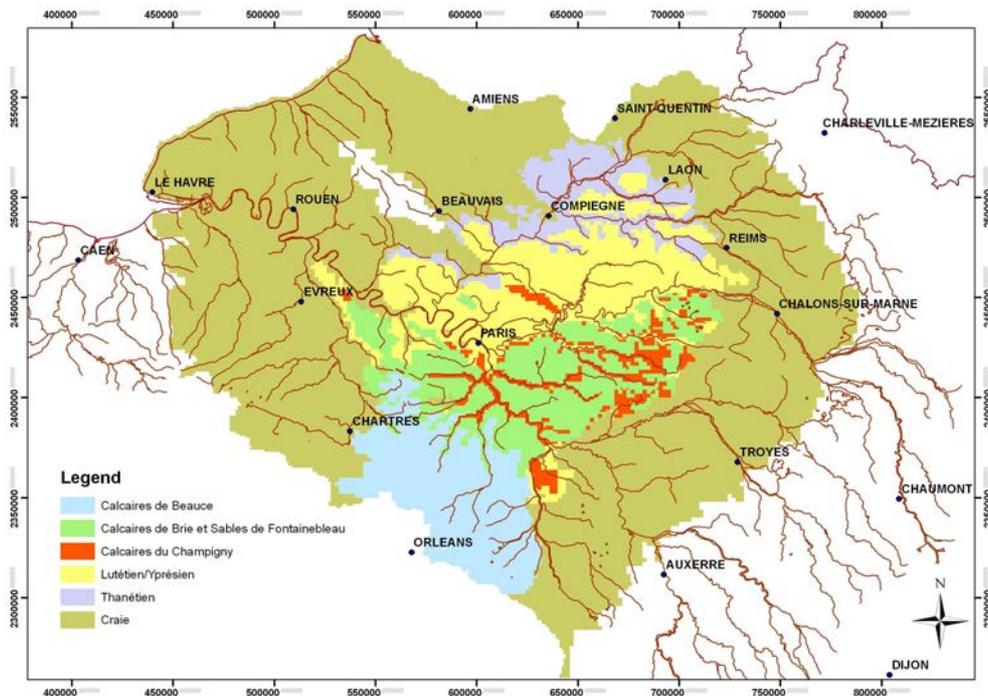


Illustration 16 : Superposition de l'ensemble des formations aquifères représentées dans le modèle

3.1.2.5. Cartes structurales des formations tertiaires

L'acquisition par la DRIEE Île-de-France des cartes structurales du BRGM portant sur les différentes coupures au 1/50000 englobant l'ensemble des formations tertiaires permet de rediscrétiser finement, horizontalement et verticalement, l'ensemble des formations paléogènes. Les niveaux cartographiés et fournis par le BRGM sous forme de bitmaps géo-référencées sont les suivants :

- le toit des sables de Fontainebleau ;
- le mur des sables de Fontainebleau ;
- le toit des Marnes Vertes ;
- le toit des calcaires de Champigny ;
- le toit des calcaires de Saint Ouen ;
- le toit des sables d'Auvers ;
- le toit du Lutétien ;
- le mur du Lutétien ;
- le toit du Sparnacien ;
- le toit du Thanétien ;
- le toit de la Craie.

C'est à partir de ces cartes que sont déterminées les cotes de mur et de toit des différentes formations aquifères modélisées.

Ces cotes déterminent l'épaisseur des formations aquifères mais également les épaisseurs des formations semi-perméables séparant ces couches dont le coefficient de transfert vertical entre couches est directement dépendant. A titre d'exemple, l'illustration 17 présente la carte structurale du toit des Calcaires de Saint-Ouen.

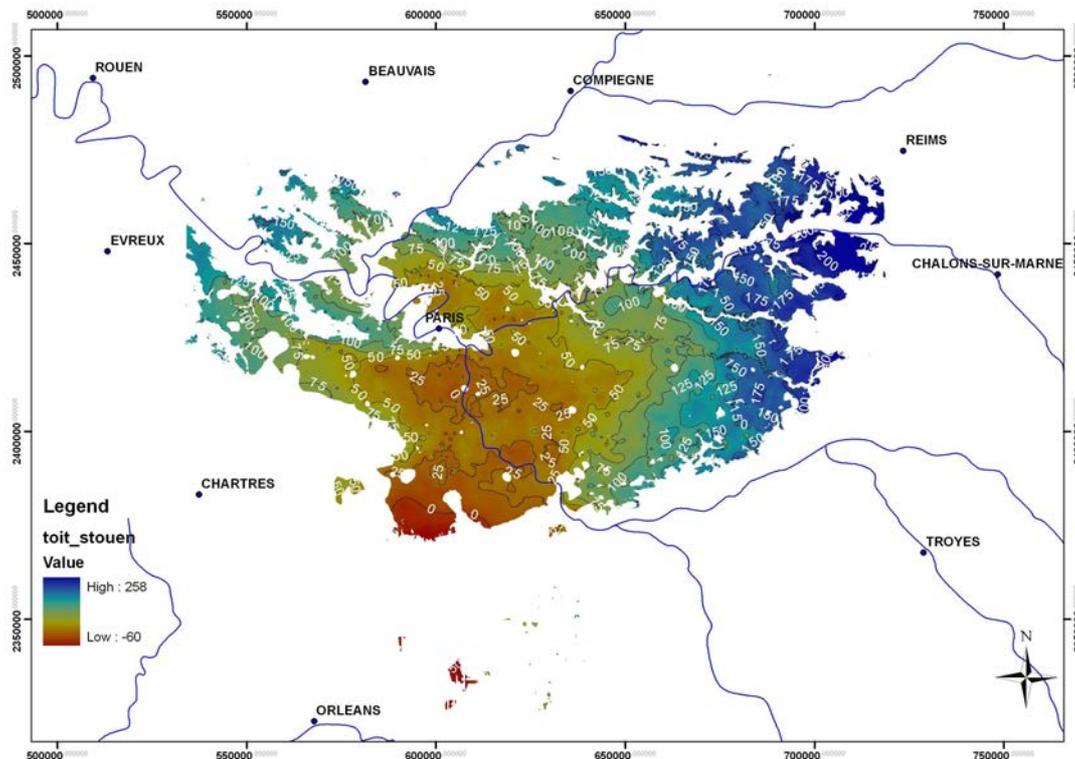


Illustration 17 : Carte structurale du toit des Calcaires de Champigny

3.1.3. PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE

3.1.3.1. Pluviométrie – évapotranspiration

Les données météorologiques (pluviométrie, évapotranspiration potentielle) utilisée par le modèle sont issues de Météo-France et proviennent de la procédure SAFRAN (Quinatana Segui et al., 2008) qui fournit des valeurs journalières de chaque variable sur une grille régulière au pas de 8 kilomètres. La période couverte par ces données va de 1970 à nos jours. A titre d'exemple, l'illustration 18 présente, sur la grille SAFRAN, la pluviométrie moyenne annuelle entre 1970 et 2004.

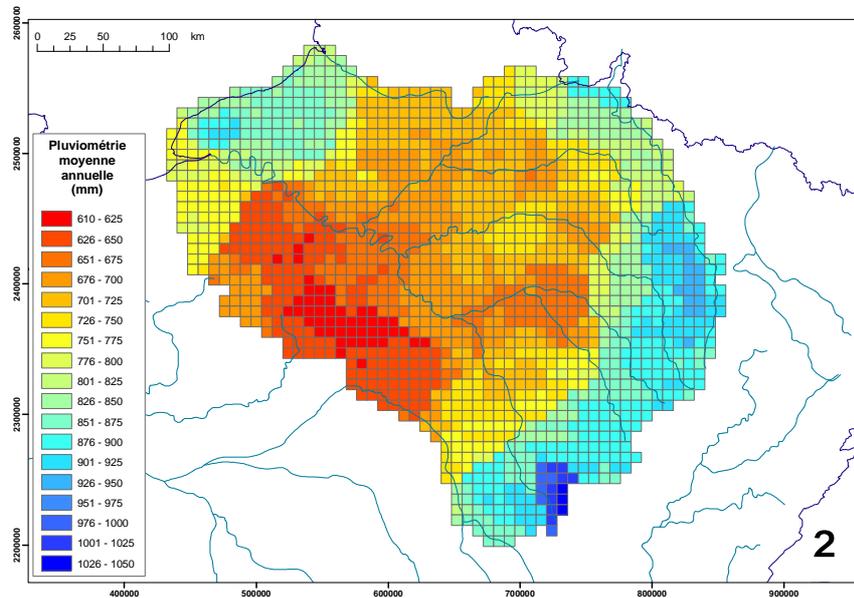


Illustration 18 : Pluviométrie moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine

3.1.3.2. Paramètres des fonctions de production du module de surface

Les paramètres des différentes fonctions de production (présentés Illustration 6) qui permettent d'effectuer le bilan hydrique des précipitations, en toute maille de surface, sont établis, préalablement à tout calage du modèle, à partir de paramètres physiographiques. Ces paramètres sont essentiellement :

- l'occupation du sol, déterminée à partir de la base de données « Corine Land Cover » ;
- les différentes classes de sol, déterminées à partir de la base de données sol de l'INRA d'Orléans (unité Infosol).

Quinze fonctions principales ont été déterminées sur le modèle de surface : une fonction « zone urbaine », une fonction « eau libre », une fonction « zone de socle » et 6 fonctions « zones humides », « calcaires », « argiles », « sables », « limons » et « alluvions » en présence ou non de forêt.

Ces 15 fonctions de production sont ensuite réparties proportionnellement en fonction de leur présence sur chaque maille de surface.

3.1.3.3. Paramètres du souterrain

Les paramètres de calage des différentes couches aquifères sont la transmissivité (qui représente le produit de la perméabilité de l'aquifère par son épaisseur utile) et le coefficient d'emmagasinement (rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique correspondante). Ces paramètres sont initialement estimés à partir de mesures ponctuelles et sont ensuite calés dans le but de reproduire les niveaux piézométriques moyens des aquifères mais également leur évolution dans le temps sous l'effet de l'alternance de période de sécheresse – période humide, à l'échelle de temps saisonnière ou pluri-annuelle.

3.1.4. BASE DE DONNEES « PRELEVEMENTS »

Afin de pouvoir prendre en compte de manière explicite l'ensemble des prélèvements anthropiques du bassin lors de la phase de calage et d'exploitation du modèle, des bases de données ont été compilées à partir de l'ensemble des éléments fournis par l'agence de bassin Seine-Normandie, la DRIEE Île-de-France et l'association AQUI-Brie. Ces bases de données concernent les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP), pour l'industrie et pour l'agriculture (irrigation principalement). Elles permettent de disposer des prélèvements annuels effectués entre les années 2000 et 2004 pour l'AEP et l'industrie et entre les années 1994 et 2006 pour les prélèvements agricoles. Pour l'ensemble des captages, nous avons cherché à préciser au mieux l'emplacement du forage ainsi que le ou les aquifères captés ce qui permettra de répartir au mieux ces prélèvements lors des modélisations.

3.1.4.1. Prélèvements A.E.P. en nappe

L'illustration 19 précise la situation géographique de l'ensemble des captages recensés dans la base de prélèvements AEP.

Remarque : les prélèvements effectués dans les départements les plus à l'Est du Bassin (Meuse, Haute Marne, Côte d'Or) n'ont volontairement pas été traités car ils sont situés en totalité hors de la zone de représentation des aquifères du modèle « Seine ».

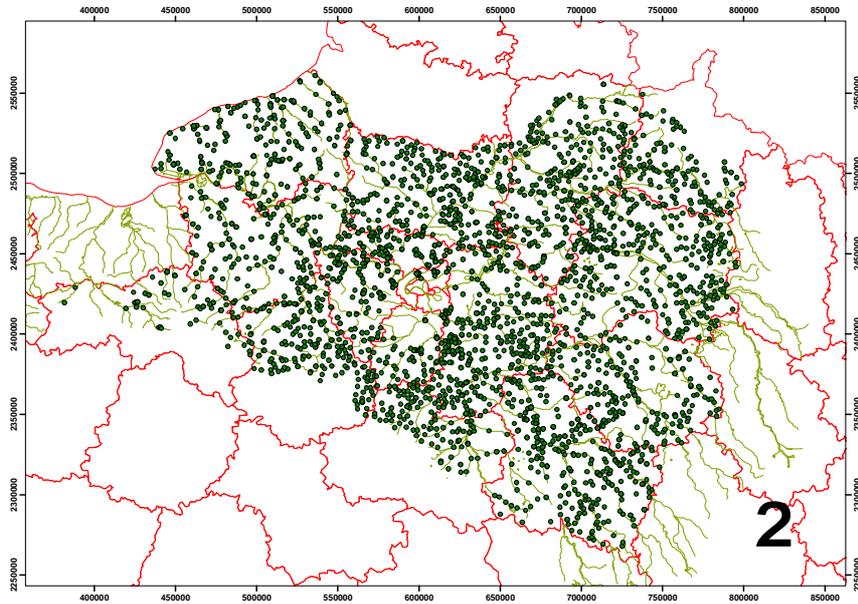


Illustration 19 : Situation géographique des captages A.E.P. en nappe

Sur l'ensemble de la période considérée (2000 – 2004), l'évolution annuelle des prélèvements AEP globaux recensés dans la base de données est relativement stable (autour de 700 Mm³/an).

3.1.4.2. Prélèvements industriels en nappe

Les prélèvements industriels sont localisés sur l'illustration 20. Sur l'ensemble de la période considérée (2000 – 2004), l'évolution annuelle des prélèvements globaux recensés dans la base de données est relativement stable autour de 180 Mm³/an.

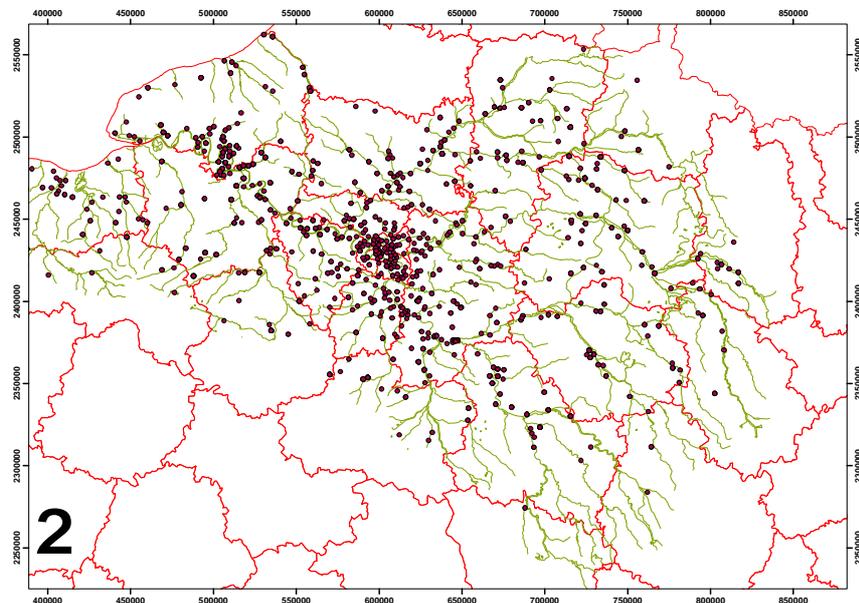


Illustration 20 : Localisation de l'ensemble des forages industriels de prélèvement en nappe

3.1.4.3. Prélèvements agricoles en nappe

Sur l'ensemble de la période considérée (1994 – 2006), l'évolution annuelle des prélèvements globaux recensés dans la base de données est présentée sur l'illustration 21. Ces valeurs font apparaître une évolution certaine des quantités prélevées à partir des années 2002. Cet accroissement sensible des prélèvements peut être lié simplement à la mise en place systématique de compteurs qui permet de quantifier plus précisément les quantités d'eau prélevées par les agriculteurs pour l'irrigation par exemple.

Dans la grande majorité des cas, les prélèvements agricoles sont effectués dans la nappe phréatique (illustration 22).

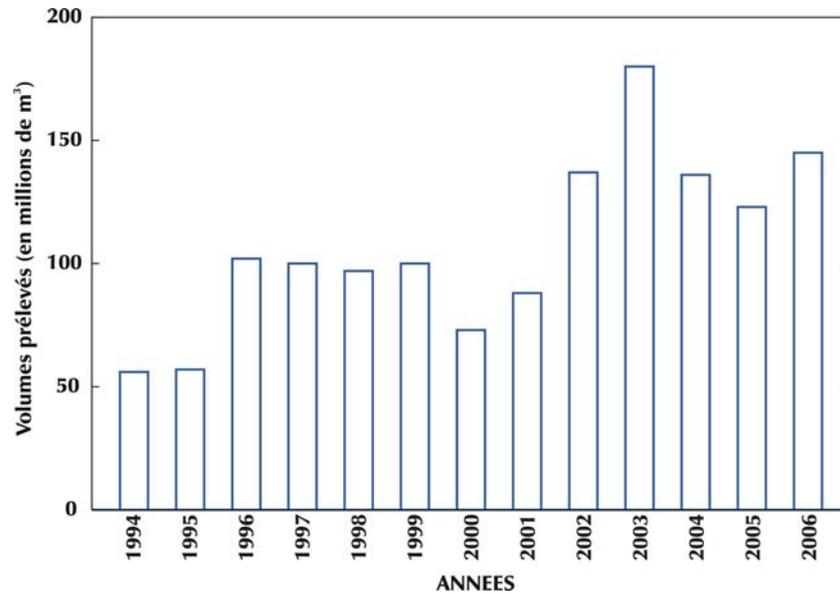


Illustration 21 : Prélèvements agricoles en nappe moyens annuels entre 1994 et 2006

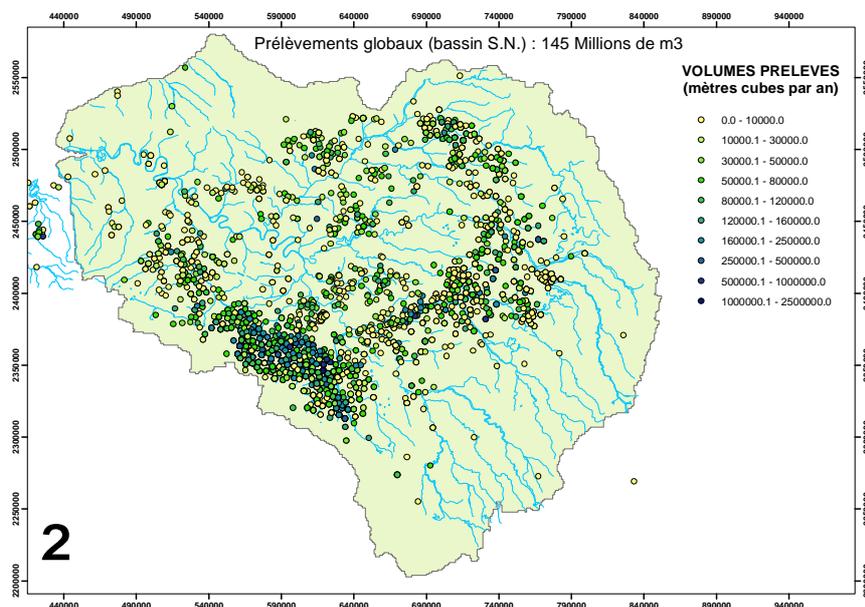


Illustration 22 : Volumes prélevés en nappe à des fins agricoles en 2006

3.1.5. PRISE EN COMPTE DES PRELEVEMENTS DANS LES MODELISATIONS

Dans les modélisations en régime transitoire qui permettent de reproduire au mieux l'évolution des niveaux piézométriques des nappes et des débits des cours d'eau, la prise en compte des

prélèvements en nappe s'effectue au pas de temps de calcul du modèle, c'est-à-dire la journée.

3.1.5.1. Volumes journaliers prélevés

Les différentes bases de données constituées fournissent les volumes moyens annuels prélevés en nappe par ouvrage. Compte tenu du pas de calcul du modèle, ces volumes sont répartis :

- de manière uniforme sur toute l'année pour ce qui concerne les prélèvements à des fins AEP et industriels ;
- en moyenne et uniformément sur une période comprise entre le 15 mai et le 30 août pour ce qui concerne les prélèvements agricoles.

3.1.5.2. Formations aquifères captées

Les règles suivantes sont appliquées pour ce qui concerne les aquifères captés :

- la ou les formations aquifères captées sont précisées dans les bases de données :
 - une seule formation est répertoriée : la globalité du débit est affectée à la maille de la couche « modèle » correspondante ;
 - deux ou plusieurs formations sont répertoriées : le débit global est réparti proportionnellement au nombre de formations.
- Les formations captées ne sont pas précisées dans les bases :
 - Le prélèvement est appliqué en totalité à formation aquifère située à la verticale immédiate du point de captage si son épaisseur est supérieure à 20 mètres ;
 - Le prélèvement est appliqué par moitié à la première formation rencontrée si son épaisseur est comprise en 10 et 20 mètres, l'autre moitié étant appliquée à la formation aquifère sous jacente à la première ;
 - Si l'épaisseur de la première formation rencontrée est inférieure à 10 mètres, aucun prélèvement n'est effectué dans cette couche, les prélèvements étant reportés sur les couches plus profondes selon les règles énoncées précédemment.

3.2. CALCUL DE L'IMPACT DES PRELEVEMENTS EN REGIME PERMANENT

L'illustration 23 présente le bilan hydrique moyen des formations aquifères, calculé en régime permanent et avec intégration des pompages. Le régime permanent représente un état moyen du

système, invariable dans le temps et donc stabilisé.

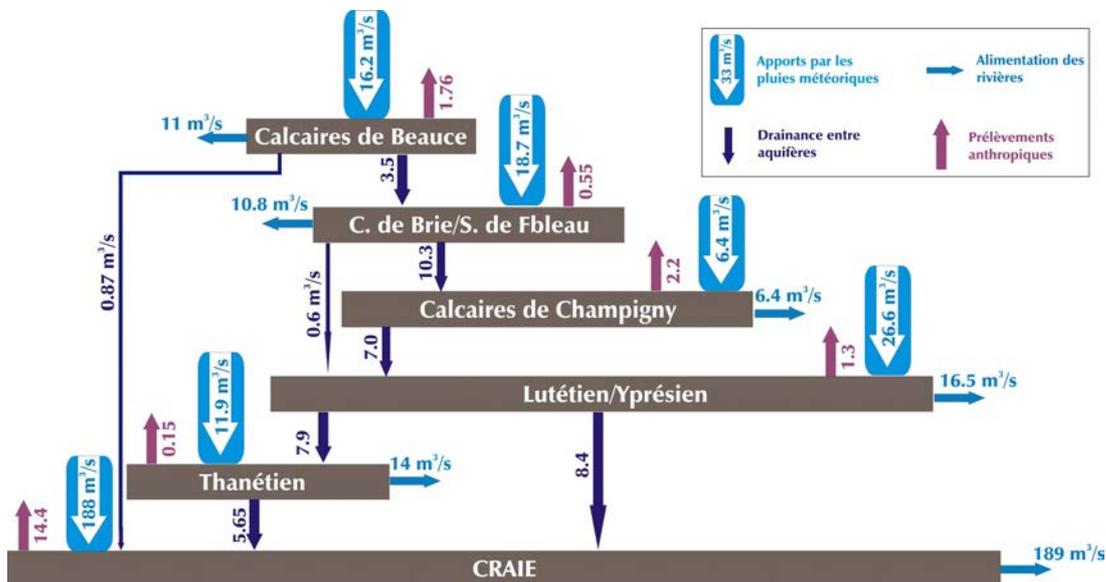


Illustration 23 : Bilan hydrique global des formations aquifères en régime permanent (période moyenne 1985-2008) avec prise en compte des prélèvements

Au regard de ce bilan, la pression relative des prélèvements anthropiques (rapport prélèvements/alimentation de la formation aquifère par les pluies et la drainance entre formations) sur la ressource est précisée sur le tableau suivant.

Formation aquifère	Pression des prélèvements sur la ressource
Calcaires de Beauce	10.9 %
Calcaires de Brie / Sables de Fbleau	2.5 %
Calcaires de Champigny	13.2 %
Pression relaLutétien/Yprésien	3.8 %
Thanétien	0.7 %
Craie	7.1 %

Tableau 1 : Pression relative des prélèvements par aquifère

Les illustrations 24 à 29 présentent la piézométrie moyenne de chaque formations aquifère modélisée et calculée en régime permanent.

