

VERSION au 20/4/2009

Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine

-oOo-

**Représentation différenciée
des aquifères du Tertiaire**

/

Intégration des prélèvements anthropiques

P. VIENNOT

**Références : R071128PVIE
ARMINES : C.276803.70954
DIREN Île-de-France : BC-2007-153-R35-00032**

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	11
2 PRINCIPE GENERAL DU MODELE MODCOU	12
2.1 MODELISATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS EN NAPPE.....	13
2.2 MODELISATION DES ECOULEMENTS SUPERFICIELS.....	13
2.3 ECHANGES ENTRE LE DOMAINE DE SURFACE ET LE DOMAINE SOUTERRAIN	15
2.4 TRANSFERT DES LAMES D’EAU INFILTREES DANS LA ZONE NON SATUREE.....	15
3 MISE EN PLACE DU MODELE MODCOU SUR LE BASSIN DE LA SEINE	17
3.1 COUCHE DE SURFACE	17
3.2 DOMAINE SOUTERRAIN	20
3.2.1 Géologie générale du bassin.....	20
3.2.2 Formations aquifères prises en compte dans le modèle INITIAL	21
3.3 NOUVELLE CONCEPTUALISATION DES AQUIFERES SIMULES	22
3.3.1 Formations tertiaires du bassin de la Seine.....	22
3.3.2 Cartes structurales des formations tertiaires	28
3.4 PARAMETRES D’ENTREE DU MODELE	32
3.4.1 pluviométrie - évapotranspiration.....	32
3.4.2 paramètres des fonctions de production du module de surface	33
3.4.3 paramètres du souterrain	35
BASE DE DONNEES « PRELEVEMENTS »	42
3.5 PRELEVEMENTS A.E.P. EN NAPPE	42
3.6 PRELEVEMENTS INDUSTRIELS EN NAPPE	43
3.7 PRELEVEMENTS AGRICOLES EN NAPPE	44
4 PRISE EN COMPTE DES PRELEVEMENTS DANS LES MODELISATIONS.....	47
4.1 VOLUMES JOURNALIERS PRELEVES.....	47
4.2 FORMATIONS AQUIFERES CAPTEES.....	47
5 CALCUL EN REGIME PERMANENT	48
5.1 PIEZOMETRIE CALCULEE EN REGIME PERMANENT	48
5.2 BILAN HYDRIQUE GLOBAL CALCULE EN REGIME PERMANENT	52
6 INFLUENCE DES PRELEVEMENTS EN REGIME PERMANENT	53
6.1 RABATTEMENT INDUIT PAR LES PRELEVEMENTS.....	53
6.2 BILAN HYDRIQUE GLOBAL CALCULE EN L’ABSENCE DE PRELEVEMENTS	56
7 CALCUL EN REGIME TRANSITOIRE	57
7.1 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE.....	58
7.2 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE BRIE ET DES SABLES DE FONTAINEBLEAU.....	62
7.3 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE CHAMPIGNY.....	65

7.4 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES FORMATIONS DU LUTETIEN ET DE L'YPRESIEN	73
7.5 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DE LA FORMATION DU THANETIEN.....	78
7.6 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DE LA CRAIE	80
7.7 DEBITS CALCULES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES.....	93
7.7.1 Bassin de l'Oise	93
7.7.2 Bassin de LA SEINE AMONT	104
7.7.3 Bassin de LA SEINE AVAL	117
ANNEXE 1	124
CARTES STRUCTURALES DES FORMATIONS	124
TERTIAIRES DU BASSIN DE PARIS.....	124
ANNEXE 2	131
PRELEVEMENTS A.E.P. DANS LES DIFFERENTES	131
FORMATIONS AQUIFERES (moyenne 2000-2004)	131
FORMATION DES CALCAIRES DE BRIE.....	133
FORMATION DES SABLES DE FONTAINEBLEAU.....	135
FORMATION DES CALCAIRES DE CHAMPIGNY	135
FORMATION DES CALCAIRES DE SAINT OUEN	137
FORMATIONS DU LUTETIEN ET DE L'YPRESIEN.....	137
FORMATIONS DES SABLES D'AUVERS ET DE BEAUCHAMP	138
FORMATION DE LA NAPPE DE LA CRAIE	139
ANNEXE 3	140
Prélèvements INDUSTRIELS en nappe dans les.....	140
différentes formations AQUIFERES (moyenne 2000-2004).....	140
FORMATIONS DU TERTIAIRE	141
FORMATION DE LA CRAIE.....	142
8 TRANSFERT DE L'APPLICATION A LA DIREN ÎLE-DE-FRANCE	144
8.1 MODULE DE SURFACE : CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DES PRECIPITATIONS	144
8.2 TRANSFERT DANS LA ZONE NON SATUREE.....	145
8.3 CALCUL MODCOU	146

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe général du modèle couplé MODCOU	12
Figure 2 : schématisation de la représentation multicouche	12
Figure 3 : Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs.	14
Figure 4 : Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.....	15
Figure 5 : Principe du modèle en cascade de Nash.....	16
Figure 6: Principe de discrétisation du domaine de surface	17
Figure 7 : Modèle numérique de terrain au pas de 100 m.....	18
Figure 8 : Maillage de la couche de surface. La discrétisation en petites mailles permet de reproduire le réseau hydrographique principal (de bassin versant supérieur à 250 km ²) ainsi que les limites de ces bassins versants	19
Figure 9 : Réseau de mailles "rivières" de la couche de surface.....	19
Figure 10 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Seine. Les formations du Jurassique inférieure à la Craie affleurent en auréoles concentriques autour d'une vaste zone de formations tertiaires (Eocène et Oligocène au centre du bassin).....	20
Figure 11 : Vue tridimensionnelle des trois principaux aquifères du bassin	21
Figure 12 : extension de la couche aquifère représentant les Calcaires de Beauce.....	24
Figure 13 : extension de la couche aquifère représentant les Sables de Fontainebleau et les Calcaires de Brie	24
Figure 14 : extension de la formation du Champigny	25
Figure 15 : extension de la formation aquifère du Lutétien/Yprésien.....	26
Figure 16 : extension de la formation aquifère du Thanétien	27
Figure 17: superposition de l'ensemble des formations aquifères représentées dans le modèle	27
Figure 18 : épaisseur de la couche "modèle" des Calcaires de Beauce	29
Figure 19 : épaisseur de la couche "modèle" des Sables de Fontainebleau et des Calcaires de Brie	29
Figure 20 : épaisseur de la couche "modèle" des Calcaires de Champigny.....	30
Figure 21 : épaisseur de la couche "modèle" du Lutétien/Yprésien.....	30
Figure 22 : épaisseur de la couche "modèle" du Thanétien	31
Figure 23 : épaisseur de la couche "modèle" de la Craie	31
Figure 24 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle* (ETP) journalière moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine.....	32
Figure 25 : Pluviométrie moyenne observée sur le bassin de la Seine (1970-2004) : données SAFRAN Météo-France	33
Figure 26 : Evapotranspiration potentielle moyenne (années 1970-2004) : données SAFRAN Météo France	33
Figure 27 : Répartition spatiale des surface agricoles utiles sur le maillage de surface.....	34

Figure 28 : Répartition géographique des fonctions de production de type "zones urbaines"	35
Figure 29 : transmissivité calée de la formation des Calcaires de Beauce	36
Figure 30 : transmissivité calée de la formation des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau	36
Figure 31 : transmissivité calée de la formation des Calcaires de Champigny	37
Figure 32 : transmissivité calée de la formation du Lutétien/Yprésien	37
Figure 33 : transmissivité calée de la formation du Thanétien	38
Figure 34 : transmissivité calée de la formation de la Craie	38
Figure 35 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation des Calcaires de Beauce	39
Figure 36 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau	39
Figure 37: coefficient d'emmagasinement calé de la formation des Calcaires de Champigny	40
Figure 38: coefficient d'emmagasinement calé de la formation du Lutétien/Yprésien	40
Figure 39 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation du Thanétien	41
Figure 40 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation de la Craie	41
Figure 41 : Situation géographiques des captages A.E.P. en nappe	42
Figure 42 : Volumes globaux annuels prélevés en nappe à des fins AEP	43
Figure 43 : Volumes globaux recensés et prélevés en nappe à des fins industrielles	44
Figure 44 : Localisation de l'ensemble des forages industriels de prélèvement en nappe	44
Figure 45 : Prélèvements agricoles en nappe moyens annuels entre 1994 et 2006	45
Figure 46: Localisation de l'ensemble des forages agricoles de prélèvement en nappe	45
Figure 47 : Volumes prélevés en nappe à des fins agricoles en 2006	46
Figure 48 : piézométrie calculée en régime permanent : formation des Calcaires de Beauce	48
Figure 49 : piézométrie calculée en régime permanent : formation des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau	49
Figure 50 : piézométrie calculée en régime permanent : formation des Calcaires de Champigny	49
Figure 51 : piézométrie calculée en régime permanent : formations du Lutétien/Yprésien	50
Figure 52 : piézométrie calculée en régime permanent : formation du Thanétien	50
Figure 53 : piézométrie calculée en régime permanent : formation de la Craie	51
Figure 54 : bilan hydrique global des formations aquifères en régime permanent (période moyenne 1985-2008) avec prise en compte des prélèvements	52
Figure 55 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation des Calcaires de Beauce	53
Figure 56 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation des Calcaires de Brie/Sables de Fontainebleau	54
Figure 57 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation des Calcaires de Champigny ...	54
Figure 58 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation du Lutétien/Yprésien	55

Figure 59 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation du Thanétien	55
Figure 60 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation de la Craie	56
Figure 61 : bilan hydrique global des formations aquifères en régime permanent (période moyenne 1985-2008) avec absence de prélèvements	57
Figure 62 : nappe des Calcaires de Beauce - situation géographique des piézomètres retenus	58
Figure 63 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Batilly-en-Gatinais (Loiret)	59
Figure 64: évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre d'Engenville (Loiret)	59
Figure 65 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre d'Allainville (Yvelines)	60
Figure 66 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Saint-Léger des Aubées (Eure et Loir)	60
Figure 67 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Mainvilliers (Loiret)	61
Figure 68 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Trancrainville (Eure et Loir)	61
Figure 69 : nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau - situation géographique des piézomètres retenus	62
Figure 70 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau : piézomètre de Congerville-Thioville (Essonnes)	63
Figure 71 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau : piézomètre de Fontainebleau (Seine et Marne).....	63
Figure 72 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau : piézomètre de Paray-Douaville (Yvelines)	64
Figure 73 : nappe des Calcaires de Champigny - situation géographique des piézomètres retenus.....	65
Figure 74 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Ferolles-Attilly (Seine et Marne)	66
Figure 75 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Brie-Comte-Robert (Seine et Marne)	66
Figure 76 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Verneuil l'Etang (Seine et Marne)	67
Figure 77 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de la Houssaye-en-Brie (Seine et Marne)	67
Figure 78 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Nangis (Seine et Marne)	68
Figure 79: évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Montereau sur le Jard (Seine et Marne)	68

Figure 80 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Saint-Martin-Chennetron (Seine et Marne).....	69
Figure 81 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Champdeuil (Seine et Marne)	69
Figure 82 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Courpalay (Seine et Marne)	70
Figure 83 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Evry-Grégy sur Yerre (Seine et Marne)	70
Figure 84 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Moissy-Cramayel (Seine et Marne)	71
Figure 85 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Pezarches (Seine et Marne)	71
Figure 86 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Savigny-le-Temple (Seine et Marne)	72
Figure 87 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Vert-Saint-Denis (Seine et Marne).....	72
Figure 88 : formations aquifères du Lutétien et de l'Yprésien - situation géographique des piézomètres retenus	73
Figure 89 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Bréval (Yvelines)	74
Figure 90 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Saint-Vaast les Mello (Oise)	74
Figure 91 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Fresnoy-le-Luat (Oise)	75
Figure 92 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre d'Armentières sur Ourcq (Aisne)	75
Figure 93 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Fère en Tardenois (Aisne)	76
Figure 94 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Lagny le Sec (Oise)	76
Figure 95 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Penchard (Seine et Marne)	77
Figure 96 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Villers-Cotterets (Aisne).....	77
Figure 97 : formation aquifère du Thanétien - situation géographique du piézomètre retenu	78
Figure 98 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la formation du Thanétien : piézomètre de Chiry-Ourscamp (Oise)	79
Figure 99 : nappe de la Craie : localisation des piézomètres retenus	80
Figure 100 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Buhy (Val d'Oise).....	81

Figure 101 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Perdreauxville (Yvelines)	82
Figure 102 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Chéroy (Yonne)	82
Figure 103 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Rocquemont (Seine-Maritime)	83
Figure 104 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Bois d'Ennebourg (Seine-Maritime)	83
Figure 105 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Trois-Pierres (Seine-Maritime).....	84
Figure 106 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Fresne-les-Reims (Marne).....	84
Figure 107 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Linthelles (Marne)	85
Figure 108 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre Les Grandes Loges (Marne).....	85
Figure 109 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Villeloup (Aube).....	86
Figure 110 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre d'Orvilliers Saint Julien (Aube)	86
Figure 111 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Bussy le Château (Marne)	87
Figure 112 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Vailly (Aube)	87
Figure 113 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Beauvais (Oise).....	88
Figure 114 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre d'Estrée-Saint-Denis (Oise).....	88
Figure 115 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Farceaux (Eure)	89
Figure 116 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Sompuis (Marne)	89
Figure 117 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Catenay (Seine Maritime).....	90
Figure 118 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de l'Aigle (Orne)	90
Figure 119 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Le Sourd (Aisne)	91
Figure 120 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Saint-Hermé-Outre et Ramecourt (Aisne)	91

Figure 121 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Veauville-les-Quelles (Seine-Maritime) 92

Figure 122 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de La Selve (Aisne) 92

Figure 123 : situation géographique des stations simulées sur le bassin de l'Oise 93

Figure 124 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Monceau-sur-Oise 94

Figure 125 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station d'Origny-Ste-Benoite 94

Figure 126: comparaison des débits simulés et mesurés sur la Serre à la station de Mortiers 95

Figure 127: comparaison des débits simulés et mesurés sur la Serre à la station de Pont-à-Bucy..... 95

Figure 128 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Condren 96

Figure 129 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aire à Amblaincourt 96

Figure 130 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aire à la station de Varennes-en-Argonne..... 97

Figure 131 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Mouronville 97

Figure 132 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Givry-en-Argone 98

Figure 133 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vaulx à la station d'Ecly 98

Figure 134 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Suippe à la station de Selles..... 99

Figure 135 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Suippe à la station d'Orainville..... 99

Figure 136 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Berry-au-Bac 100

Figure 137 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Veslee à la station de Bouy 100

Figure 138 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vesle à la station de Puisieux 101

Figure 139 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Choisy-au-Bac 101

Figure 140 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Arronde à la station de Clairoux..... 102

Figure 141 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Pont-Ste-Maxence..... 102

Figure 142 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Therain à la station de Maysel..... 103

Figure 143 : situation géographique des stations simulées sur le bassin de la Seine en amont de Paris..... 104

Figure 144 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Ourq à la station de Chouy 105

Figure 145 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Marne à la station de Châlons-en-Champagne 105

Figure 146 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Surmelin à la station de Saint-Eugène 106

Figure 147 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Petit-Morin à la station de Jouarre 106

Figure 148 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Grand-Morin à la station de Pommeuse 107

Figure 149 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Marne à la station de Noisiel (Gournay)..... 107

Figure 150 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Yerre à la station de Courtomer 108

Figure 151 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Voulzie à la station de Jutigny 108

Figure 152 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Armançon à la station de Tronchoy 109

Figure 153 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Armançon à la station de Jaulges..... 109

Figure 154 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Armanche à la station de Chessy-les-Prés	110
Figure 155 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vanne à la station de Pont-sur-Vanne.....	110
Figure 156 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Yonne à la station de Courlon	111
Figure 157 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Ouanne à la station de Charny.....	111
Figure 158 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Ouanne à la station de Gy-lès-Nonains	112
Figure 159 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Loing à la station de Chalette-sur-Loing	112
Figure 160 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Loing à la station d'Episy.....	113
Figure 161 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Essonne à la station de Boulancourt	113
Figure 162 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Essonne à la station de Guigneville	114
Figure 163 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Essonne à la station de Ballancourt	114
Figure 164 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Orge à la station d'Epinais-sur-Orge.....	115
Figure 165 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Orge à la station de Morsang-sur-Orge.....	115
Figure 166 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Paris-Pont d'Austerlitz...	116
Figure 167 : situation géographique des stations simulées sur le bassin de la Seine en aval de Paris	117
Figure 168 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Mauldre à la station d'Aulnay-sur-Mauldre.....	118
Figure 169 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Epte à la station de Fourges.....	118
Figure 170 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Sainte-Lupercie.....	119
Figure 171 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Charpont	119
Figure 172 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Avre à la station d'Acon	120
Figure 173 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Avre à la station de Muzy	120
Figure 174 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Cailly-sur-Eure	121
Figure 175 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Iton à la station de Normanville	121
Figure 176 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Louviers	122
Figure 177 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Andelle à la station de Vascoeil	122
Figure 178 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Poses.....	123
Figure A1-179 : carte structurale du toit des Sables de Fontainebleau (source BRGM)	125
Figure A1-180 : carte structurale du mur des Sables de Fontainebleau (source BRGM).....	125
Figure A1-181 : carte structurale du toit des Marnes Vertes (source BRGM)	126
Figure A1-182 : carte structurale du toit des Calcaires de Champigny (source BRGM).....	126
Figure A1-183 : carte structurale du toit des Calcaires de Saint-Ouen (source BRGM).....	127
Figure A1-184 : carte structurale du toit des Sables d'Auvers (source BRGM)	127
Figure A1-185 : cartes structurales du toit du Lutétien (source BRGM)	128
Figure A1-186 : carte structurale du mur du Lutétien (source BRGM)	128
Figure A1-187 : carte structurale du toit du Sparnacien (source BRGM)	129

Figure A1-188 : carte structurale du toit du Thanétien (source BRGM)	129
Figure A1-189 : carte structurale du toit de la Craie (source BRGM)	130
Figure A2-190 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Beauce	132
Figure A2-191 : Localisation des forages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Beauce et d'autres formations	132
Figure A2-192 : Prélèvements moyens annuels dans les ouvrages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Beauce et d'autres formations	133
Figure A2-193 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Brie	133
Figure A2-194 : Localisation des forages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Brie et d'autres formations	134
Figure A2-195 : Prélèvements AEP moyens annuels dans les ouvrages captant conjointement la nappe des Calcaires de Brie et d'autres formations	134
Figure A2-196 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des sables de Fontainebleau	135
Figure A2-197 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Champigny	135
Figure A2-198 : Localisation des ouvrages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Champigny et d'autres formations	136
Figure A2-199 : Prélèvements AEP moyens annuels dans les ouvrages captant conjointement la nappe des Calcaires de Champigny et d'autres formations	136
Figure A2-200 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Saint Ouen	137
Figure A2-201 : Prélèvements A.E.P. dans les formation du Lutétien	137
Figure A2-202 : Prélèvements A.E.P. dans les formation du Lutétien + Yprésien	138
Figure A2-203 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des sables d'Auvers et de Beauchamp	138
Figure A2-204 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe de la Craie	139
Figure A3-205 : Formations prélevées par les forages industriels (source AQUI-Brie)	141
Figure A3-206 : Prélèvements industriels en nappe : volumes prélevés (source AQUI-Brie)	141
Figure A3-207 : Prélèvements industriels en nappe : Volumes moyens prélevés des forages non renseignés au niveau de l'aquifère capté	142
Figure A3-208 : Localisation des ouvrages et volumes moyens annuels prélevés à des fins industrielles dans l'aquifère de la Craie	142
Figure 209: Module de surface - bilan hydrique des précipitations	144
Figure 210 : Module de calcul du transfert dans les formations non saturées	145
Figure 211 : Module de calcul des écoulements couplés surface-souterrain	146
Figure 212 : Exemple de fichier d'entrée du programme MODCOU	147

1 INTRODUCTION

L'École des mines de Paris/ARMINES, par le biais de son Centre de Géosciences (ex Centre d'Informatique Géologique) 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 sert également de vecteur hydraulique à la dissémination des pollutions diffuses d'origine agricole dans le bassin (nitrates, pesticides). Initialement mis en place par E. Gomez dans le cadre de sa thèse (2002) et par souci d'allègement des calculs, le choix des formations souterraines à modéliser s'était porté sur trois aquifères principaux :

- l'aquifère de la Craie ;
- l'aquifère de l'Eocène au sens large : les nappes du Soissonnais et de Champigny ont été regroupées du fait de domaines d'extension sensiblement différents et que les argiles et sables de Beauchamp ne représentaient pas de barrières hydrauliques efficace à l'échelle régionale retenue
- l'aquifère de l'Oligocène : nappe de Beauce au sens large également (sables de Fontainebleau, Calcaires de Brie, ...)

La calage du modèle, initié par E. Gomez a été repris en 2004 dans le cadre d'une étude commanditée par la DIREN Île-de-France, intitulée « Modélisation hydrogéologique du bassin de la Seine - Calage du comportement des nappes internes du bassin de la Seine - Prévission des étiages » et ayant donné lieu au rapport LHM/RD/04/30. Ce nouveau calibrage du modèle avait permis de reproduire de manière satisfaisante les niveaux piézométriques et leur évolution sur plus de 30 ans de plus de 50 ouvrages répartis sur le bassin de la Seine ainsi que le débit des grands cours d'eau (Seine, Marne, Yonne, etc...). De plus, le calage du modèle est effectué sans prise en compte explicite des prélèvements dans les nappes et les cours d'eau.

A ce jour, des demandes d'études d'impact plus précises et plus locales nous amènent à reconsidérer la conceptualisation du modèle et plus particulièrement celle des couches souterraines modélisées afin d'affiner les résultats du modèle en terme de restitution piézométrique et de débits des « petits » cours d'eau amont du bassin.

Le présent document présente respectivement le principe général du modèle, la nouvelle discrétisation horizontale et verticale apportée dans les formations du tertiaire et les résultats du calage en régime permanent et transitoire sur les vingt dernières années.

2 PRINCIPE GENERAL DU MODELE MODCOU

Le logiciel MODCOU permet de simuler de façon couplée les écoulements de surface et en nappes (figure 1).

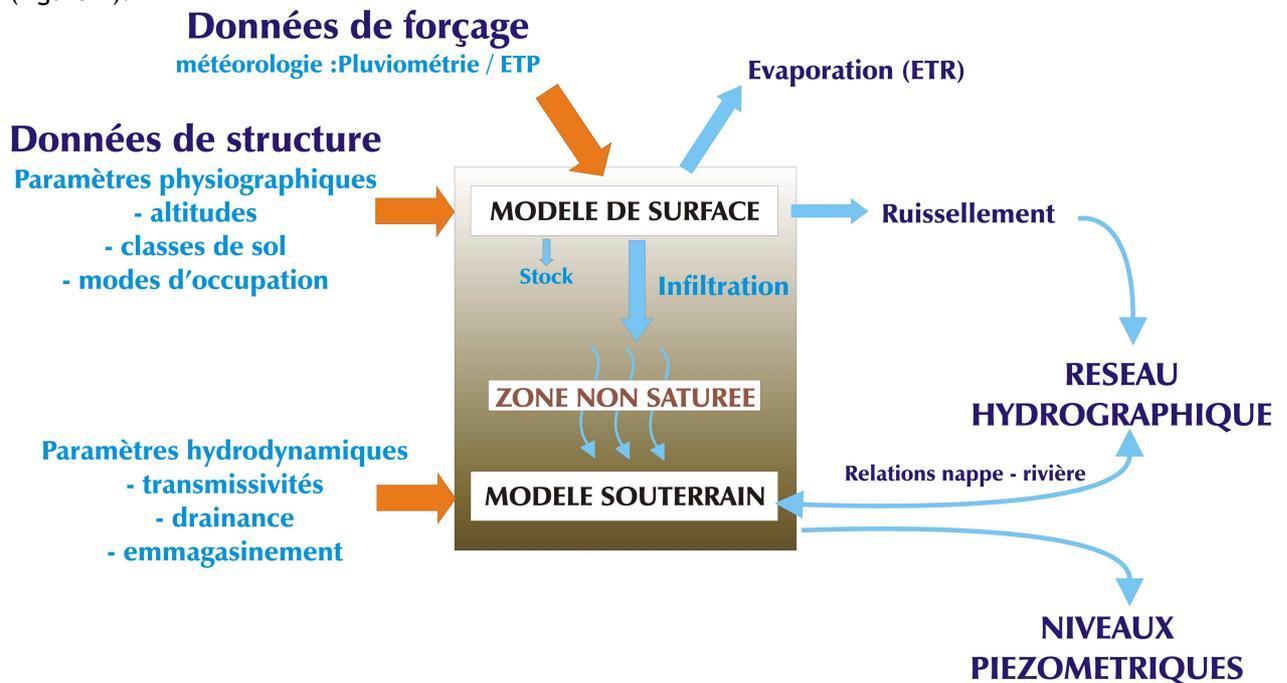


Figure 1 : Principe général du modèle couplé MODCOU

Ce modèle utilise la méthode des différences finies sur des mailles carrées emboîtées (figure) 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.

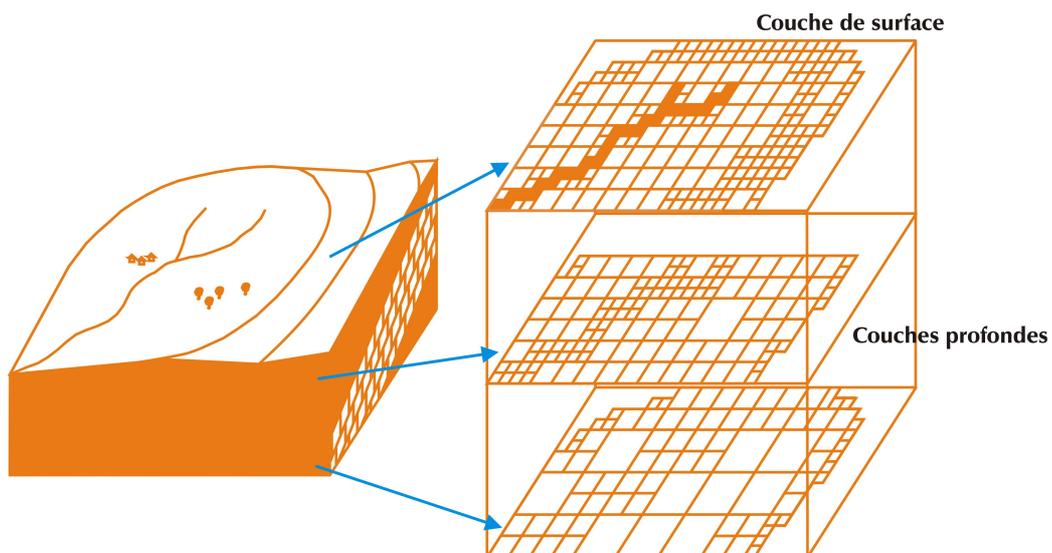


Figure 2 : schématisation de la représentation multicouche

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 (m^2/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 (figure 5).

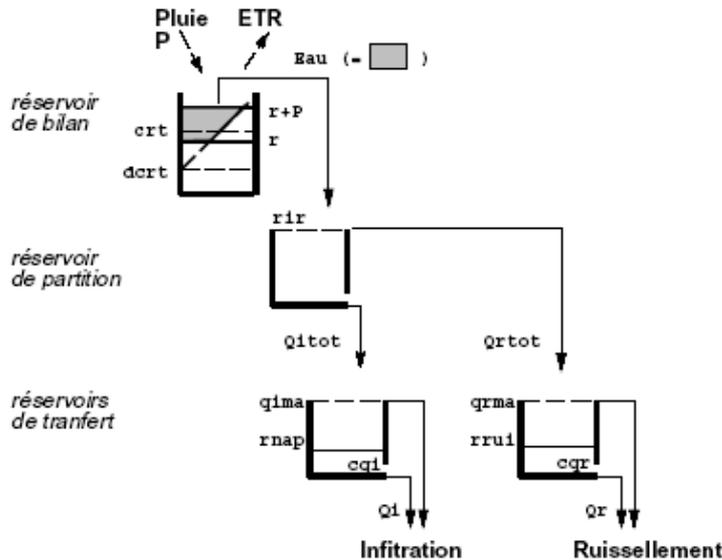


Figure 3 : Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs.

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 :

$$Q_{ri}(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left(\sum_{j=1}^{N_k} q_{rj}(t - kdt) \right),$$

Où K est le nombre de zones isochrone du sous-bassin, N_k le nombre de mailles de la zone isochrone k , et $q_{rj}(t-kdt)$ 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 :

$$Q = T_p * (H - H_0)$$

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.

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 (figure 6).

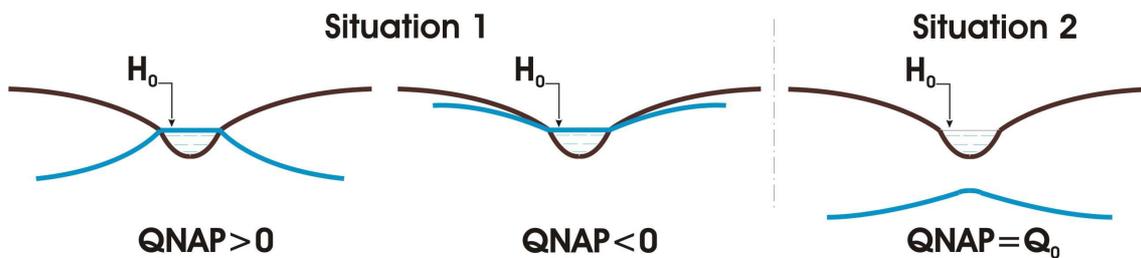


Figure 4 : Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.

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.

2.4 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 (figure 5).

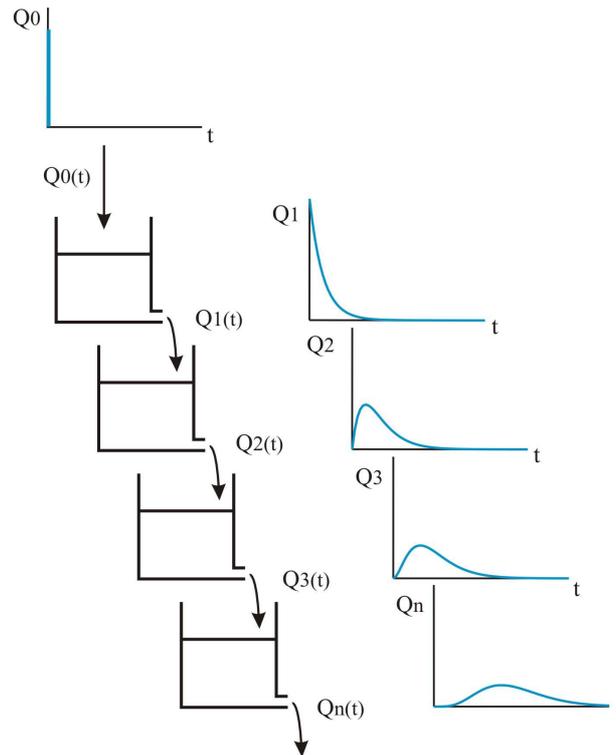


Figure 5 : Principe du modèle en cascade de Nash.

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 N ième 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

3.1 COUCHE DE SURFACE

Les directions de drainage de chaque maille sont définies à partir d'un modèle numérique de terrain au pas de 100 m (figure 7) grâce à un logiciel développé au CEMAGREF de Lyon : Hydrodem (E. Leblois). La figure 6 présente un exemple de réseau de drainage.

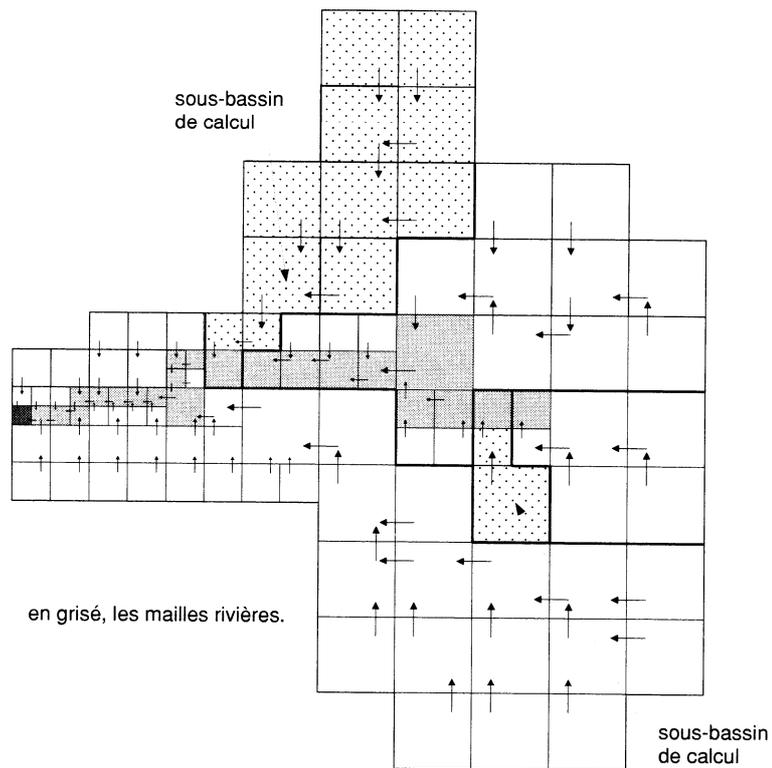


Figure 6: Principe de discrétisation du domaine de surface

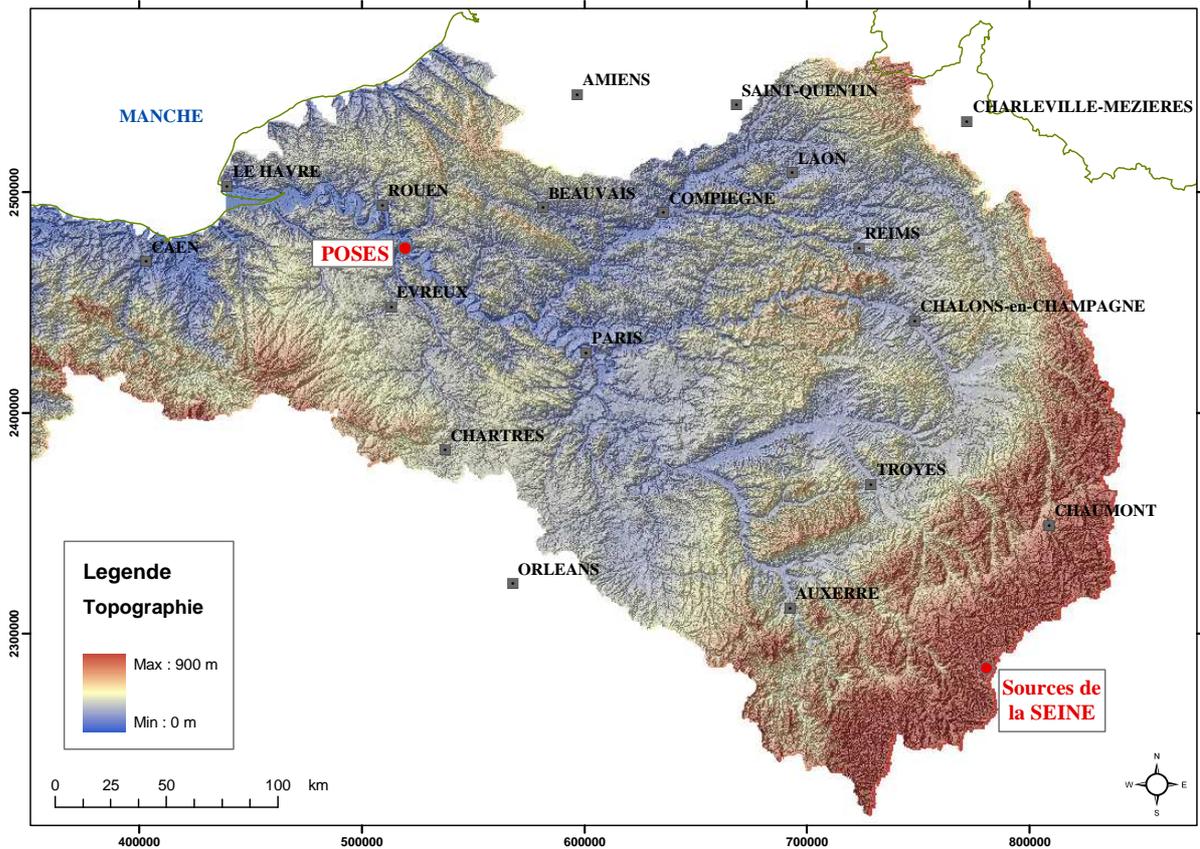


Figure 7 : Modèle numérique de terrain au pas de 100 m

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 95560 km² constituée de 35198 mailles de taille variable (de 1 à 8 kilomètres de coté).

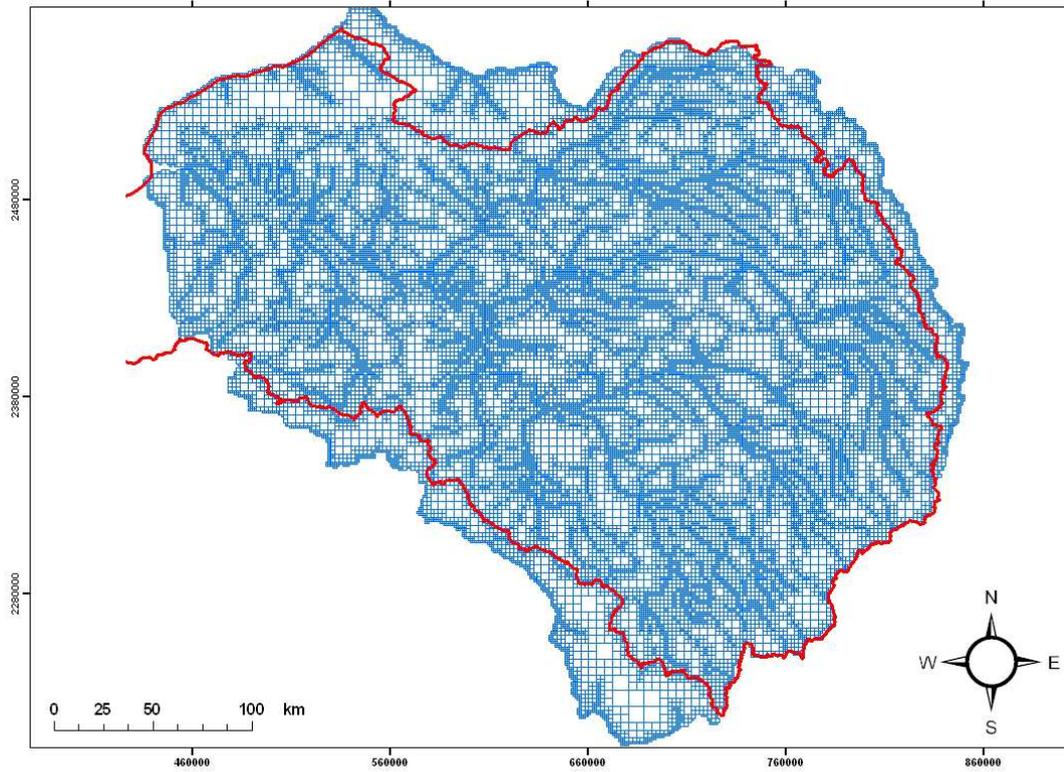


Figure 8 : Maillage de la couche de surface. La discrétisation en petites mailles permet de reproduire le réseau hydrographique principal (de bassin versant supérieur à 250 km²) ainsi que les limites de ces bassins versants

La figure 9 présente les réseaux de mailles définies comme « rivière » dans le modèle.

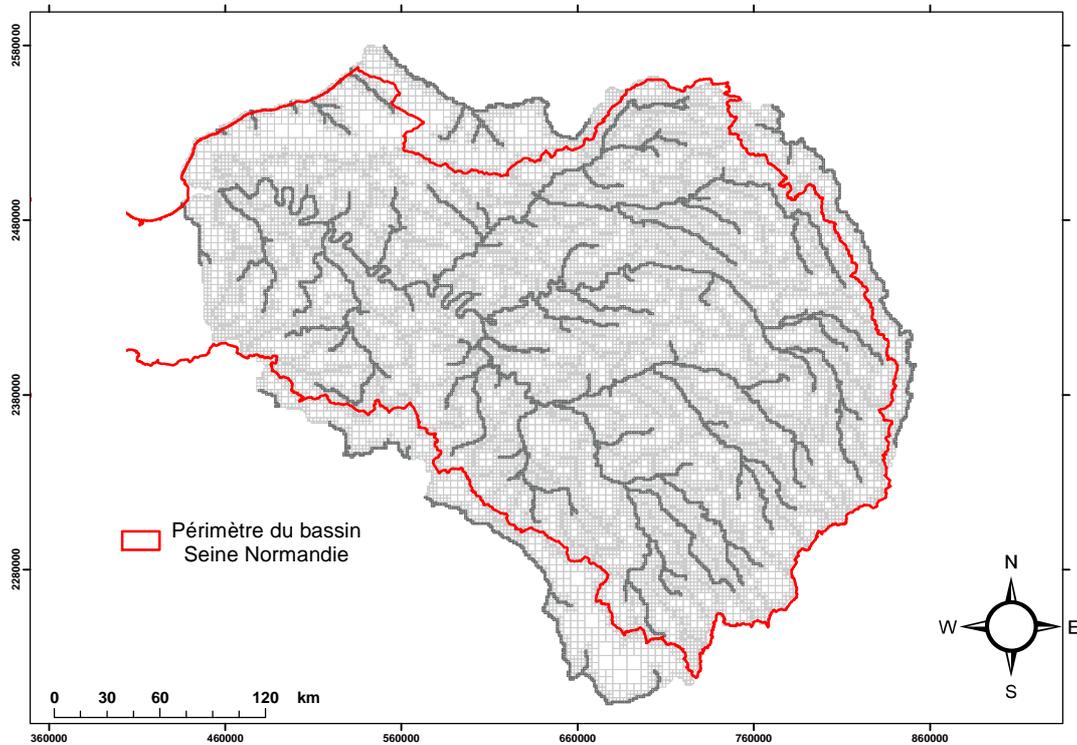


Figure 9 : Réseau de mailles "rivières" de la couche de surface

3.2 DOMAINE SOUTERRAIN

3.2.1 GEOLOGIE GENERALE DU BASSIN

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'étagant du début du Secondaire (Trias) au Tertiaire supérieur (Miocène) et s'appuyant sur des massifs anciens (figure 10). Ce bassin sédimentaire est caractérisé par un empilement de formations à faible pendage convergent vers le centre (géométrie dite "en pile d'assiettes" (figure 11), comprenant d'importantes formations aquifères séparées par des formations semi-perméables.

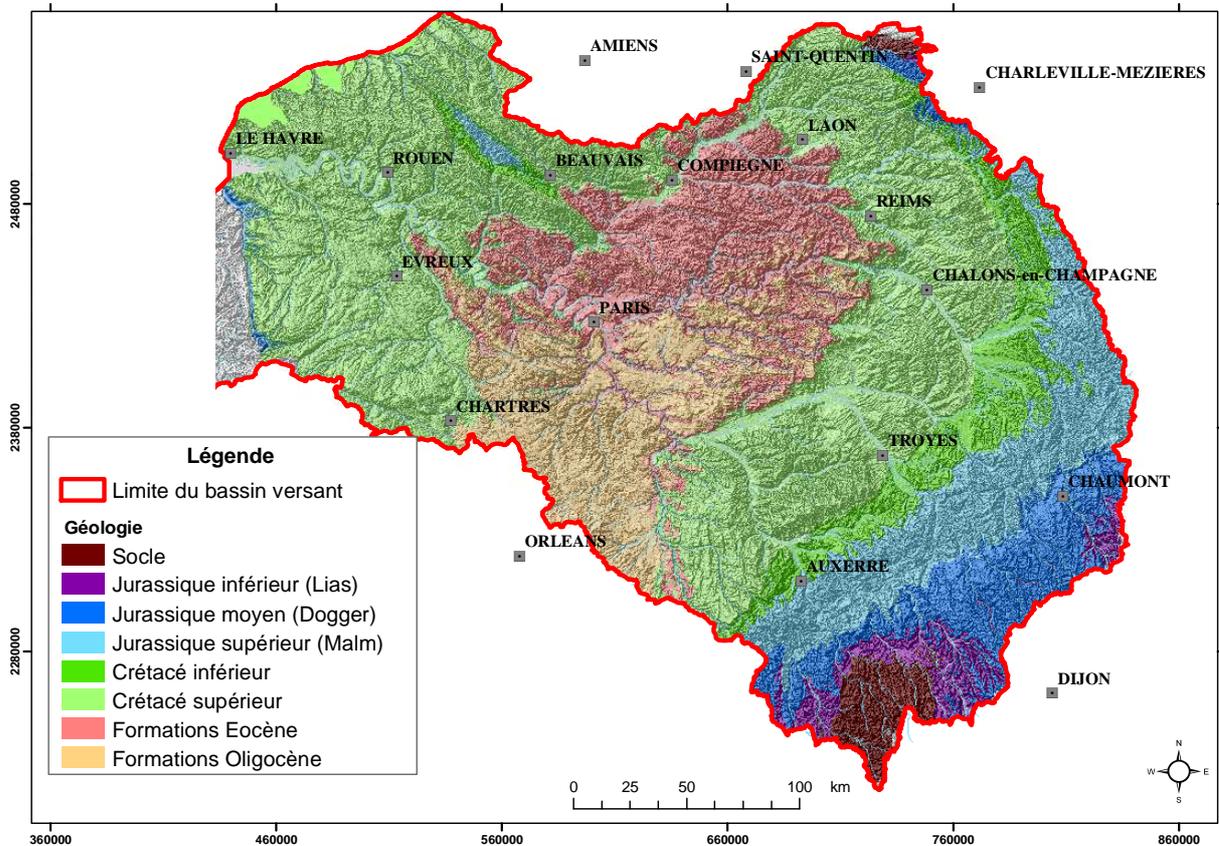


Figure 10 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Seine. Les formations du Jurassique inférieur à la Craie affleurent en auréoles concentriques autour d'une vaste zone de formations tertiaires (Eocène et Oligocène au centre du bassin)

3.2.2 FORMATIONS AQUIFERES PRISES EN COMPTE DANS LE MODELE INITIAL

Les formations aquifères représentées dans la première version du modèle et dénommées « nappes internes », étaient au nombre de trois et étaient respectivement, de la plus superficielle à la plus profonde, l'Oligocène, l'Eocène (au sens large) et la Craie.

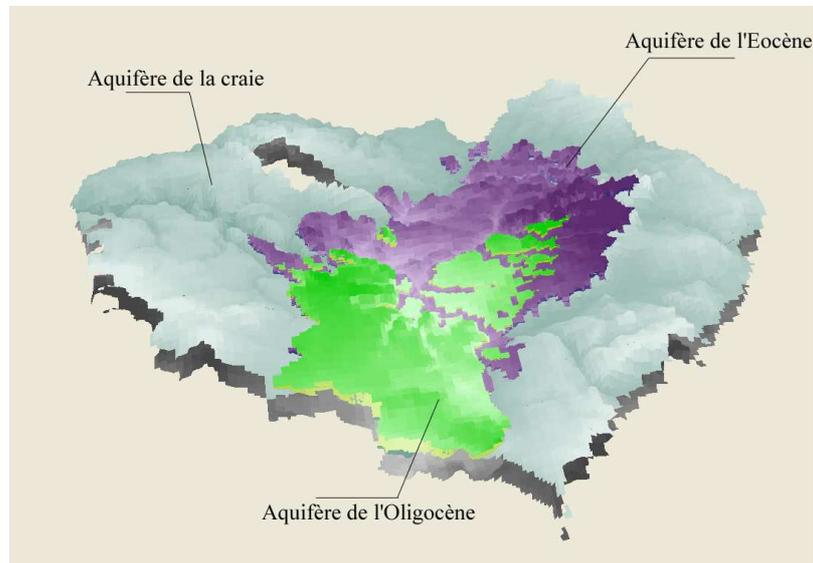


Figure 11 : Vue tridimensionnelle des trois principaux aquifères du bassin

Les formations aquifères, dites « nappes externes », de l'auréole ante Crétacé du bassin (du Lias inférieur à l'Albien), ne sont pas explicitement représentées du fait de surfaces affleurantes de faible extension et d'alimentation par infiltration généralement inférieure à 5%. Sur ces formations, une grande partie des eaux météoriques est donc rapidement acheminée vers le réseau hydrologique de surface par l'intermédiaire du ruissellement direct ou par drainage des premiers décimètres de sol. Les figures 14 à 15 présentent respectivement les maillages et épaisseurs des formations aquifères retenues.

Le modèle initial « Seine » ne comportant que trois aquifères principaux et notamment des formations tertiaires regroupées en « Oligocène » et « Eocène » a montré ses limites à reproduire de manière convenable les débits des « petits » cours d'eau du bassin et plus précisément sur les rivières coulant sur ces formations tertiaires ainsi que ses difficultés à reproduire localement les taux de pollution en nitrates des différents aquifères (du fait du rôle de « mélange » imposé par une représentation simplifiée des formations aquifères multicouches). De plus, la non prise en compte de manière explicite des prélèvements anthropiques dans ce modèle limite également ses applications en terme d'étude d'impact localisée. Il a donc été décidé de remodeler l'outil en discrétisant finement des formations tertiaires et en prenant en compte l'ensemble des prélèvements anthropiques dans le calage général du modèle.

Il faut également noter qu'il a été décidé de ne pas modifier la couche de surface du modèle initial et que la discrétisation minimale à 1km et des limites de bassin versant minimal à 250 km² seraient maintenues.

3.3 NOUVELLE CONCEPTUALISATION DES AQUIFERES SIMULES

3.3.1 FORMATIONS TERTIAIRES DU BASSIN DE LA SEINE

3.3.1.1 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. Corneilles, Sannois, Pierrefitte. Au Nord-Ouest de Versailles et sur les buttes-mères 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'Île-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 (figure 12) et une seconde représentant les Sables de Fontainebleau en continuité hydraulique avec les Calcaires de Brie (figure 13).

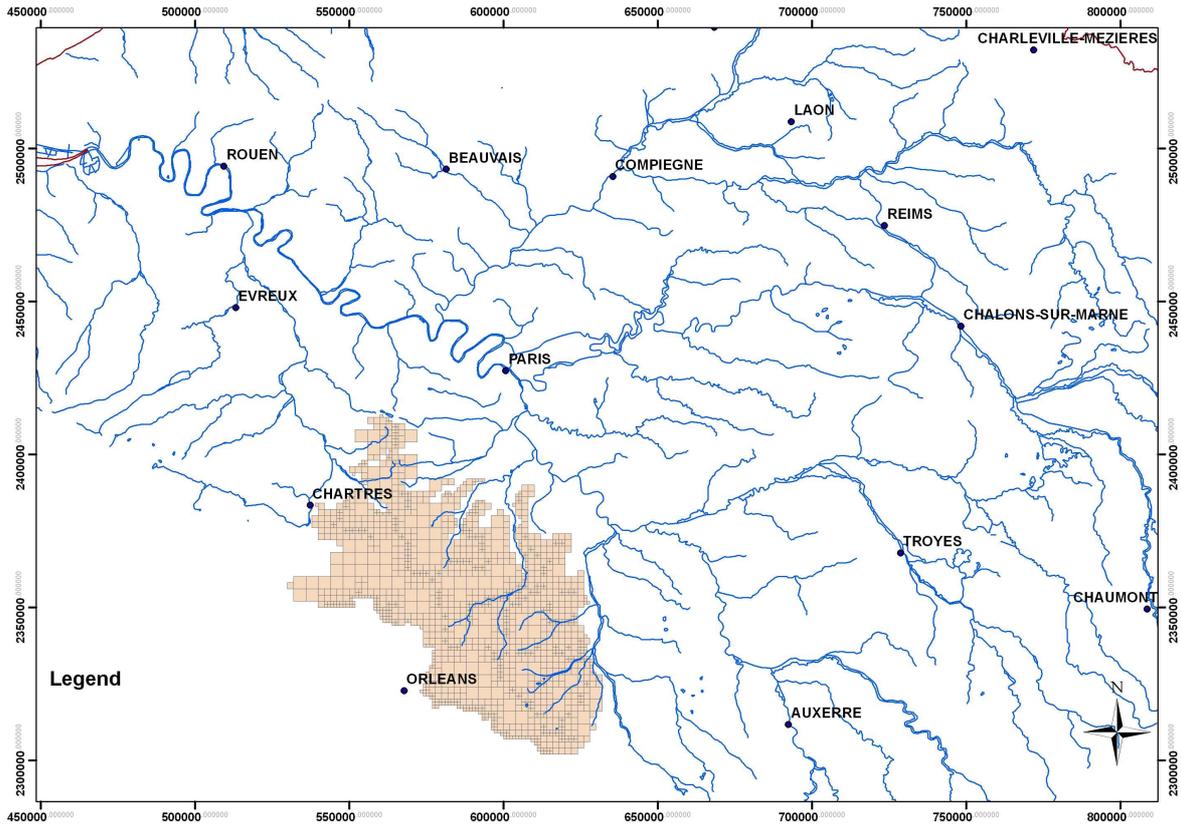


Figure 12 : extension de la couche aquifère représentant les Calcaires de Beauce

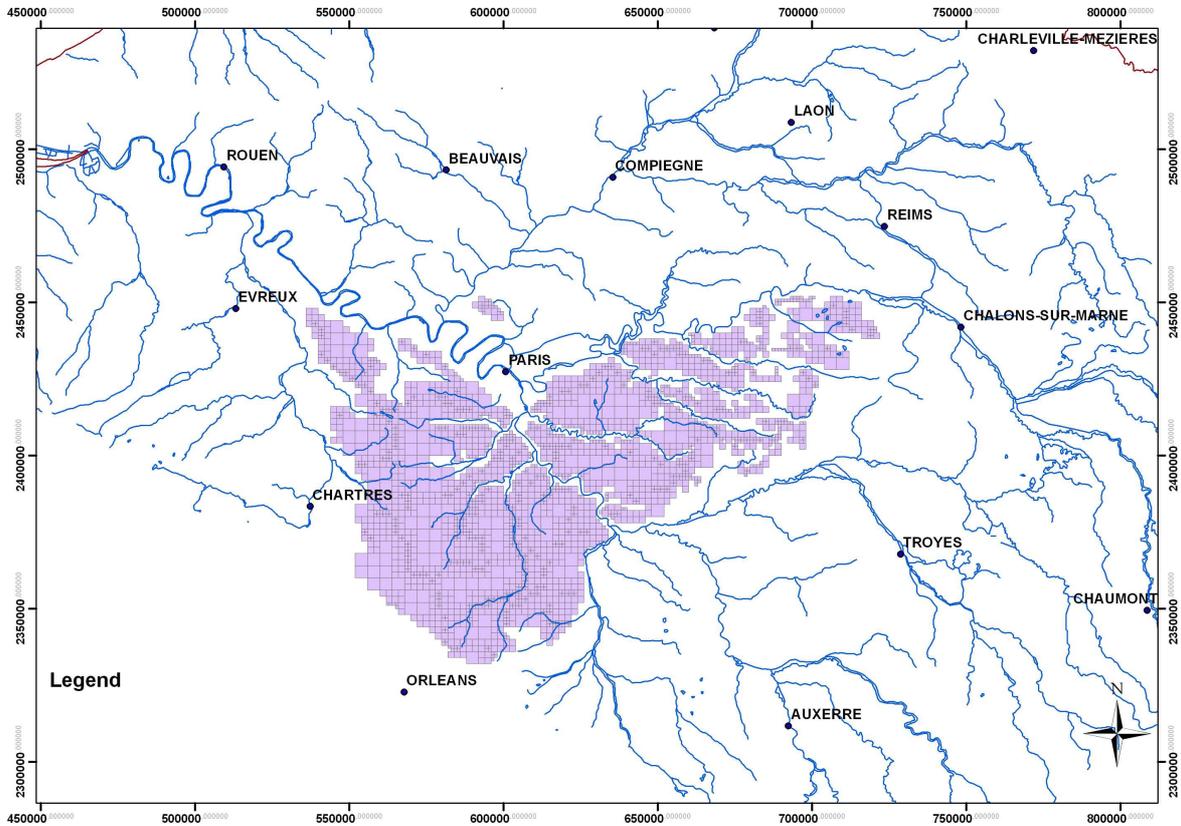


Figure 13 : extension de la couche aquifère représentant les Sables de Fontainebleau et les Calcaires de Brie

3.3.1.2 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 terme de ressource en eau 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. La figure 14 précise l'extension retenue de la formation du Champigny au sens large dans le modèle.

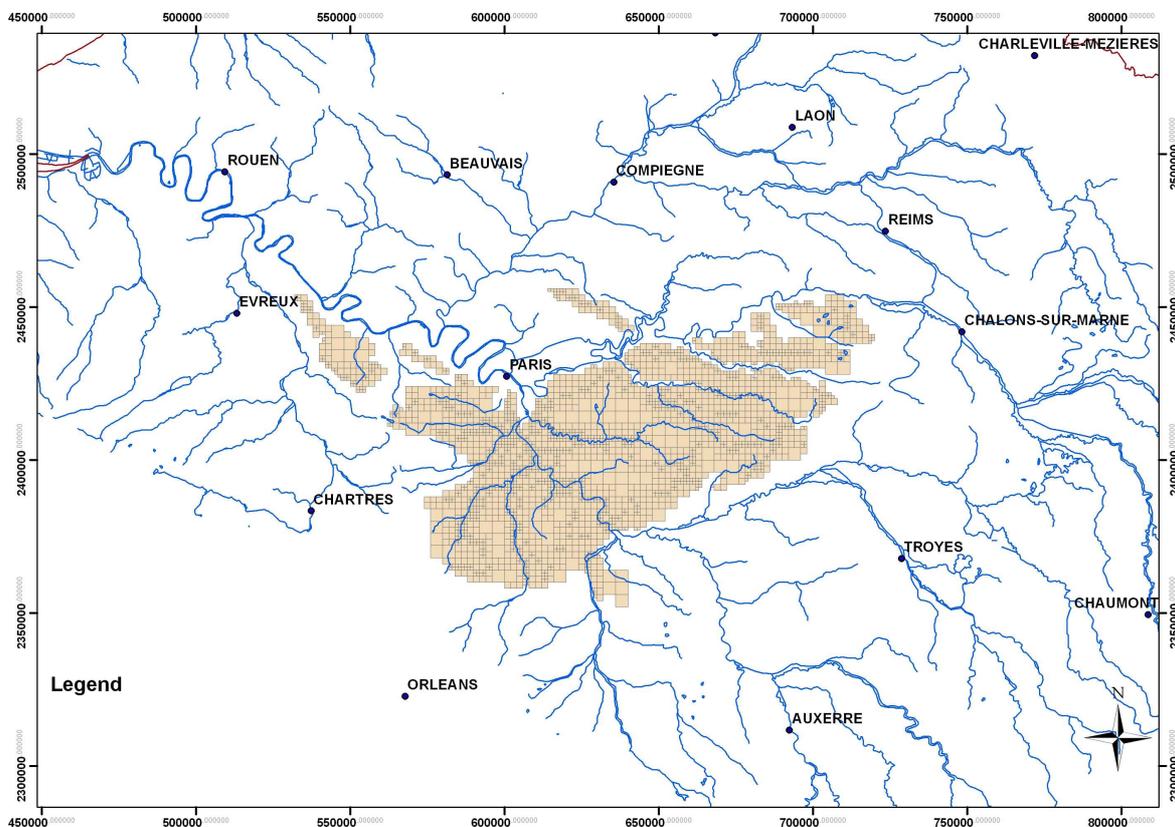


Figure 14 : extension de la formation du Champigny

3.3.1.3 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'ocène 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'Éocène moyen et inférieur sera modélisée sous la forme d'une couche représentant l'Yprésien et le Lutétien (figure 15) et d'une autre représentant le Thanétien (figure 16).

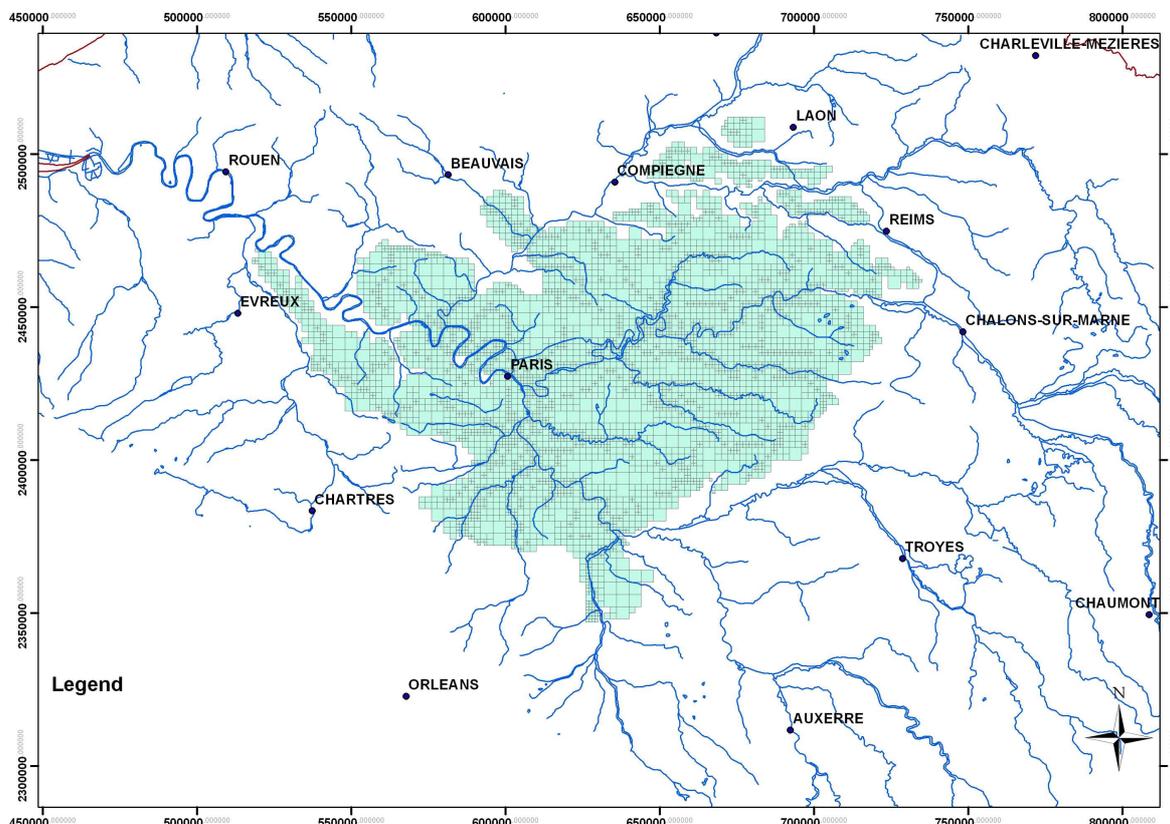


Figure 15 : extension de la formation aquifère du Lutétien/Yprésien

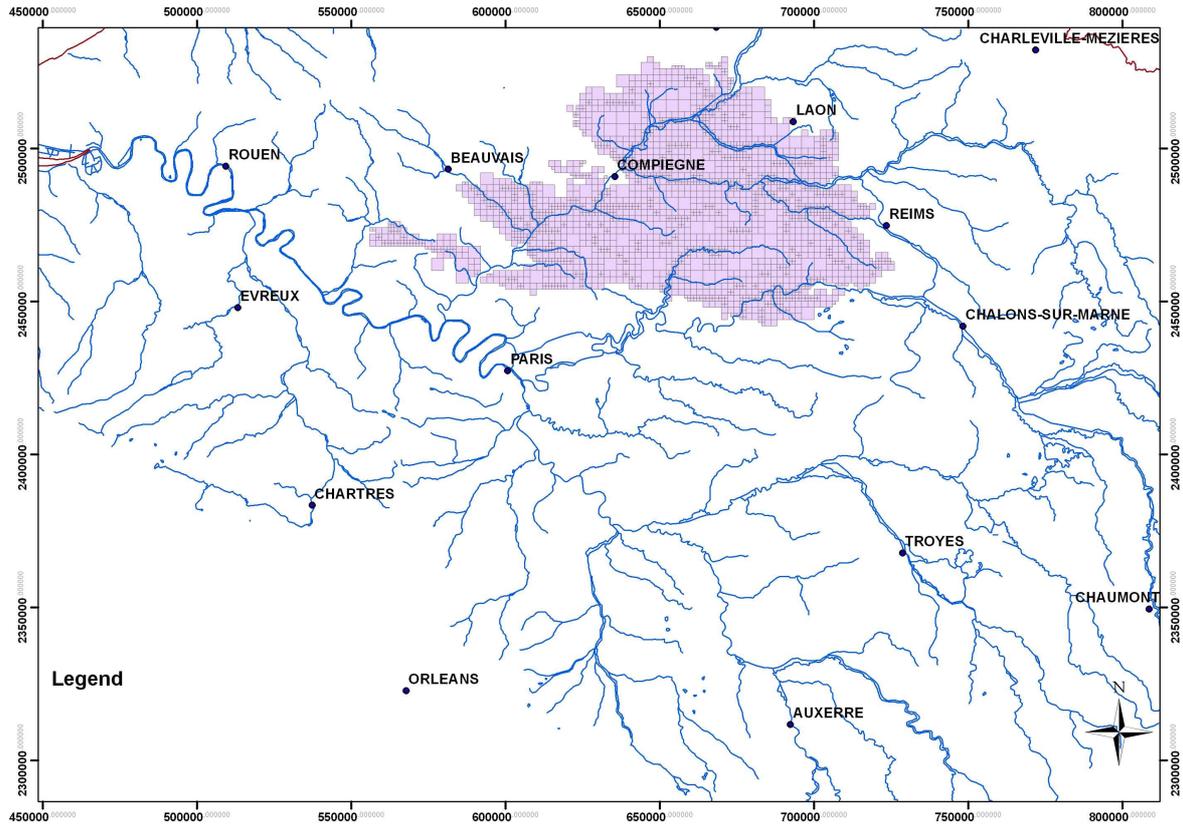


Figure 16 : extension de la formation aquifère du Thanétien

L'extension géographique et l'empilement de l'ensemble des couches du modèle sont précisés sur la figure 17.

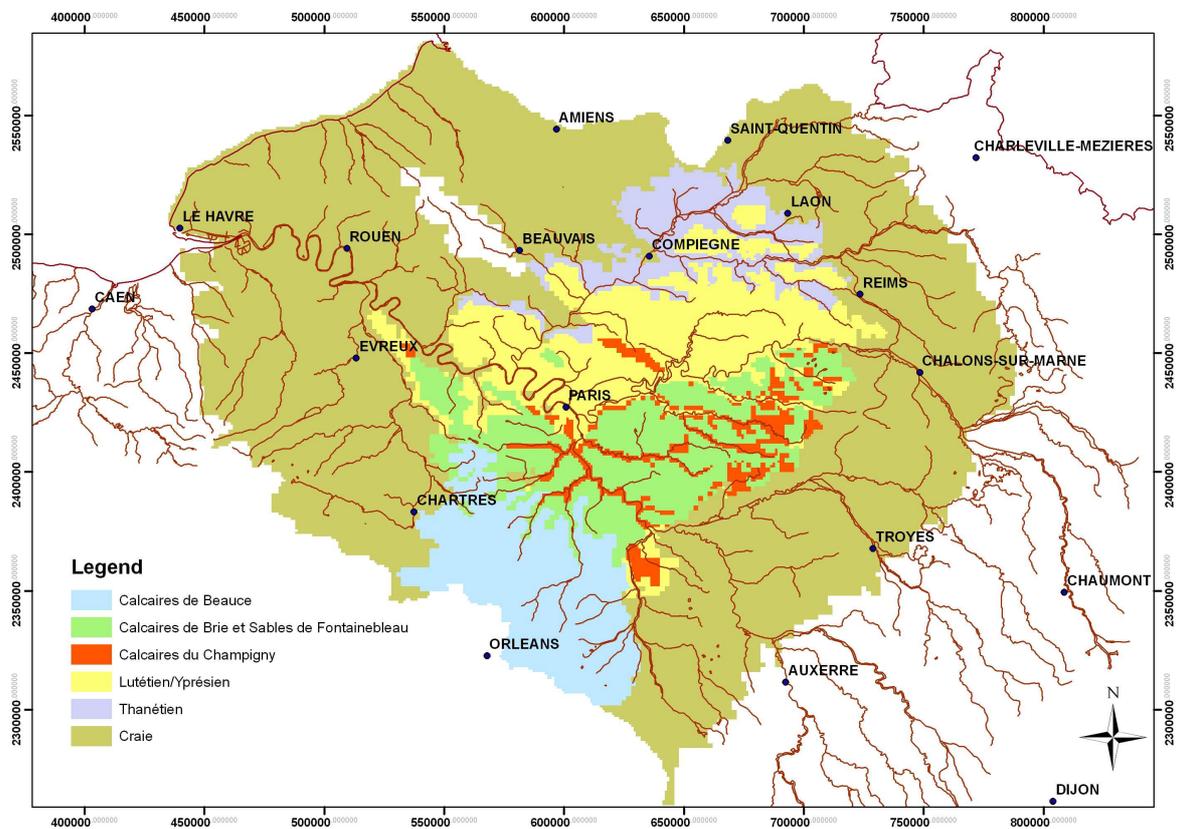


Figure 17: superposition de l'ensemble des formations aquifères représentées dans le modèle

3.3.2 CARTES STRUCTURALES DES FORMATIONS TERTIAIRES

L'acquisition par la DIREN 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.

L'ensemble de ces cartes structurales est présenté en annexe 1.

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.

Les figures 18 à 23 précisent les épaisseurs retenues pour l'ensemble des couches aquifères modélisées.

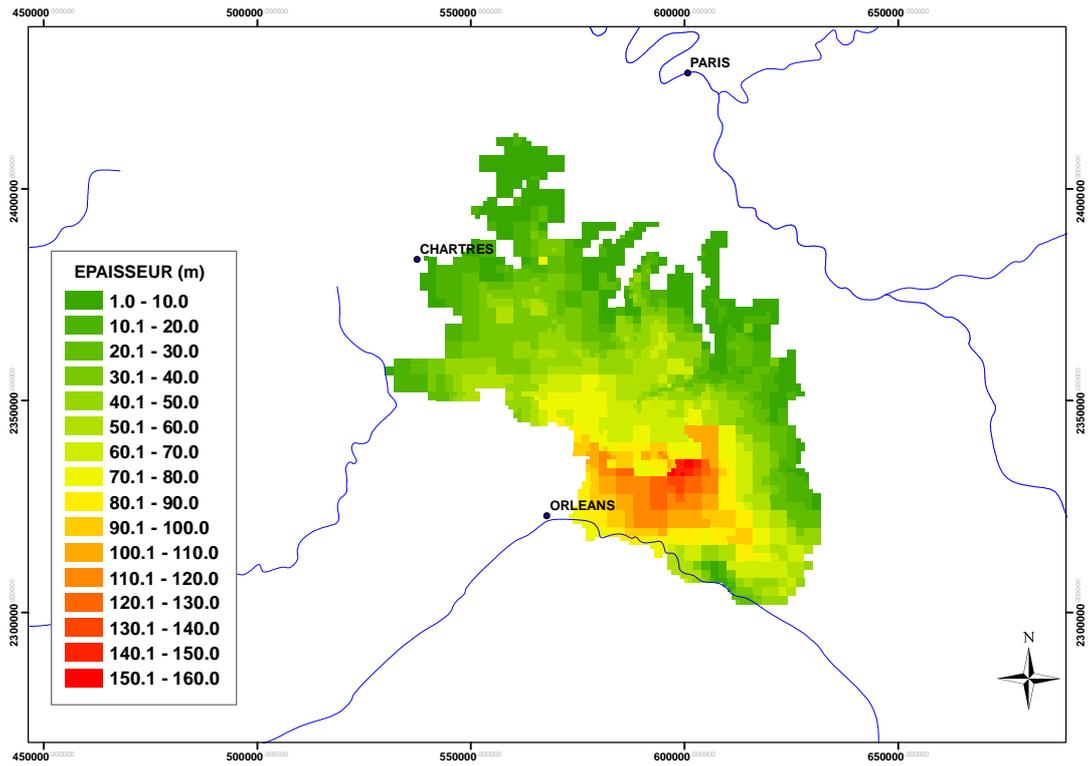


Figure 18 : épaisseur de la couche "modèle" des Calcaires de Beauce

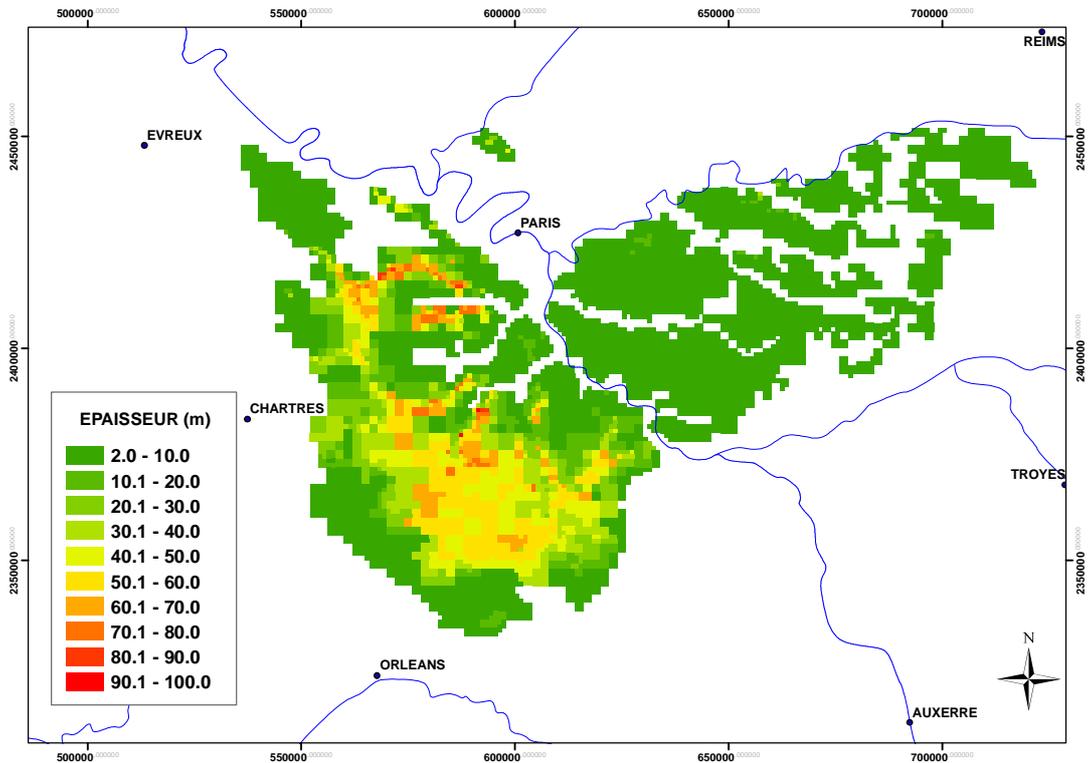


Figure 19 : épaisseur de la couche "modèle" des Sables de Fontainebleau et des Calcaires de Brie

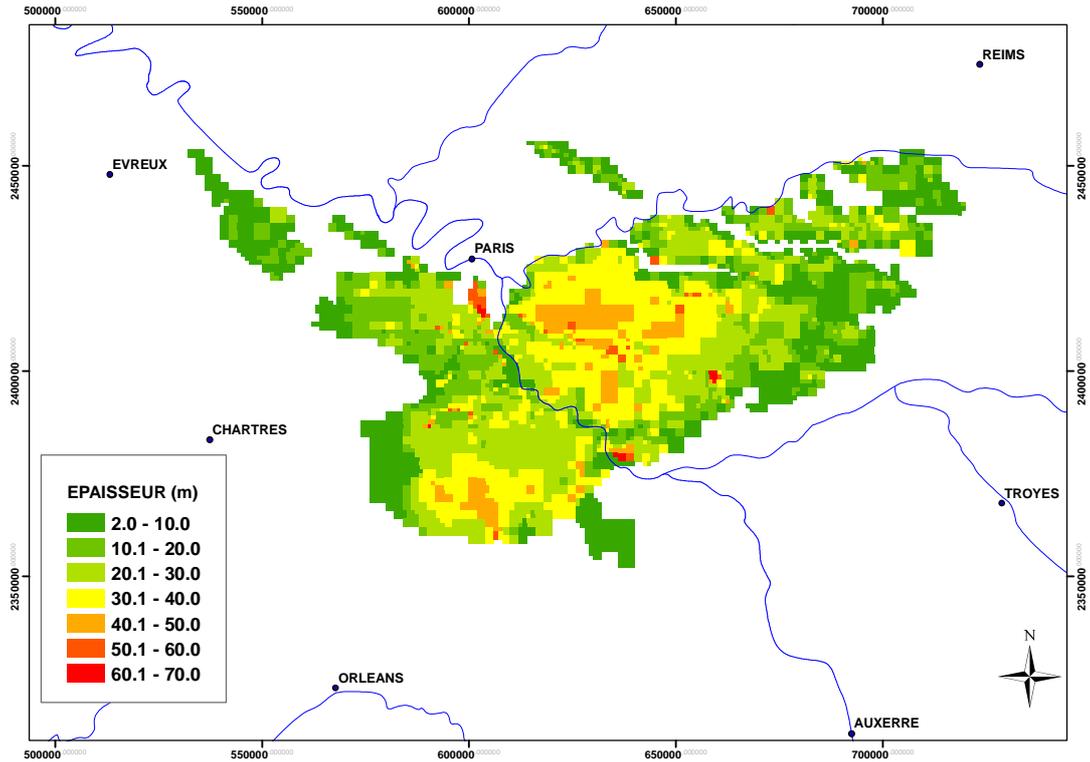


Figure 20 : épaisseur de la couche "modèle" des Calcaires de Champigny

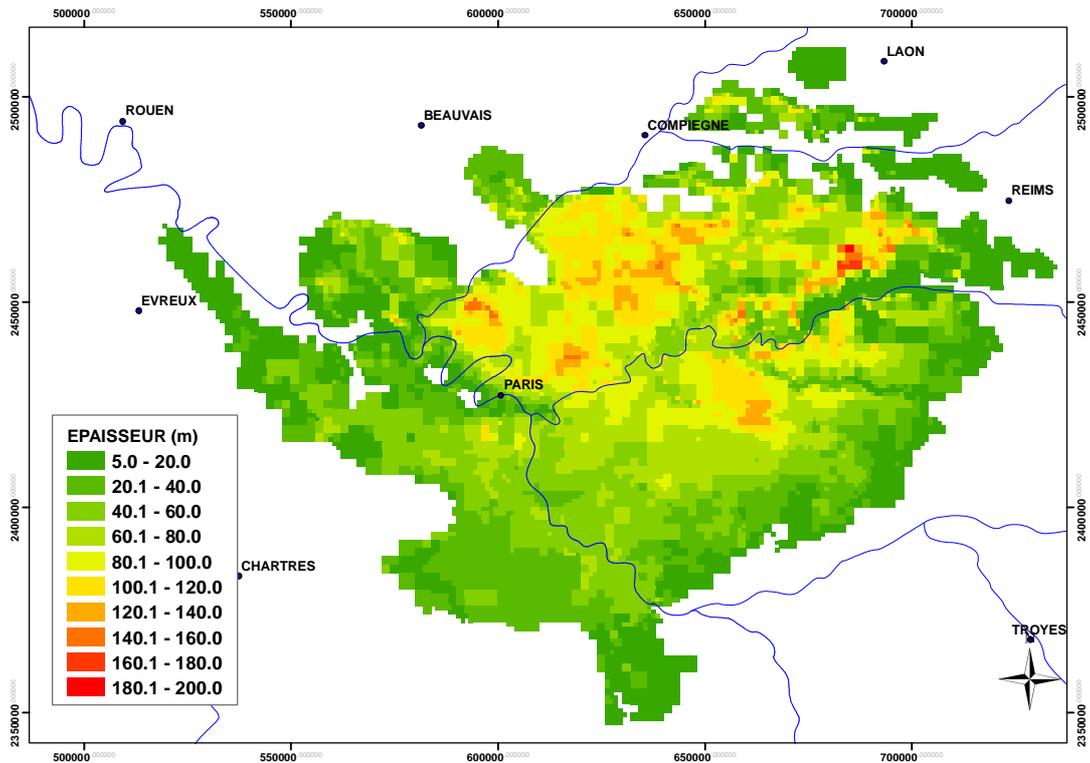


Figure 21 : épaisseur de la couche "modèle" du Lutétien/Yprésien

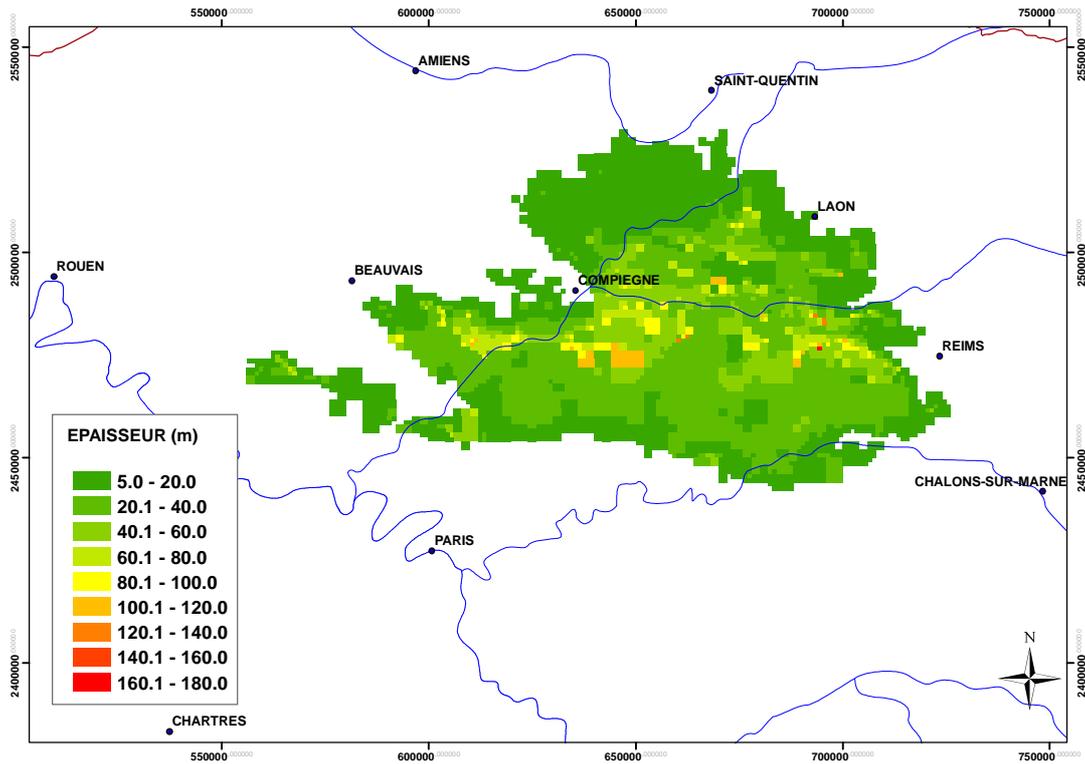


Figure 22 : épaisseur de la couche "modèle" du Thanétien

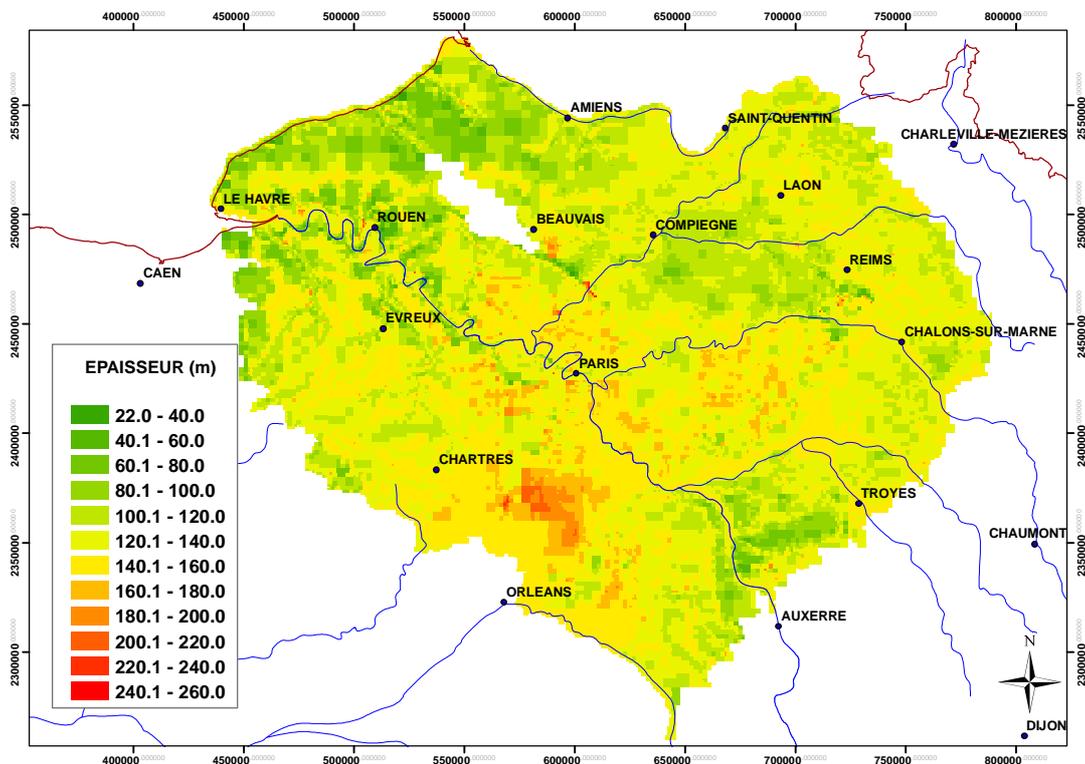


Figure 23 : épaisseur de la couche "modèle" de la Craie

3.4 PARAMETRES D'ENTREE DU MODELE

3.4.1 PLUVIOMETRIE - EVAPOTRANSPIRATION

La pluviométrie sur le bassin de la Seine est bien répartie au cours de l'année (figure 24).