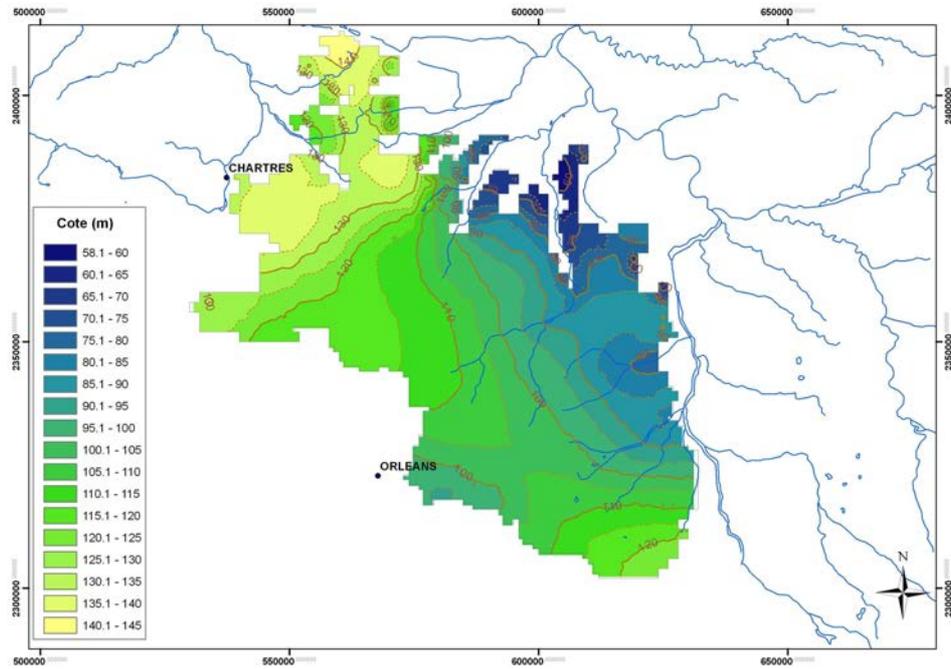


Illustration 24 : Piézométrie de la formation aquifère des Calcaires de Beauce calculée en régime permanent d'écoulement

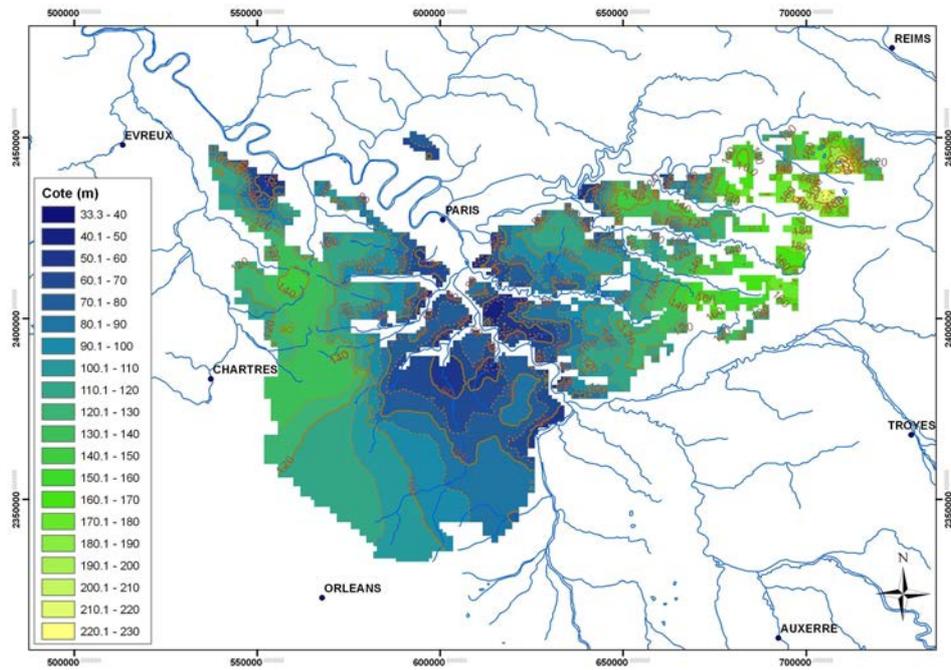


Illustration 25 : Piézométrie de la formation aquifère des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau calculée en régime permanent d'écoulement

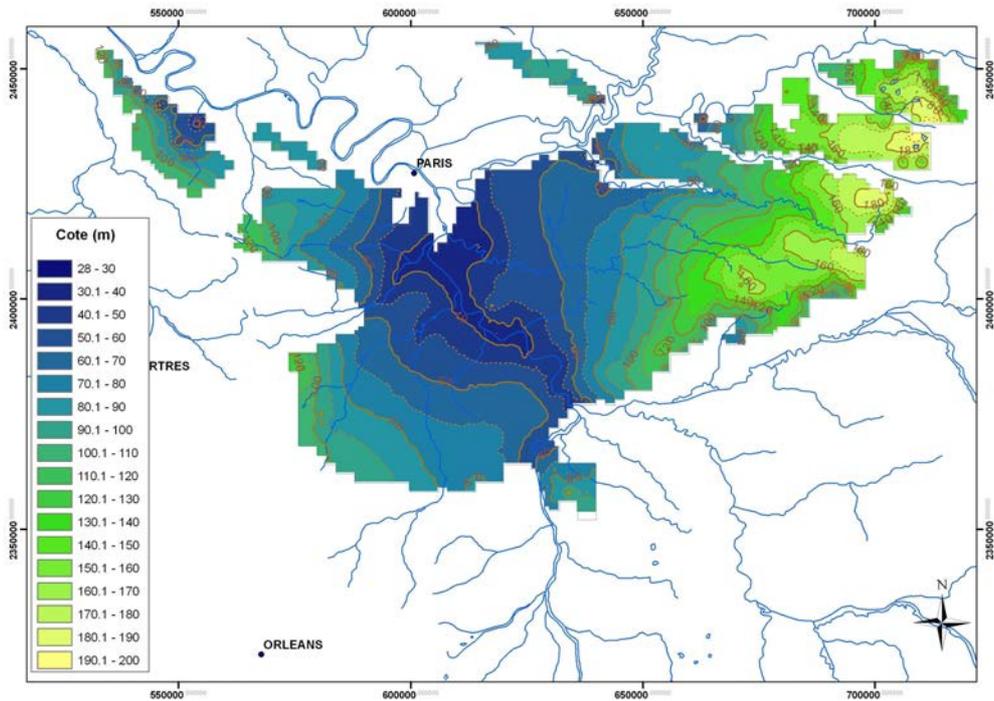


Illustration 26 : Piézométrie de la formation aquifère des Calcaires de Champigny calculée en régime permanent d'écoulement

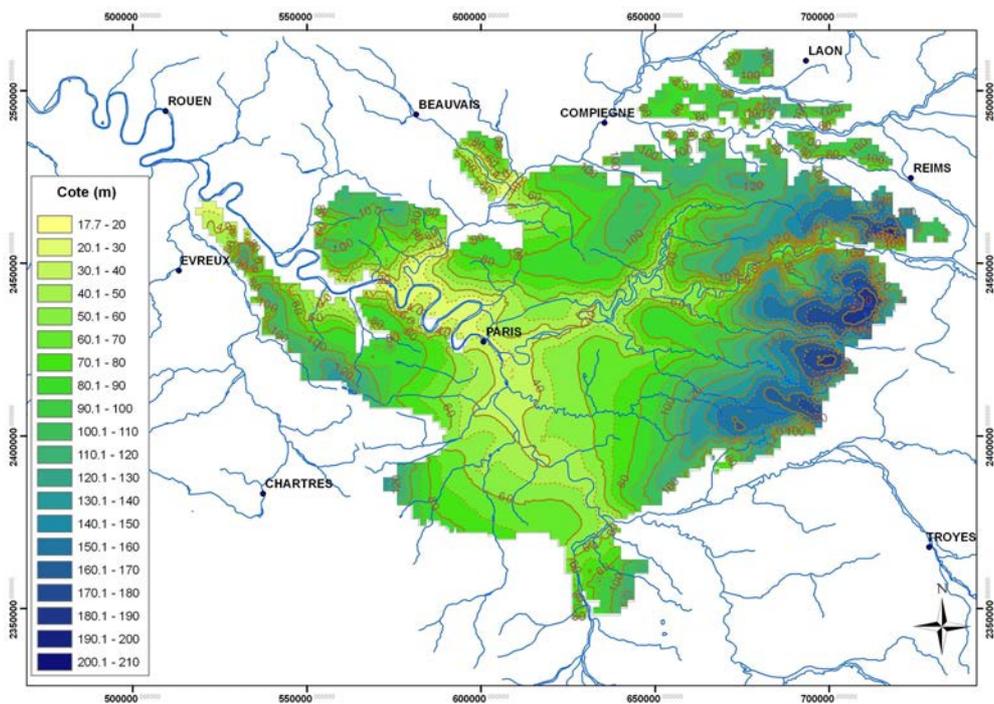


Illustration 27 : Piézométrie de la formation aquifère du Lutétien/Yprésien calculée en régime permanent d'écoulement

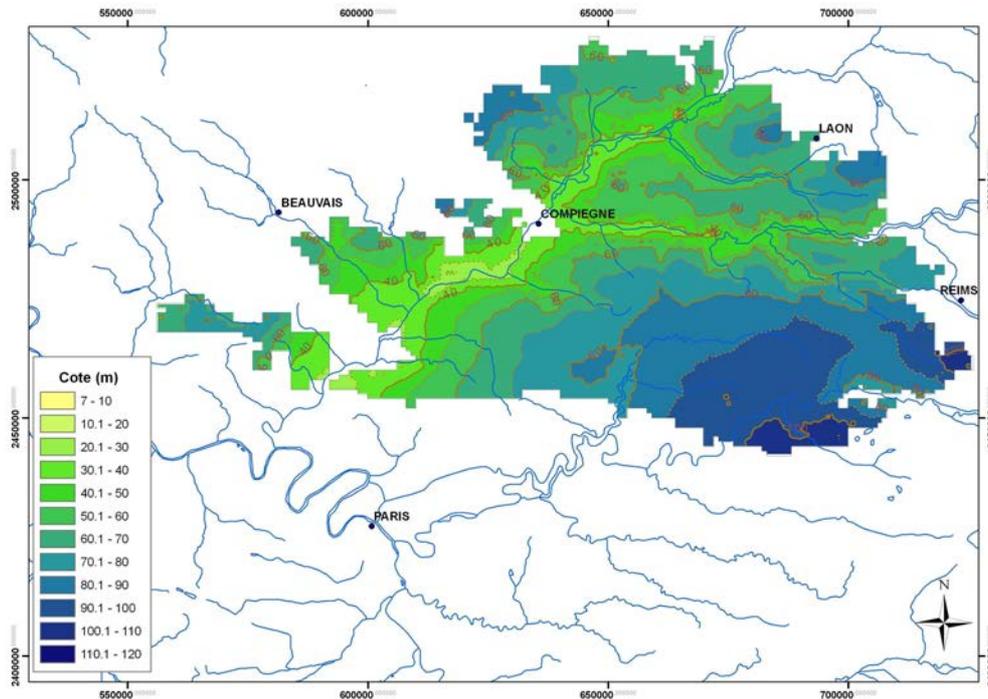


Illustration 28 : Piézométrie de la formation aquifère du Thanétien calculée en régime permanent d'écoulement

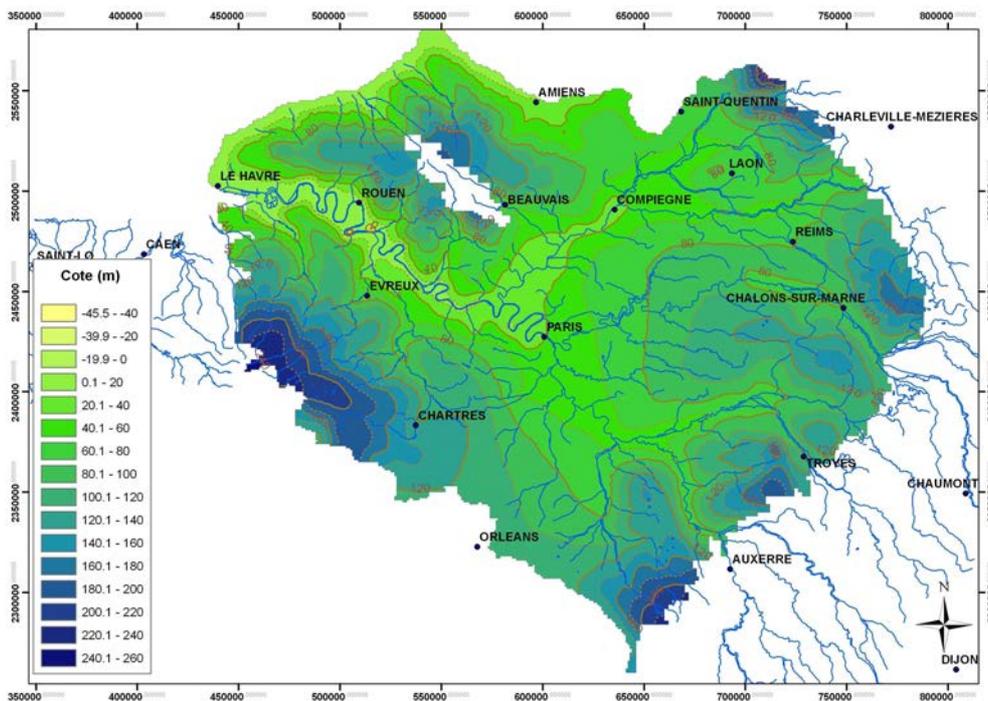


Illustration 29 : Piézométrie de la formation aquifère de la Craie calculée en régime permanent d'écoulement

3.3. CALCUL EN REGIME TRANSITOIRE

Le calcul en régime transitoire est effectué au pas de temps journalier. Le calage du modèle à été effectué sur la période 1995-2007 puis le calcul étendu sur la période 1985-2011. Ce calage doit permettre de reproduire au mieux, tout en respectant le bilan hydrique de l'ensemble du système (pluviométrie, évaporation, dynamique des formations aquifères, débits sur le réseau hydrographique et aux exutoires, ...) les piézométries mesurées dans les différents ouvrages de contrôle du bassin ainsi que les débits aux principales stations hydrométriques. Près de 100 piézomètres et 150 stations hydrologiques sont ainsi utilisées (illustration 30 et 31).

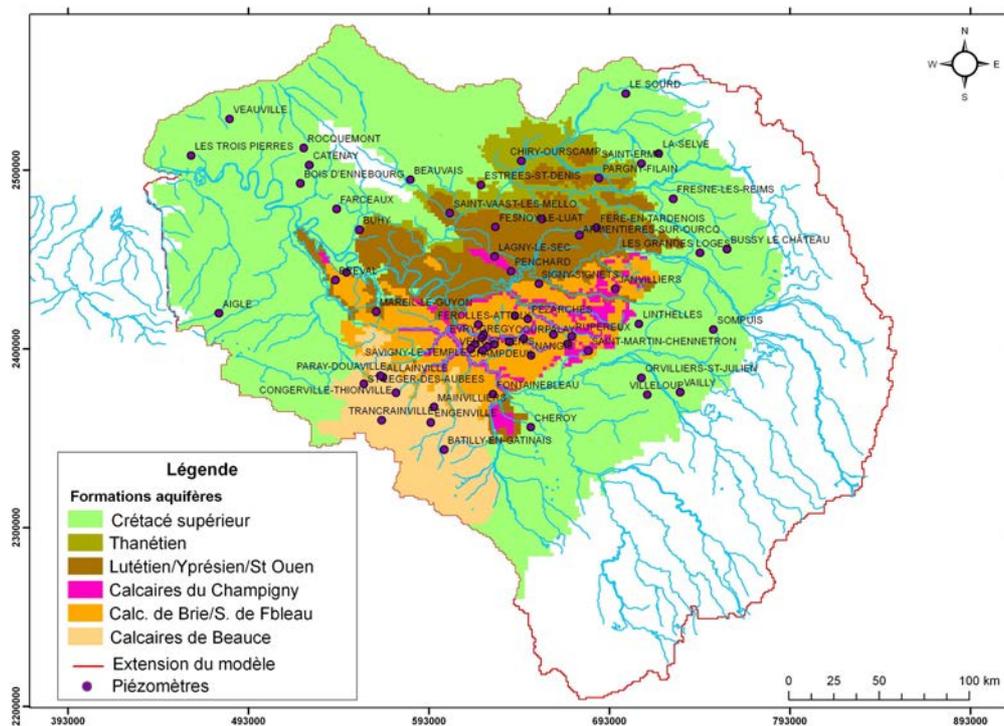


Illustration 30 : Localisation des piézomètres utilisés pour le calage et l'exploitation du modèle

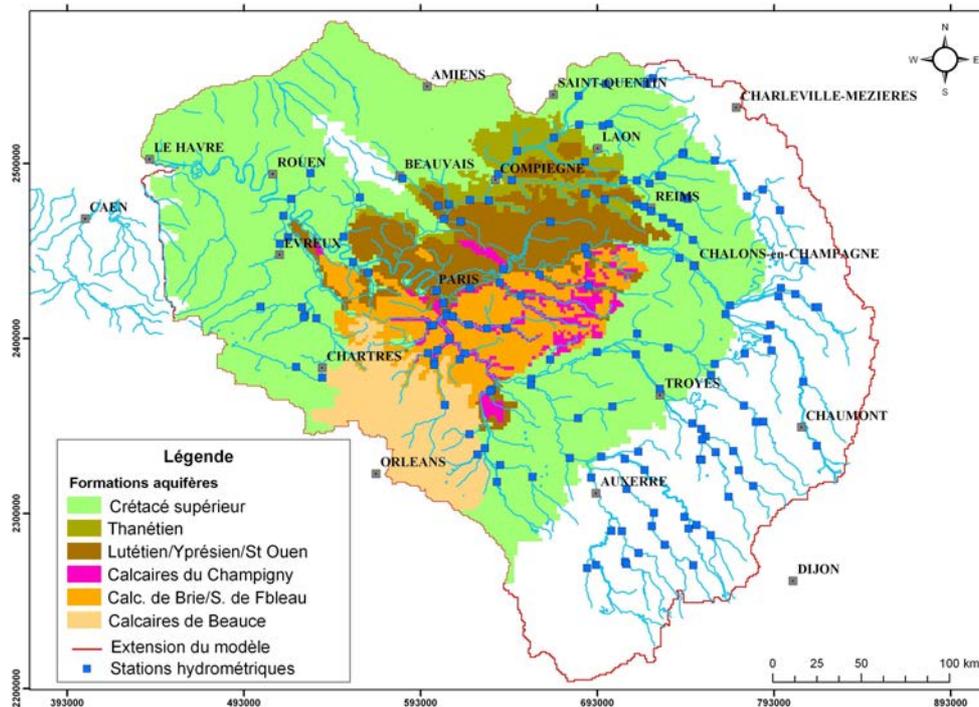


Illustration 31 : Localisation des stations hydrométriques utilisés pour le calage et l’exploitation du modèle

Nous illustrons ci-dessous quelques résultats du modèle via une comparaison des simulations au pas de temps journalier avec les observations en termes de piézométrie et de débits sur certaines stations hydrométriques du bassin. On constate un bon accord général entre le modèle et les observations.

3.3.1. EVOLUTION DES NIVEAUX CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE

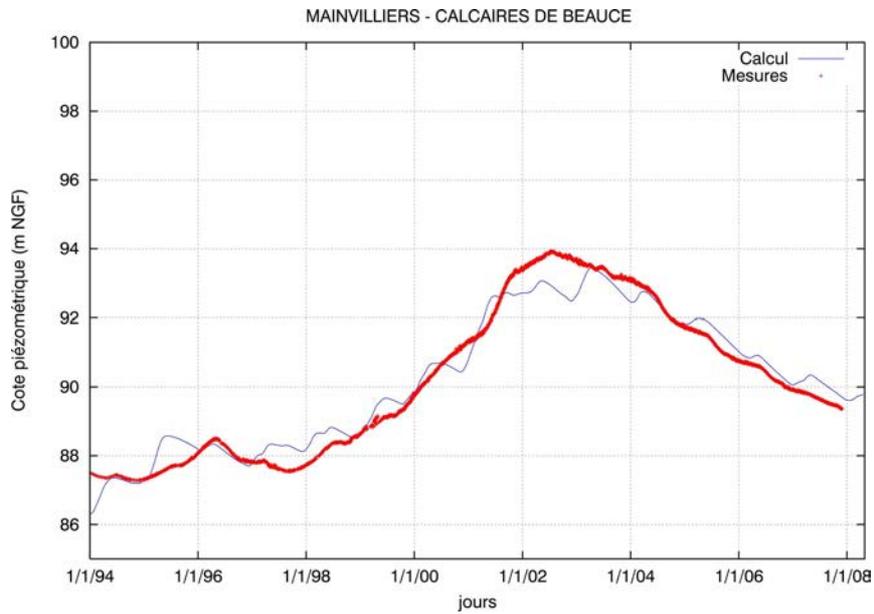


Illustration 32 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Mainvilliers (Loiret)

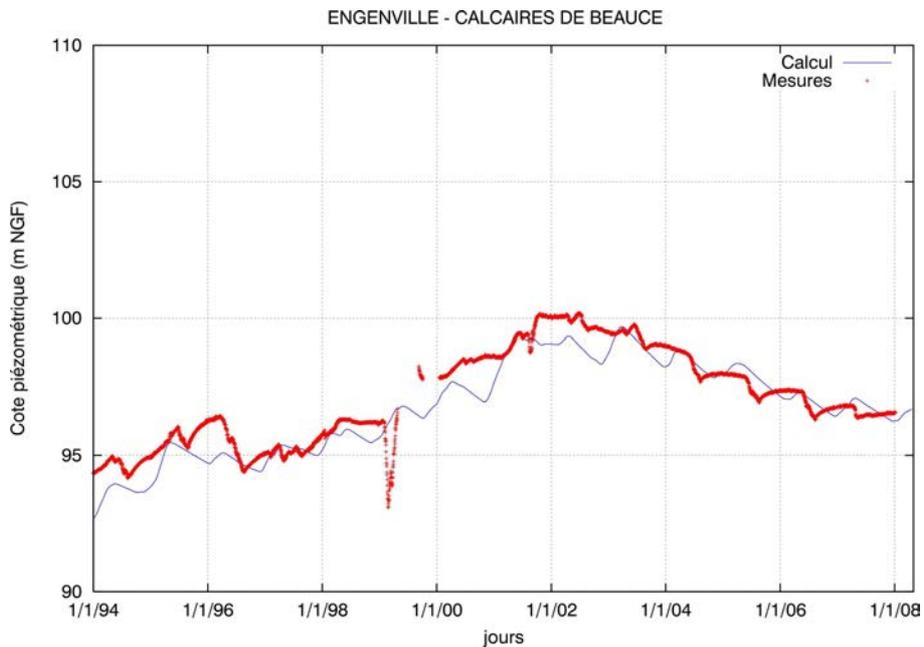


Illustration 33 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre d'Engenville (Loiret)

3.3.2. EVOLUTION DES NIVEAUX CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE CHAMPIGNY

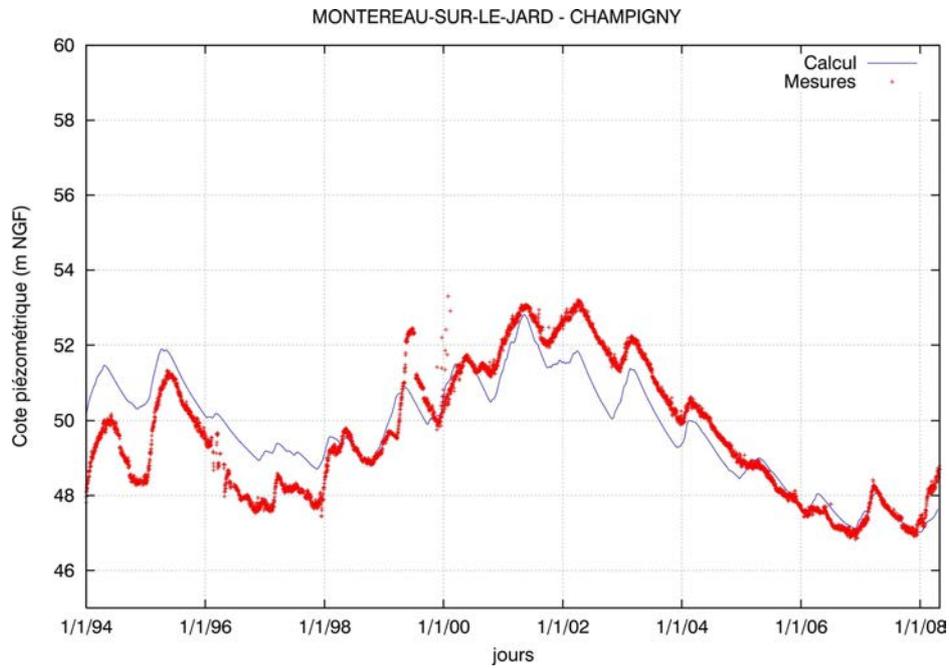


Illustration 34 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Montereau sur le Jard (Seine et Marne)

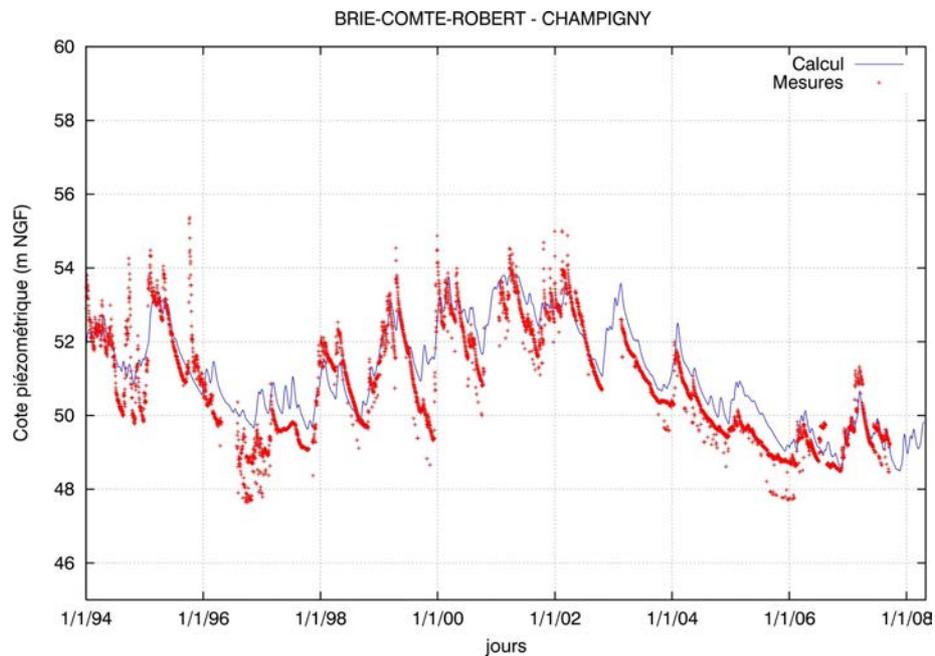


Illustration 35 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Brie-Comte-Robert (Seine et Marne)

3.3.3. ÉVOLUTION DES NIVEAUX CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DE LA CRAIE

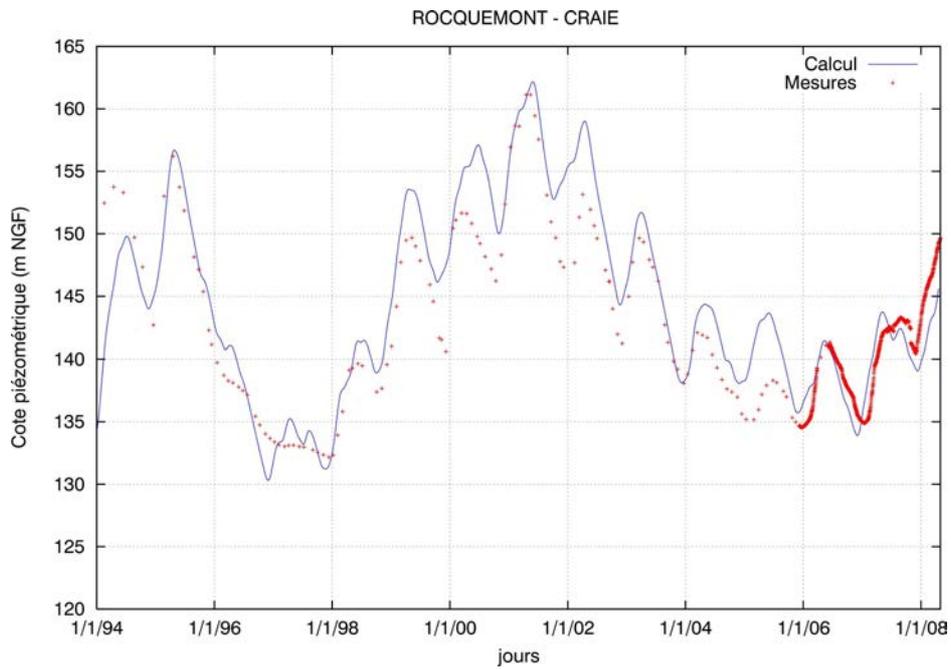


Illustration 36 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Rocquemont (Seine-Maritime)