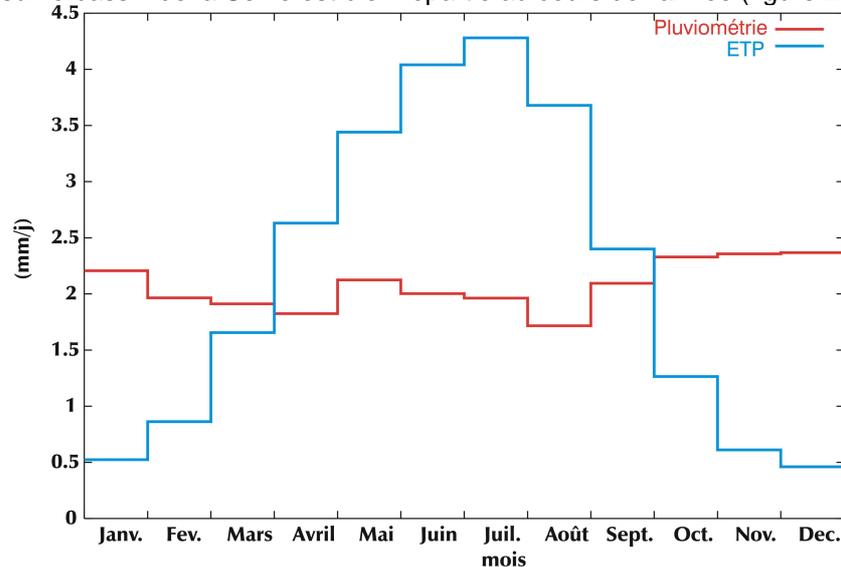


Figure 24 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle* (ETP) journalière moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine

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 la précipitation.

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.

Les données météorologiques (pluviométrie, évapotranspiration potentielle) utilisées par le modèle sont issues de Météo-France et proviennent de la procédure SAFRAN 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.

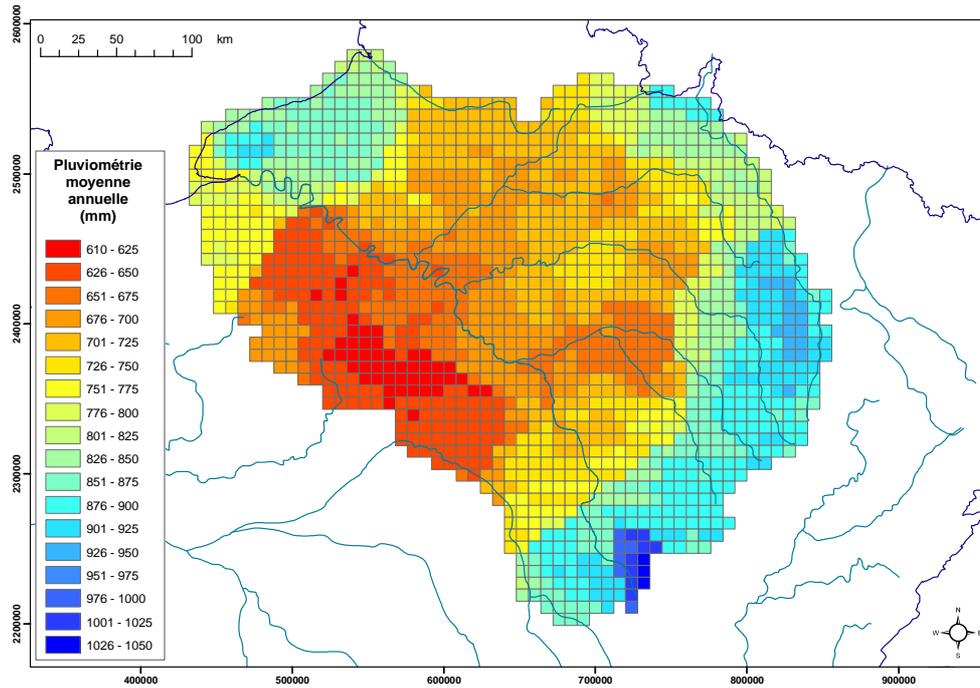


Figure 25 : Pluviométrie moyenne observée sur le bassin de la Seine (1970-2004) : données SAFRAN Météo-France

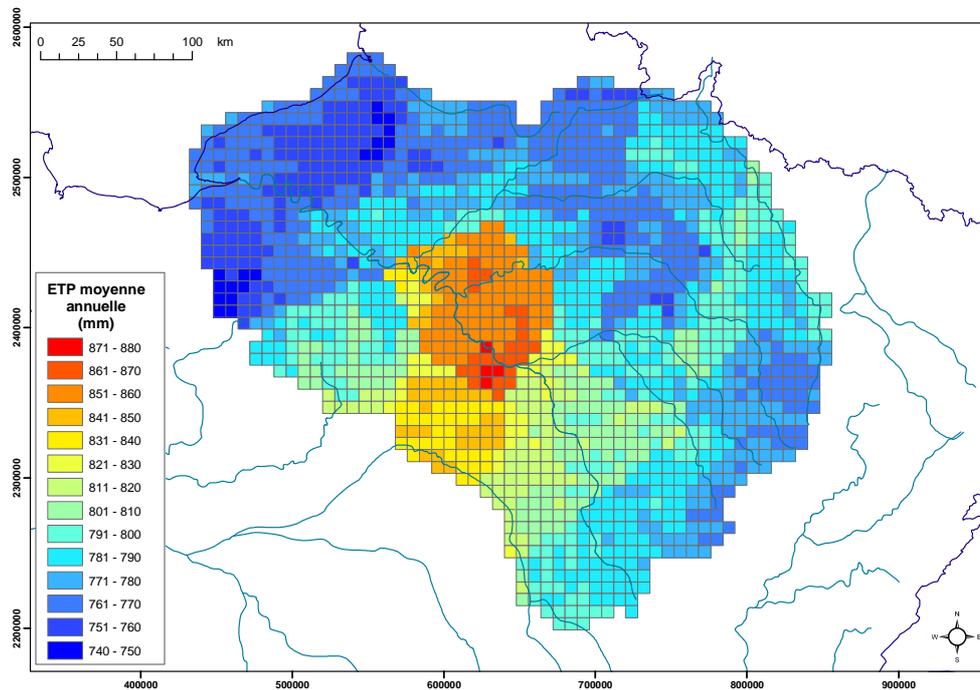


Figure 26 : Evapotranspiration potentielle moyenne (années 1970-2004) : données SAFRAN Météo France

3.4.2 PARAMETRES DES FONCTIONS DE PRODUCTION DU MODULE DE SURFACE

Les paramètres des différentes fonctions de production (présentés figures 3) 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.

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. A titre d'exemple, la figure 27 présente la répartition spatiale des proportions de surfaces agricoles utiles (somme des 6 fonctions présentées ci-dessus en l'absence de forêt) sur le maillage de surface du modèle et la figure 28 la répartition des fonctions de production « zones urbaines ».

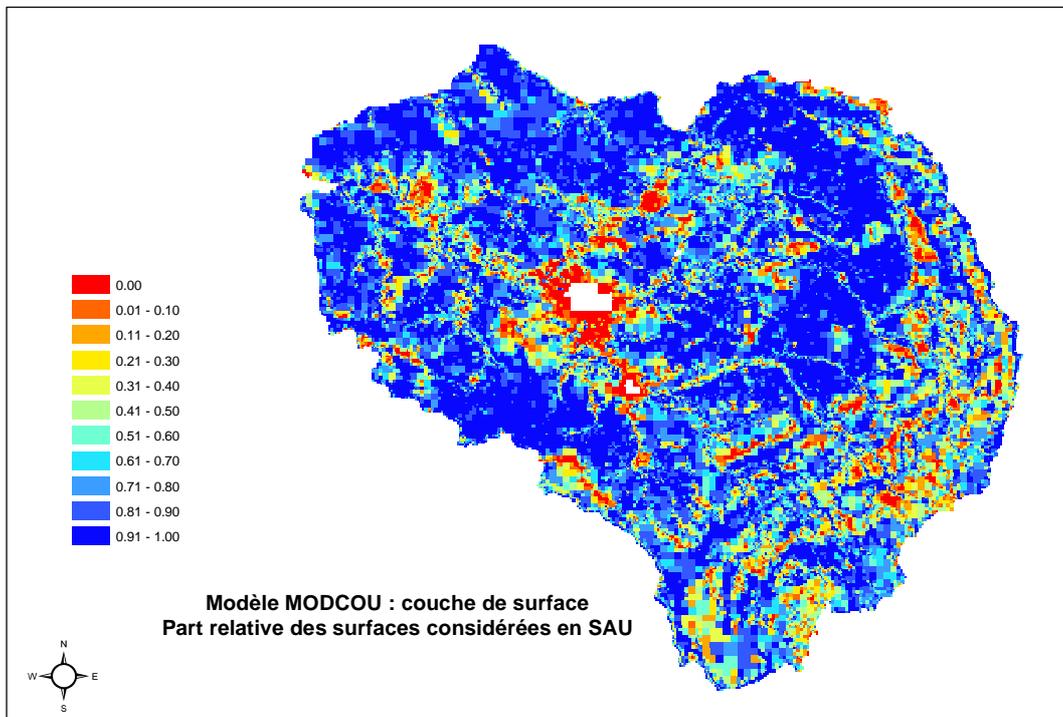


Figure 27 : Répartition spatiale des surface agricoles utiles sur le maillage de surface

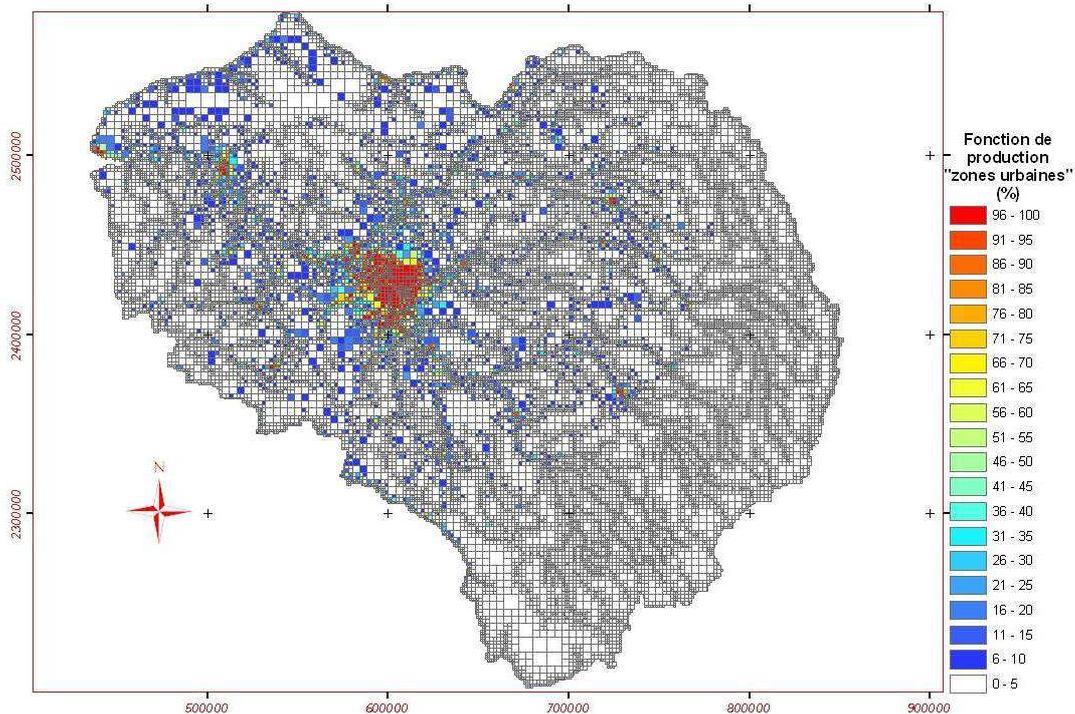


Figure 28 : Répartition géographique des fonctions de production de type "zones urbaines"

3.4.3 PARAMETRES 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.

Les figures 29 à 34 présentent les transmissivités de chaque formation aquifère retenue et les figures 35 à 40 les coefficients d'emmagasinement obtenus après calage du modèle.

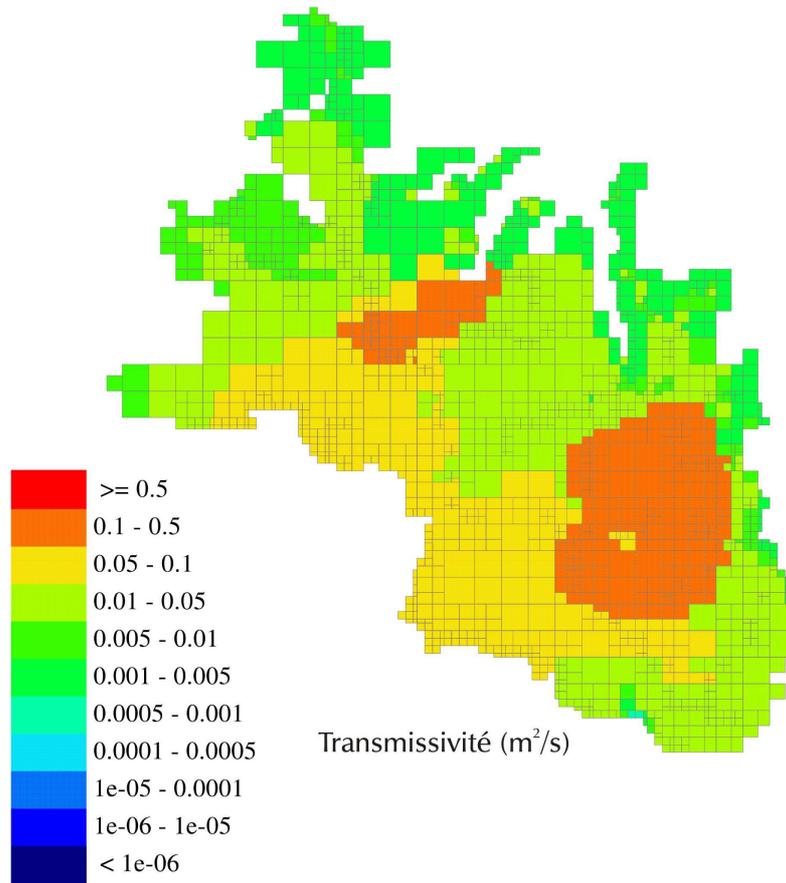


Figure 29 : transmissivité calée de la formation des Calcaires de Beauce

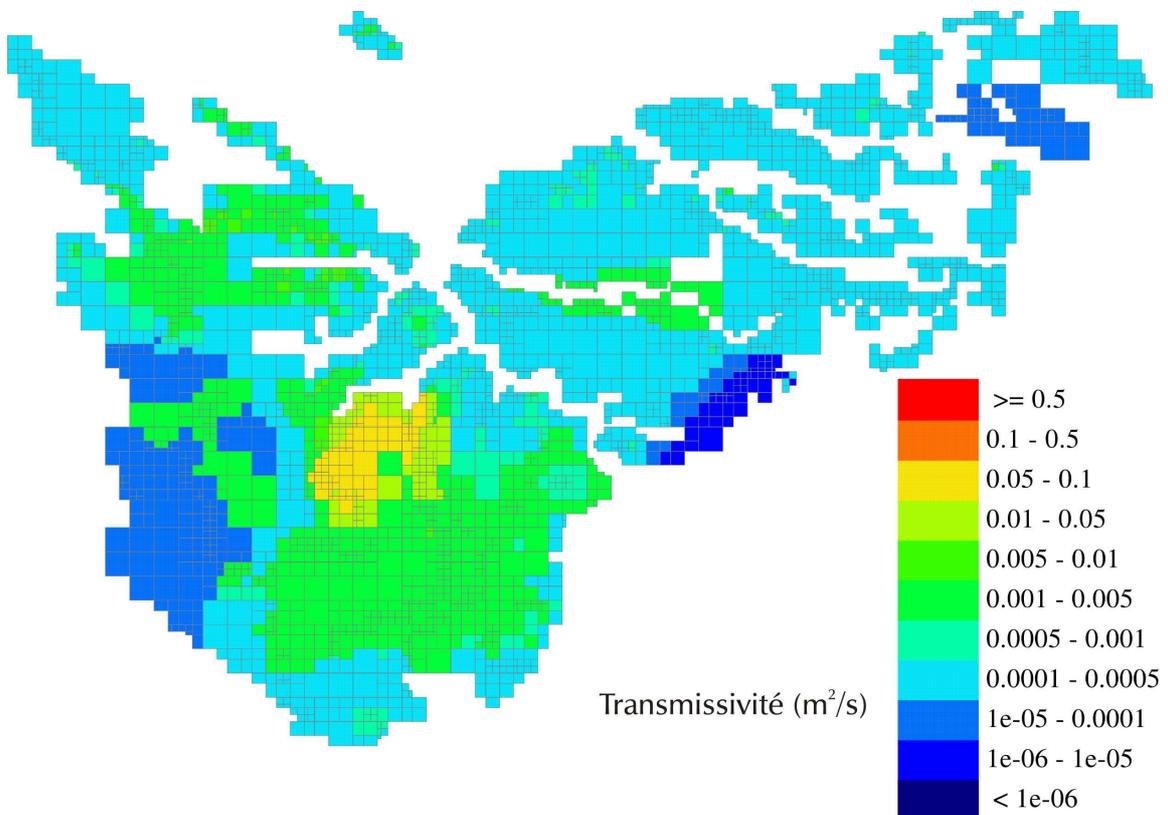


Figure 30 : transmissivité calée de la formation des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau

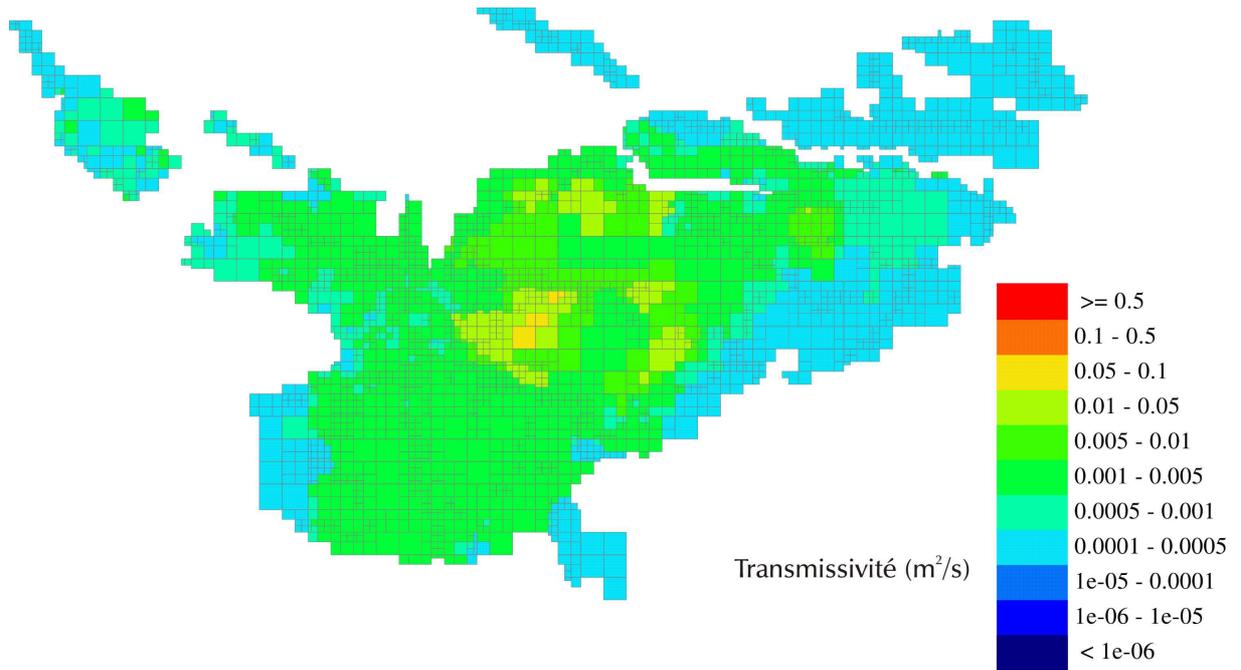


Figure 31 : transmissivité calée de la formation des Calcaires de Champigny

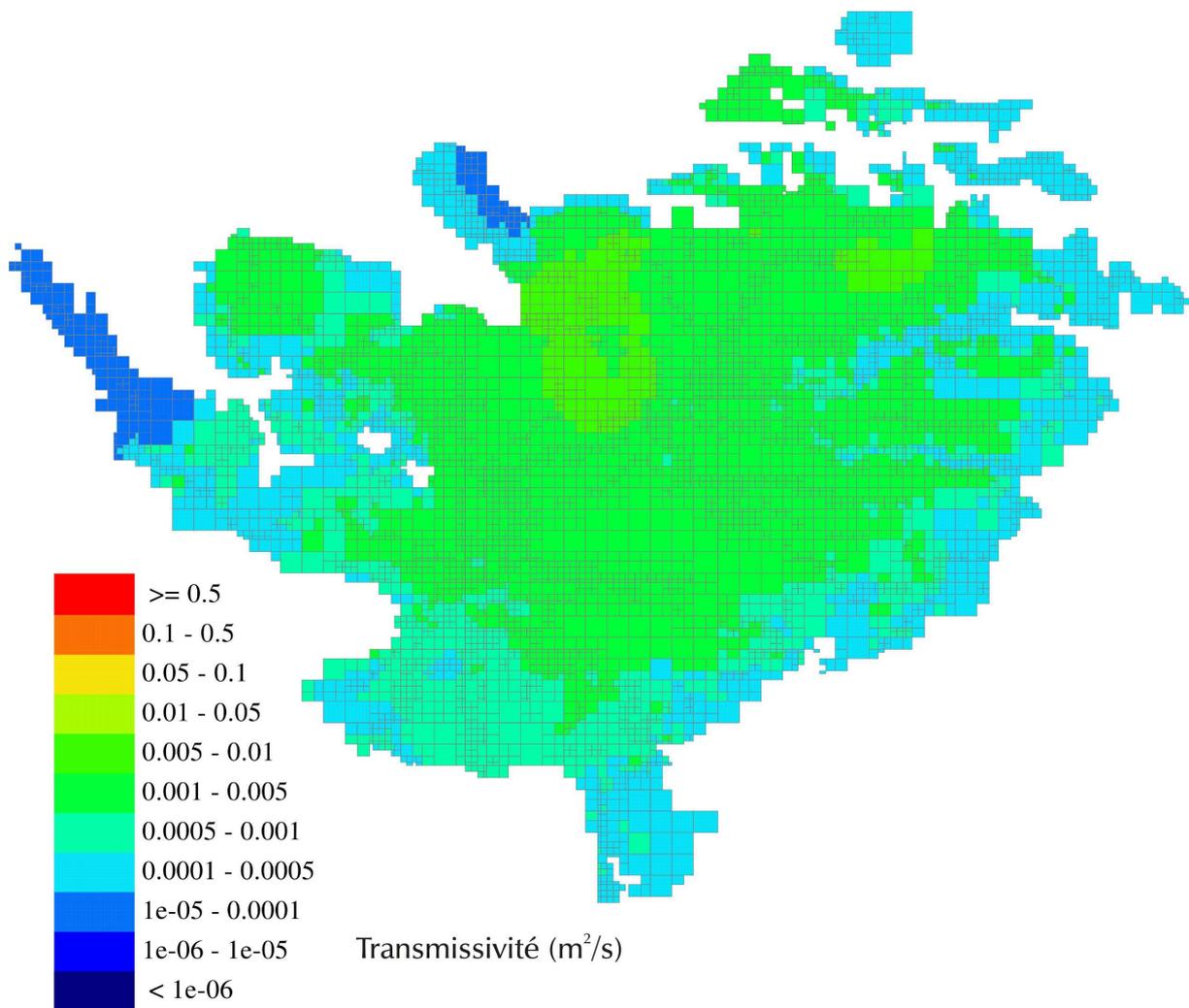


Figure 32 : transmissivité calée de la formation du Lutétien/Yprésien

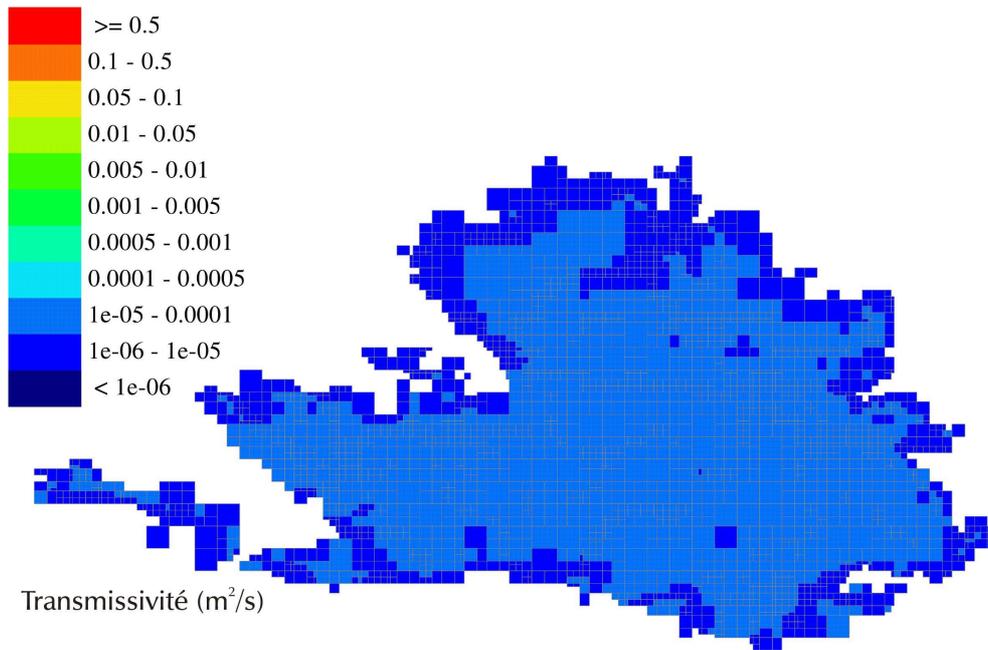


Figure 33 : transmissivité calée de la formation du Thanétien

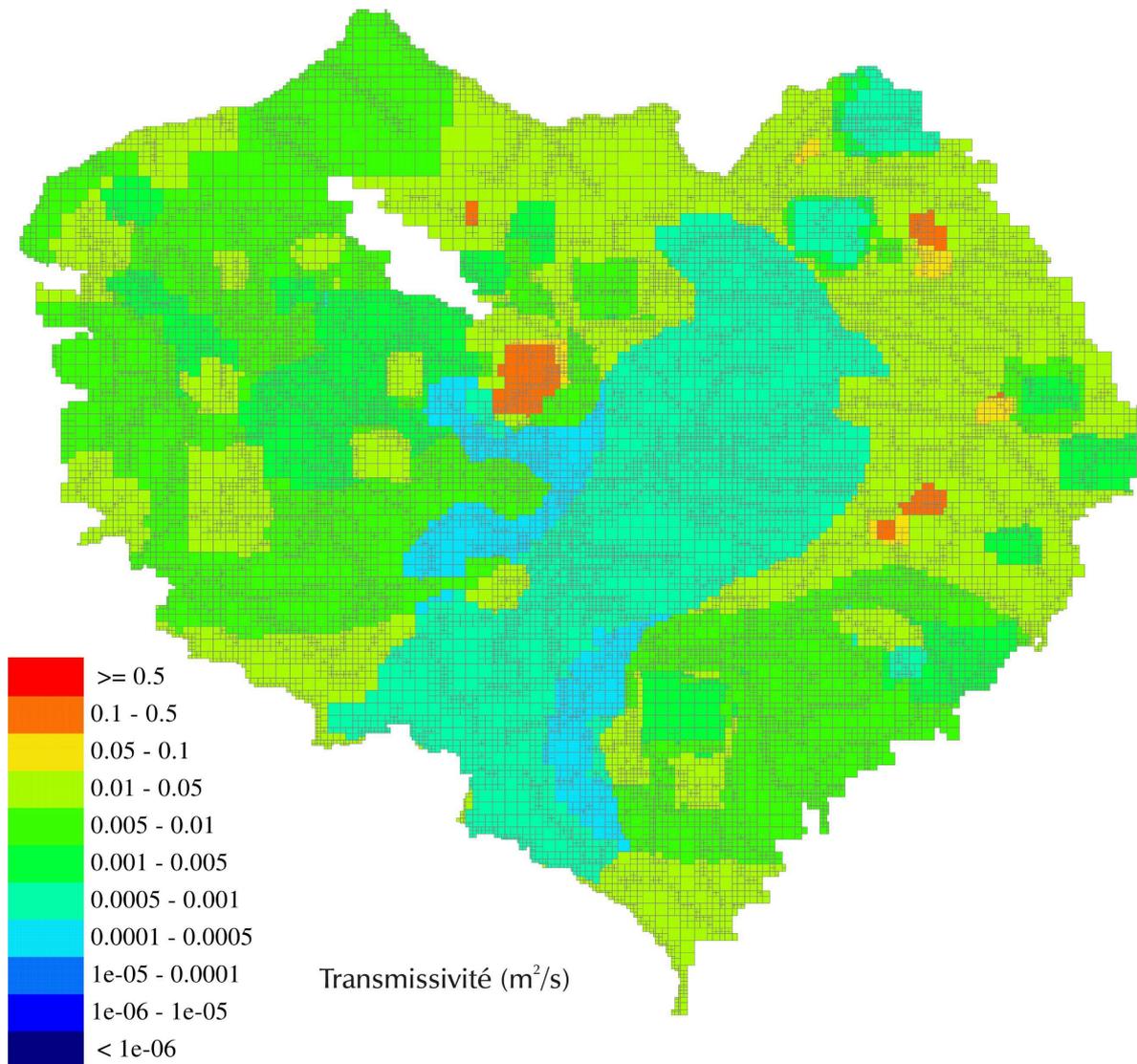


Figure 34 : transmissivité calée de la formation de la Craie

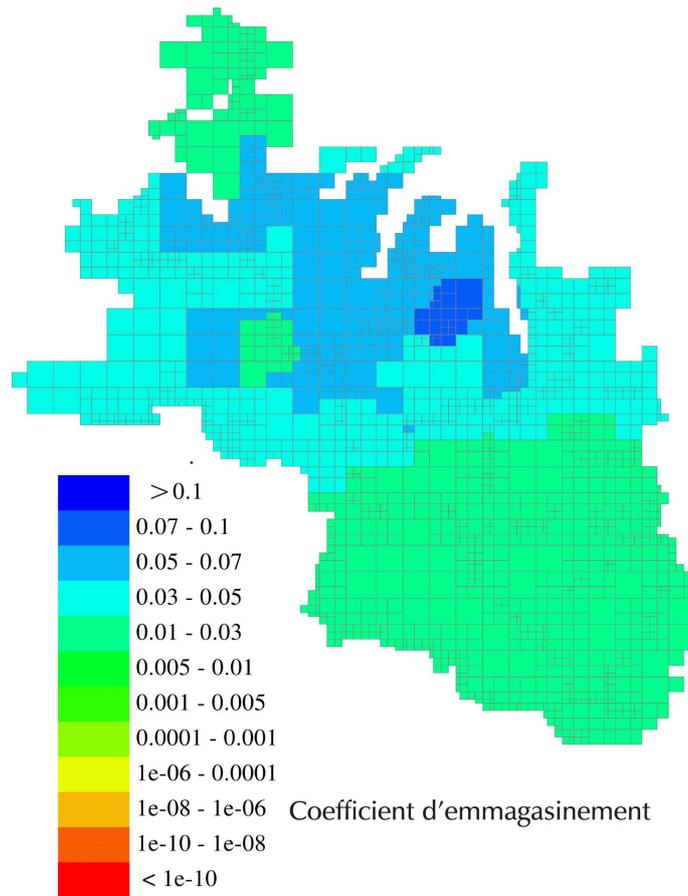


Figure 35 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation des Calcaires de Beauce

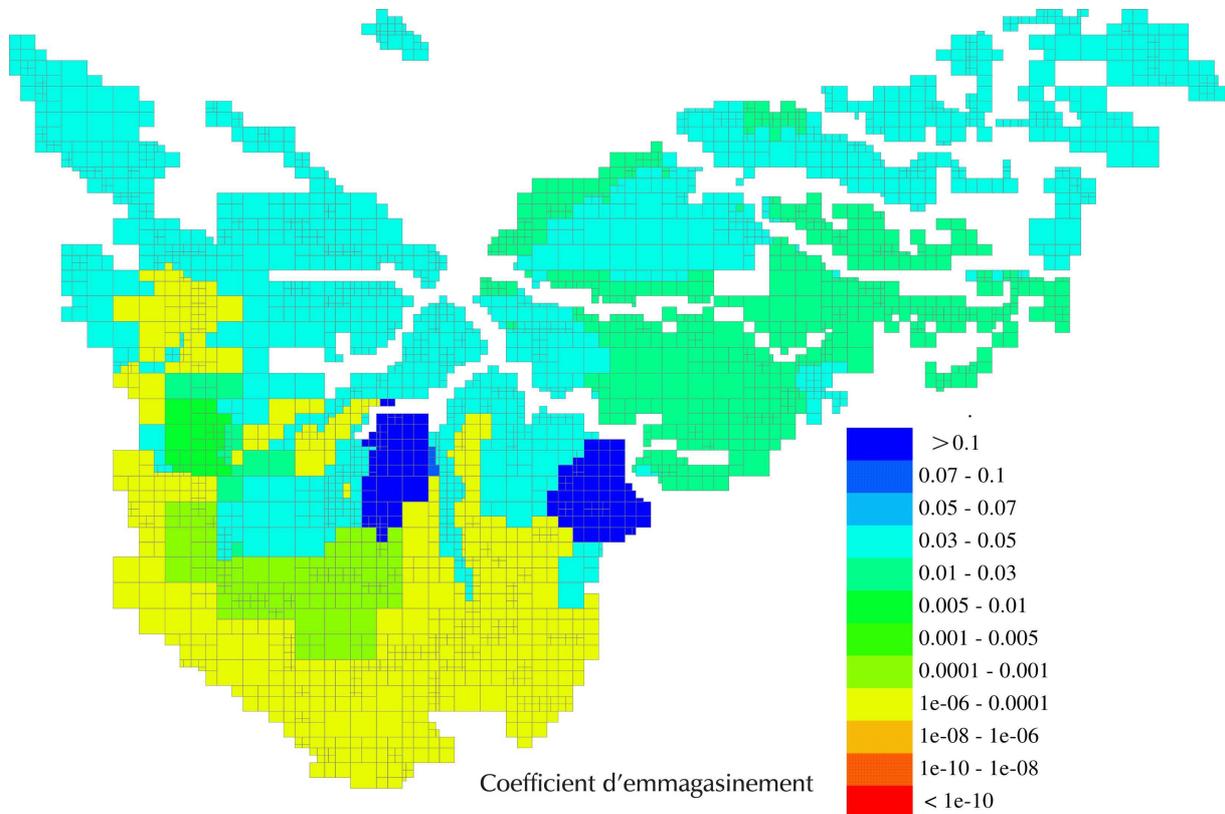


Figure 36 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau

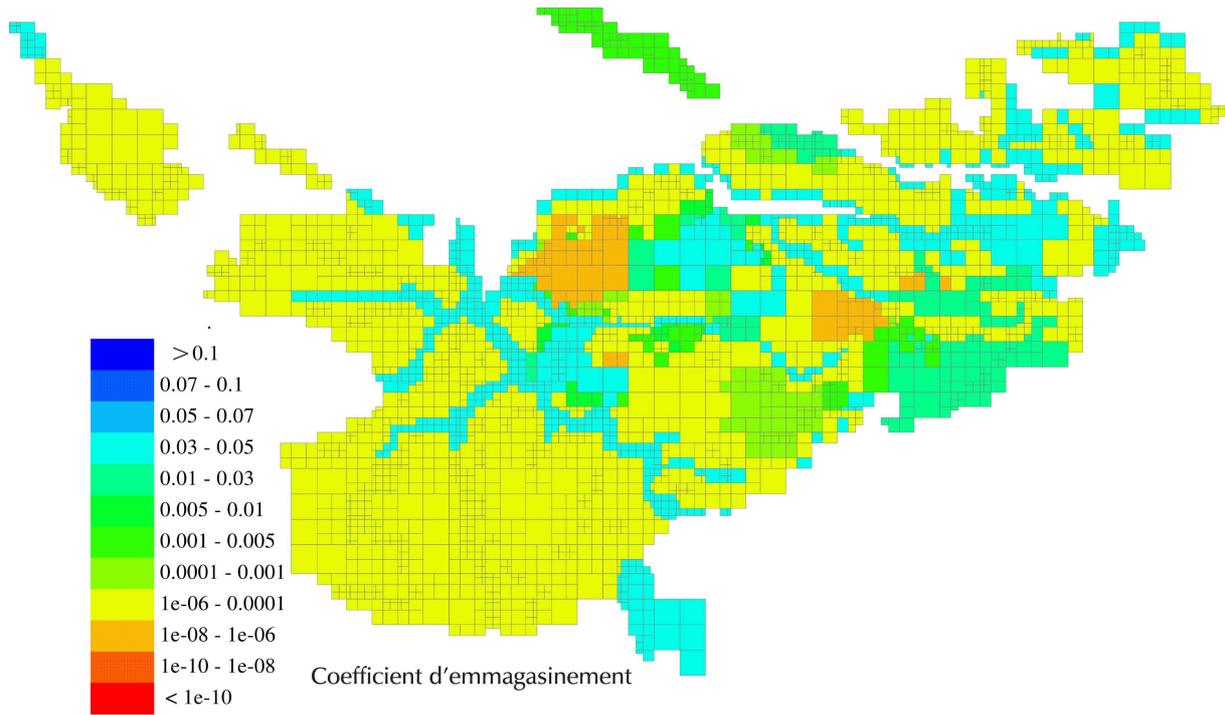


Figure 37: coefficient d'emménagement calé de la formation des Calcaires de Champigny

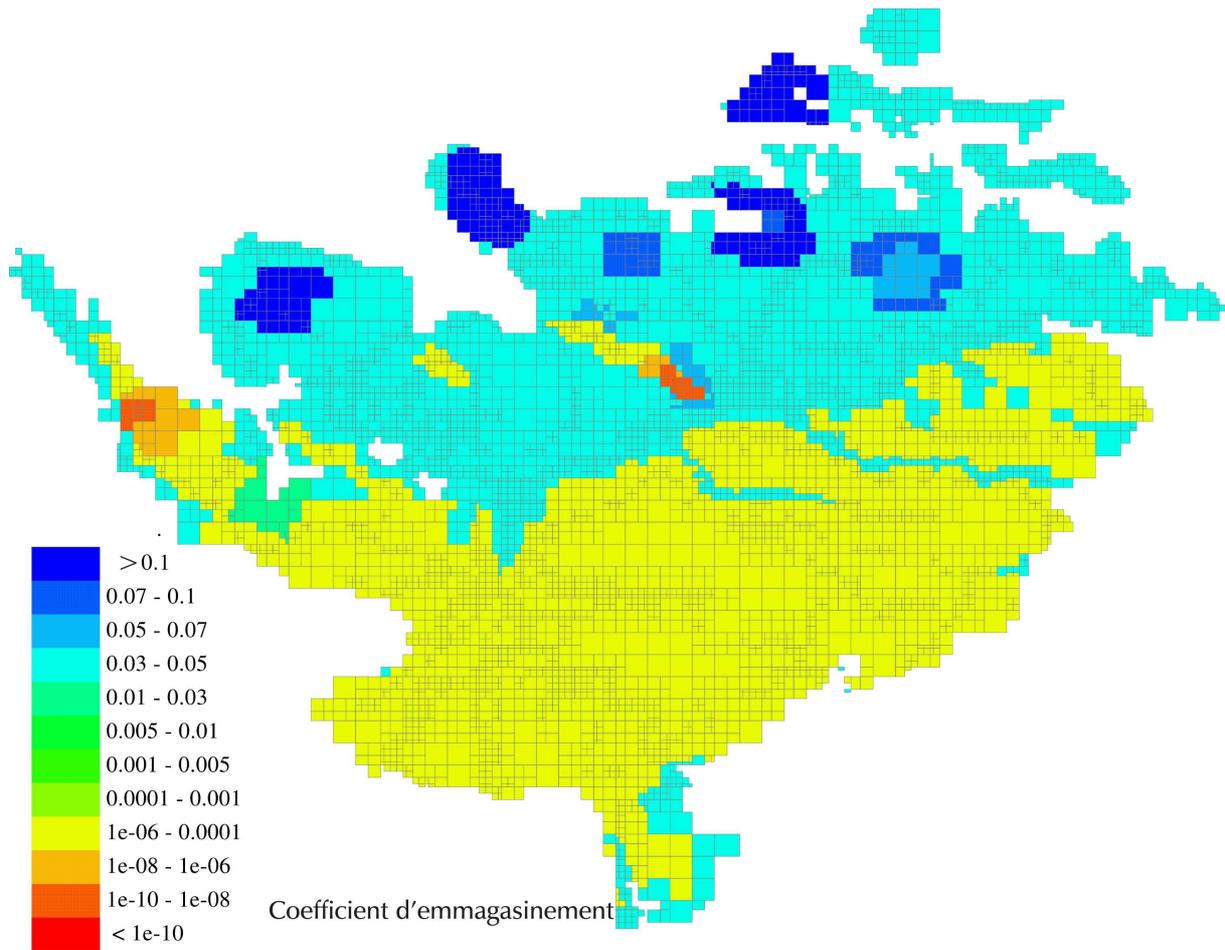


Figure 38: coefficient d'emménagement calé de la formation du Lutétien/Yprésien

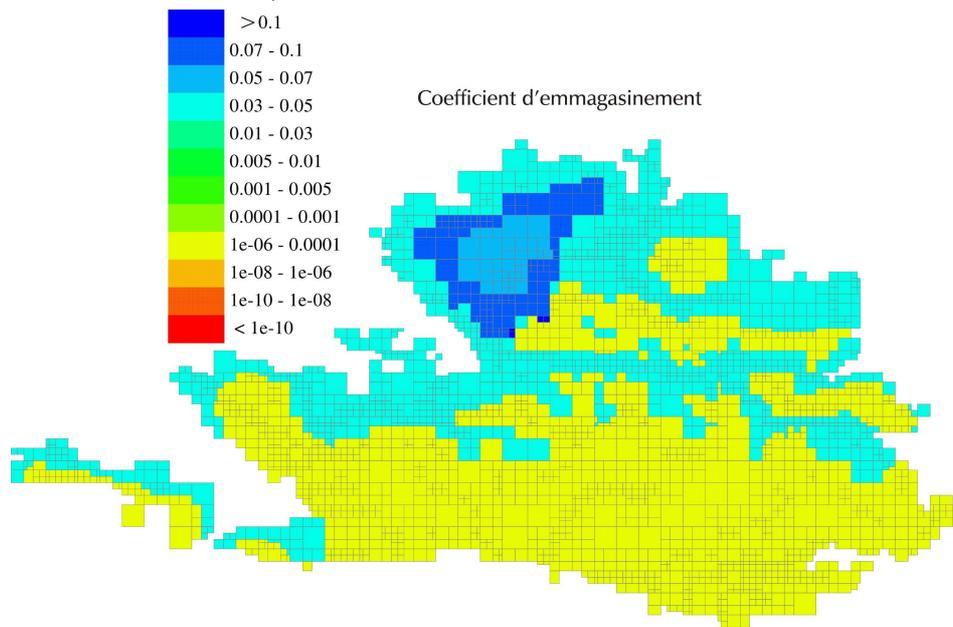


Figure 39 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation du Thanétien

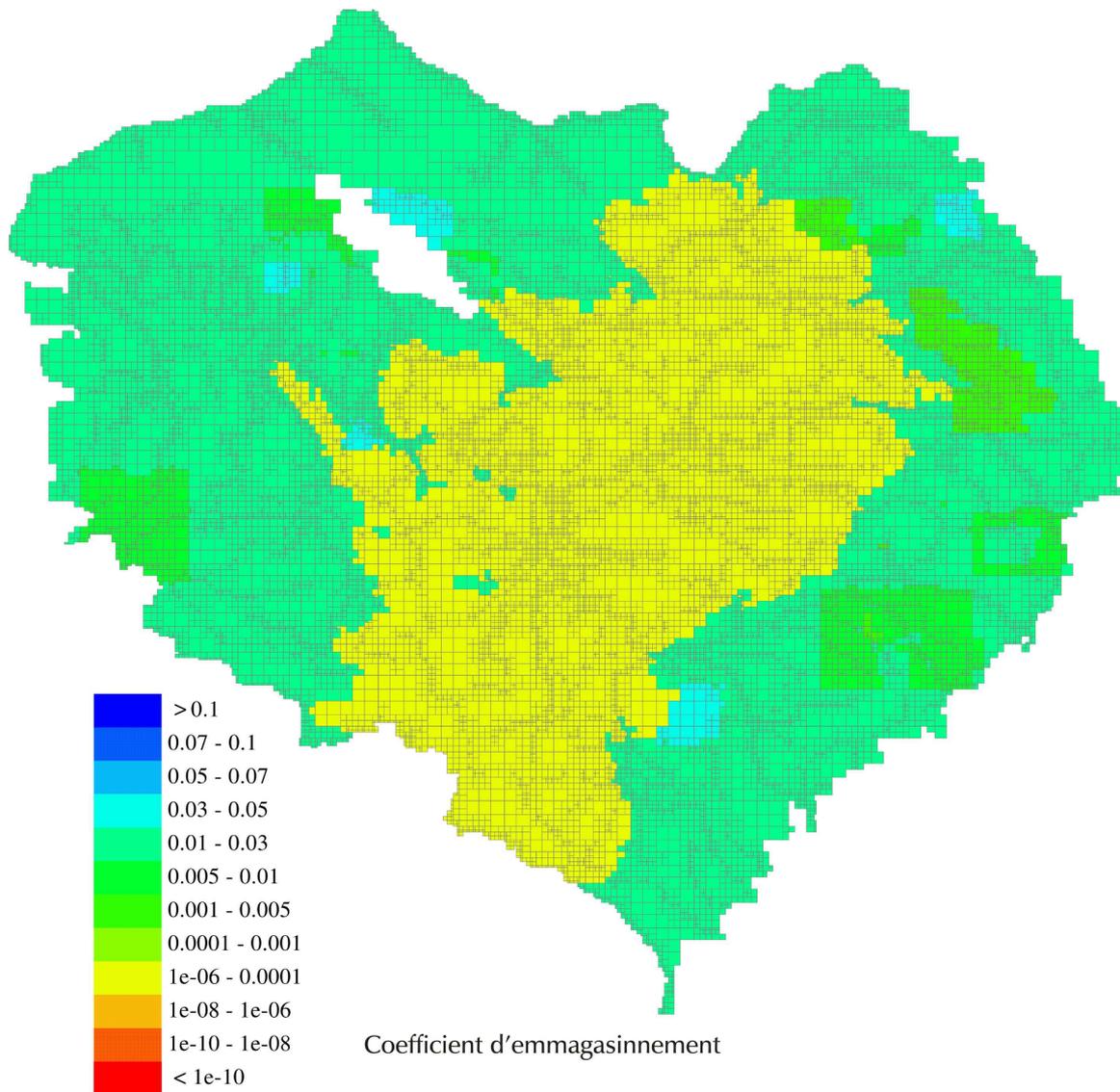


Figure 40 : coefficient d'emmagasinement calé de la formation de la Craie

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 DIREN 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.

3.5 PRELEVEMENTS A.E.P. EN NAPPE

La figure 41 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 ».

Le détail des volumes prélevés, ouvrage pour ouvrage, et les formations aquifères sollicitées sont présentés en annexe 2.

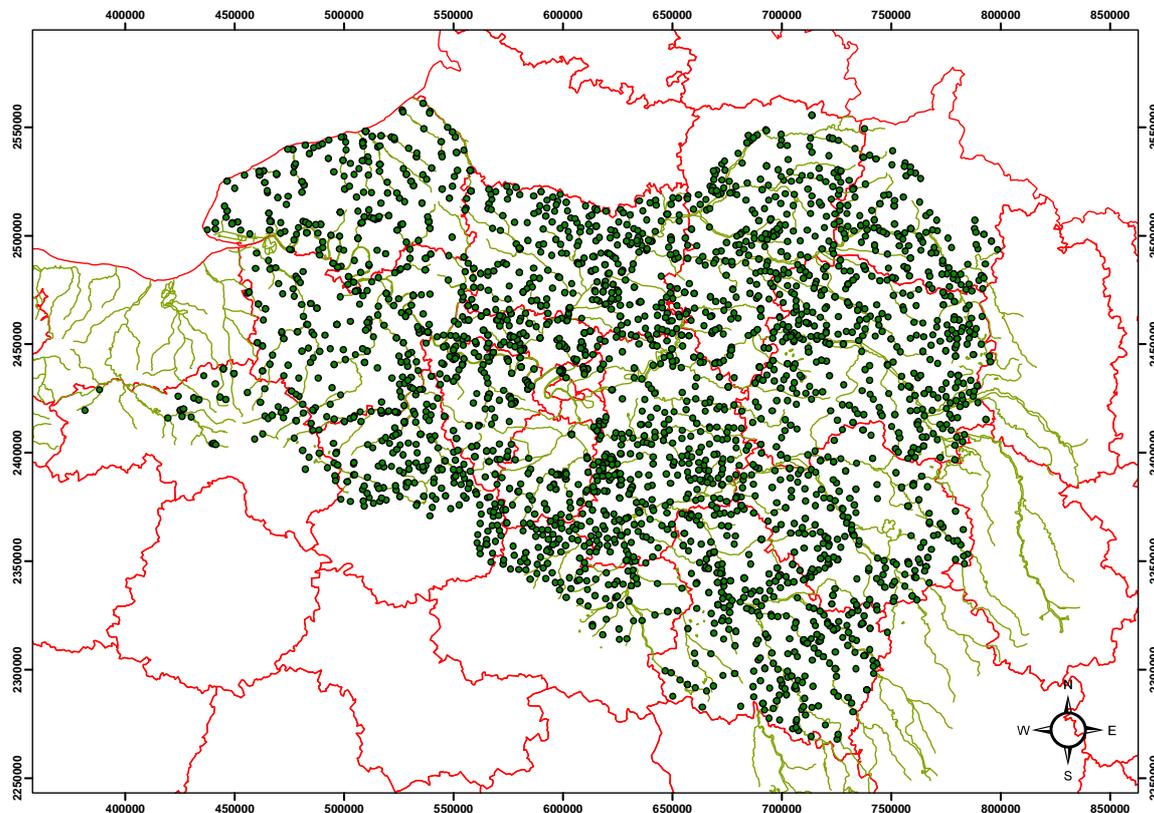


Figure 41 : Situation géographiques des captages A.E.P. en nappe

Sur l'ensemble de la période considérée (2000 - 2004), l'évolution annuelle des prélèvements AEP globaux recensés dans la base de données est présentée sur la figure 42. On remarque une stabilité certaines des volumes prélevés sur la période.

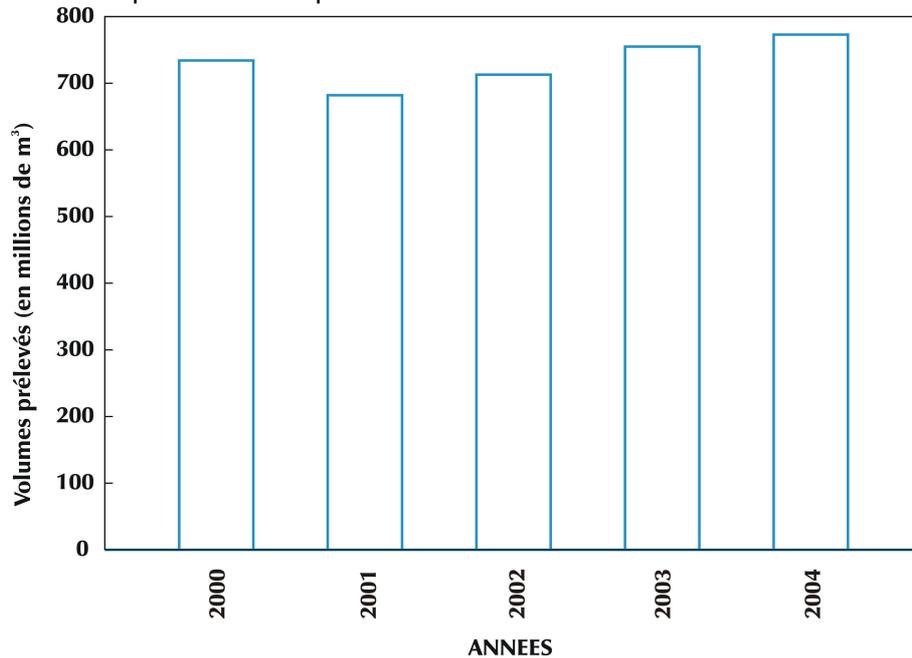


Figure 42 : Volumes globaux annuels prélevés en nappe à des fins AEP

3.6 PRELEVEMENTS INDUSTRIELS EN NAPPE

Sur l'ensemble de la période considérée (2000 - 2004), l'évolution annuelle des prélèvements globaux recensés dans la base de données est présentée sur la figure 43. Comme pour l'AEP, on remarque une certaine stabilité des volumes globaux prélevés. En annexe 3 sont présentés la localisation des ouvrages et les volumes moyens annuels prélevés dans les différents horizons aquifères.

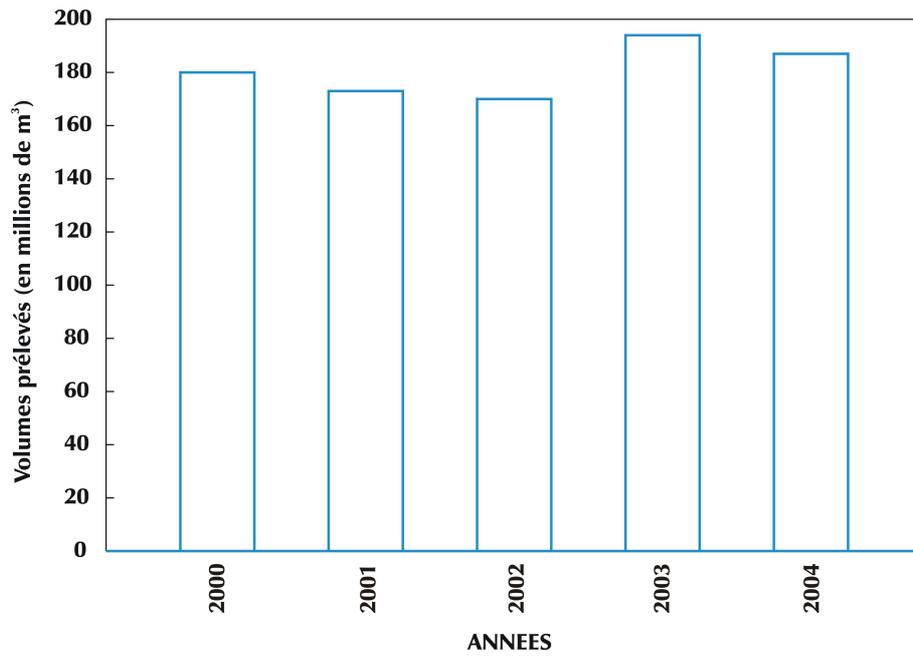


Figure 43 : Volumes globaux recensés et prélevés en nappe à des fins industrielles

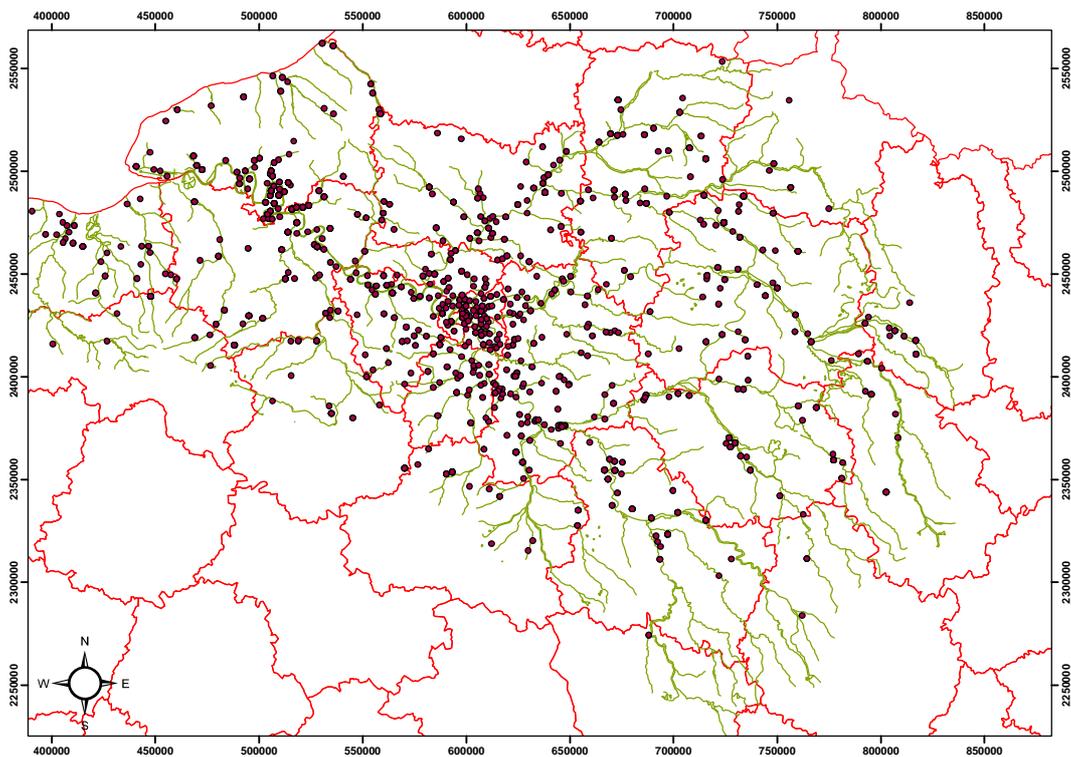


Figure 44 : Localisation de l'ensemble des forages industriels de prélèvement en nappe

3.7 PRELEVEMENTS 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 la figure 45. 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.

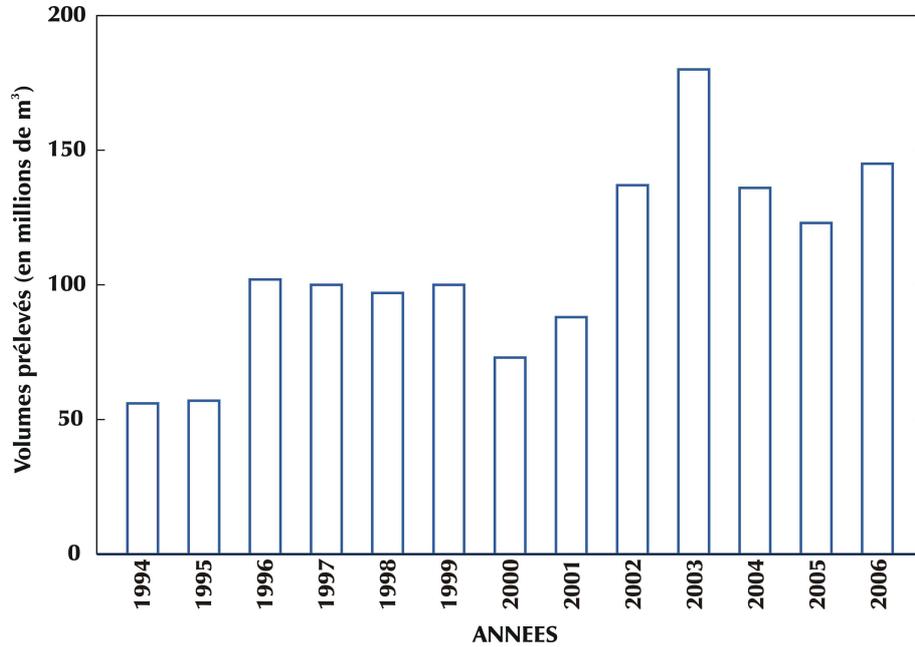


Figure 45 : Prélèvements agricoles en nappe moyens annuels entre 1994 et 2006

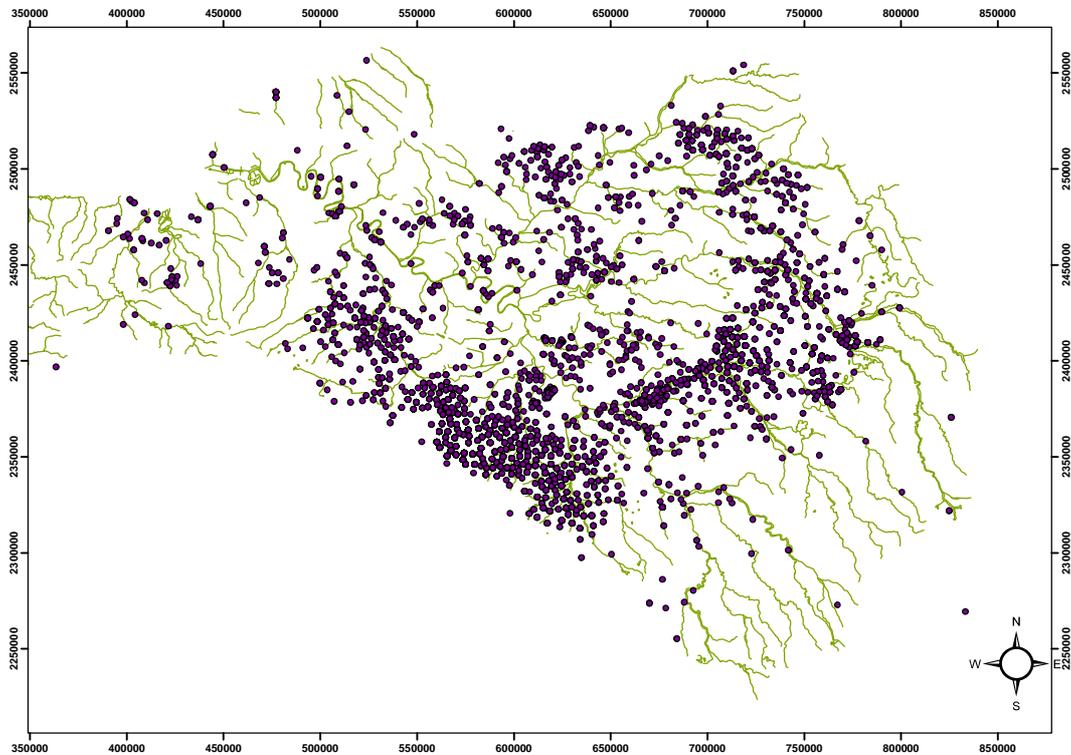


Figure 46: Localisation de l'ensemble des forages agricoles de prélèvement en nappe

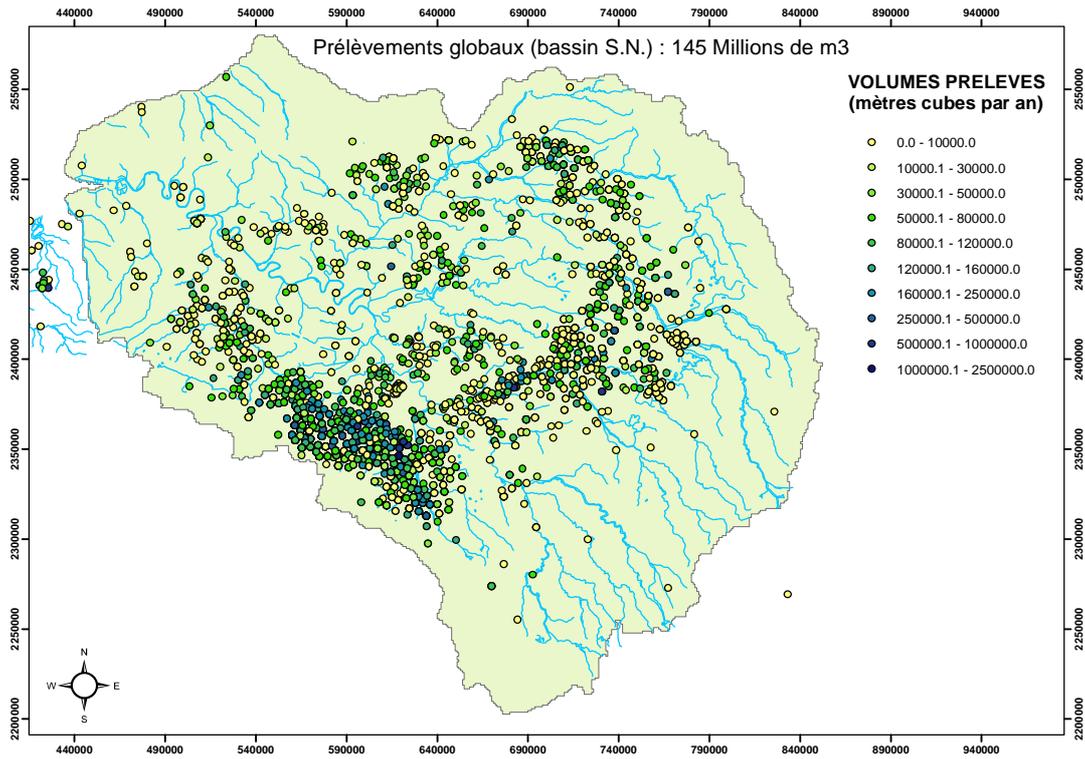


Figure 47 : Volumes prélevés en nappe à des fins agricoles en 2006

4 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.

4.1 VOLUMES JOURNALIERS PRELEVES

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.

4.2 FORMATIONS AQUIFERES CAPTEES

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 m, 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.

5 CALCUL EN REGIME PERMANENT

5.1 PIEZOMETRIE CALCULEE EN REGIME PERMANENT

Les figures 36 à 41 précisent la piézométrie moyenne des aquifères calculée sur la période de simulation (1970-2004).

En moyenne, l'ensemble des prélèvements dans les formations aquifères représentés est de près de 645 millions de m³ par an.

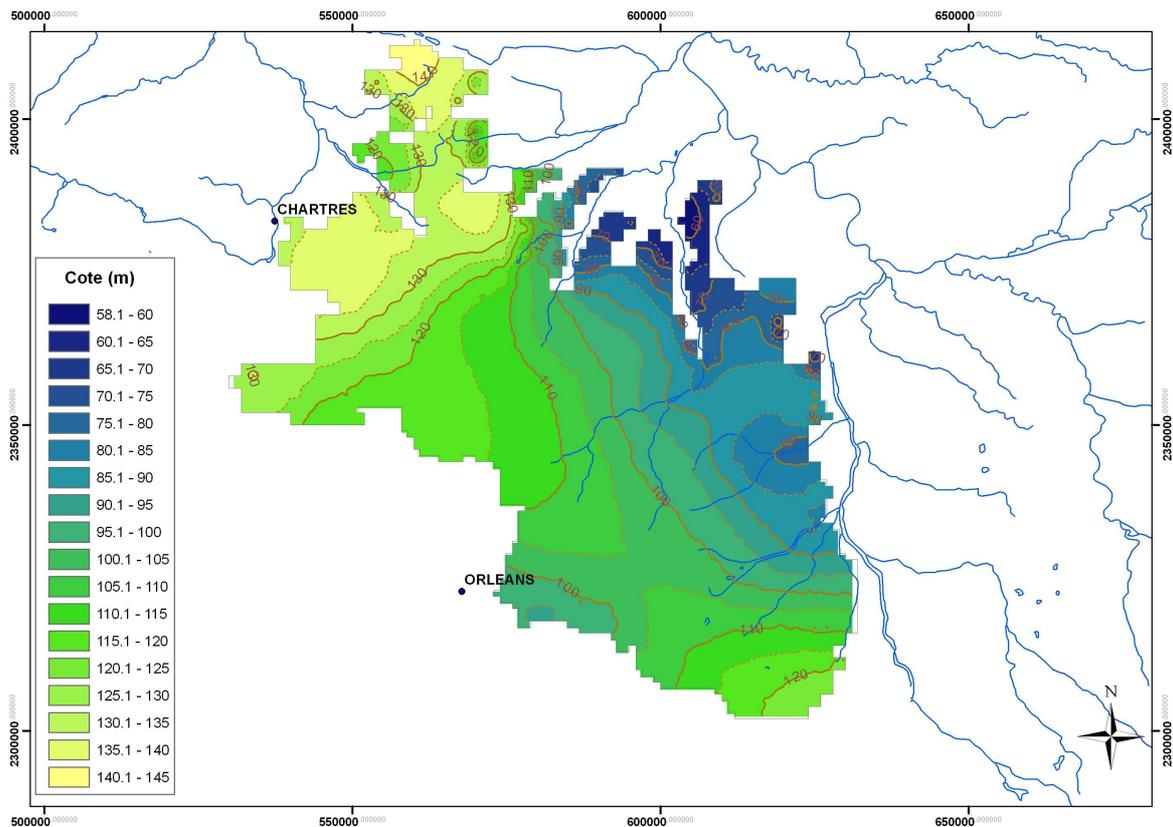


Figure 48 : piézométrie calculée en régime permanent : formation des Calcaires de Beauce

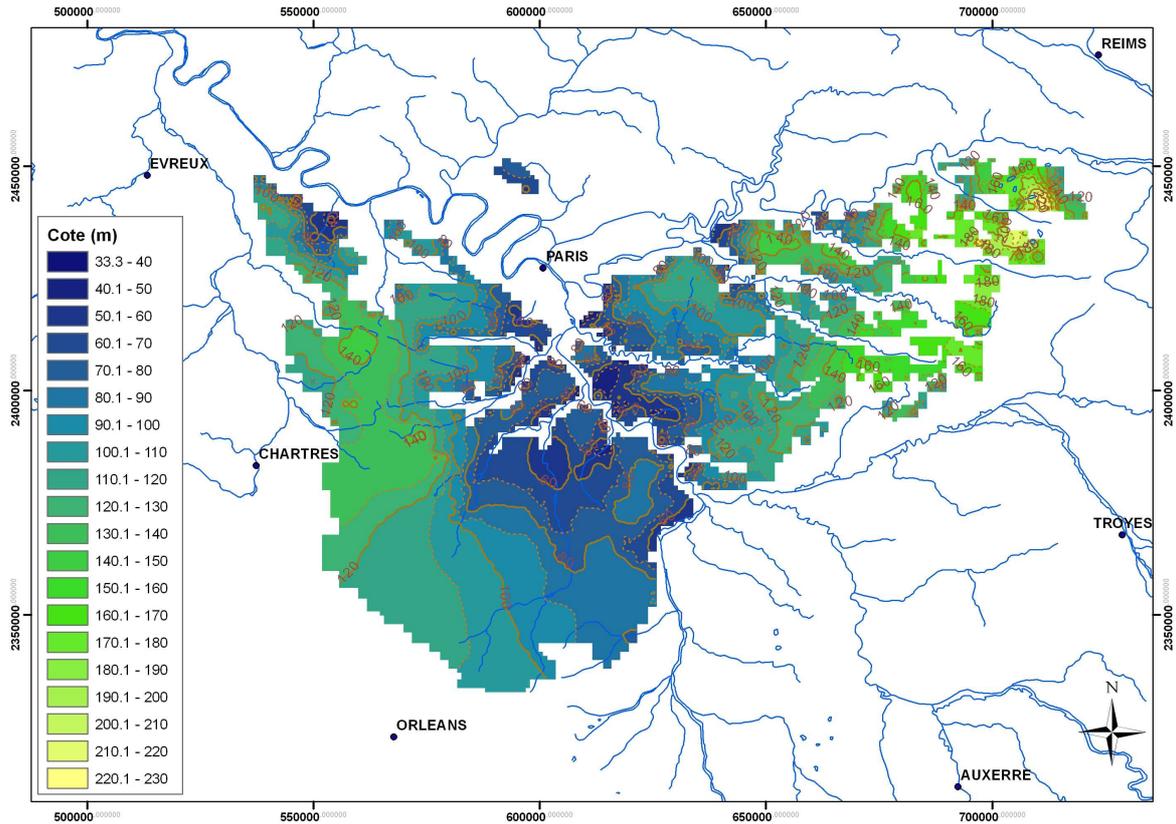


Figure 49 : piézométrie calculée en régime permanent : formation des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau

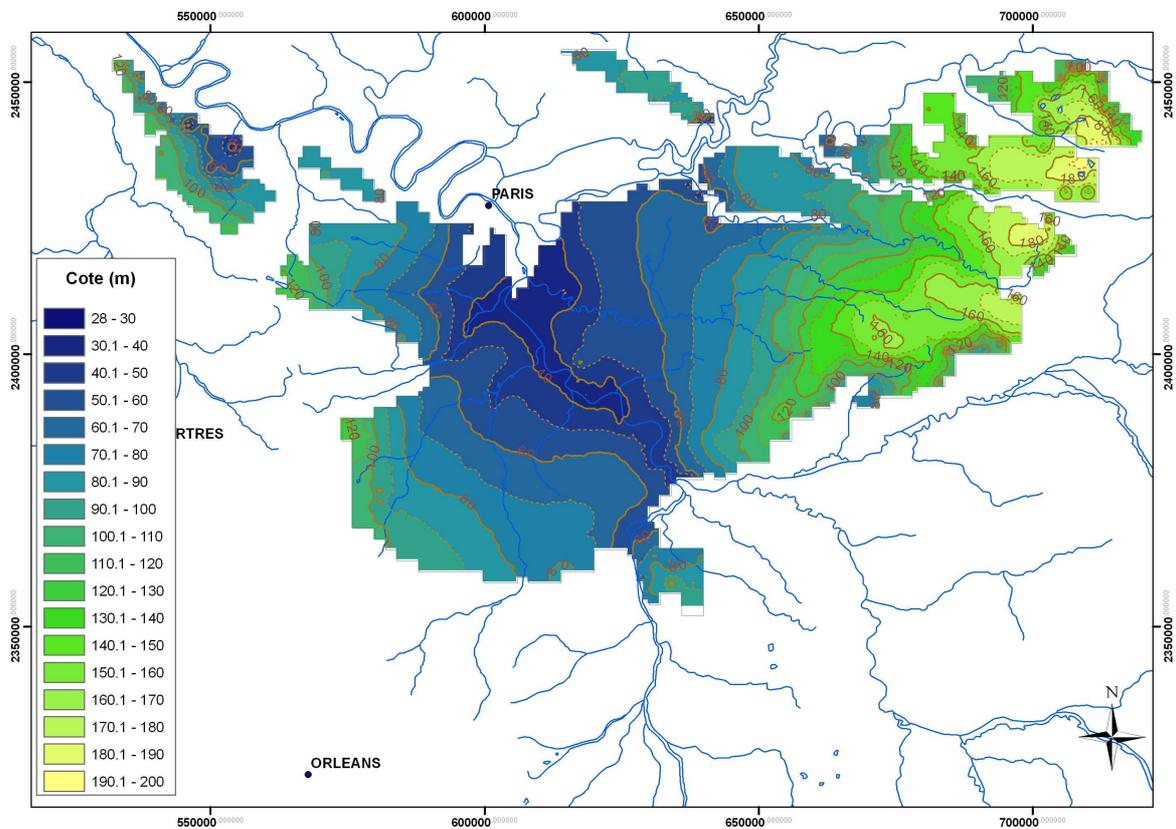


Figure 50 : piézométrie calculée en régime permanent : formation des Calcaires de Champigny

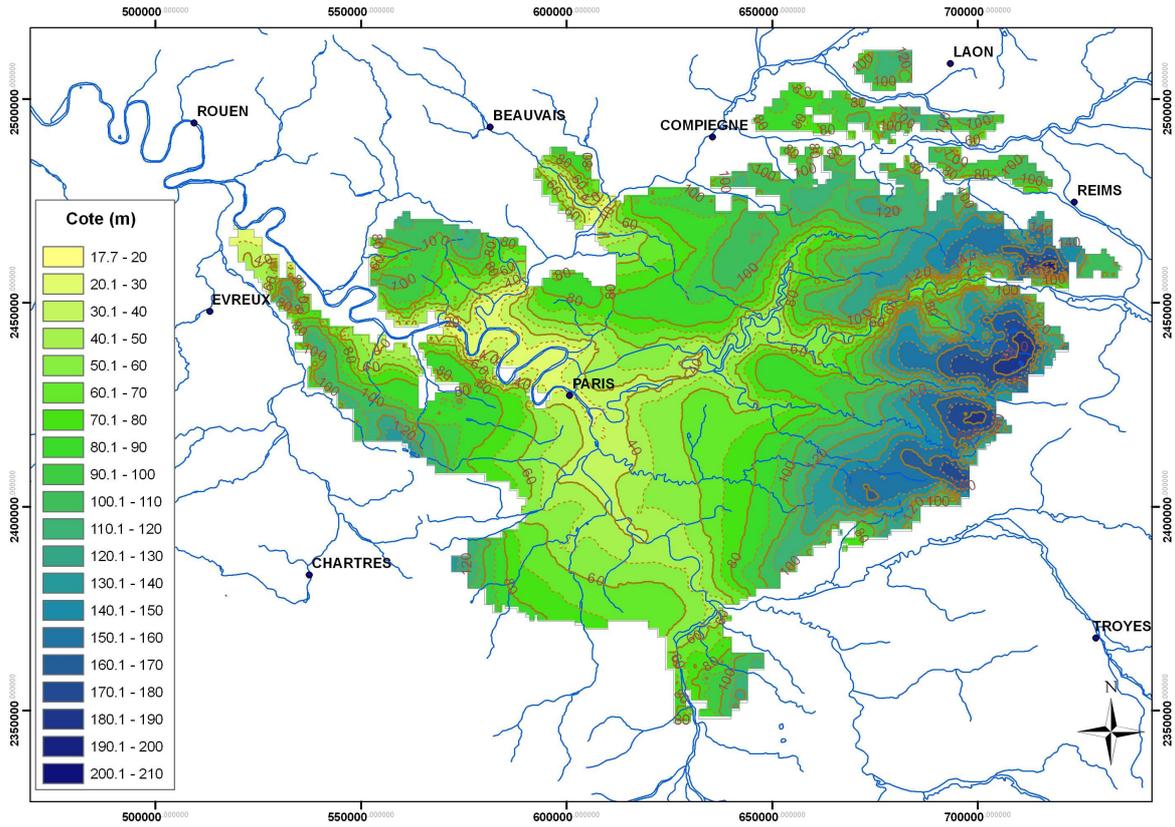


Figure 51 : piézométrie calculée en régime permanent : formations du Lutétien/Yprésien

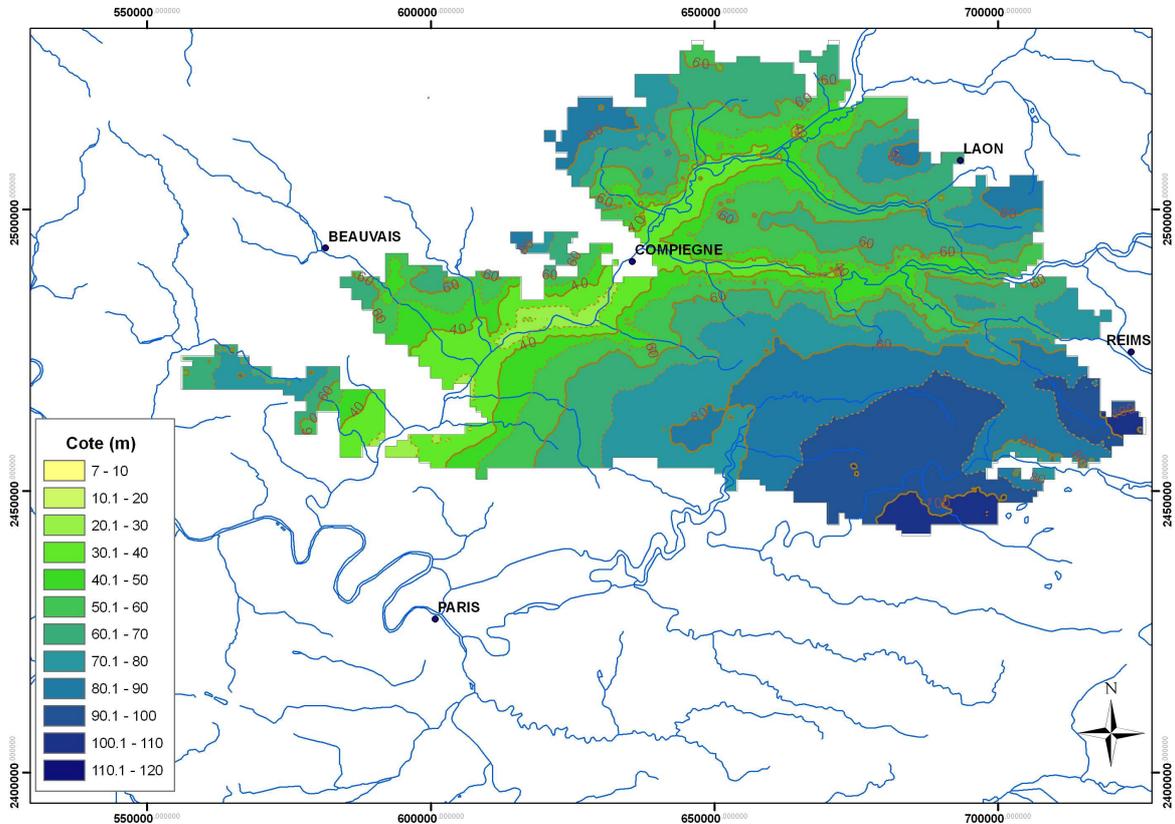


Figure 52 : piézométrie calculée en régime permanent : formation du Thanétien

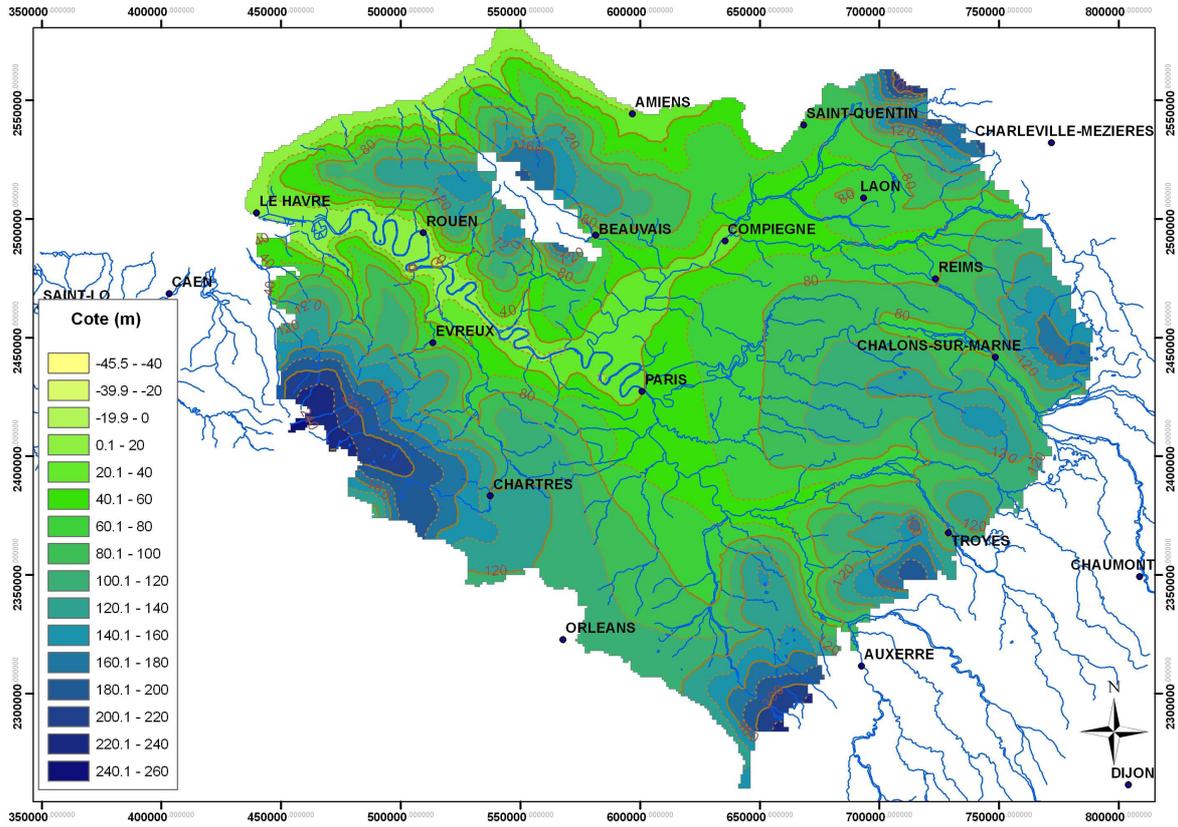


Figure 53 : piézométrie calculée en régime permanent : formation de la Craie

5.2 BILAN HYDRIQUE GLOBAL CALCULE EN REGIME PERMANENT

La figure 53 le bilan hydrique moyen des formations aquifères calculés en régime permanent et avec intégration des pompages.

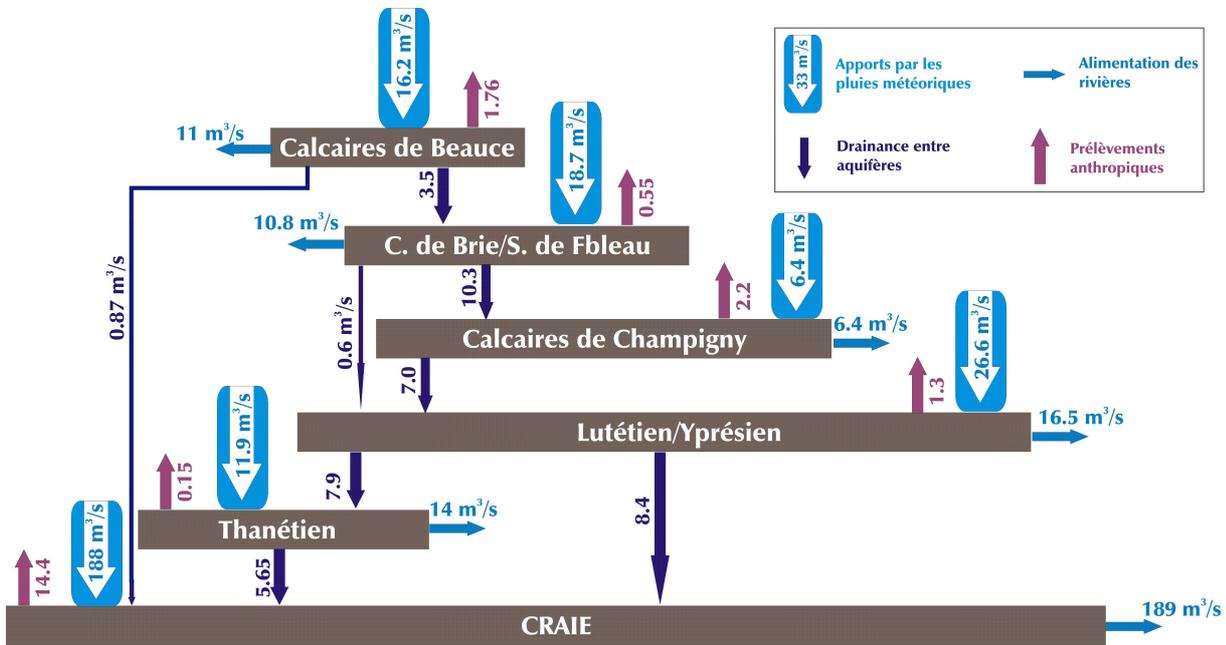


Figure 54 : bilan hydrique global des formations aquifères en régime permanent (période moyenne 1985-2008) avec prise en compte des prélèvements

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 %
Lutétien/Yprésien	3.8 %
Thanétien	0.7 %
Craie	7.1 %

6 INFLUENCE DES PRELEVEMENTS EN REGIME PERMANENT

6.1 RABATTEMENT INDUIT PAR LES PRELEVEMENTS

Toujours en régime permanent, les figures 55 à 60 présente le rabattement calculé en régime permanent lié à l'ensemble des prélèvements effectués dans les formations aquifères modélisées. Ce rabattement calculé est bien sûr fonction des propriétés hydrodynamiques imposées dans le modèle et issues du calage.

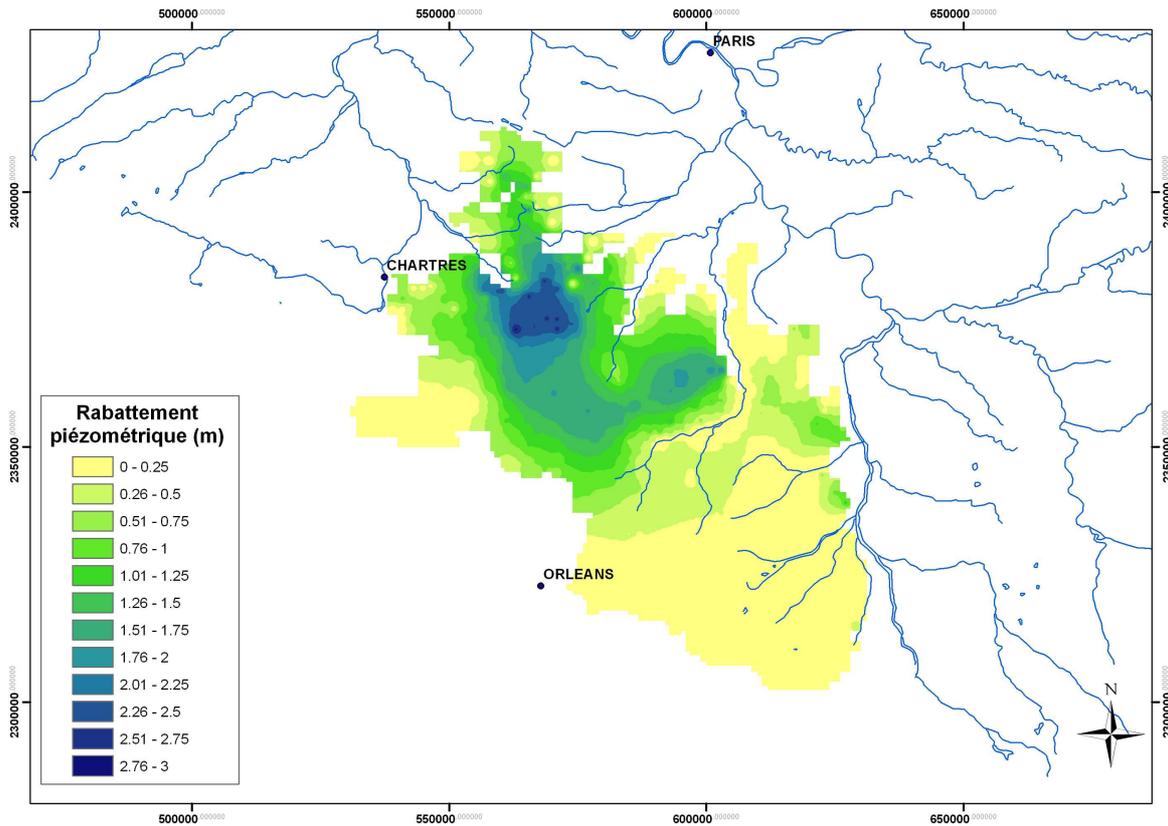


Figure 55 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation des Calcaires de Beauce

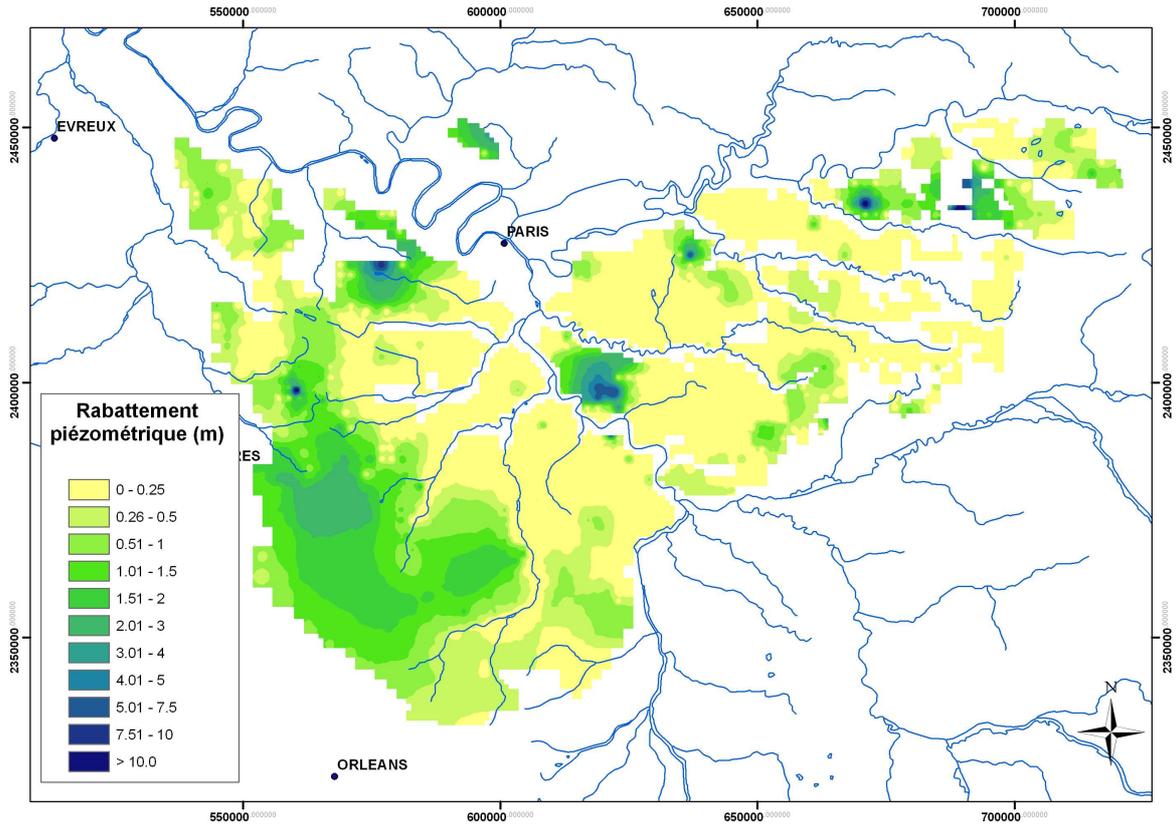


Figure 56 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation des Calcaires de Brie/Sables de Fontainebleau

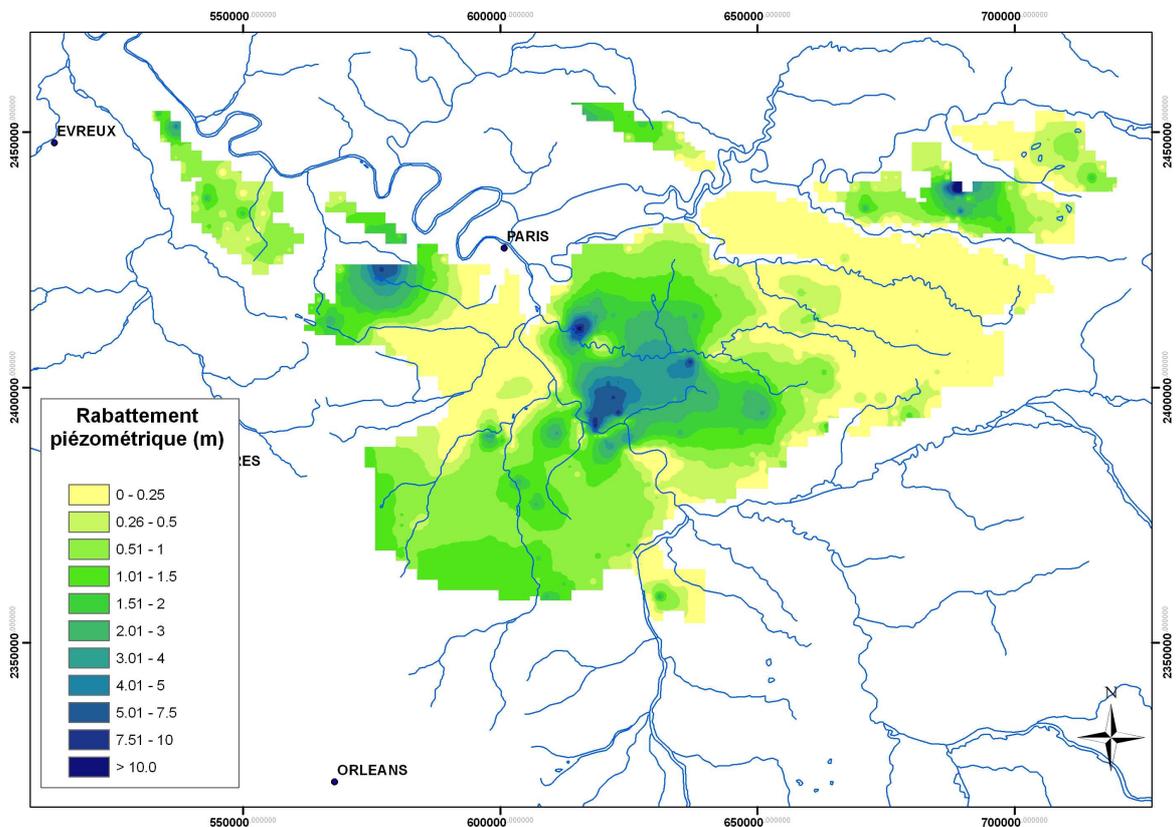


Figure 57 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation des Calcaires de Champigny

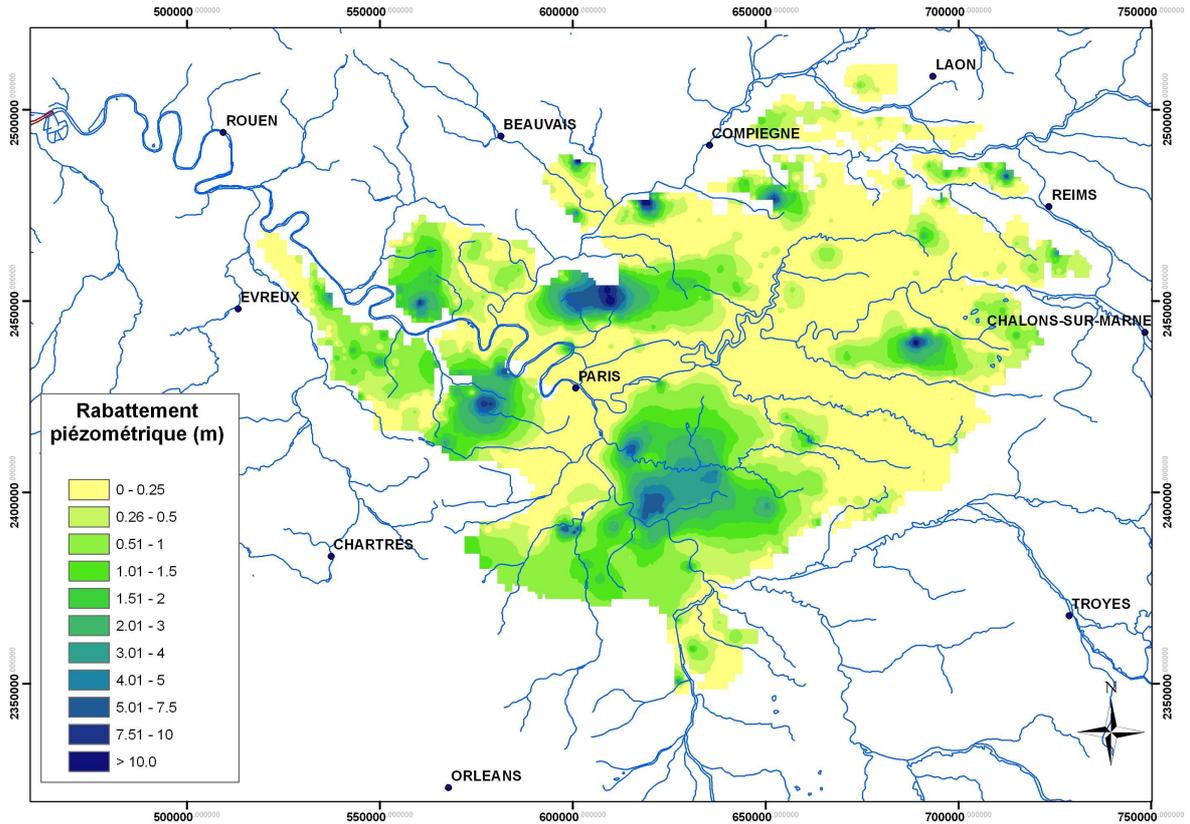


Figure 58 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation du Lutétien/Yprésien

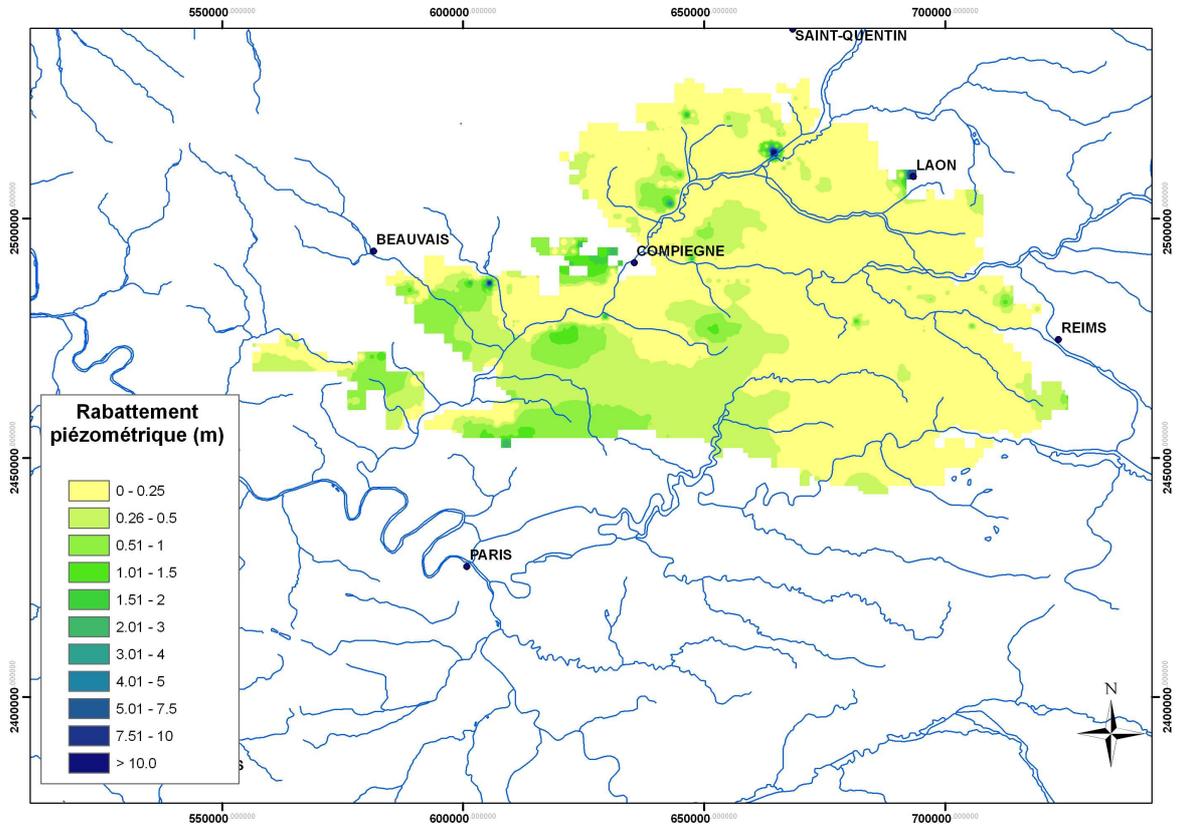


Figure 59 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation du Thanétien

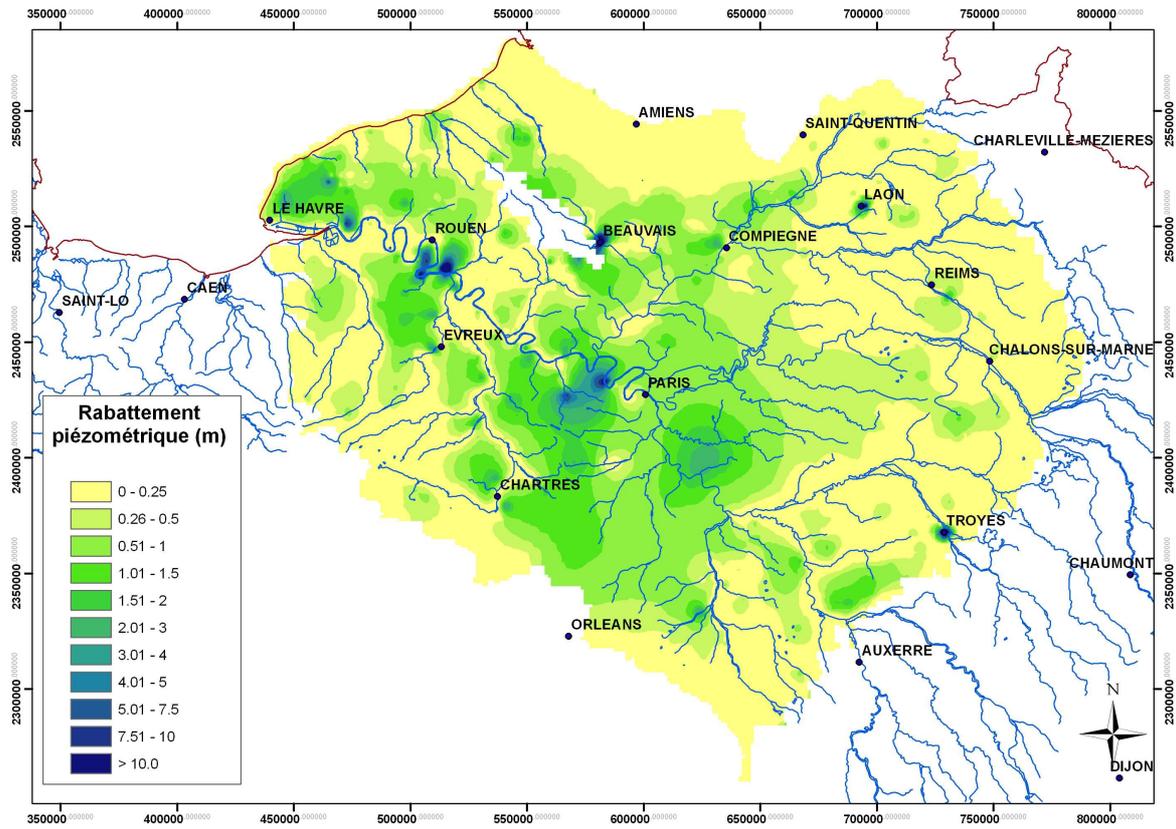


Figure 60 : rabattement calculé induit par les prélèvements dans la formation de la Craie

6.2 BILAN HYDRIQUE GLOBAL CALCULE EN L'ABSENCE DE PRELEVEMENTS

En l'absence de prélèvement, le bilan global moyen (toujours calculé en régime permanent) des formations aquifères est présenté figure 55.

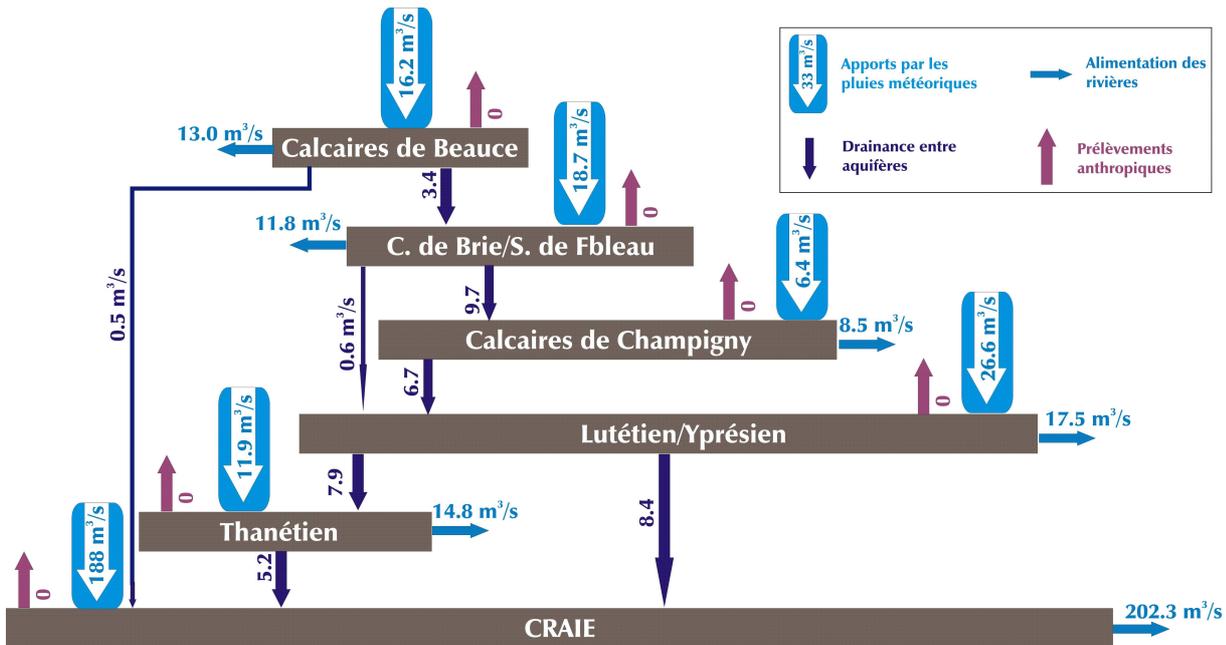


Figure 61 : bilan hydrique global des formations aquifères en régime permanent (période moyenne 1985-2008) avec absence de prélèvements

L'absence de prélèvement modifie sensiblement les flux d'eau échangés entre couches aquifères de part la modification des charges piézométriques mais également les flux d'eau apportés au réseau hydrographique par ces mêmes couches. Le tableau suivant précise l'augmentation relative de flux d'eau apporté aux rivières en l'absence des prélèvements anthropiques.

Formation aquifère	Augmentation du flux d'eau apporté aux rivières en l'absence de prélèvement
Calcaires de Beauce	+18.1 %
Calcaires de Brie / Sables de Fbleau	+ 9.2 %
Calcaires de Champigny	+ 32.8 %
Lutétien/Yprésien	+6 %
Thanétien	+5.7 %
Craie	+7 %

7 CALCUL EN REGIME TRANSITOIRE

Le calcul en régime transitoire est effectué au pas de temps journalier. Le calcul est effectué sur la période 1986-2005. Les principales sorties du modèle sont :

Les évolutions temporelles des niveaux piézométriques au niveau des piézomètres choisis ;

Les évolutions temporelles des débits aux stations hydrométriques également choisies.

7.1 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE

La figure 62 présente la localisation géographique des piézomètres retenus lors du calage du modèle en régime transitoire.

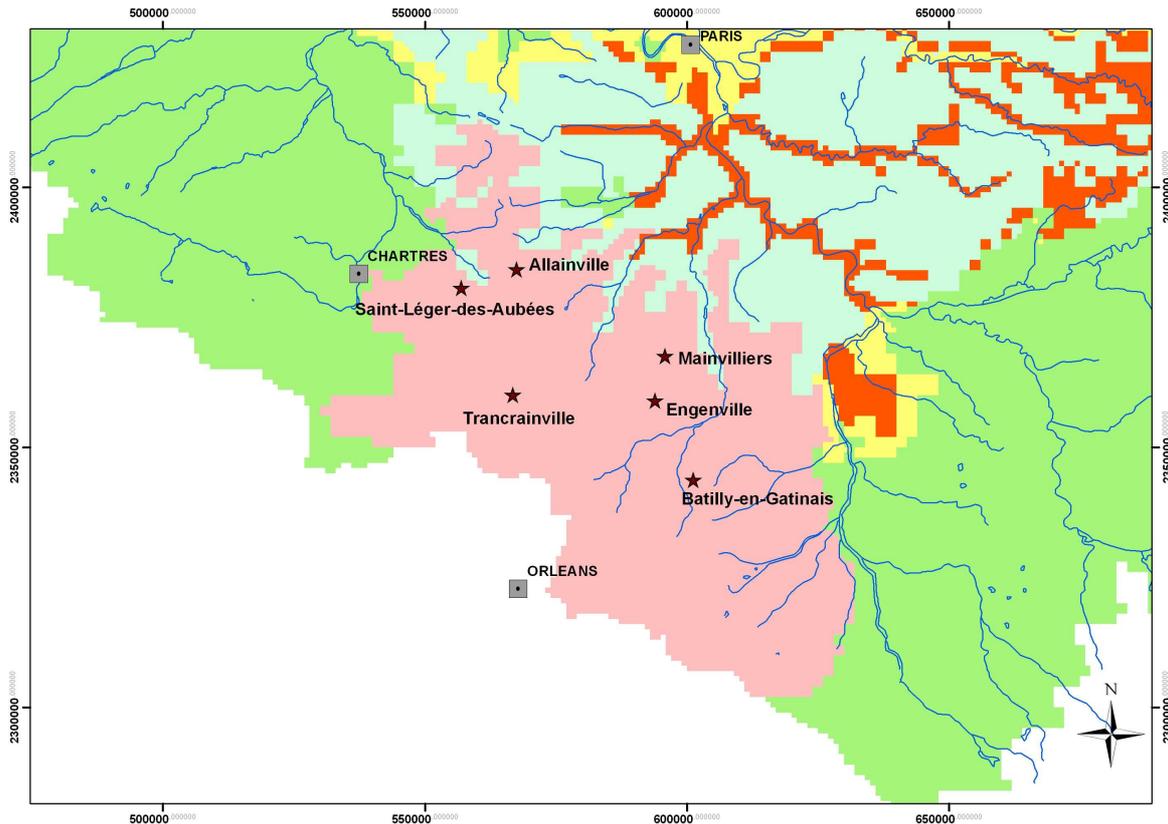


Figure 62 : nappe des Calcaires de Beauce - situation géographique des piézomètres retenus

Les figures 63 à 68 présentent la comparaison des piézométries mesurées aux différents ouvrages et celles calculées par le modèle dans la maille correspondante sur la période 1994-2005.

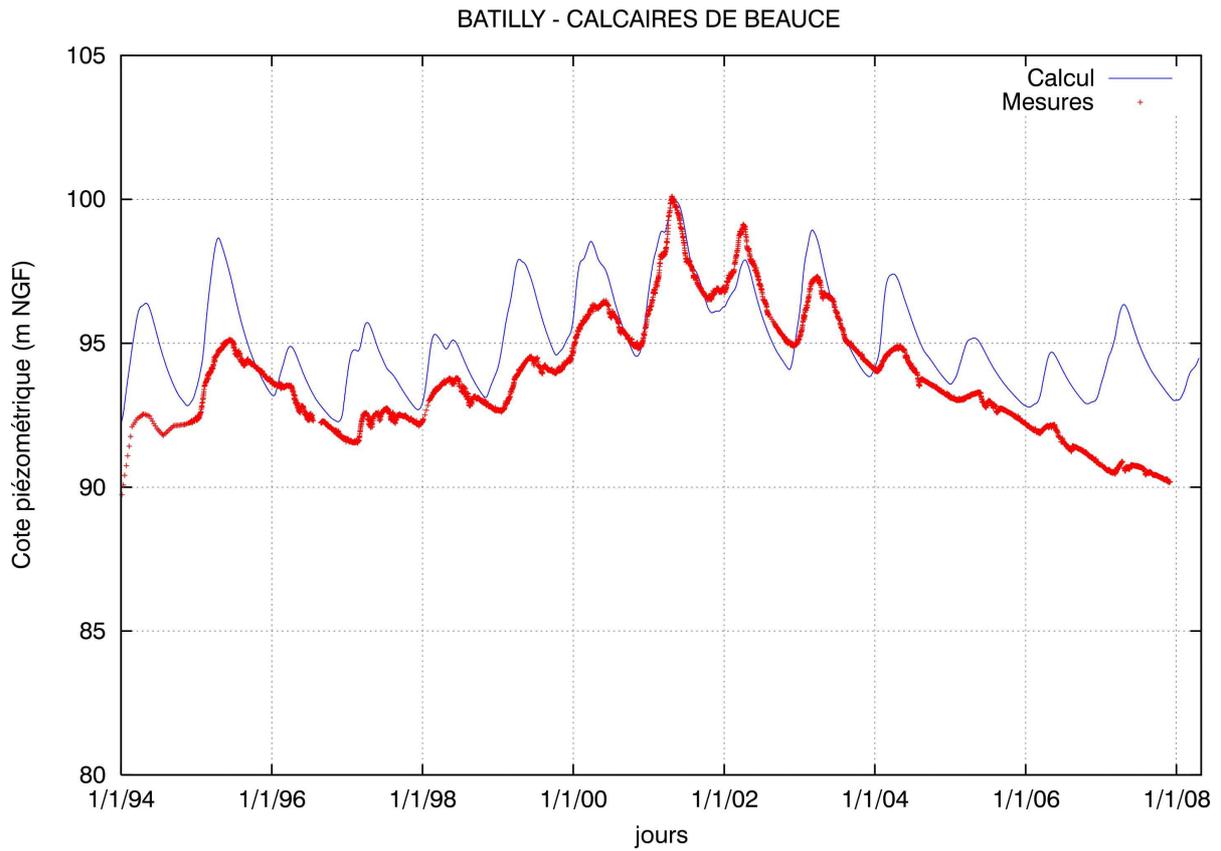


Figure 63 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Batilly-en-Gatinais (Loiret)

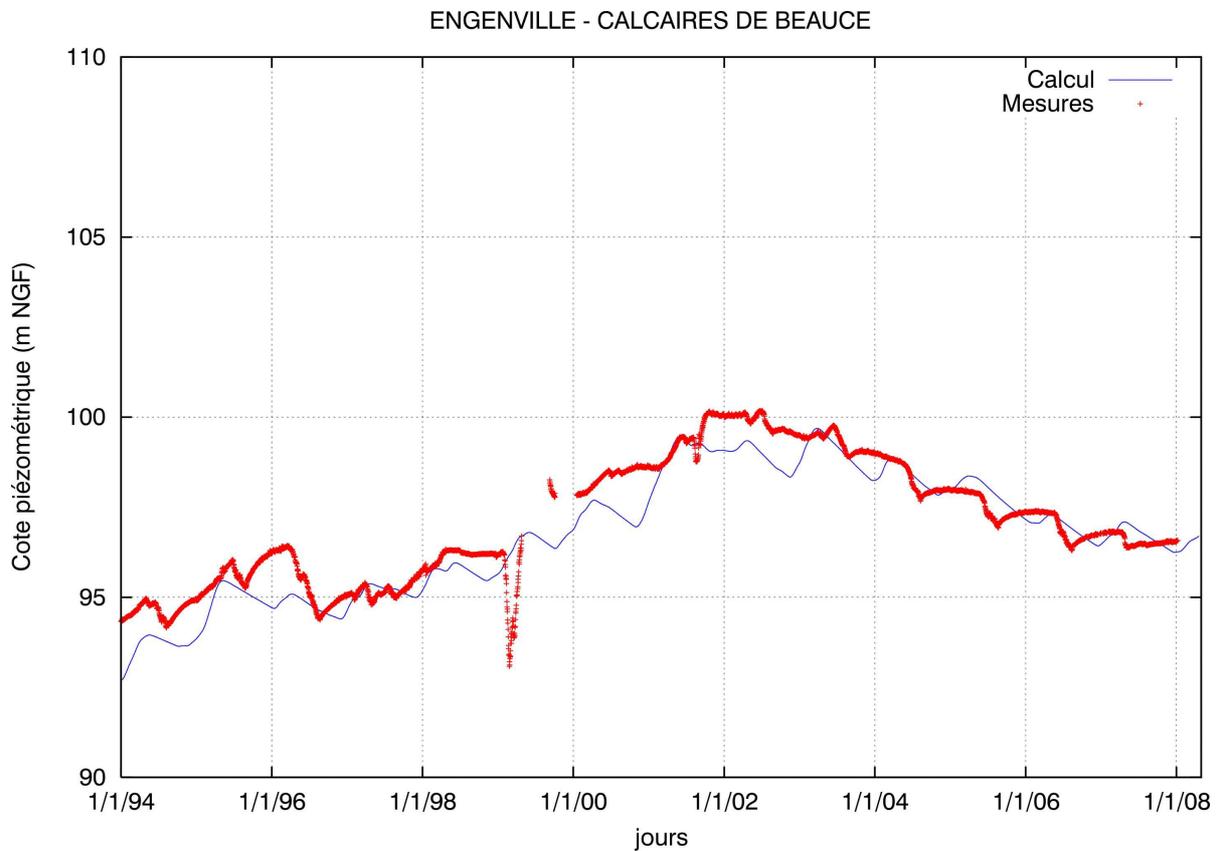


Figure 64: évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre d'Engenville (Loiret)

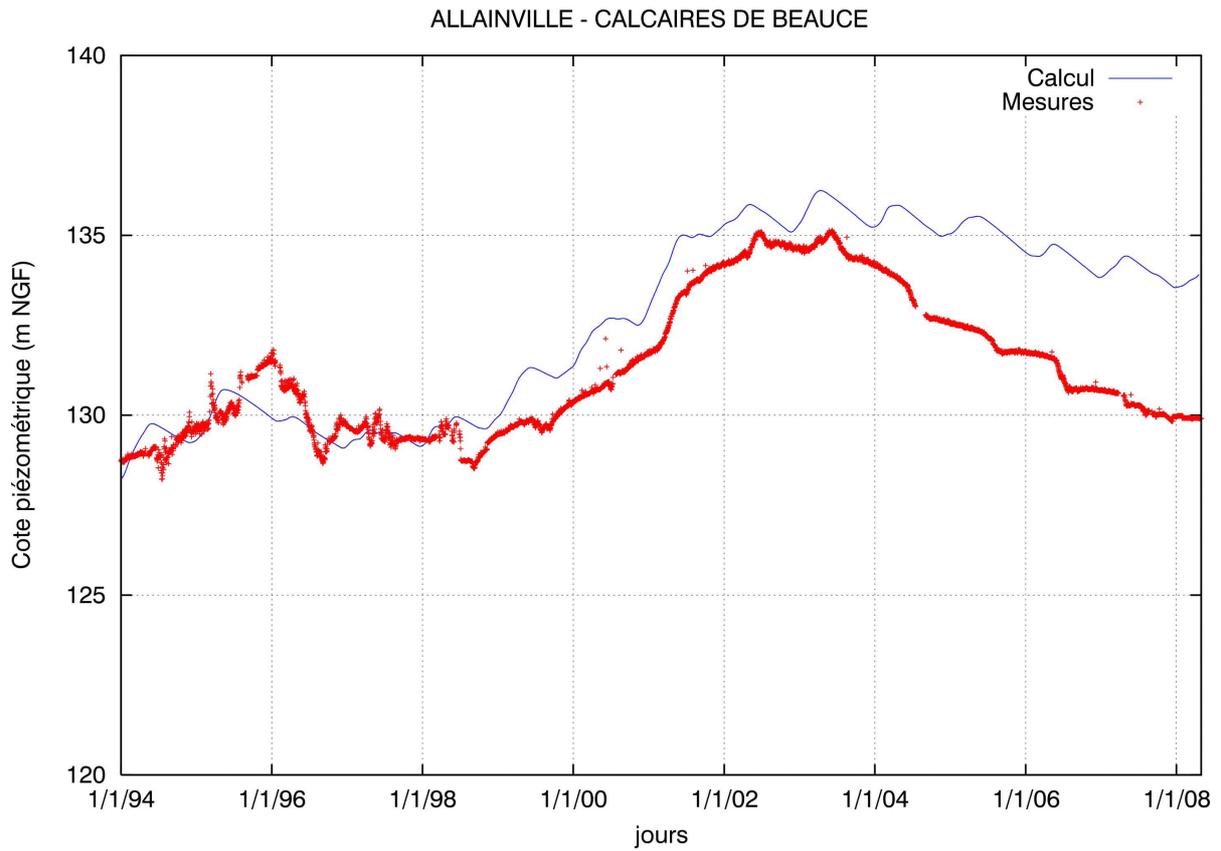


Figure 65 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre d'Allainville (Yvelines)

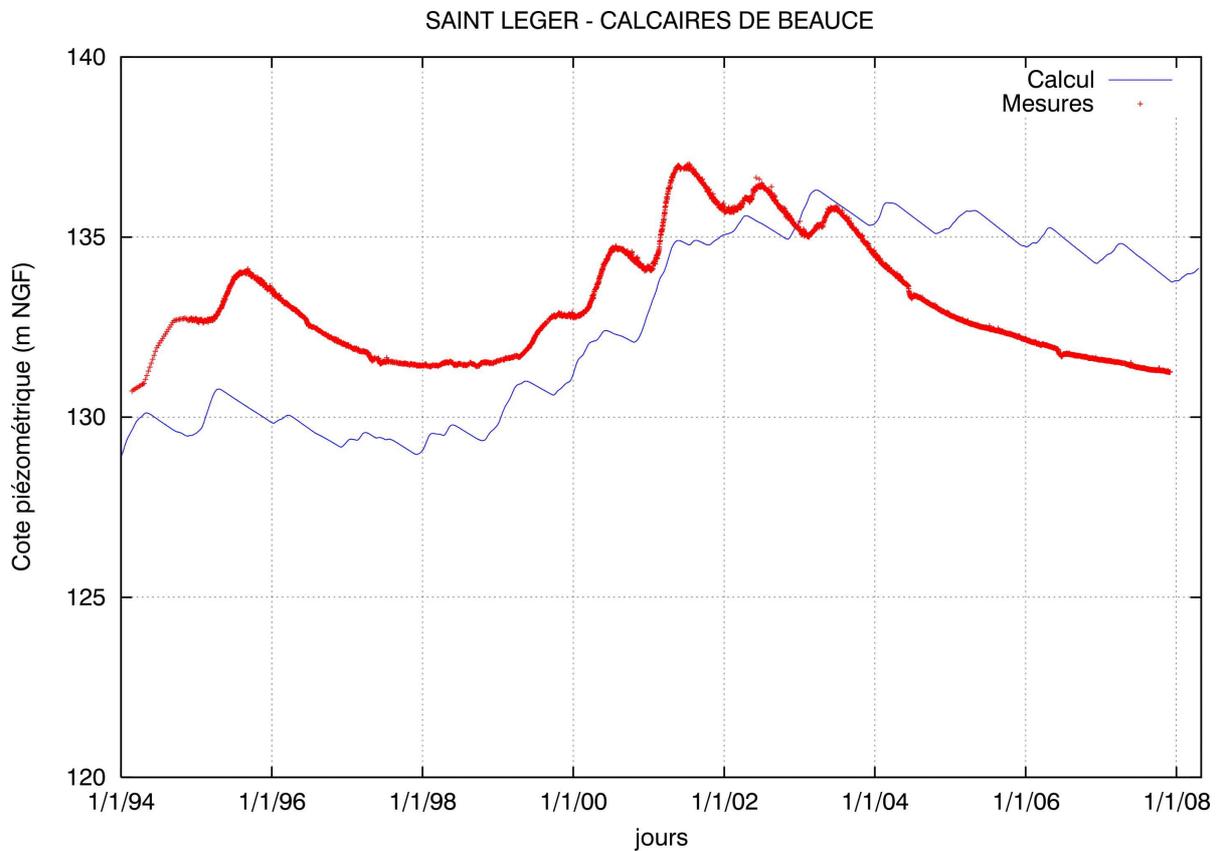


Figure 66 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Saint-Léger des Aubées (Eure et Loir)

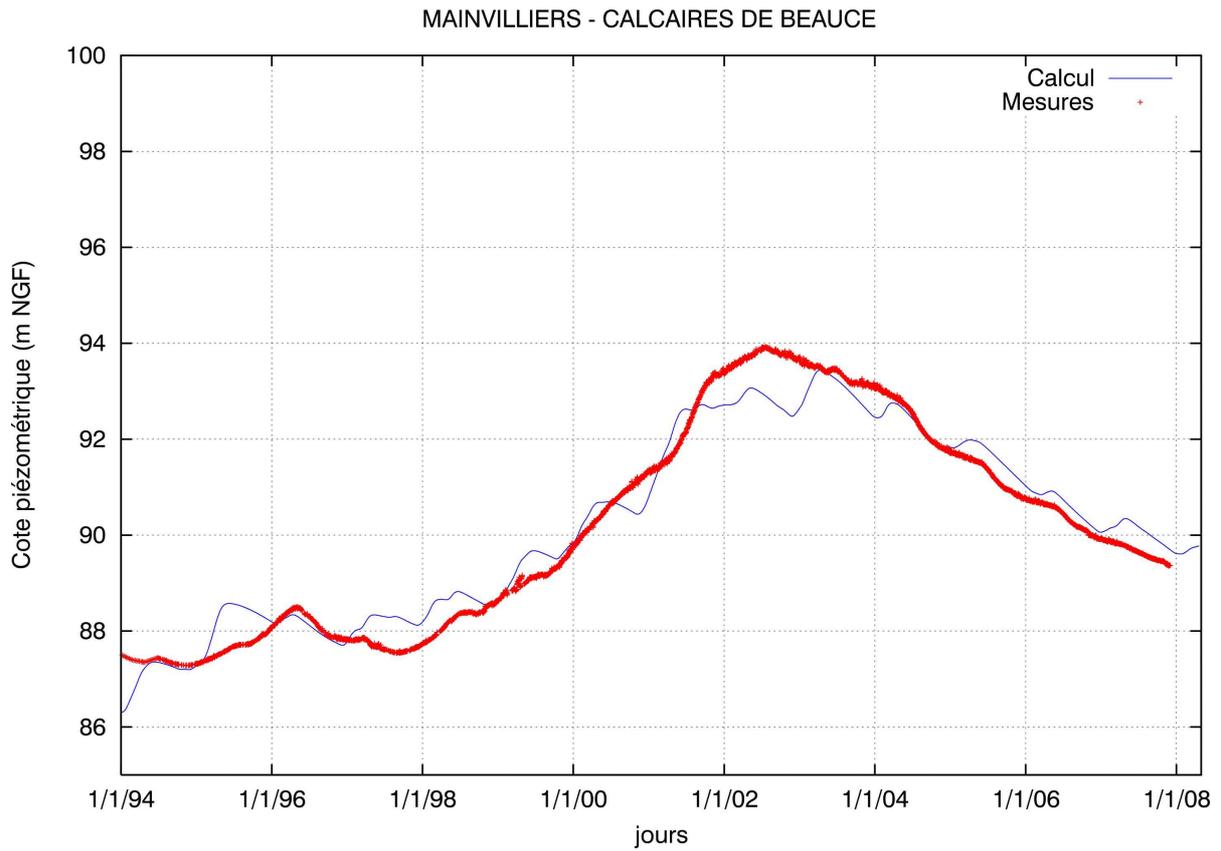


Figure 67 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Mainvilliers (Loiret)

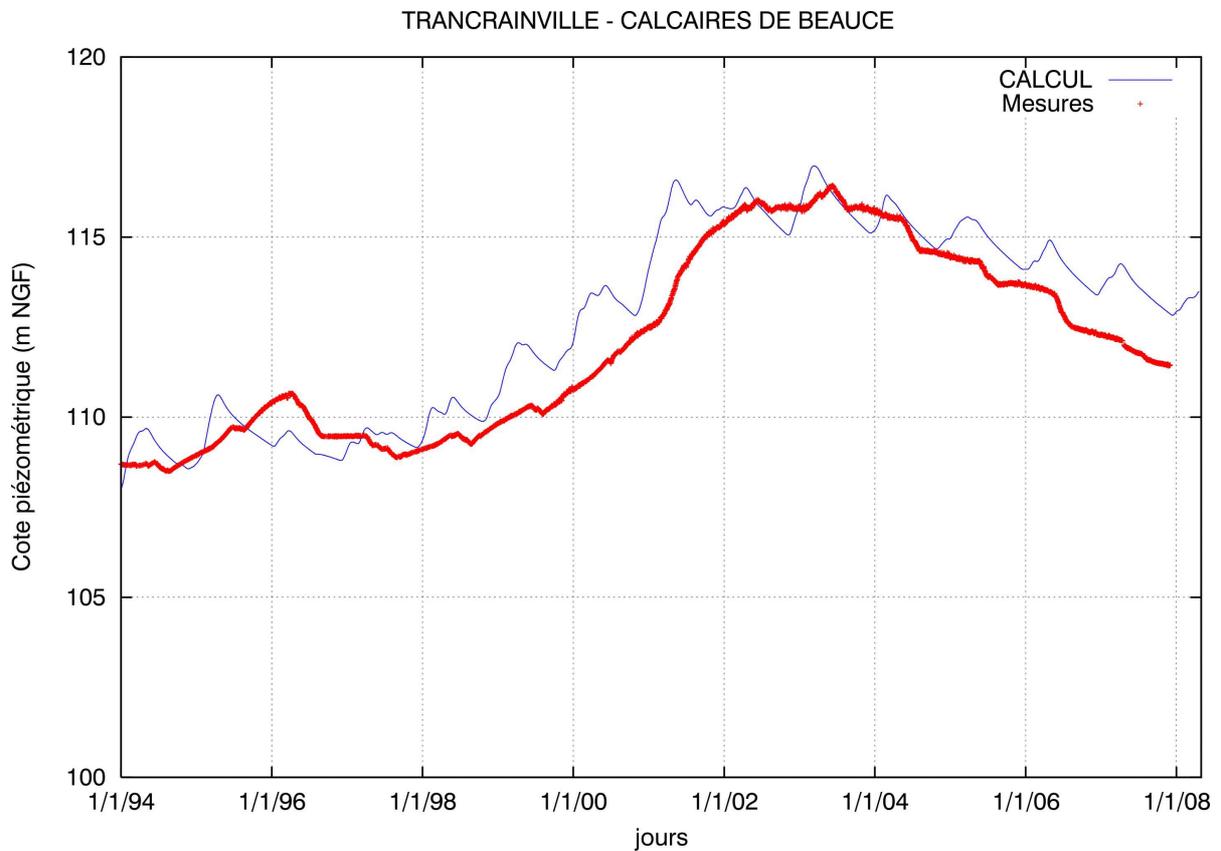


Figure 68 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Beauce : piézomètre de Trancrainville (Eure et Loir)

7.2 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE BRIE ET DES SABLES DE FONTAINEBLEAU

La figure 69 présente la localisation géographique des piézomètres atteignant la nappe des Calcaires de Brie ou celle des Sables de Fontainebleau et retenus lors du calage du modèle en régime transitoire.

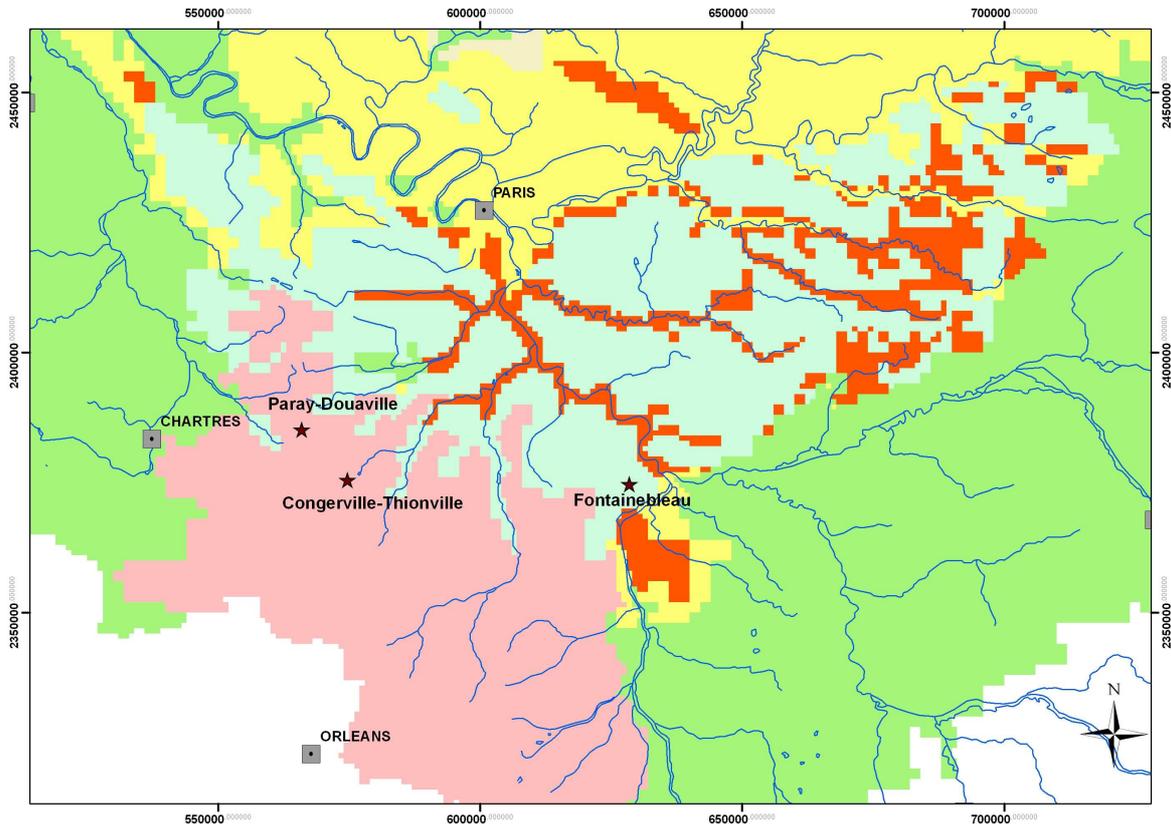


Figure 69 : nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau - situation géographique des piézomètres retenus

Les figures 70 à 72 présentent la comparaison des piézométries mesurées aux différents ouvrages et celles calculées par le modèle dans la maille correspondante sur la période 1994-2005.

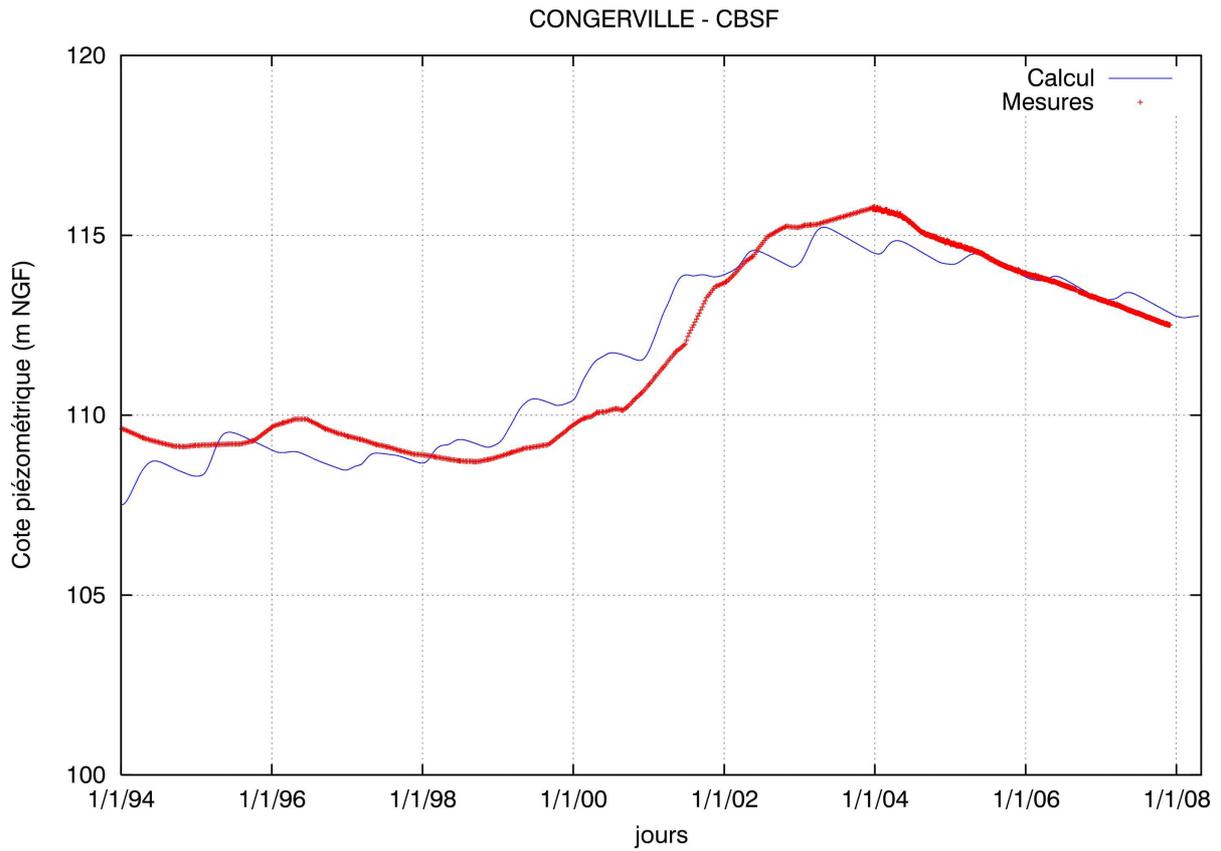


Figure 70 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau : piézomètre de Congerville-Thioville (Essonne)

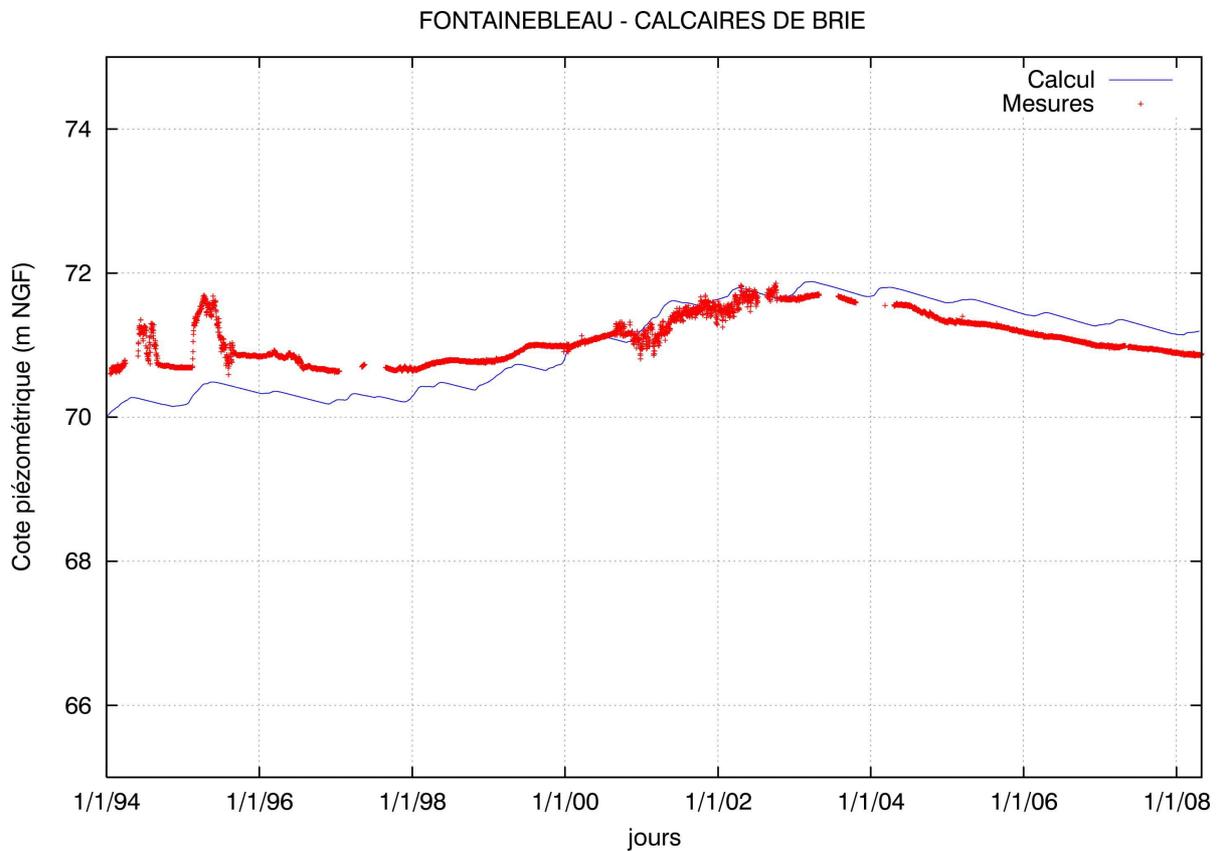


Figure 71 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau : piézomètre de Fontainebleau (Seine et Marne)

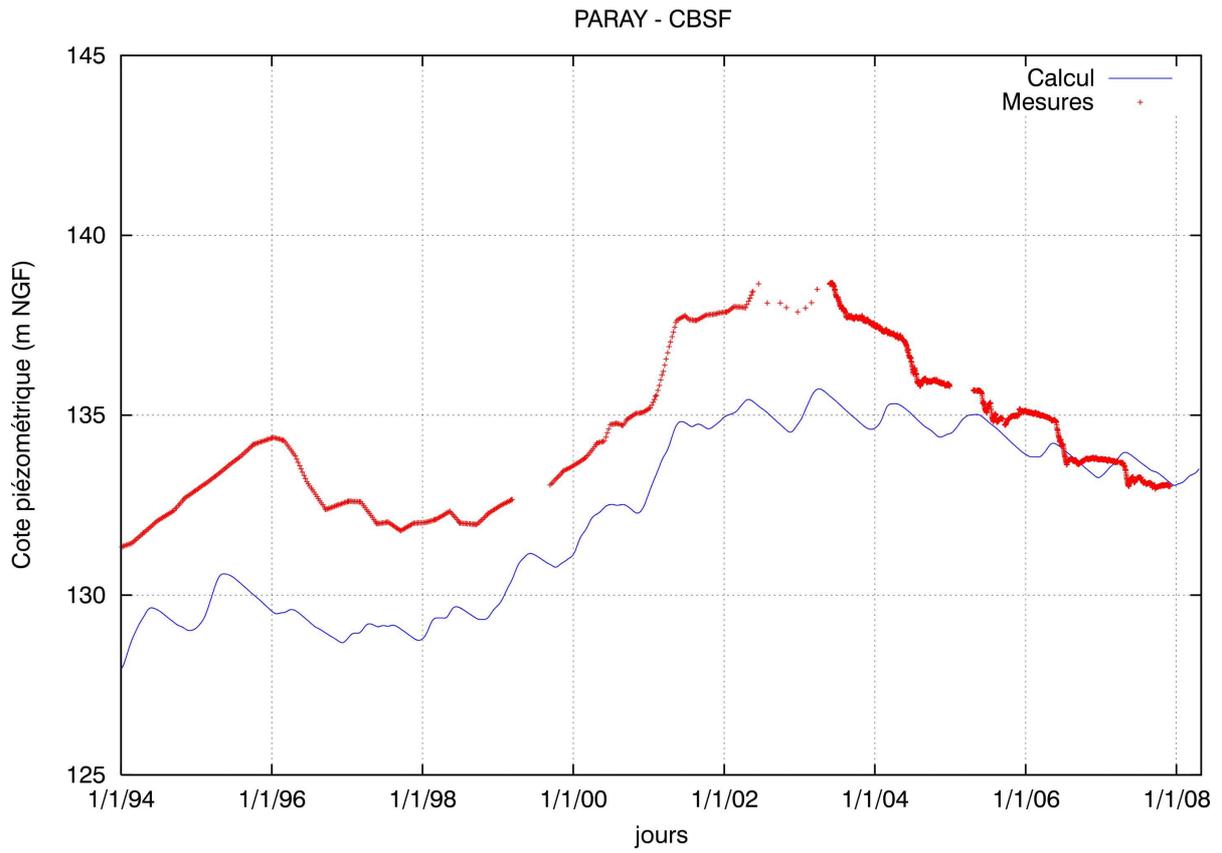


Figure 72 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Brie et des Sables de Fontainebleau : piézomètre de Paray-Douaville (Yvelines)

7.3 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES CALCAIRES DE CHAMPIGNY

La figure 73 présente la localisation géographique des piézomètres atteignant la nappe des Calcaires de Champigny et retenus lors du calage du modèle en régime transitoire.

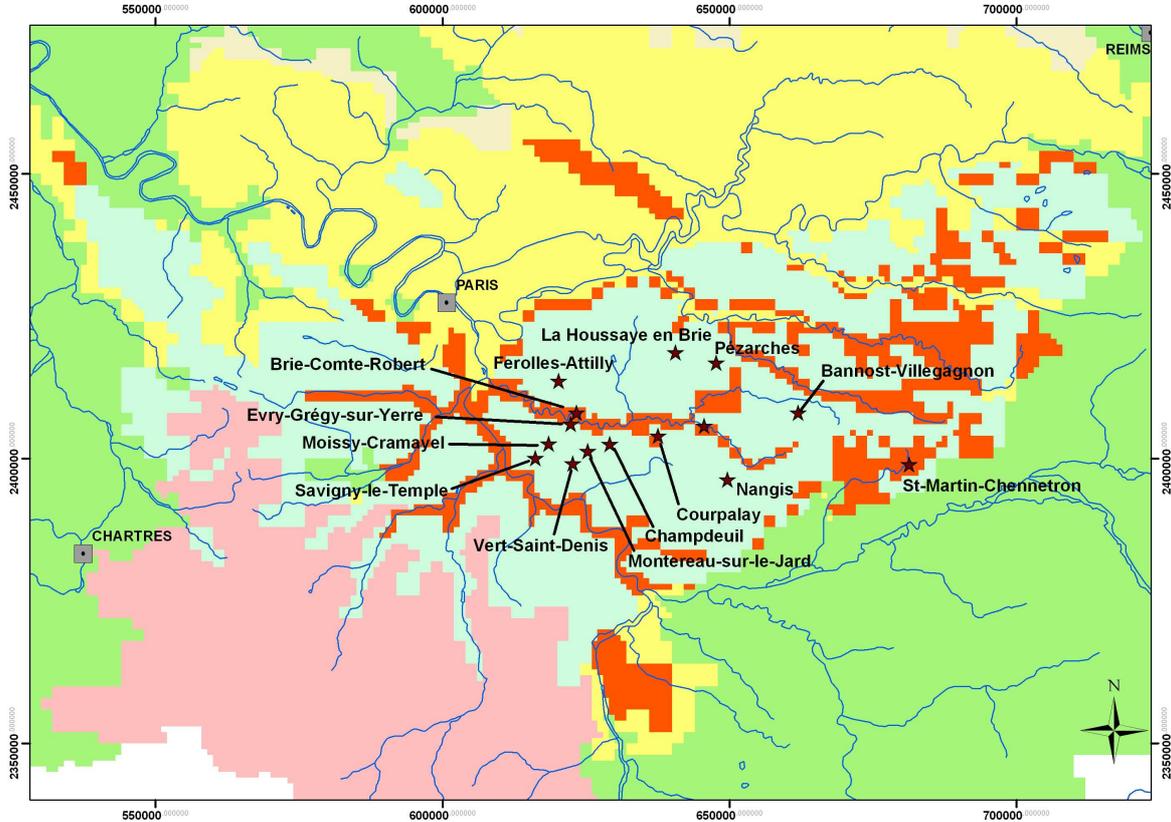


Figure 73 : nappe des Calcaires de Champigny - situation géographique des piézomètres retenus

Les figures 74 à 87 présentent la comparaison des piézométries mesurées aux différents ouvrages et celles calculées par le modèle dans la maille correspondante sur la période 1994-2005. Certains piézomètres n'ont été installés et suivis que depuis 2002. La comparaison mesure-calcul n'est donc effectuée que sur la période 2002-2006.