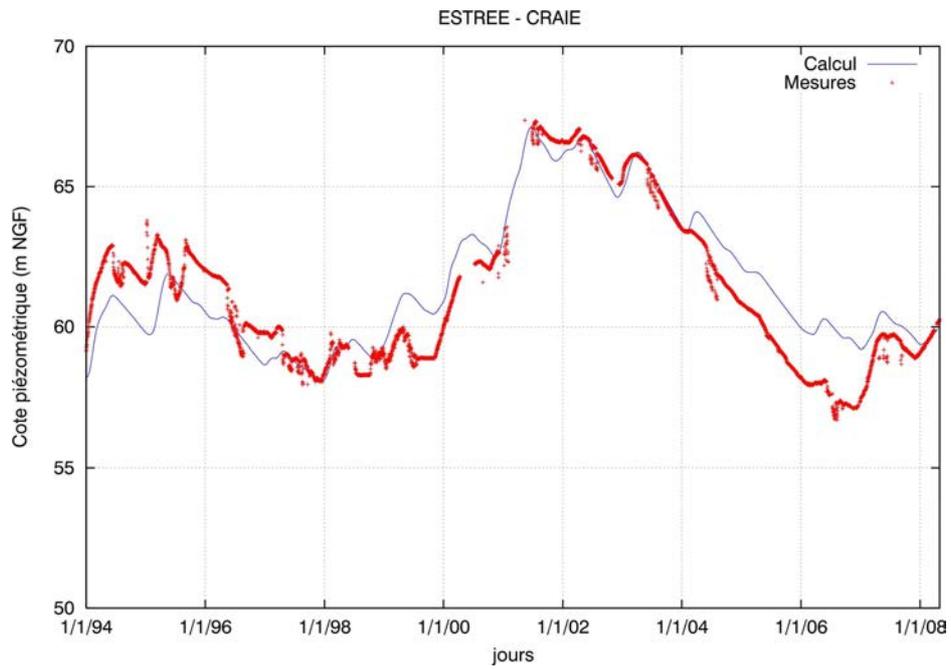


Illustration 37 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre d'Estrée-Saint-Denis (Oise)

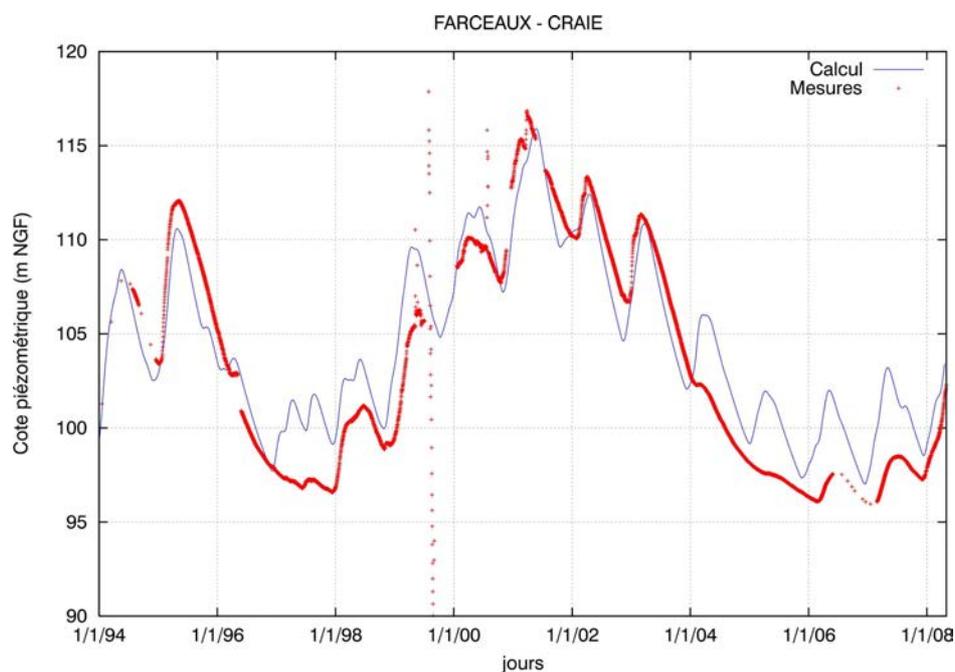


Illustration 38 : Evolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Farceaux (Eure)

3.3.4. DEBITS CALCULES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES

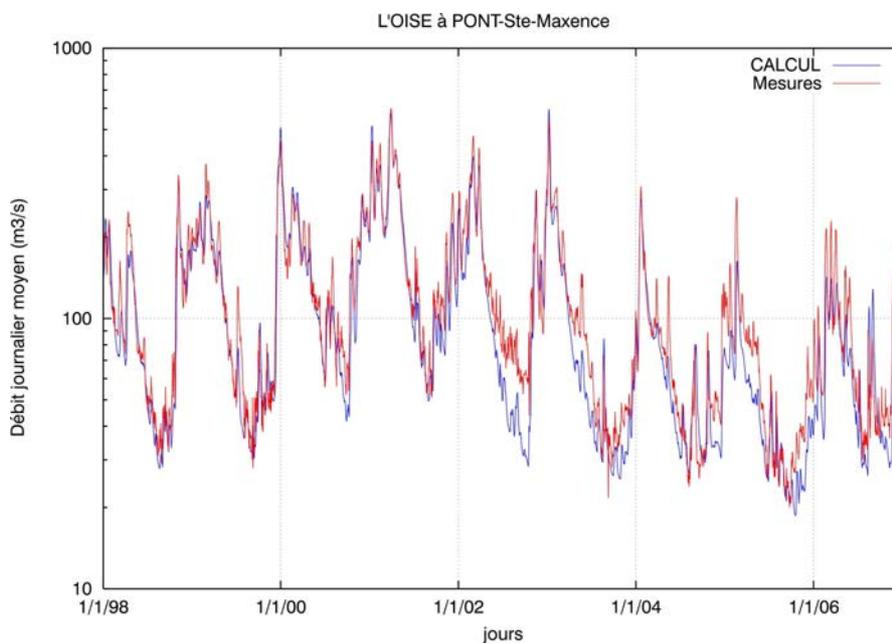


Illustration 39 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Pont-Ste-Maxence

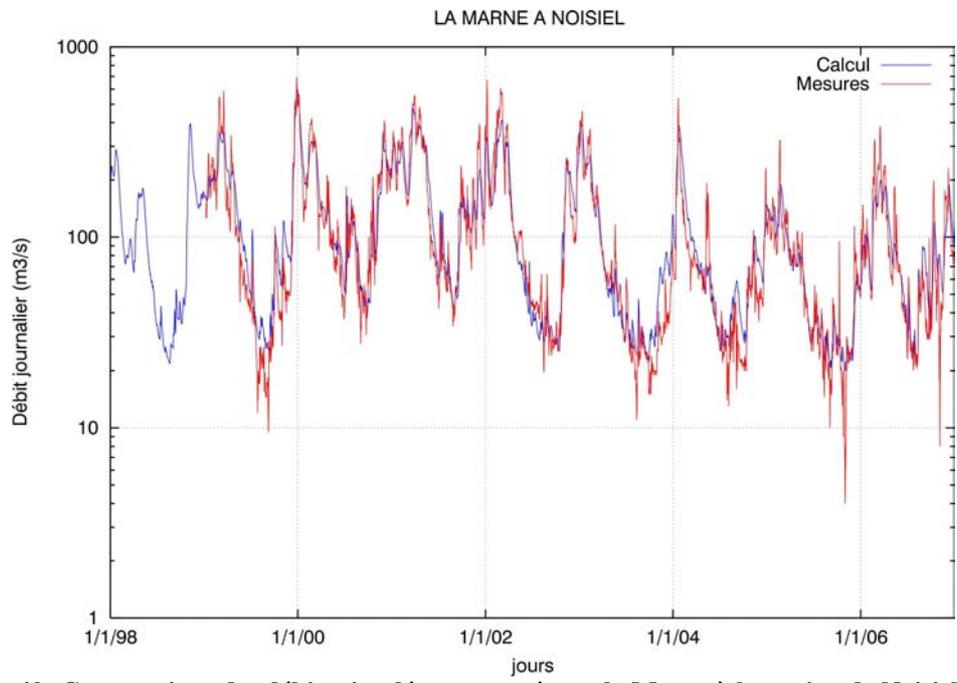


Illustration 40 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur la Marne à la station de Noisiel (Gournay)

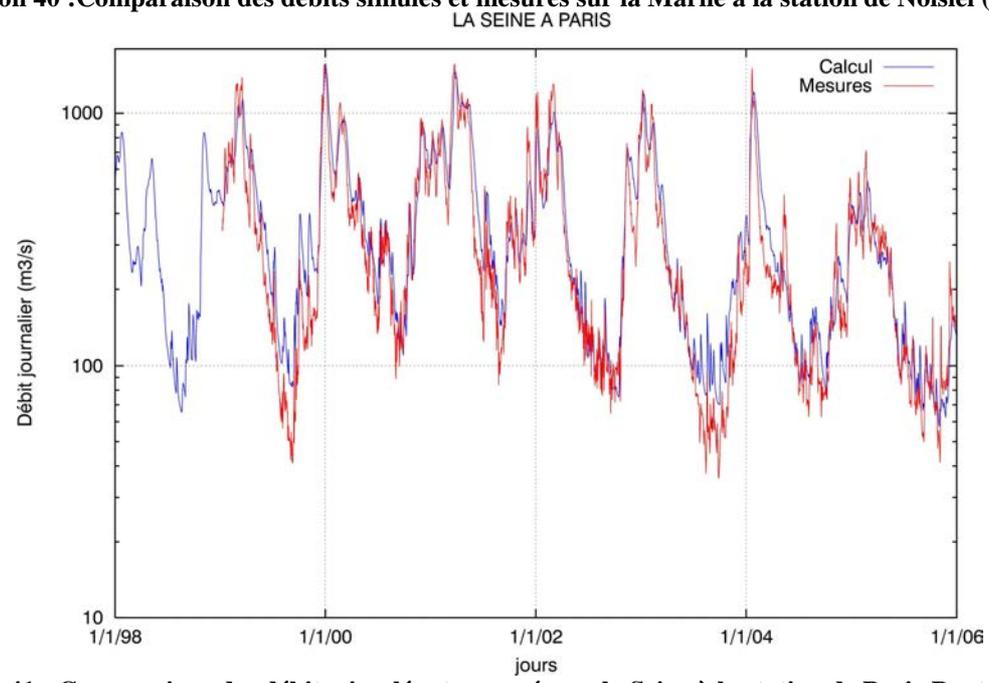


Illustration 41 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Paris-Pont d'Austerlitz

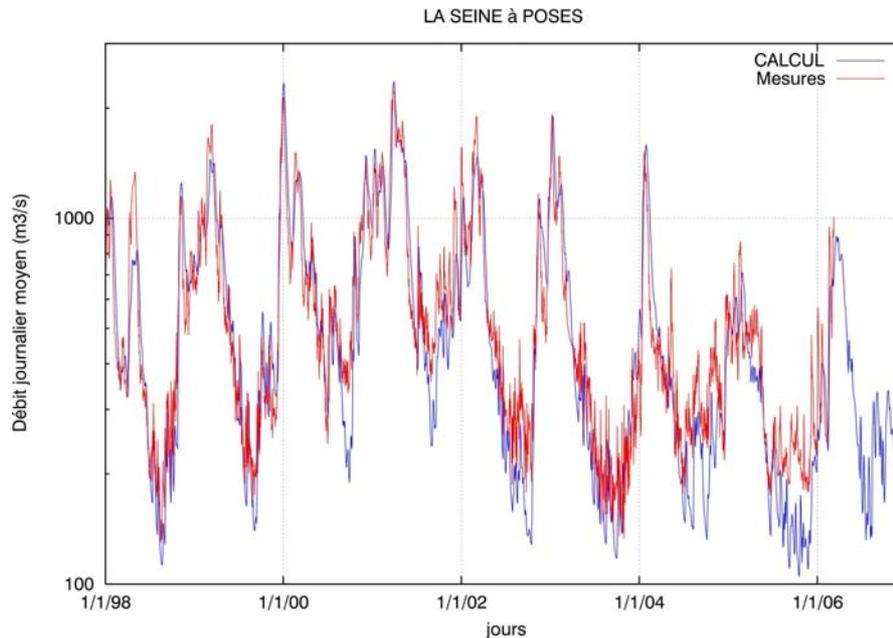


Illustration 42 : Comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Poses

3.4. EXPLOITATION DU MODELE

En plus de l'exploitation du modèle dans le cadre de ce projet « Explore 2070 », le modèle présenté ci-dessus a été mis à la disposition de la DRIEE Île-de-France qui l'utilise principalement pour étudier l'impact de modifications de volumes prélevés sur les débits des petits cours d'eau de tête de bassin.

Il sert également à l'estimation du débit de base des cours d'eau (le débit du aux seuls apports par les formations aquifères) pour l'estimation des débits d'étiage sévère. A titre d'exemple, les illustrations 43 et 44 présentent les débits mesurés (naturalisés à partir des données journalières de lachûres et stockages des barrages réservoirs situés à l'amont) et calculés au printemps 2011, à Paris Austerlitz pour la Seine et à Noisiel pour la Marne, et l'estimation du débit d'étiage en l'absence totale de précipitations à partir du 22 avril 2011.

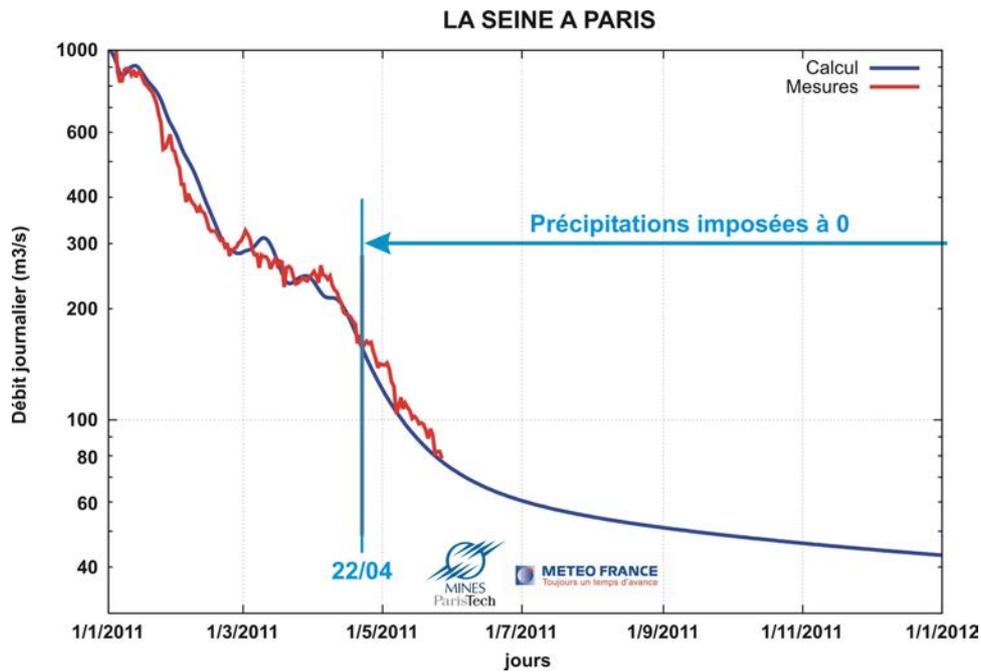


Illustration 43 : Estimation du débit de base de la Seine à Paris en l'absence totale de précipitations

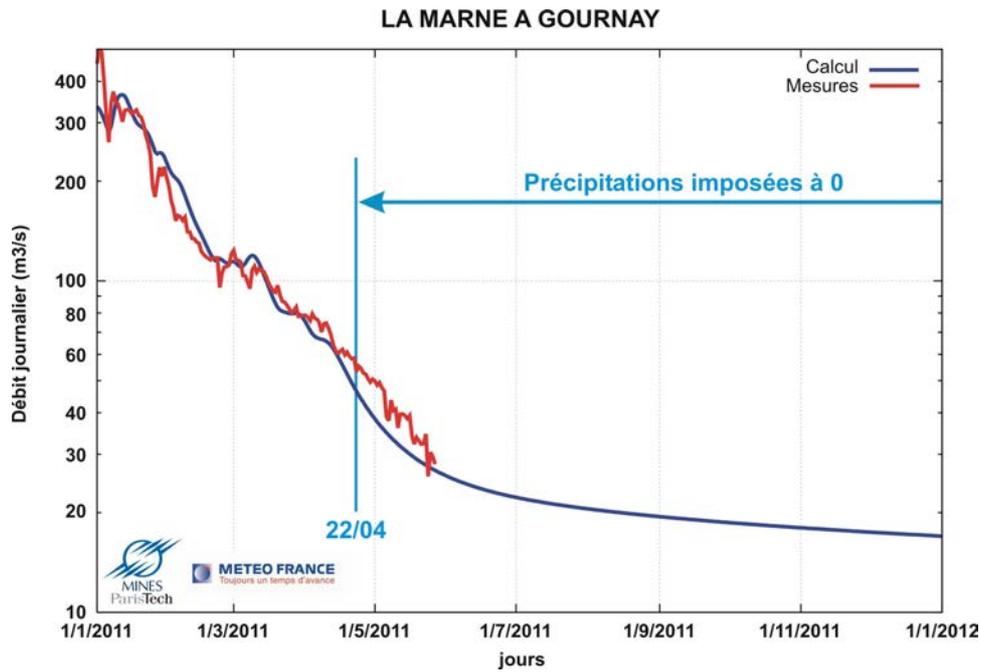


Illustration 44 : Estimation du débit de base de la Marne à Gournay en l'absence totale de précipitations

4. EXPLOITATION DU MODELE SOUS CHANGEMENTS CLIMATIQUES

4.1. METHODOLOGIE GENERALE

La méthodologie généralement utilisée dans ce type de projet est présentée sur l'illustration 45.

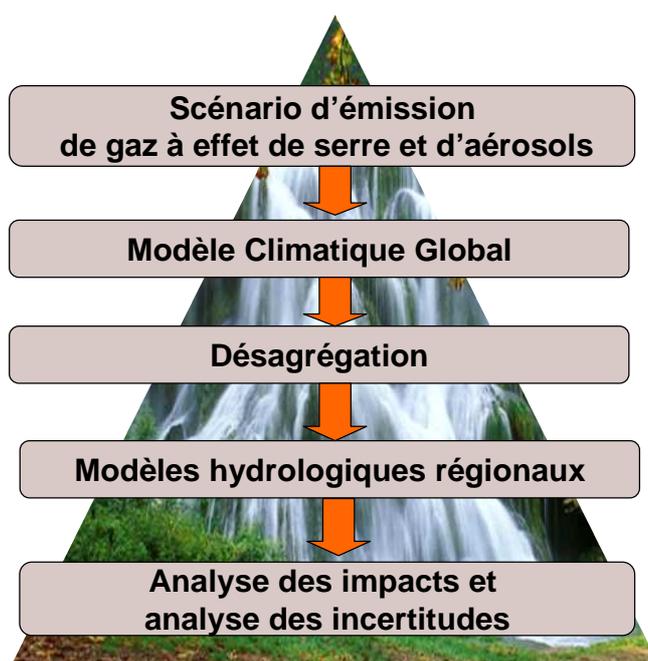


Illustration 45 : Principe général d'une étude d'impact du changement climatique (J. Boé 2007)

La première étape consiste à estimer les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Ces émissions sont alors utilisées par les modèles de climat pour en déduire l'évolution du climat dans le futur. Ces simulations sont ensuite désagrégées (ou régionalisées) pour obtenir une meilleure estimation de l'évolution du climat à une échelle plus fine. Ces informations régionales sont ensuite utilisées dans des modèles hydrologiques régionaux pour estimer l'impact du changement climatique sur les débits des rivières et le niveau des nappes phréatiques. Chacune de ces opérations conduit à une forme de simplification de la réalité, qui génère une part d'erreur ou d'incertitude.

Sept modèles de climat et scénario d'émission de gaz à effet de serres (issus du 4^{ème} exercice du GIEC) ont été traités dans le cadre du projet « Explore 2070 ».

4.1.1. SCENARIOS D'EMISSION

Les modèles de climat utilisent différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols pour réaliser des projections sur l'évolution du climat jusqu'en 2100. Les experts du GIEC en ont sélectionné plusieurs afin de garantir une base de travail commune et représentative. Ces scénarios prennent en compte des facteurs sociétaux, démographiques et économiques. L'illustration 46 présente les évolutions temporelles des émissions de gaz à effet de serre selon les différents scénarios traités par le GIEC.

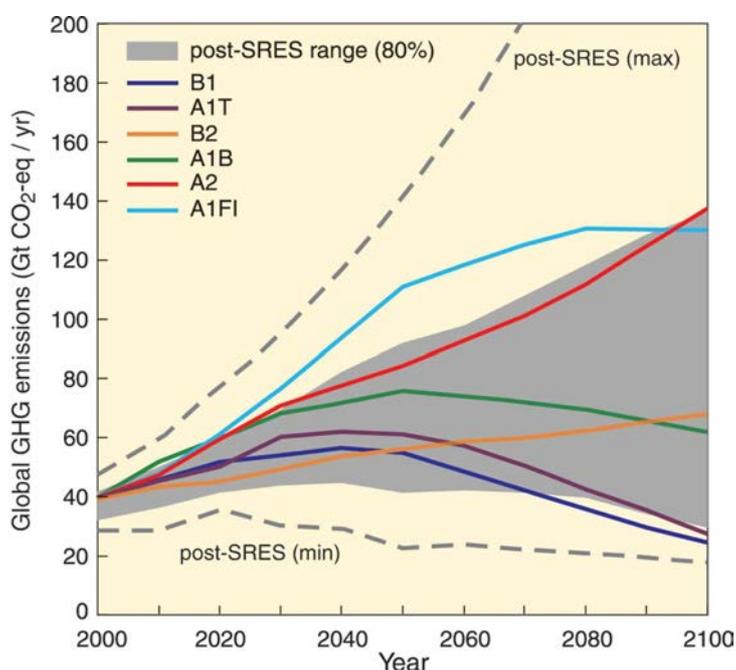


Illustration 46 : Émissions mondiales de GES (en gigatonnes équivalent CO2 par an) en l'absence de politiques climatiques additionnelles (source : 4^{ème} rapport du GIEC).

Dans le cadre du projet « Explore 2070 », c'est le scénario médian A1B qui a été retenu.

4.1.2. MODELES DE CLIMAT ET METHODE DE DESAGREGATION

Sept modèles de climat ont donc été retenus dans le cadre du projet « Explore 2070 ». Tous ces modèles ont été traités par le GIEC et ont été désagrégés par la même méthode de désagrégation : la méthode des régimes de temps (Boé *et al*, 2006).

Cette méthode présente l'avantage d'être facilement applicable à un grand nombre de projections climatiques et peut être utilisée pour la quantification des incertitudes. Sa principale limite réside

dans le fait que les liens « grande échelle – échelle locale » sont considérés invariants entre le futur et le passé. Elle ne permet donc pas, ou mal, la prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive du climat actuel (sauf pour la température) (Terray *et al.*, 2010).

Six des sept modèles de climat utilisés (CCCMA_GCGM3_1, GFDL_CM2_0, GFDL_CM2_1, GISS_MODEL_E_R, MPI_ECHAM5, MRI_CGCM2_3_2A) couvrent uniquement la période 1961-1990 pour la simulation du climat actuel et la période 2046-2065 pour la période temps futur (ou milieu de siècle). Seul le modèle ARPEGE couvre de manière continue, la période 1950-2065.

4.1.3. EVALUATION DES SCENARIOS CLIMATIQUES DESAGREGES

Une première évaluation consiste à vérifier que les simulations climatiques désagrégées sur le temps présent se comparent favorablement aux observations. Ainsi, l'illustration 47 présente la comparaison des évolutions lissées des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle entre les observations (« obs » analyse SAFRAN) et le scénario climatique ARPEGE A1B continu désagrégé par la méthode des régimes de temps (« mod »). On ne doit bien sûr pas s'attendre à ce que le modèle de climat reproduise les événements observés une année donnée mais il doit être capable de reproduire l'amplitude de variation ainsi que les tendances. C'est ce que l'on constate dans ce cas précis même si l'évolution de l'évapotranspiration potentielle varie cependant de façon plus lente dans le modèle désagrégé.

Scénario ARPEGE A1B continu

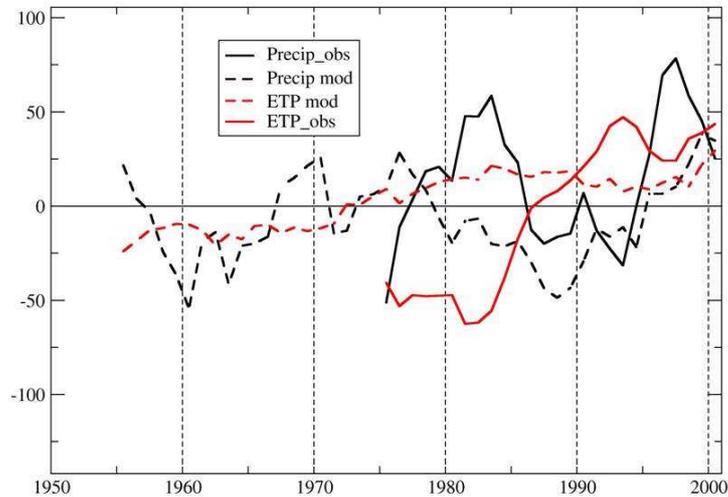


Illustration 47 : Evolution des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle moyennée par rapport à la moyenne des observations sur la période 1970-2000 (données SAFRAN)

En moyenne, les modèles de climat désagrégés sont capables de bien représenter les caractéristiques du bassin de la Seine comme le montre le tableau suivant.

MODELE	Précip. (mm/j)	ETP(mm/j)	Temp. (°C)
SAFRAN	2.14	2.18	10.05
ARP_CONT.	2.03	2.18	10.35
CCCMA_GCGM3_1	2.17	2.19	10.25
GFDL_CM2_0	2.18	2.19	10.35
GFDL_CM2_1	2.07	2.17	10.15
GISS_MODEL_E_R	2.09	2.20	10.35
MPI_ECHAM5	2.16	2.18	10.25
MRI_CGCM2_3_2A	2.17	2.18	10.35

Tableau 2 : Temps présent - précipitations, évapotranspiration potentielle et température moyenne selon les données de l'analyse SAFRAN et les 7 modèles de climat utilisés

4.1.4. EVOLUTION POSSIBLE DU CLIMAT

L'illustration 48 présente la tendance d'évolution sur la période 1950-2100 de la moyenne annuelle des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) simulées par le modèle ARPEGE Continu sous scénario d'émission A1B. On constate une augmentation assez régulière la moyenne

glissante sur 10 ans de l'ETP alors que l'évolution des précipitations, qui tendent à diminuer, est plus irrégulière et s'accompagne de fortes variations interannuelles (courbe en pointillés).

Scénario ARPEGE A1B continu

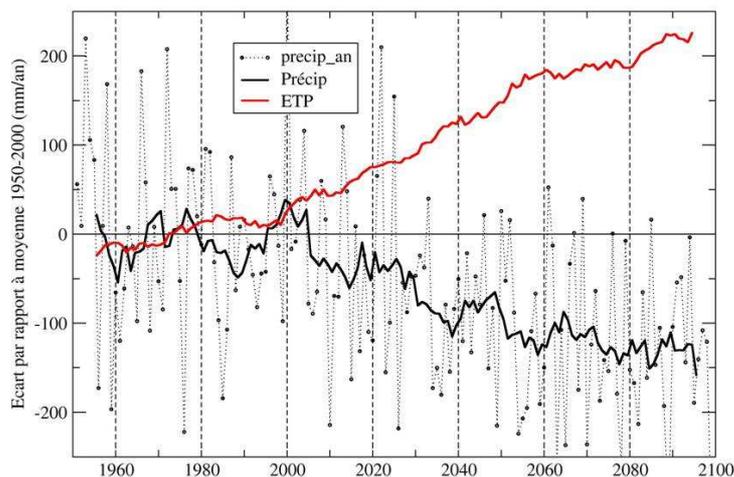


Illustration 48 : Evolution des précipitations et de l'ETP entre 1950 et 2100 selon le modèle ARPEGE sous scénario A1B et désagrégation par la méthode des régimes de temps.

Tous les scénarios projettent une augmentation de la température de 1,5 à 3 °C à l'horizon 2050. Cela s'accompagne d'une augmentation de l'ETP de 10 à 25 % (illustration 49) alors qu'en termes de précipitation les résultats sont plus dispersés (illustration 50).

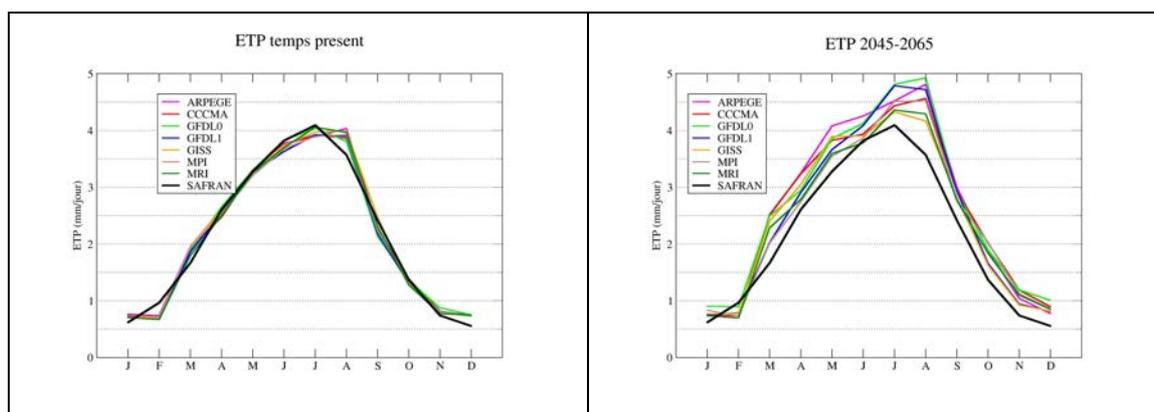


Illustration 49 : Evolution mensuelle moyenne de l'évapotranspiration potentielle (les valeurs mesurées actuelles sont reproduites sur la courbe en noir (données SAFRAN))

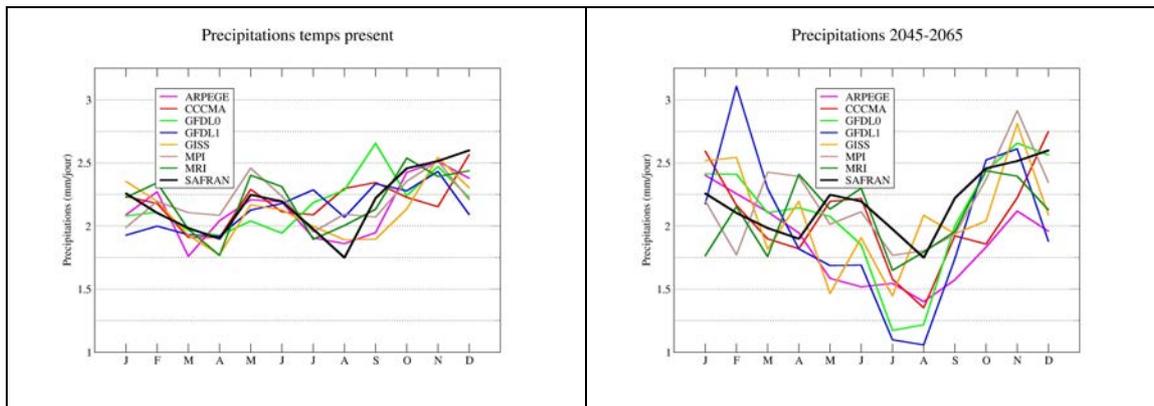


Illustration 50 : Evolution mensuelle moyenne des précipitations (les valeurs mesurées actuelles sont reproduites sur la courbe en noir (données SAFRAN)

Les illustrations 51 à 54 permettent d’appréhender la distribution spatiale de ces évolutions pour les précipitations et l’évapotranspiration potentielle sur le domaine modélisé. Sur ces cartes sont précisées les évolutions moyennes, en %, calculées pour chaque modèle de climat par rapport aux valeurs temps présent. Ces cartes montrent que, globalement, l’ETP augmente en toutes régions et pour tous les modèles, alors que l’évolution des précipitations est spatialement plus variable.

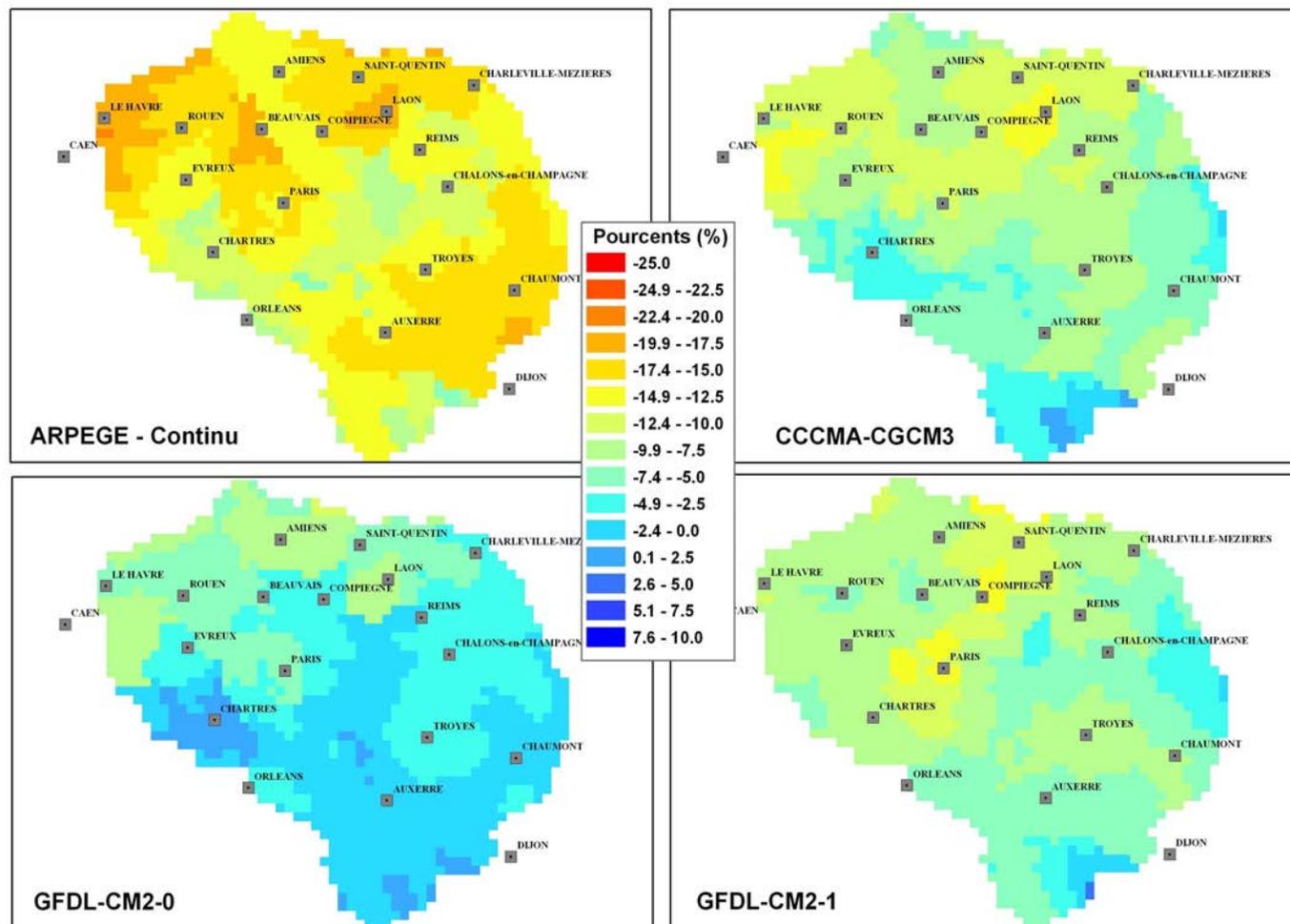


Illustration 51 : Evolution relative des précipitations à l'horizon 2046-2065 selon quatre des sept modèles de climat utilisés

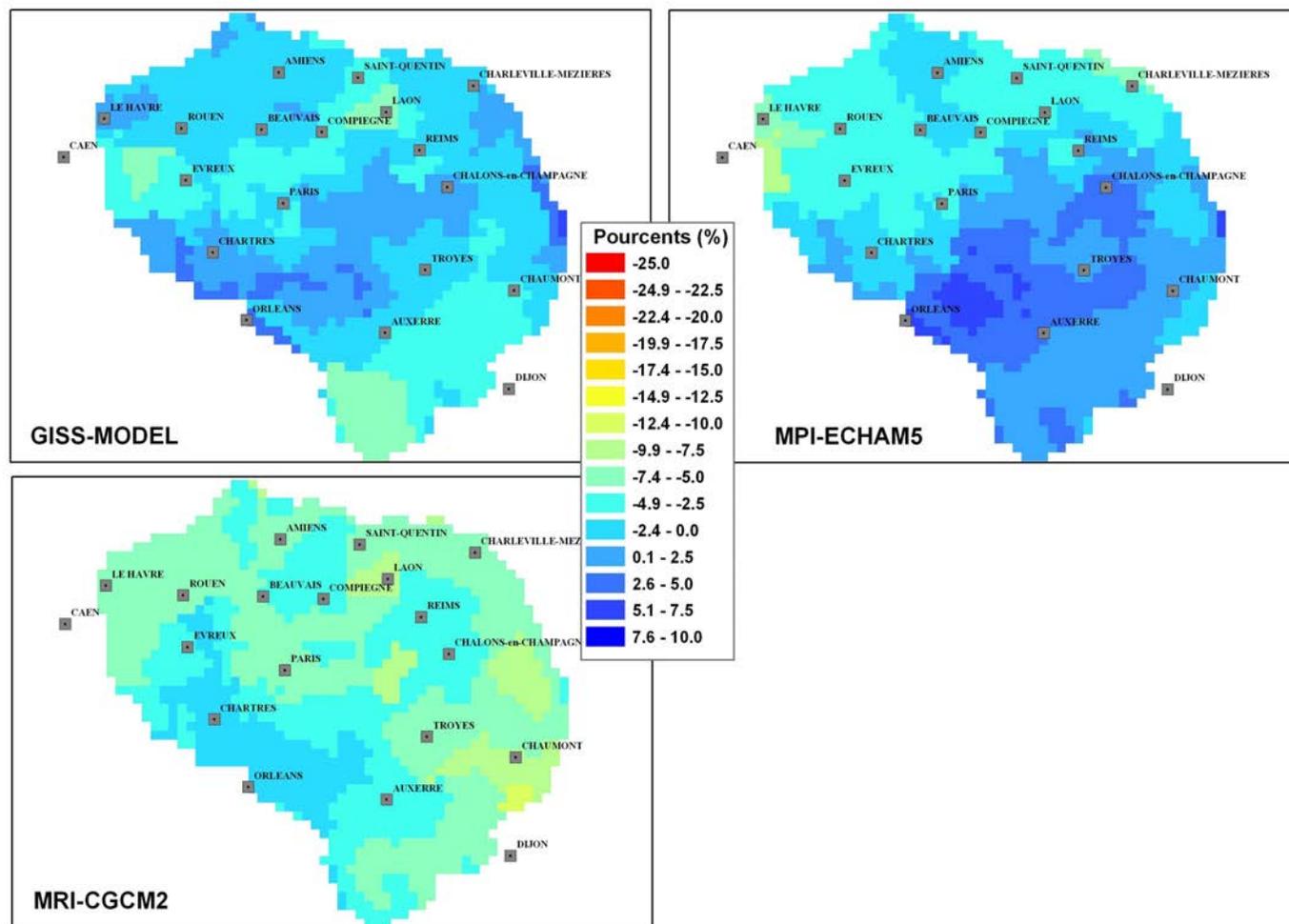


Illustration 52 : Evolution relative des précipitations à l'horizon 2046-2065 selon trois des sept modèles de climat utilisés

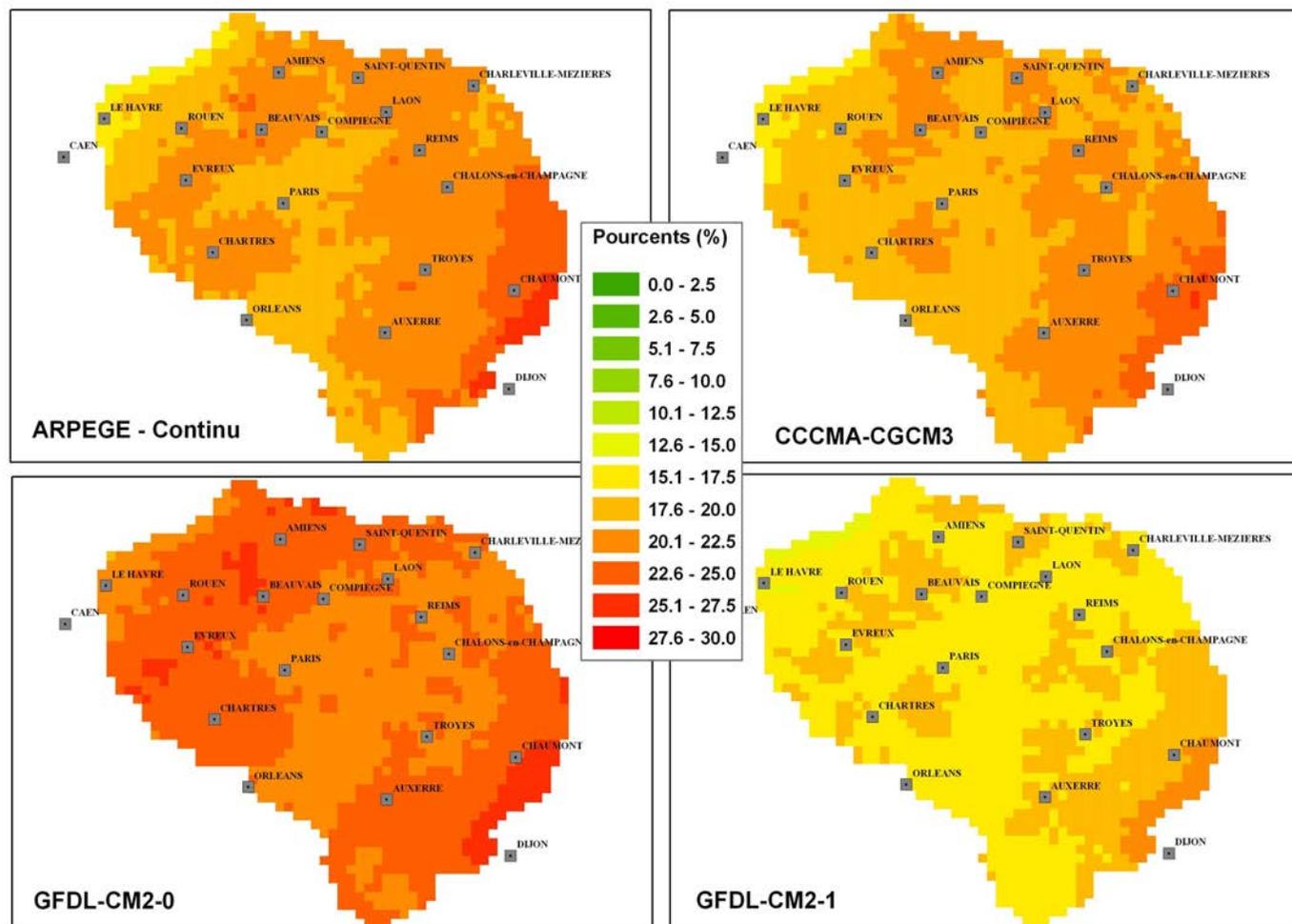


Illustration 53 : Evolution relative de l'évapotranspiration potentielle à l'horizon 2046-2065 selon quatre des sept modèles de climat utilisés

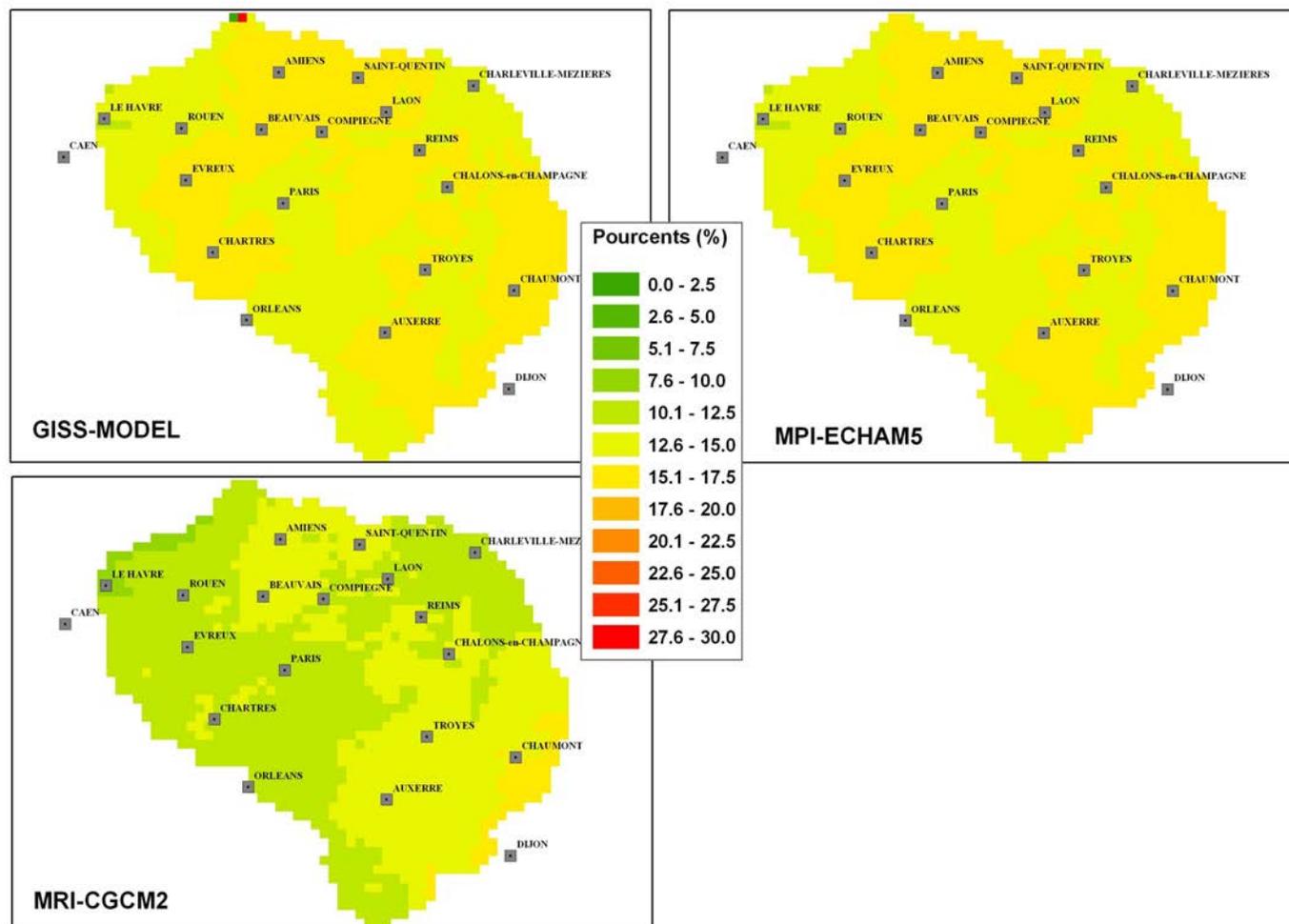


Illustration 54 : Evolution relative de l'évapotranspiration potentielle à l'horizon 2046-2065 selon trois des sept modèles de climats utilisés

4.2. PRINCIPE GENERAL DES SIMULATIONS

L'ensemble des calculs est réalisé en régime transitoire et au pas de temps journalier. L'ensemble des données climatiques est fourni par « tranche de temps » (à l'exception du scénario ARPEGE continu), c'est-à-dire qu'il n'y a pas continuité entre les données « temps présent » et les données « temps futur ». Ainsi, les calculs « temps présent » sont effectués sur la période 1961-1990 et les calculs « temps futurs » sur la période 2046-2065. Pour ce qui concerne le scénario ARPEGE continu les calculs sont effectués de manière continue de 1950 à 2065.

Cette contrainte impose donc de réaliser spécifiquement une initialisation du modèle hydrodynamique en fonction de la période et du modèle de climat utilisé. Dans le cadre du programme RExHySS, un certain nombre de test a été réalisé afin d'obtenir la méthode d'initialisation la mieux adaptée et permettre ainsi d'exploiter au mieux l'ensemble des périodes simulées (une mauvaise initialisation du modèle peut générer un biais conséquent lors des premières années de calcul).

Dans l'ensemble des résultats présentés ci-après, le modèle hydrodynamique MODCOU est initialisé en imposant une piézométrie moyenne calculée en régime permanent sur la base des données météorologique des dix premières années de chaque scénario traité.

Chaque simulation produit les résultats bruts suivants :

- Bilan hydrique annuel des précipitations (répartition entre la lame d'eau réellement évaporée (ETR), le ruissellement de surface et l'infiltration vers les formations aquifères ;
- Débit aux stations hydrométriques et piézométrie calculée au niveau des ouvrages de contrôle au pas de temps journalier ;
- Cartes de piézométrie de l'ensemble du domaine modélisé au pas de temps annuel.

Dans un premier temps, les calculs en « temps futur » sont réalisés en supposant que l'ensemble des prélèvements reste inchangé (à la fois en volume prélevé et en localisation des ouvrages de pompage). Dans une seconde phase, les volumes prélevés seront modifiés en fonction des scénarios fournis par BIPE.

4.3. EVOLUTION DU BILAN HYDRIQUE

L'illustration 55 présente, pour chaque modèle de climat et comparé à la période réelle actuelle

(dénommée SAFRAN) l'évolution du bilan hydrique moyen des précipitations calculé par le modèle hydrogéologique MODCOU sur la période de temps présent et sous climat futur.

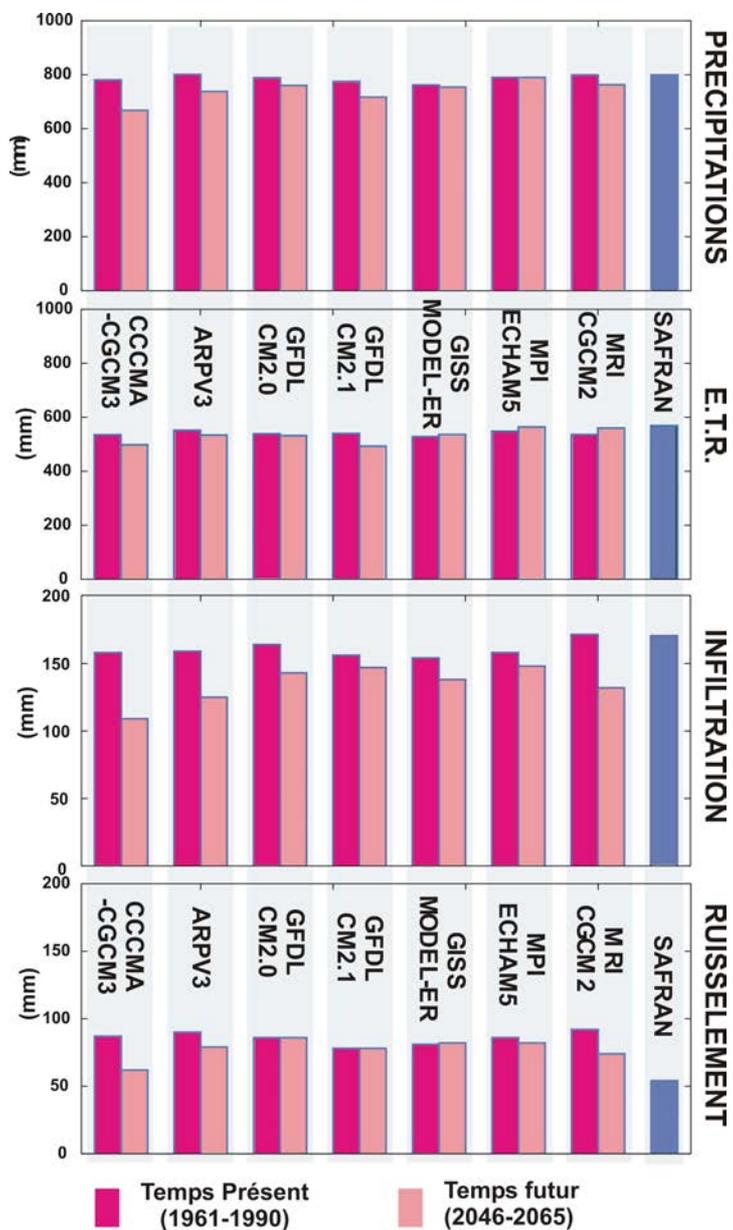


Illustration 55 : Evolution comparée des bilans hydriques sous temps présent et futur

On remarque essentiellement une baisse sensible, et ce pour chaque modèle climat, de la valeur de la lame d'eau infiltrée, lame d'eau susceptible d'alimenter les formations aquifères du bassin.

Le tableau suivant, précise l'évolution du bilan annuel moyen des valeurs d'alimentation des

formations aquifères modélisées du bassin (exprimées en millions de m³ et par an).