FEROLLES-ATTILLY - CHAMPIGNY

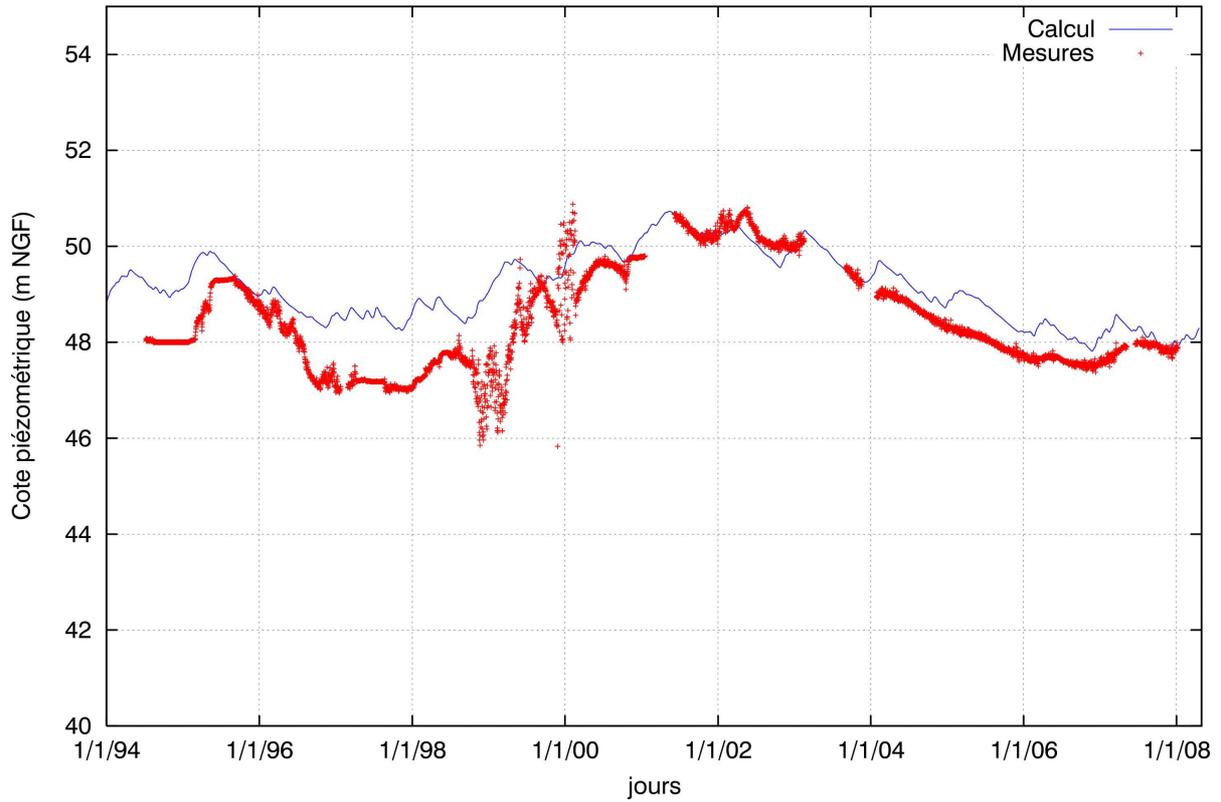


Figure 74 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Ferolles-Attilly (Seine et Marne)

BRIE-COMTE-ROBERT - CHAMPIGNY

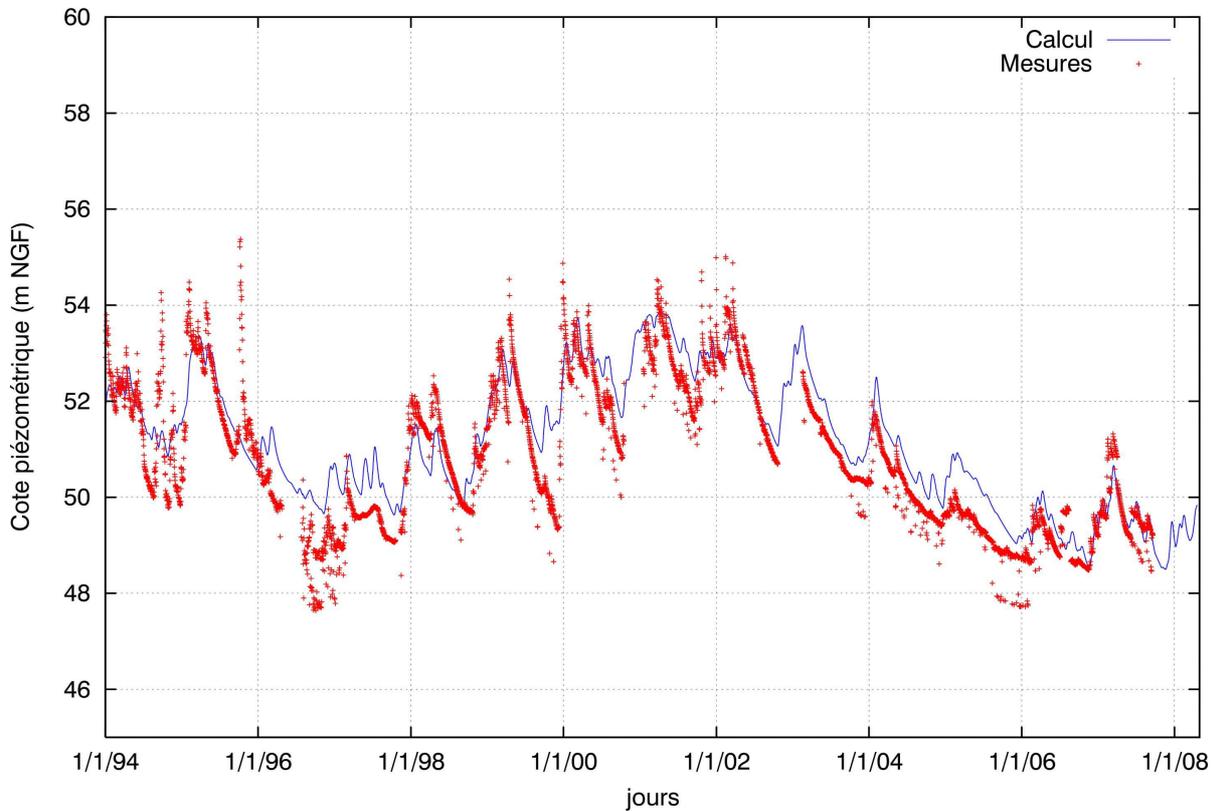


Figure 75 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Brie-Comte-Robert (Seine et Marne)

VERNEUIL L'ETANG - CHAMPIGNY

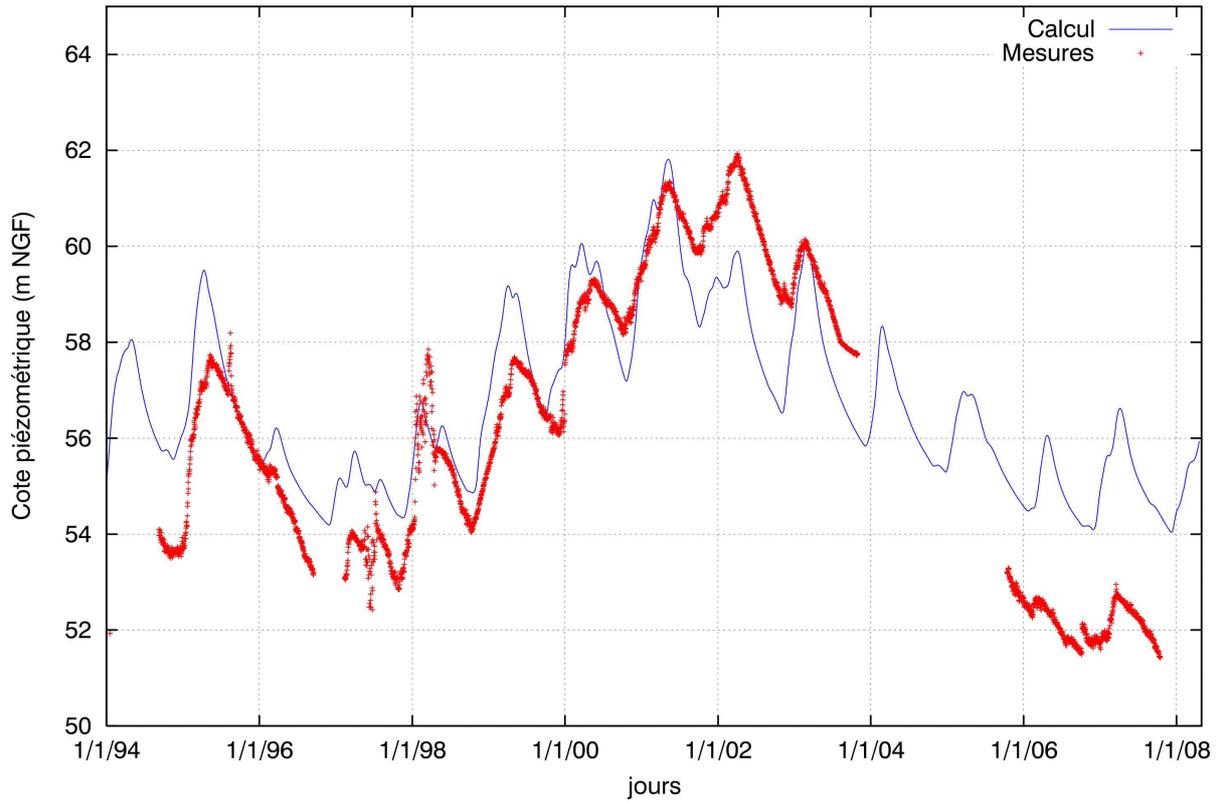


Figure 76 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Verneuil l'Etang (Seine et Marne)

LA HOUSSAYE EN BRIE - CHAMPIGNY

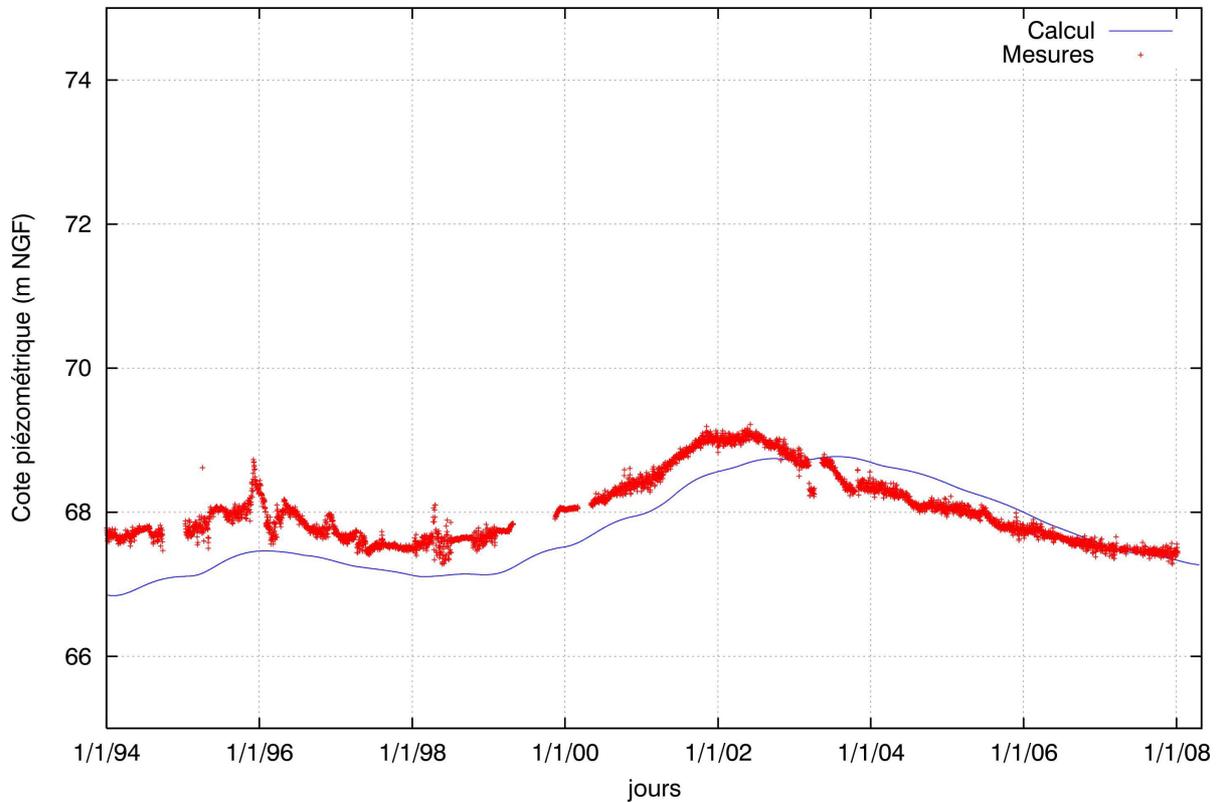


Figure 77 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de la Houssaye-en-Brie (Seine et Marne)

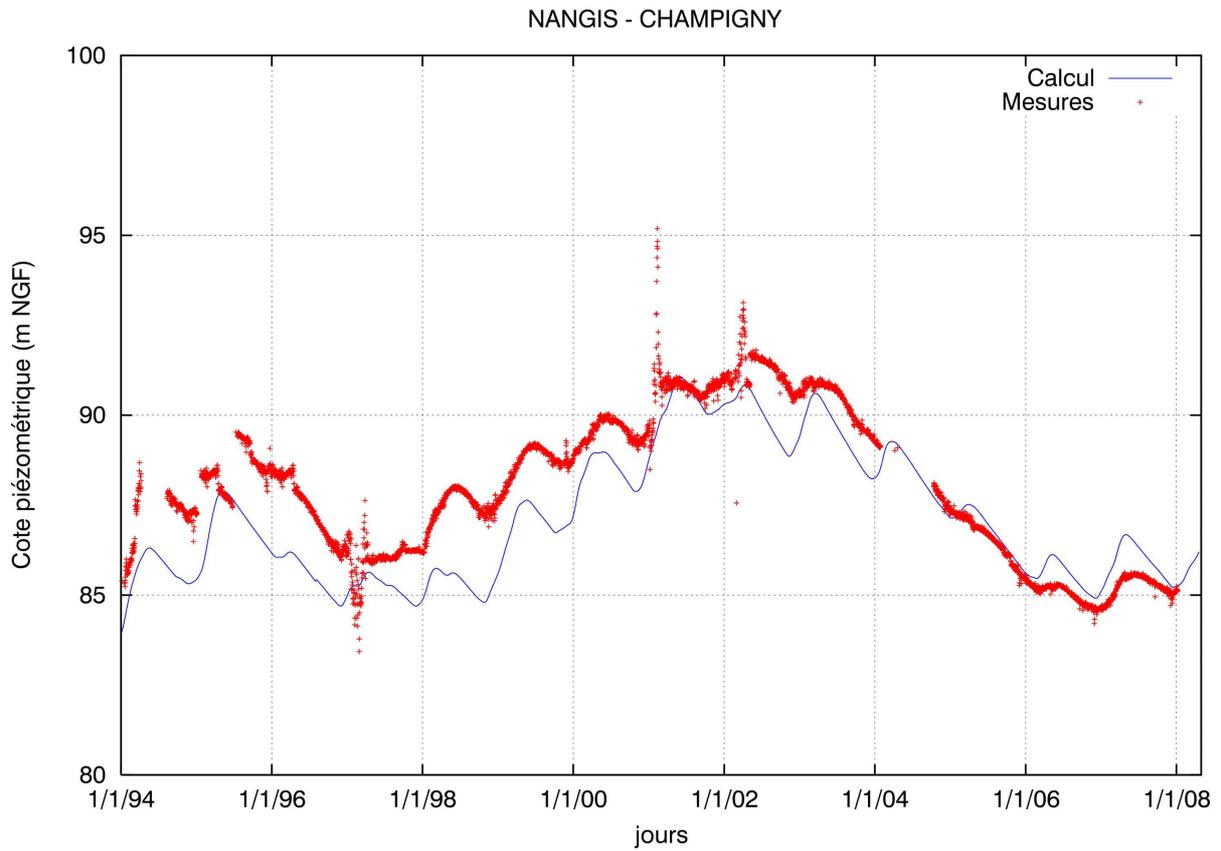


Figure 78 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Nangis (Seine et Marne)

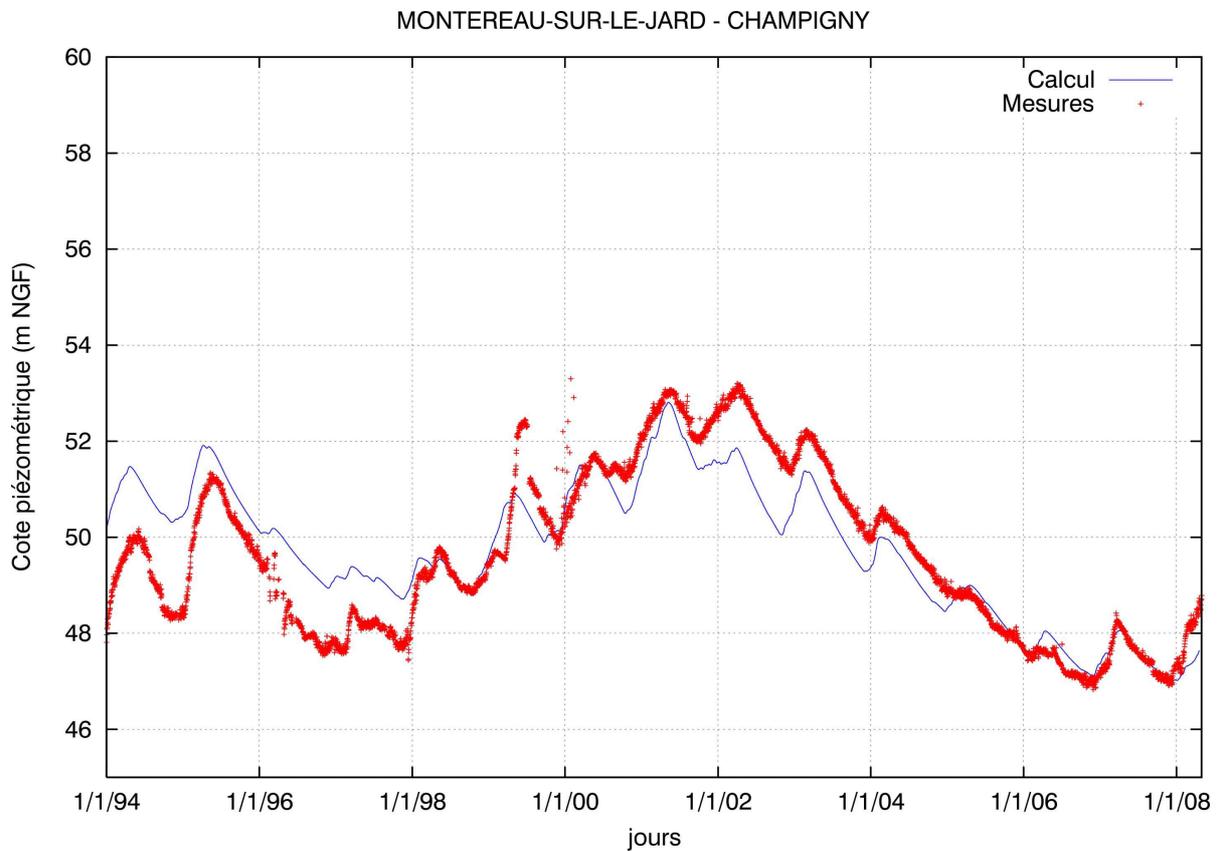


Figure 79 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Montereau sur le Jard (Seine et Marne)

ST-MARTIN-CHENNETRON - CHAMPIGNY

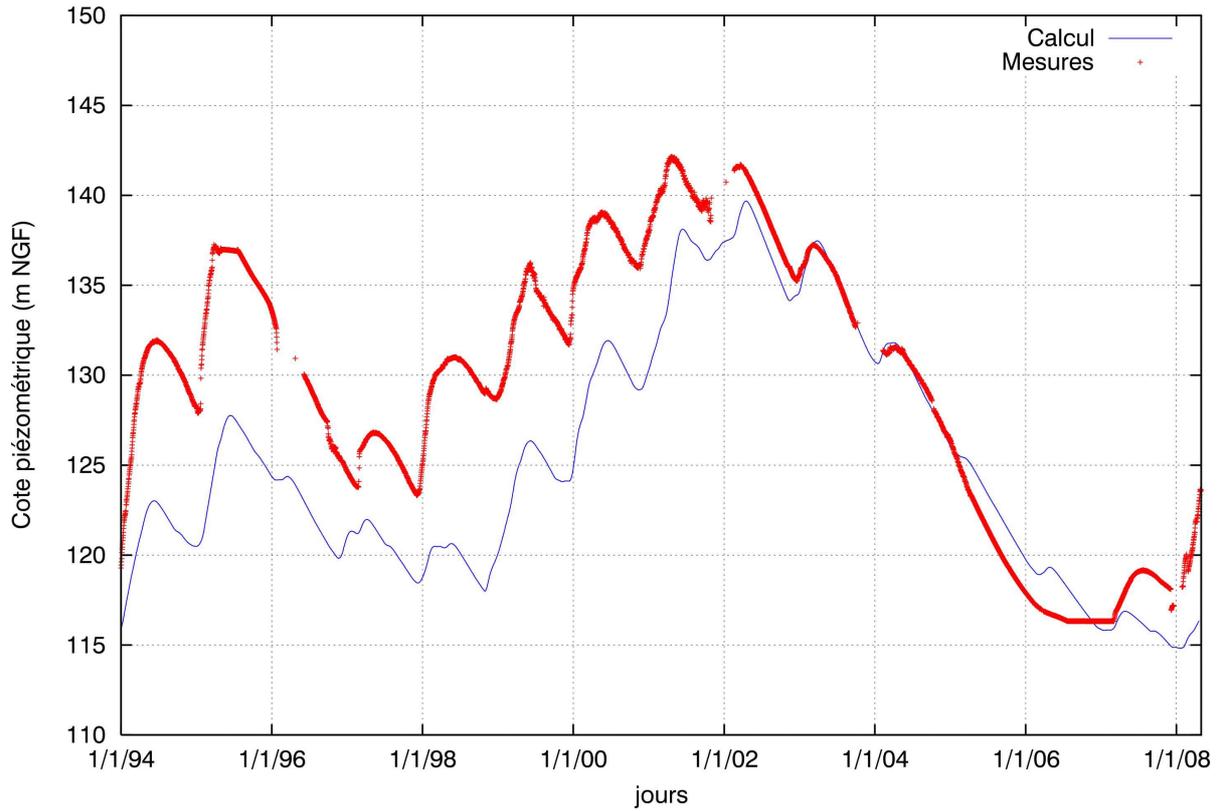


Figure 80 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Saint-Martin-Chennetron (Seine et Marne)

CHAMPDEUIL - CHAMPIGNY

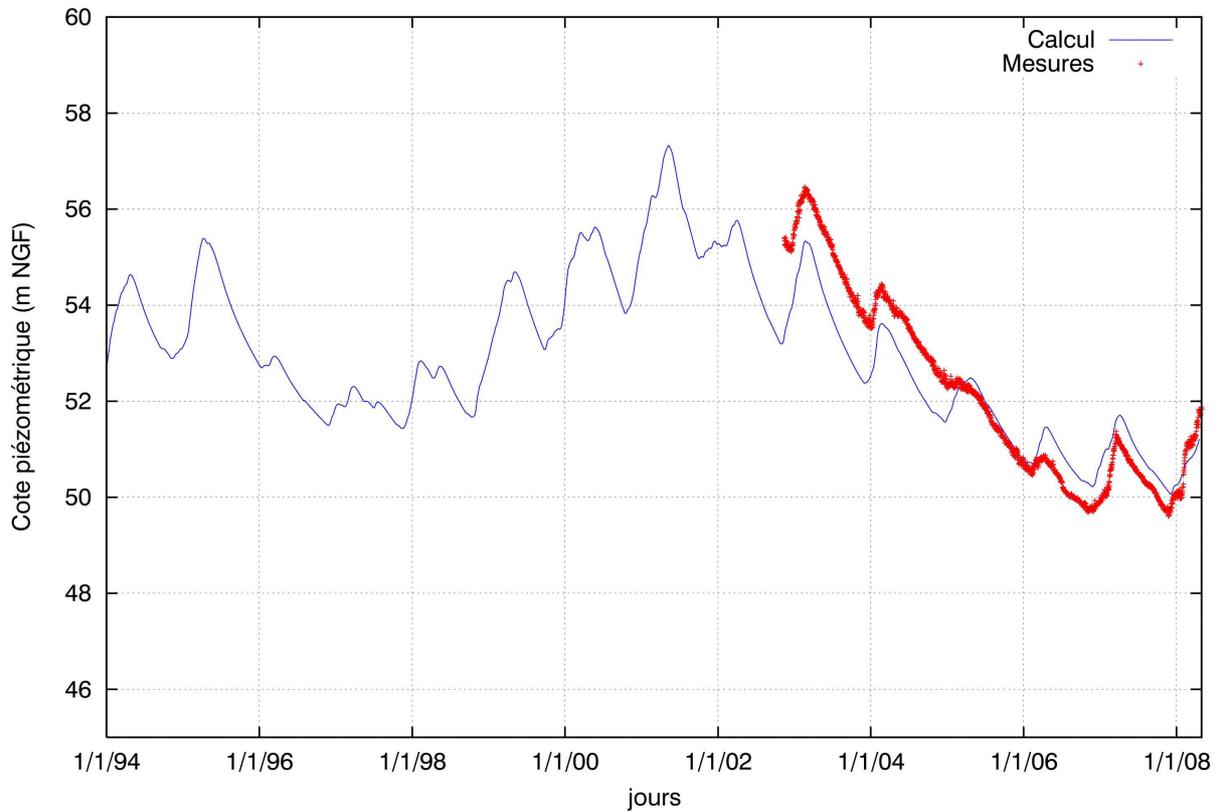


Figure 81 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Champdeuil (Seine et Marne)

COURPALAY - CHAMPIGNY

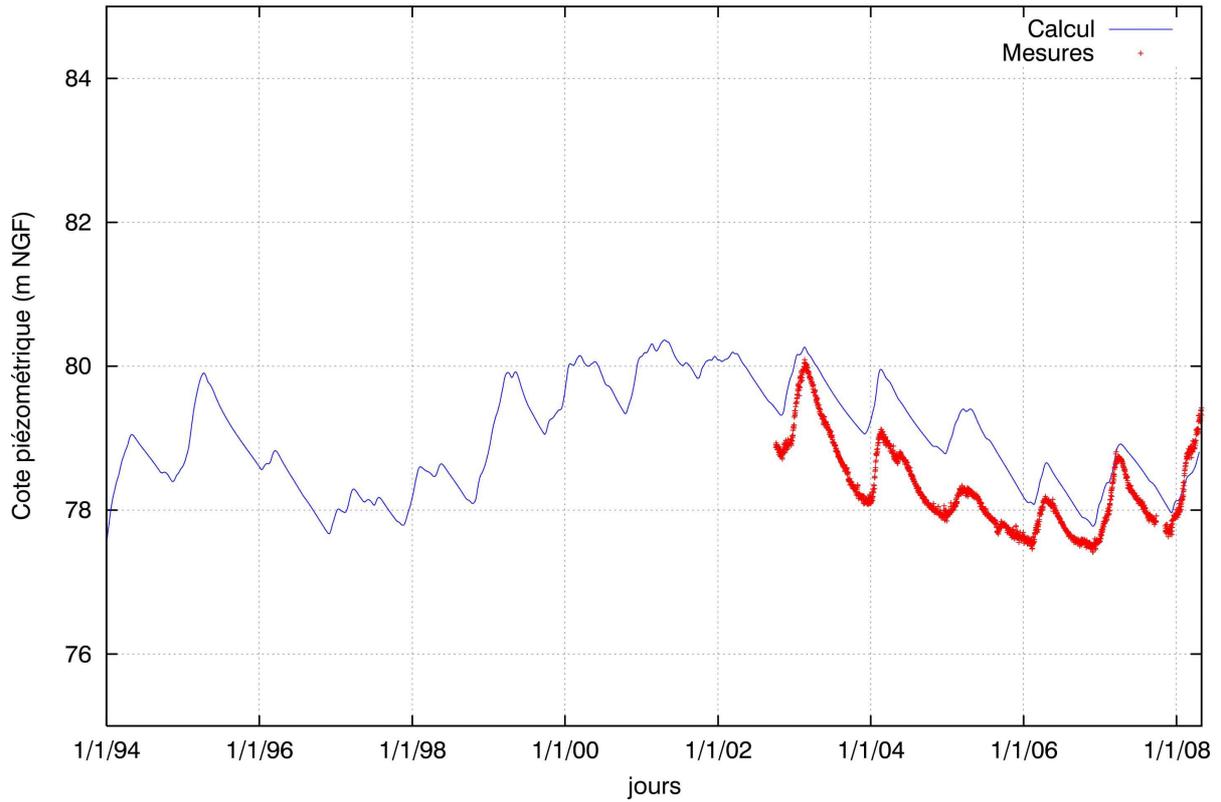


Figure 82 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Courpalay (Seine et Marne)

EVRY-GREGY-sur-Yerre - CHAMPIGNY

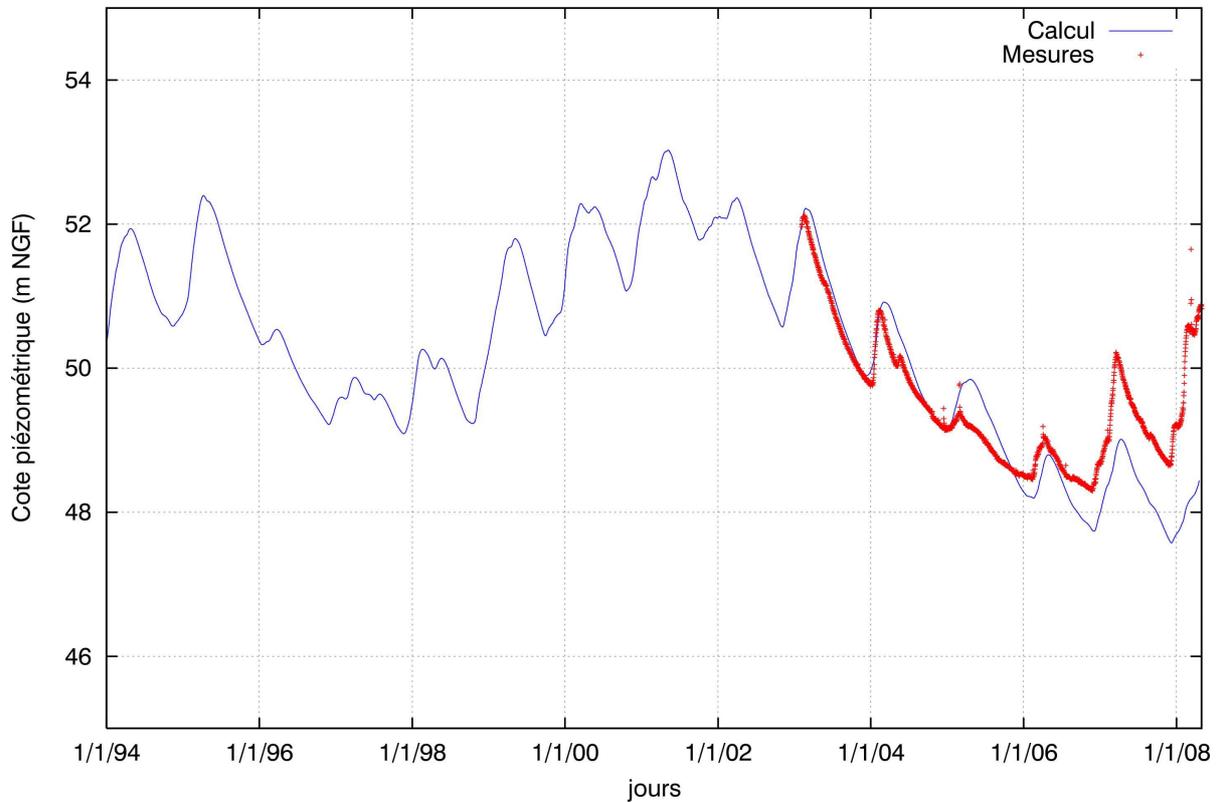


Figure 83 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Evry-Grégy sur Yerre (Seine et Marne)

MOISSY-CRAMAYEL - CHAMPIGNY

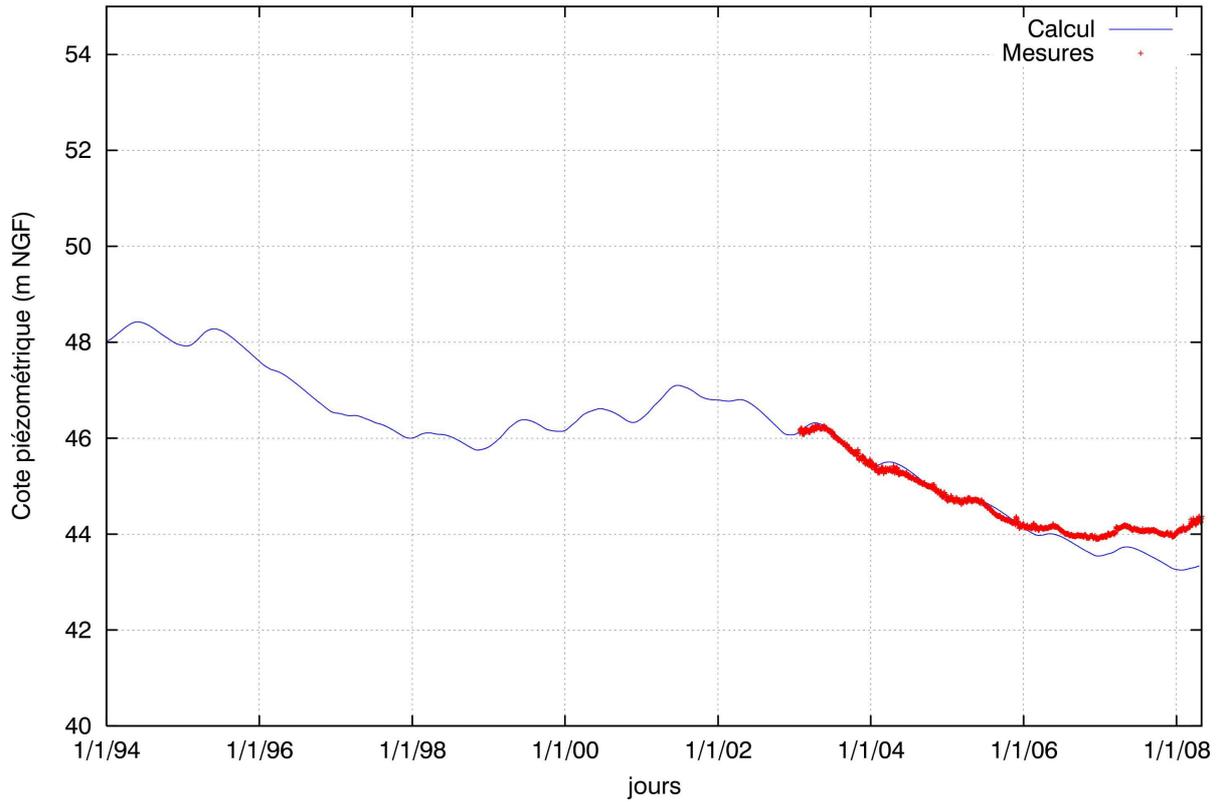


Figure 84 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Moissy-Cramayel (Seine et Marne)

PEZARCHES - CHAMPIGNY

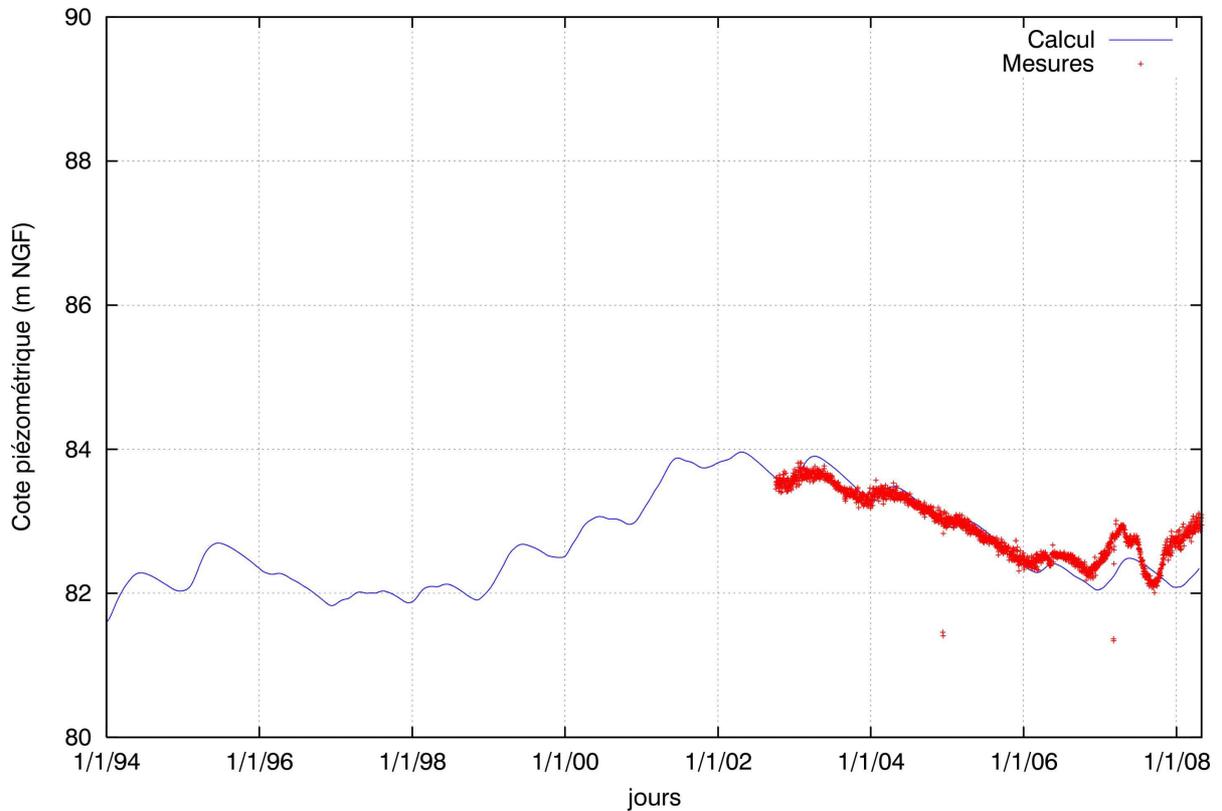


Figure 85 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Pezarches (Seine et Marne)

SAVIGNY LE TEMPLE - CHAMPIGNY

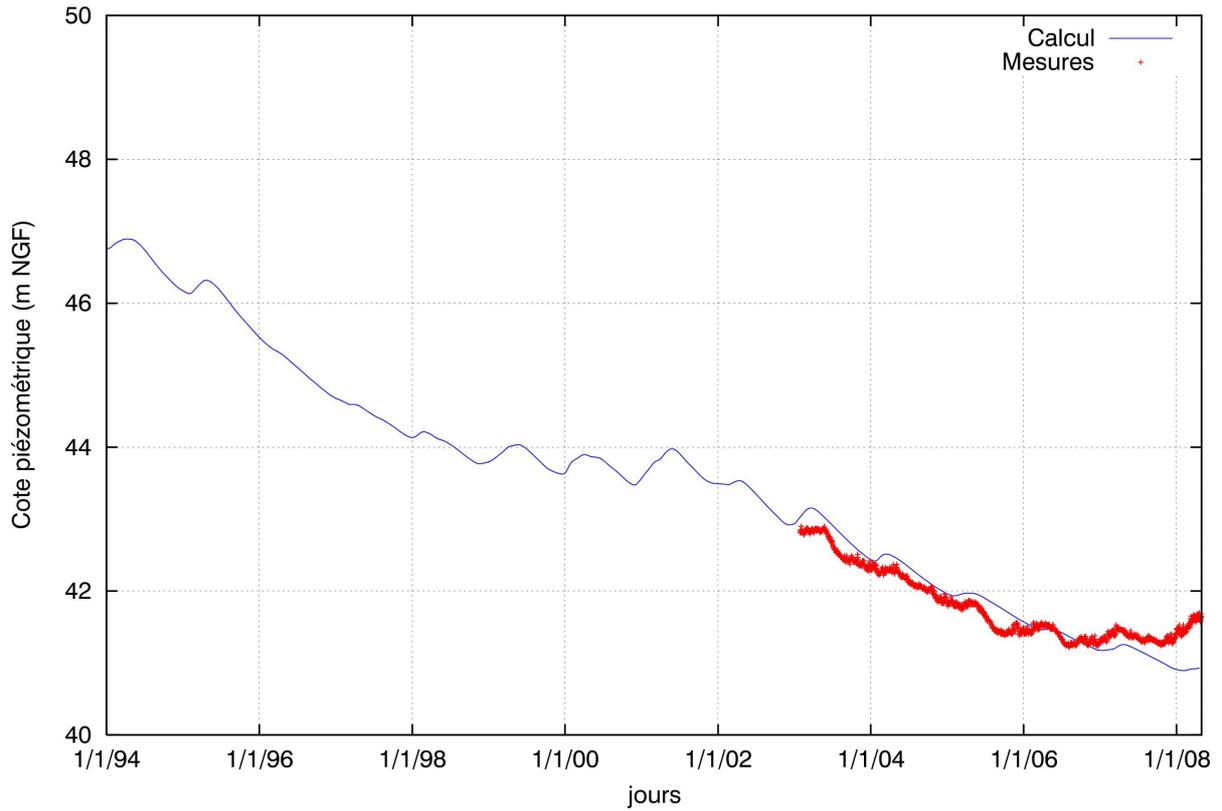


Figure 86 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Savigny-le-Temple (Seine et Marne)

VERT ST DENIS - CHAMPIGNY

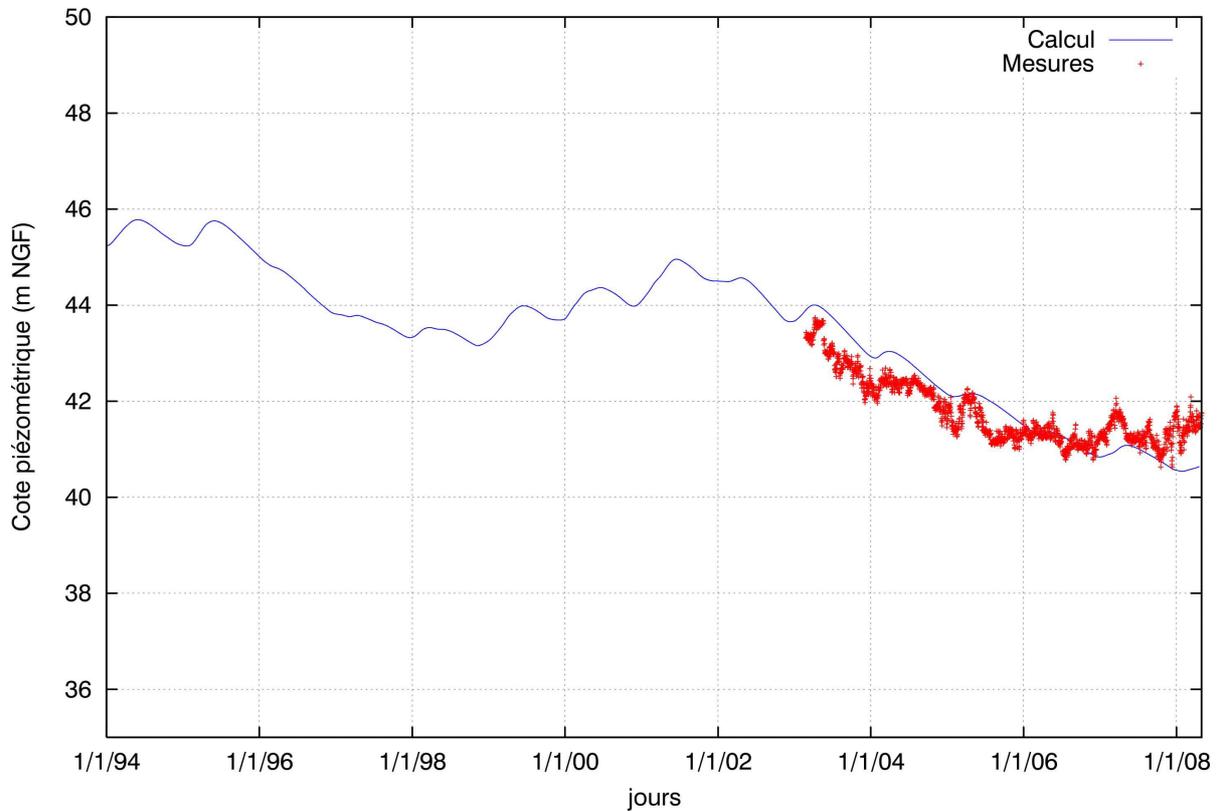


Figure 87 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe des Calcaires de Champigny : piézomètre de Vert-Saint-Denis (Seine et Marne)

7.4 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DES FORMATIONS DU LUTETIEN ET DE L'YPRESIEN

La figure 88 présente la localisation géographique des piézomètres atteignant la nappe des formations du Lutétien et/ou de l'Yprésien et retenus lors du calage du modèle en régime transitoire.

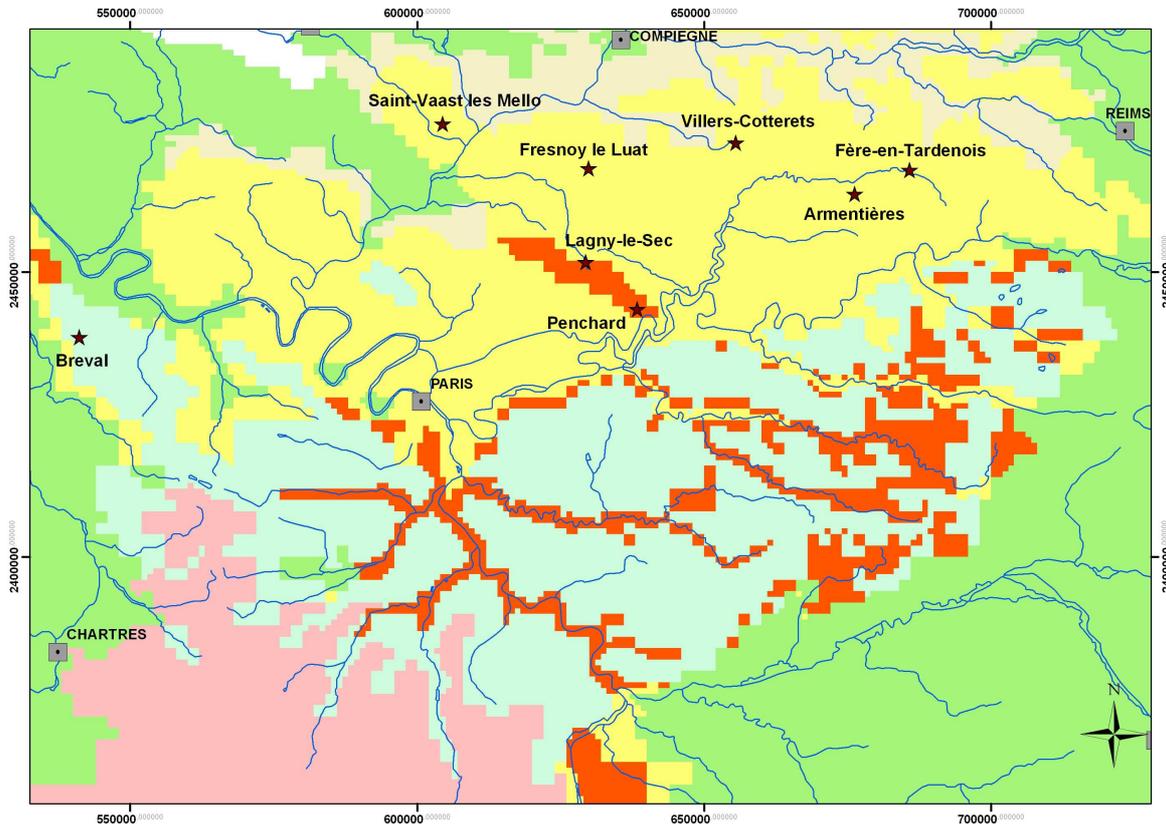


Figure 88 : formations aquifères du Lutétien et de l'Yprésien - situation géographique des piézomètres retenus

Les figures 89 à 96 présentent la comparaison des piézométries mesurées aux différents ouvrages et celles calculées par le modèle dans la maille correspondante sur la période 1994-2005.

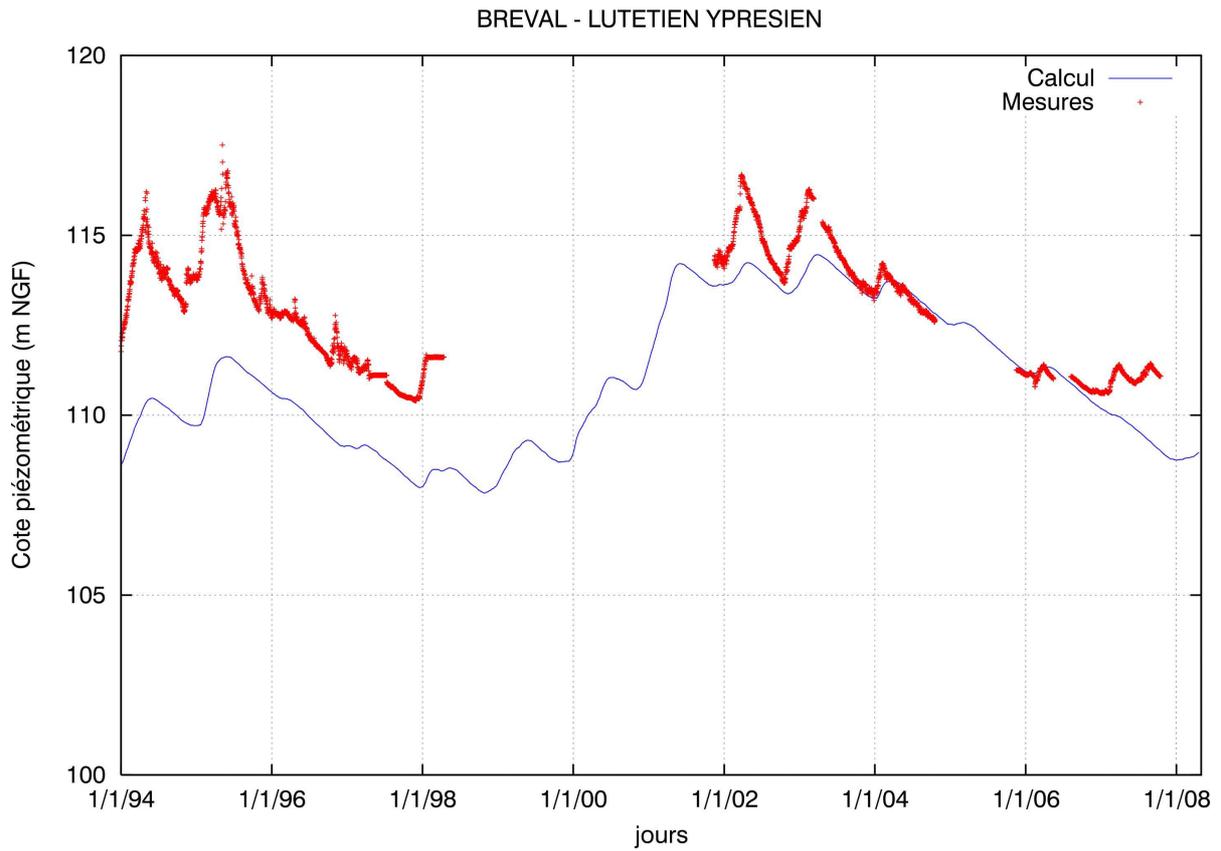


Figure 89 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Bréval (Yvelines)

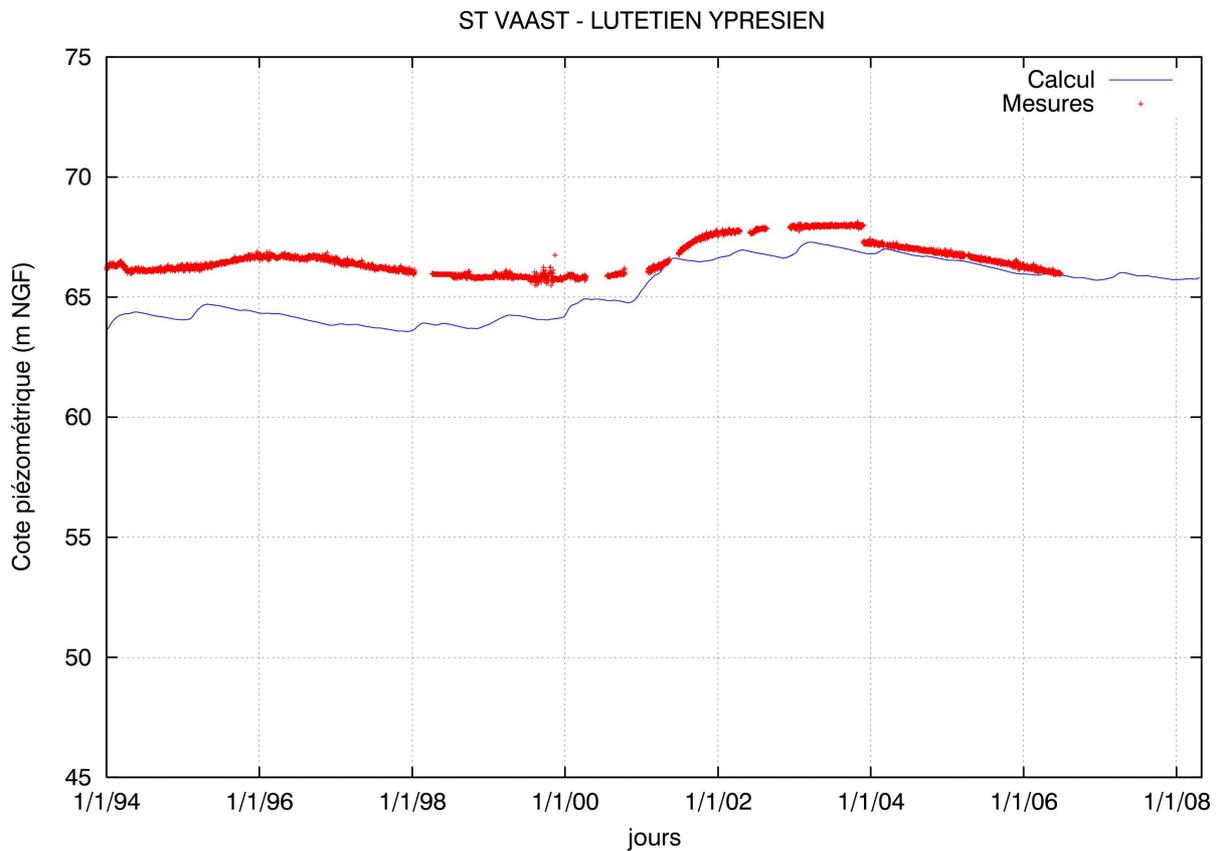


Figure 90 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Saint-Vaast les Mello (Oise)

FRESNOY LE LUAT - LUTETIEN YPRESIEN

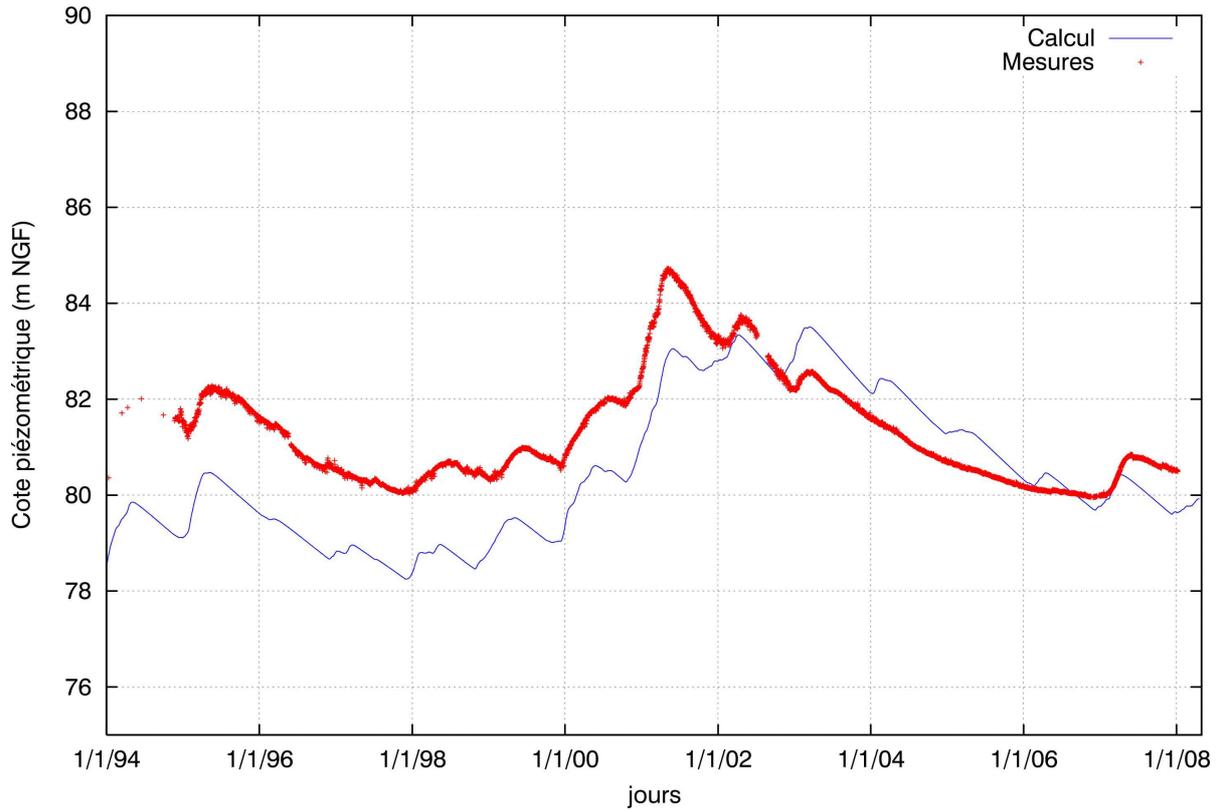


Figure 91 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Fresnoy-le-Luat (Oise)

ARMENTIERES - LUTETIEN YPRESIEN

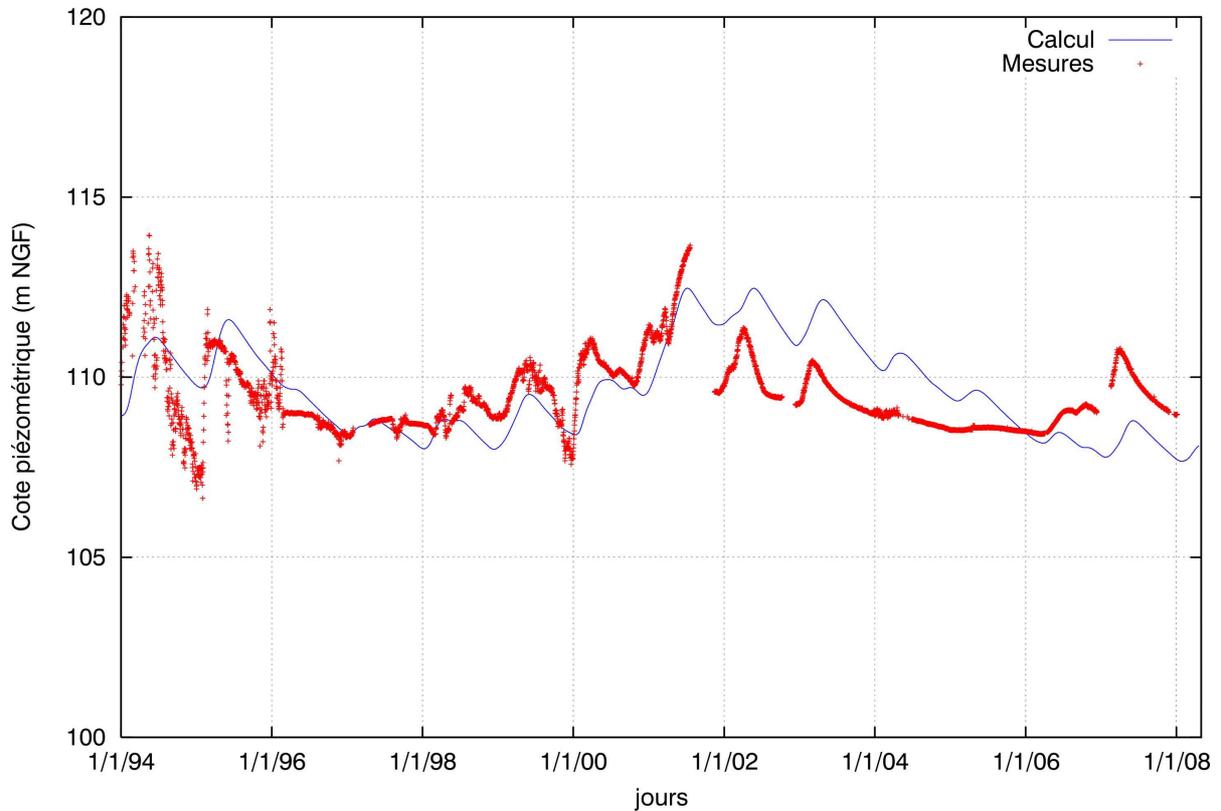


Figure 92 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre d'Armentières sur Ourcq (Aisne)

FERE EN TARDENOIS - LUTETIEN YPRESIEN

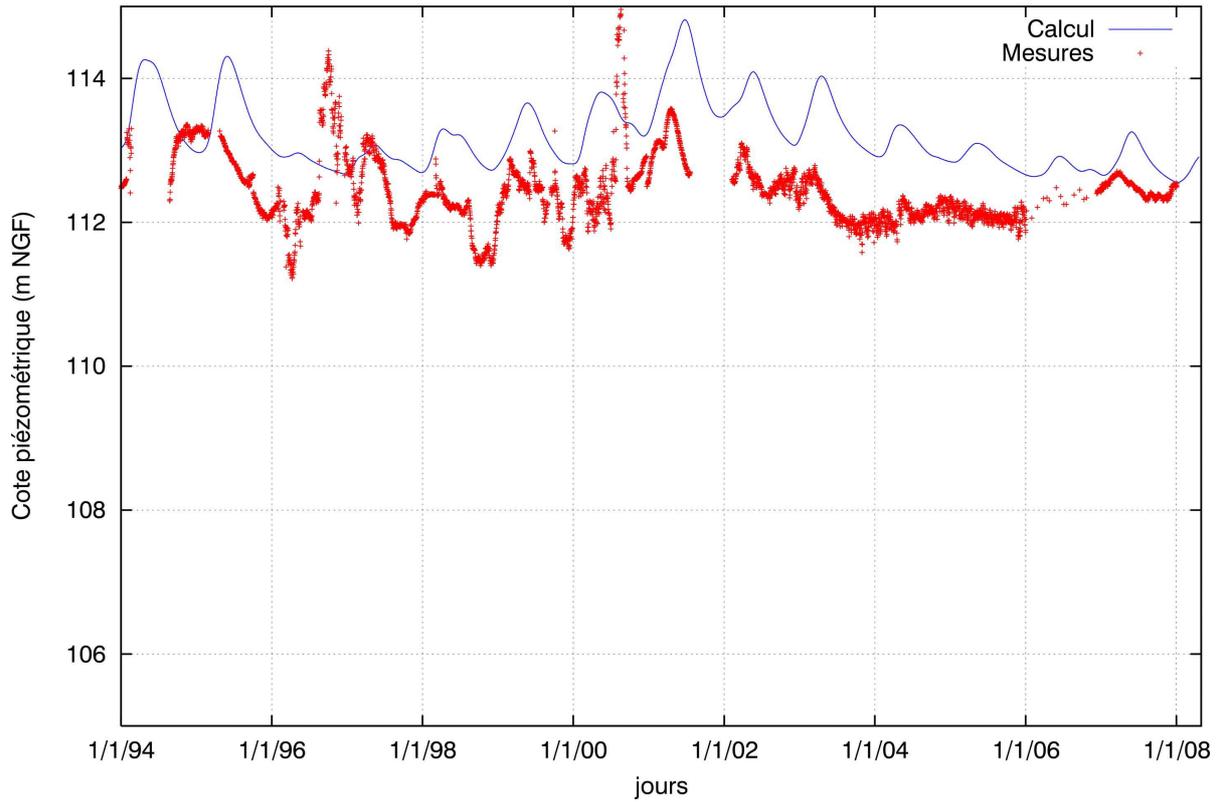


Figure 93 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Fère en Tardenois (Aisne)

LAGNY LE SEC - LUTETIEN YPRESIEN

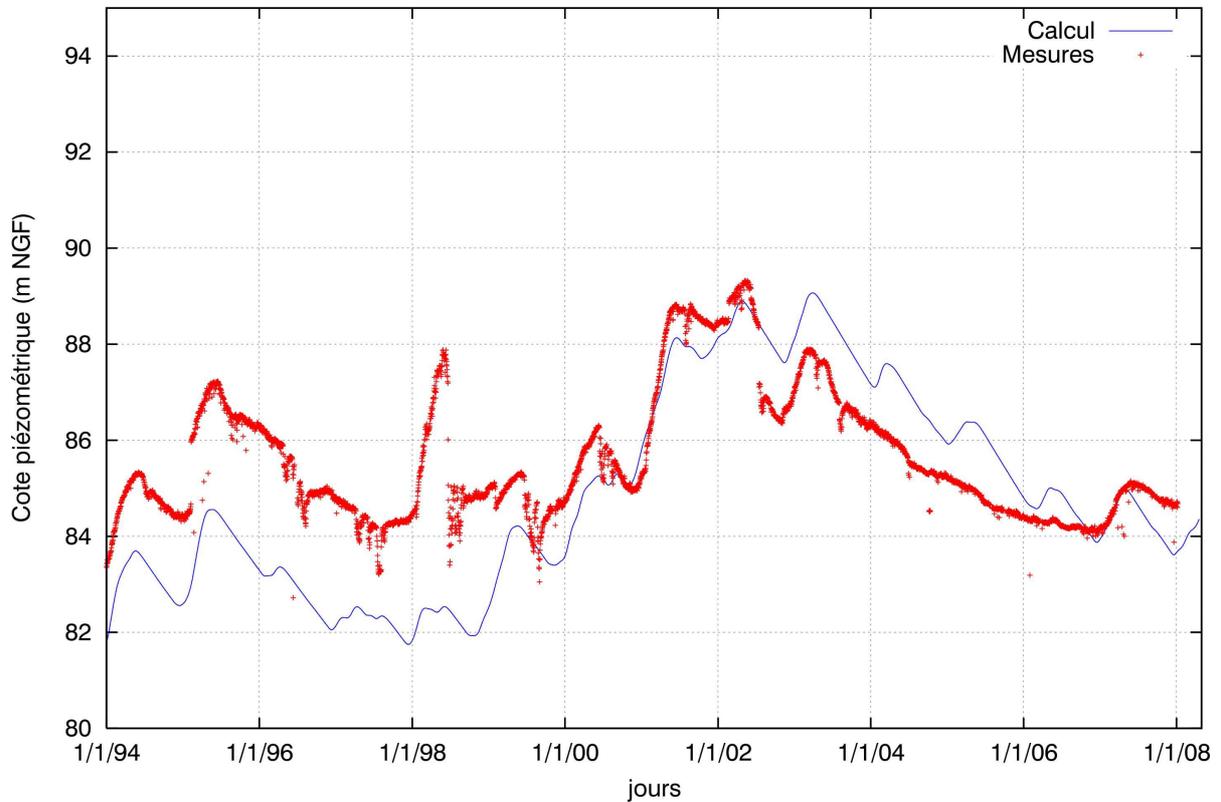


Figure 94 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Lagny le Sec (Oise)

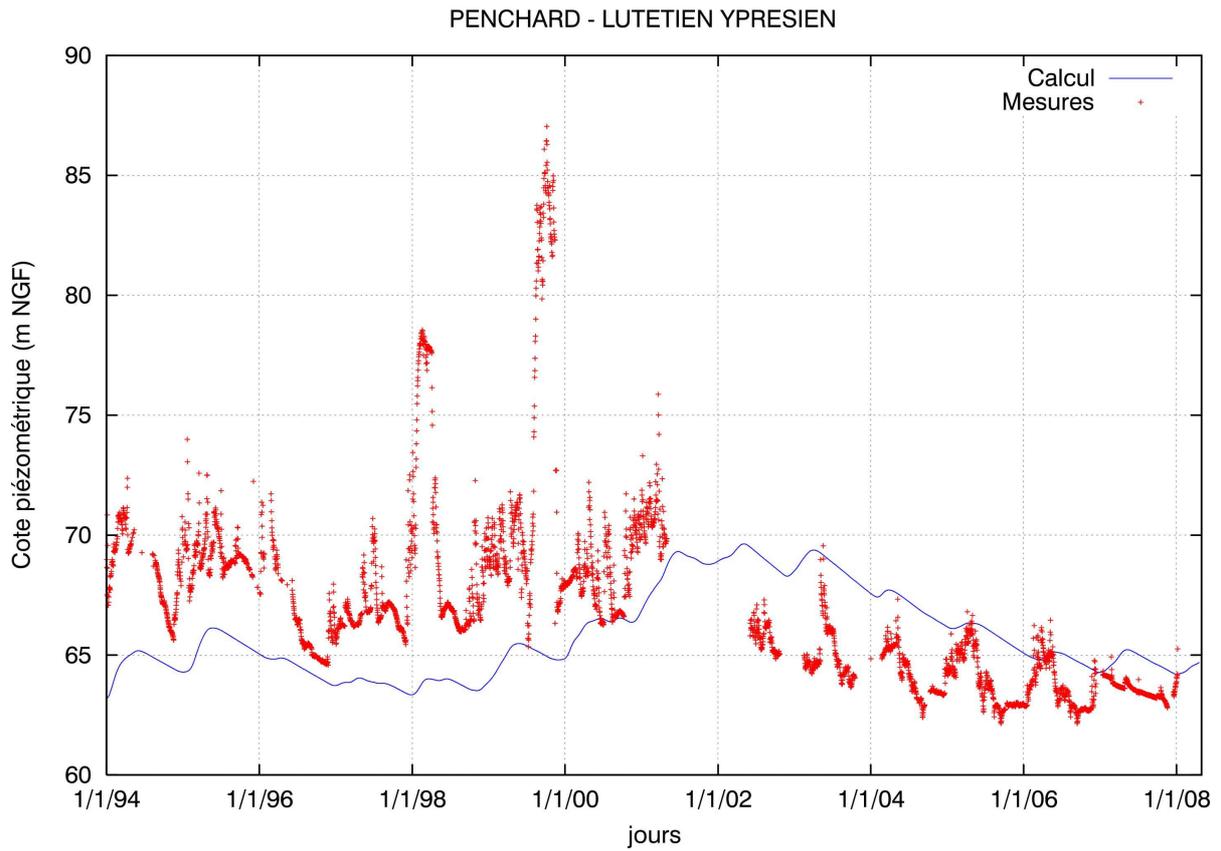


Figure 95 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Penchard (Seine et Marne)

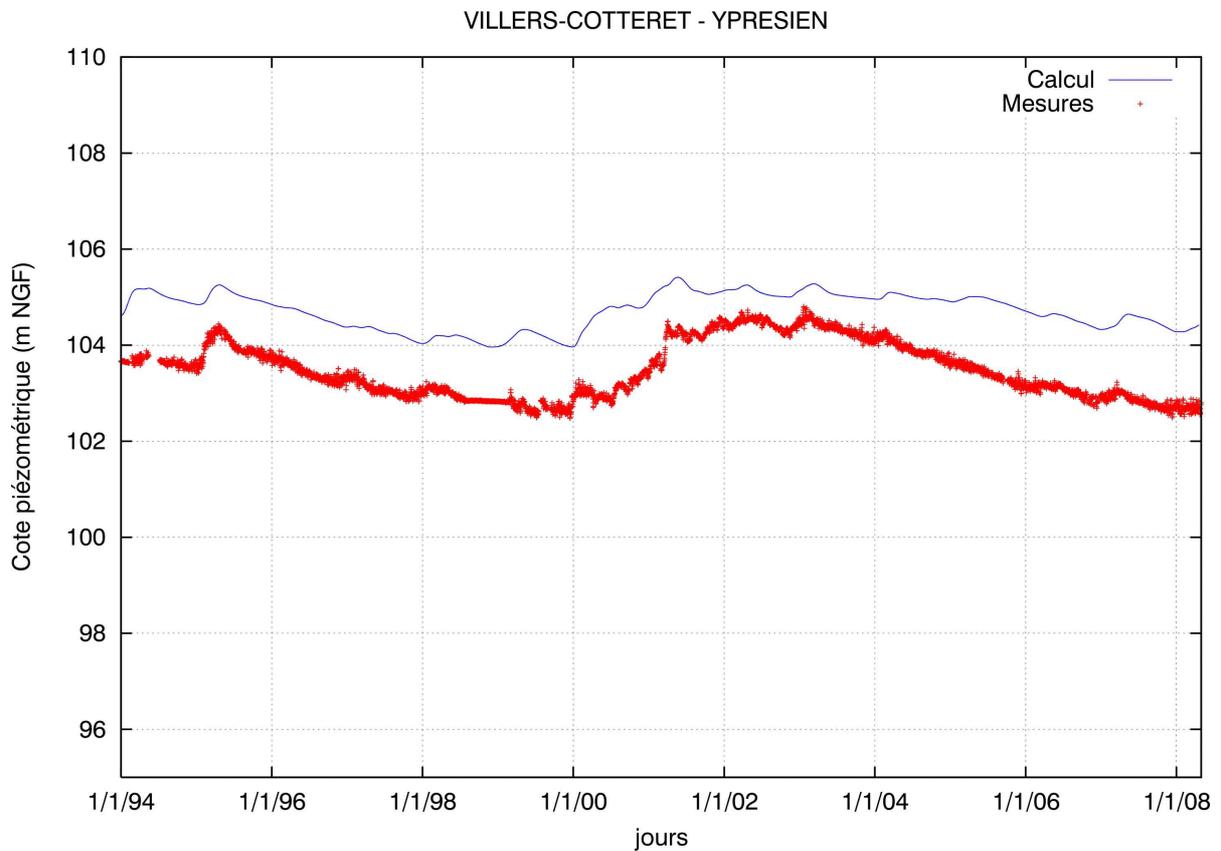


Figure 96 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans les formations du Lutétien/Yprésien : piézomètre de Villers-Cotterets (Aisne)

7.5 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DE LA FORMATION DU THANETIEN

La figure 97 présente la localisation géographique du seul piézomètre au Thanétien retenu lors du calage du modèle en régime transitoire. La figure 98 présente les évolutions piézométriques calculées et mesurées sur ce forage.

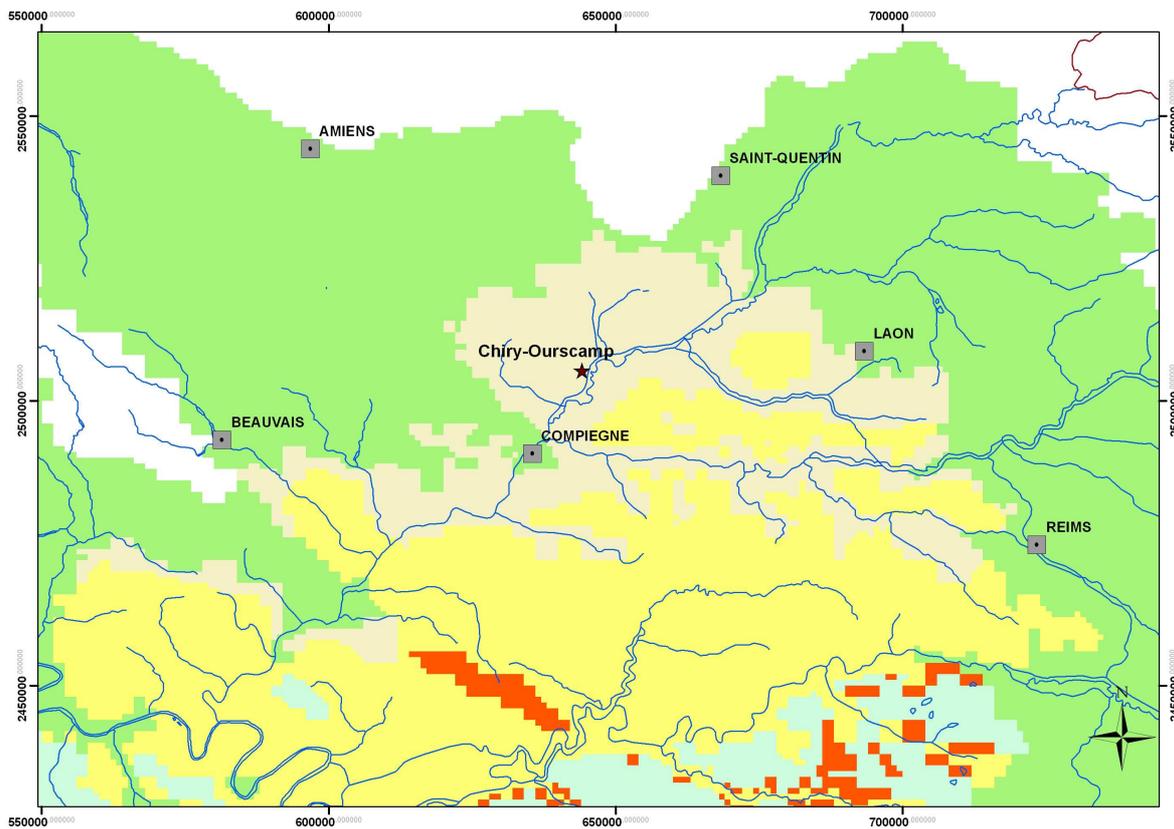


Figure 97 : formation aquifère du Thanétien - situation géographique du piézomètre retenu

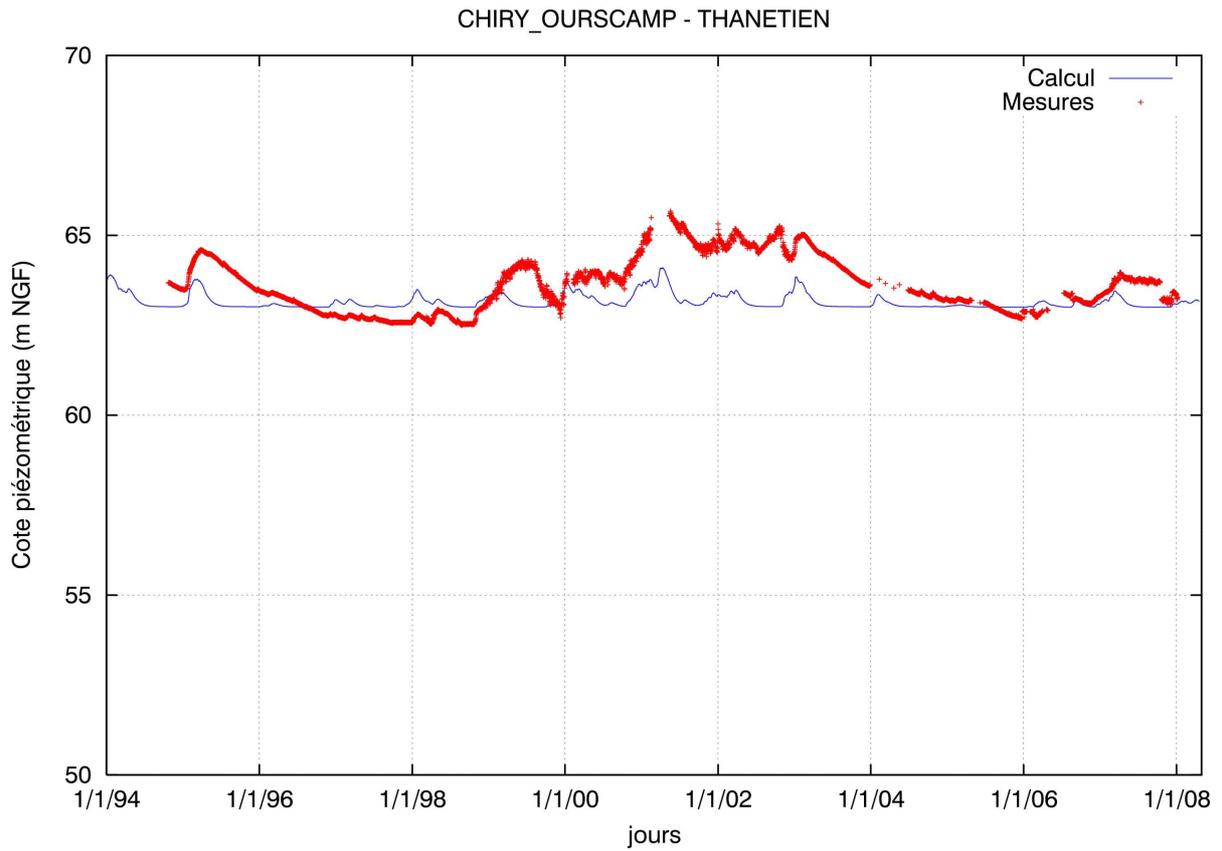


Figure 98 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la formation du Thanétien : piézomètre de Chiry-Ourscamp (Oise)

7.6 EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES CALCULES AUX PIEZOMETRES : NAPPE DE LA CRAIE

La figure 99 présente la localisation géographique des piézomètres atteignant la nappe de la Craie et retenus lors du calage du modèle en régime transitoire.

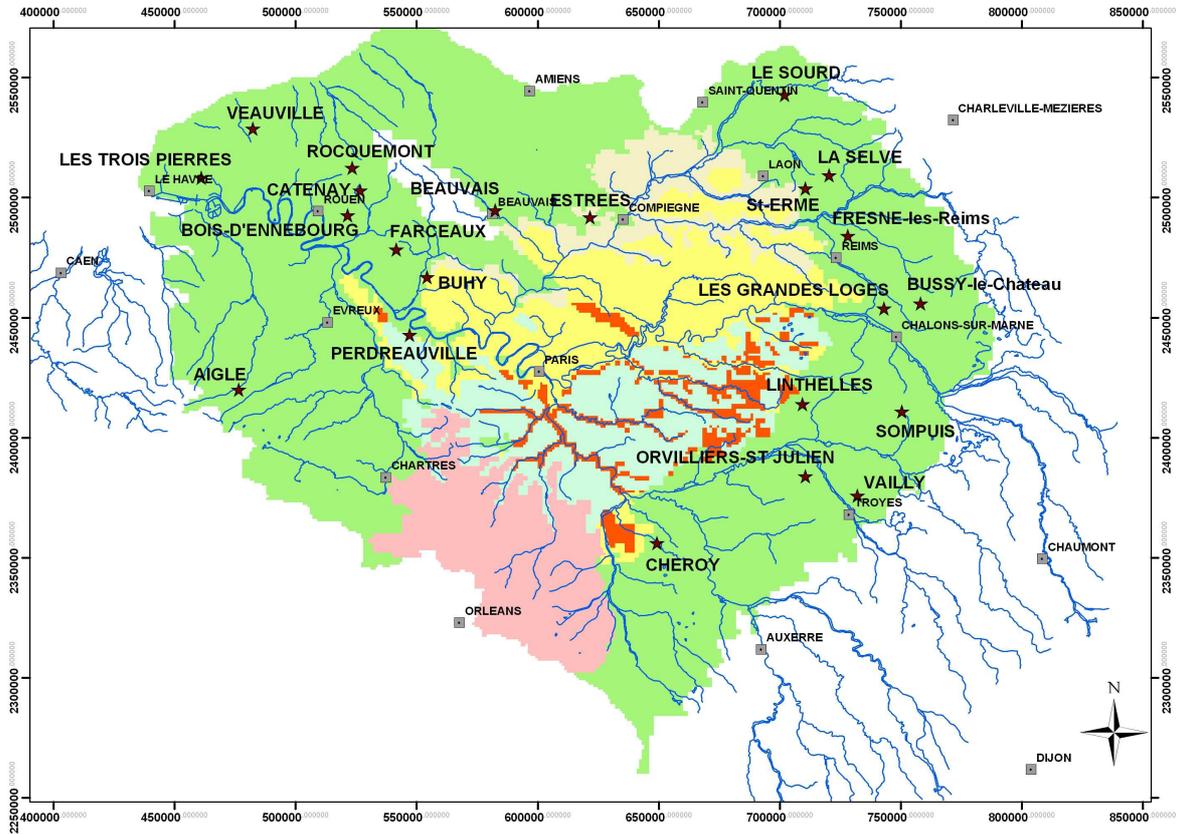


Figure 99 : nappe de la Craie : localisation des piézomètres retenus

Les figures 100 à 120 présentent la comparaison des piézométries mesurées aux différents ouvrages et celles calculées par le modèle dans la maille correspondante sur la période 1994-2005.

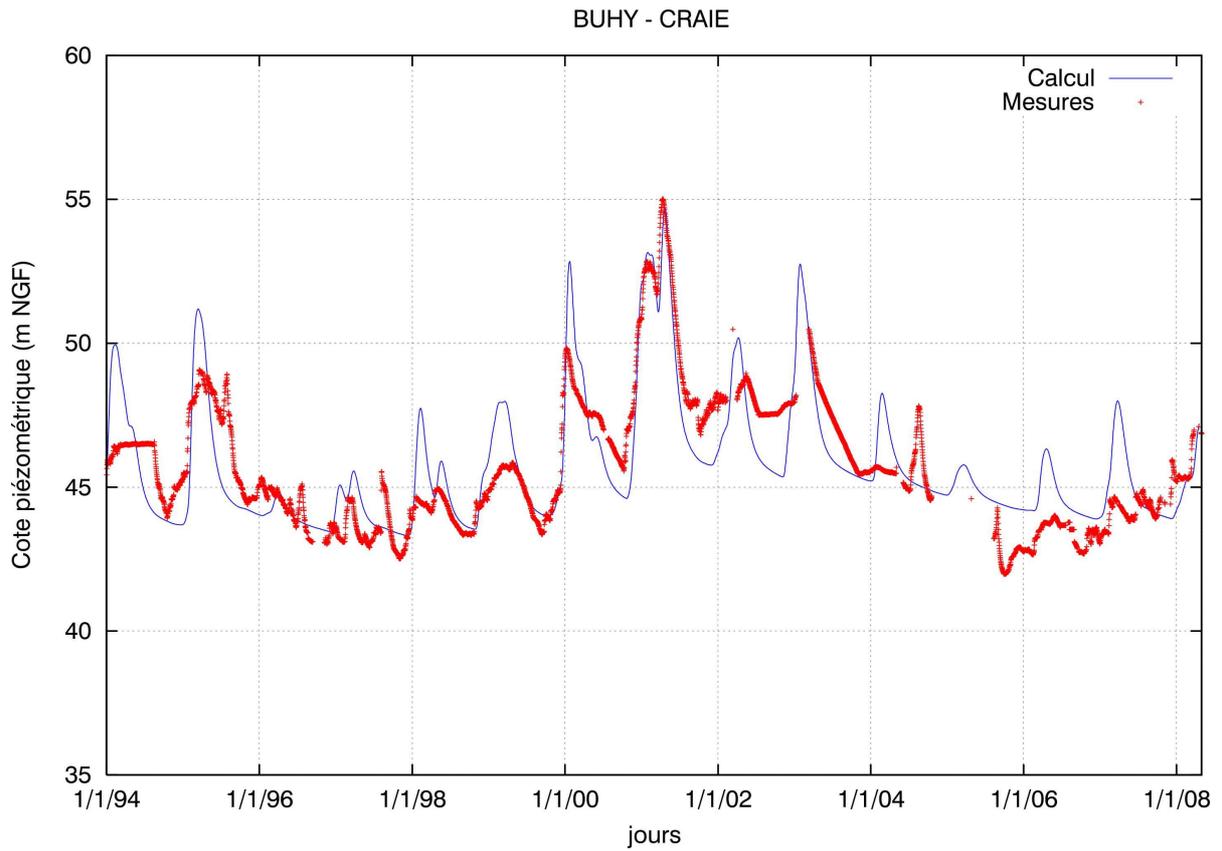


Figure 100 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Buhy (Val d'Oise)

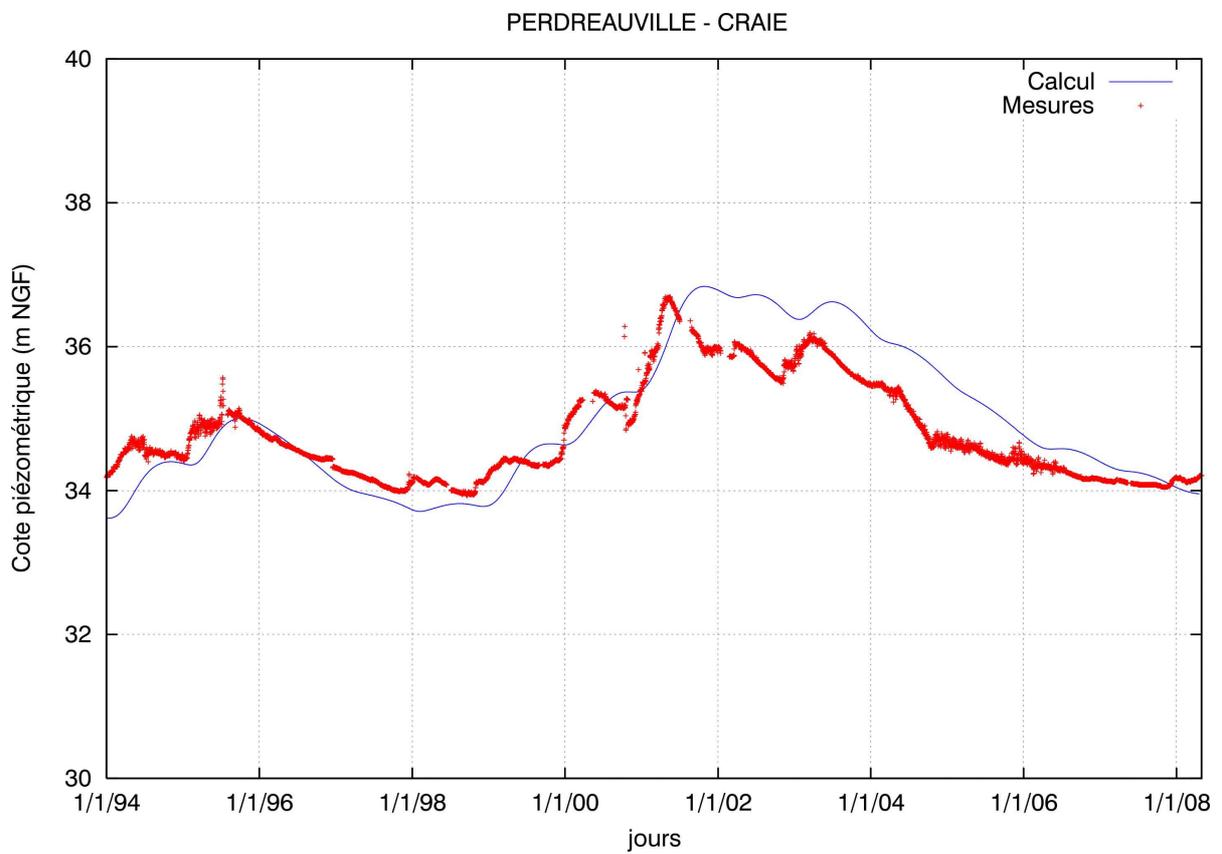


Figure 101 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Perdreauville (Yvelines)

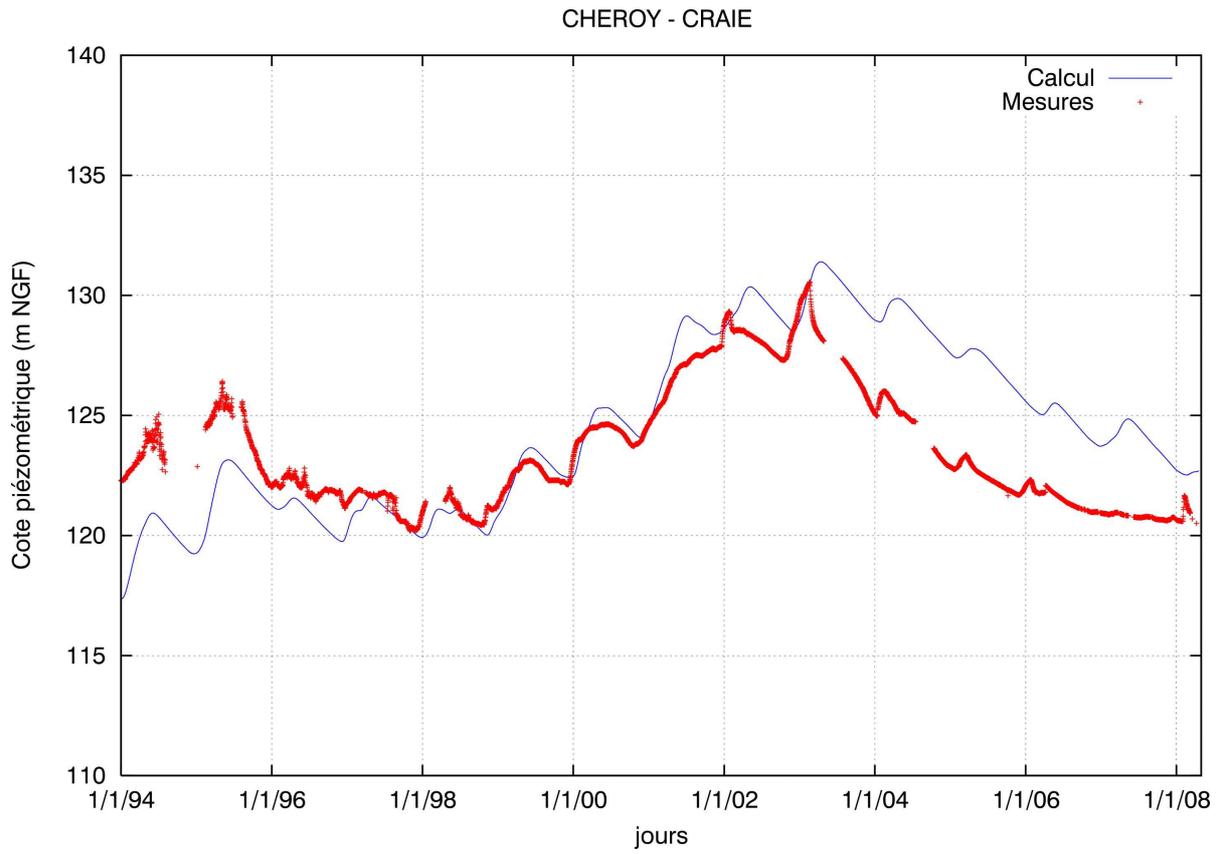


Figure 102 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Chéroy (Yonne)

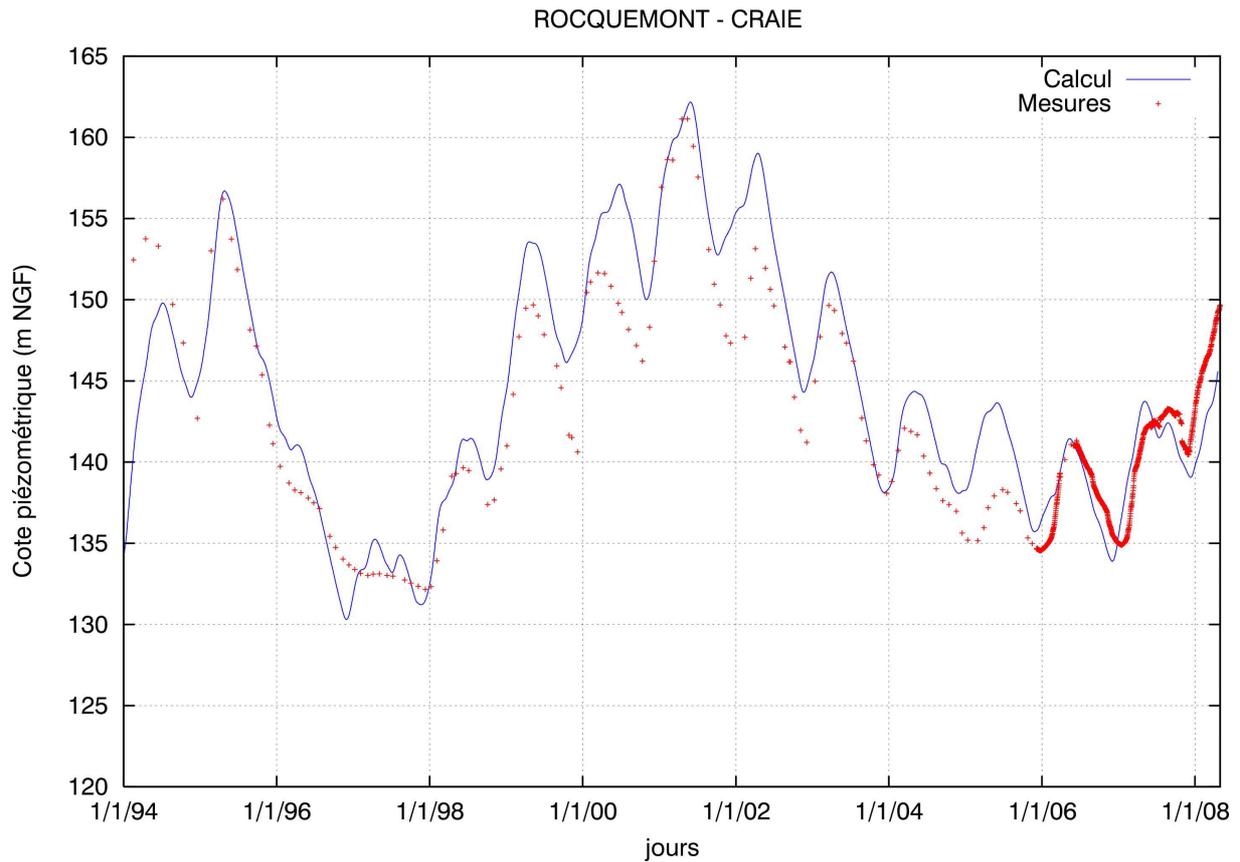


Figure 103 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Rocquemont (Seine-Maritime)

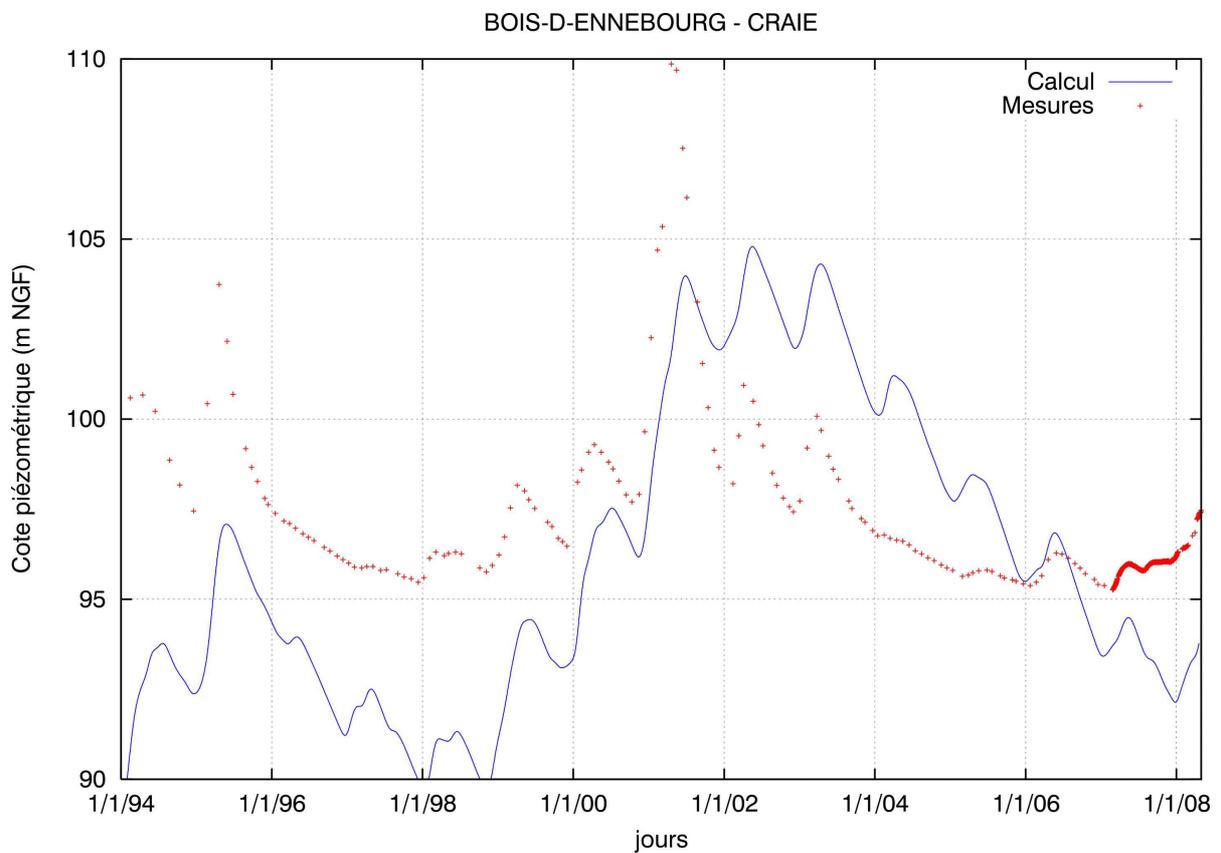


Figure 104 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Bois d'Ennebourg (Seine-Maritime)

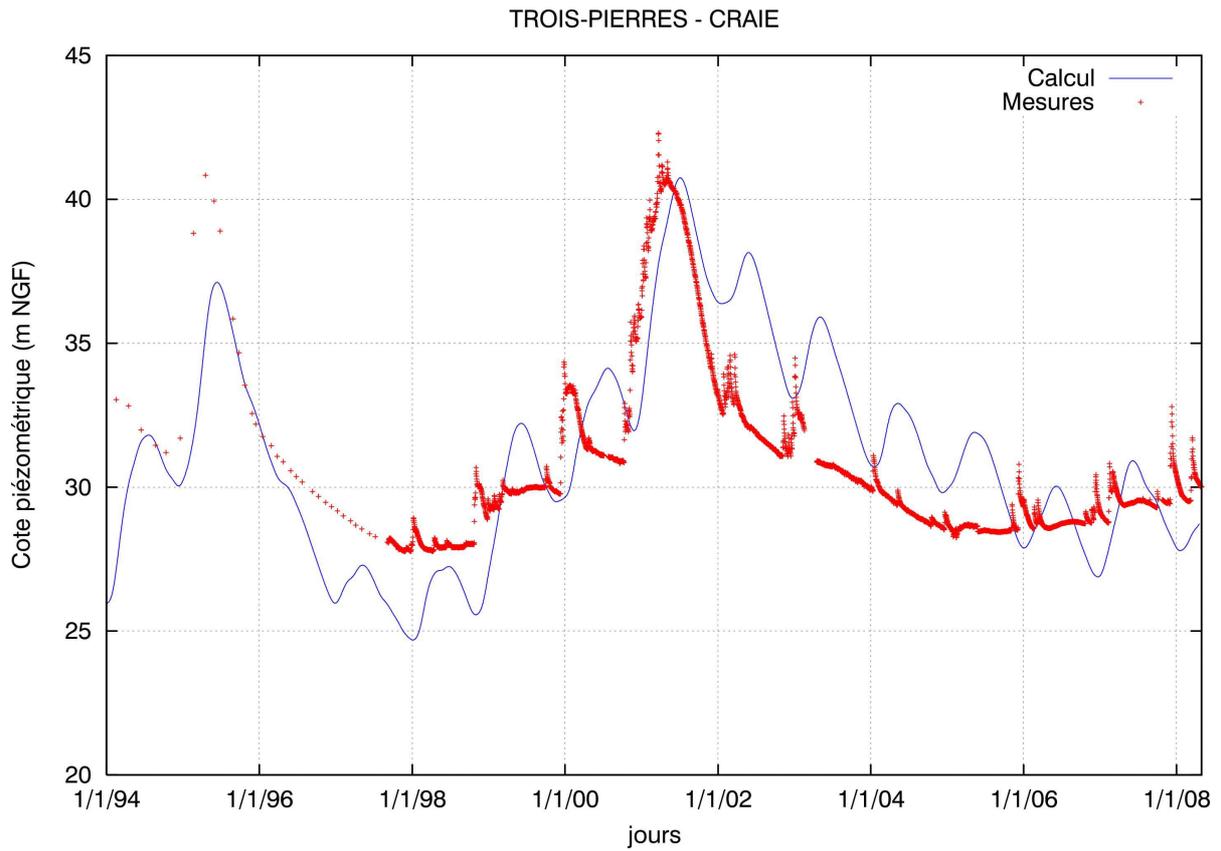


Figure 105 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Trois-Pierres (Seine-Maritime)

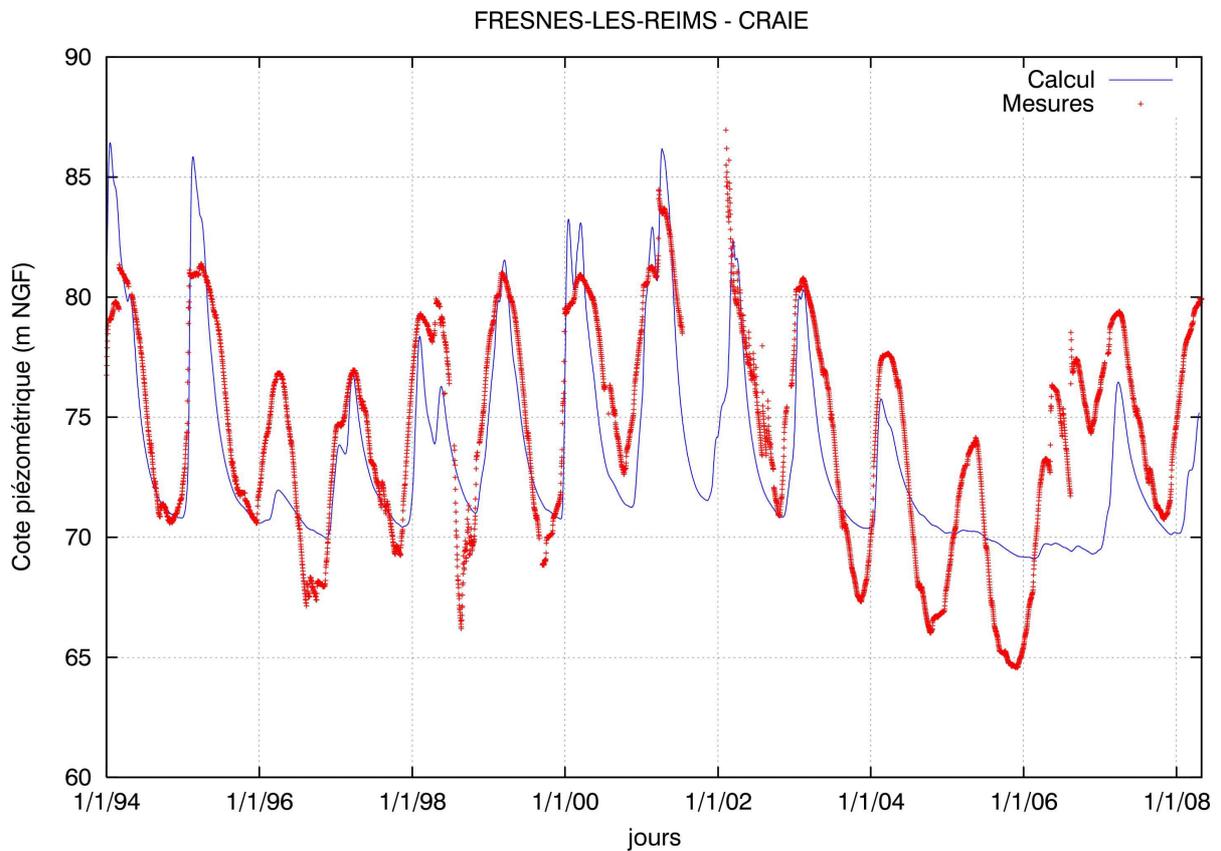


Figure 106 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Fresne-les-Reims (Marne)

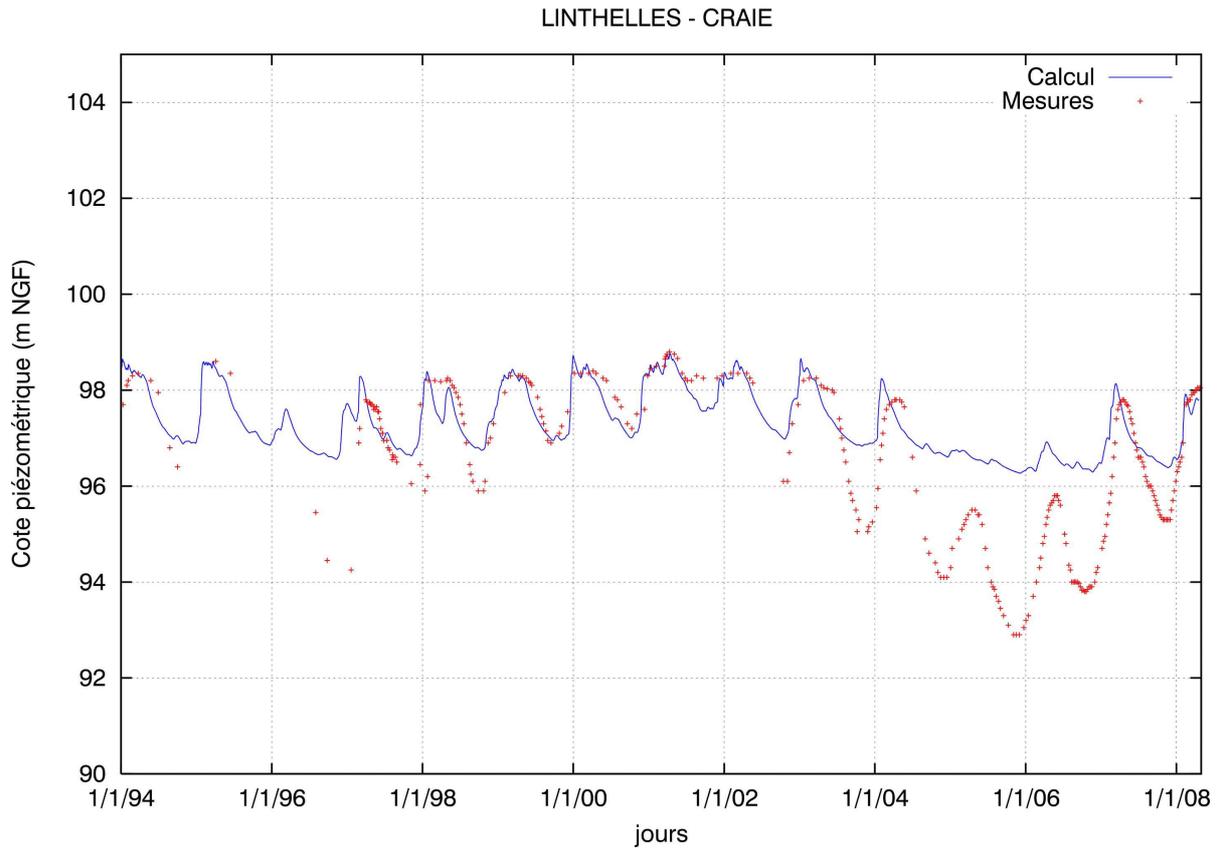


Figure 107 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Linthelles (Marne)

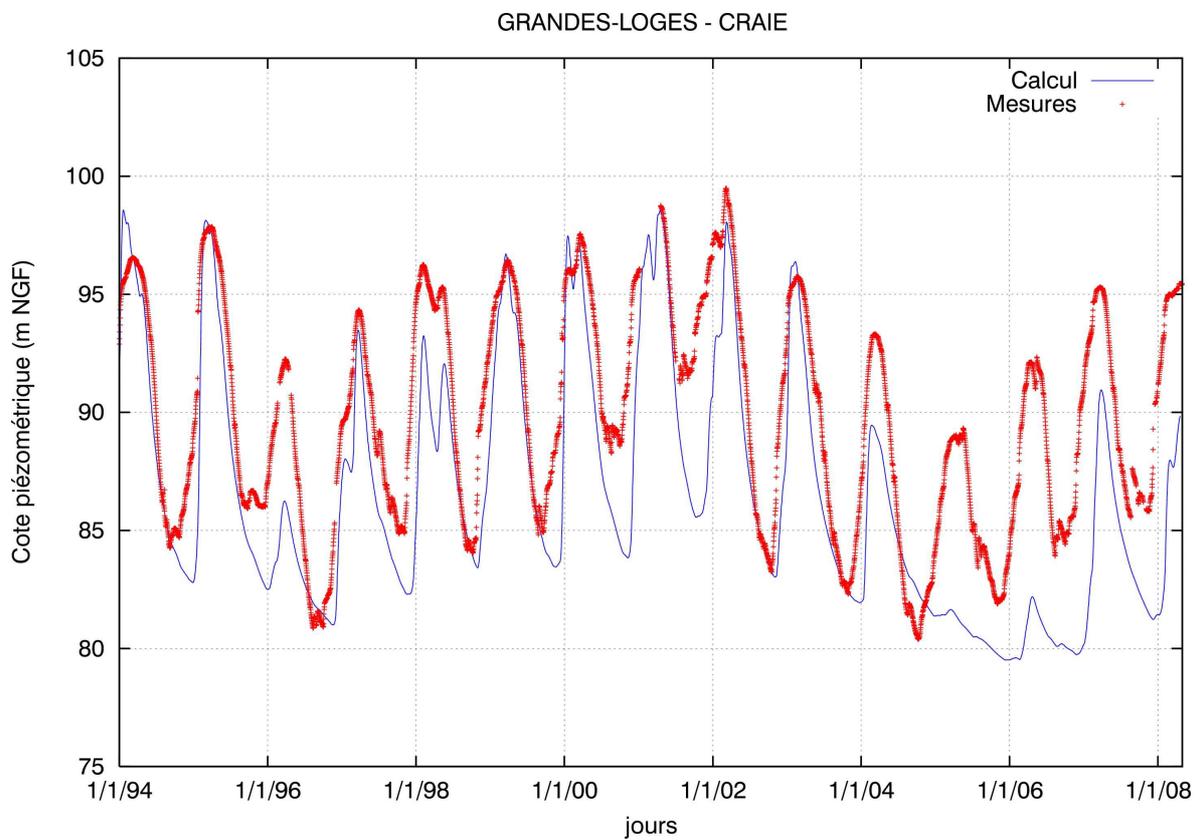


Figure 108 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre Les Grandes Loges (Marne)

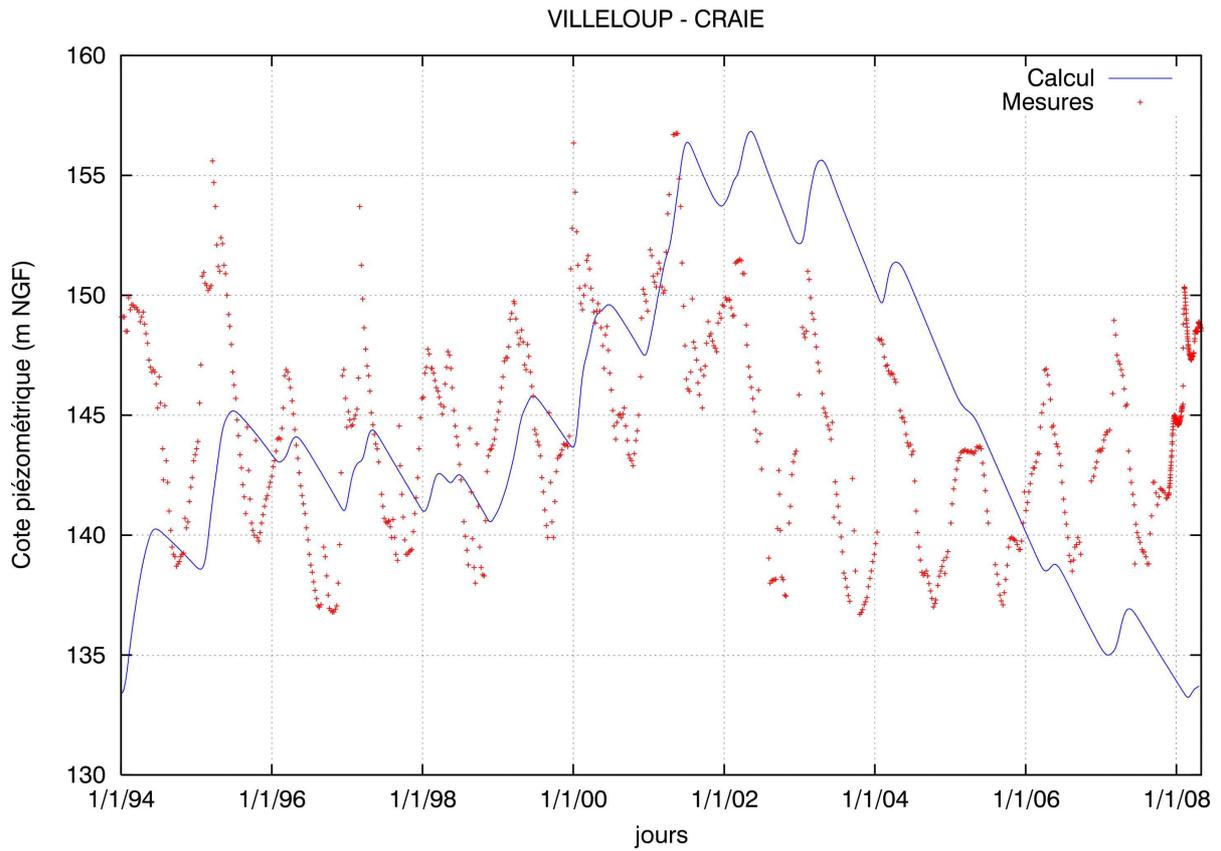


Figure 109 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Villeloup (Aube)

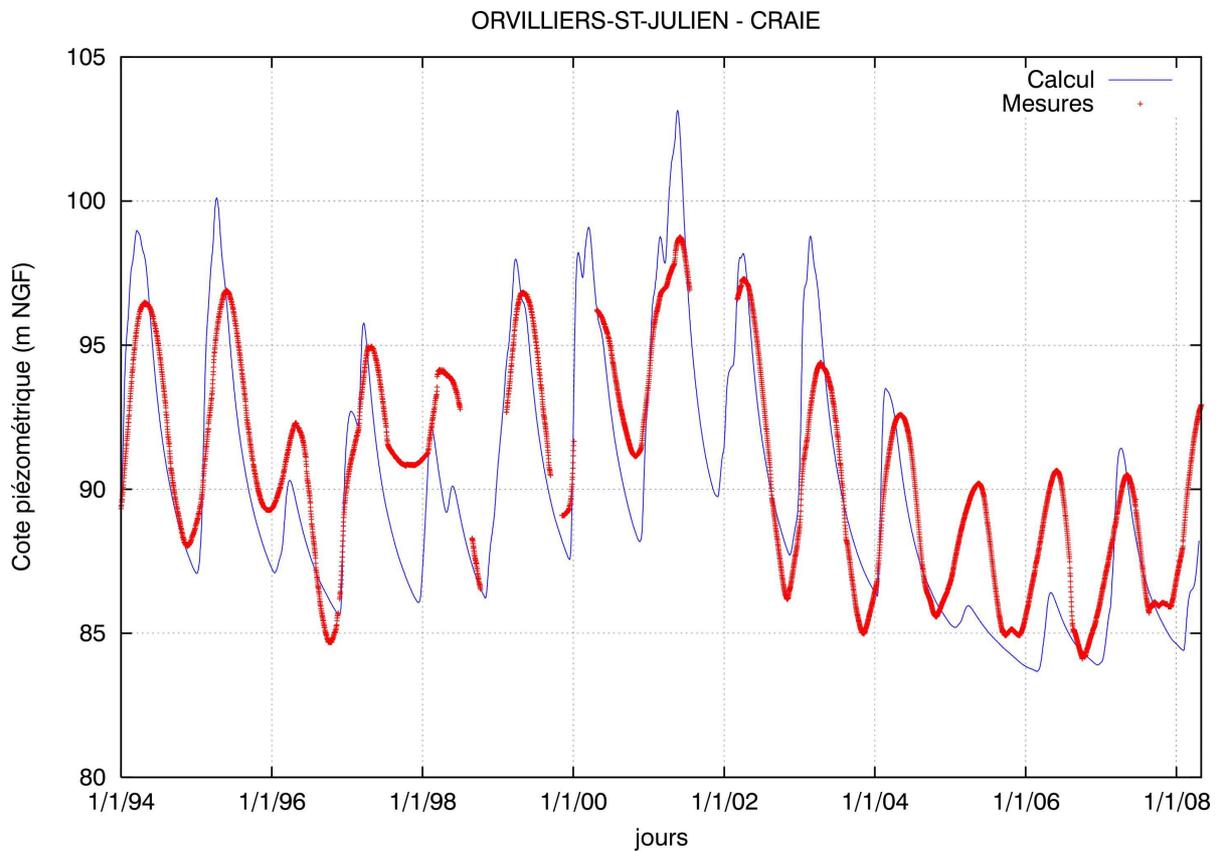


Figure 110 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre d'Orvilliers Saint Julien (Aube)

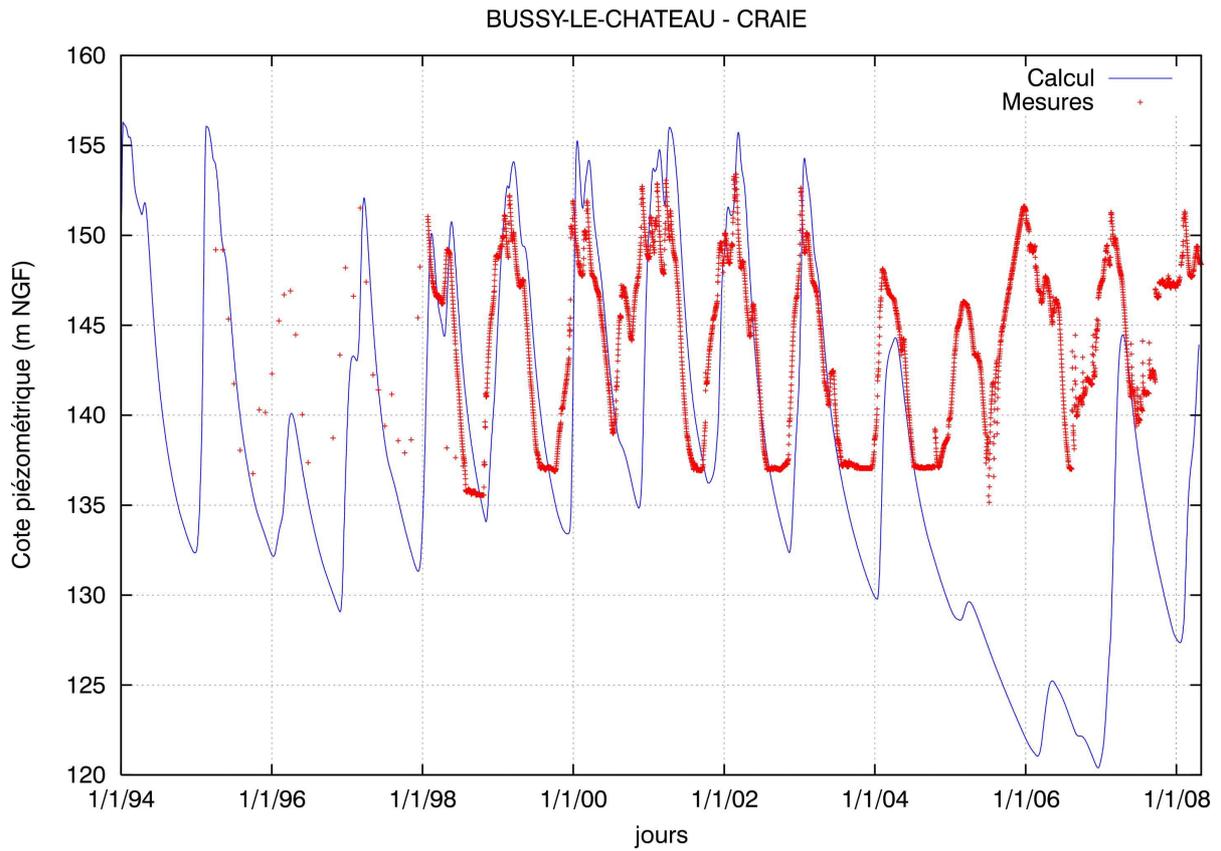


Figure 111 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Bussy le Château (Marne)

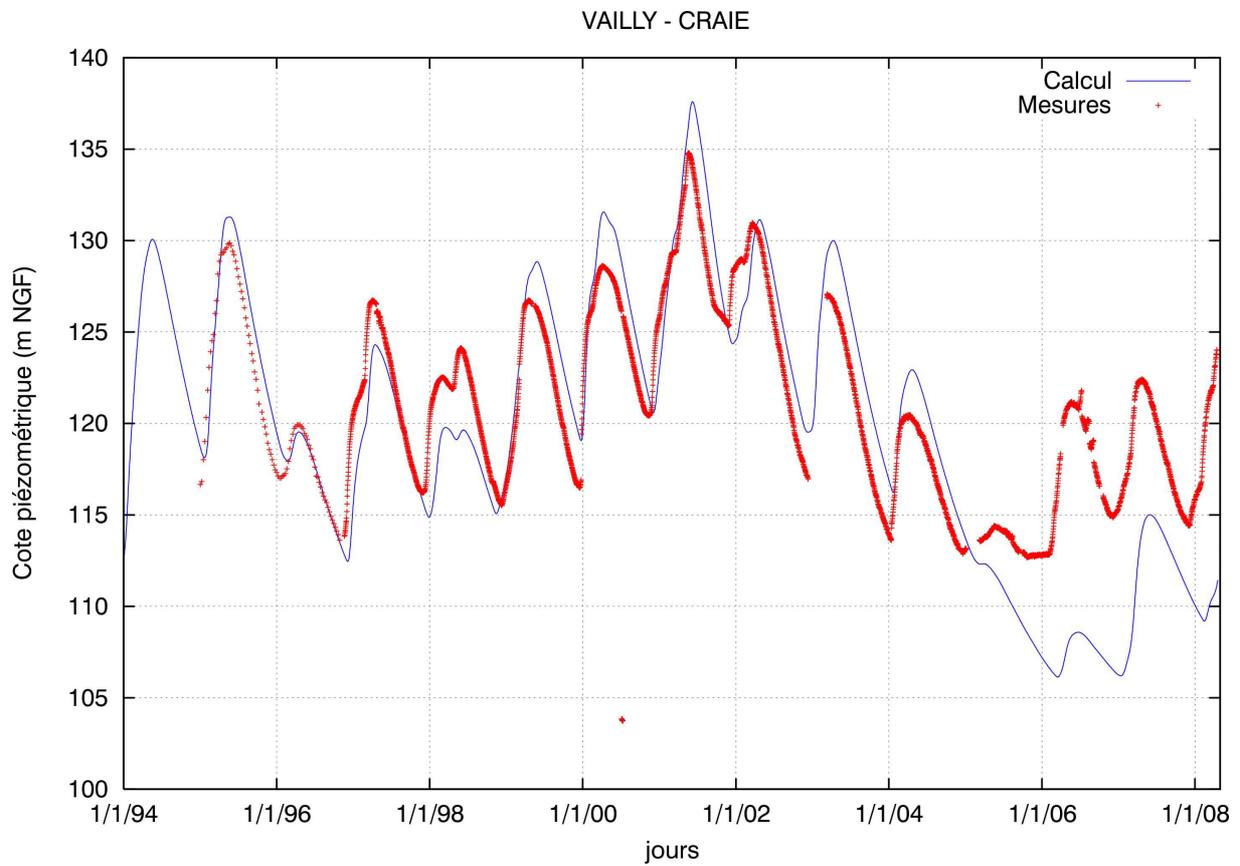


Figure 112 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Vailly (Aube)

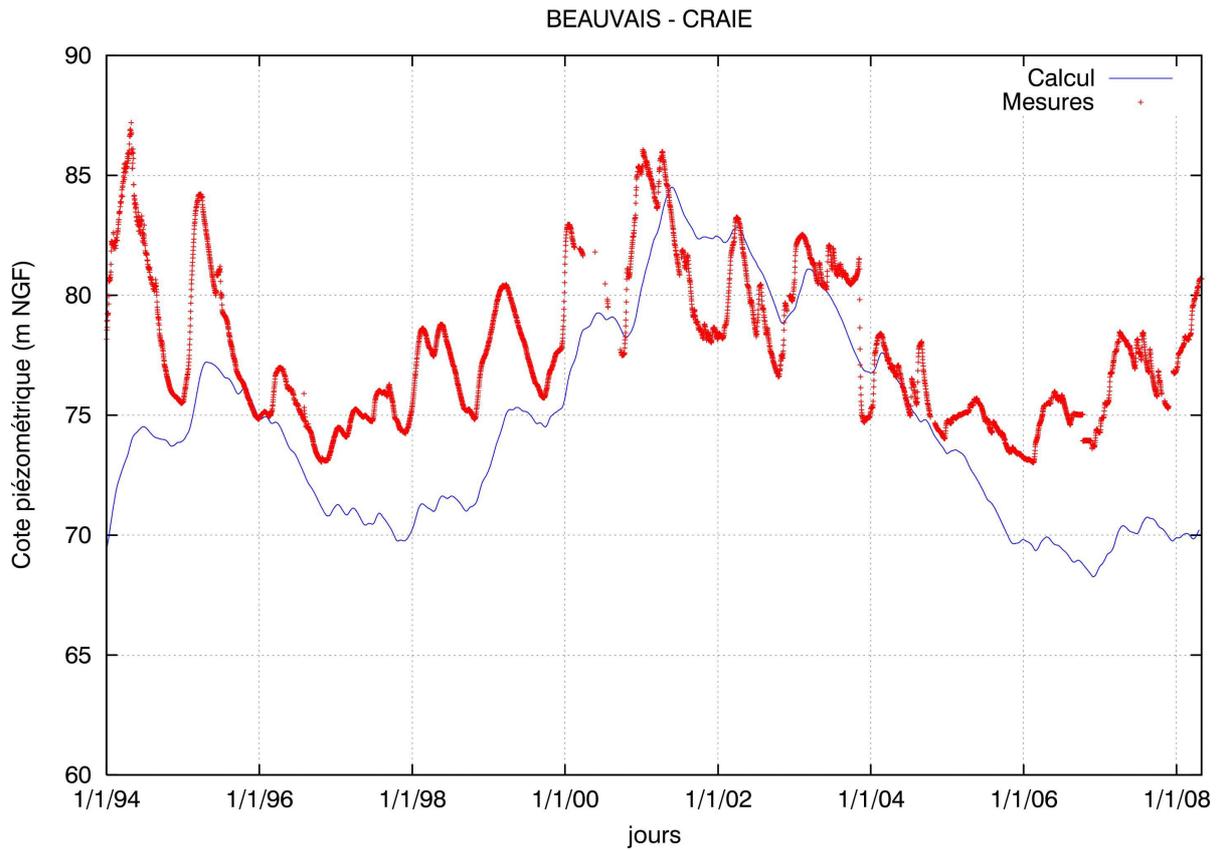


Figure 113 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Beauvais (Oise)

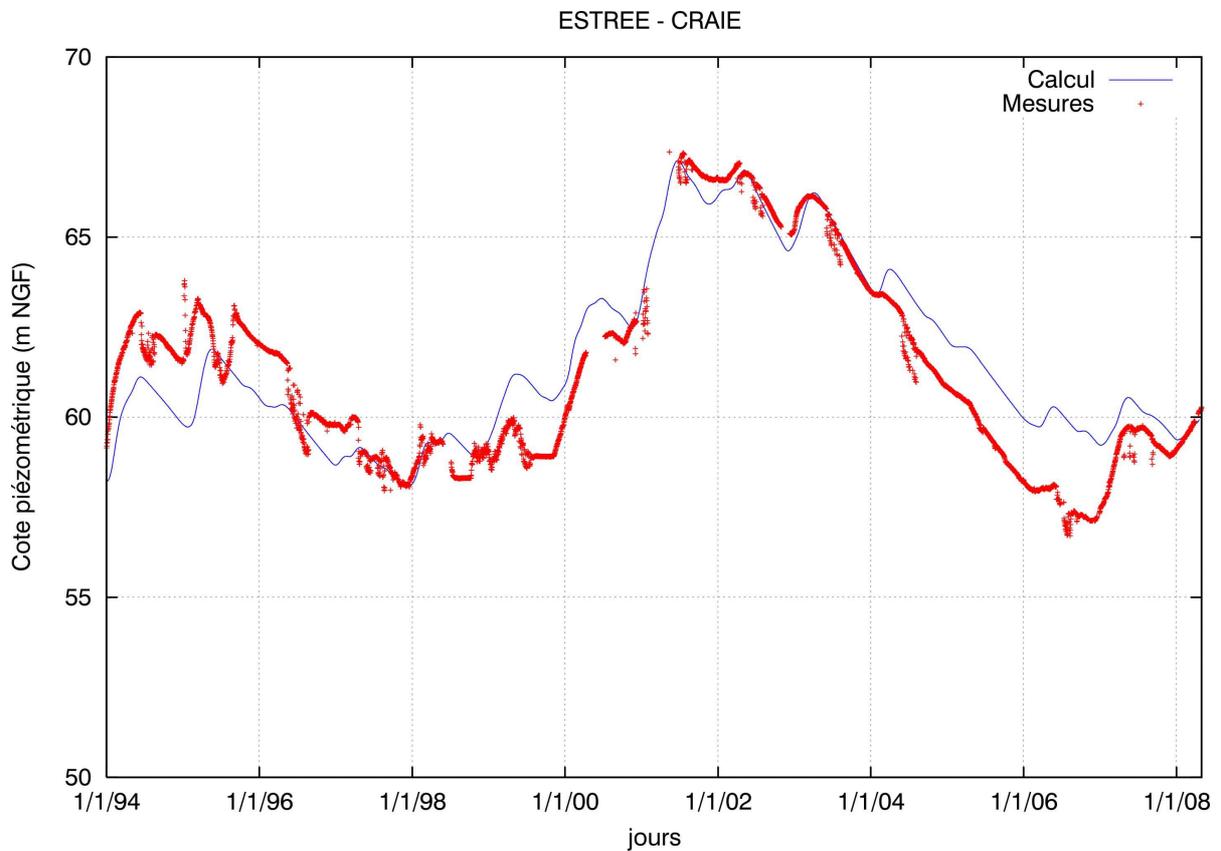


Figure 114 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre d'Estrée-Saint-Denis (Oise)

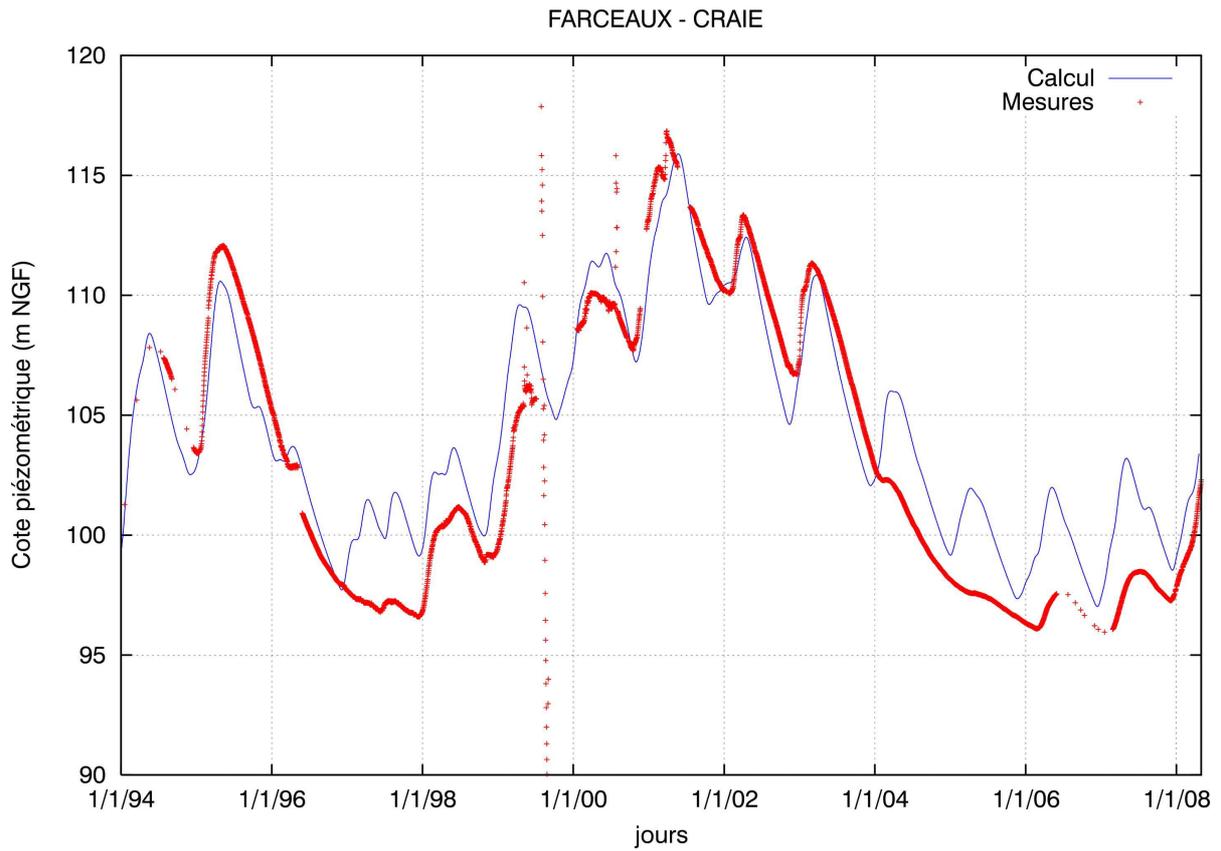


Figure 115 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Farceaux (Eure)

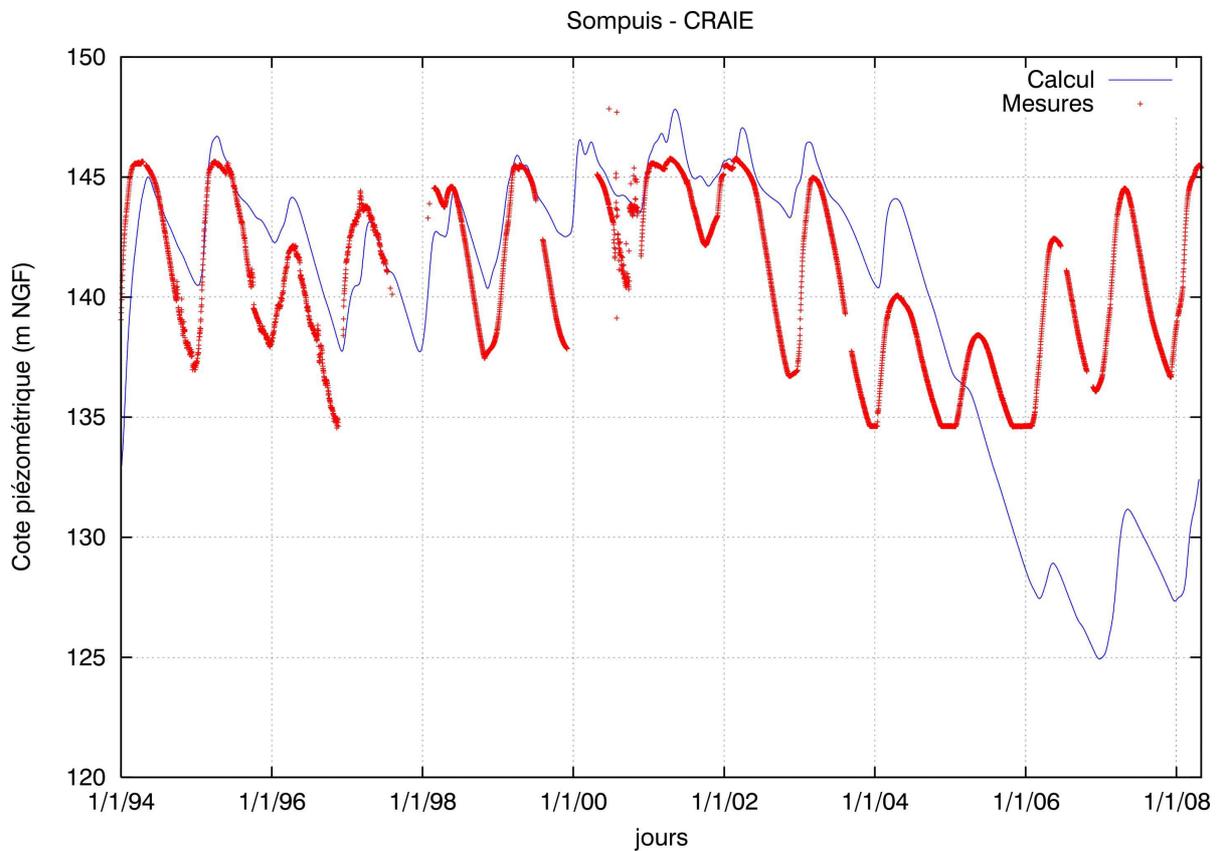


Figure 116 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Sompuis (Marne)

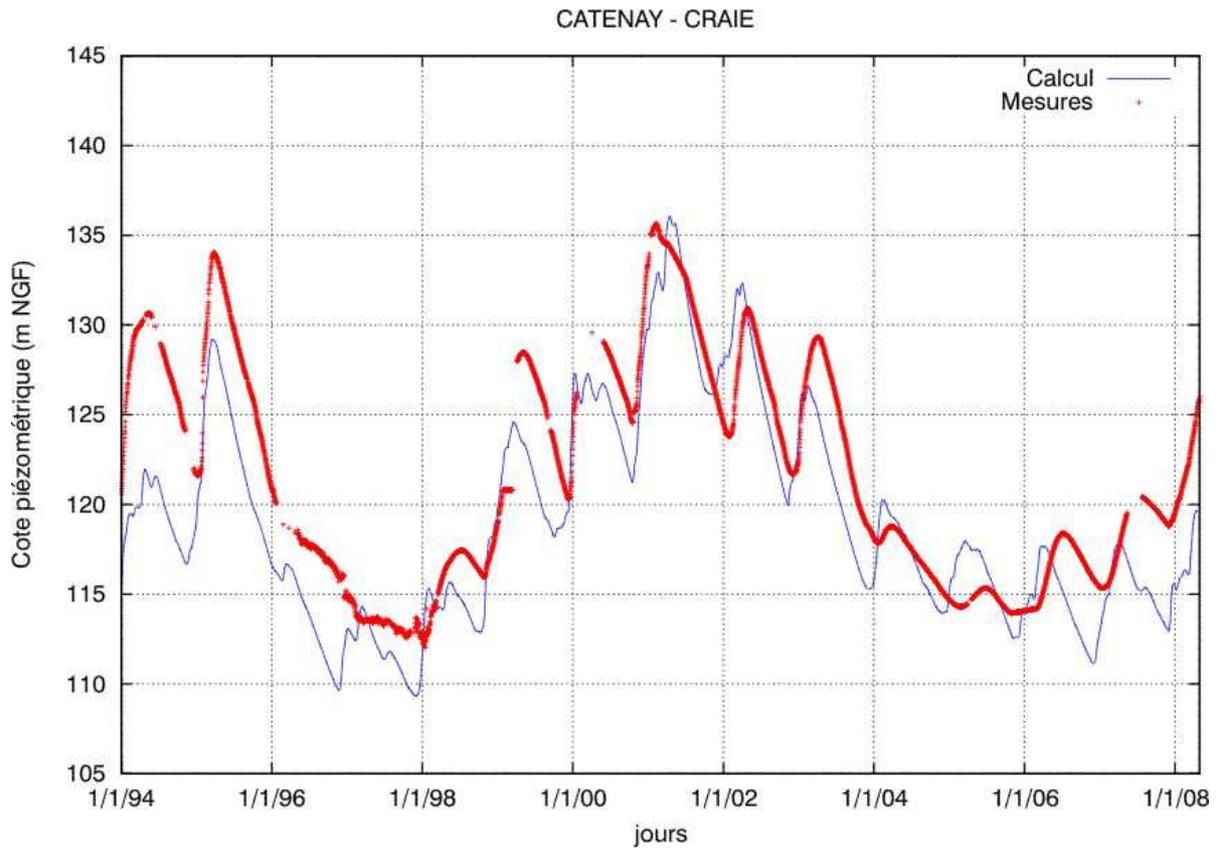


Figure 117 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Catenay (Seine Maritime)

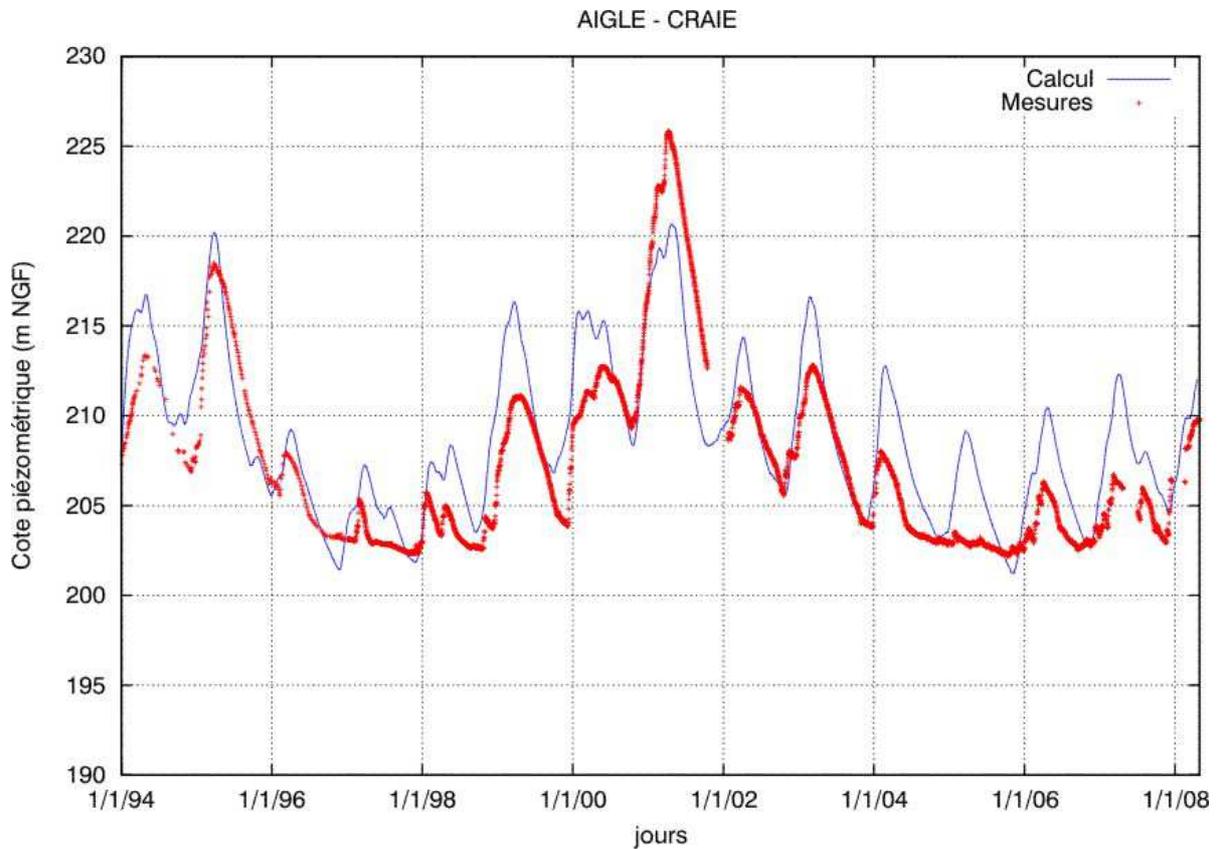


Figure 118 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de l'Aigle (Orne)

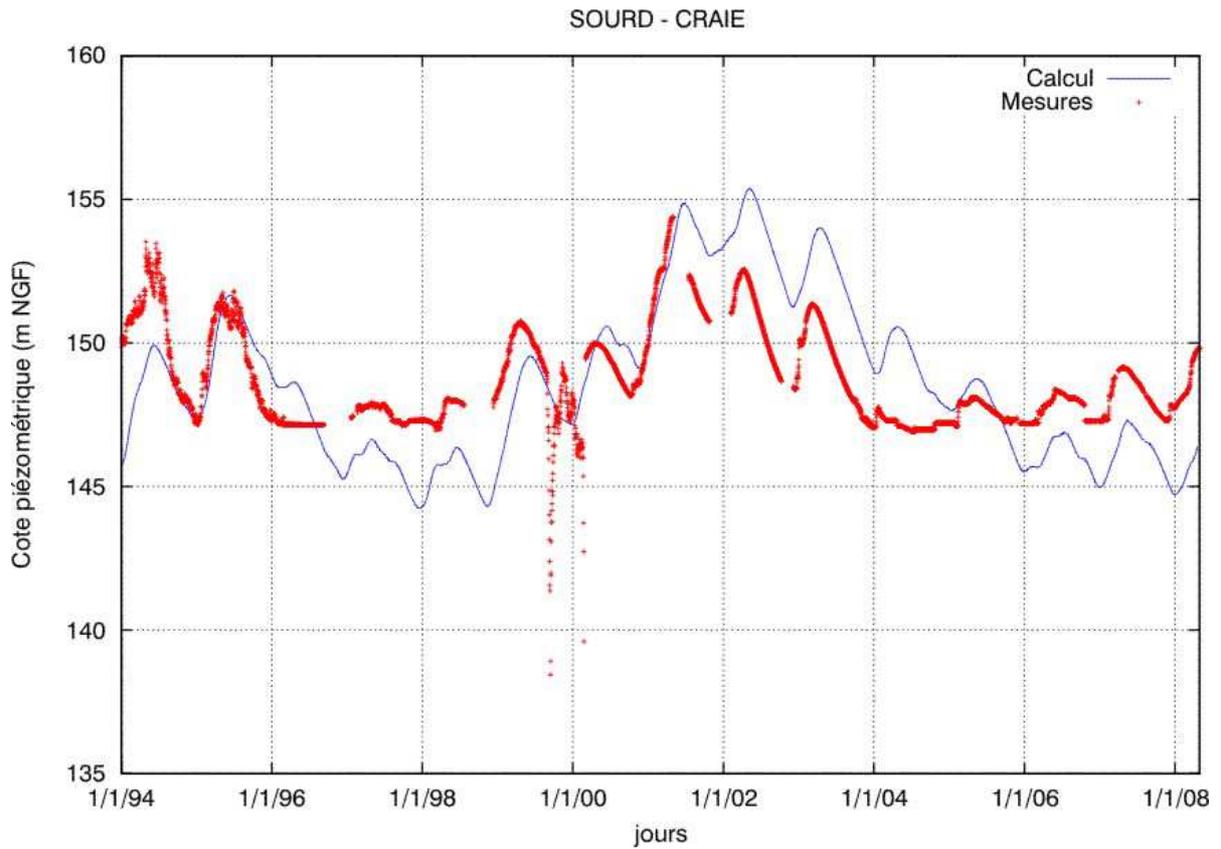


Figure 119 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Le Sourd (Aisne)

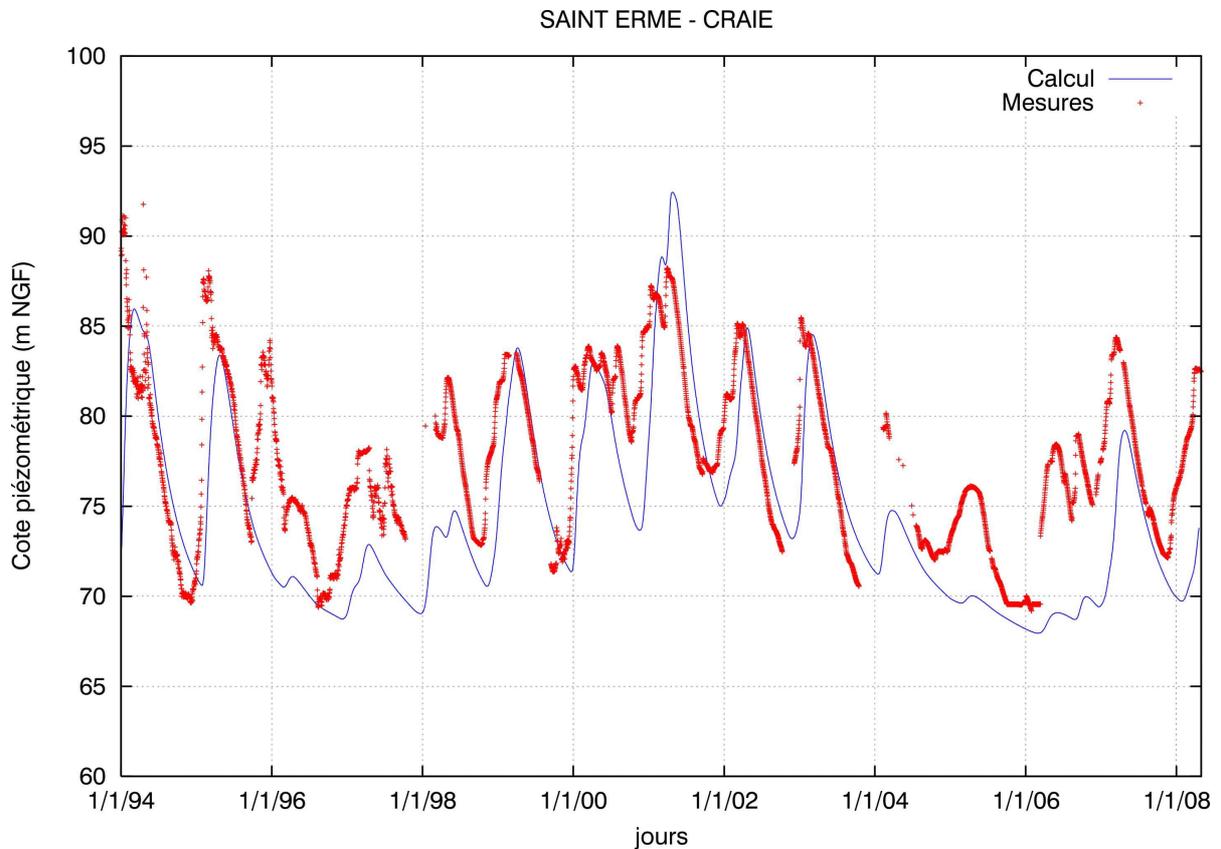


Figure 120 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Saint-Hermé-Outre et Ramecourt (Aisne)

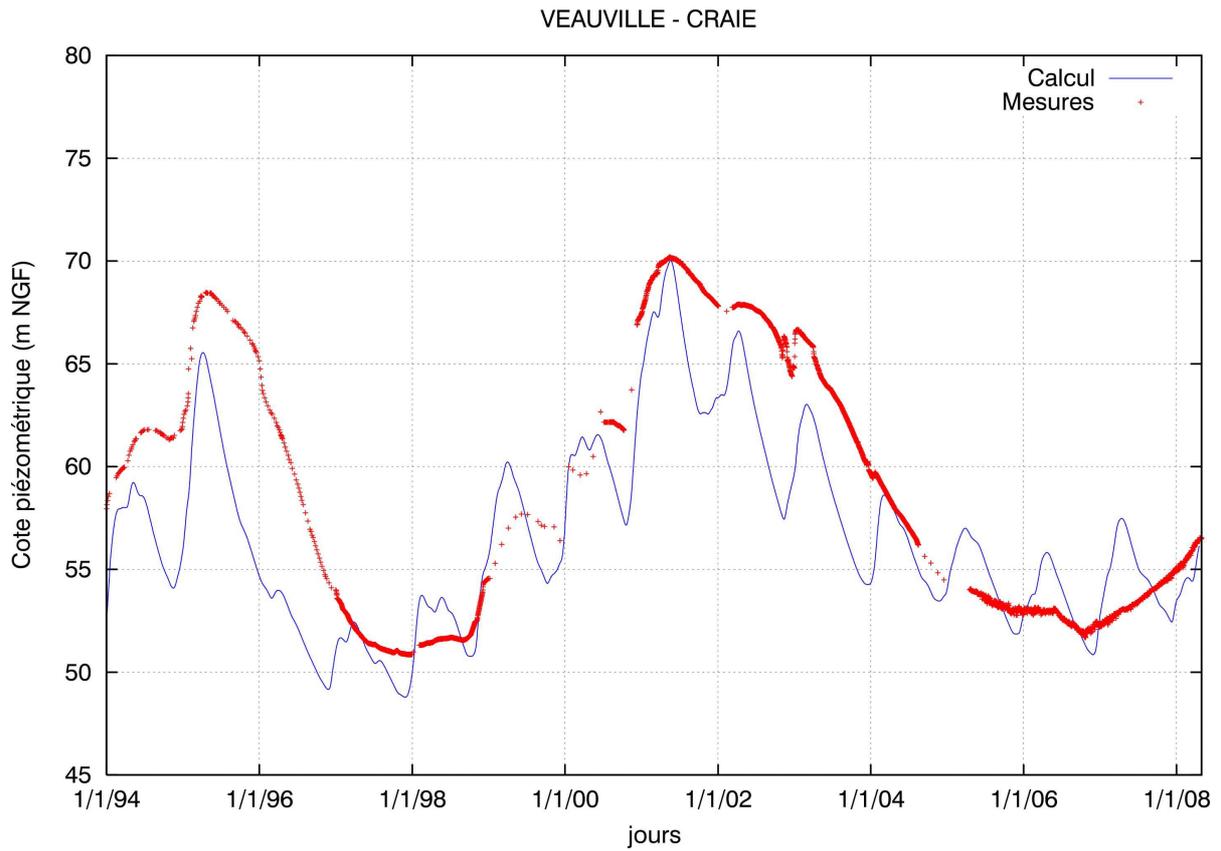


Figure 121 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de Veauville-les-Quelles (Seine-Maritime)

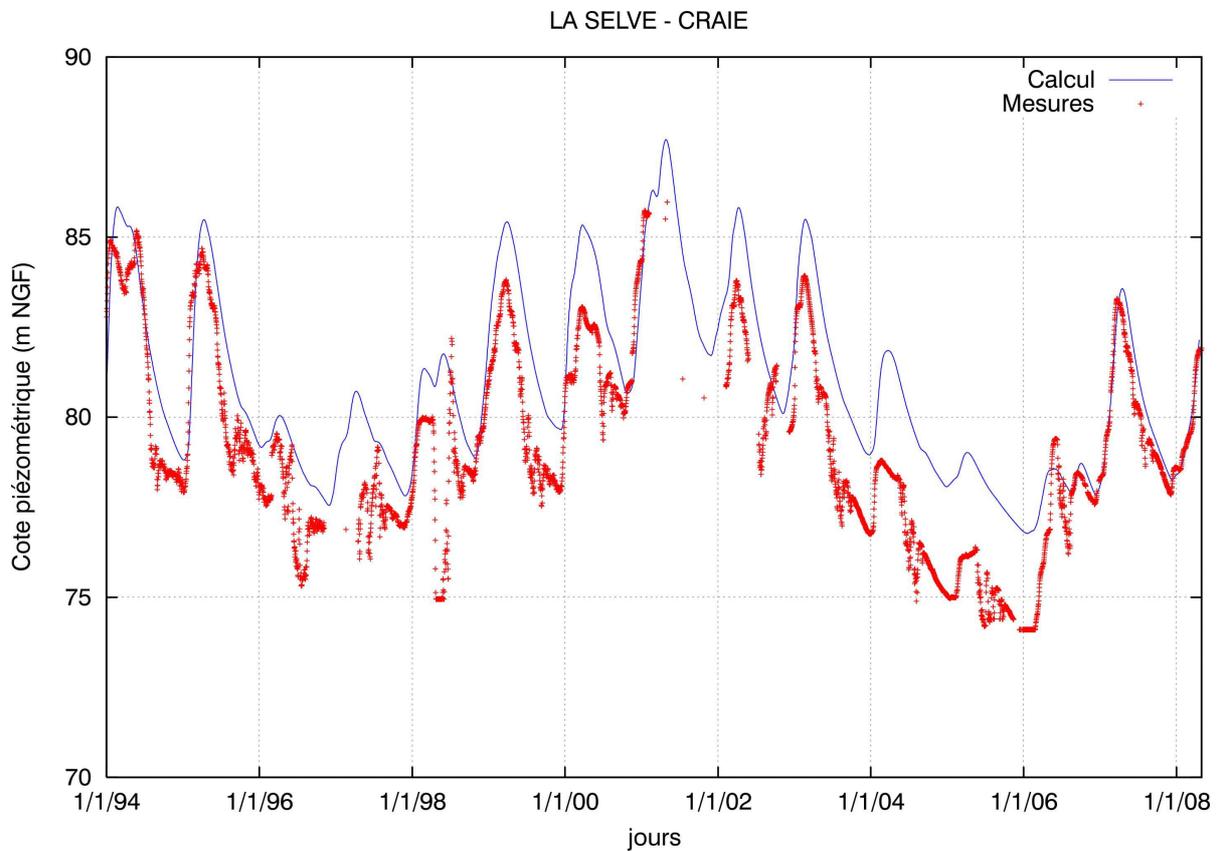


Figure 122 : évolution des piézométries calculées et mesurées dans la nappe de la Craie : piézomètre de La Selve (Aisne)

7.7 DEBITS CALCULES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES

7.7.1 BASSIN DE L'OISE

La figure 123 présente la situation géographique des stations du bassin de l'Oise calculées par le modèle.