Période	Moyenne des 7 modèles de climat	Valeur minimale	Valeur maximale
1960-1900	7915 Mm ³	7566 Mm ³ (GISS_MODEL)	8652 Mm ³ (MRI-CGCM2)
2046-2065	6462 Mm ³	5613 Mm ³ (ARPEGE)	6967 Mm ³ (MPI_ECHAM5)
Variation TP/MS	-18.4 %		

Tableau 3 : Alimentation annuelle moyenne des formations aquifères modélisées

Spatialement, les illustrations 56 et 57 présentent respectivement l'infiltration efficace moyenne des aquifères (exprimée en millimètres par an) calculés par les 7 modèles de climat en temps présent et temps futur. L'illustration 58 présente la variation relative calculée par rapport au temps présent de la valeur de cette infiltration. Localement, en milieu de siècle, la baisse peut atteindre près de 30% de l'alimentation calculée en temps présent.

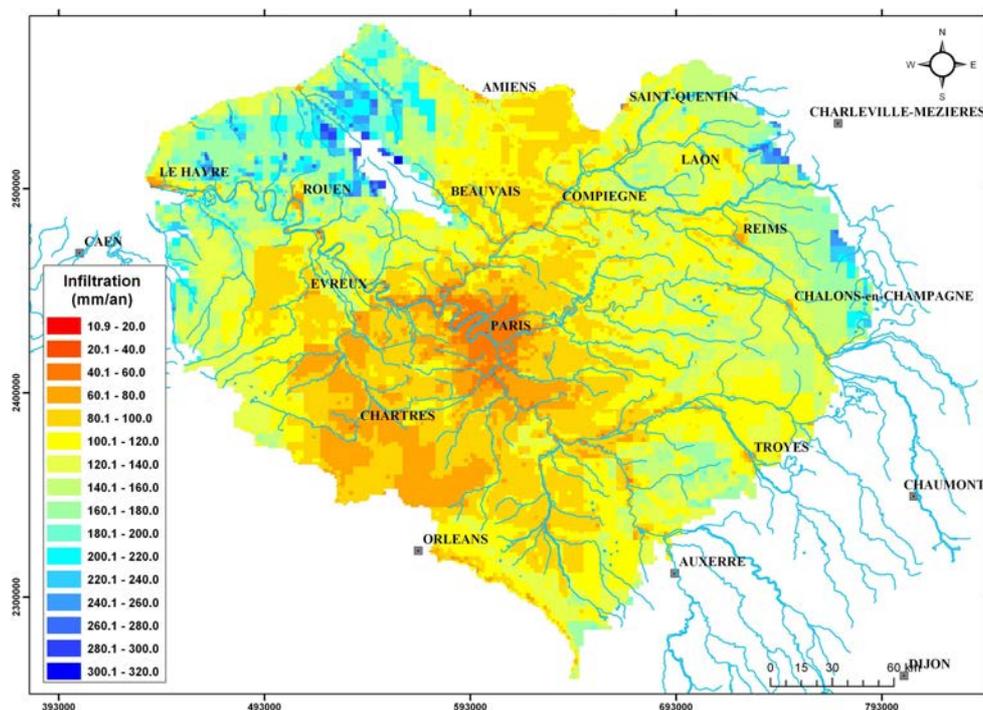


Illustration 56 : Alimentation moyenne annuelle des formations aquifères en temps présent

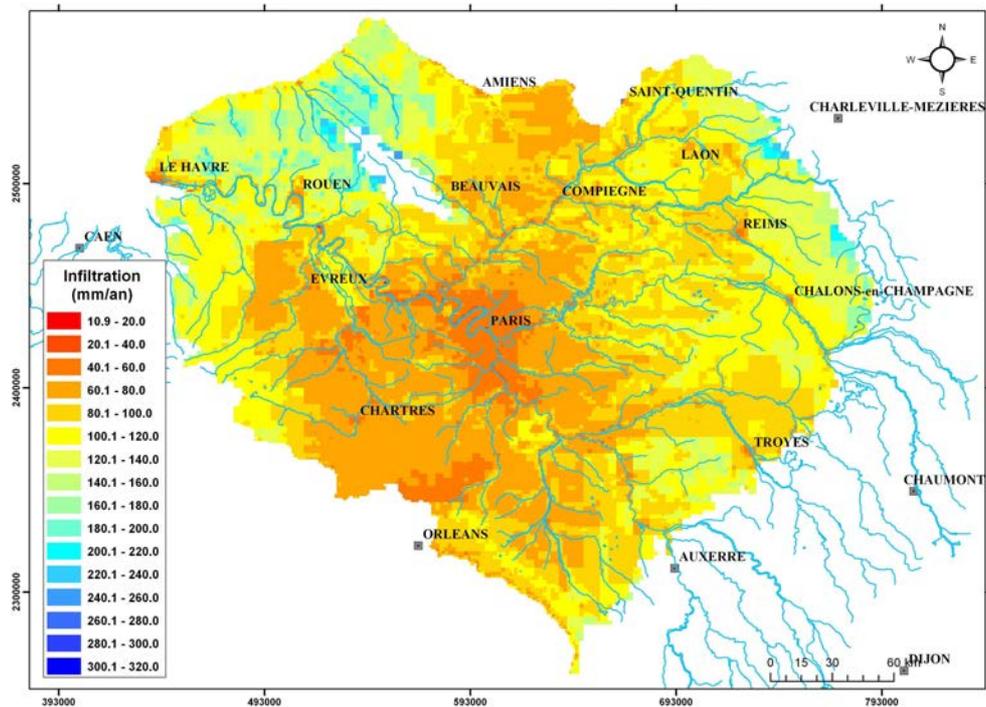


Illustration 57 : Alimentation moyenne annuelle des formations aquifères en temps futur

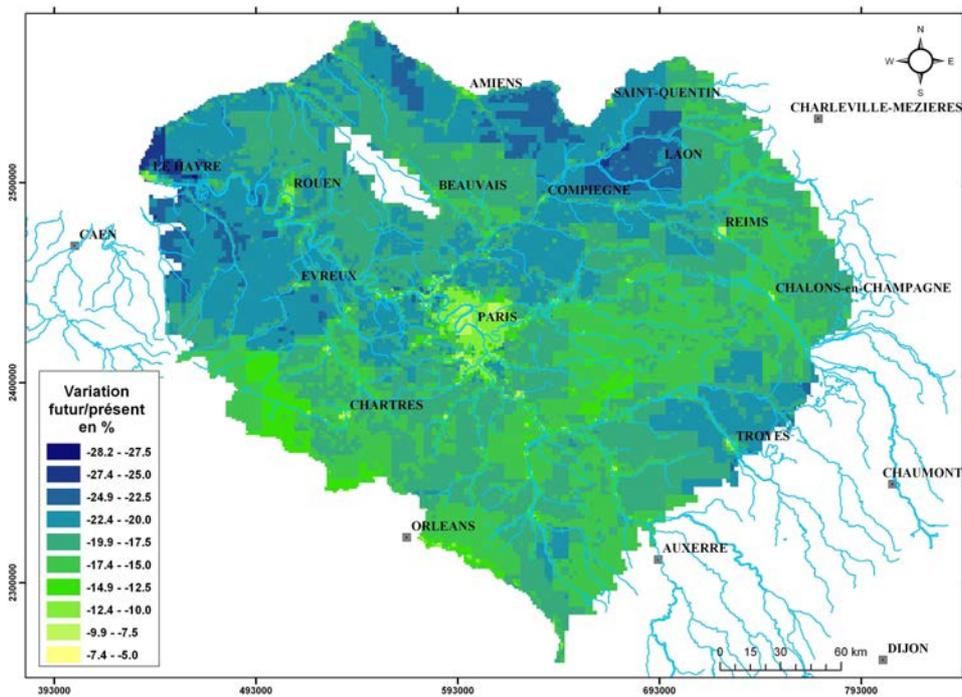


Illustration 58 : Variations relatives de l'alimentation moyenne annuelle des formations aquifères

4.4. EVOLUTION DE LA PIEZOMETRIE DU BASSIN

Les illustrations 59 à 64 présentent l'évolution de la piézométrie moyenne calculée, pour les 7 modèles de climat, en toute maille des formations aquifères modélisées, par rapport à celle obtenue en temps présent et selon la formule :

$$\Delta H = \left(\sum_{i=1}^n (H_{tp} - H_{tf}) \right) / n$$

Avec n étant le nombre de scénarios traités. Une valeur positive représente donc une baisse du niveau piézométrique moyen (rabattement de la nappe par rapport au temps présent).

L'évolution comparée des niveaux moyens mensuels calculés sur quelques piézomètres représentatifs du bassin est précisée sur les illustrations 65 à 68.

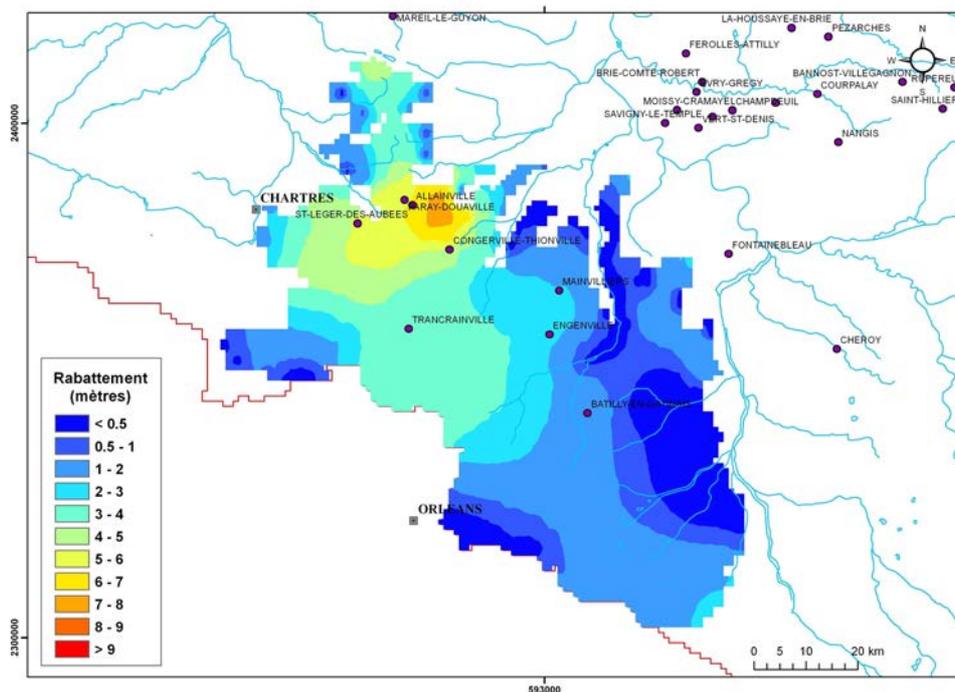


Illustration 59 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des Calcaires de Beauce (moyenne des sept modèles de climat)

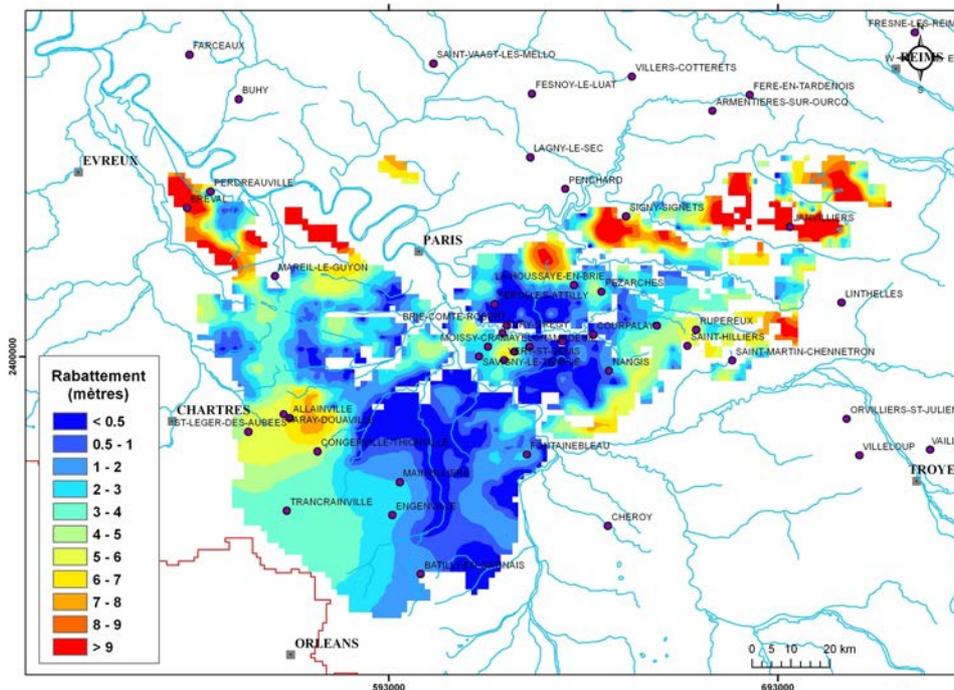


Illustration 60 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des Calcaires de Beauce (moyenne des sept modèles de climat)

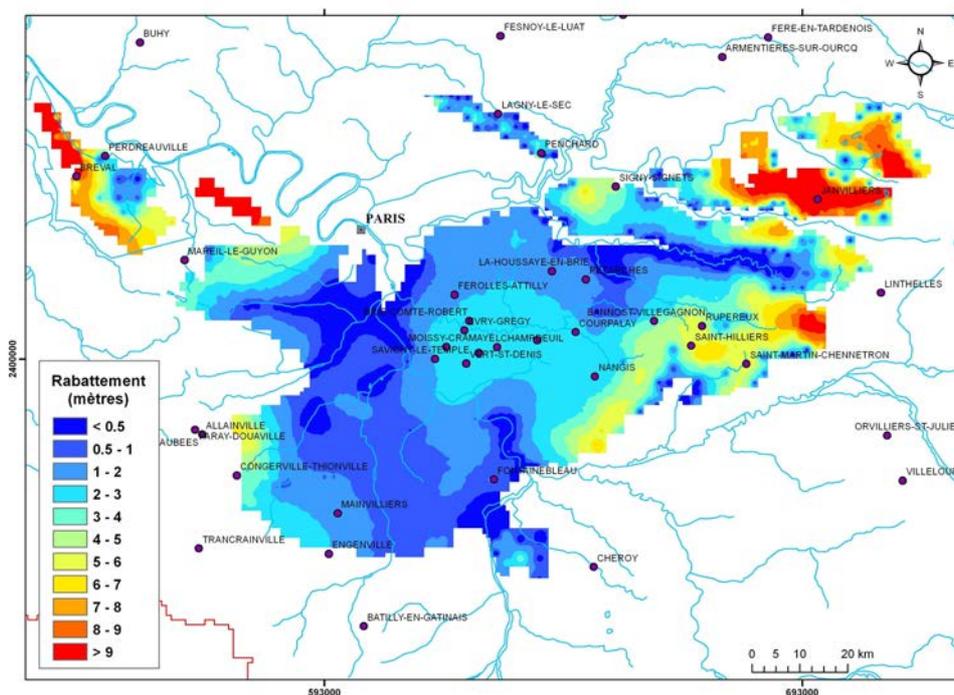


Illustration 61 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des Calcaires de Champigny (moyenne des sept modèles de climat)

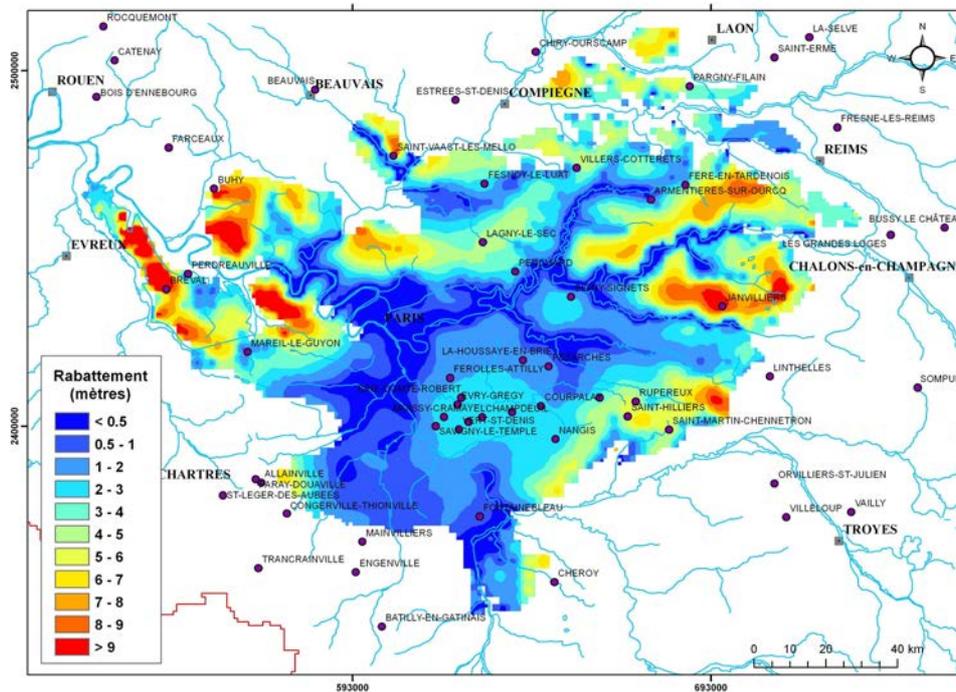


Illustration 62: Evolution du niveau moyen de la formation aquifère des formations du Lutétien/Yprésien (moyenne des sept modèles de climat)

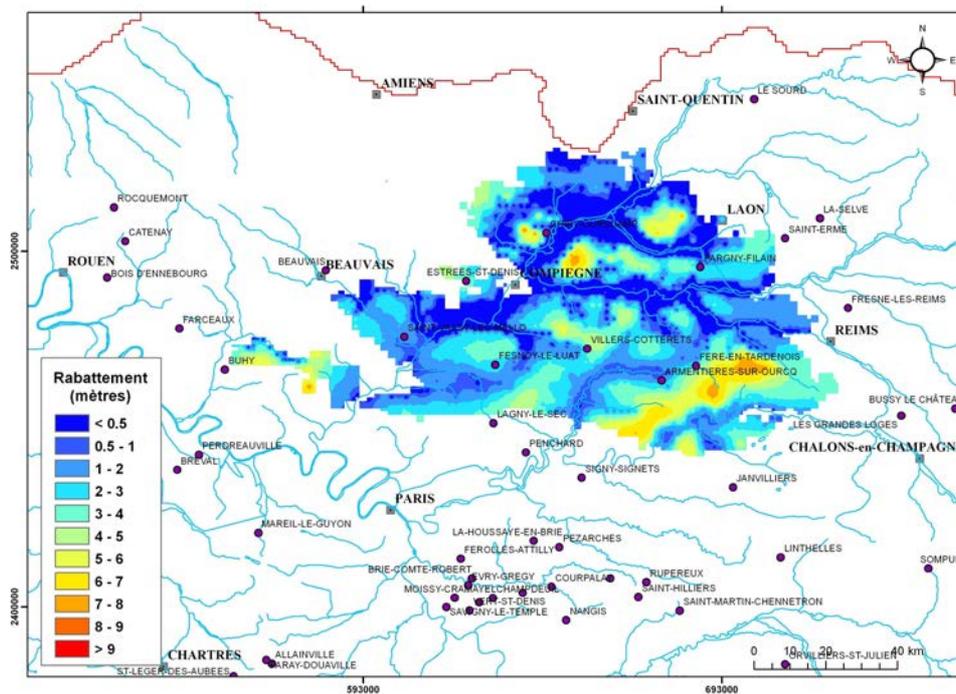


Illustration 63 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère du Thanétien (moyenne des sept modèles de climat)

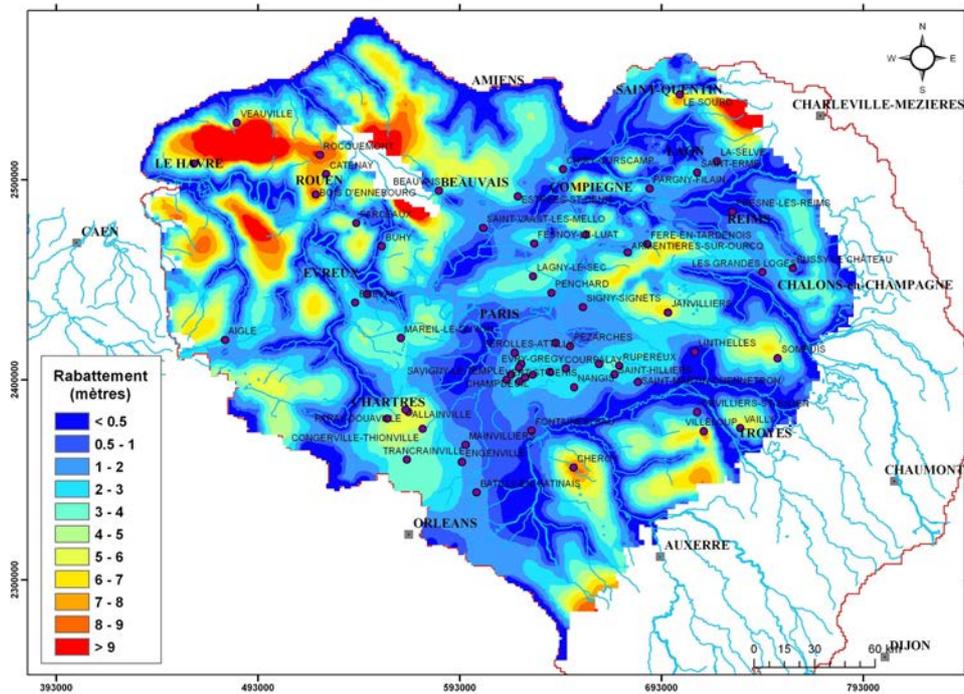
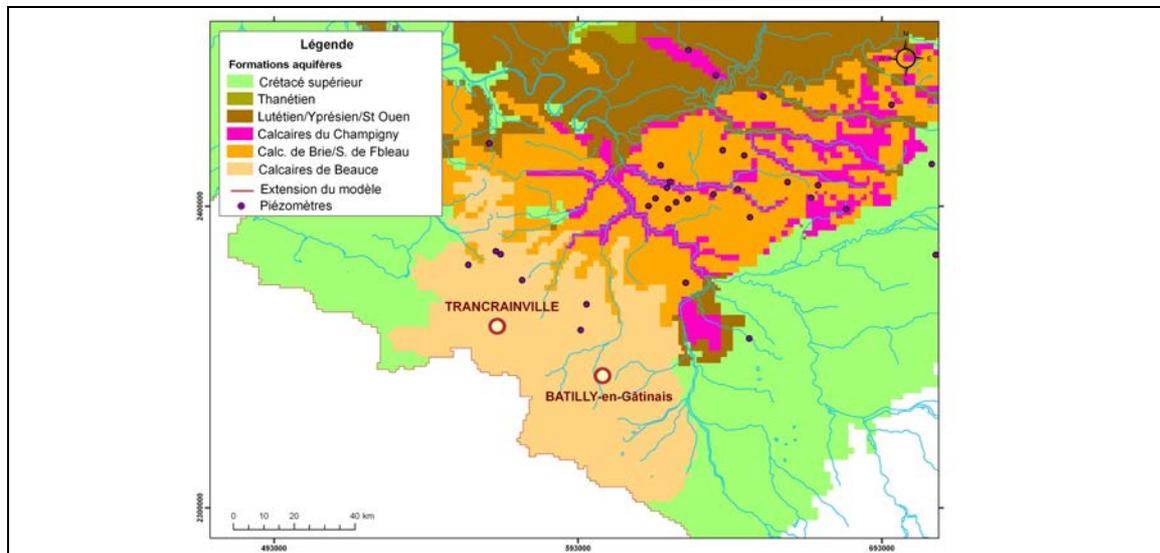


Illustration 64 : Evolution du niveau moyen de la formation aquifère de la Craie (moyenne des sept modèles de climat)



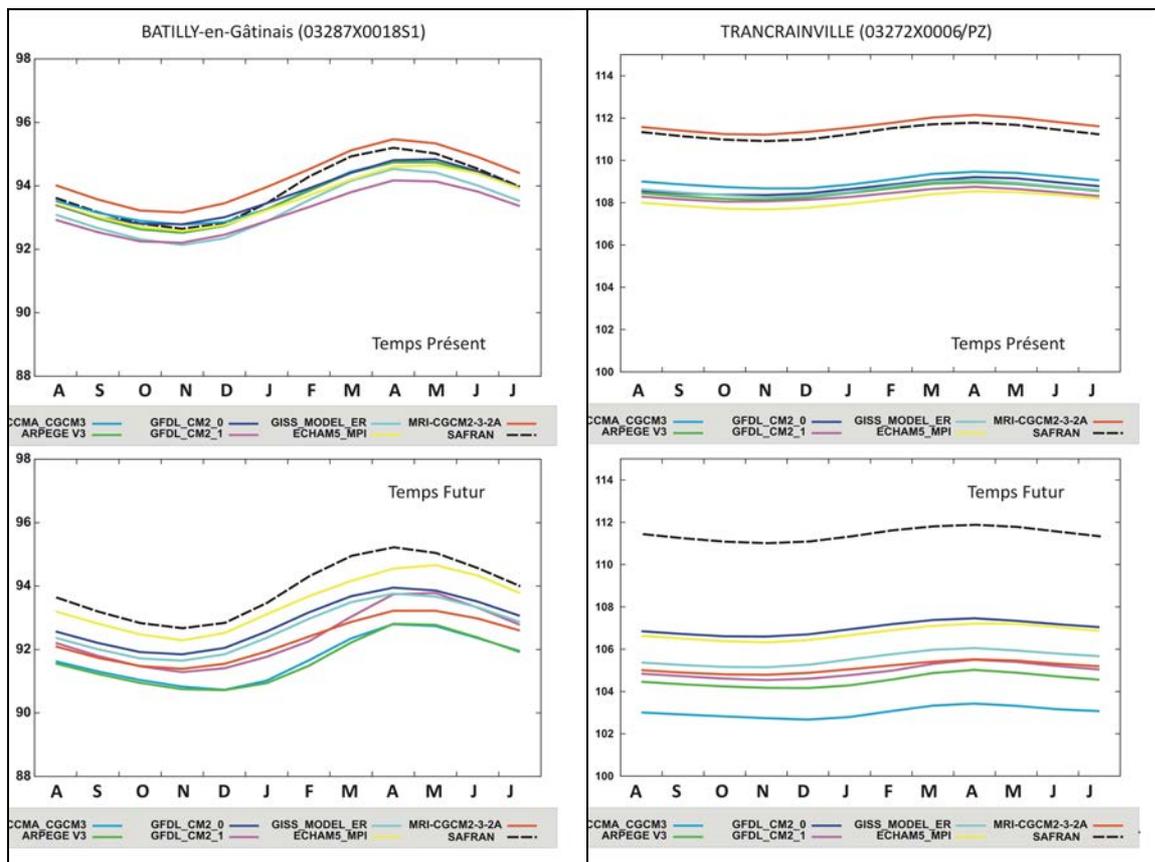
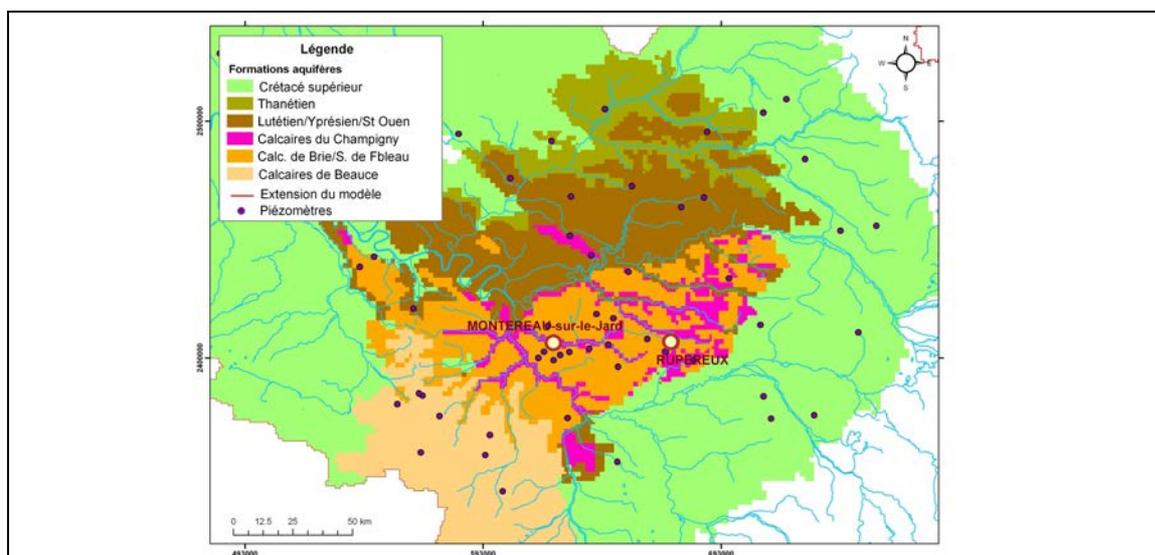