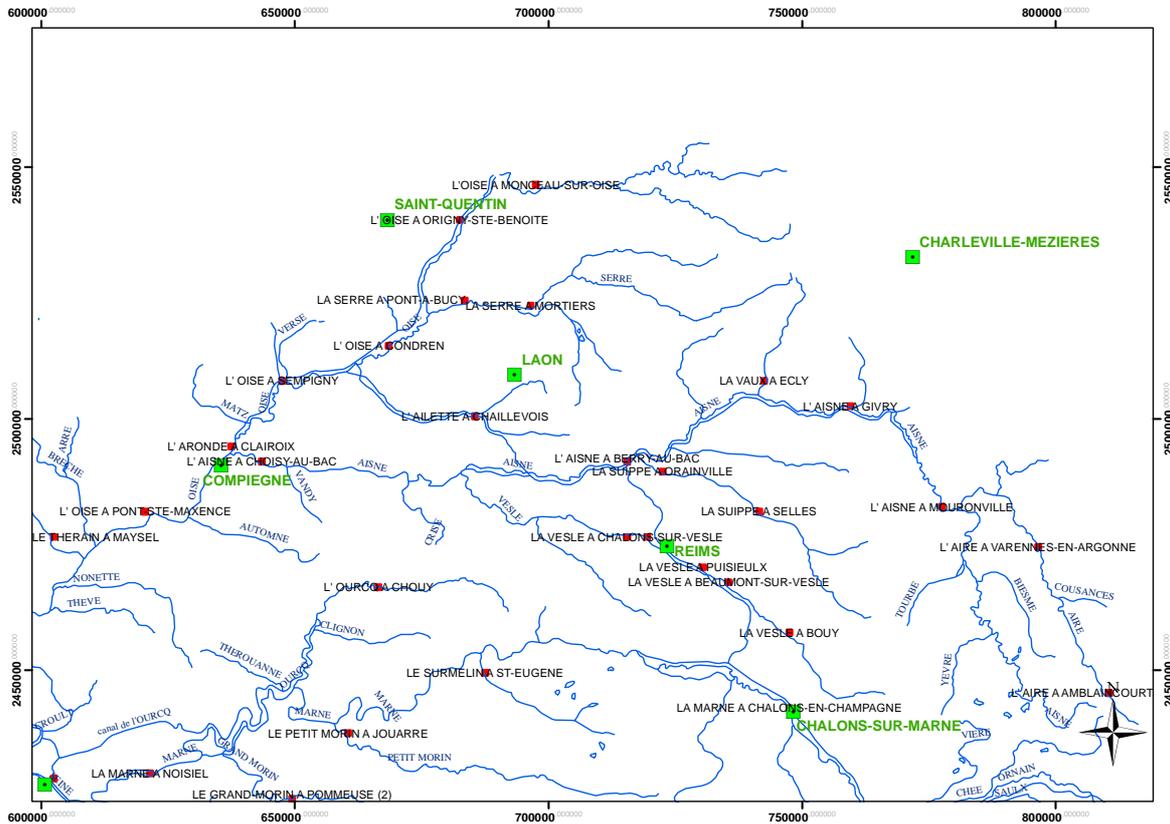


Figure 123 : situation géographique des stations simulées sur le bassin de l'Oise

L'OISE à MONCEAU-SUR-OISE

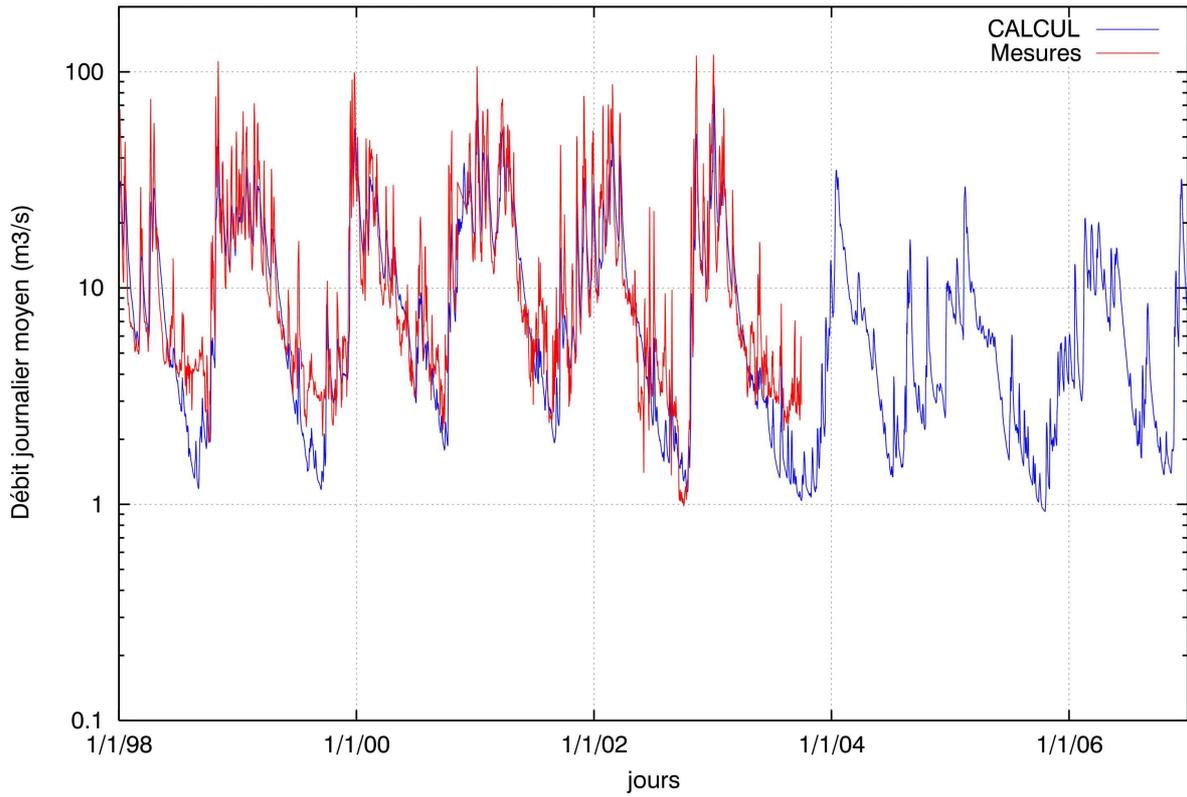


Figure 124 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Monceau-sur-Oise

L'OISE à ORIGNY STE BENOITE

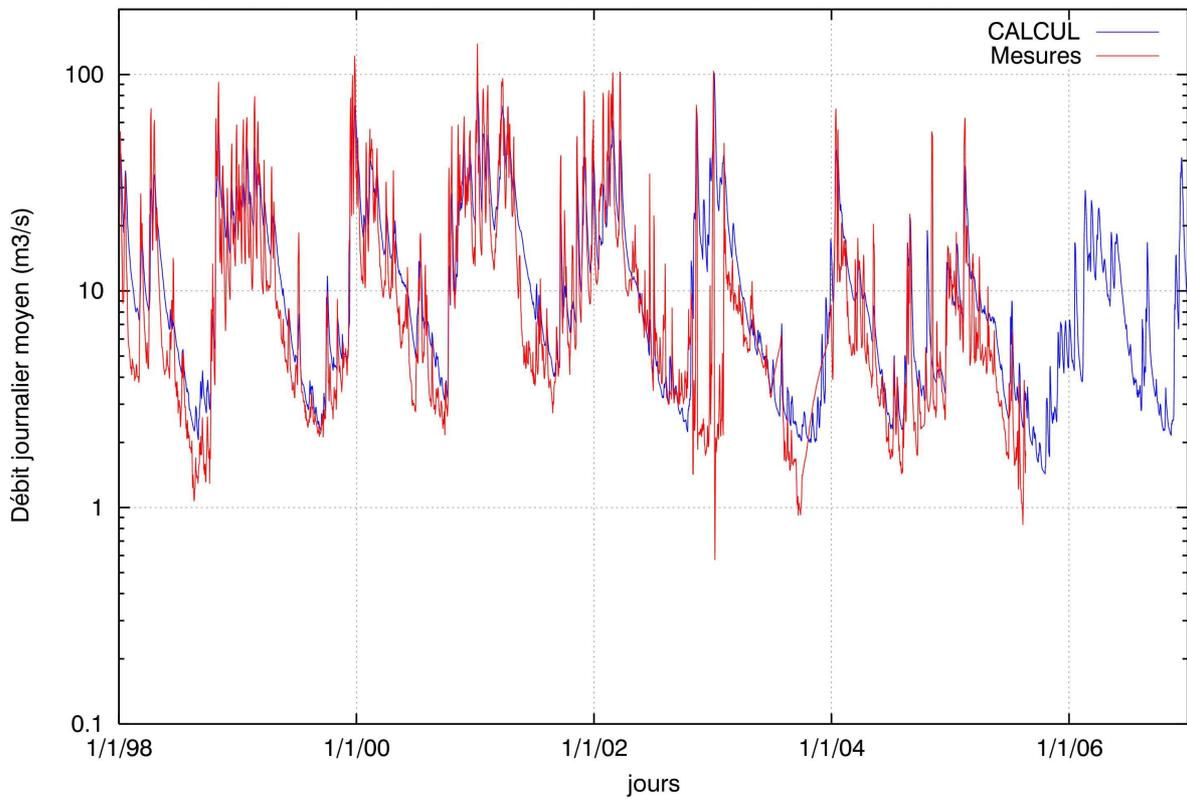


Figure 125 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station d'Origny-Ste-Benoite

LA SERRE à MORTIERS

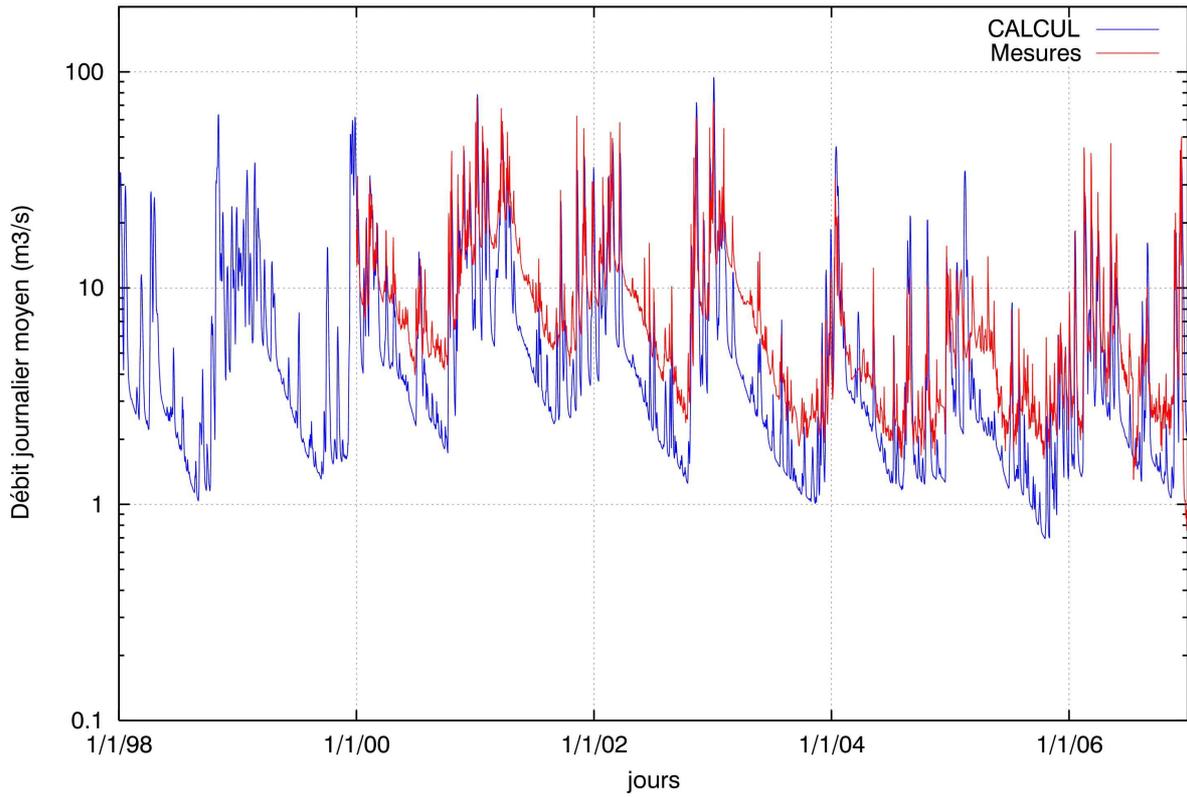


Figure 126: comparaison des débits simulés et mesurés sur la Serre à la station de Mortiers

LA SERRE à PONT à BUCY

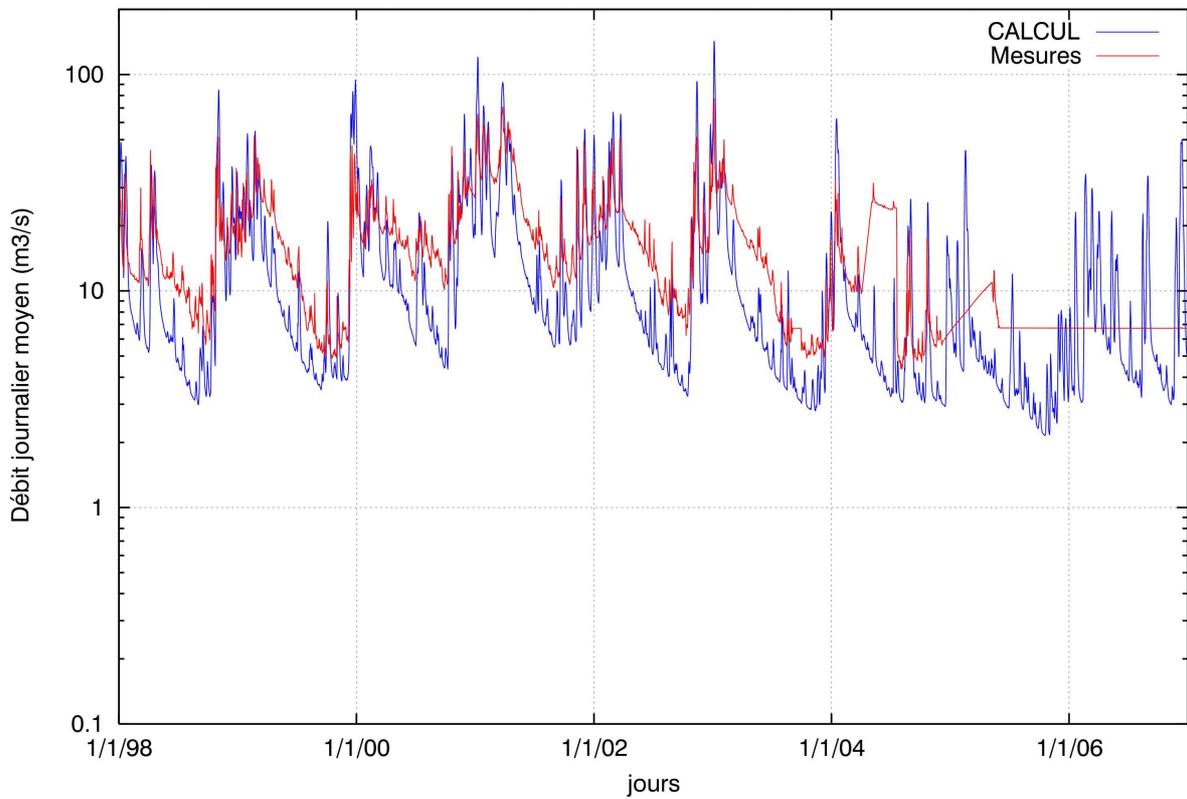


Figure 127: comparaison des débits simulés et mesurés sur la Serre à la station de Pont-à-Bucy

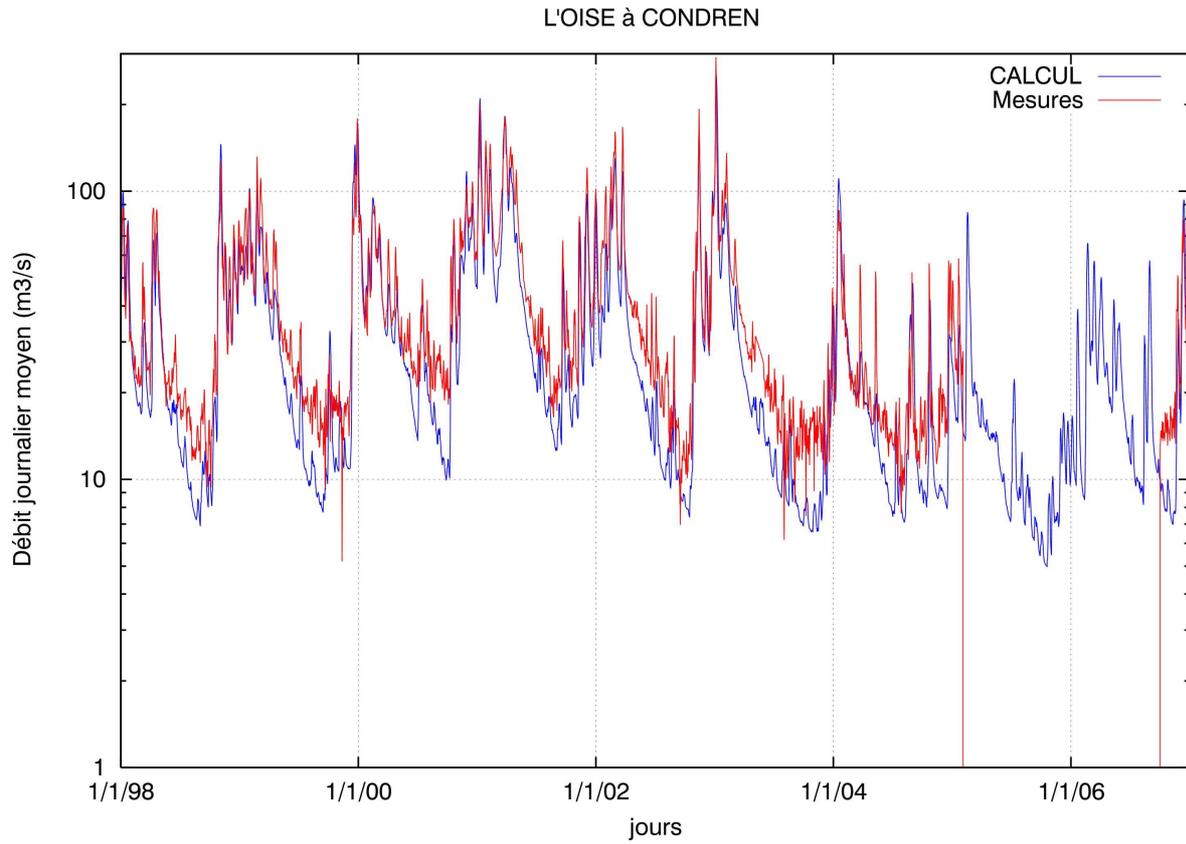


Figure 128 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Condren

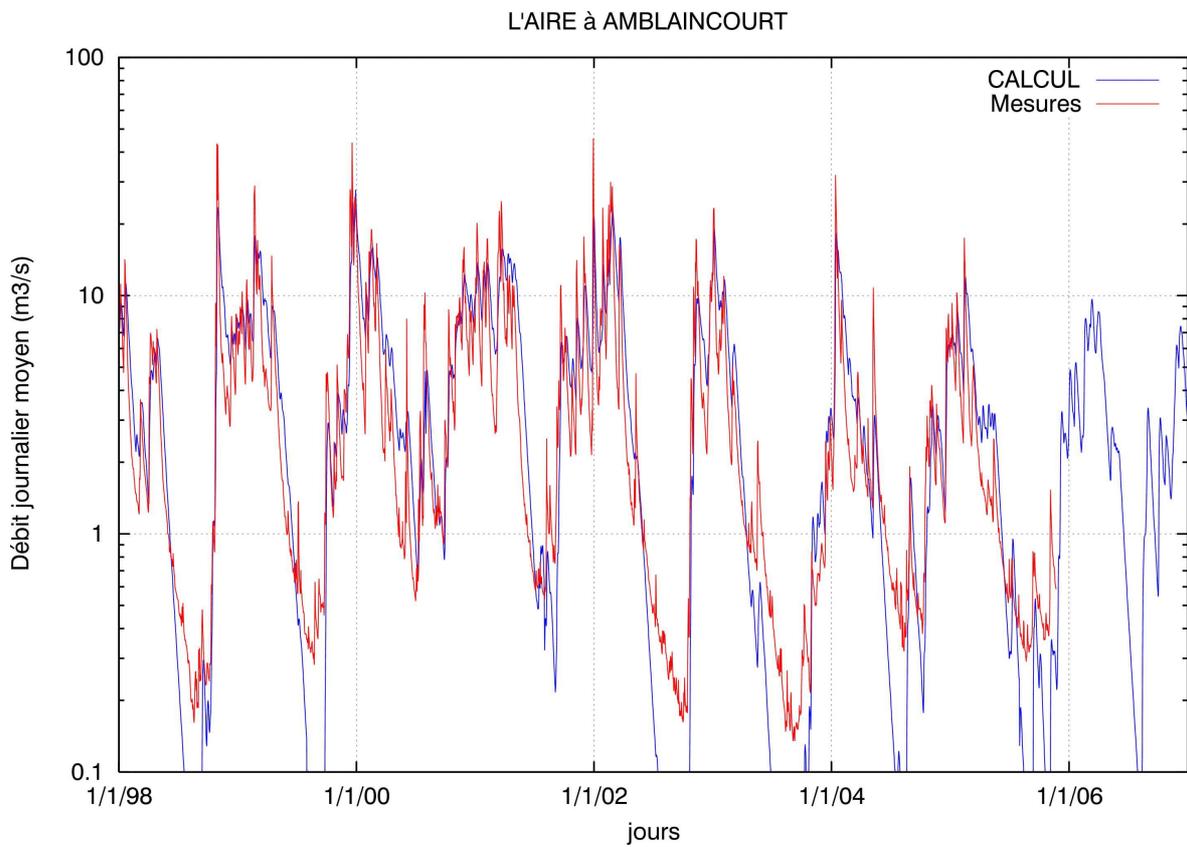


Figure 129 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aire à Amblaincourt

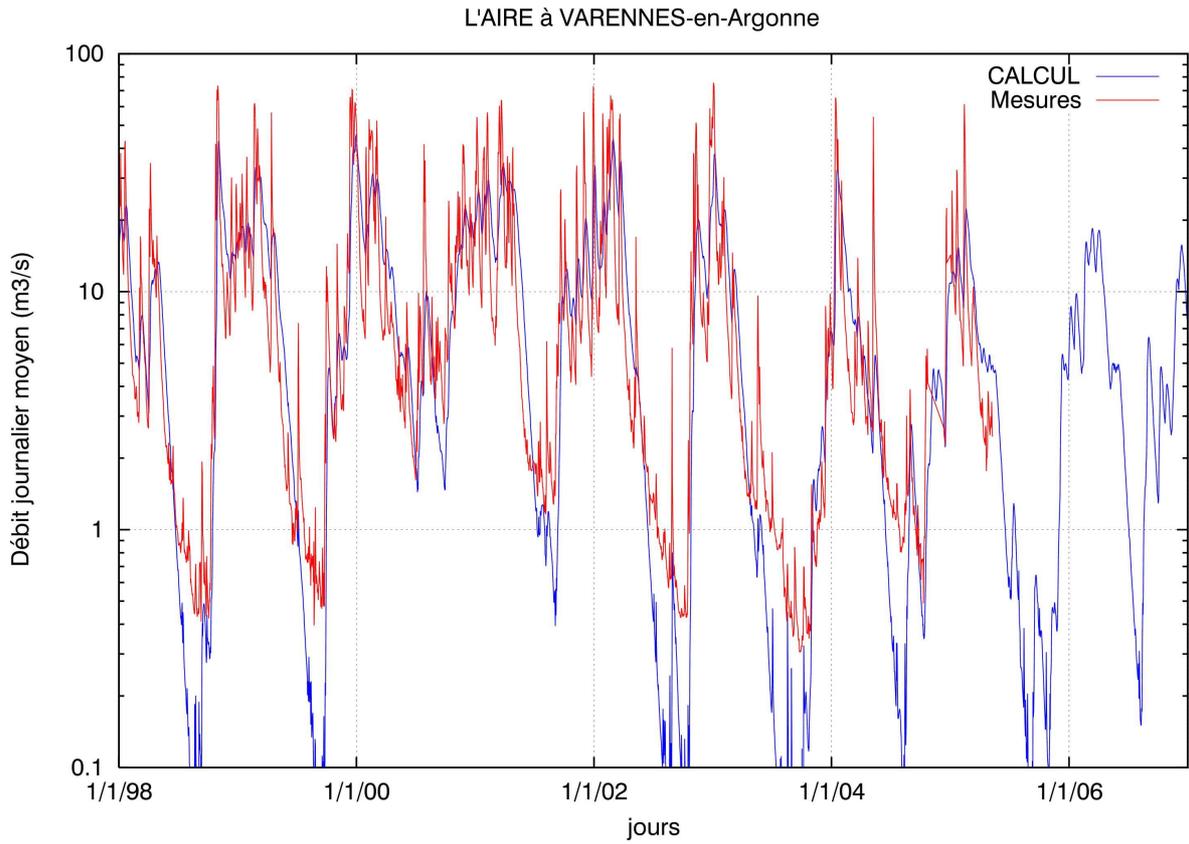


Figure 130 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aire à la station de Varennes-en-Argonne

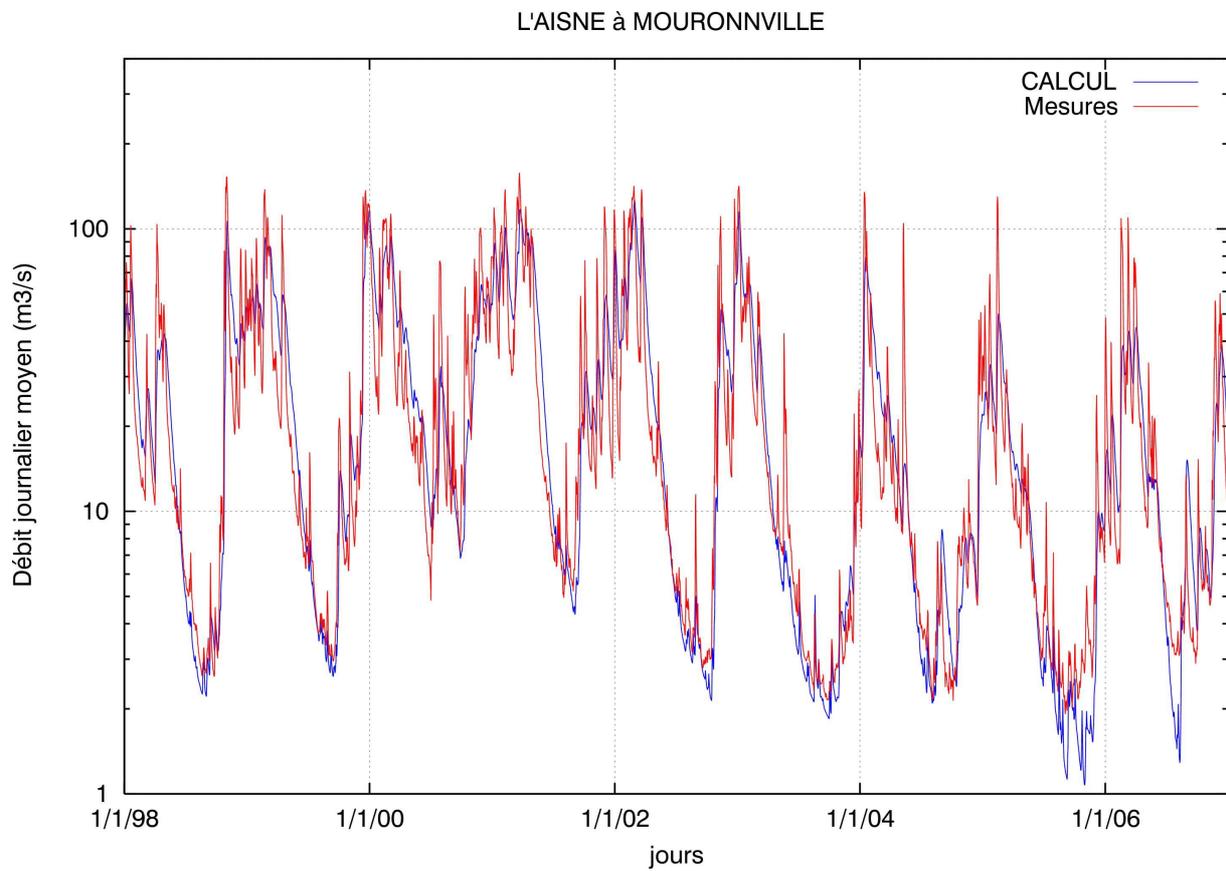


Figure 131 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Mouronville

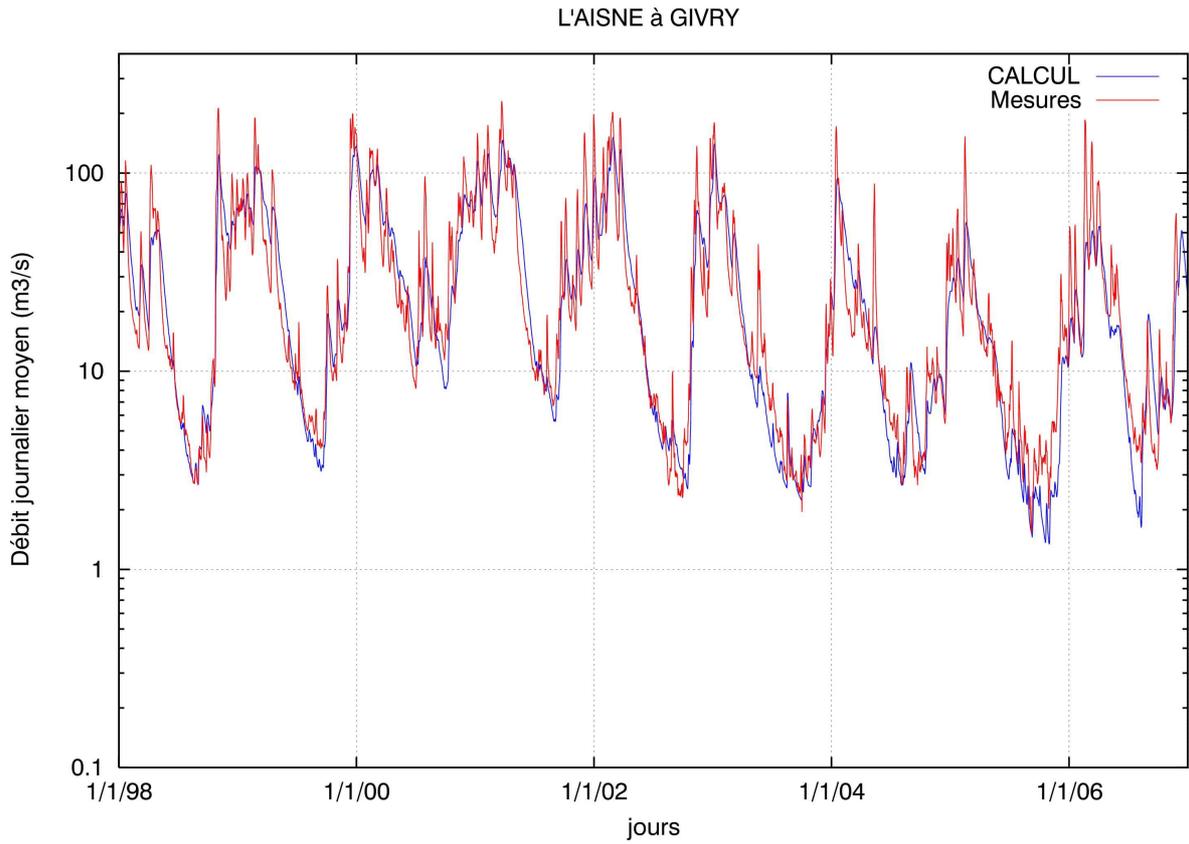


Figure 132 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Givry-en-Argonne

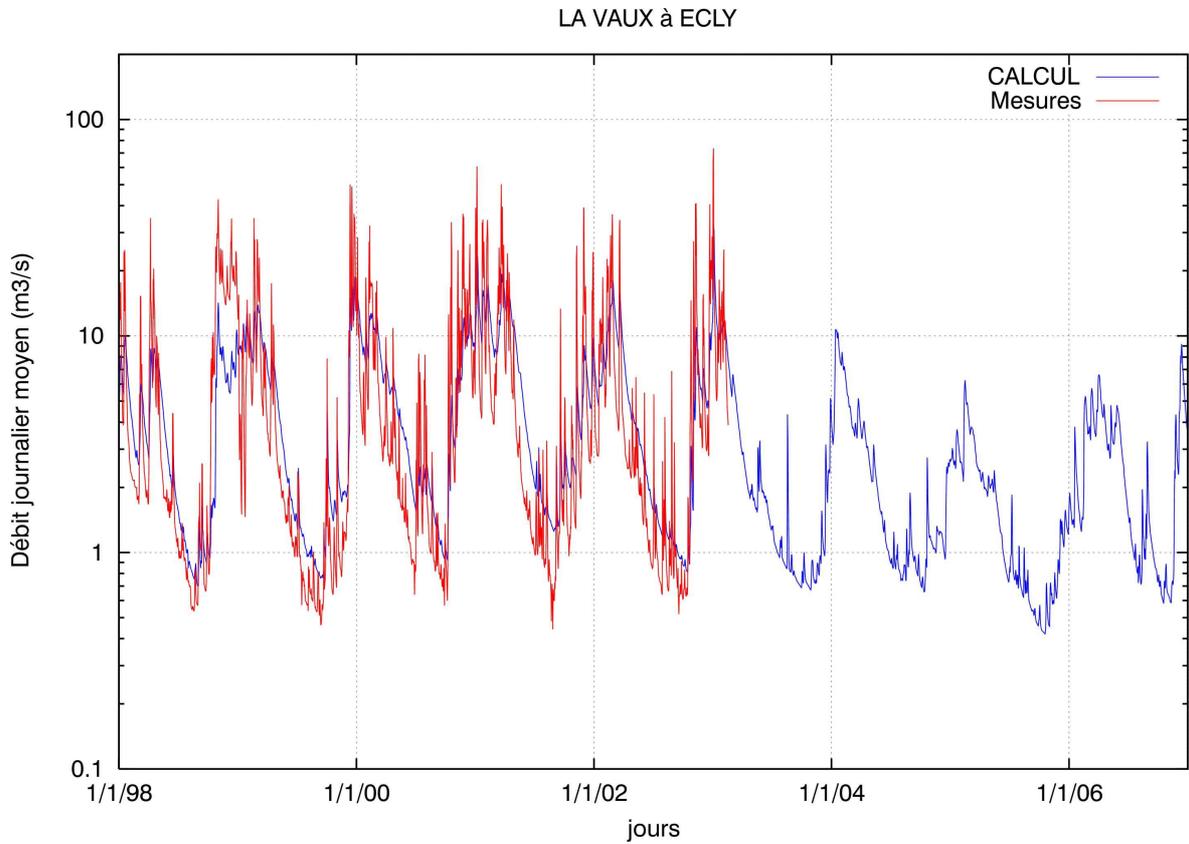


Figure 133 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vaux à la station d'Eclly

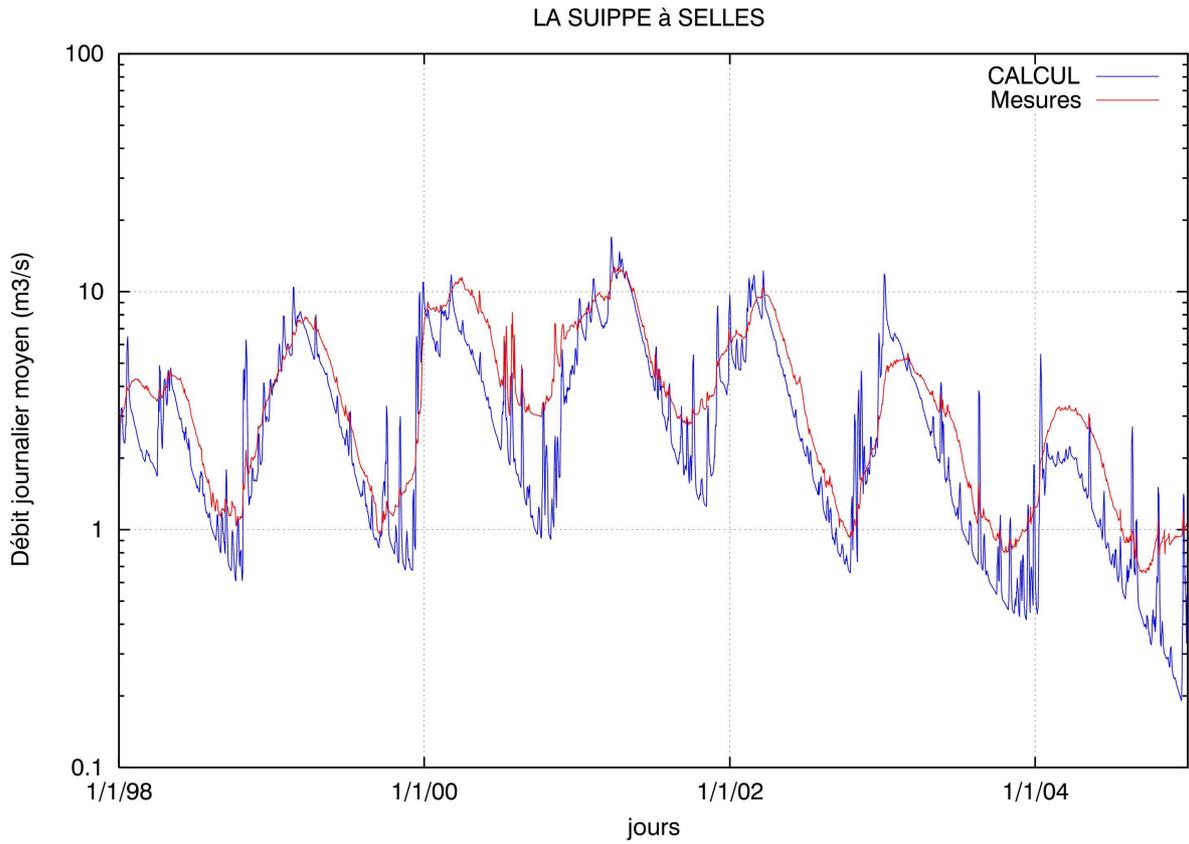


Figure 134 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Suipe à la station de Selles

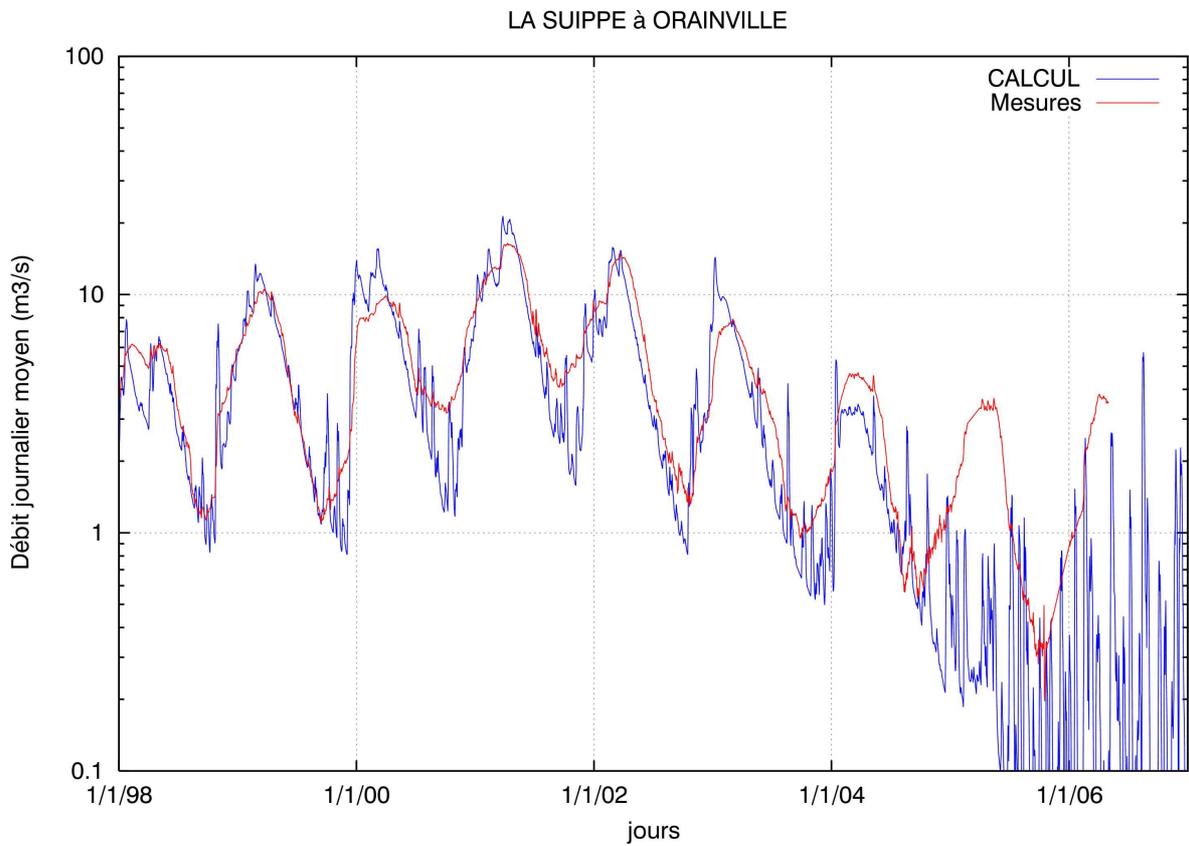


Figure 135 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Suipe à la station d'Orainville

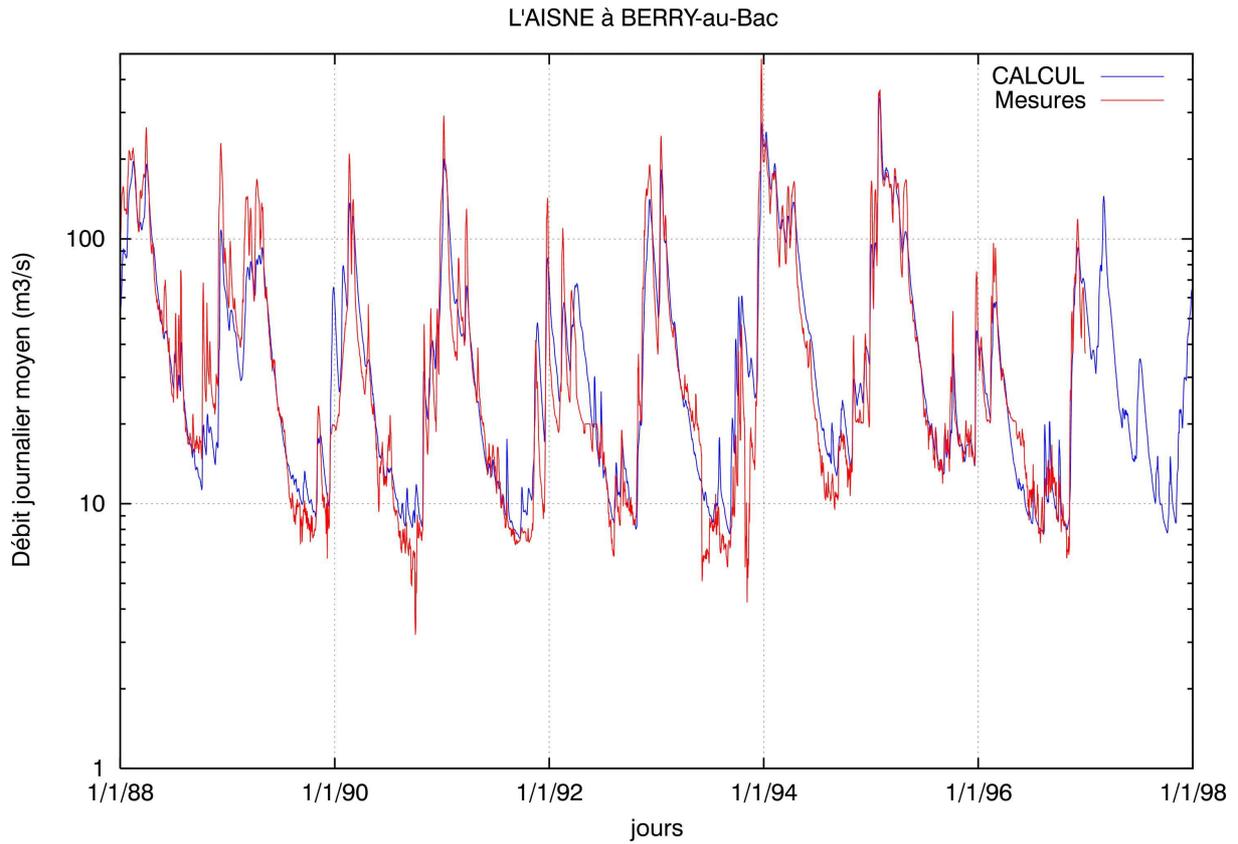


Figure 136 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Berry-au-Bac

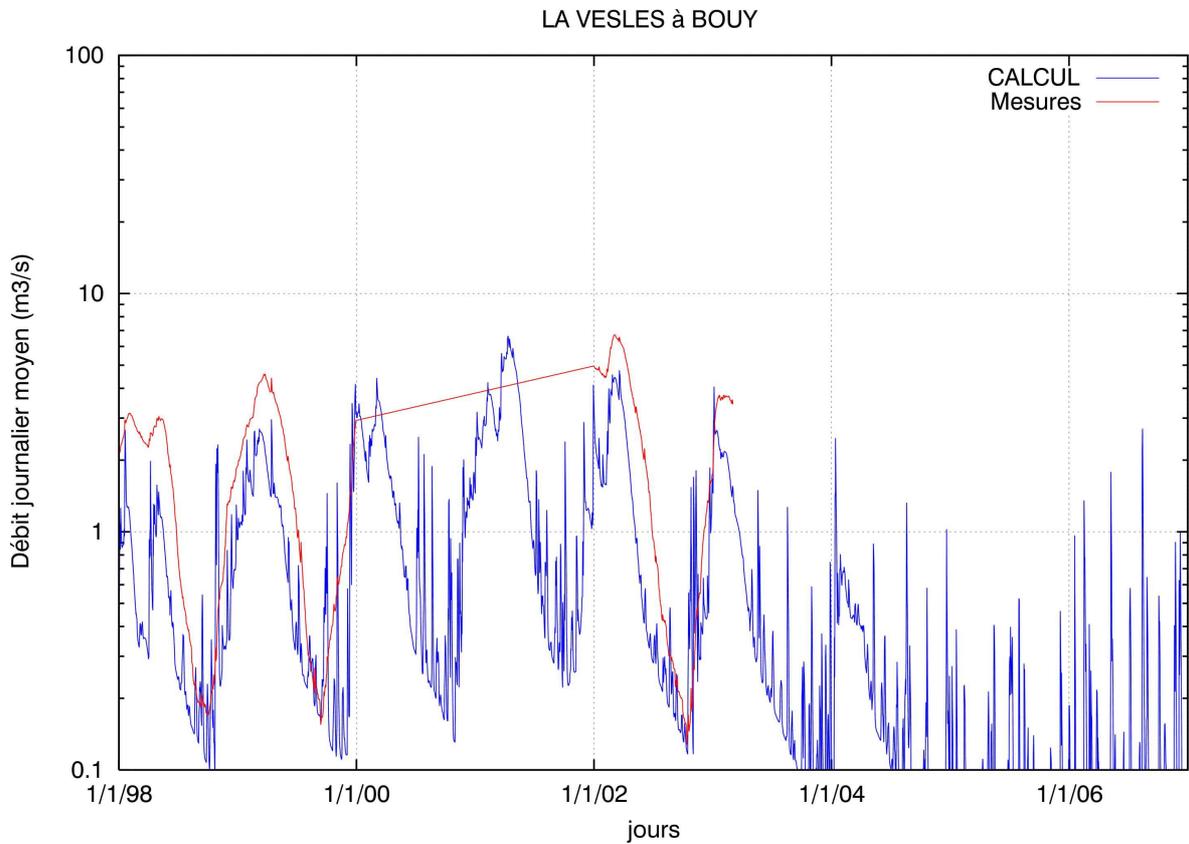


Figure 137 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Veslee à la station de Bouy

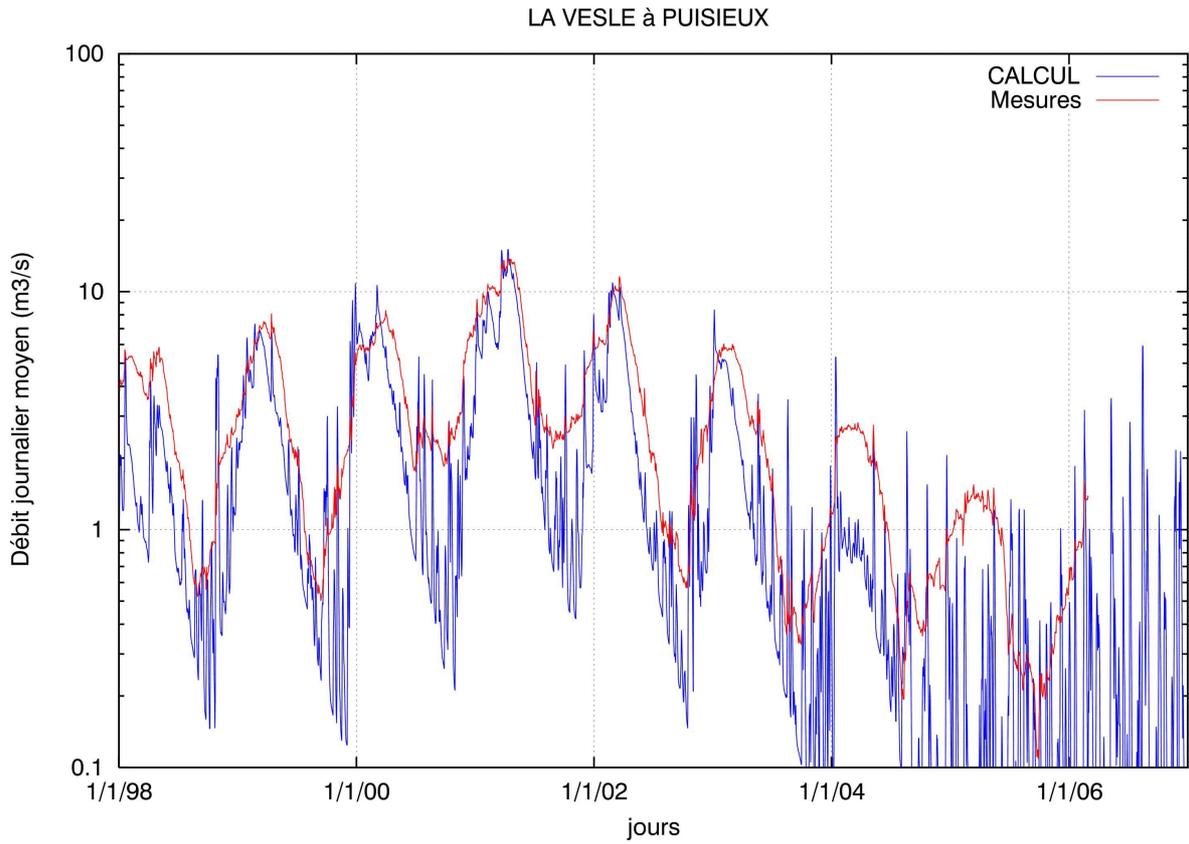


Figure 138 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vesle à la station de Puisieux

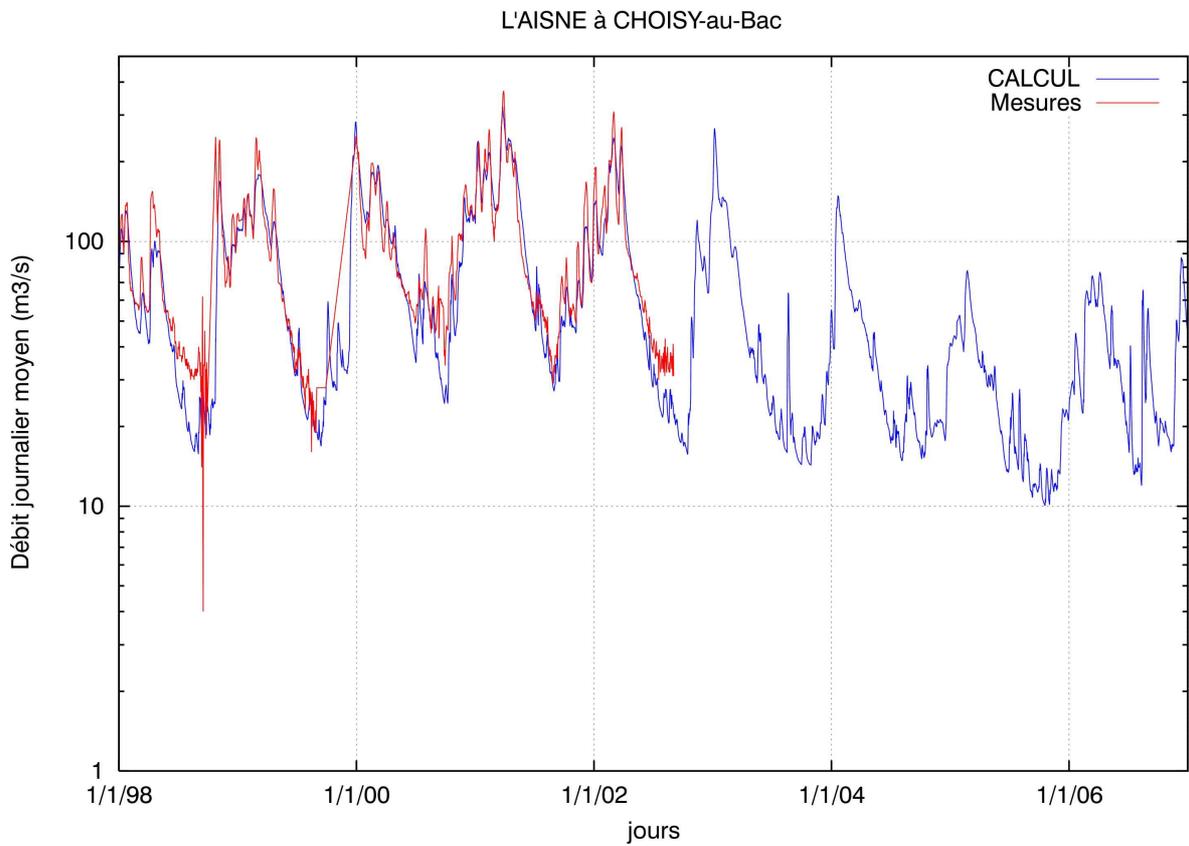


Figure 139 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Aisne à la station de Choisy-au-Bac

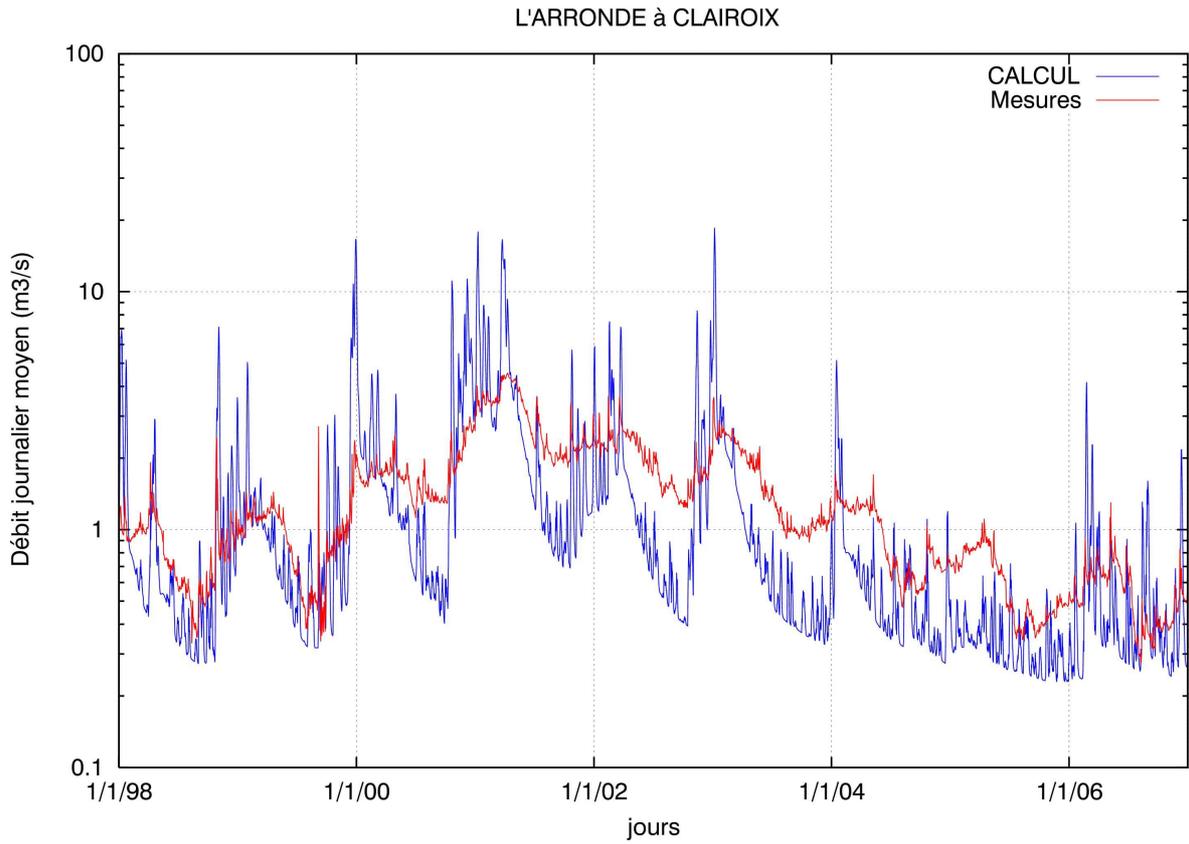


Figure 140 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Arronde à la station de Clairoux

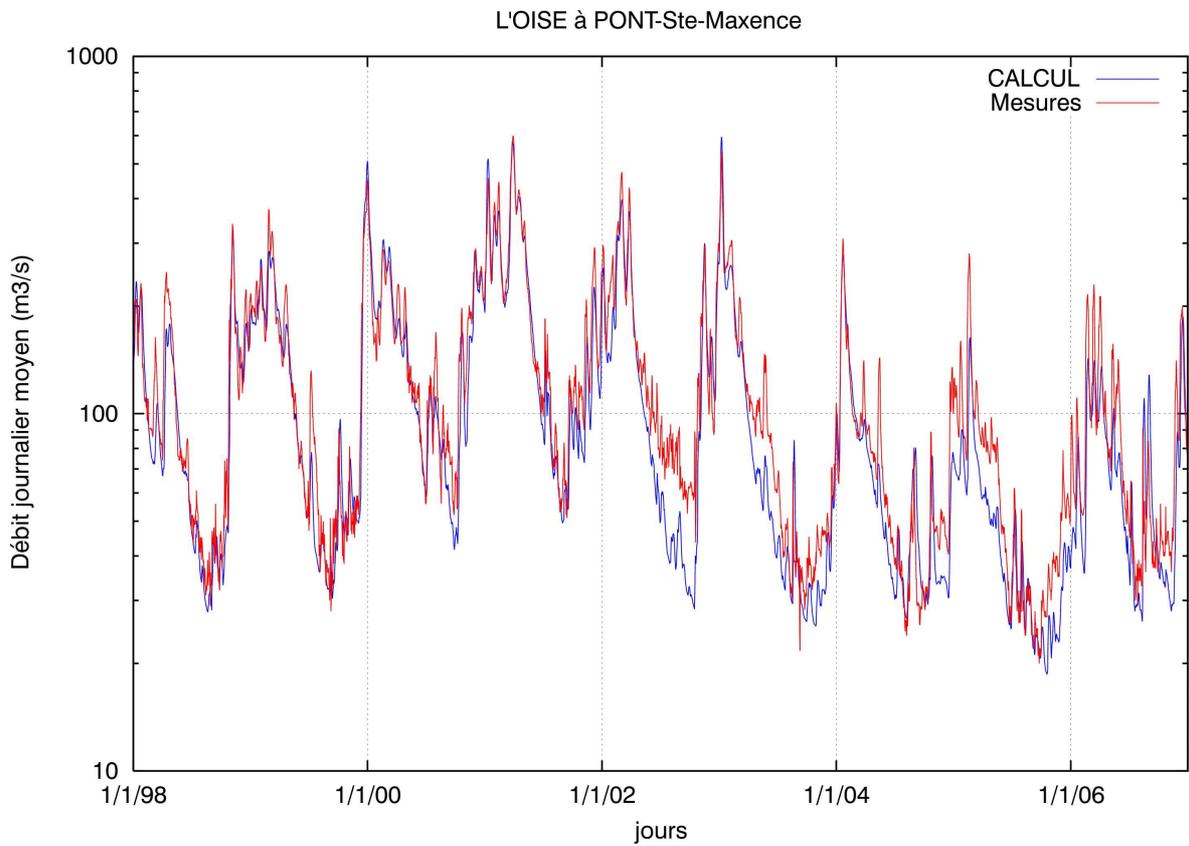


Figure 141 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Oise à la station de Pont-Ste-Maxence

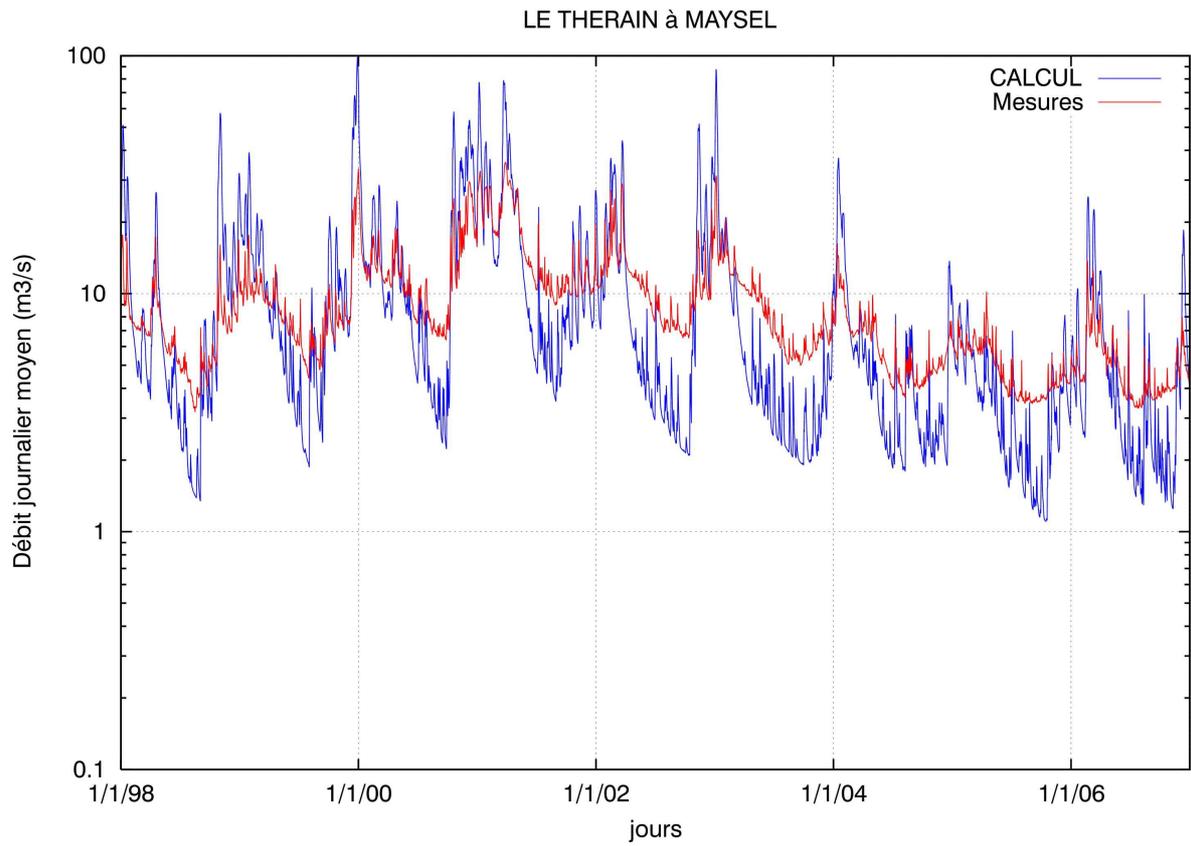


Figure 142 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Therain à la station de Maysel

7.7.2 BASSIN DE LA SEINE AMONT

La figure 143 présente la situation géographique des stations du bassin de la Seine en amont de Paris calculées par le modèle.

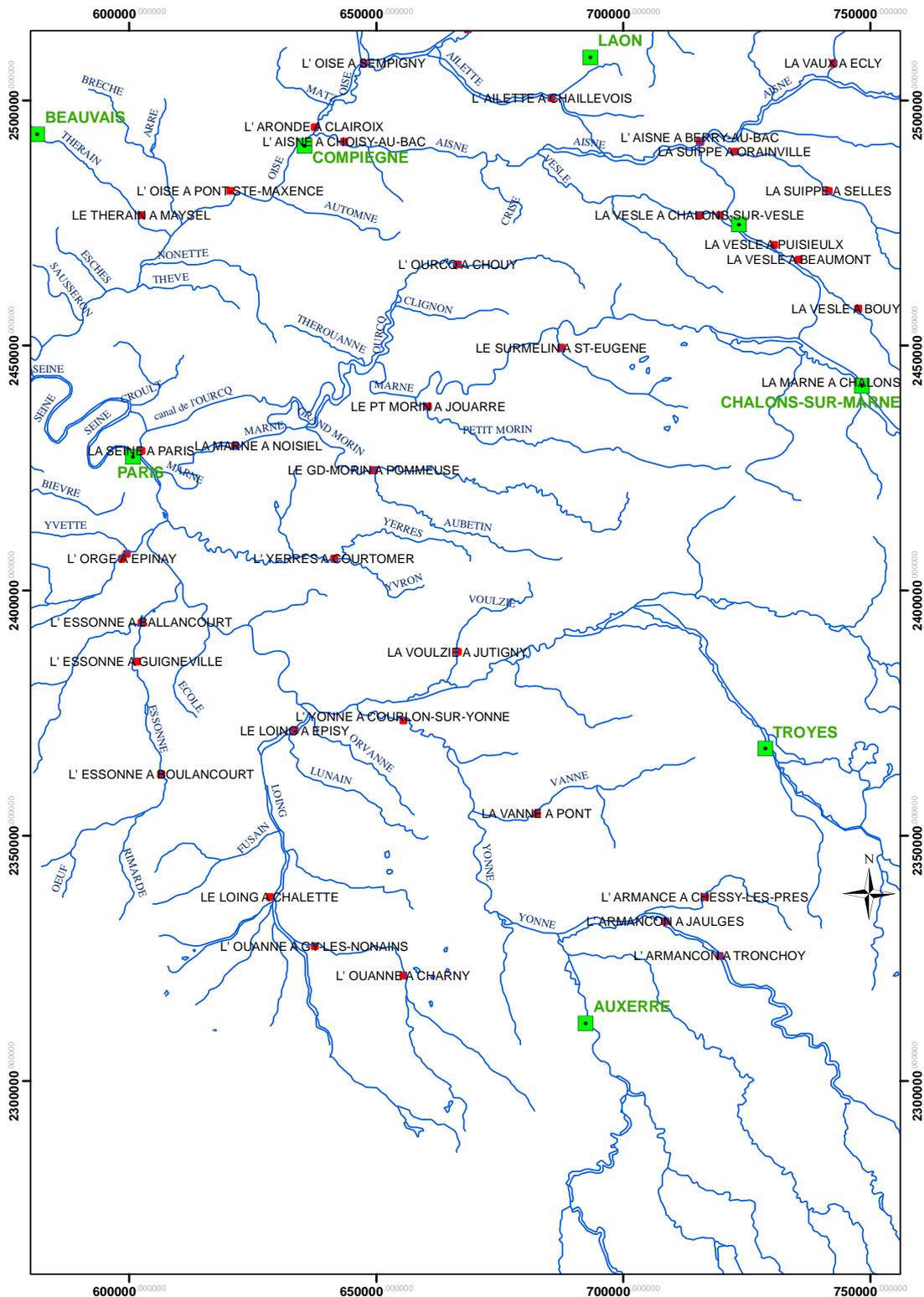


Figure 143 : situation géographique des stations simulées sur le bassin de la Seine en amont de Paris

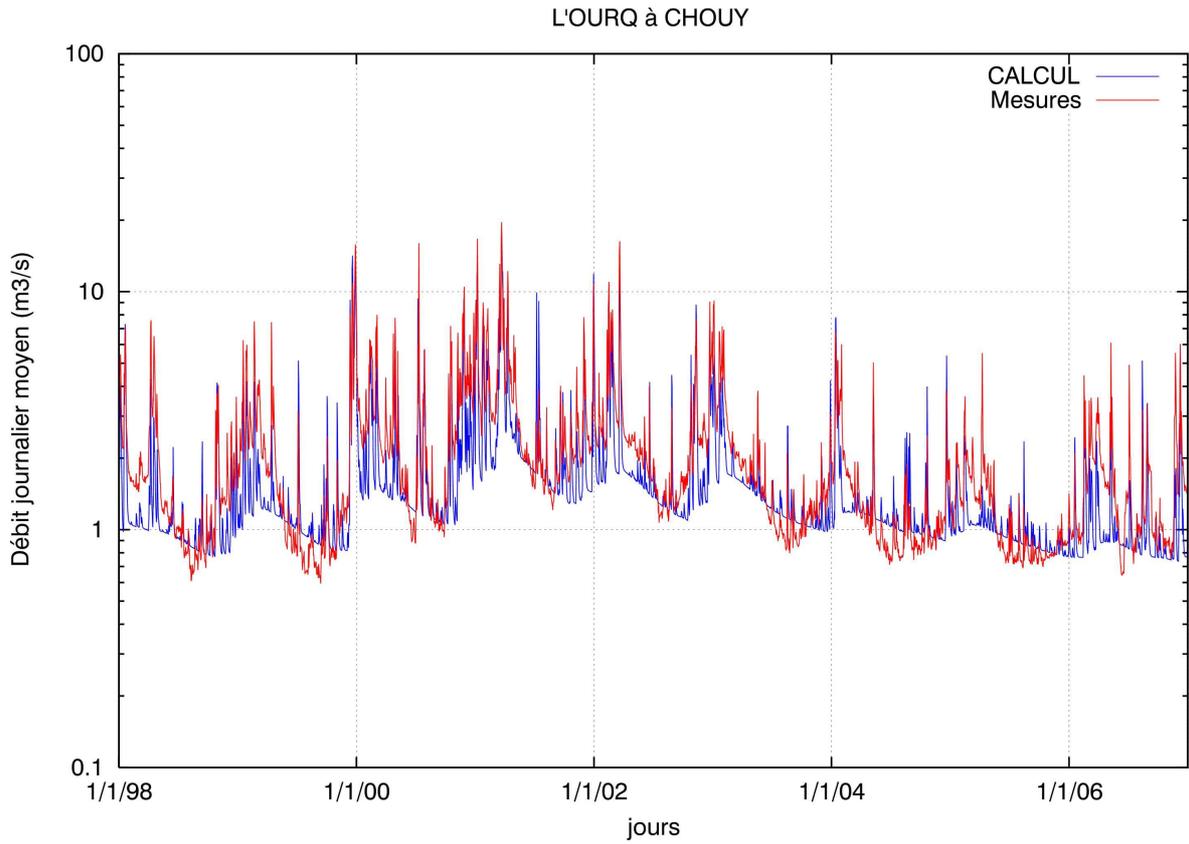


Figure 144 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Ourq à la station de Chouy

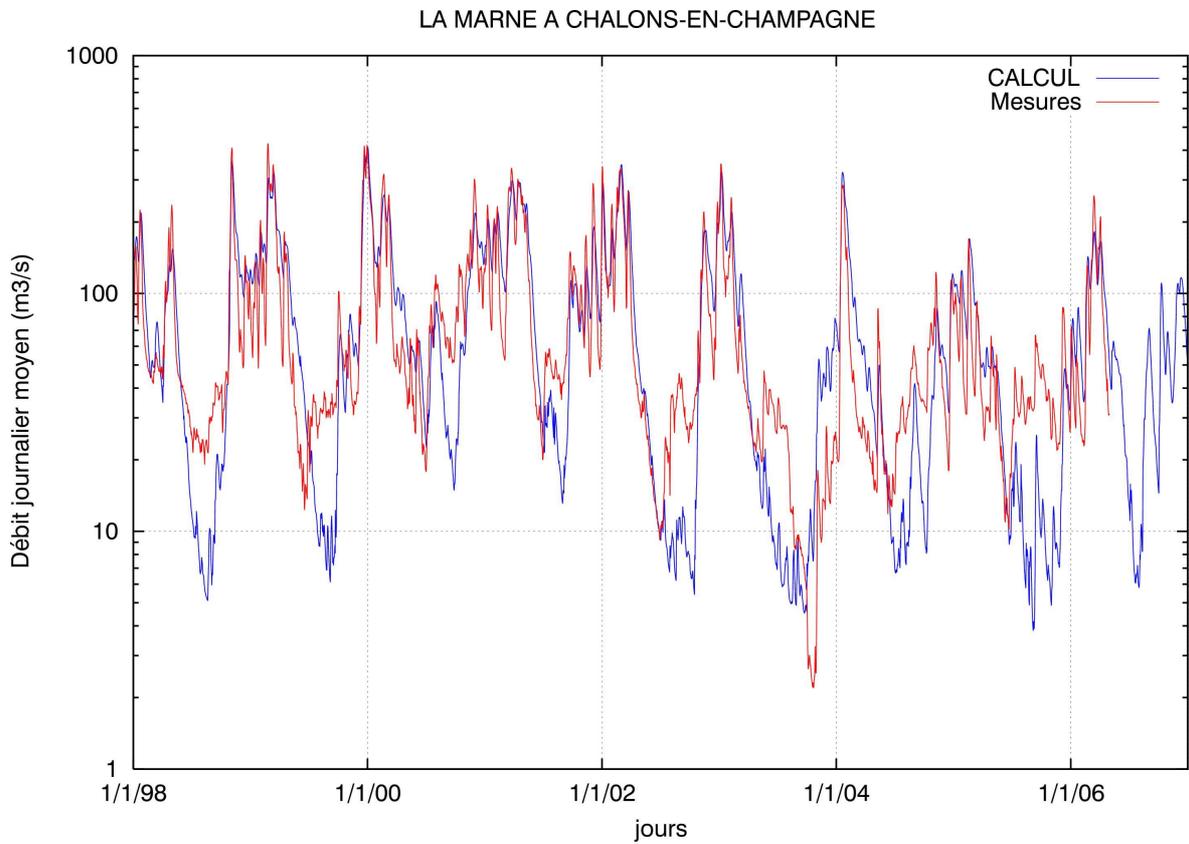


Figure 145 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Marne à la station de Châlons-en-Champagne

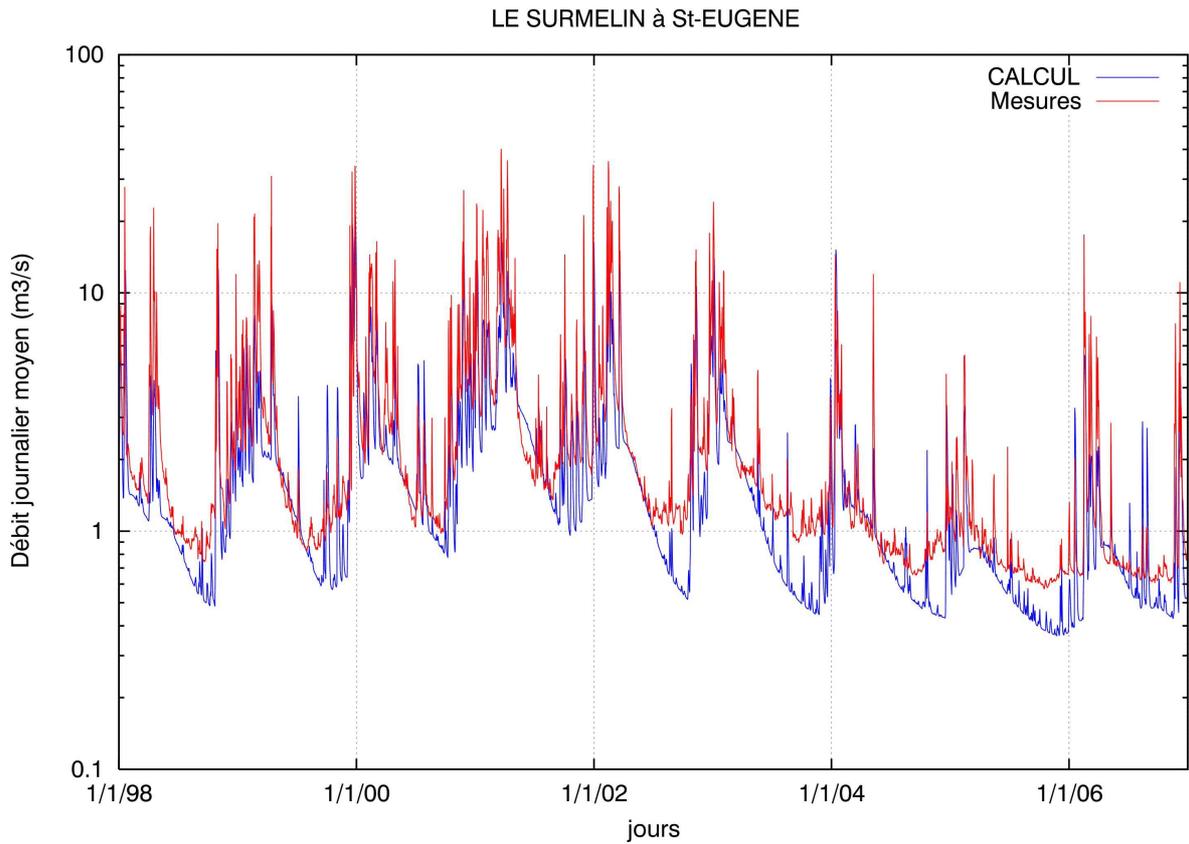


Figure 146 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Surlélin à la station de Saint-Eugène

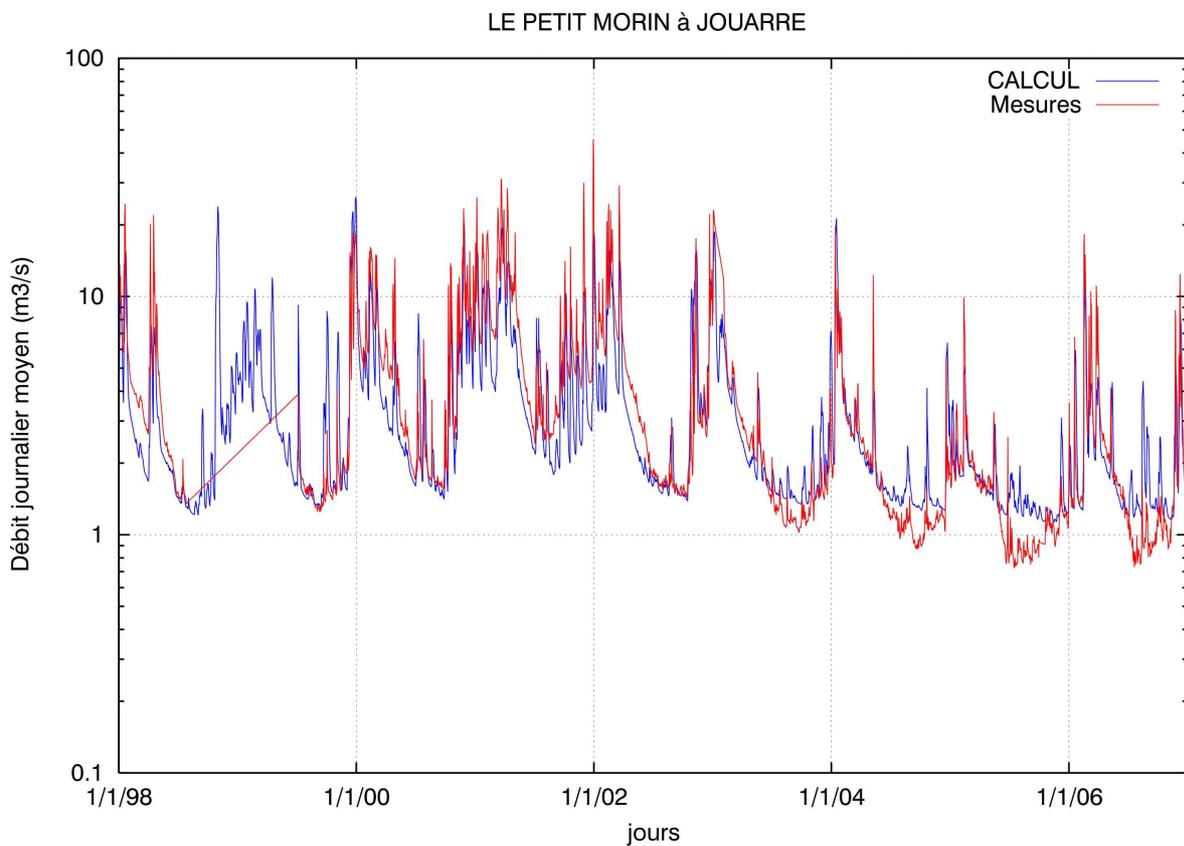


Figure 147 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Petit-Morin à la station de Jouarre

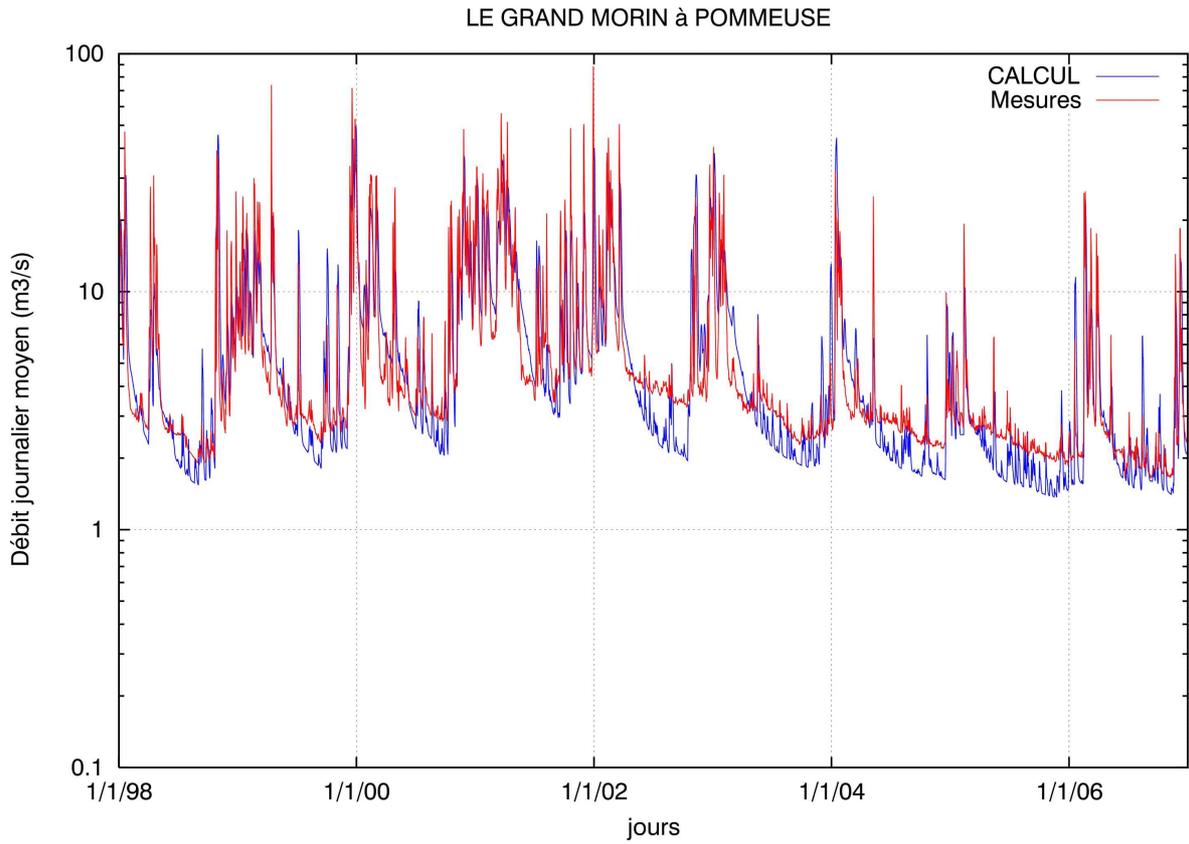


Figure 148 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Grand-Morin à la station de Pommeuse

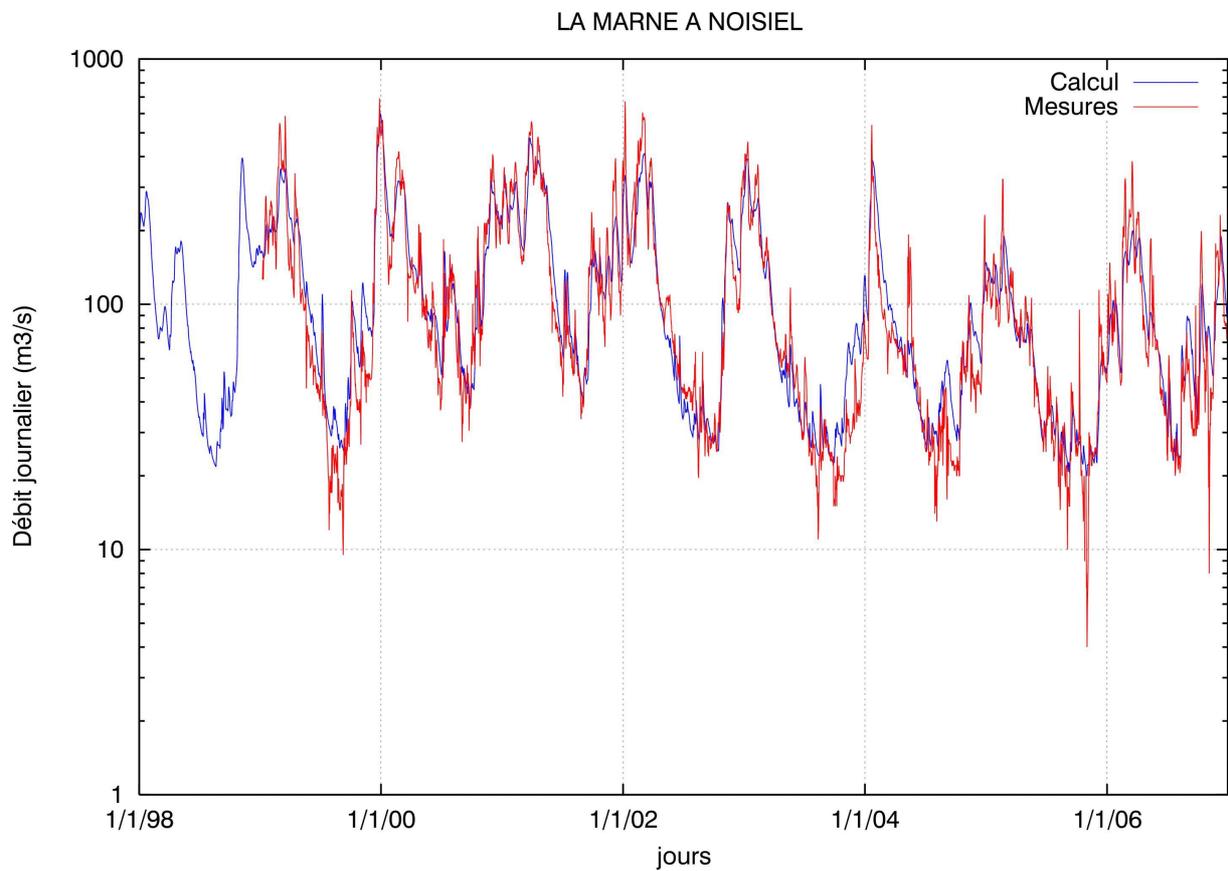


Figure 149 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Marne à la station de Noisiel (Gournay)

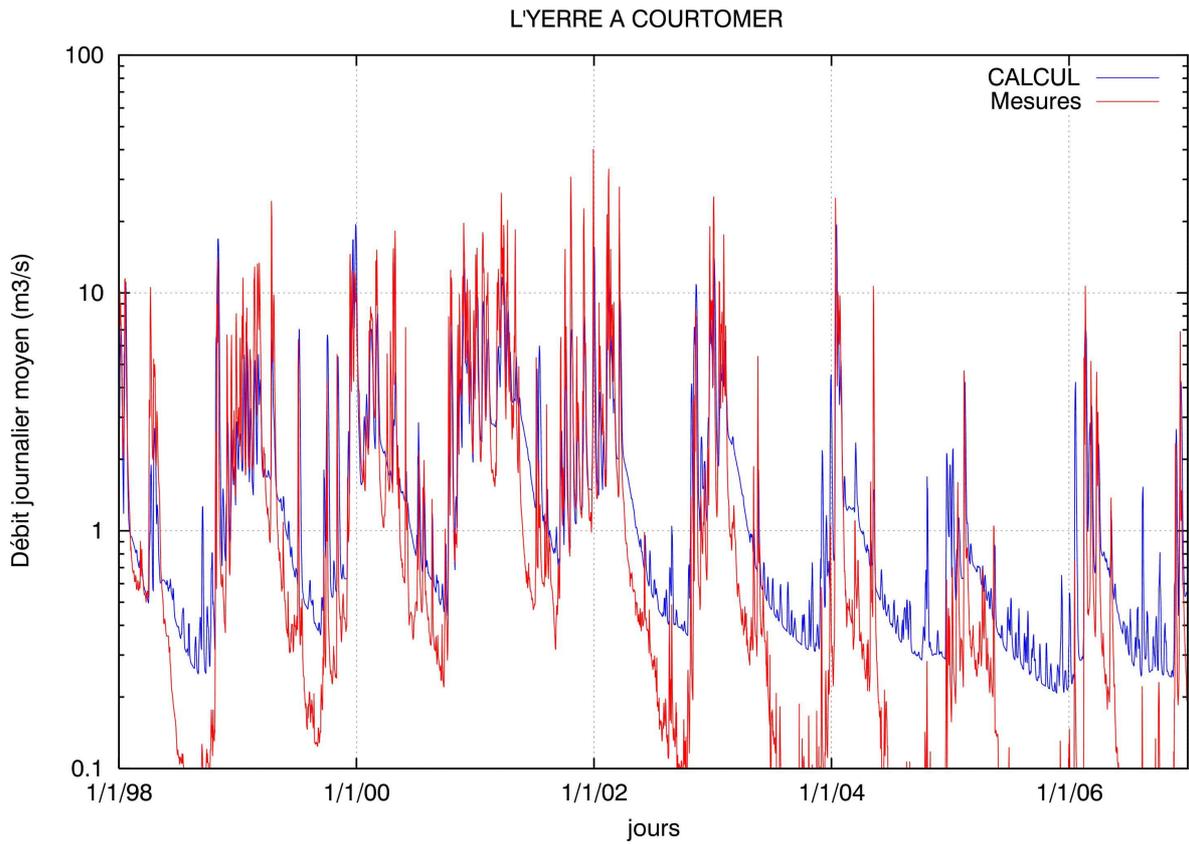


Figure 150 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Yerre à la station de Courtomer