Illustration 65 : Piézomètres de Batilly-en Gâtinais et Trancrainville, nappe des Calcaires de Beauce : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat



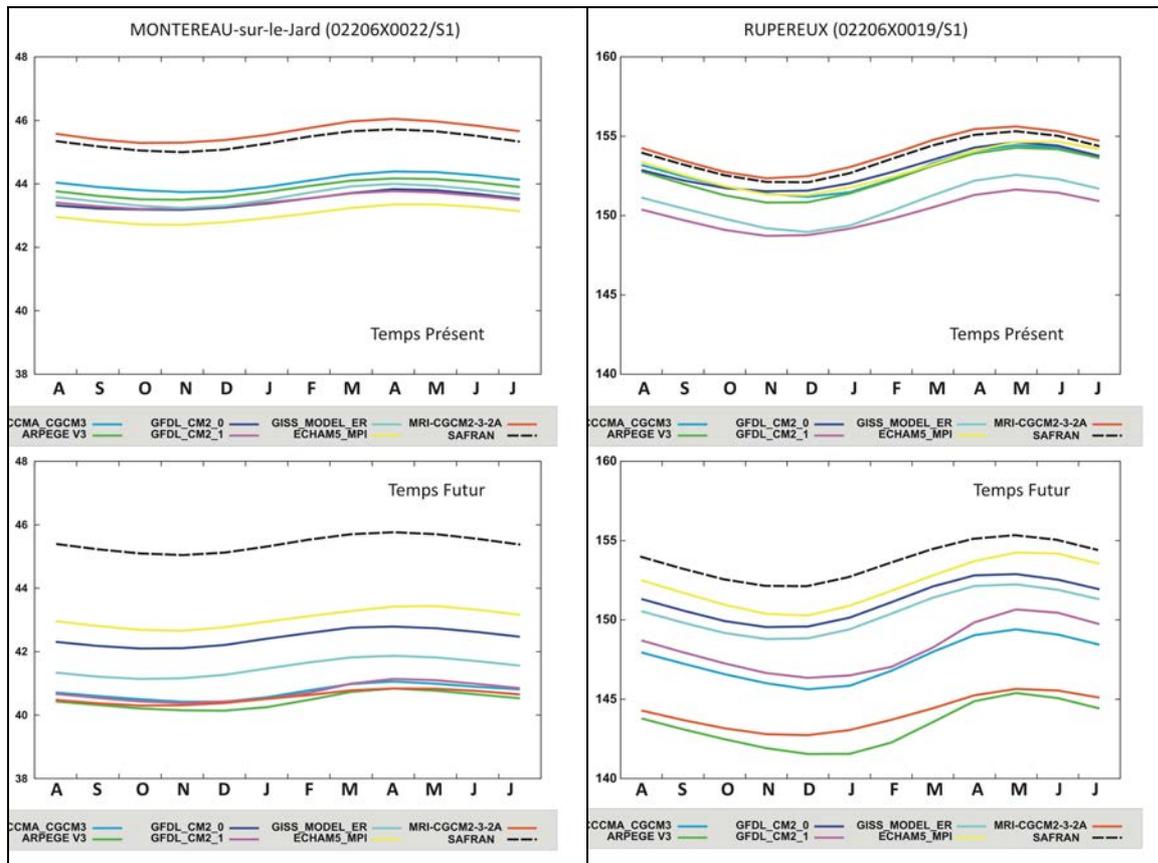
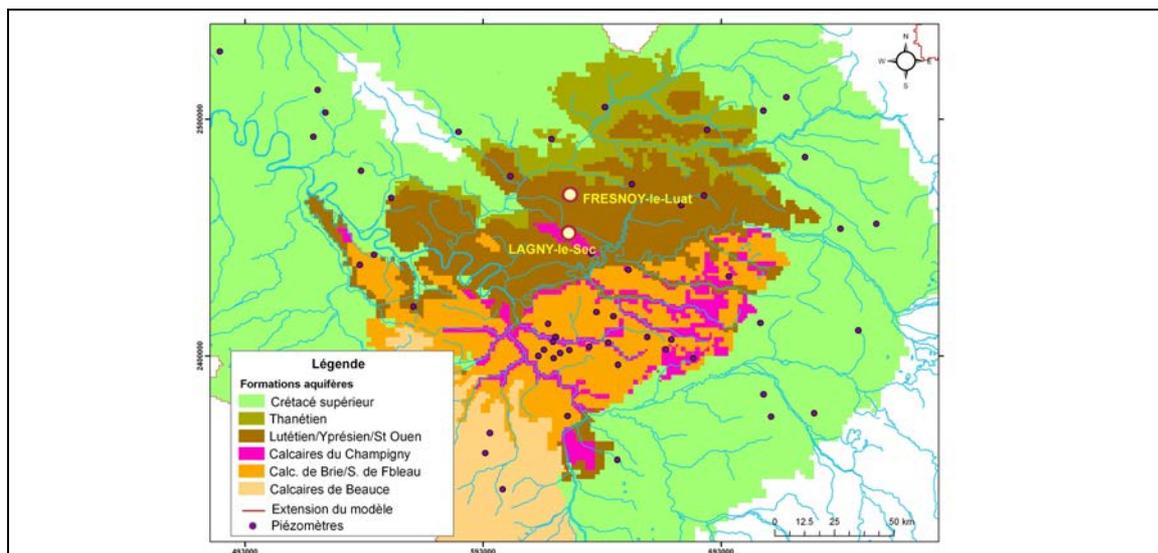


Illustration 66 : Piézomètres de Montereau-sur-le-Jard et Rupereux, nappe des Calcaires de Champigny : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat



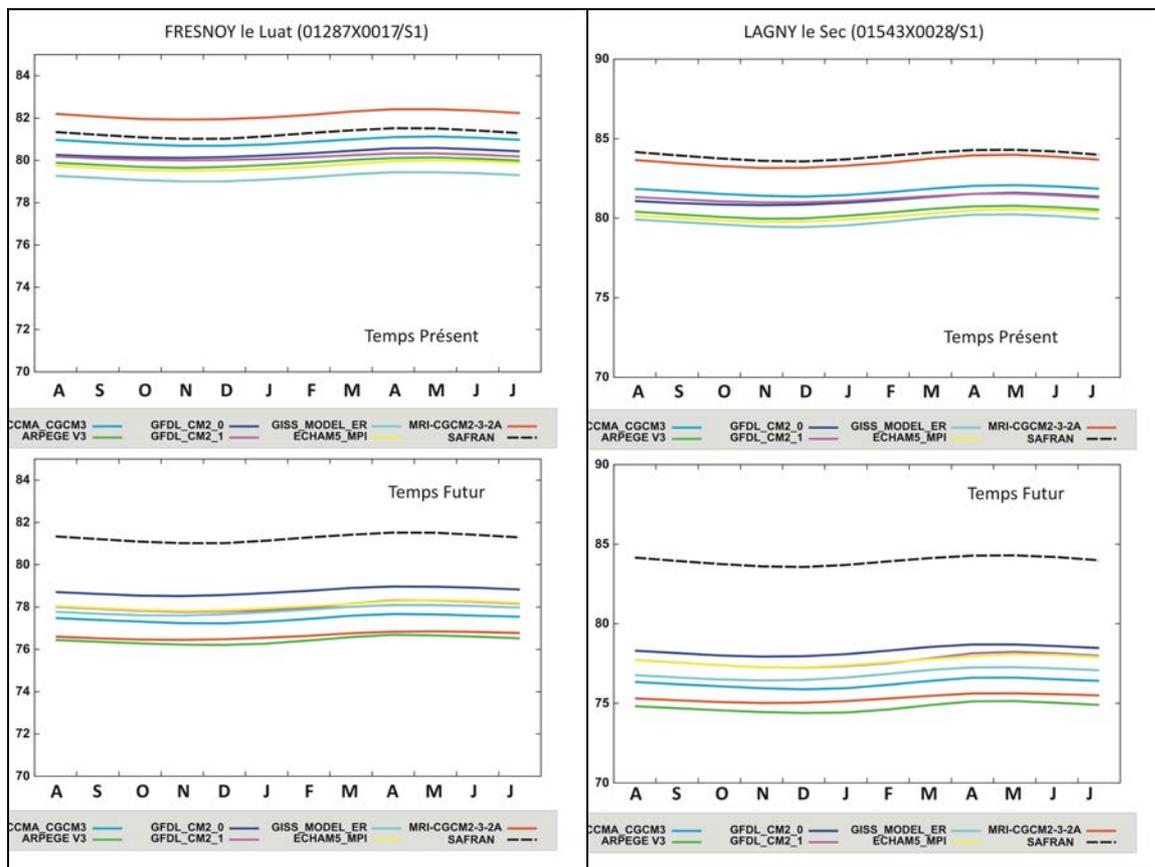


Illustration 67 : Piézomètres de Fresnoy-le-Luat et de Lagny-le-Sec, nappe du Lutétien/Yprésien : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat

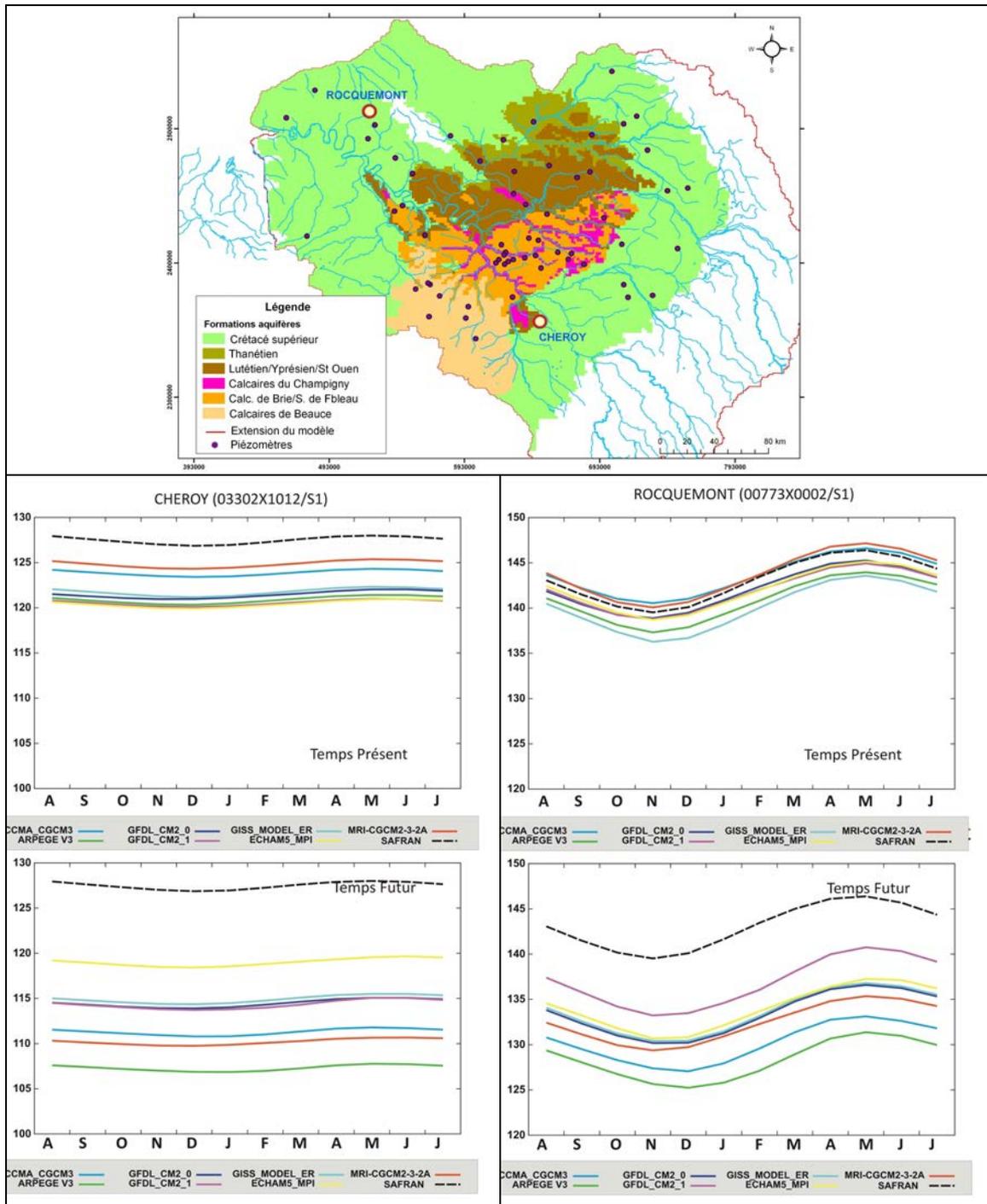


Illustration 68 : Piézomètres de Cheroy et Rocquemont, nappe de la Craie : évolution moyenne mensuelle de la piézométrie calculée en temps présent et futur selon les sept modèles de climat

4.5. EVOLUTION DU DEBIT DES COURS D'EAU

Le calcul de l'évolution du débit des principaux cours d'eau du bassin est effectué en comparant les débits calculés en temps présent et futur et ce, pour chaque modèle de climat.

Sur 6 stations de la Seine et de ses principaux affluents : l'Yonne à Courlon-sur-Yonne, la Marne à Noisiel, l'Oise à Creil, l'Eure à Charpont, la Seine à Paris et la Seine à Poses (illustration 69), les illustrations 70 à 75 présentent respectivement :

- l'évolution de la moyenne mensuelle des débits calculés, en temps présent et futur ;
- la variation relative moyenne mensuelle du débit sur les 7 modèles de climat et l'enveloppe des minima et maxima obtenus pour ces modèles

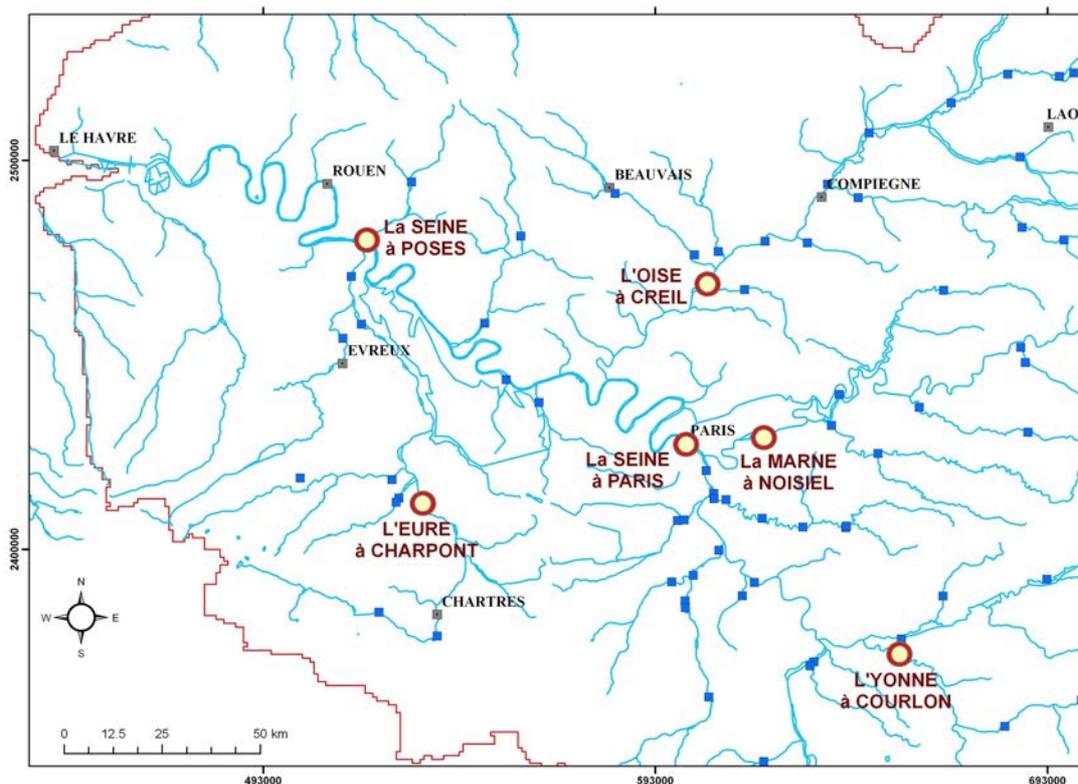


Illustration 69 : Localisation des stations présentées

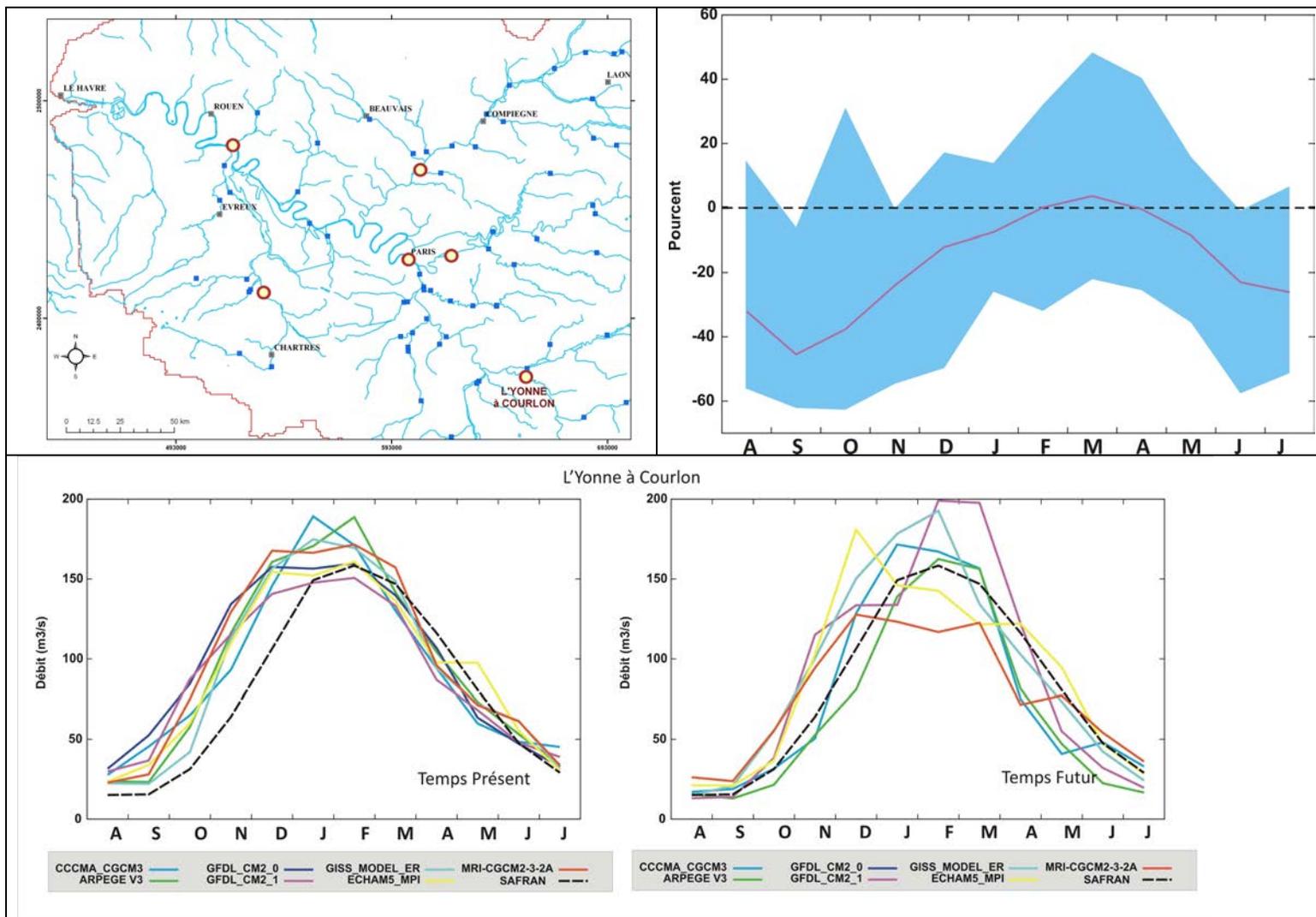


Illustration 70 : L'Yonne à Courlon – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat

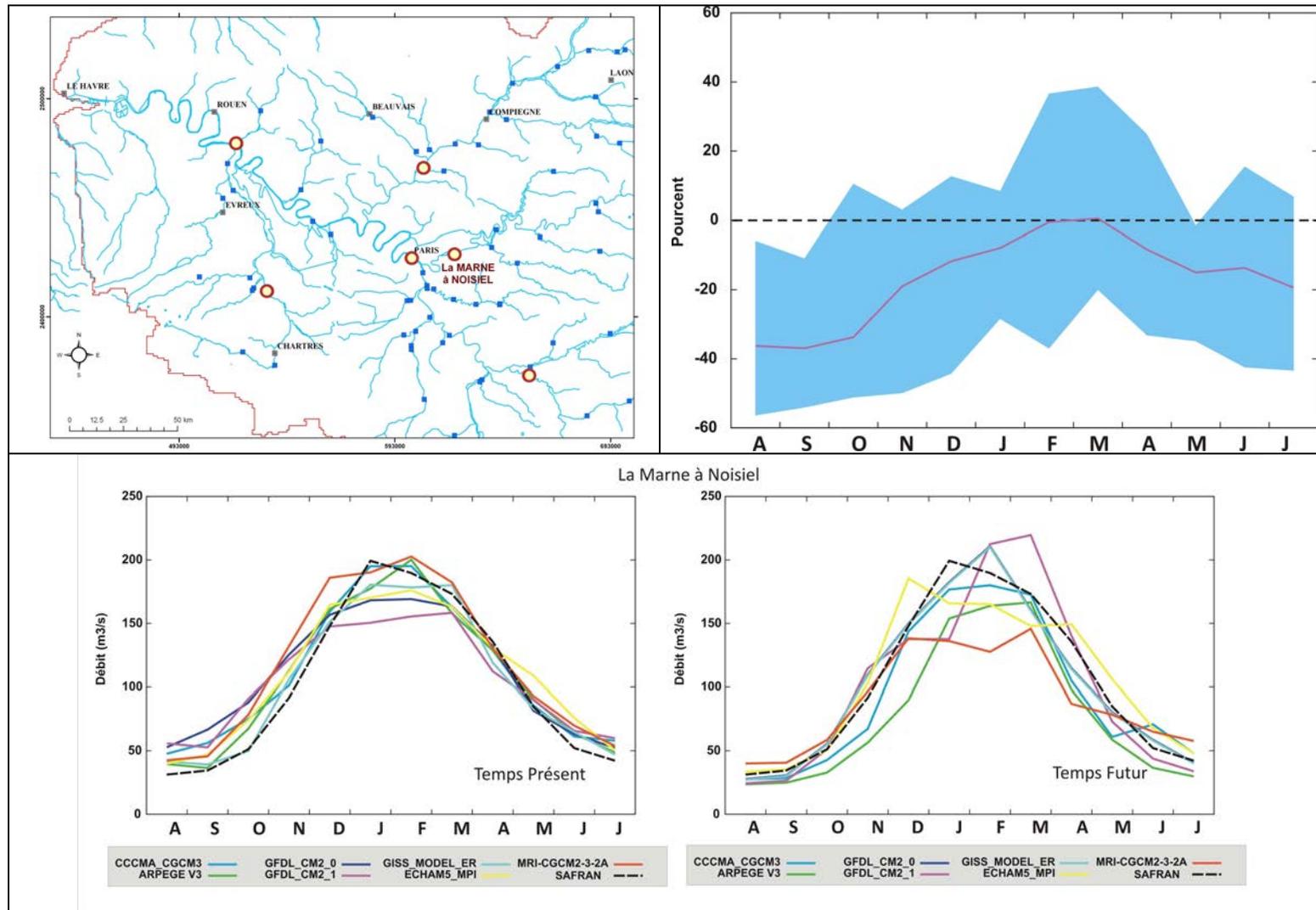


Illustration 71 : La Marne à Noisiel – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat