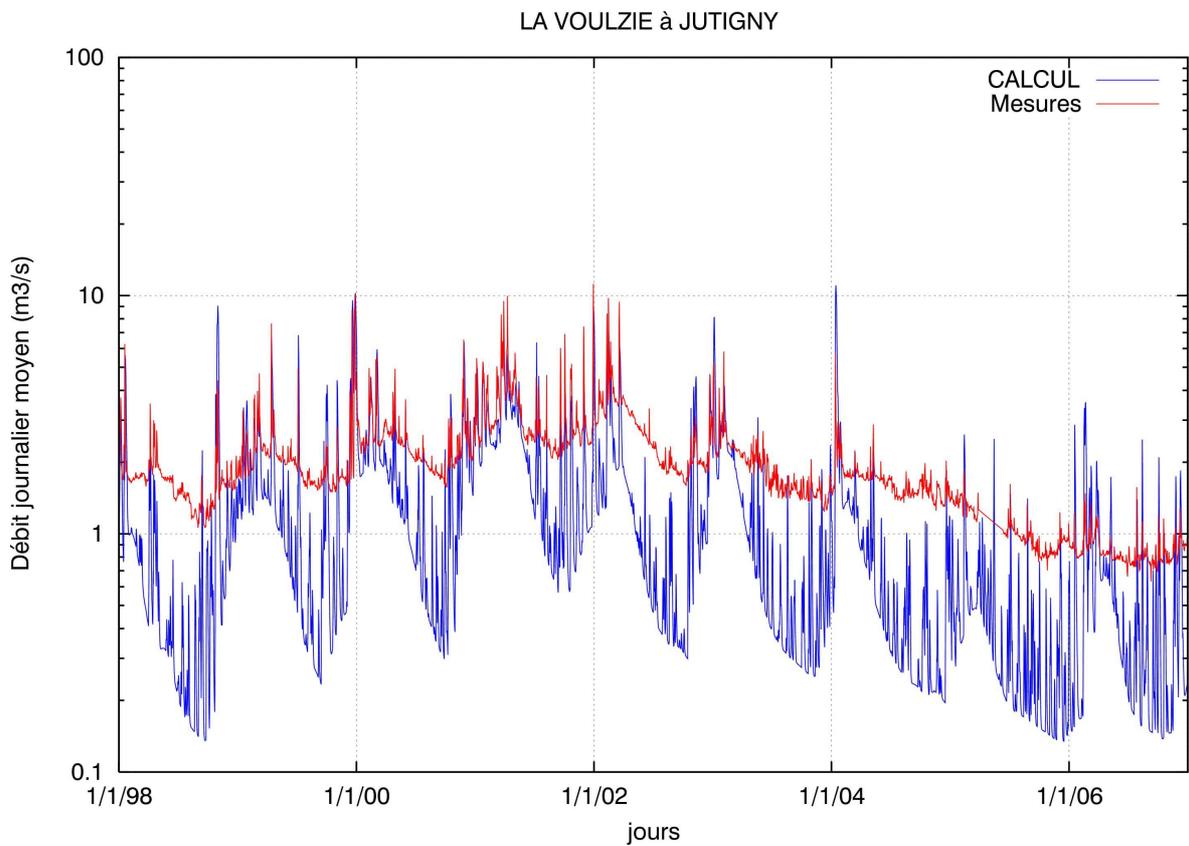


Figure 151 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vouizie à la station de Jutigny

L'ARMANCON à TRONCHOY

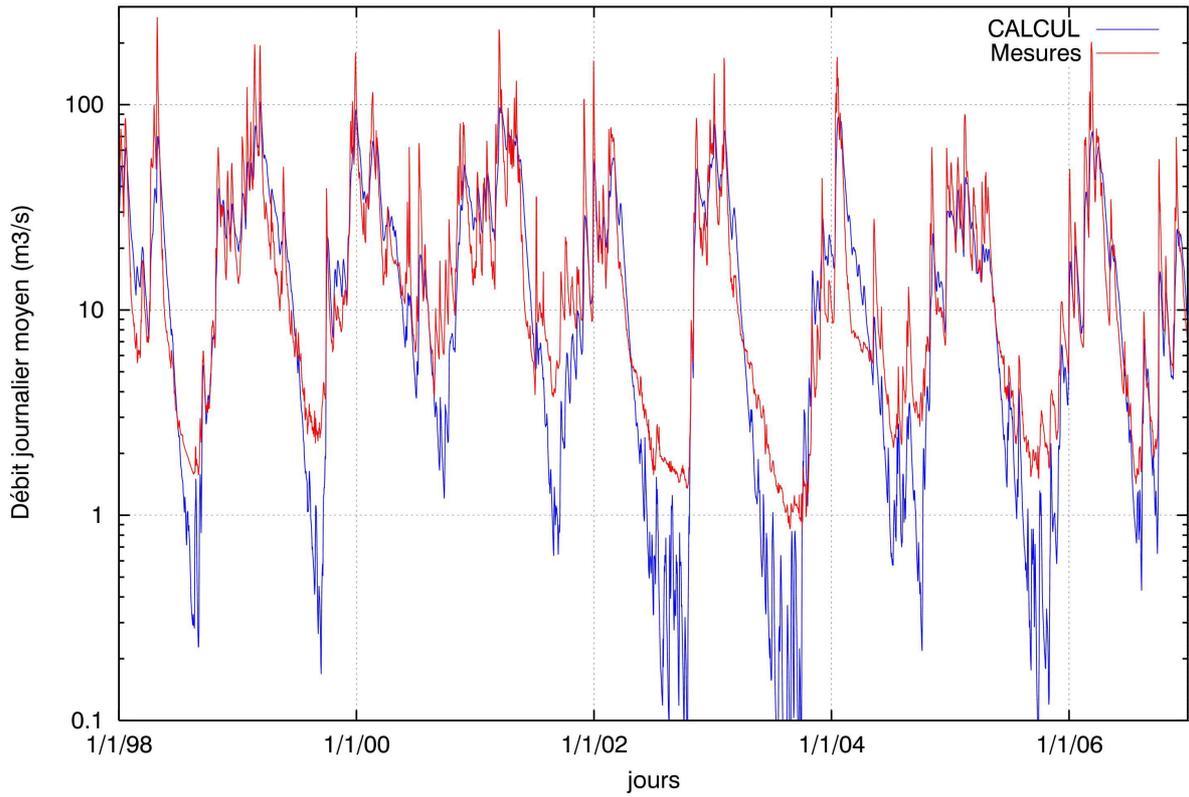


Figure 152 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Armançon à la station de Tronchoy

L'ARMANCON à JAULGES

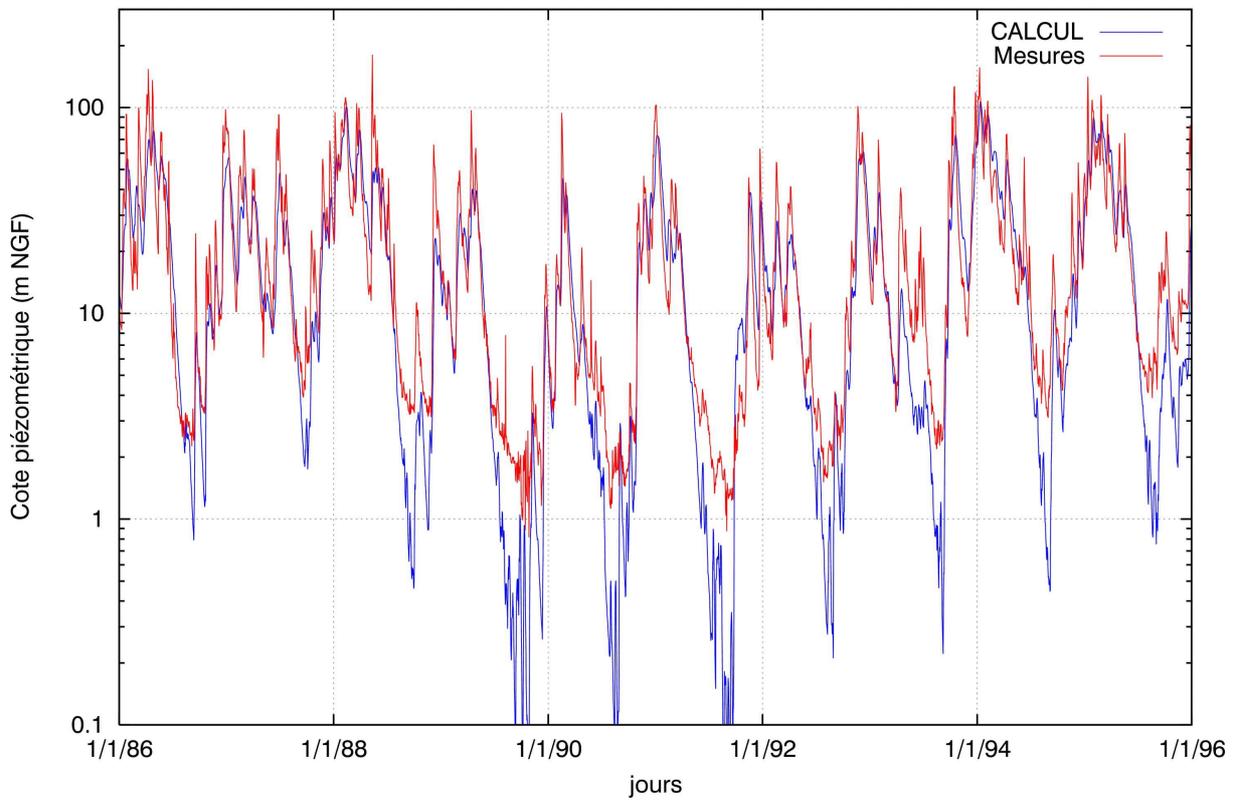


Figure 153 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Armançon à la station de Jaulges

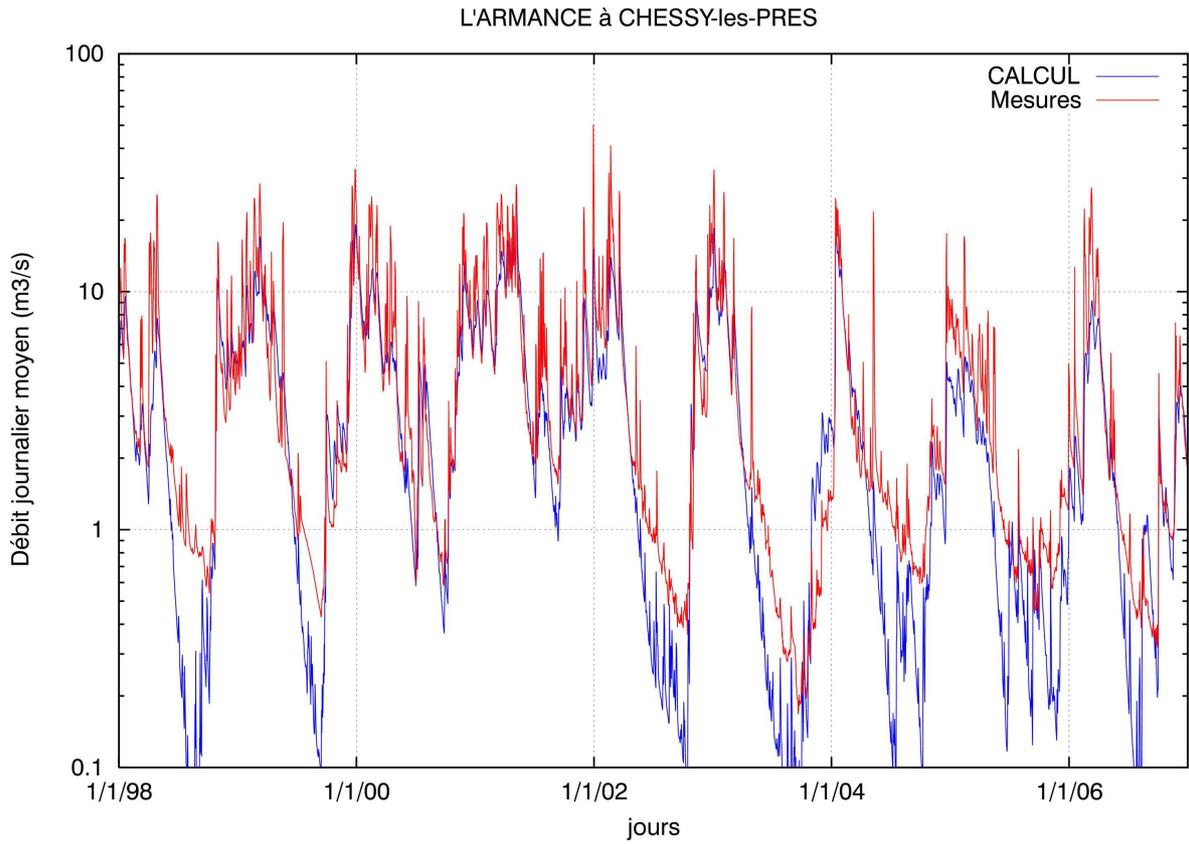


Figure 154 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Armance à la station de Chesy-les-Prés

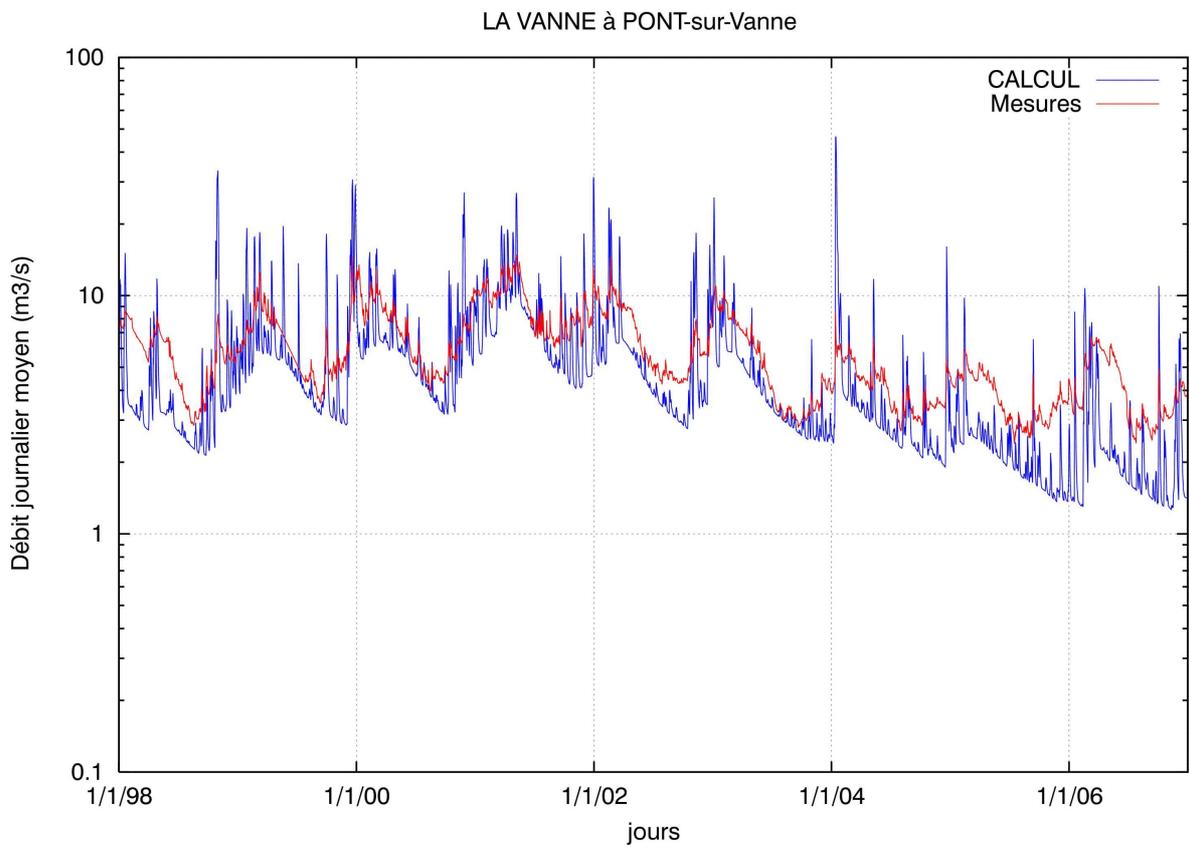


Figure 155 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Vanne à la station de Pont-sur-Vanne

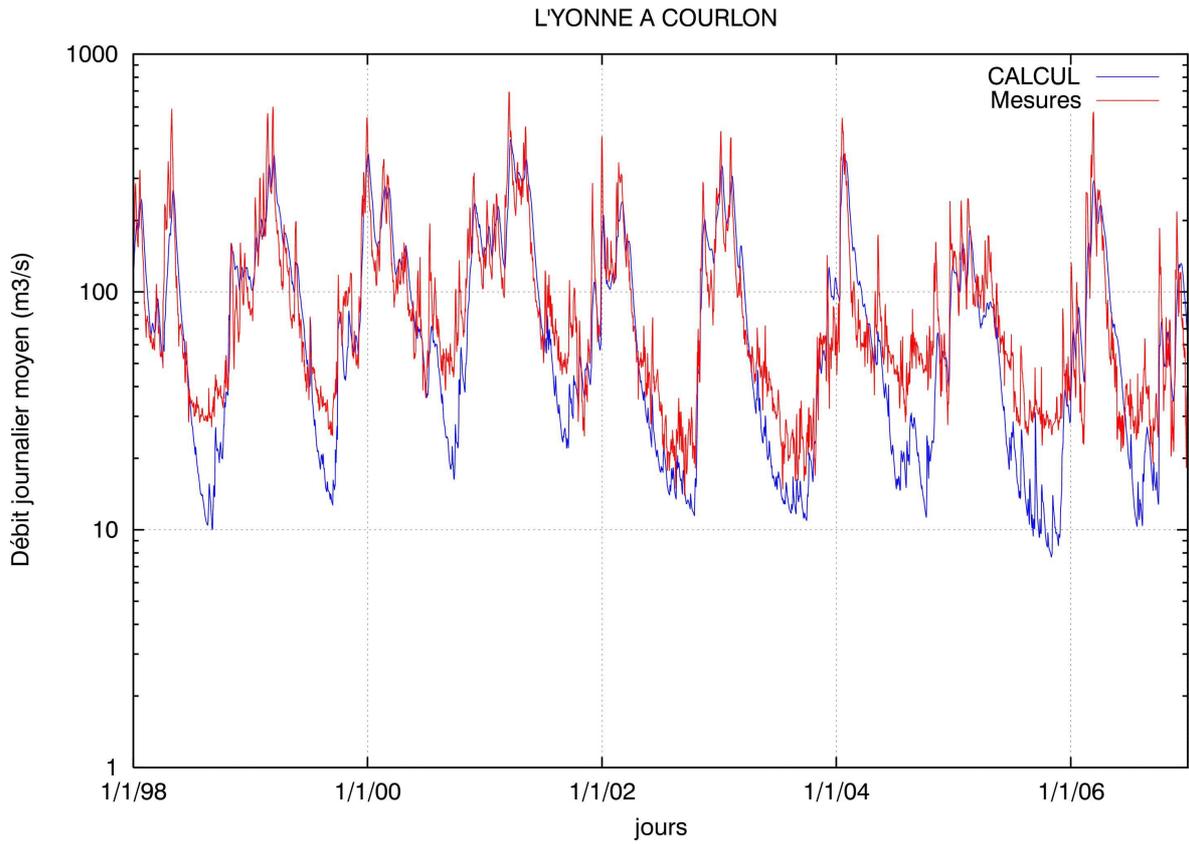


Figure 156 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Yonne à la station de Courlon

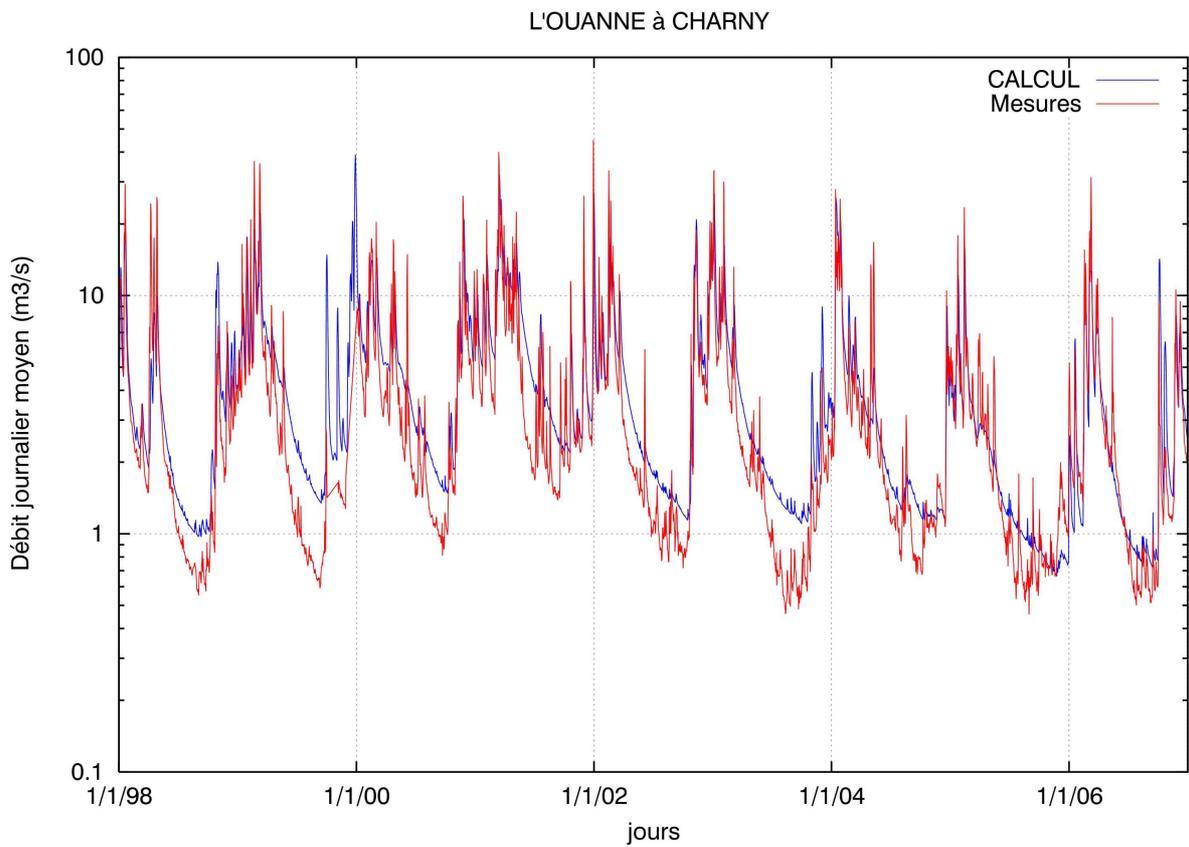


Figure 157 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Ouanne à la station de Charny

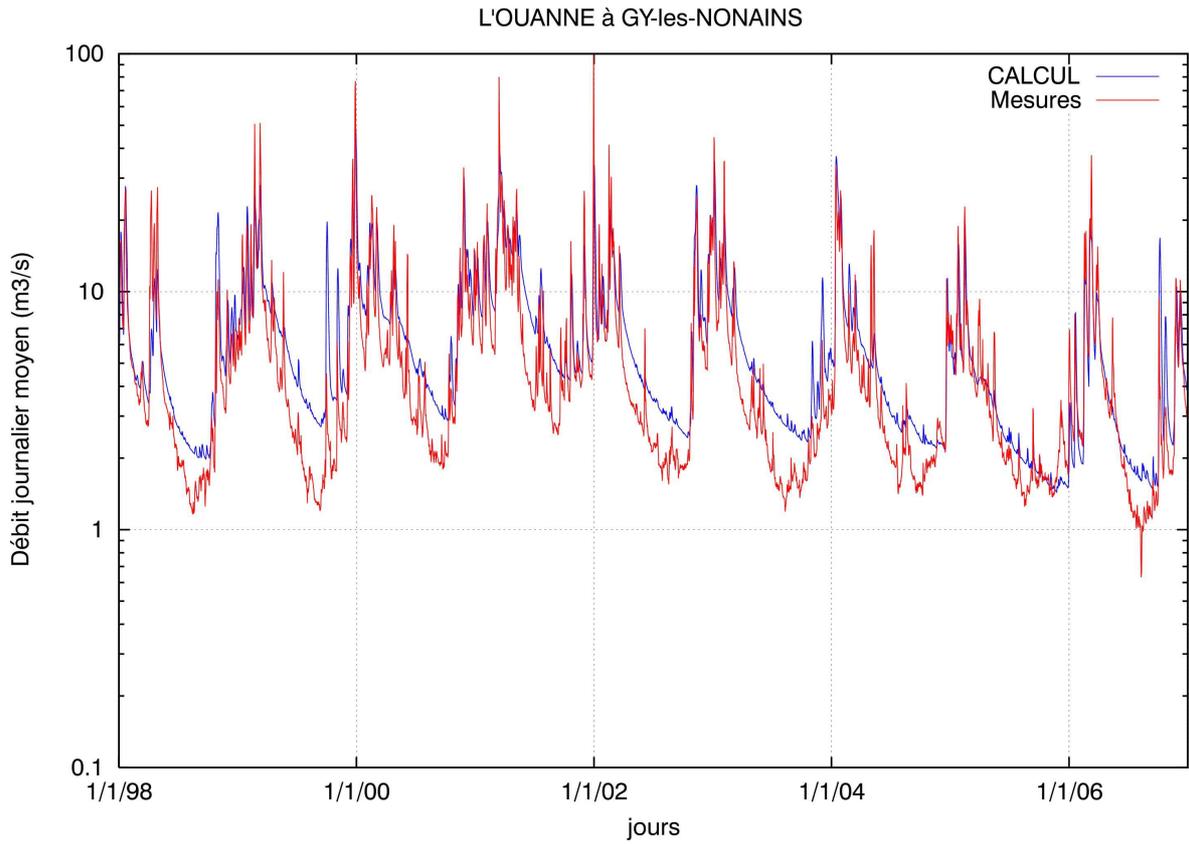


Figure 158 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Ouanne à la station de Gy-lès-Nonains

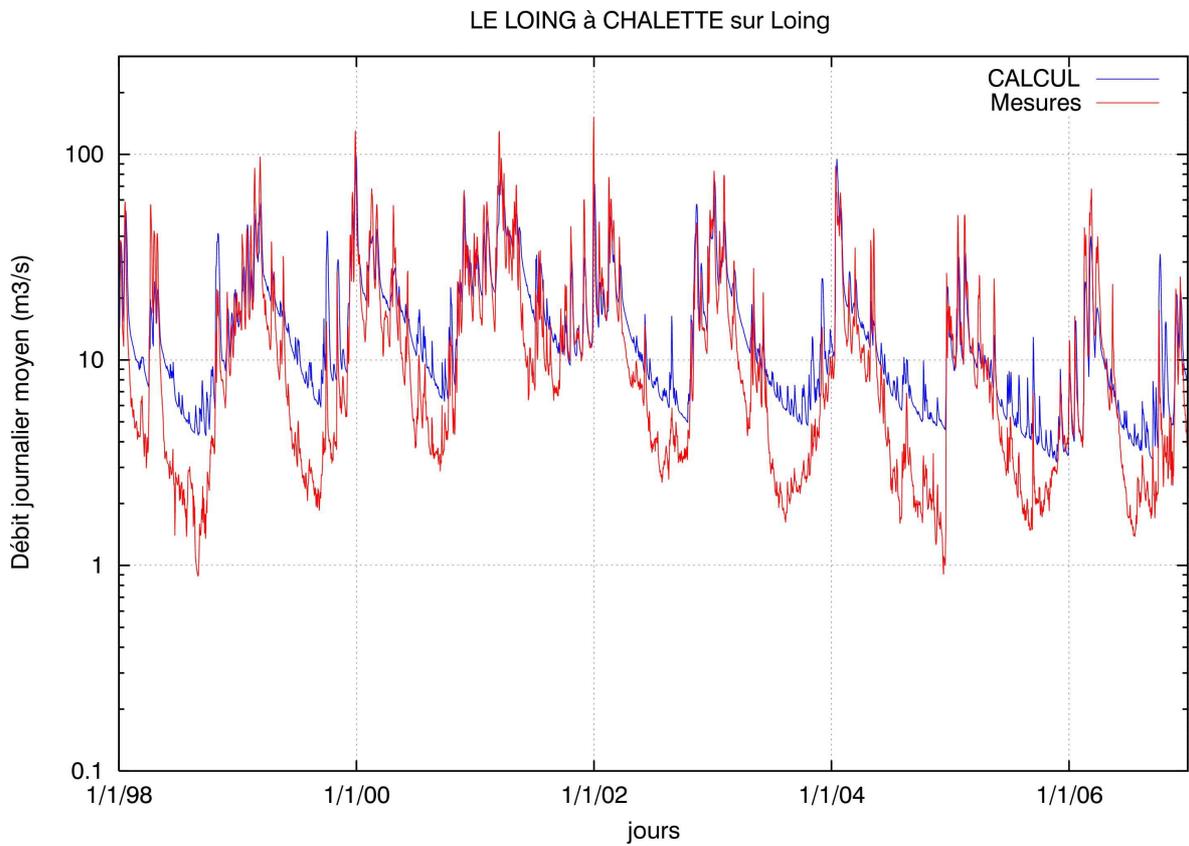


Figure 159 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Loing à la station de Chalette-sur-Loing

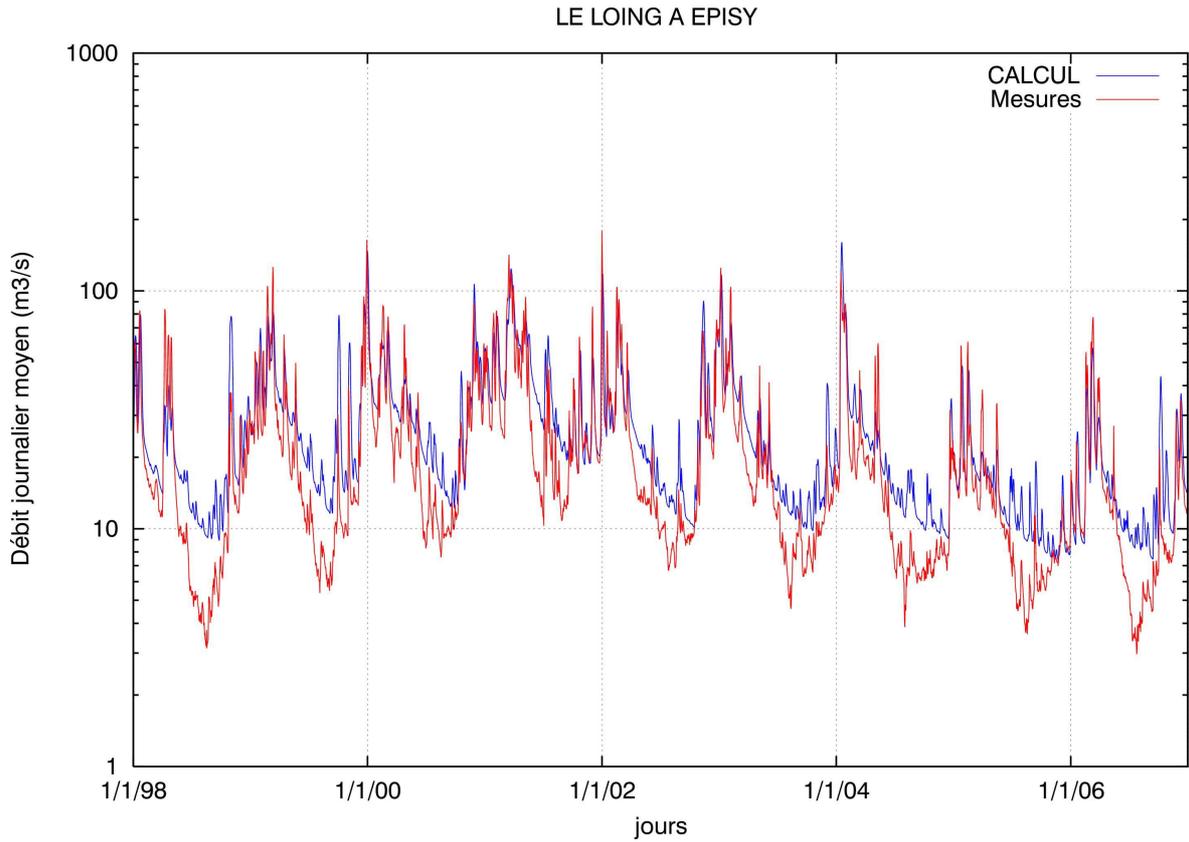


Figure 160 : comparaison des débits simulés et mesurés sur le Loing à la station d'Episy

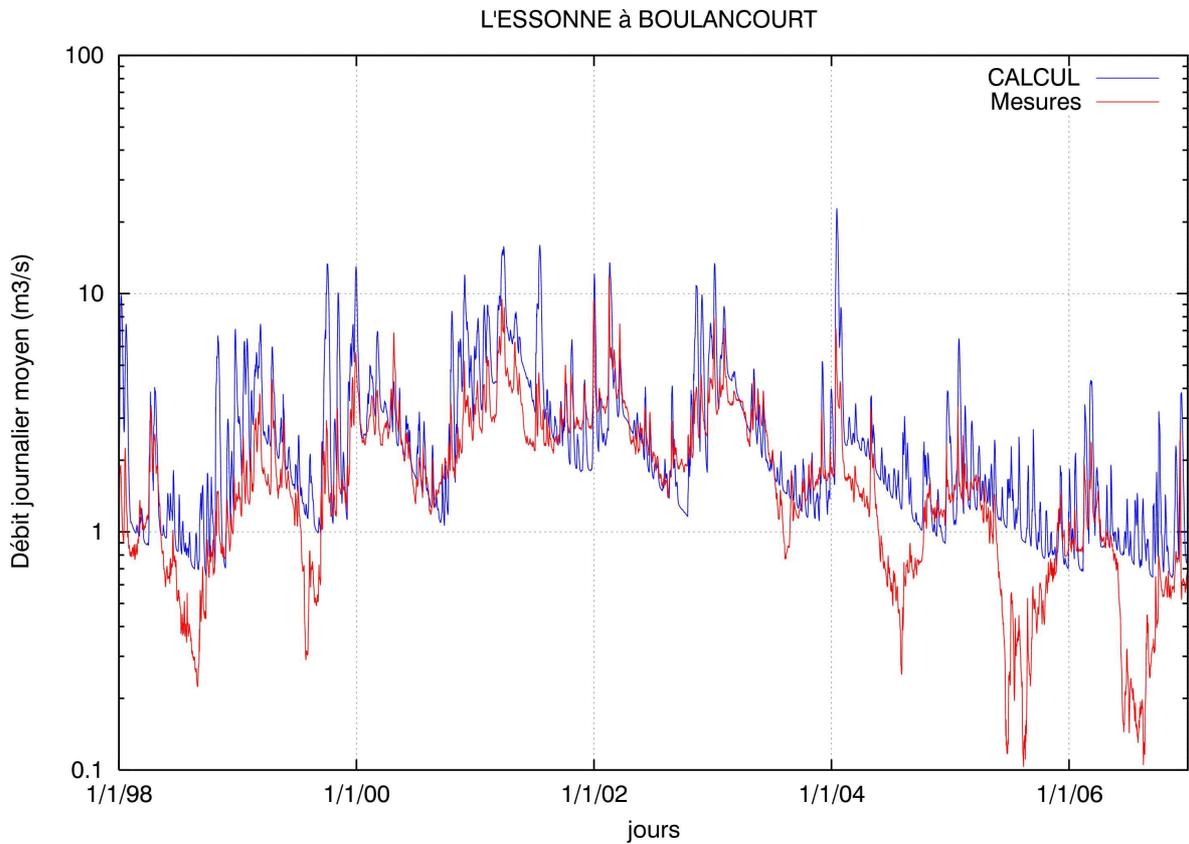


Figure 161 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Essonne à la station de Boulancourt

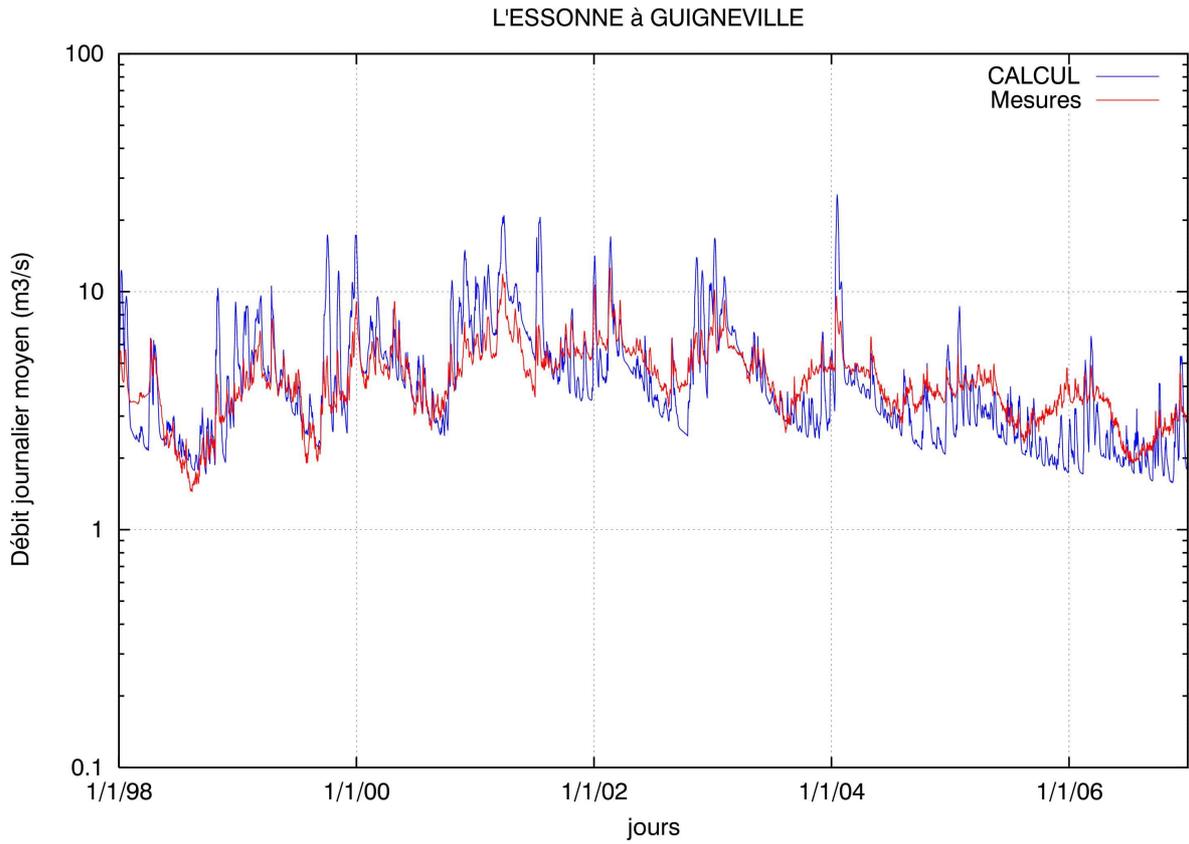


Figure 162 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Essonne à la station de Guigneville

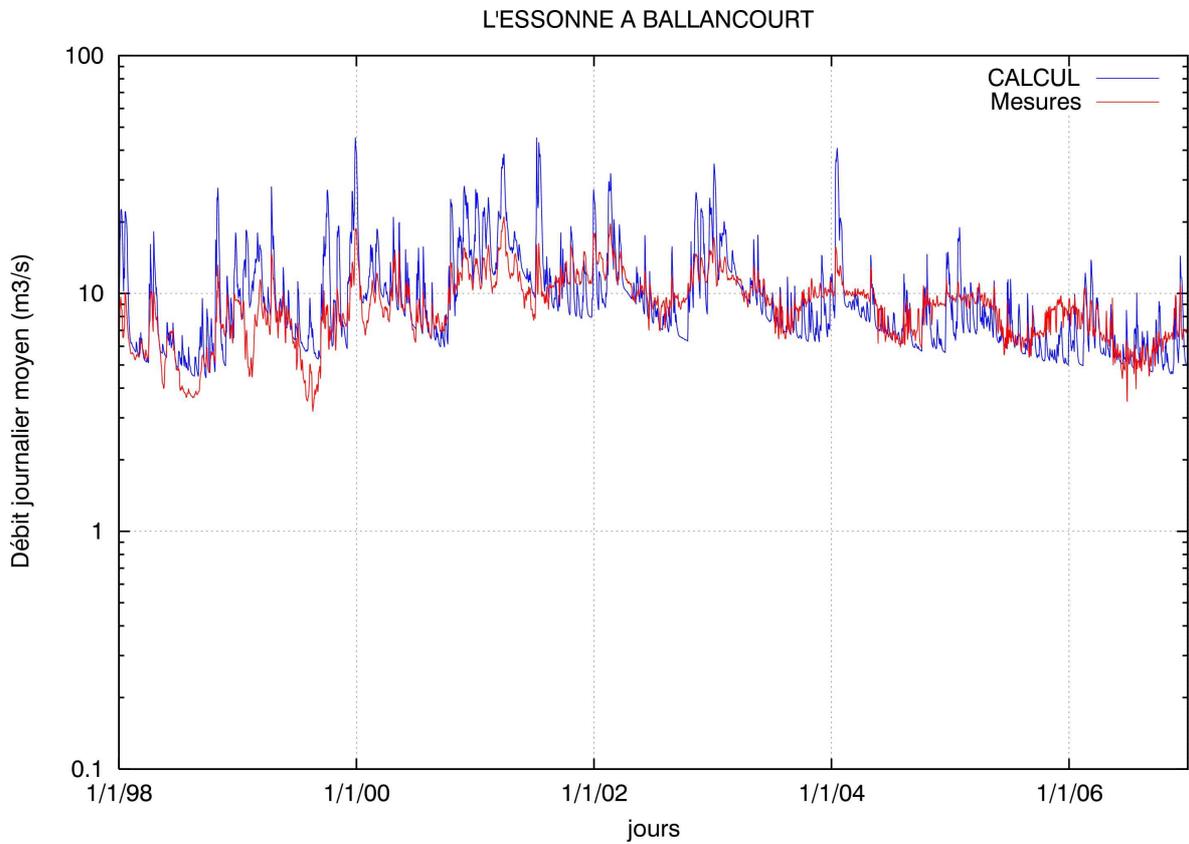


Figure 163 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Essonne à la station de Ballancourt

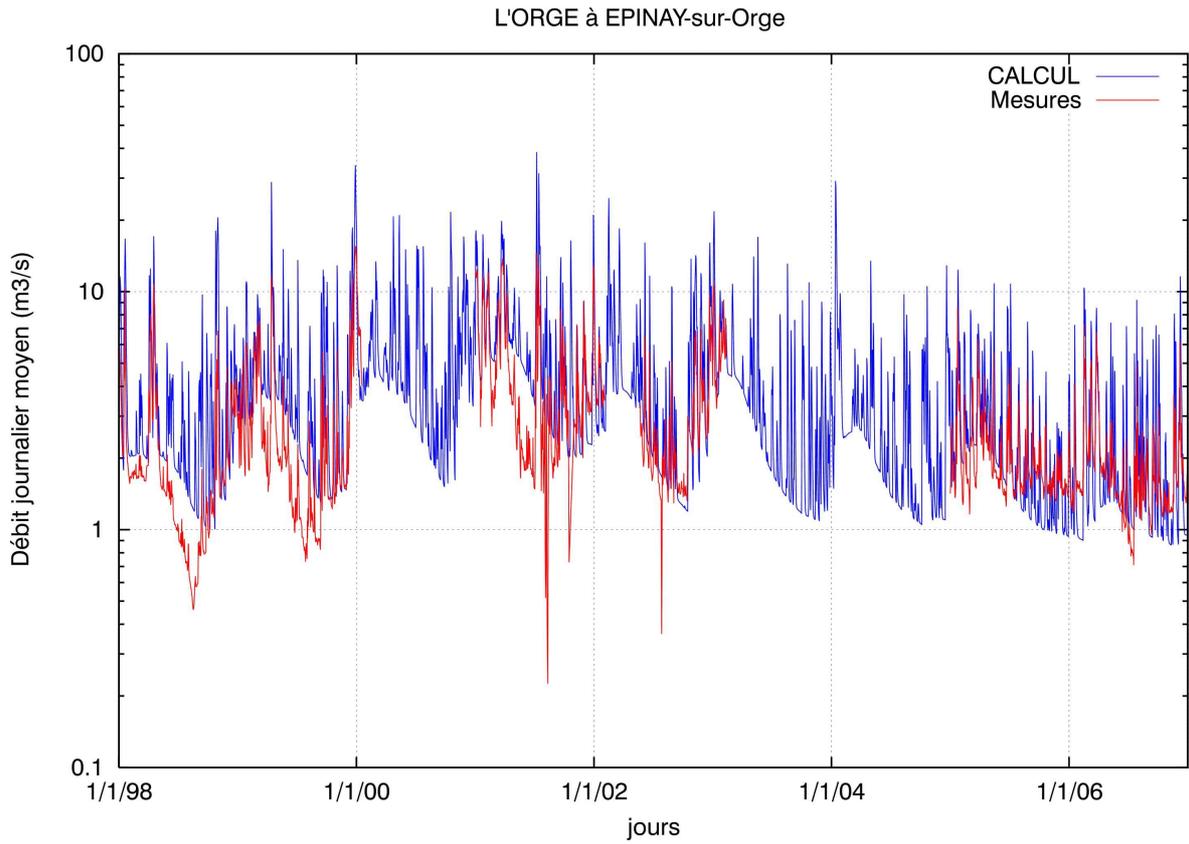


Figure 164 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Orge à la station d'Epina-sur-Orge

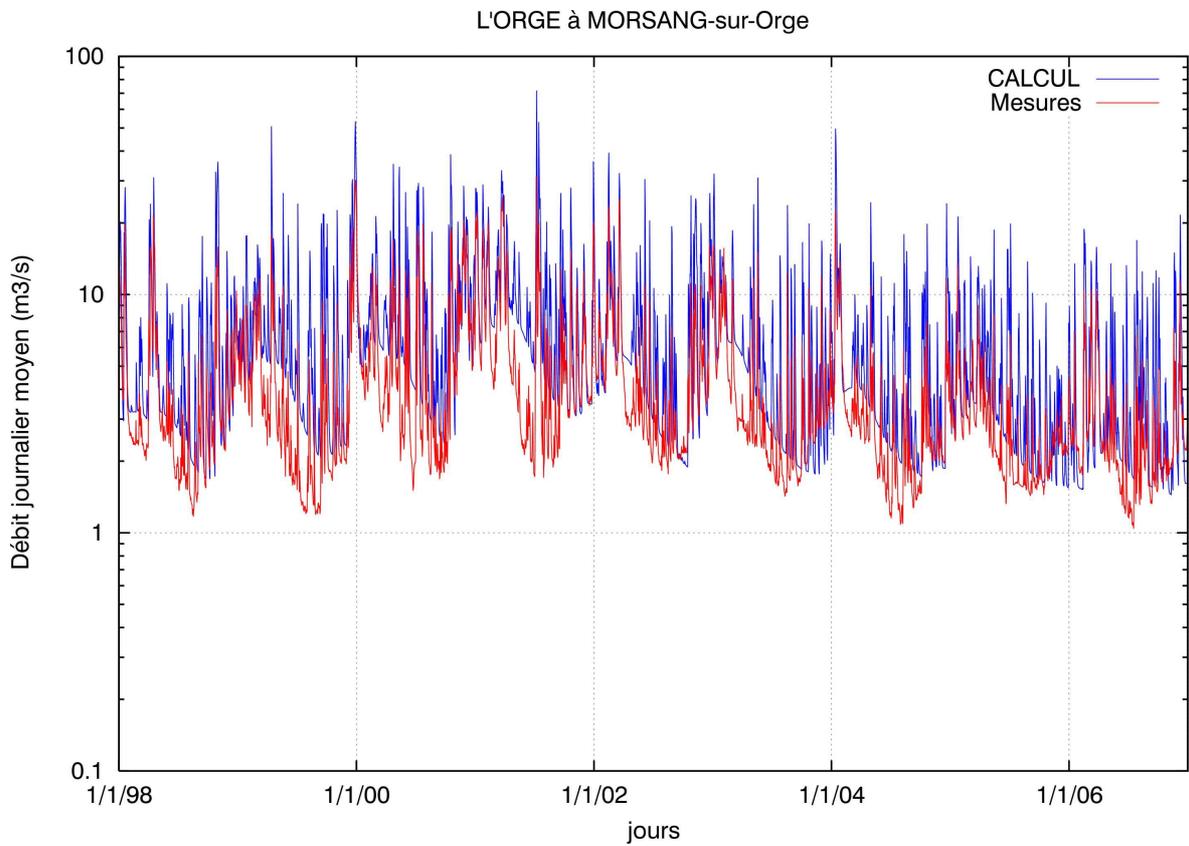


Figure 165 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Orge à la station de Morsang-sur-Orge

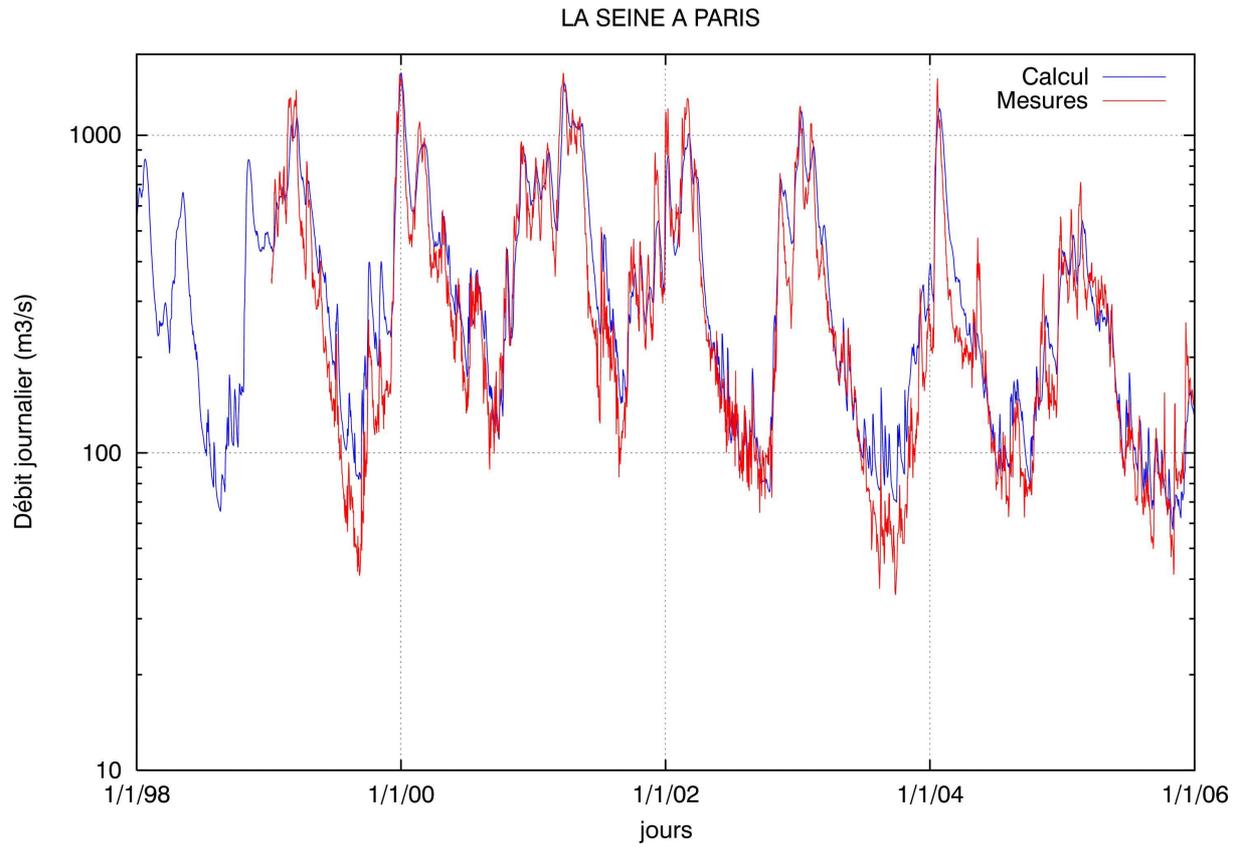


Figure 166 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Paris-Pont d'Austerlitz

7.7.3 BASSIN DE LA SEINE AVAL

La figure 167 présente la situation géographique des stations du bassin de la Seine en aval de Paris calculées par le modèle.

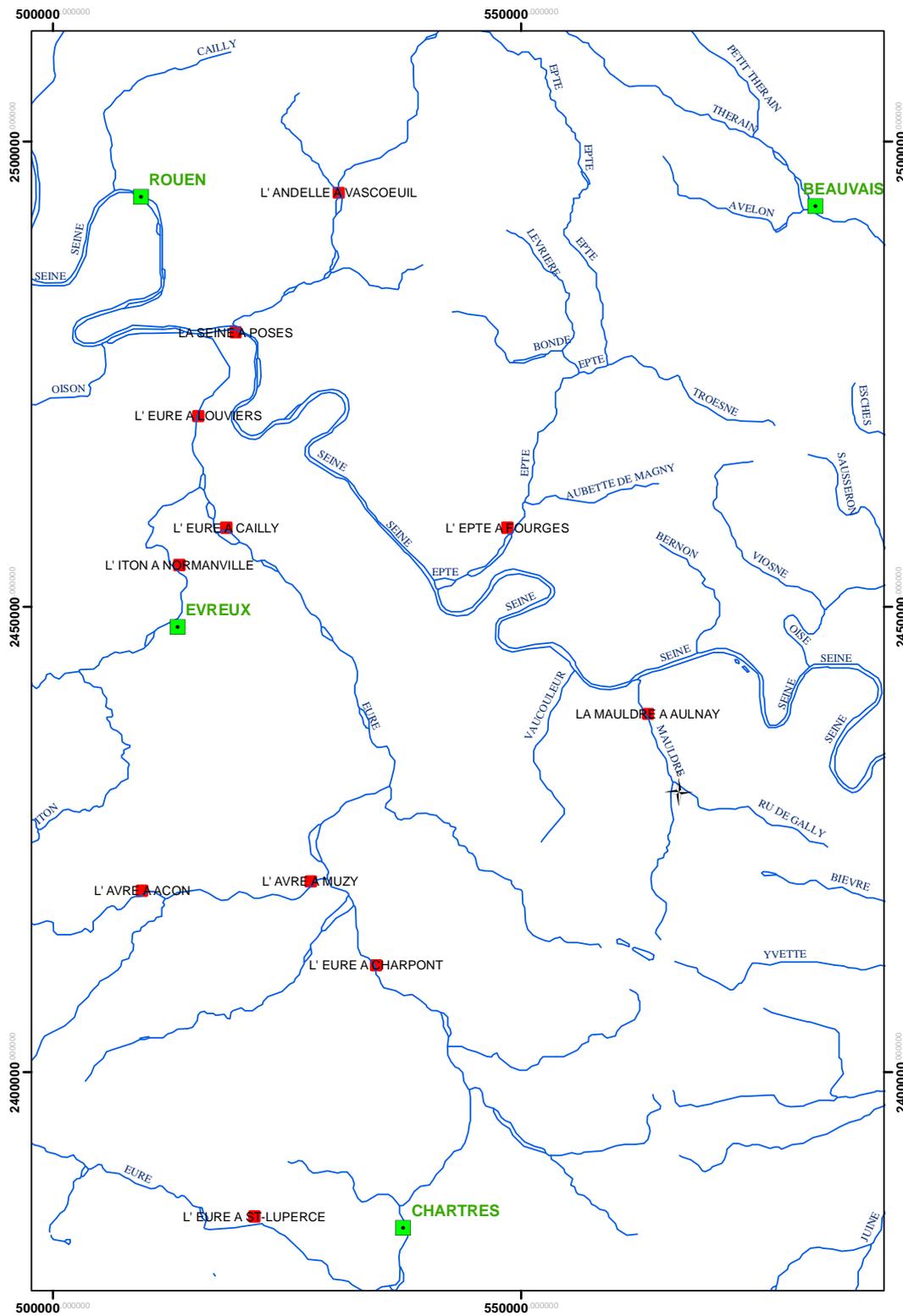


Figure 167 : situation géographique des stations simulées sur le bassin de la Seine en aval de Paris

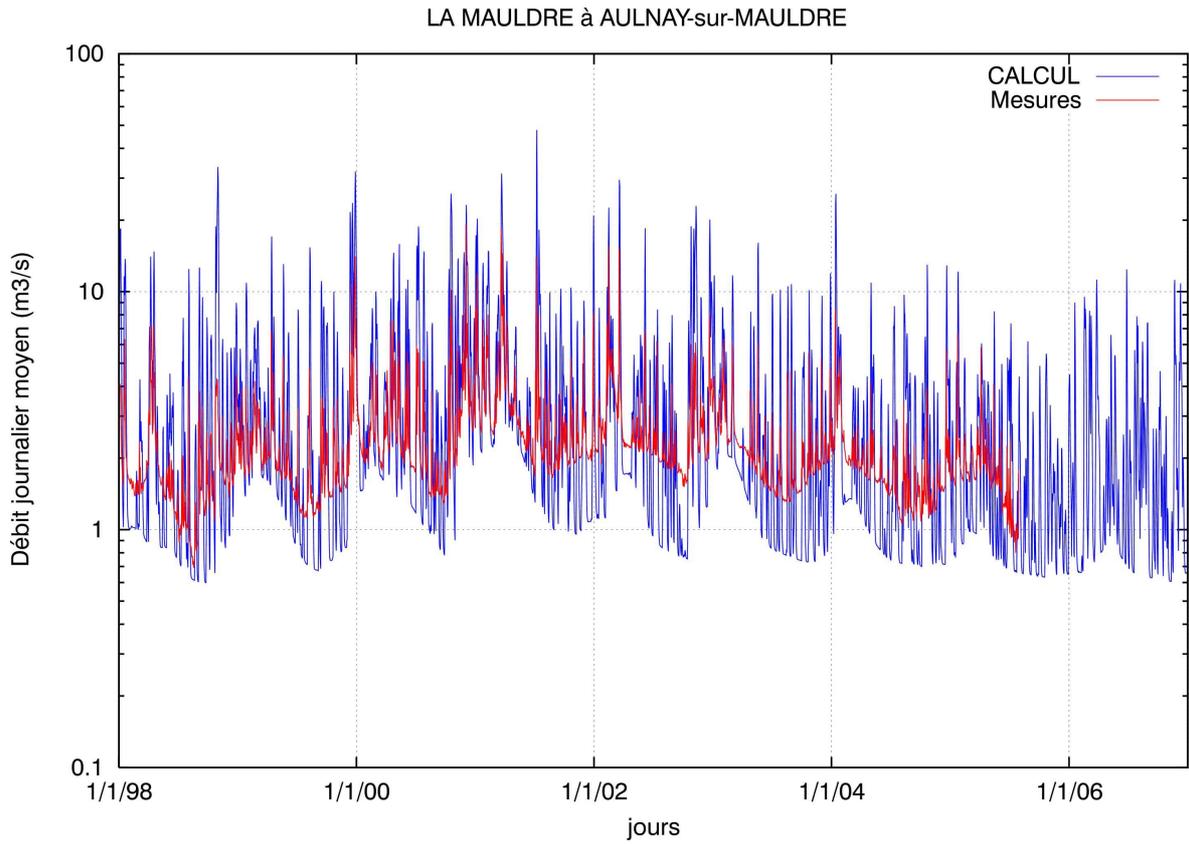


Figure 168 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Mauldre à la station d'Aulnay-sur-Mauldre

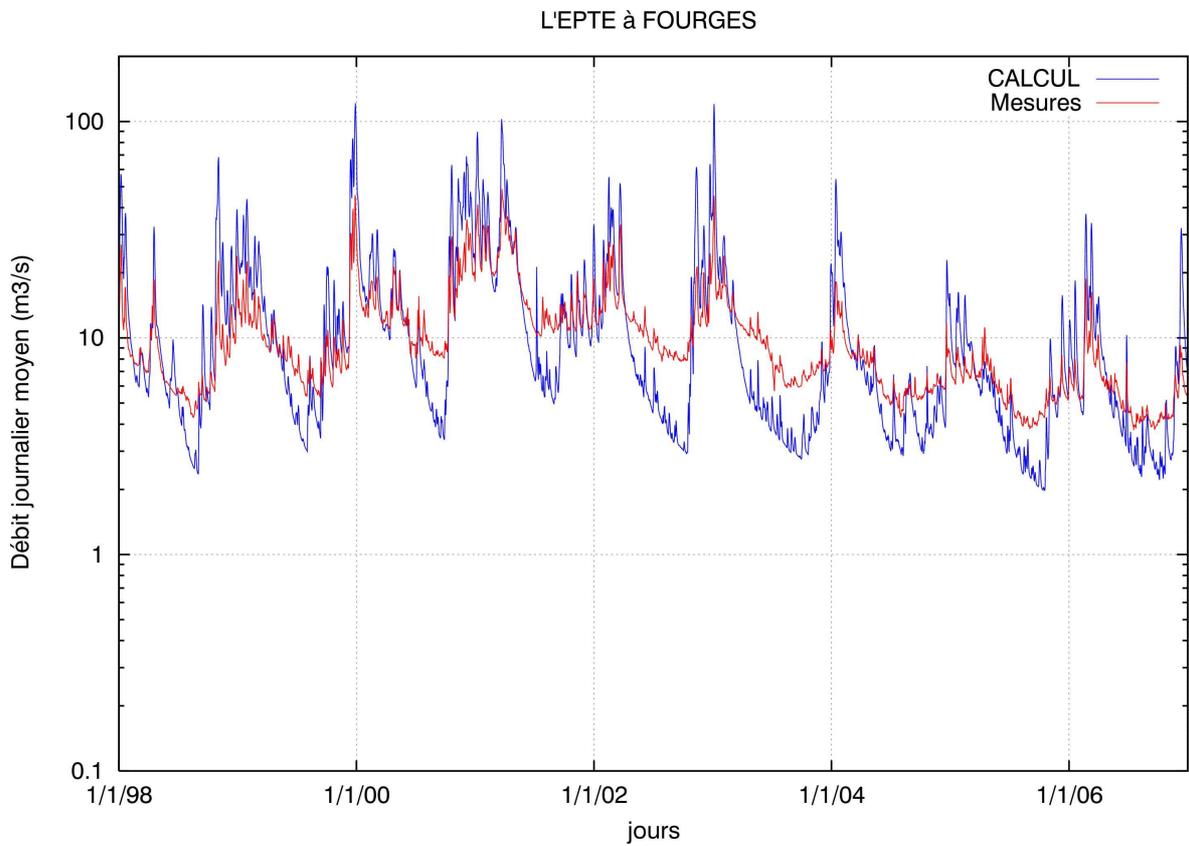


Figure 169 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Epte à la station de Fourges

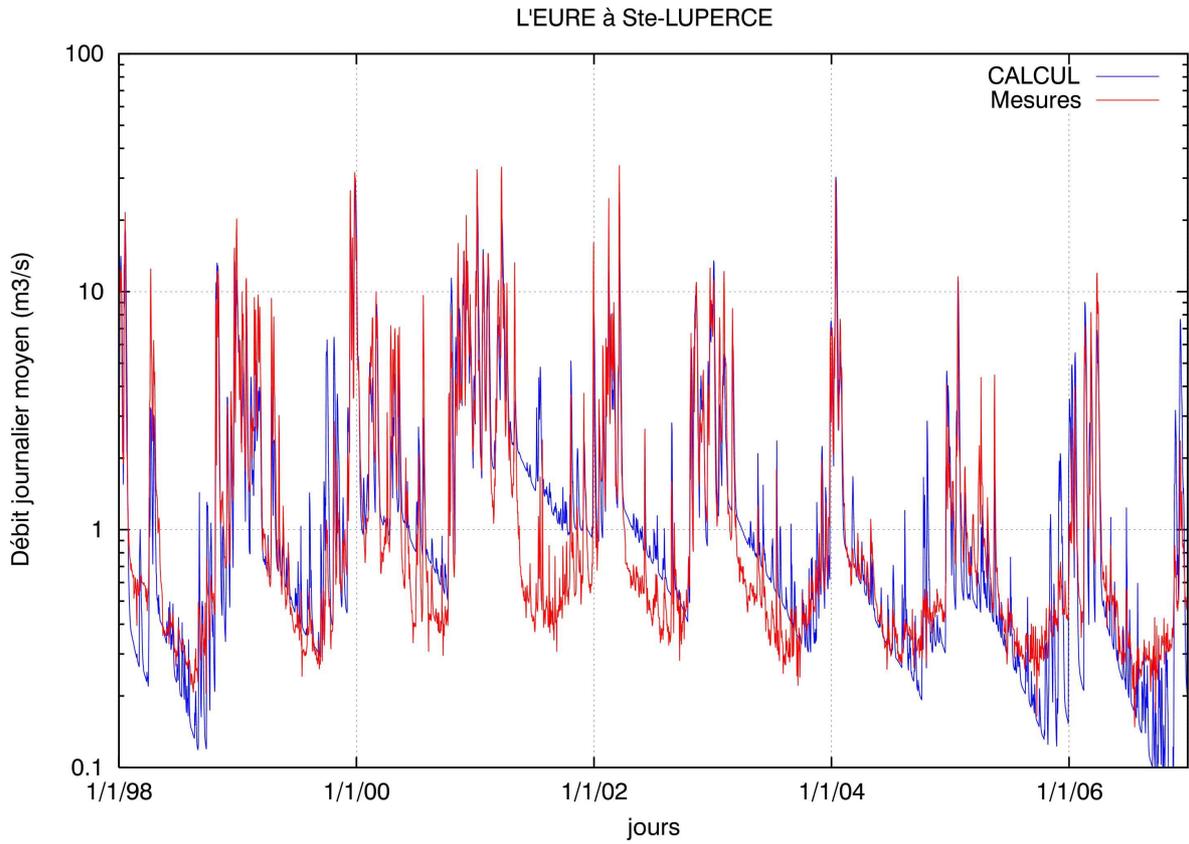


Figure 170 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Sainte-Luperce

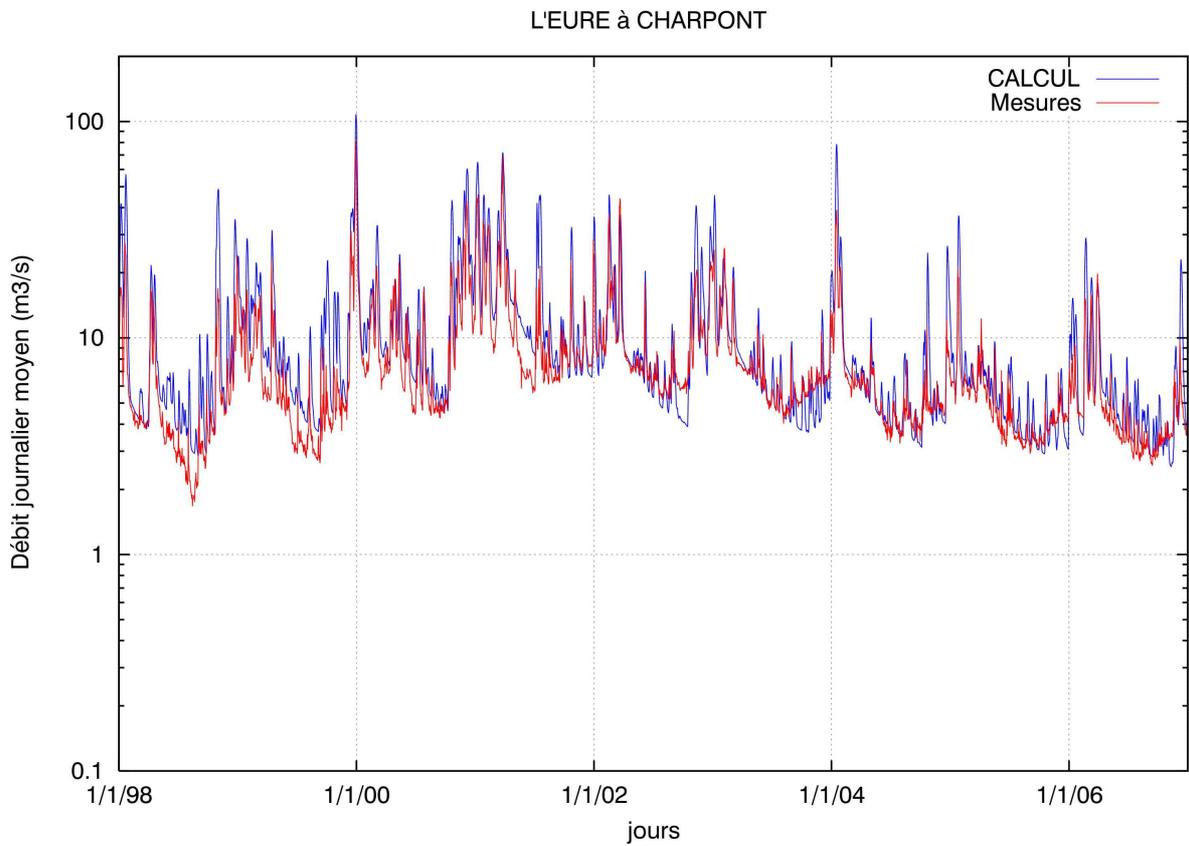


Figure 171 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Charpont

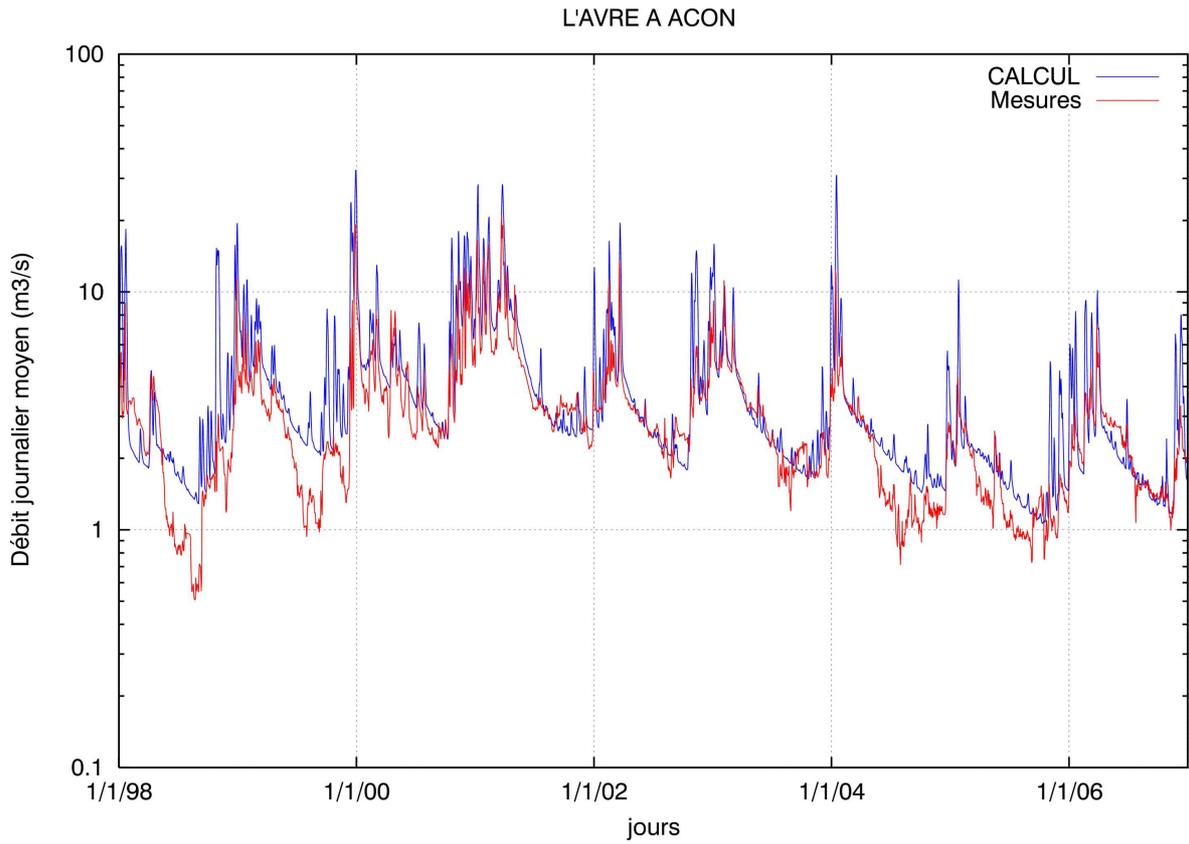


Figure 172 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Avre à la station d'Acon

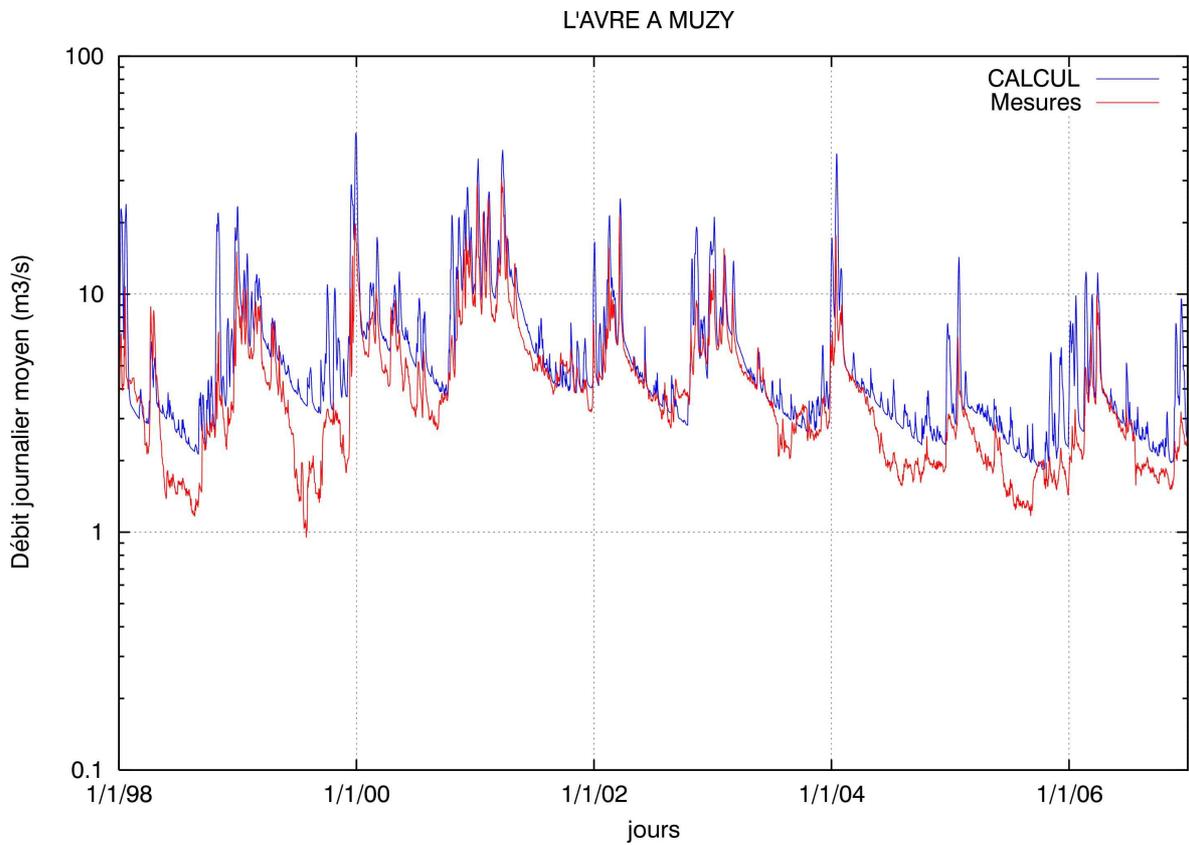


Figure 173 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Avre à la station de Muzy

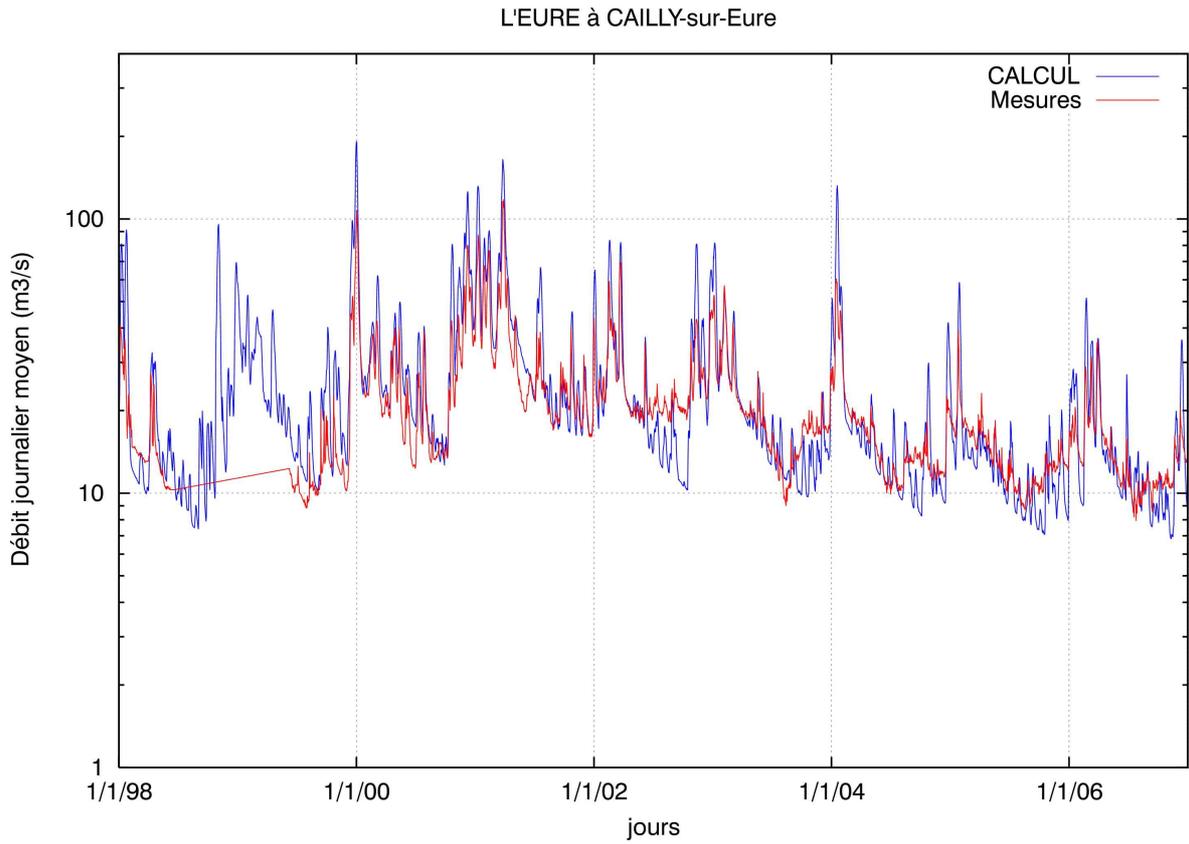


Figure 174 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Cailly-sur-Eure

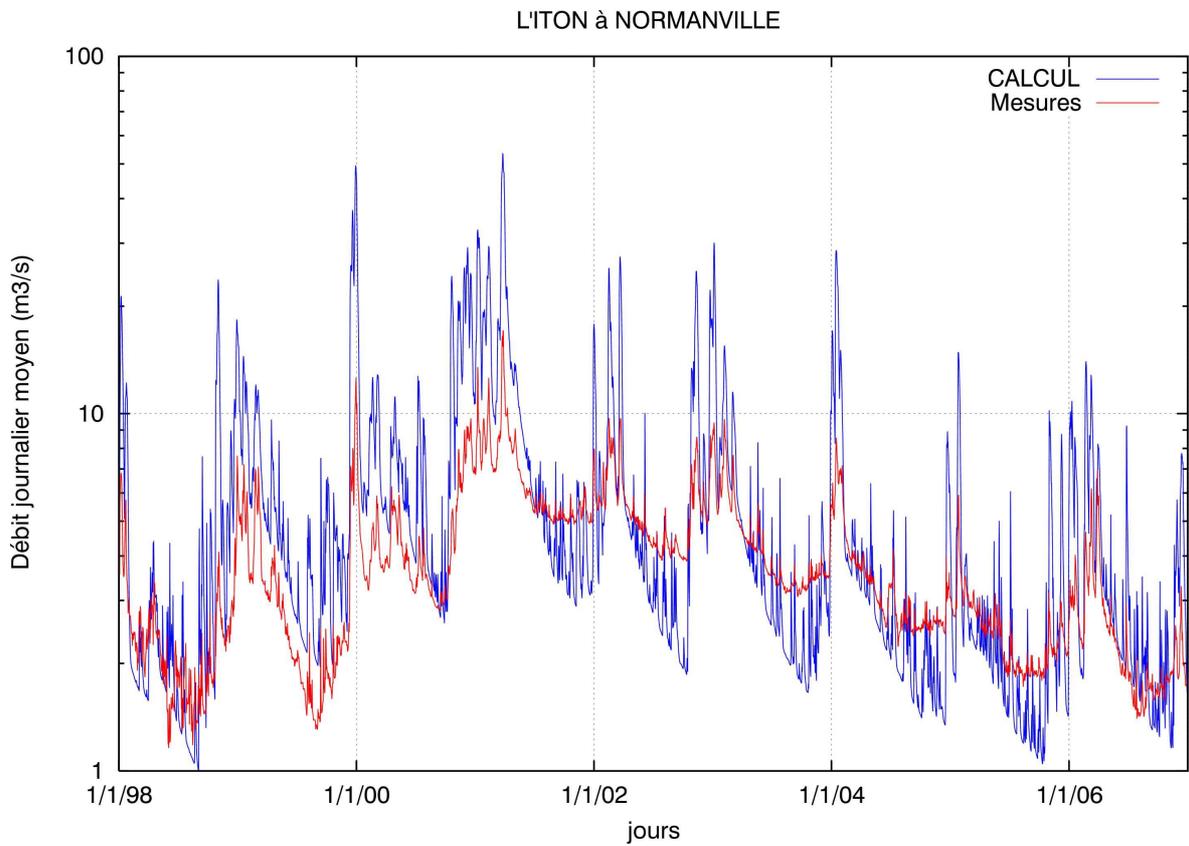


Figure 175 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Iton à la station de Normanville