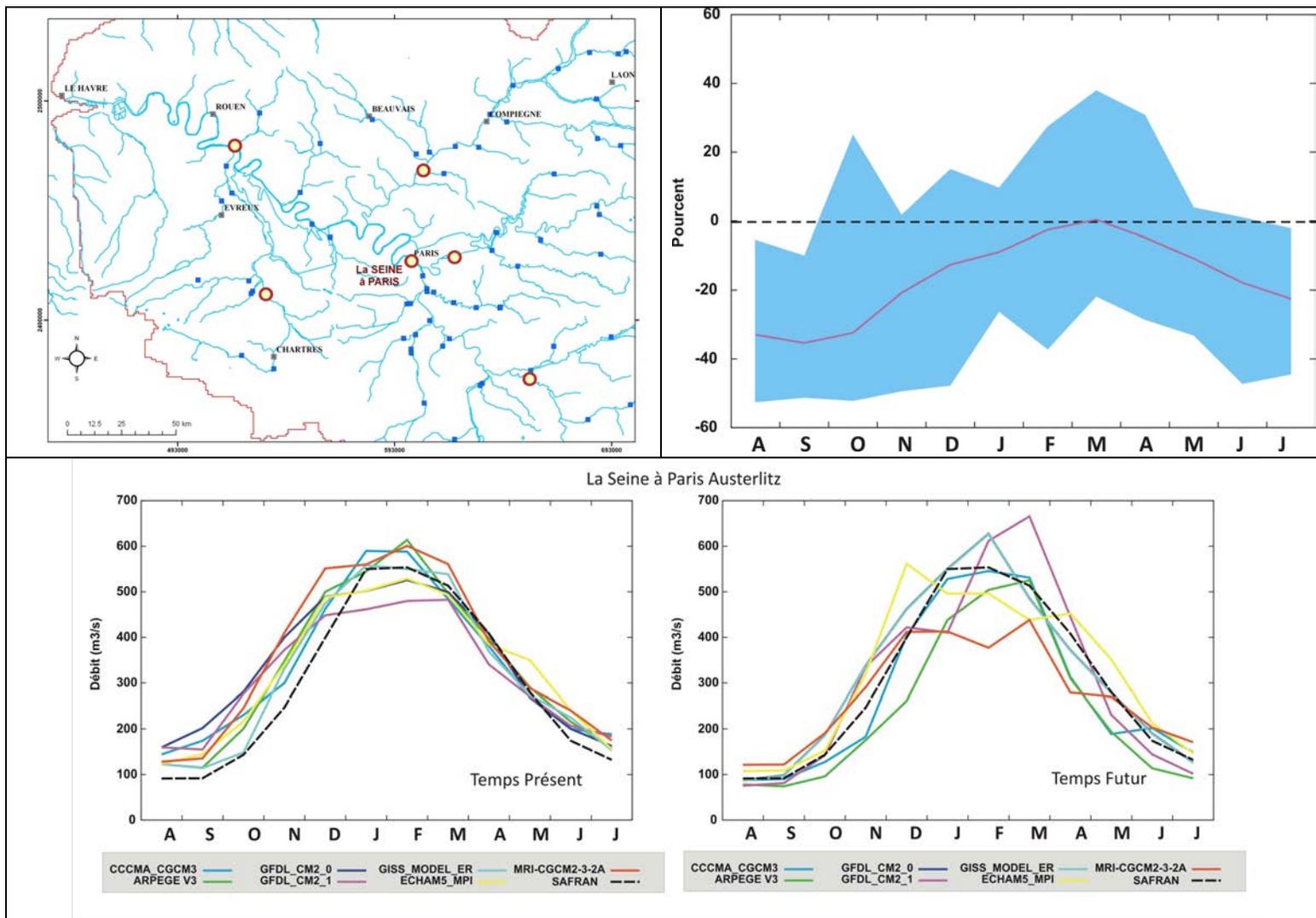


Illustration 72 : La Seine à Paris – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat

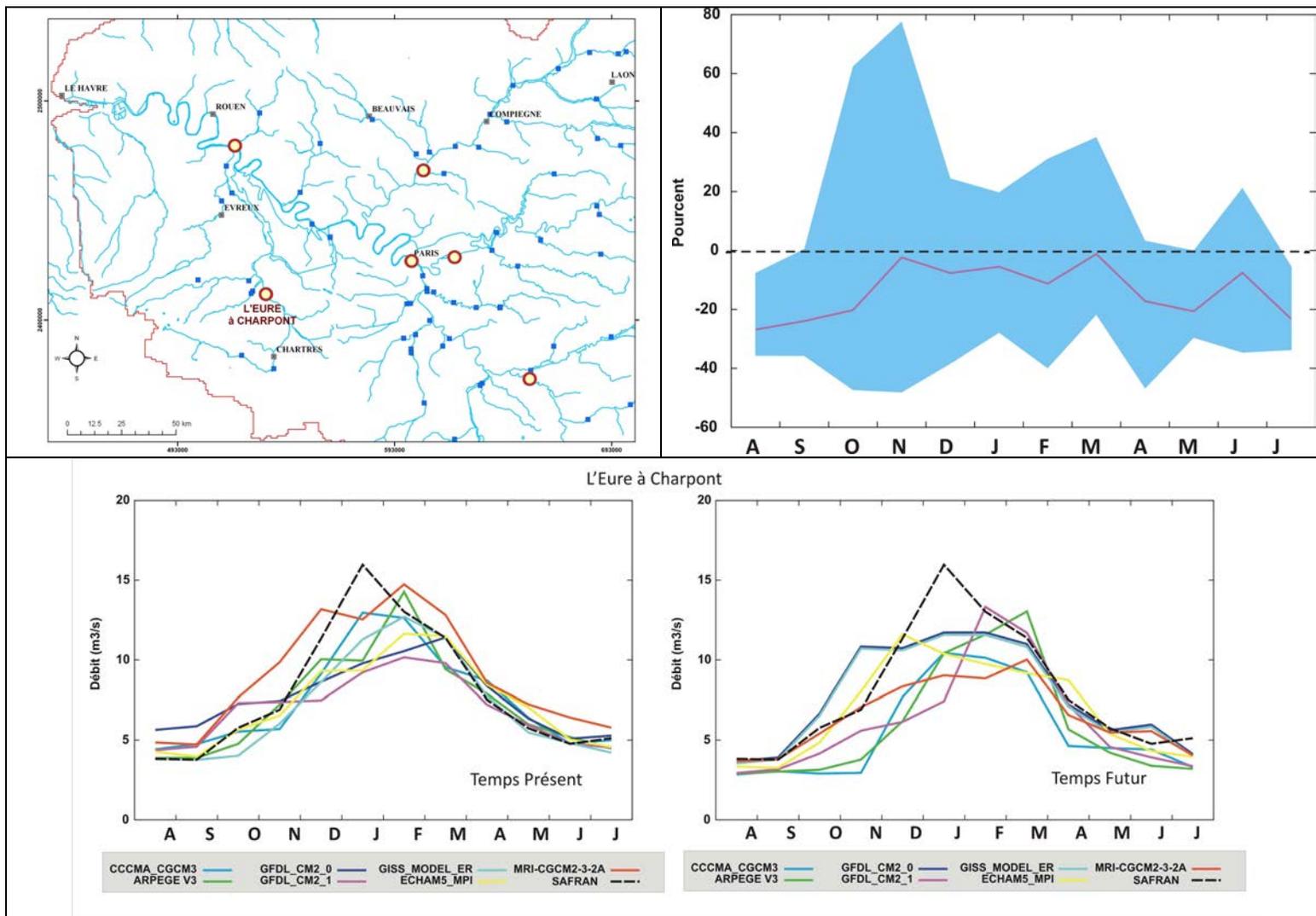


Illustration 73 : L'Eure à Charpont – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat

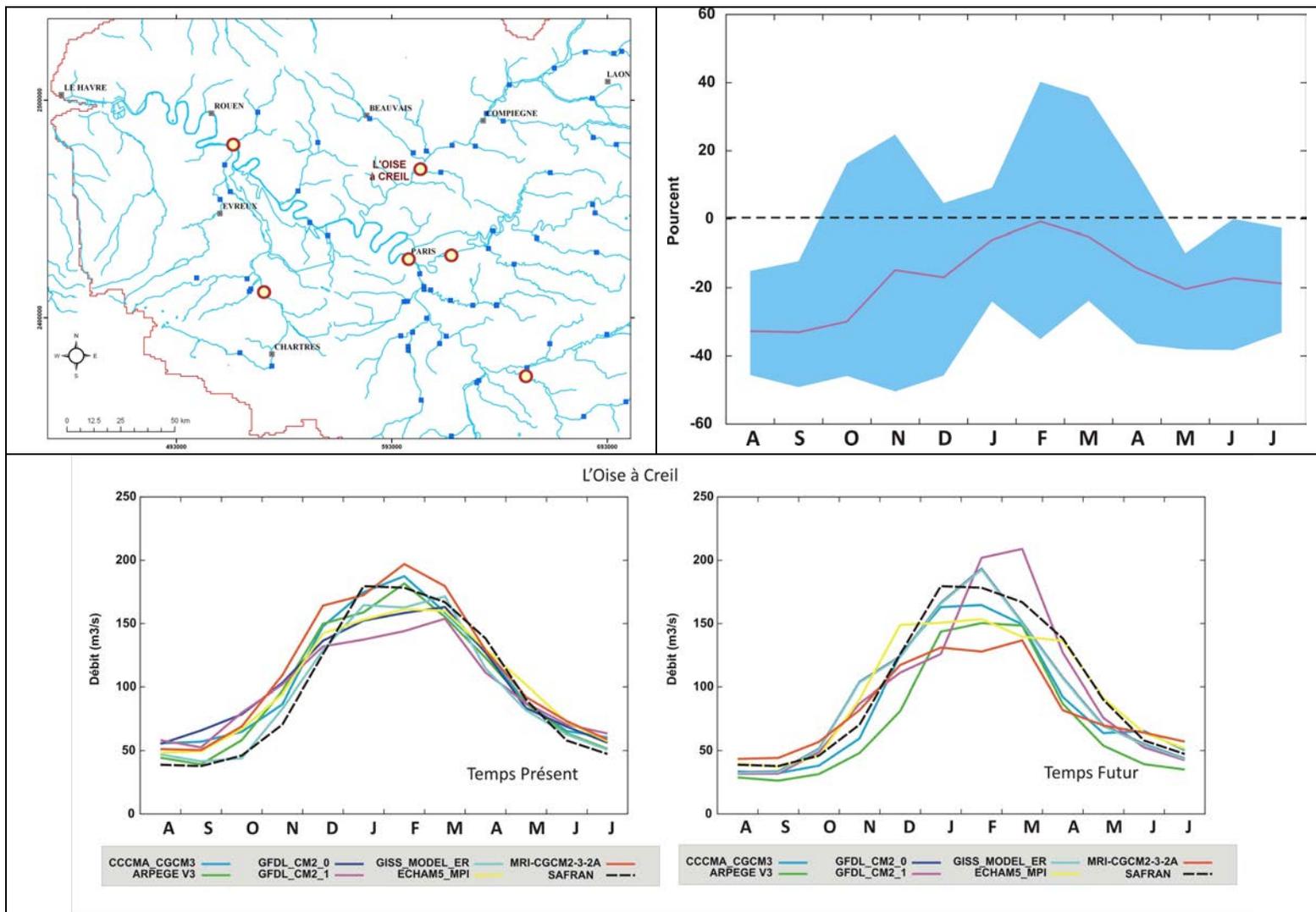


Illustration 74 : L'Oise à Creil – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat

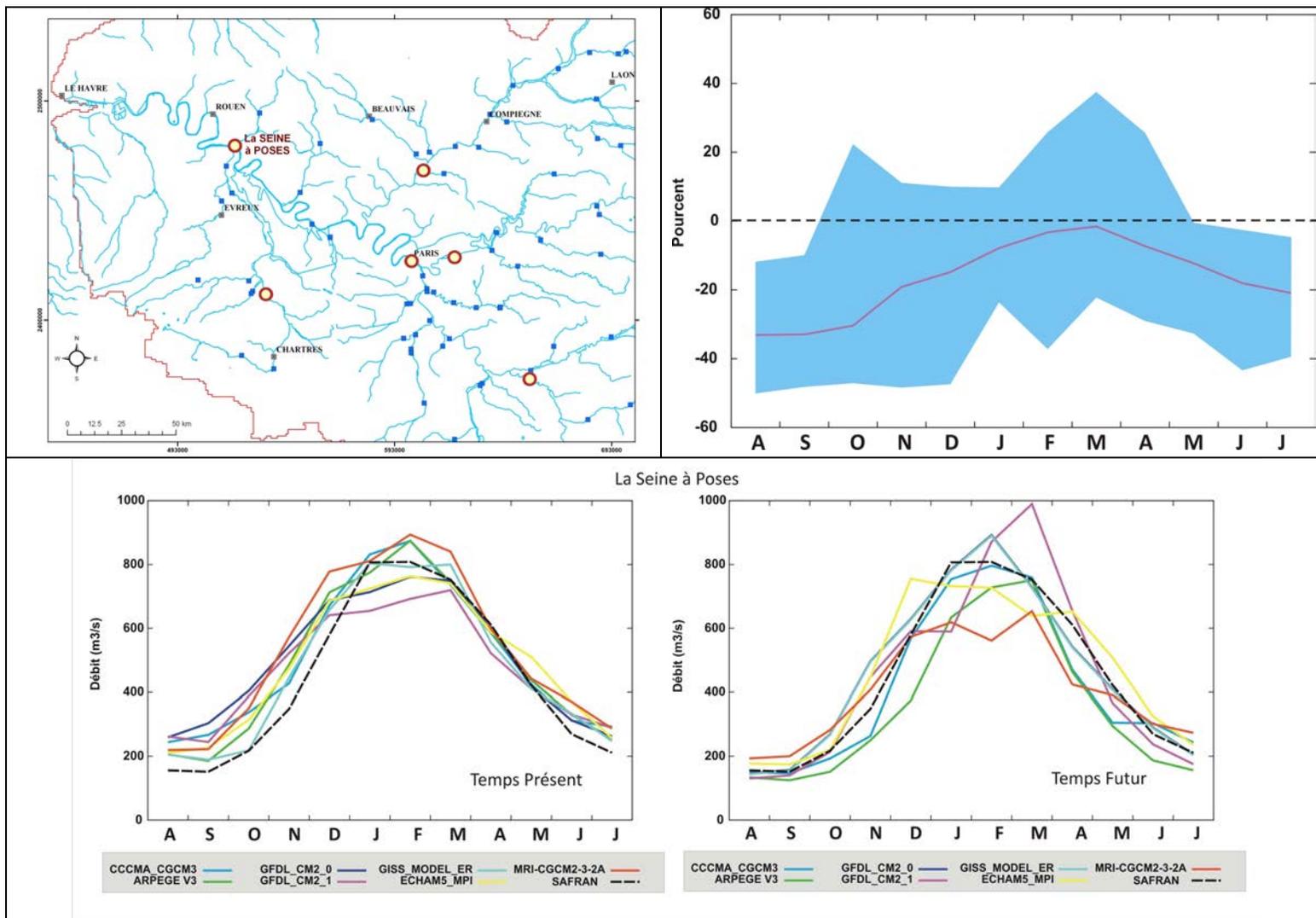


Illustration 75 : La Seine à Poses – Variation relative moyenne, minimale et maximale mensuelle du débit calculé en temps futur par rapport au temps présent et évolution du débit moyen calculé en temps présent et futur selon les sept modèle de climat

L'illustration 76 reprend les principaux résultats obtenus en présentant, pour les six stations considérées, l'évolution relative moyenne (selon les 7 modèles de climat) des débits calculés en temps futur.

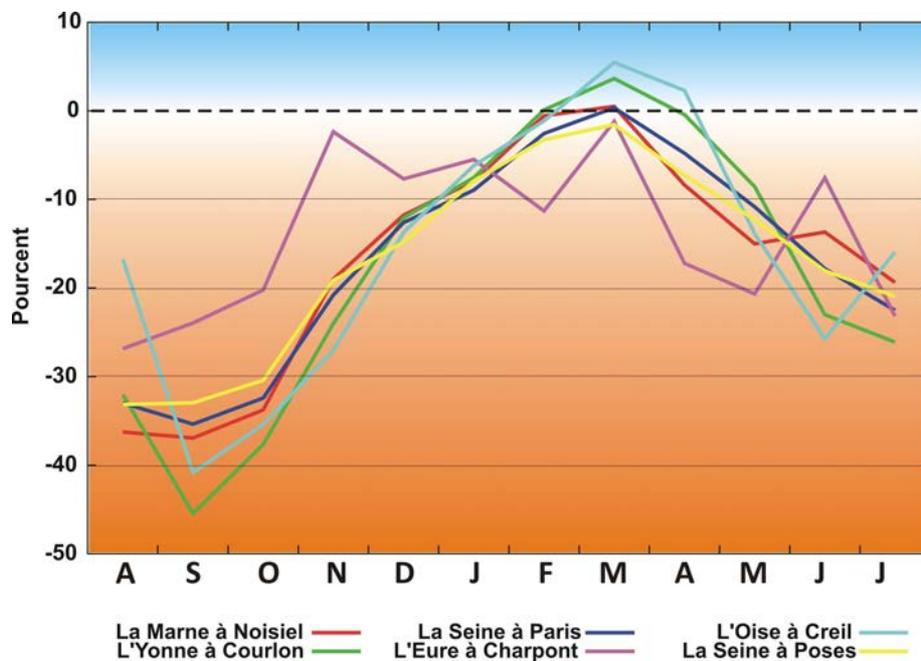


Illustration 76 : Evolution relative des débits moyens mensuels à l'horizon 2046-2065 (moyenne des 7 modèles de climat)

Ces résultats laissent globalement apparaître une baisse sensible des débits d'étiage de fin d'été, en liaison avec une baisse sensible de la piézométrie des formations aquifères (cf chapitre précédent) et une variation relativement peu marquée des débits hivernaux.

4.6. INTEGRATION DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS EN FORMATIONS AQUIFERES

Sur l'ensemble des simulations réalisées et dont les résultats ont été présentés précédemment, tous les prélèvements en nappe (A.E.P., industrie, agriculture) pris en compte dans le modèle hydrogéologique sont supposés inchangés entre le temps présent le milieu de siècle prochain.

Dans le cadre de ce projet, la société d'études et de conseil en stratégie BIPE, a fourni, à l'échelle de 99 grands bassins versant réparti sur le territoire national, une évolution de ces prélèvements intégrant l'impact de l'évolution des niveaux d'activité économique et humaine. Les scénarios fournis ont été effectués à partir de la définition « d'effets directs probables » lié au changement climatique qui sont ensuite utilisés pour définir « des effets induits » sans mesures d'adaptation particulière.

Deux scénarios différents, intégrant des variations différentes de la démographie à l'horizon 2070, ont été traités.

A l'échelle du bassin de la Seine, le tableau suivant présente l'évolution moyenne des prélèvements, usage par usage et par scénario démographique traité.

Usage	Scénario 1	Scénario 2
A.E.P.	-25.4 %	-20.8 %
Agricole	0.4 %	-3.1 %
Industrie	-52.7 %	-52.7 %
Global	-25.9 %	-23.2 %

Tableau 4 : Evolution moyenne des prélèvements entre 2006 et 2070 sur le bassin de la Seine

4.7. PRISE EN COMPTE DES SCENARIOS BIPE DANS LES SIMULATIONS

Les données mises à disposition par BIPE sont fournies en terme de volume mensuel, par bassin versant, par scénario démographique et par nature (AEP, énergie nucléaire, agricole, industrie et transfert), pour l'année 2006 et l'année 2070. Ces données ne peuvent donc pas être utilisées directement dans le

modèle hydrogéologique, calé à partir des données annuelles de prélèvement, ouvrage par ouvrage et par nature du prélèvement.

L'évolution des prélèvements a donc été prise en compte dans les modélisations en appliquant un coefficient multiplicateur annuel aux données « actuelles », identique au droit d'un même grand bassin versant, usage par usage. Ce coefficient annuel, à appliquer entre les années 2046 et 2065 est calculé selon la méthode illustrée Illustration 77.

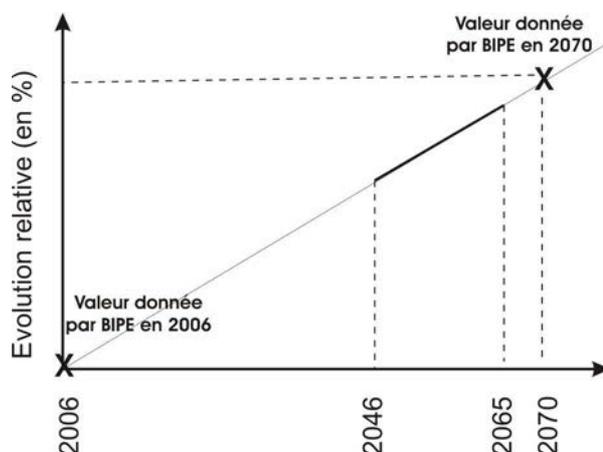


Illustration 77 : Prise en compte de l'évolution des prélèvements anthropiques dans les modélisation hydrogéologiques

4.7.1. VARIABILITE SPATIALE DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS ANTHROPIQUES SUR LE BASSIN DE LA SEINE.

Les illustrations 78 et 79 présentent, les évolutions relatives, par bassin élémentaire, des prélèvements anthropiques entre 2006 et 2070 et pour les deux scénarios d'évolution démographique.

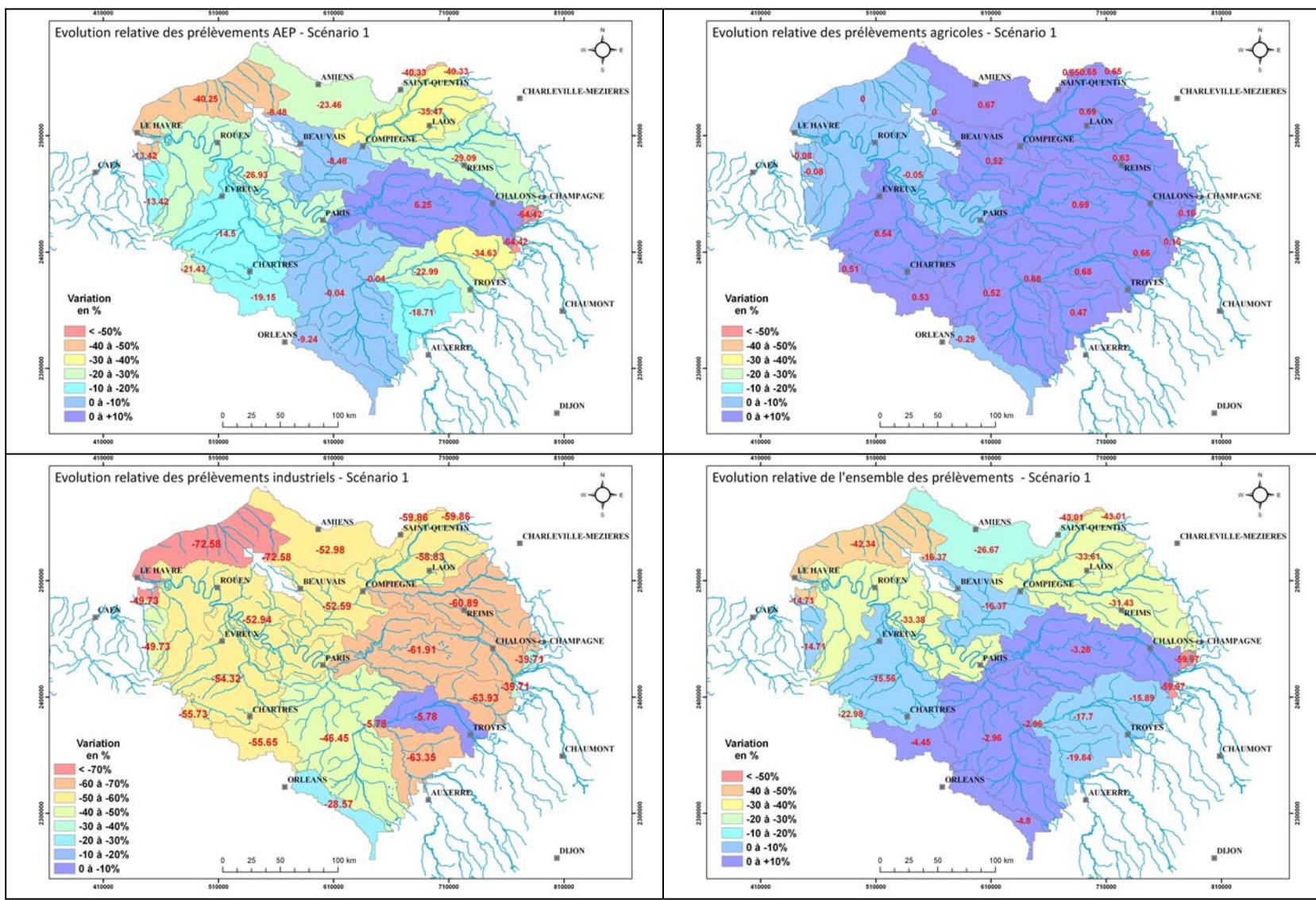


Illustration 78 : Evolution relative des prélèvements sur le bassin de la Seine – scénario 1

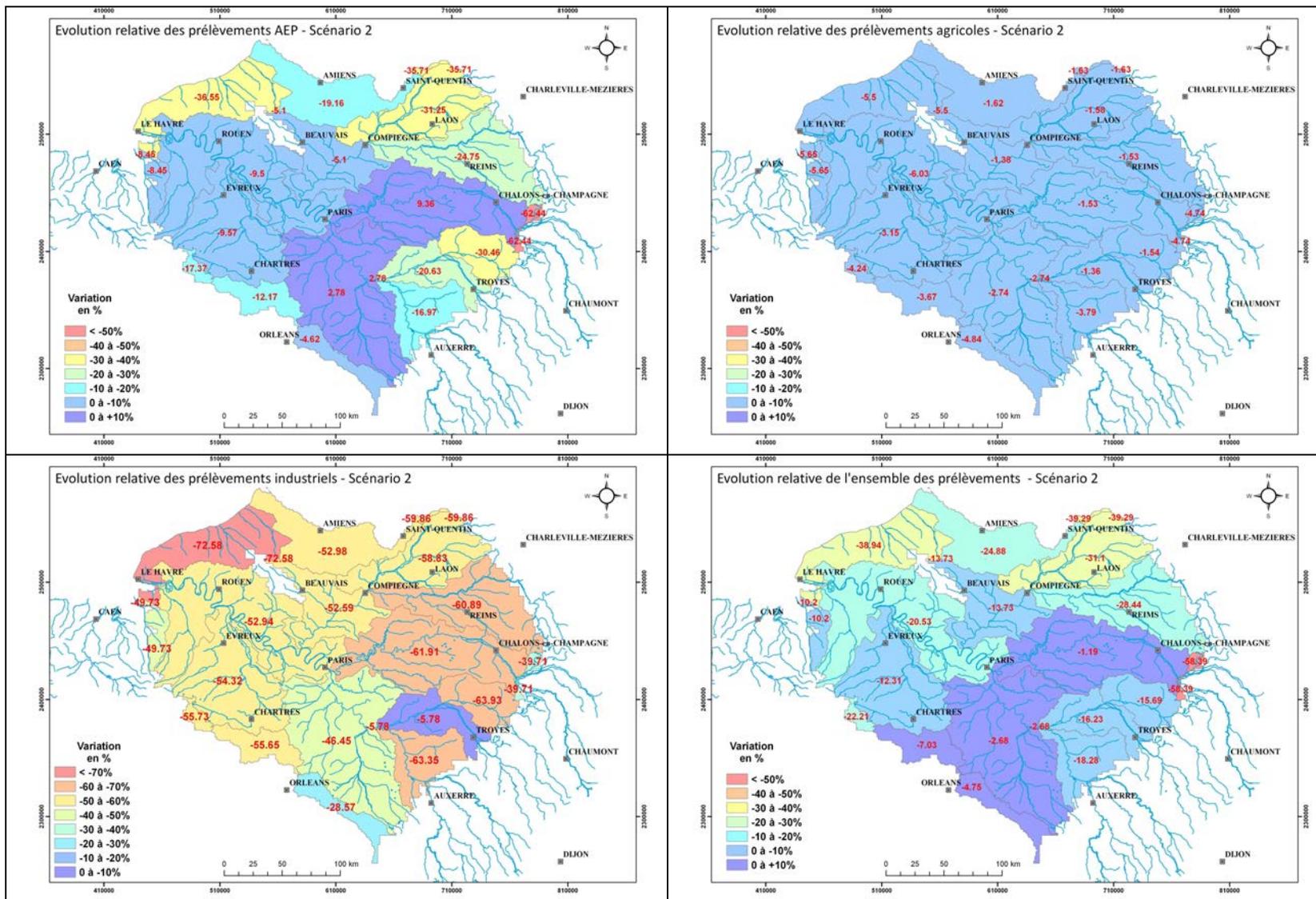


Illustration 79 : Evolution relative des prélèvements sur le bassin de la Seine – scénario 2

4.7.2. INFLUENCE DES SCENARIOS DE PRELEVEMENTS SUR LA PIEZOMETRIE DES FORMATIONS AQUIFERES DU BASSIN

Compte tenu des éléments présentés au chapitre précédent (une diminution globale moyenne des prélèvements en nappe de l'ordre de 25 % sur l'ensemble du bassin) l'effet attendu est une hausse du niveau piézométrique moyen des aquifères dans lesquels s'effectuent ces prélèvements.

Cette hausse reste toutefois limitée comme le montrent les illustrations 80 à 85 qui représentent l'influence de la prise en compte des modifications de prélèvement du scénario 1 sur la cote piézométrique moyenne (sur les résultats des sept modèles de climat) de l'ensemble des formations aquifères modélisées.

Les variations piézométriques ponctuelles maximales, par aquifère, sont présentées sur le tableau suivant.

Aquifère	Variation piézométrique maximale
Nappe des Calcaires de Beauce.	+ 0.31 m
Nappe des Calcaires de Brie et Sables de F.	+ 4.3 m
Nappe des Calcaires de Champigny	+ 4.6 m
Nappe du Lutétien/Yprésien	+ 8.7 m
Nappe du Thanétien	+ 8.1 m
Nappe de la Craie	+ 16.0 m

Tableau 5 : Variations piézométriques maximales consécutives à la prise en compte des scénarios d'évolution des prélèvements sur le bassin

Les variations les plus fortes sont observées dans la nappe de la Craie, au voisinage du grand champ captant de la boucle du Pecq/Croissy et dont la valeur des prélèvements est diminuée d'un tiers par rapport à l'actuel.

Remarque : les résultats obtenus avec la prise en compte du scénario 2 ne sont pas présentés car ils diffèrent très peu de ceux obtenus avec le scénario 1.

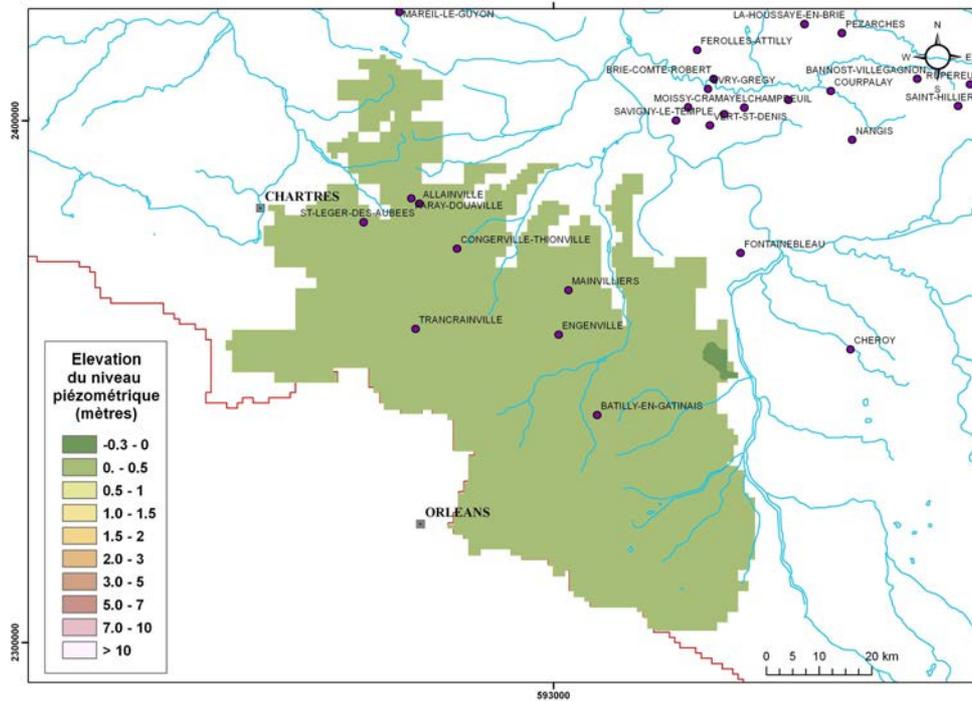


Illustration 80 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe des Calcaires de Beauce

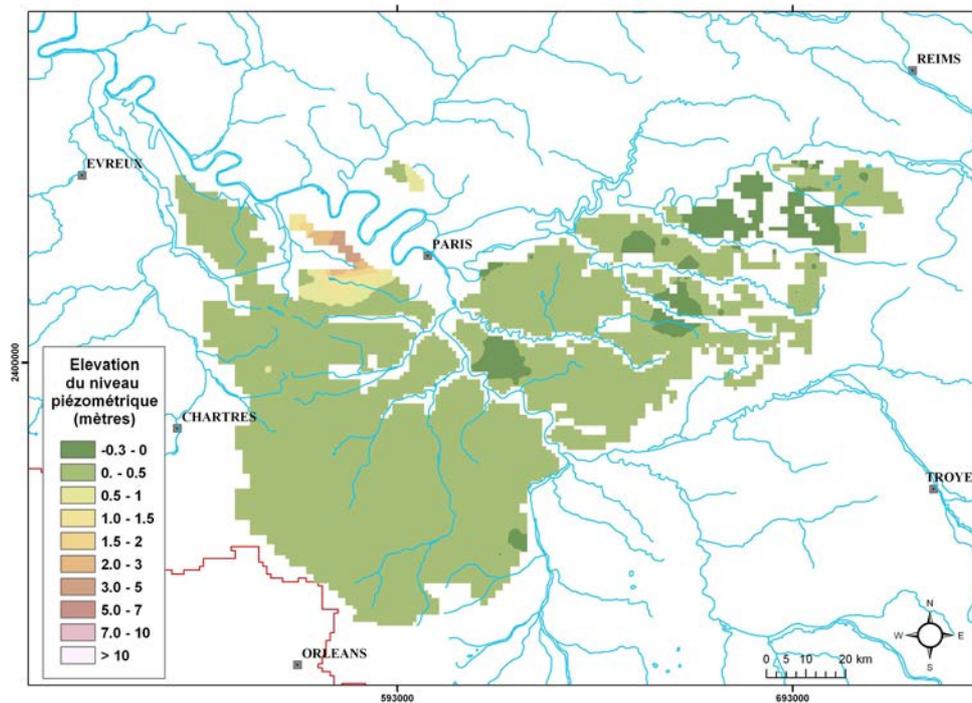


Illustration 81 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau

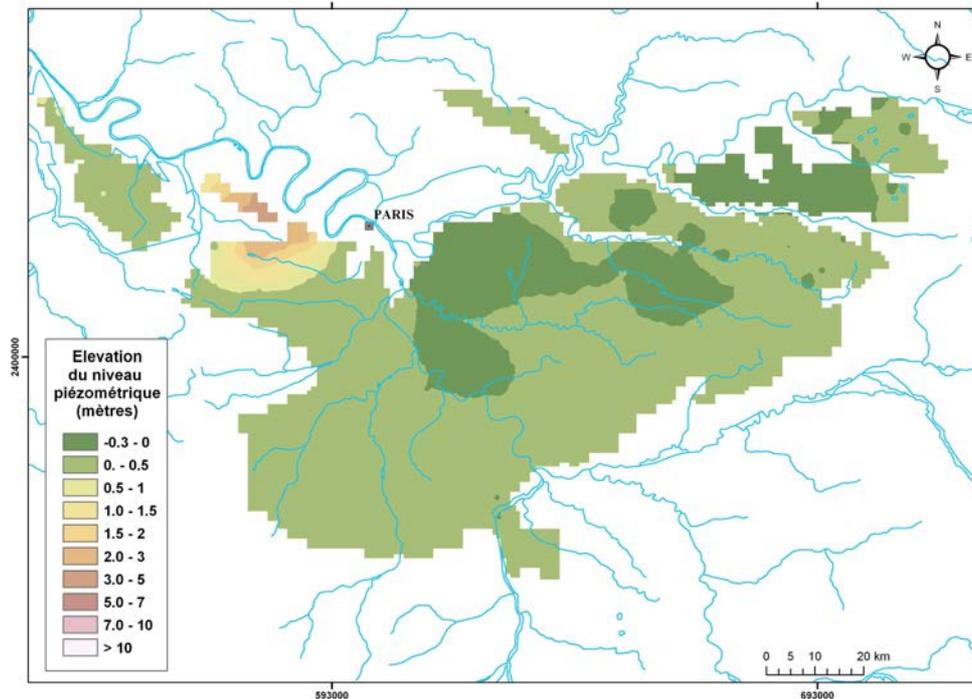


Illustration 82 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe des Calcaires de Champagne

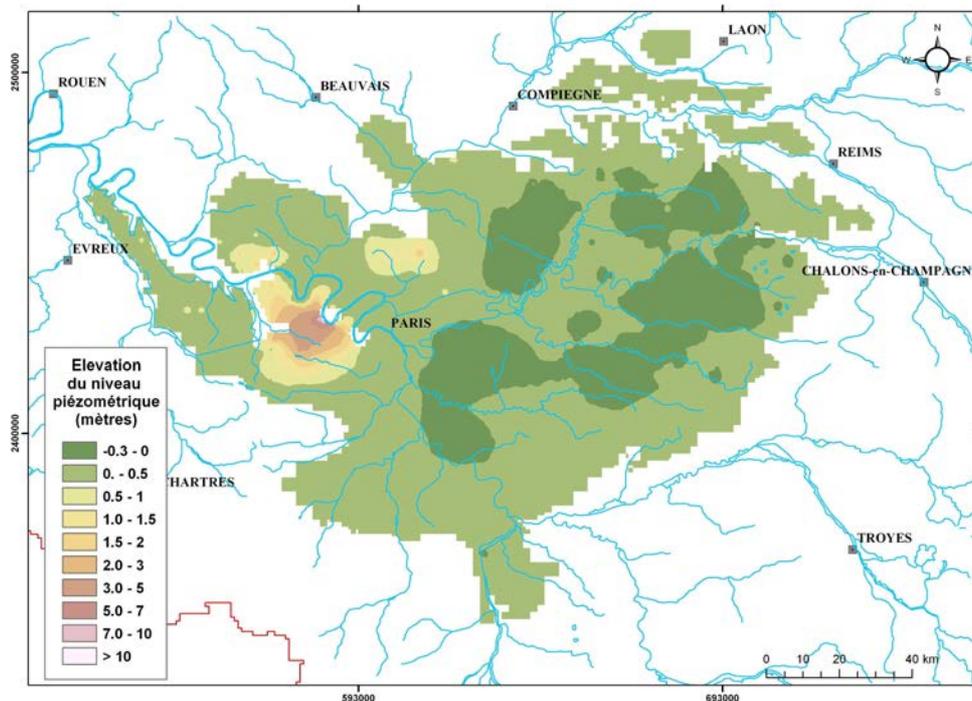


Illustration 83 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe du Lutétien/Yprésien

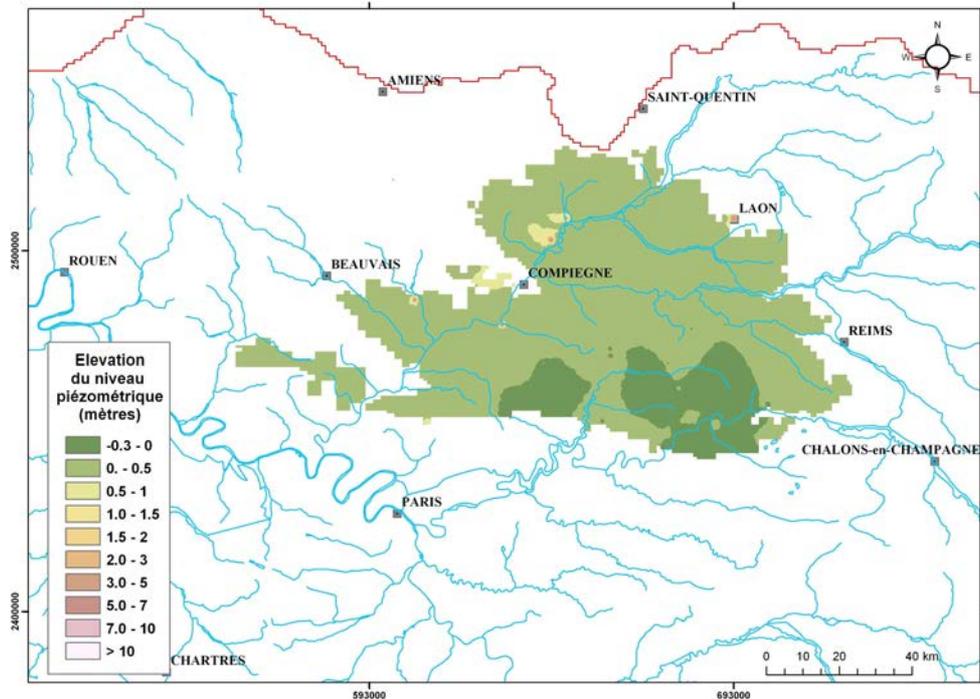


Illustration 84 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe du Thanétien

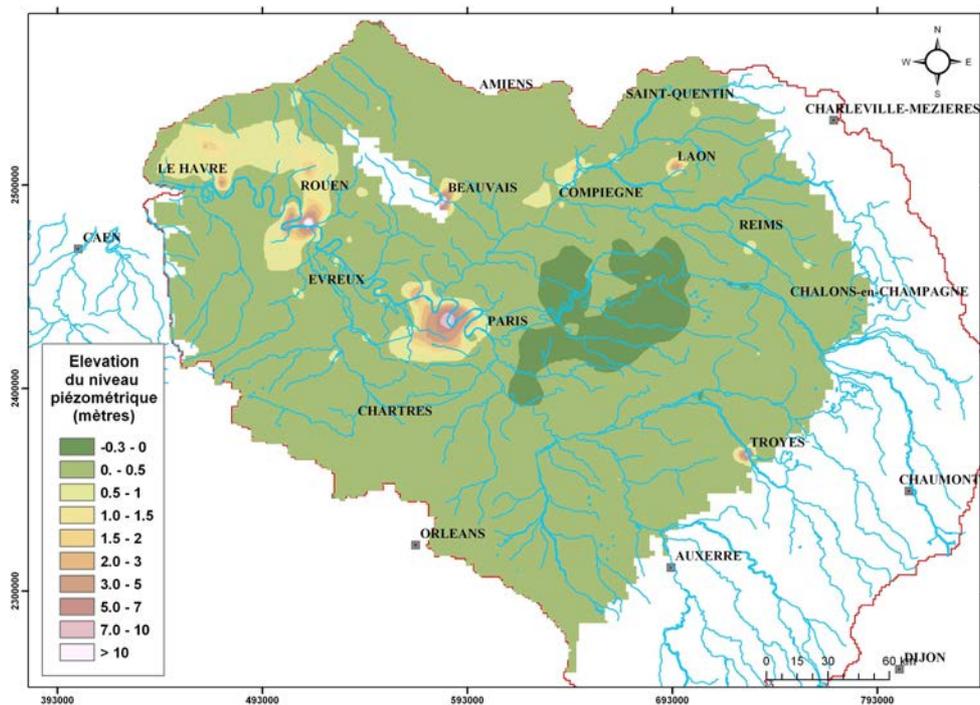


Illustration 85 : Variation piézométrique liée à la prise en compte de l'évolution des prélèvements en nappe (scénario 1 du BIPE) : nappe de la Craie

4.7.3. INFLUENCE DES SCENARIOS DE PRELEVEMENTS SUR LE DEBIT DES GRANDS COURS D'EAU DU BASSIN

Comme précisé au chapitre précédent, la relativement faible influence de la prise en compte des modifications des prélèvements en nappe sur les niveaux piézométriques moyens des formations aquifères du bassin ne modifie que très faiblement la réponse sur le débit des grands cours d'eau.

Ceci est exposé sur les illustrations 86 et 87 qui précisent, selon les deux scénarios d'évolution étudiés, leur influence relative, à l'horizon 2046-2065, sur le débit moyen mensuel de l'Yonne, la Marne et la Seine. Ces résultats représentent une moyenne de l'ensemble des sept modèles de climat étudiés.

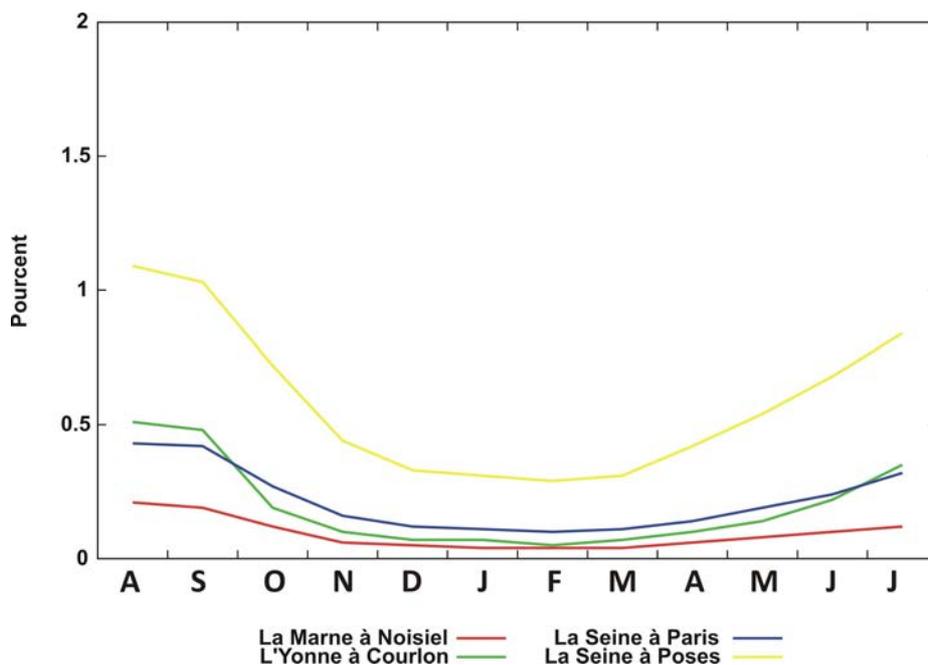


Illustration 86 : Scénario 1 d'évolution des prélèvements : variation relative du débit moyen mensuel des grands cours d'eau du bassin

Remarque : Il faut toutefois noter que si l'influence calculée sur les débits des grands cours d'eau reste très faible, ceci ne sera certainement pas le cas pour les rivières de tête de bassin, à petits débit et très sensibles aux faibles variations piézométriques.

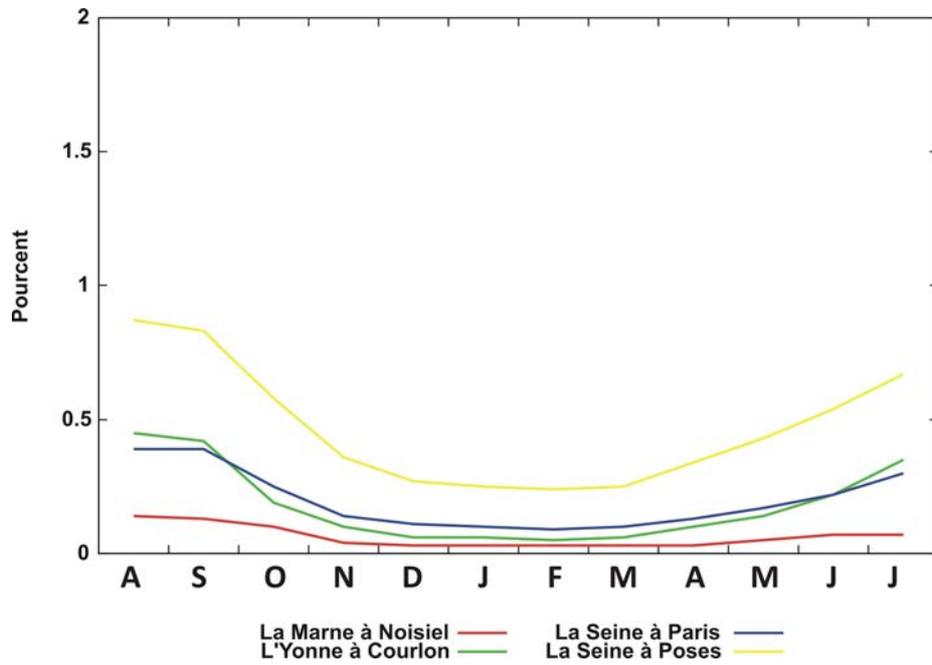


Illustration 87 : Scénario 2 d'évolution des prélèvements : variation relative du débit moyen mensuel des grands cours d'eau du bassin

5. CONCLUSIONS

Les simulations menées grâce aux projections de différents modèles climatiques permettent de dégager quelques grandes tendances de l'évolution possible (à l'horizon 2060) de l'hydrosystème du bassin de la Seine.

Si les projections climatiques désagrégées indiquent des évolutions contrastées des précipitations sur le domaine étudié avec une dispersion sensible selon les modèles de climat, elles vont toutes dans le sens d'une augmentation de la température moyenne (entre 1.5°C et 3.0°C). Ceci s'accompagne d'une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 10 à 25% selon les modèles.

Ces projections météorologiques à moyen terme ont pu être intégrées dans le modèle MODCOU, qui couple les écoulements de surface et souterrains, mis en place lors d'études précédentes sur le bassin de la Seine et calibré sur les données météorologiques présentes.

Au niveau des écoulements de surface, la prise en compte des projections météorologiques fait apparaître une baisse sensible de l'alimentation en eau des grandes formations aquifères du bassin puisque la baisse moyenne calculée pour l'ensemble des modèles de climat traité est de près de 19% et, localement, des variations de -20 à près de -30% ont été calculées sur certaines régions. Ces variations sont moins marquées au niveau des flux d'eau ruisselés en surface. Ces résultats peuvent faire craindre une diminution sensible des débits d'étiage de l'ensemble des cours d'eau du bassin et plus particulièrement sur les têtes de bassin ainsi qu'un allongement de la durée de ces étiages. En période hivernale, la légère baisse, en moyenne des sept modèles de climat analysés, des débits moyens mensuels semble moins robuste.

L'impact sur la piézométrie du bassin est sensible, toujours en liaison directe avec la diminution de la recharge par les eaux météoriques, notamment sur les grandes zones de plateaux (pays de Caux, plaine de Beauce) où la piézométrie est peu contrainte par un réseau hydrographique dense. Selon les scénarios, cette baisse peut localement dépasser 10 mètres.

La prise en compte de l'évolution des prélèvements, telle qu'estimée par la société d'études et de conseil en stratégie BIPE, et selon deux scénarios d'évolution démographique, ne modifie que de manière marginale (à l'échelle du bassin) l'évolution du niveau moyen des formations aquifères même si localement, l'impact de la prise en compte de ses scénarios peut être importantes.

Globalement, ces scénarios prévoient pourtant une baisse moyenne sur le bassin de l'ensemble des prélèvements en nappe de l'ordre de 25%, la plus grande partie (en volume) étant imputable aux prélèvements d'eau potable (A.E.P.). Cette baisse relative (fournie par petits bassins hydrographiques) a été appliquée uniformément aux prélèvements actuels pris en compte dans le modèle. Son impact sur le débit des grands cours d'eau du bassin reste très limité, même en période d'étiage, car la piézométrie évolue peu. Il est toutefois nécessaire de noter que ces scénarios ne supposent pas de modification des prélèvements d'origine agricole. Or les premiers calculs effectués dans le cadre du projet RExHySS montrent que, à surface cultivée et assolements inchangés, les besoins potentiels en irrigation augmentent de près de 50%.

6. REFERENCES

4ième rapport du GIEC : Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W.T., Laprise R., Magana Rueda V., Mearns L., Menendez C.G., Raisanen J., Rinke A., Sarr A. et Whetton P., 2007. Regional Climate Projections. In *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

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.

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.

Gomez, E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 287 pp.

Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoïn S., Rieu J., 2009. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, rapport final du projet RExHySS, programme GICC, 62 pp.

Ducharne, A., et al (2005). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Rapport final du projet GICC Seine, 60 pp.

Ducharne, A., Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E., Déqué, M. (2003). Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, *VertigO*, La revue en sciences de l'environnement sur le WEB, Vol.4 N° 3, décembre 2003.

Ducharne, A., Koster, R.D., Suarez, M., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24823-24838.

Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S., Viennot P.

(2007). Long term prospective of the Seine river system : confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311, doi:10.1016/J.scitotenv.2006.12.011

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

Habets, F., *et al* (2012): Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine, Plaquette du PIREN Seine, ISBN : 978-2-918251-12-5, 47p, .

Kendall, M., Stuart, A., et Ord, J. : The advanced theory of statistics. Vol 3 : design and analysis, and time series, 4th edition, Charles Gri-n and Co Ltd, 1977.

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.

Quintana-Segui, 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.

Meybeck M., de Marsily G. & Fustec E., 1998, La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Ed. Elsevier.

Nakicenovic, N. & Swart, R., editors (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, UK.

PIREN Seine, après 2000 ?, La Seine en équations, des modèles pour mieux comprendre la Seine et restaurer sa qualité, co-édition CNRS - AESN.

Planton, S, Déqué, M., Douville, H. and Spagnoli, B. (2005). Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique, *C.R. Géoscience*, 337 : 193-202.

Projet GICC-Seine (2005). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. 60 pages

Viennot P., Ledoux E. (2004). Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine – Calage du comportement des nappes internes du bassin de la Seine – prévision des étiages, Ecole des mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique, rapport LHM/RD/04/30, 92p.

Viennot P., Ledoux E. (2006). Influence de l'augmentation des prélèvements anthropiques en formations aquifères sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine, Ecole des mines de Paris, Centre de Géosciences, rapport R060713PVIE, 106p.

Viennot P. (2009). Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine – Représentation différenciée des aquifères du Tertiaire – Intégration des prélèvements anthropiques, Ecole des mines de Paris, Centre de Géosciences, rapport R071128PVIE, 147p.