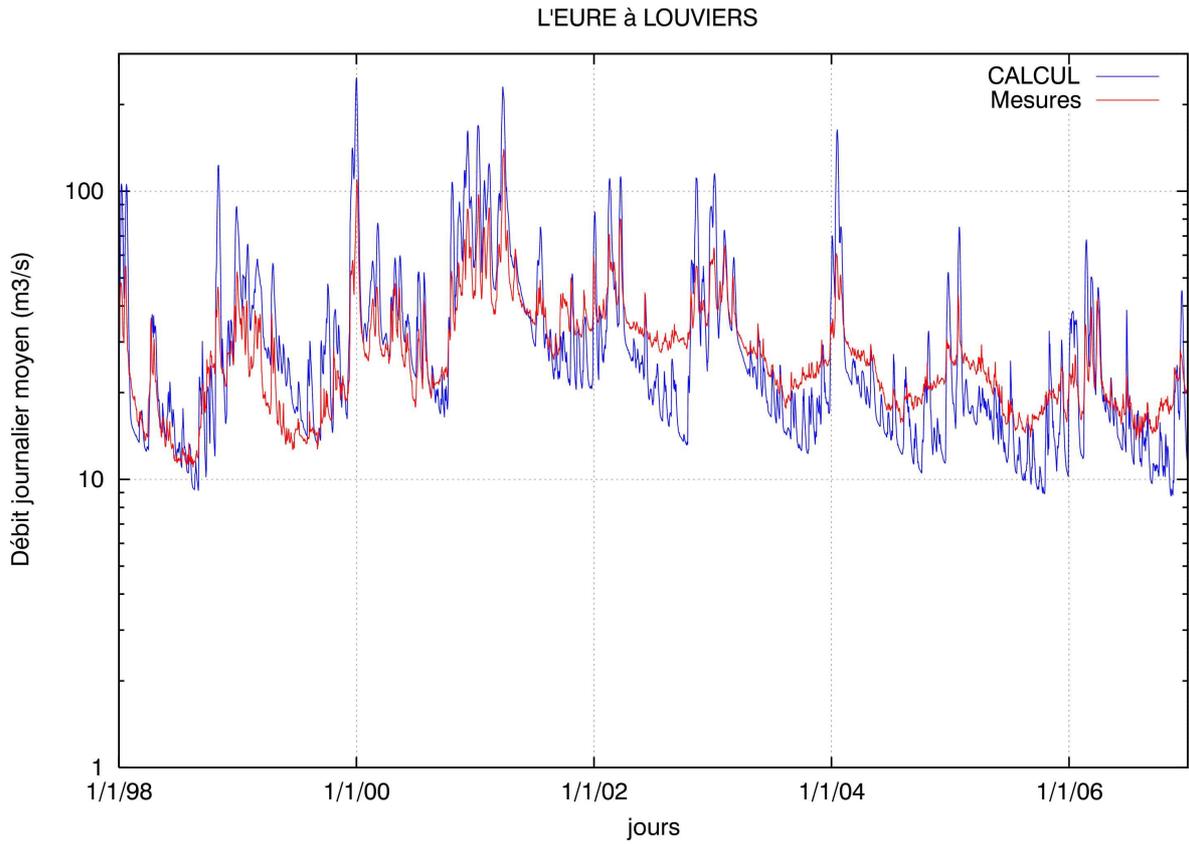


Figure 176 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Eure à la station de Louviers

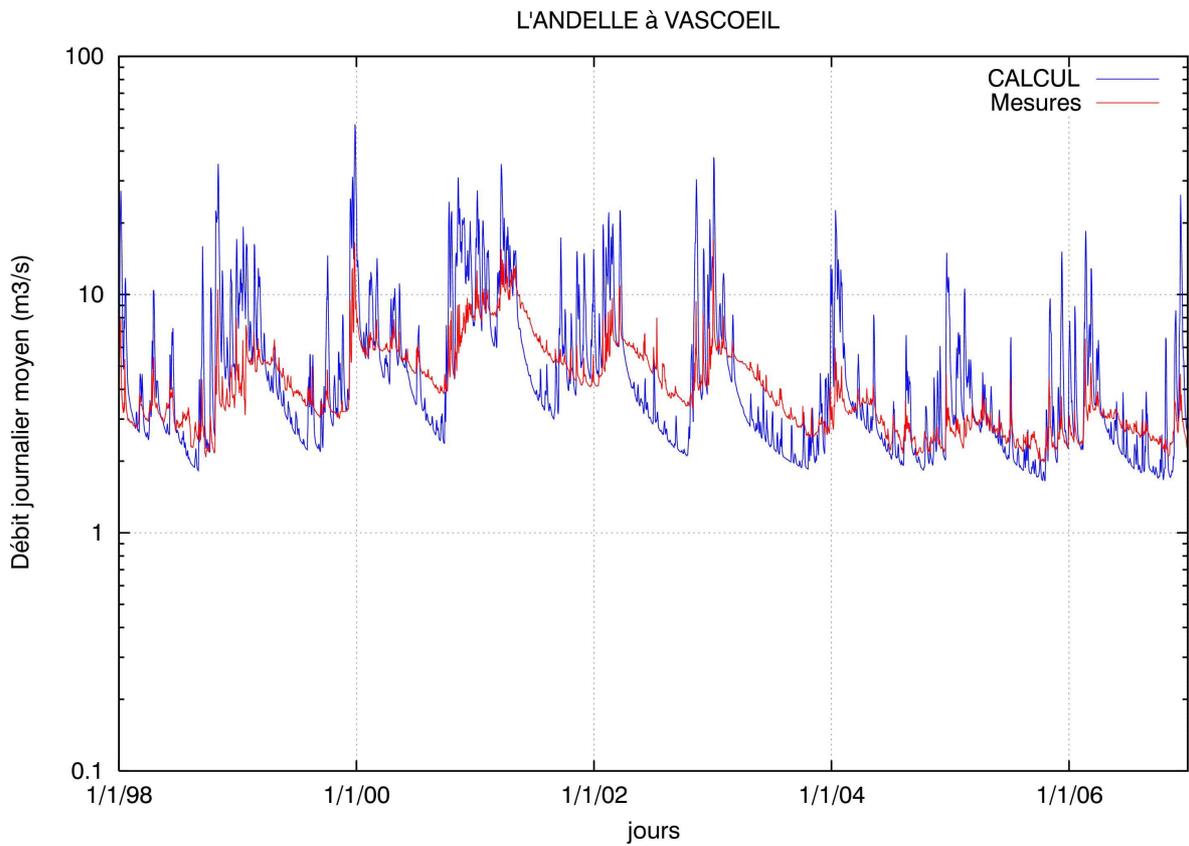


Figure 177 : comparaison des débits simulés et mesurés sur l'Andelle à la station de Vascoeil

LA SEINE à POSES

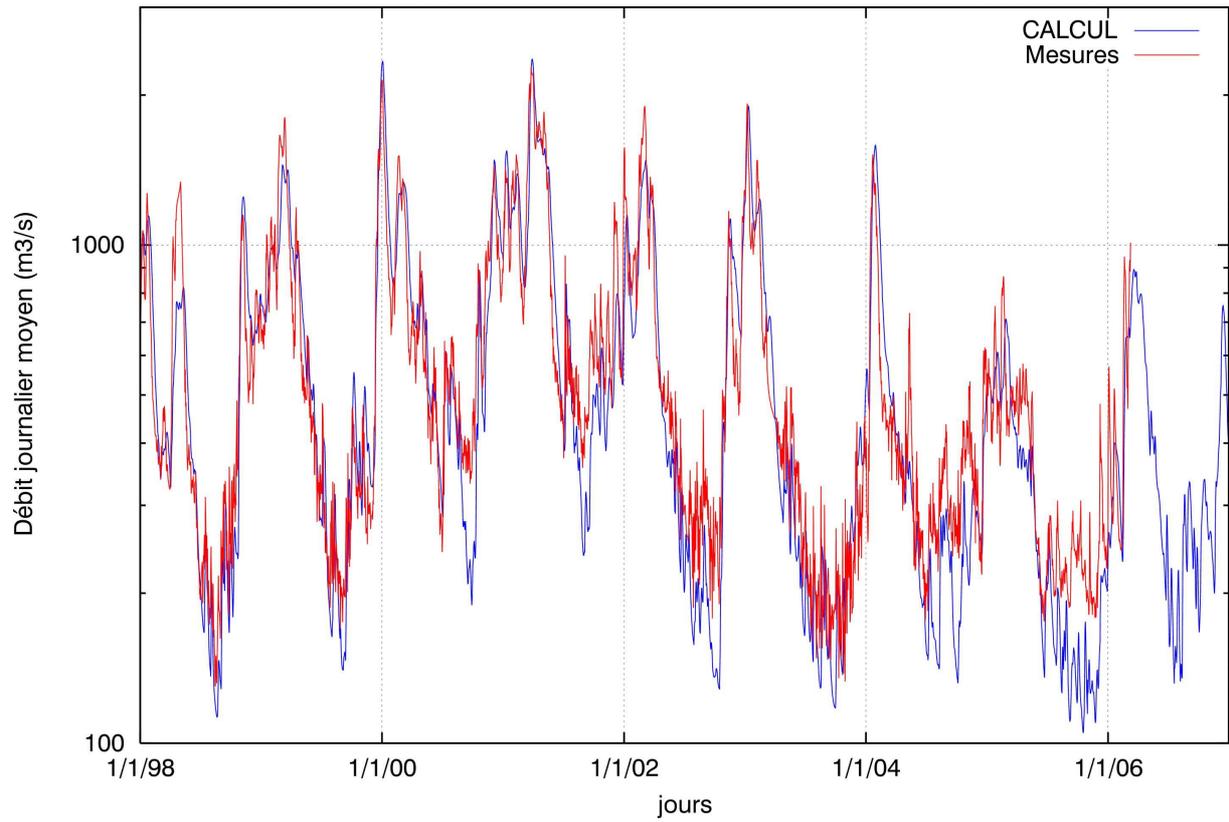


Figure 178 : comparaison des débits simulés et mesurés sur la Seine à la station de Poses

ANNEXE 1

CARTES STRUCTURALES DES FORMATIONS TERTIAIRES DU BASSIN DE PARIS

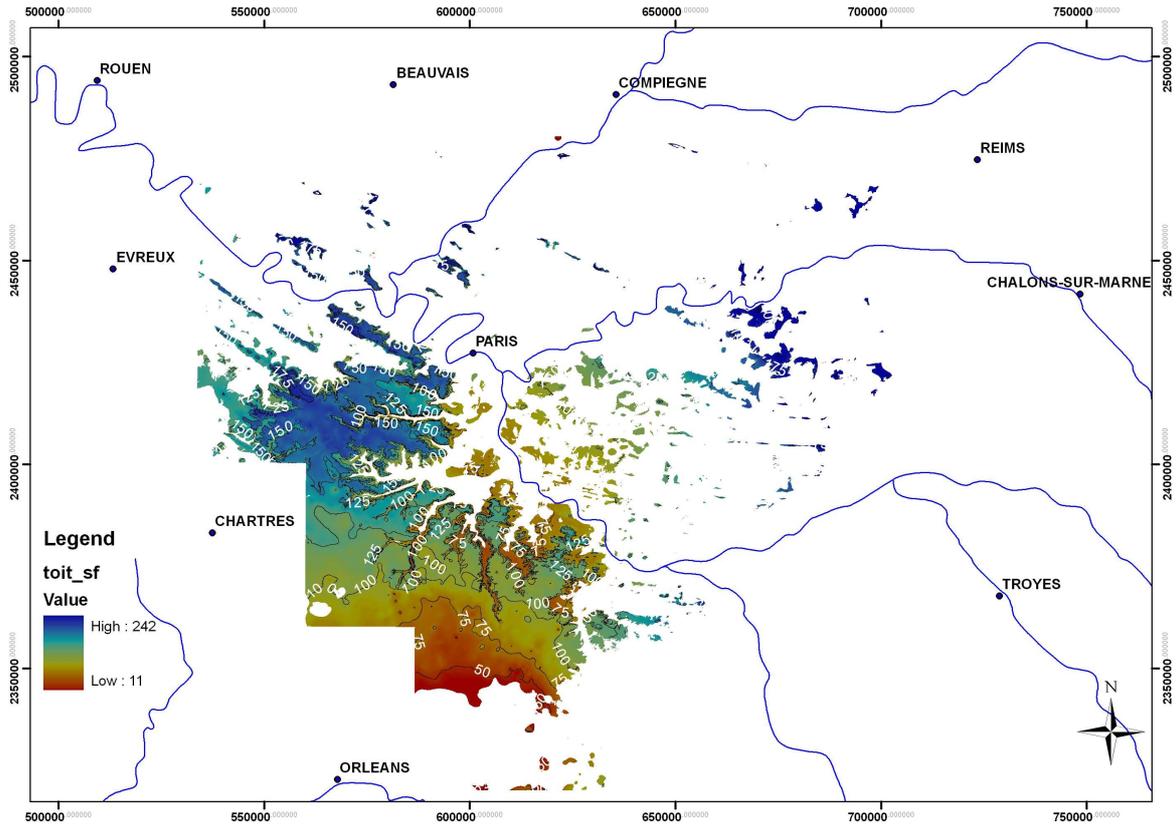


Figure A1-179 : carte structurale du toit des Sables de Fontainebleau (source BRGM)

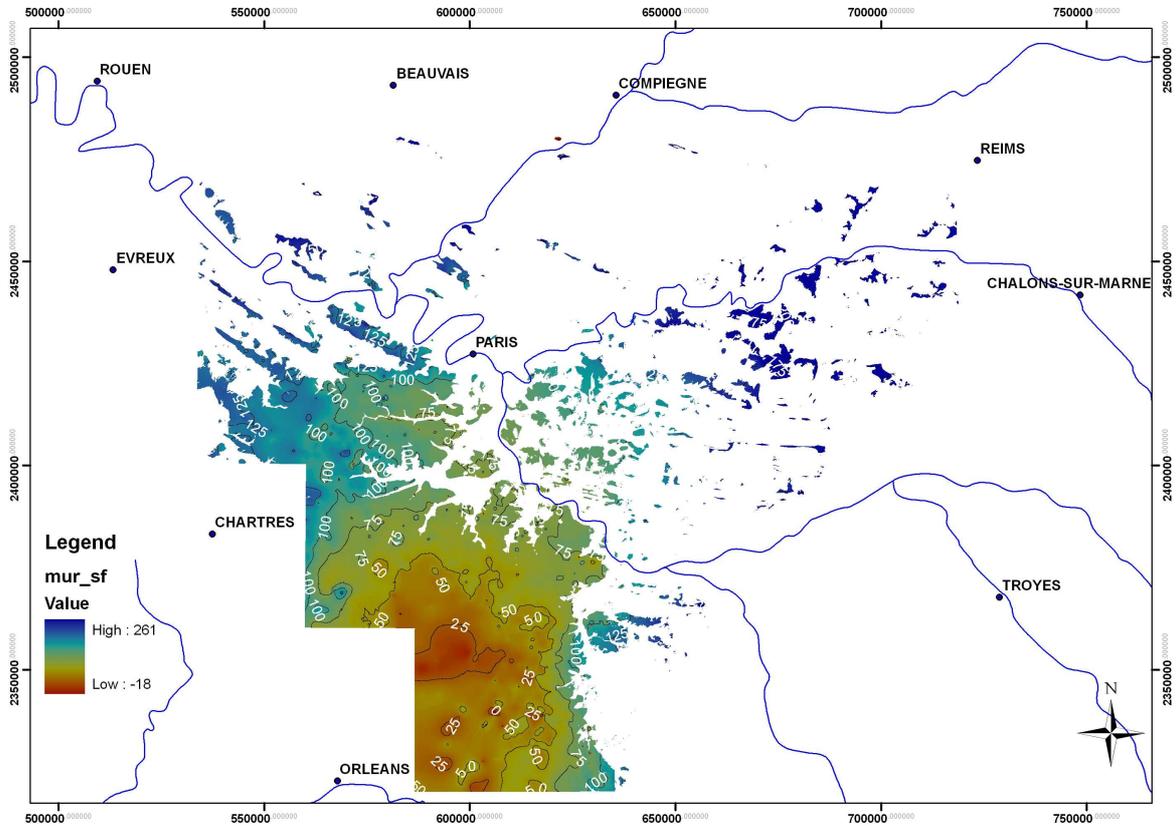


Figure A1-180 : carte structurale du mur des Sables de Fontainebleau (source BRGM)

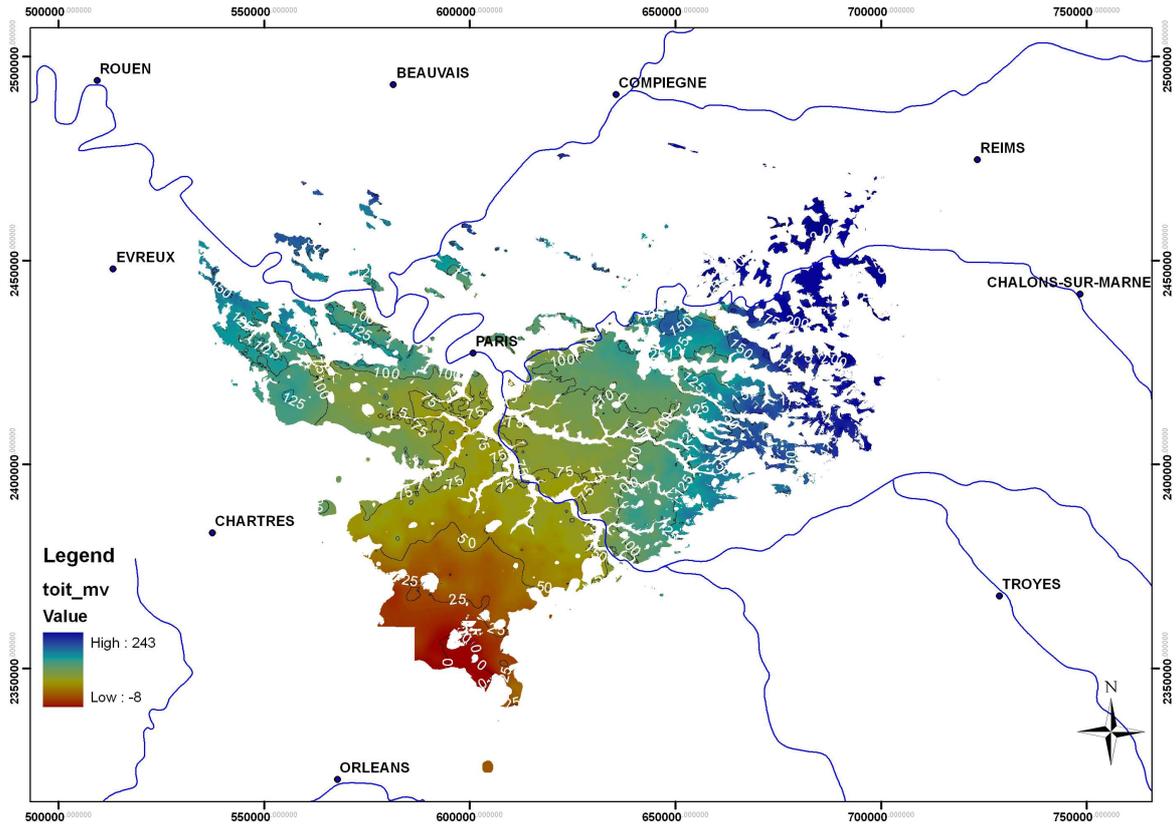


Figure A1-181 : carte structurale du toit des Marnes Vertes (source BRGM)

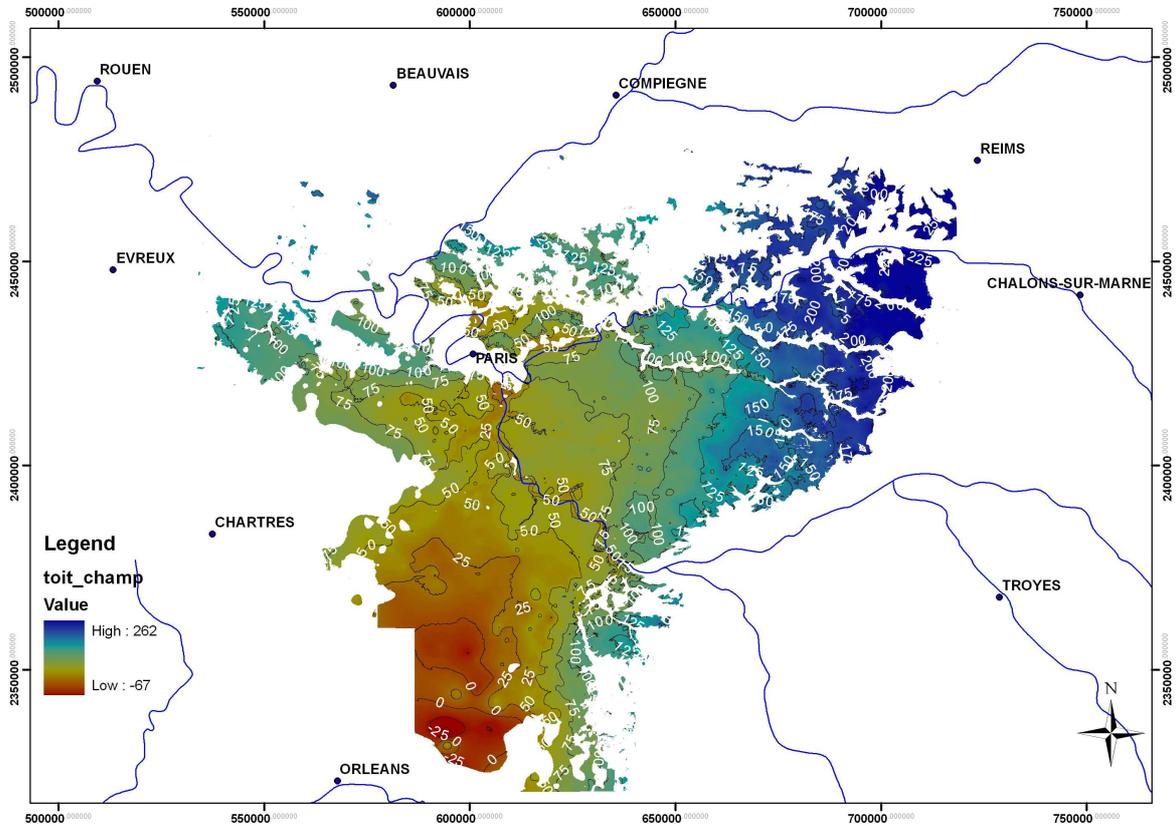


Figure A1-182 : carte structurale du toit des Calcaires de Champigny (source BRGM)

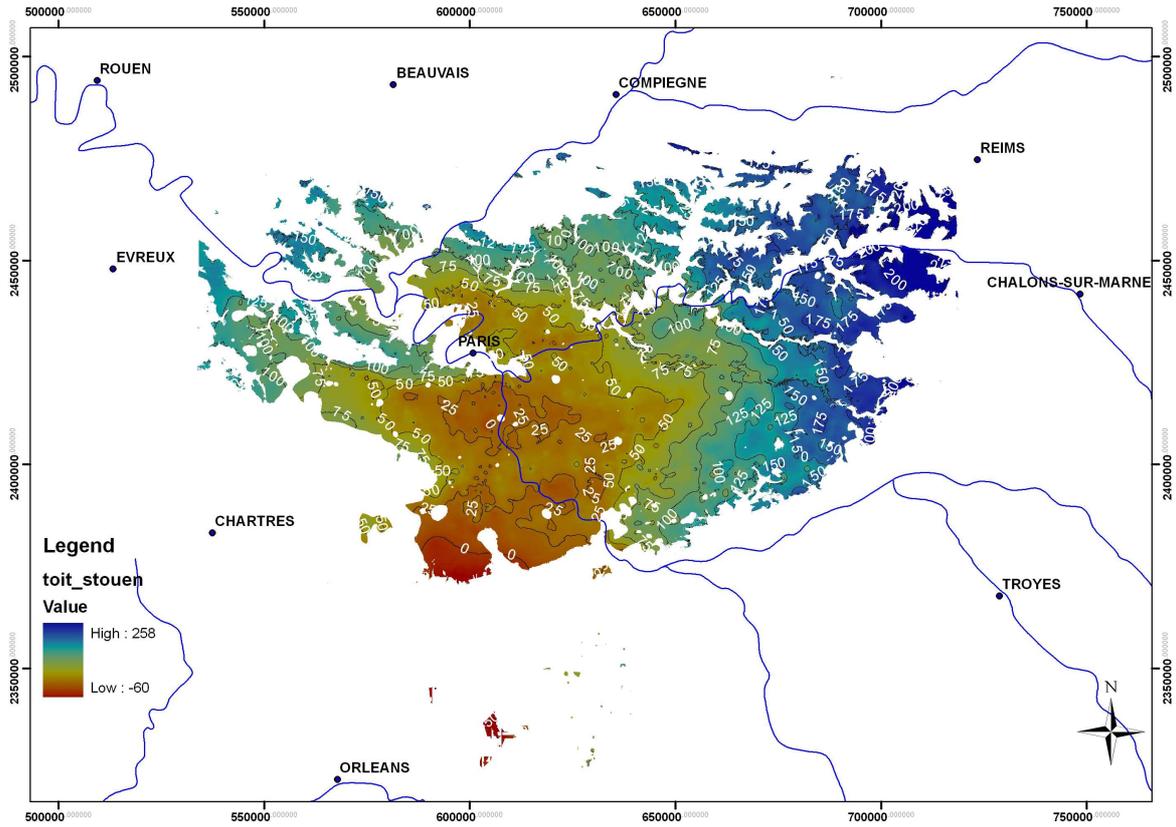


Figure A1-183 : carte structurale du toit des Calcaires de Saint-Ouen (source BRGM)

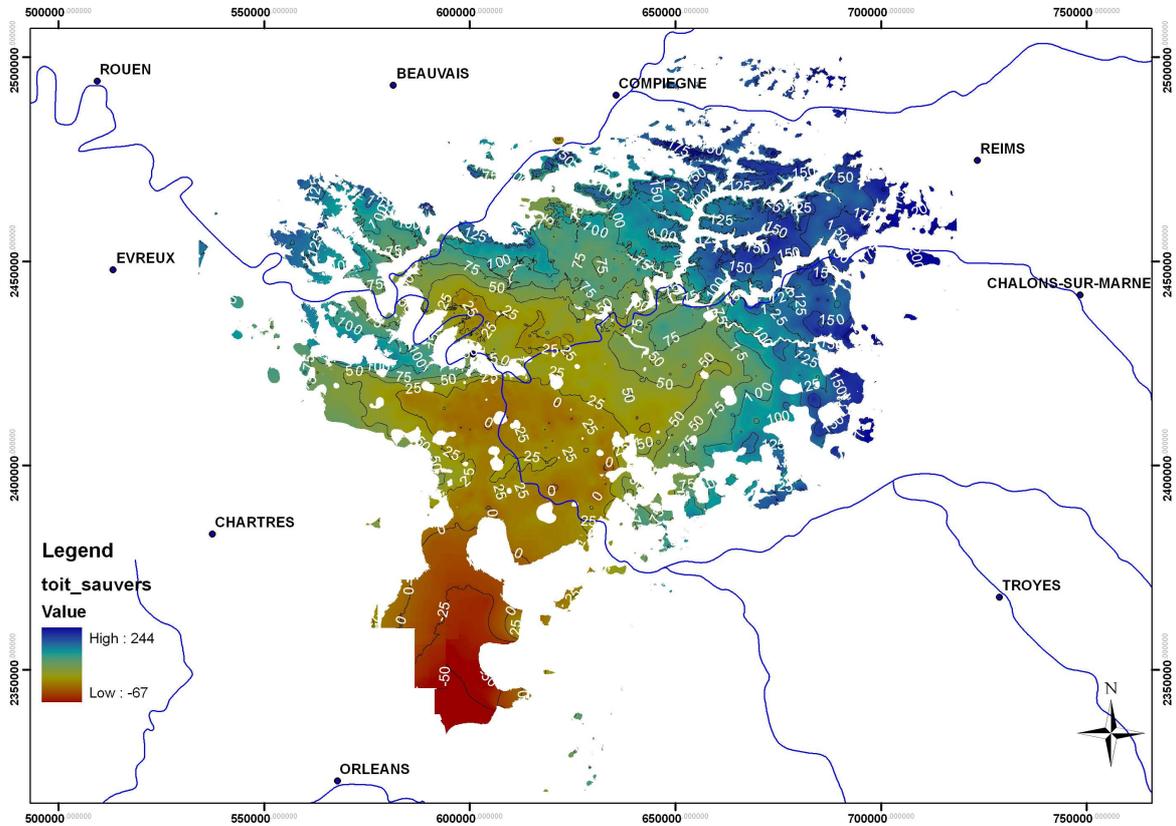


Figure A1-184 : carte structurale du toit des Sables d'Auvers (source BRGM)

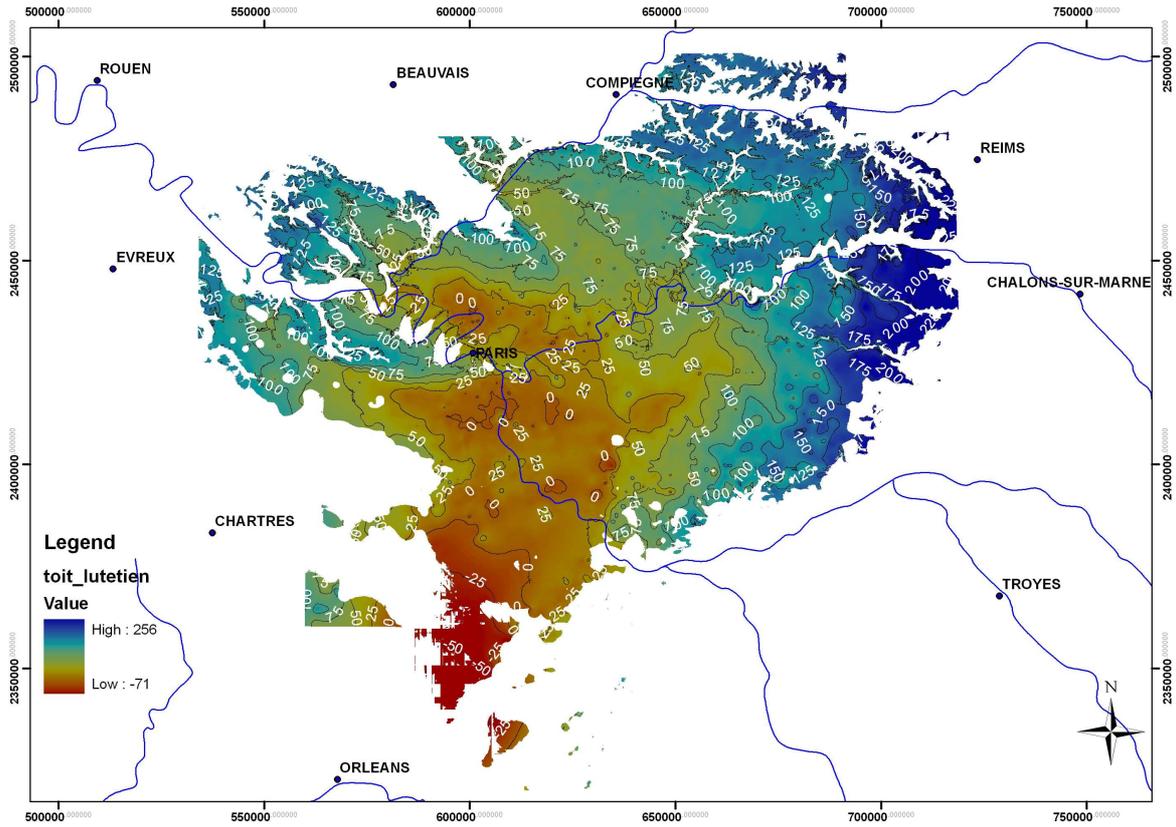


Figure A1-185 : carte structurales du toit du Lutétien (source BRGM)

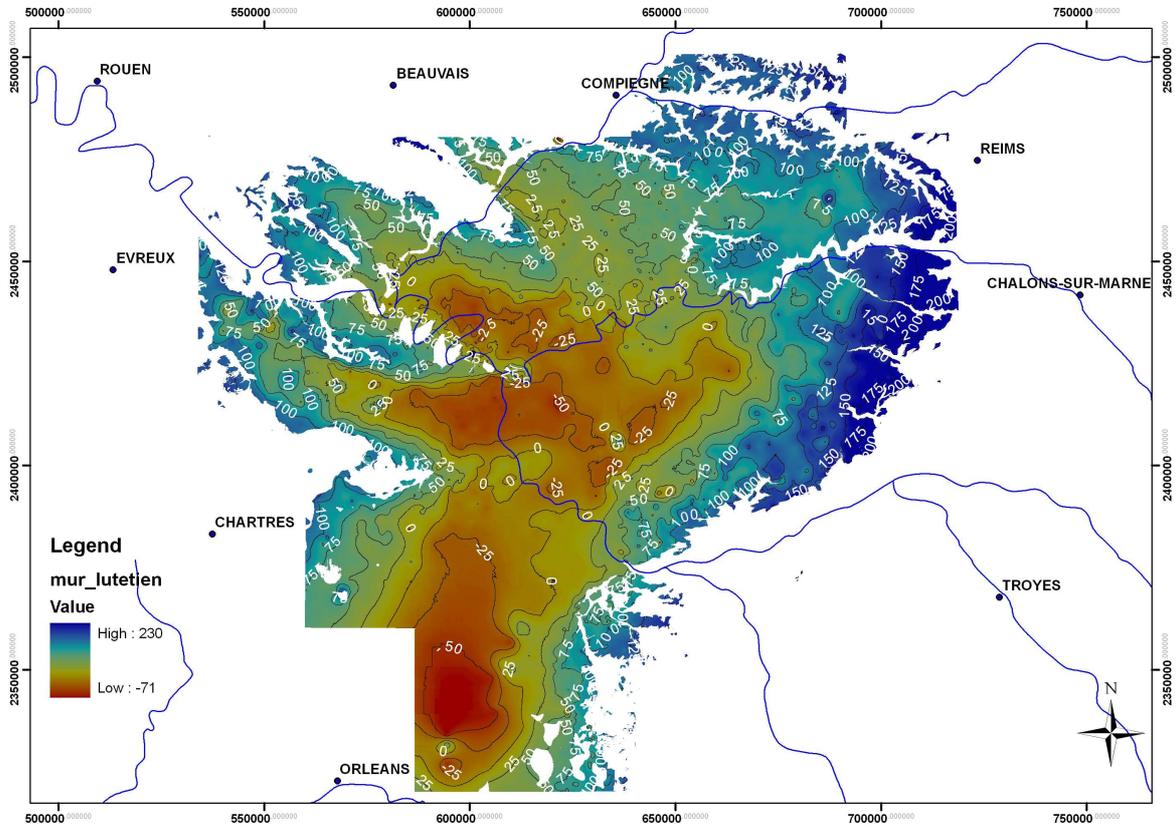


Figure A1-186 : carte structurale du mur du Lutétien (source BRGM)

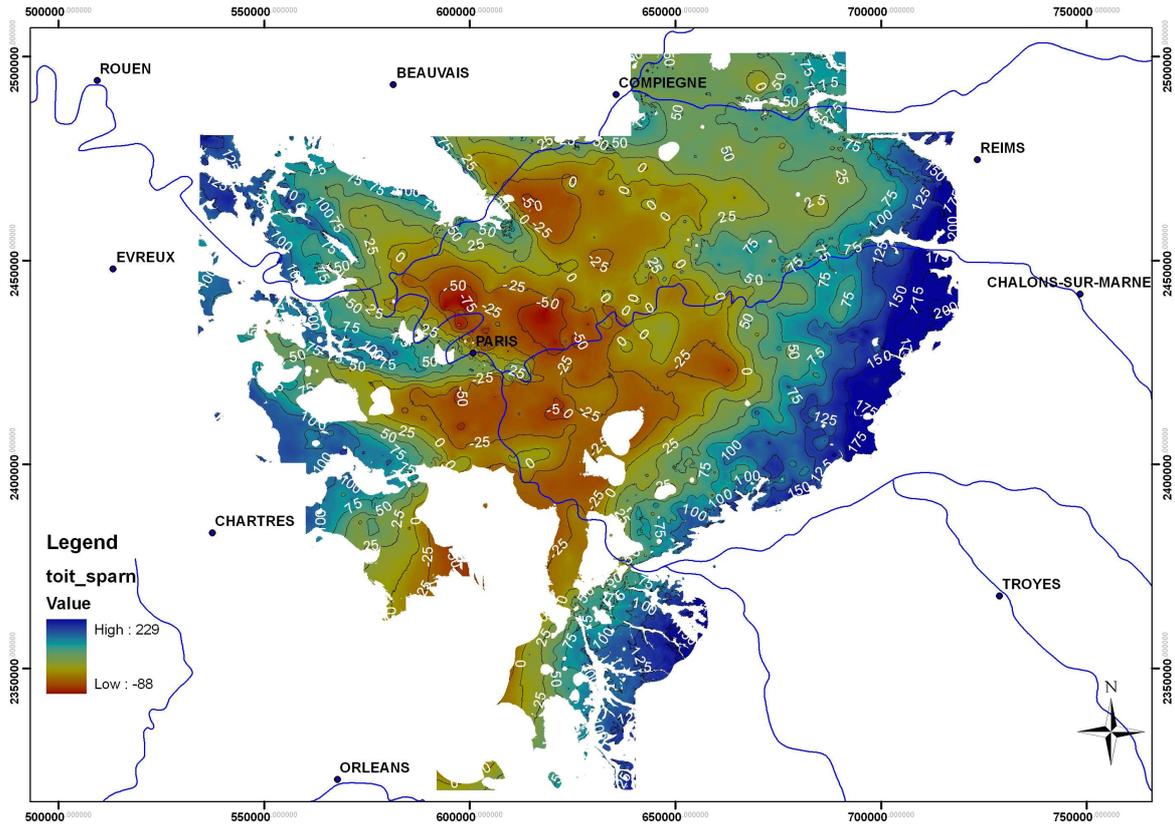


Figure A1-187 : carte structurale du toit du Sparnacien (source BRGM)

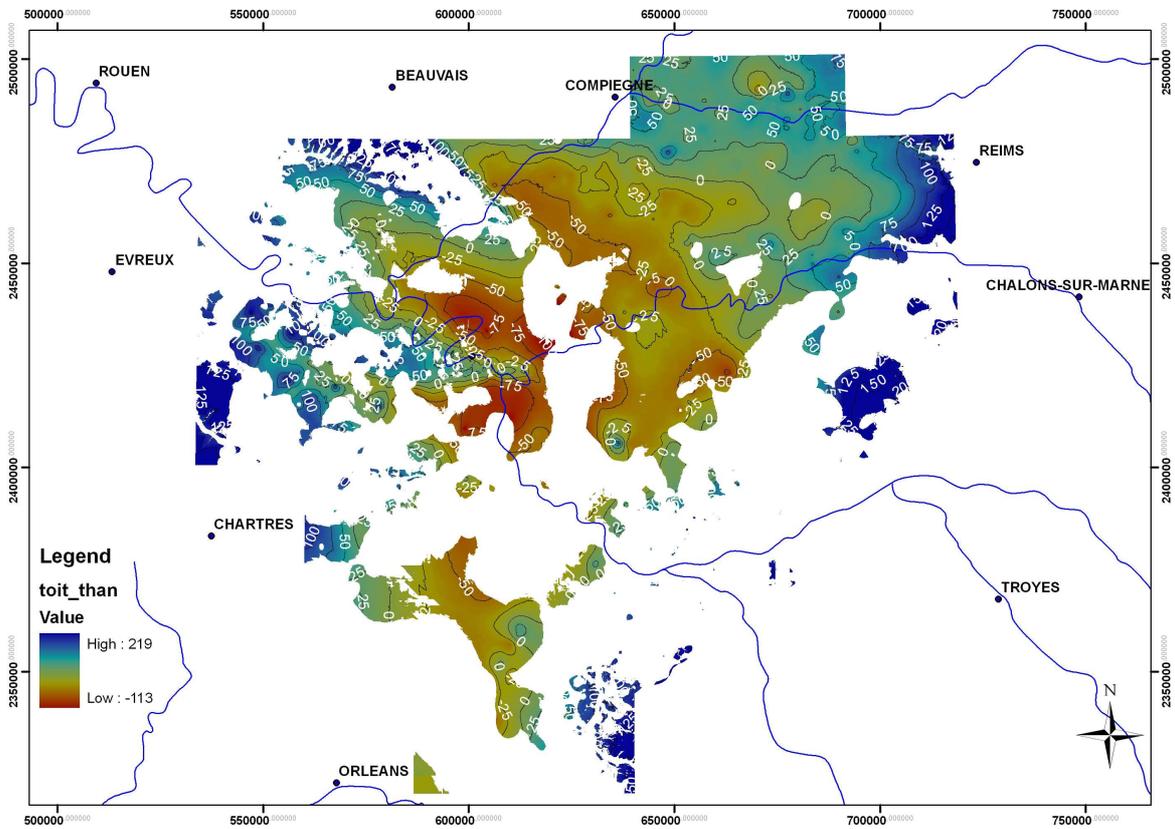


Figure A1-188 : carte structurale du toit du Thanétien (source BRGM)

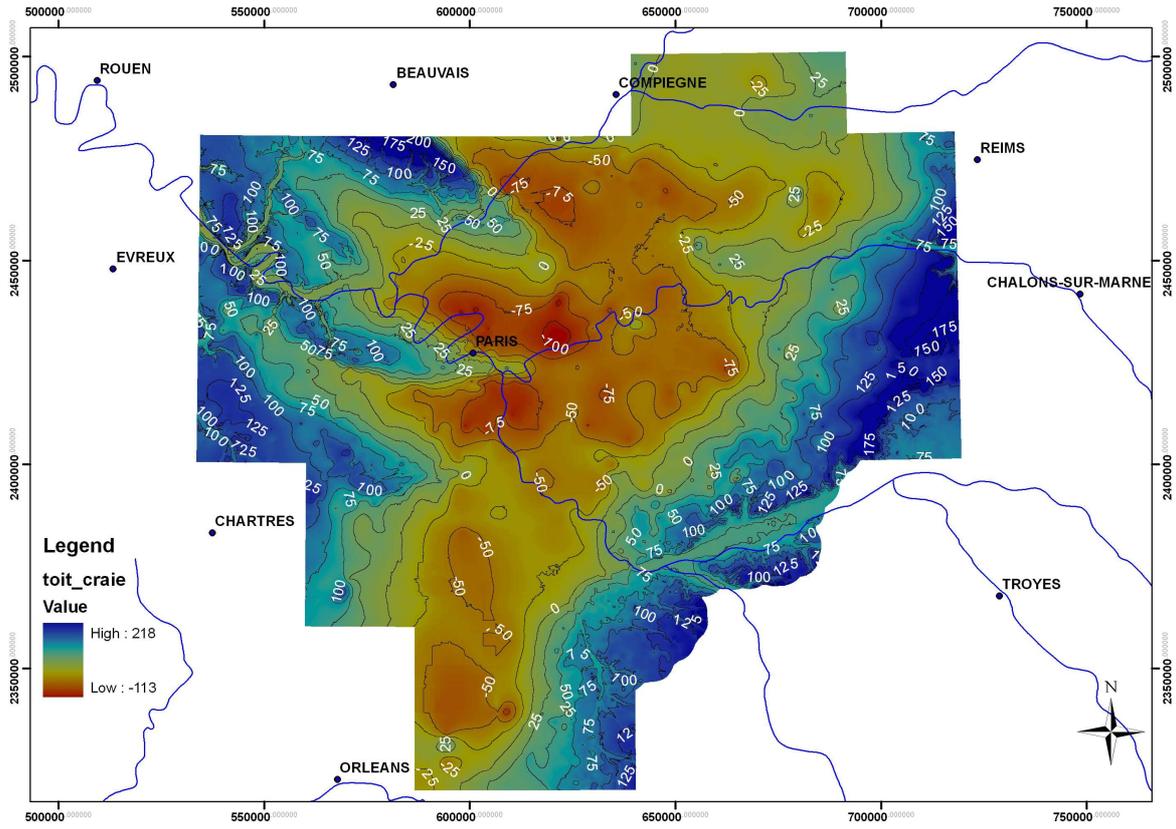


Figure A1-189 : carte structurale du toit de la Craie (source BRGM)

ANNEXE 2

PRELEVEMENTS A.E.P. DANS LES DIFFERENTES FORMATIONS AQUIFERES (MOYENNE 2000-2004)

Formation des Calcaires de Beauce

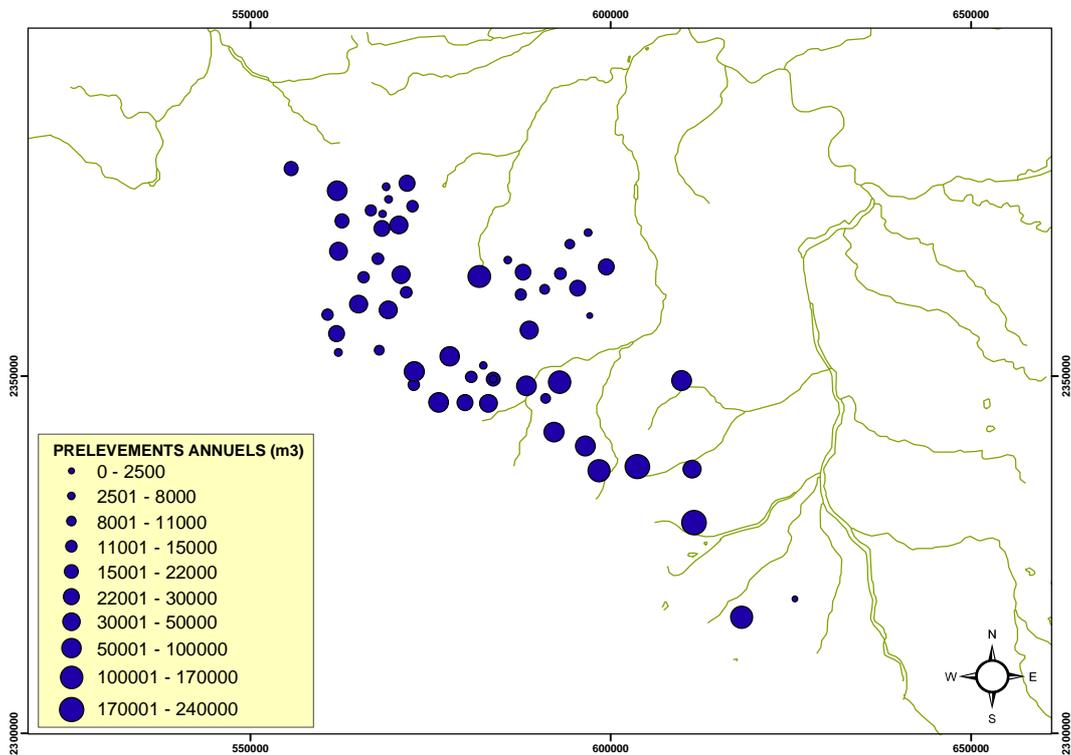


Figure A2-190 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Beauce

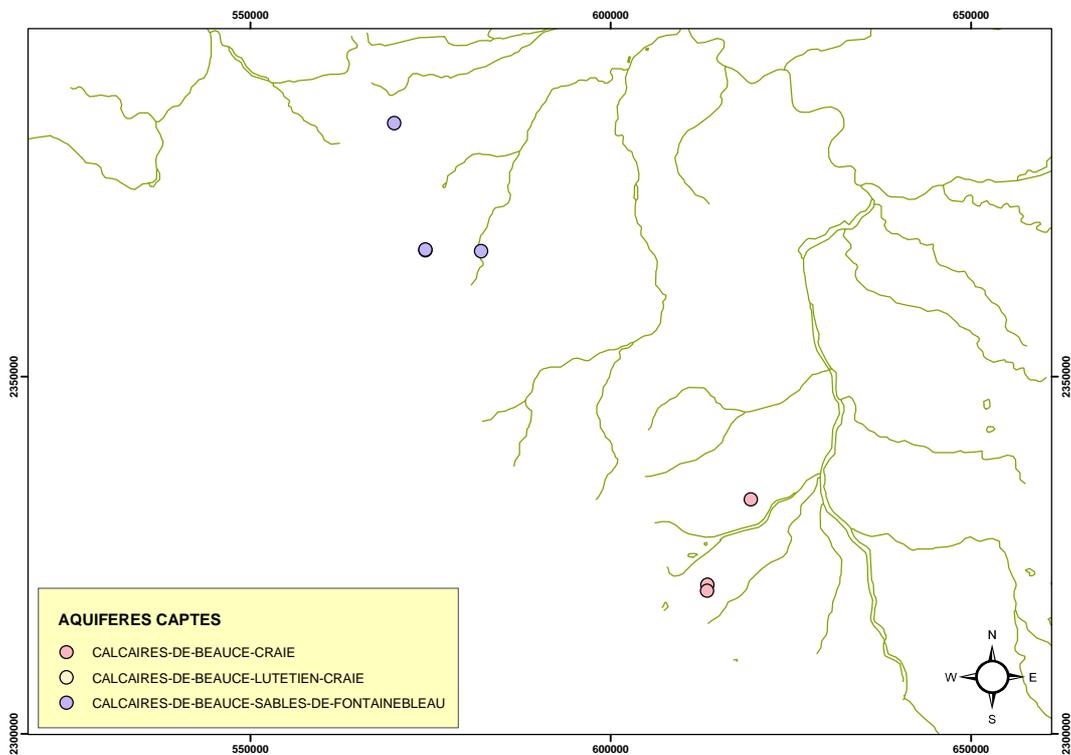


Figure A2-191 : Localisation des forages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Beauce et d'autres formations

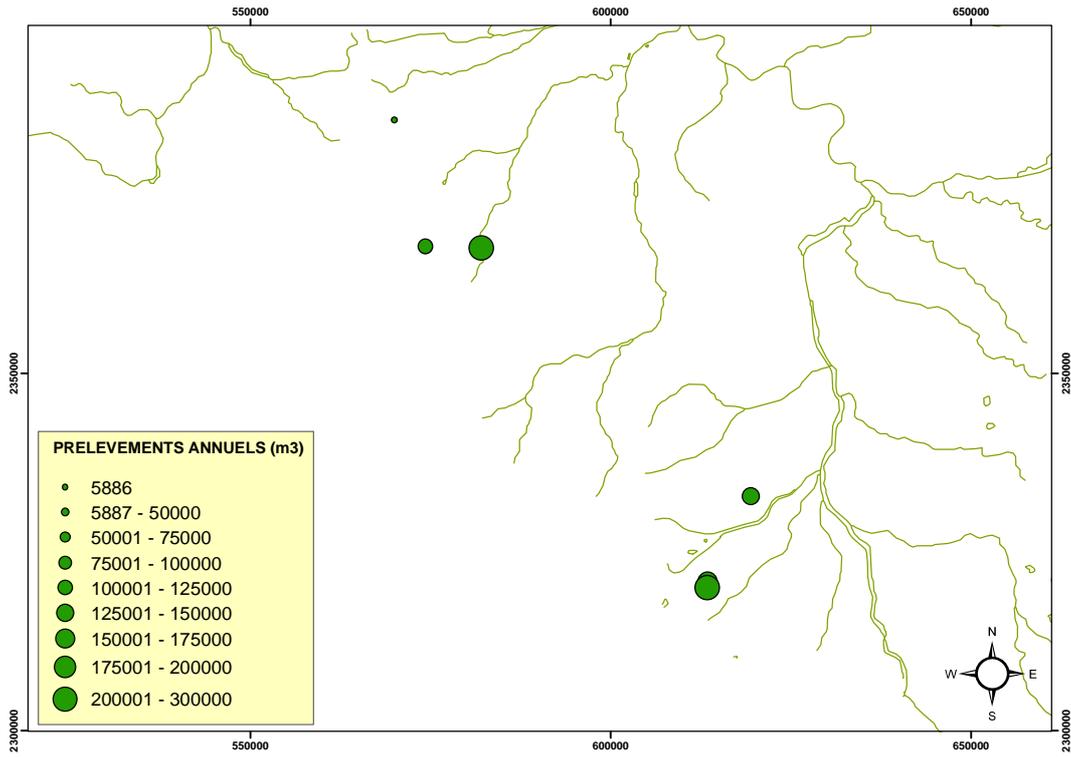


Figure A2-192 : Prélèvements moyens annuels dans les ouvrages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Beauce et d'autres formations

FORMATION DES CALCAIRES DE BRIE

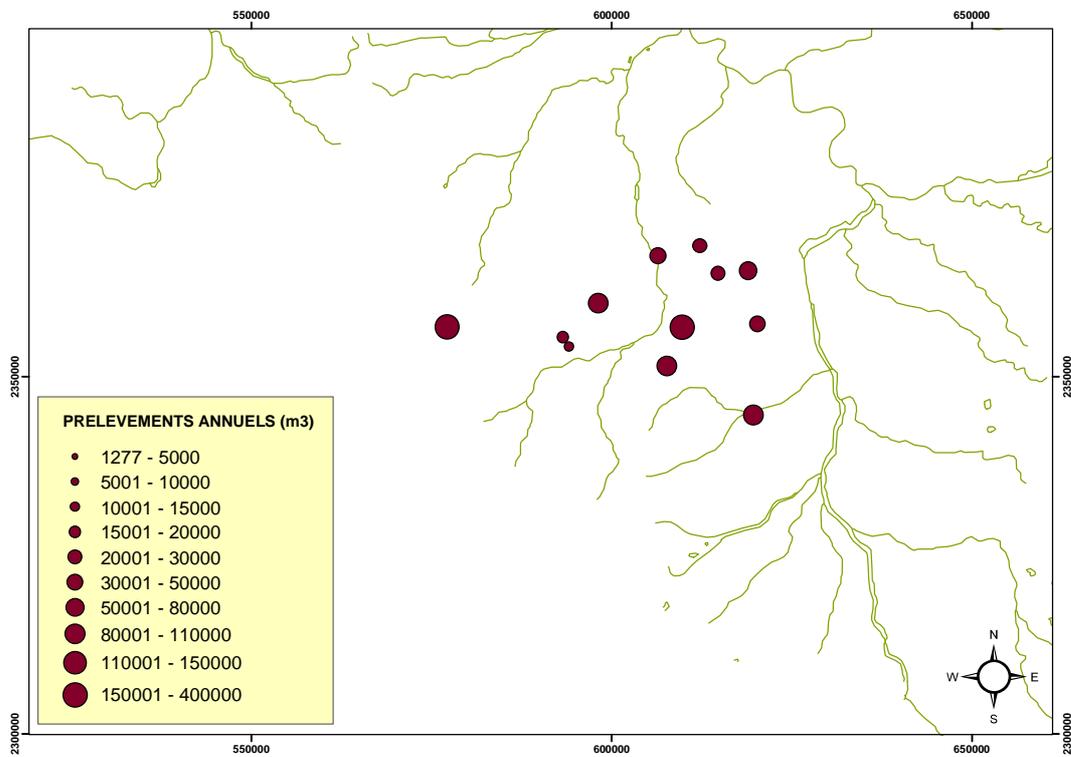


Figure A2-193 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Brie

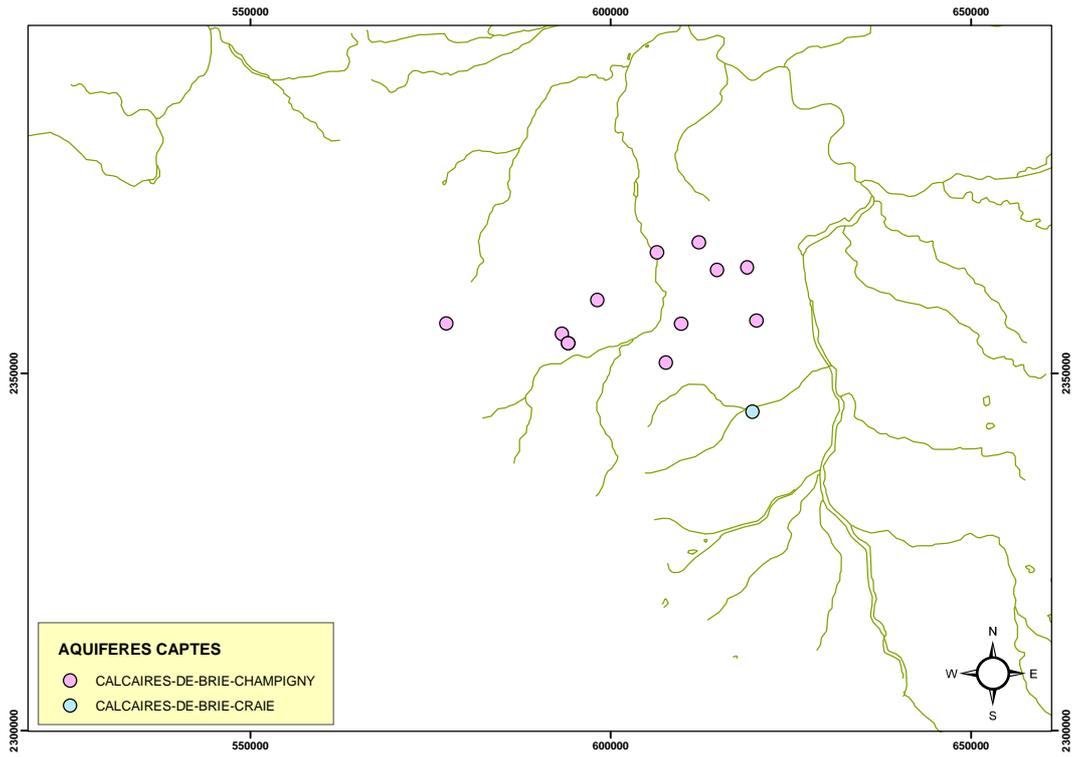


Figure A2-194 : Localisation des forages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Brie et d'autres formations

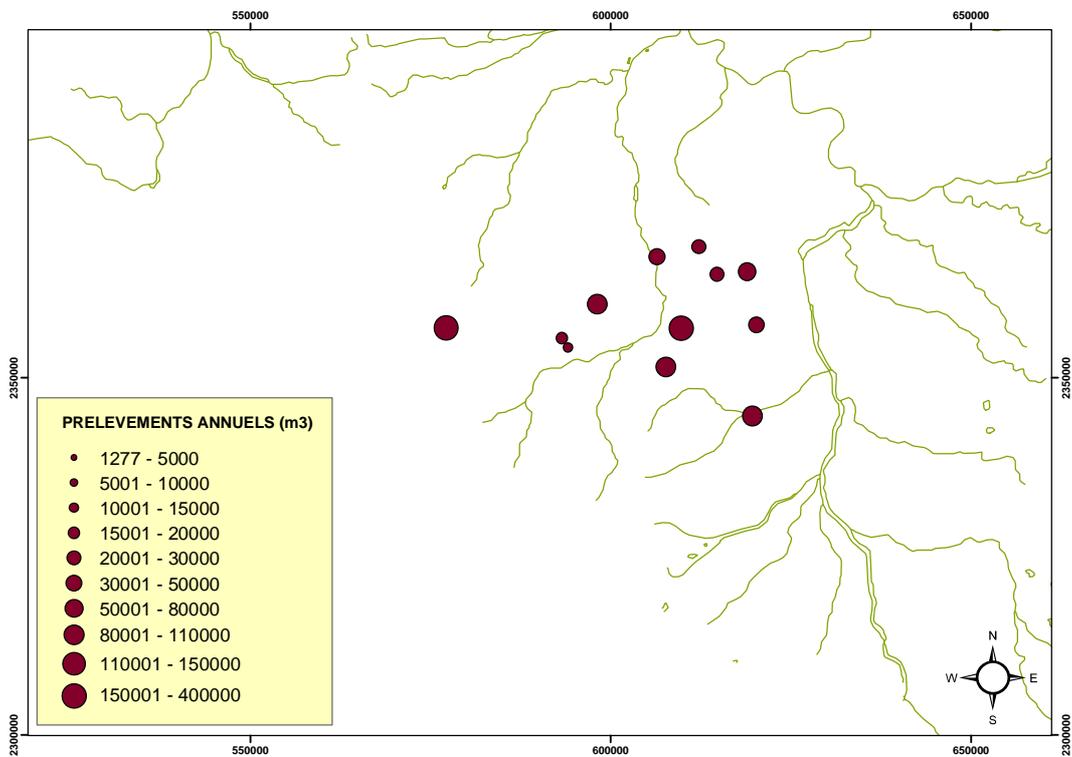


Figure A2-195 : Prélèvements AEP moyens annuels dans les ouvrages captant conjointement la nappe des Calcaires de Brie et d'autres formations

FORMATION DES SABLES DE FONTAINEBLEAU

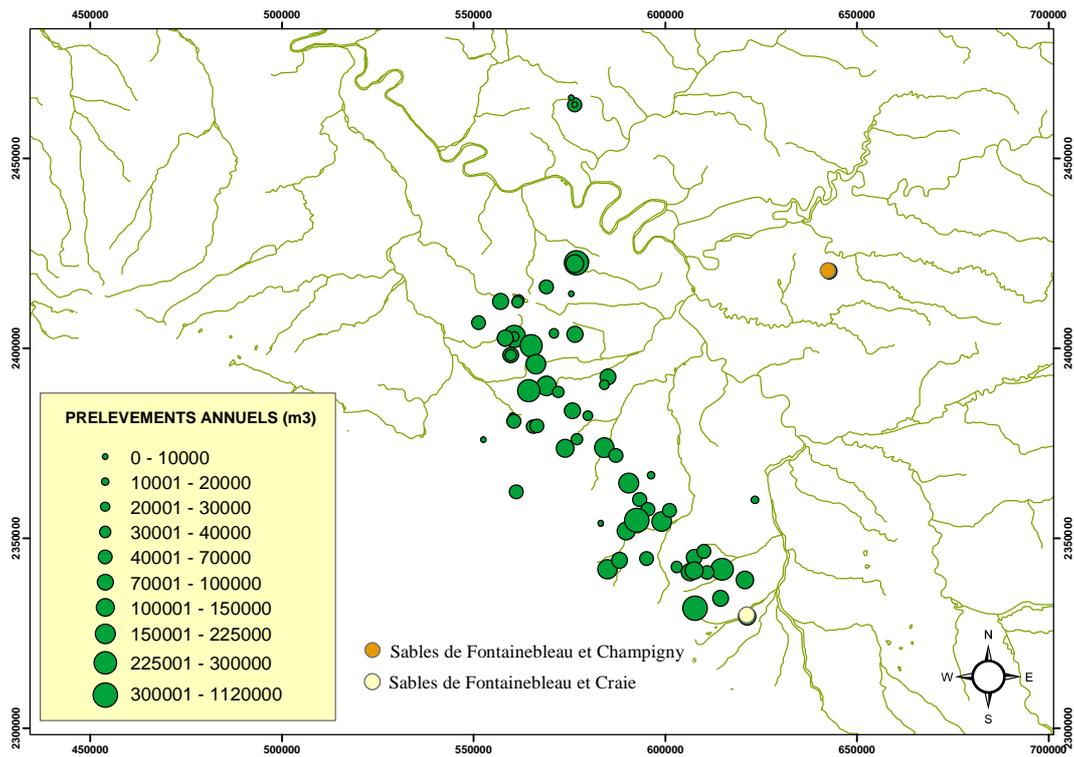


Figure A2-196 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des sables de Fontainebleau

FORMATION DES CALCAIRES DE CHAMPIGNY

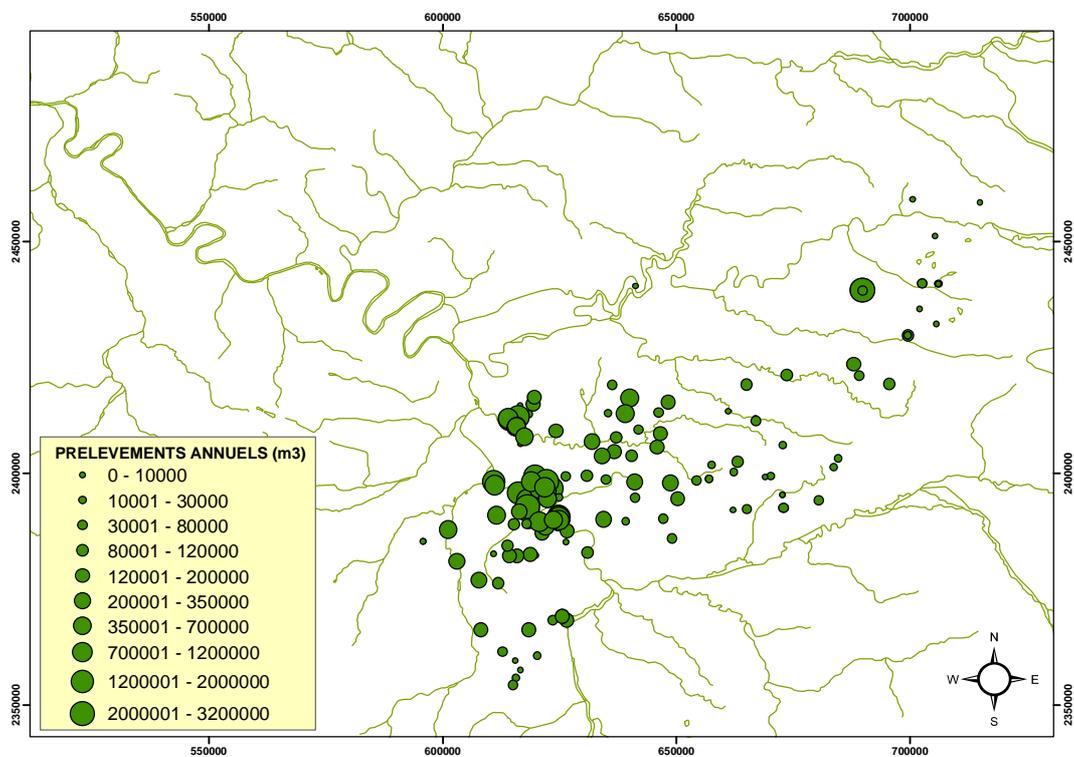


Figure A2-197 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Champigny

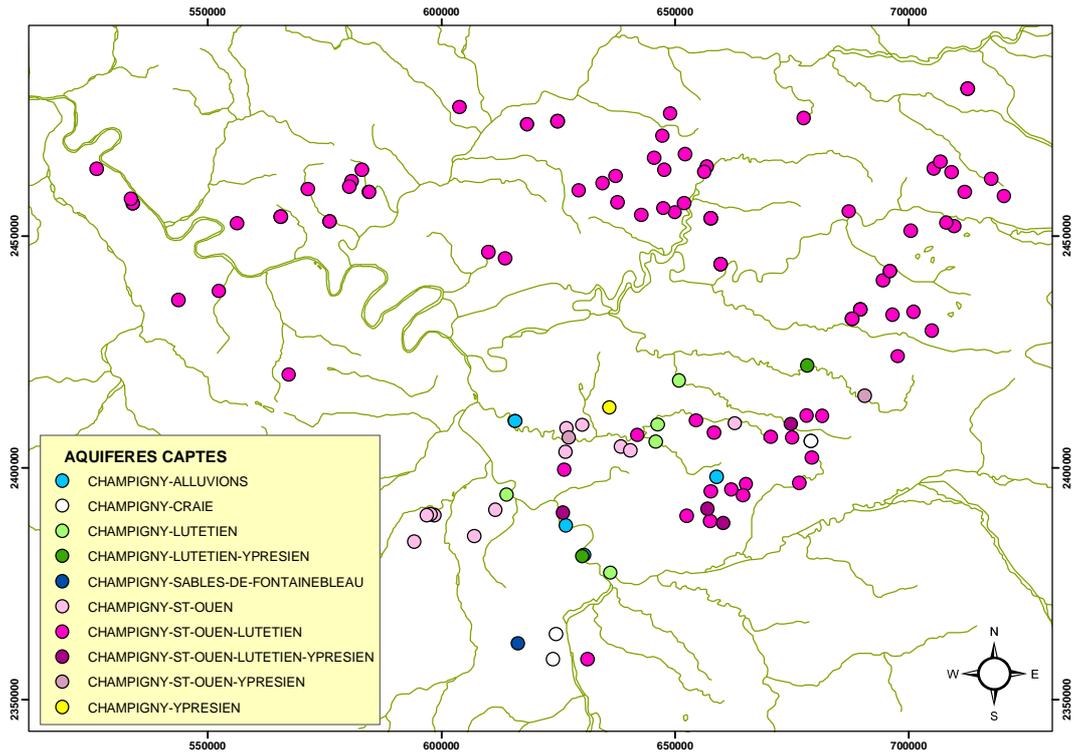


Figure A2-198 : Localisation des ouvrages AEP captant conjointement la nappe des Calcaires de Champigny et d'autres formations

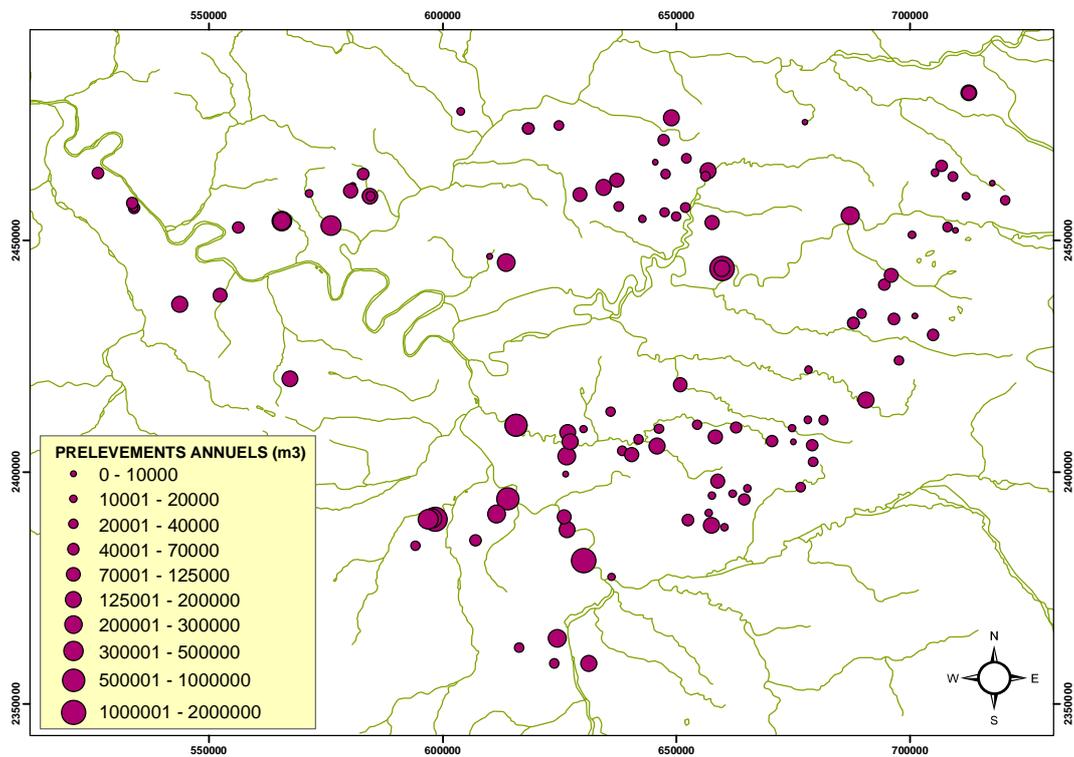


Figure A2-199 : Prélèvements AEP moyens annuels dans les ouvrages captant conjointement la nappe des Calcaires de Champigny et d'autres formations

FORMATION DES CALCAIRES DE SAINT OUEN

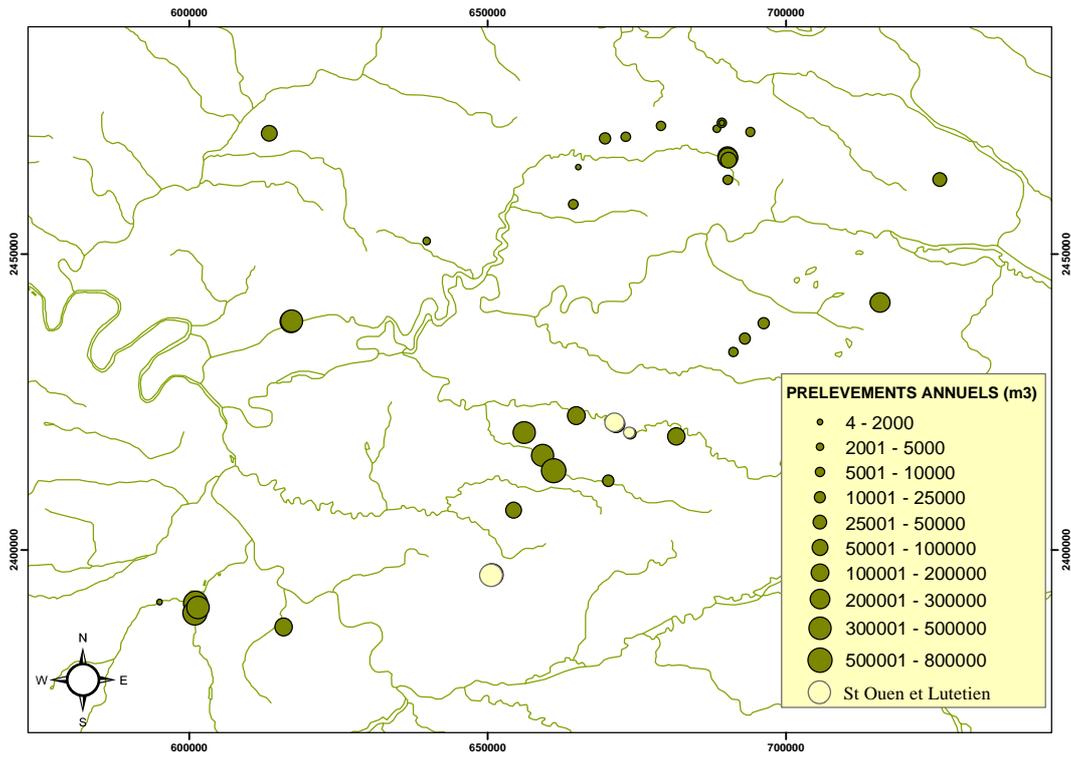


Figure A2-200 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des calcaires de Saint Ouen

FORMATIONS DU LUTETIEN ET DE L'YPRESIEN

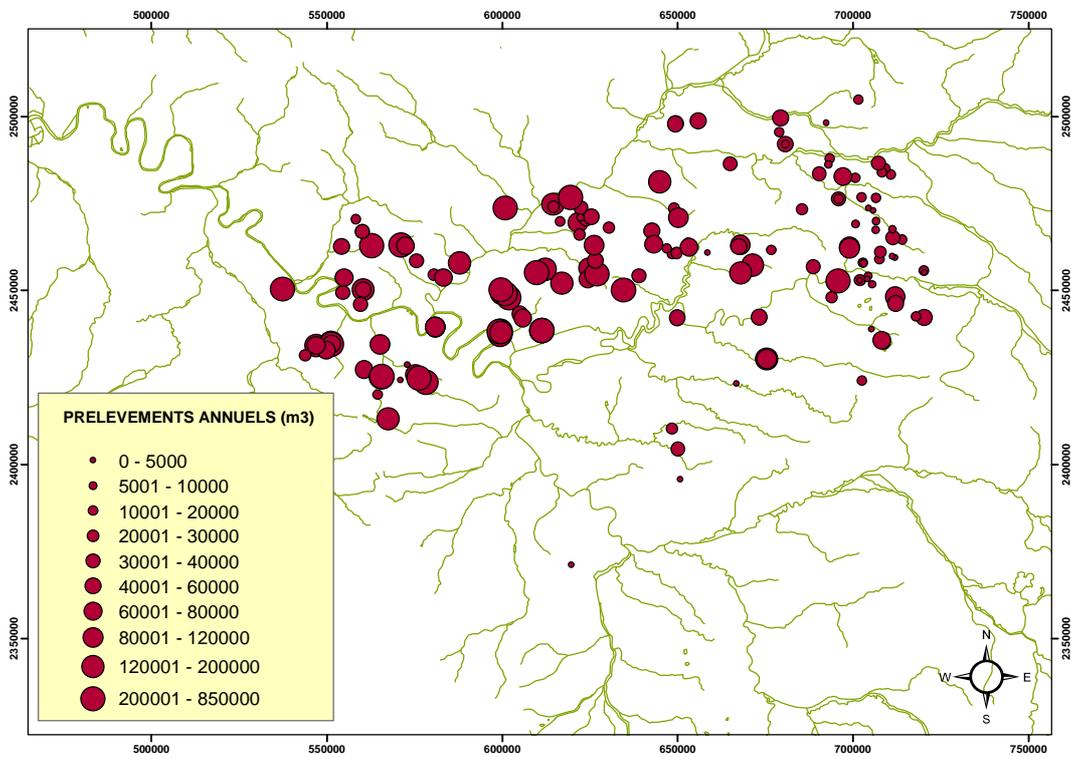


Figure A2-201 : Prélèvements A.E.P. dans les formation du Lutétien

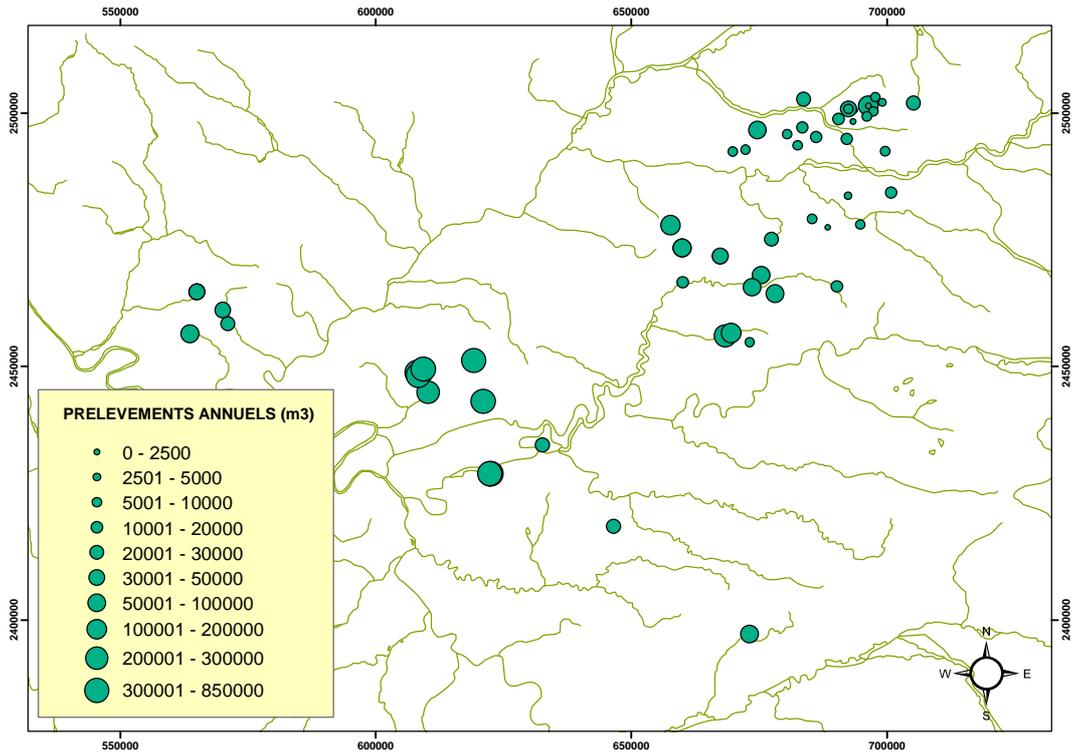


Figure A2-202 : Prélèvements A.E.P. dans les formation du Lutétien + Yprésien

FORMATIONS DES SABLES D'AUVERS ET DE BEAUCHAMP

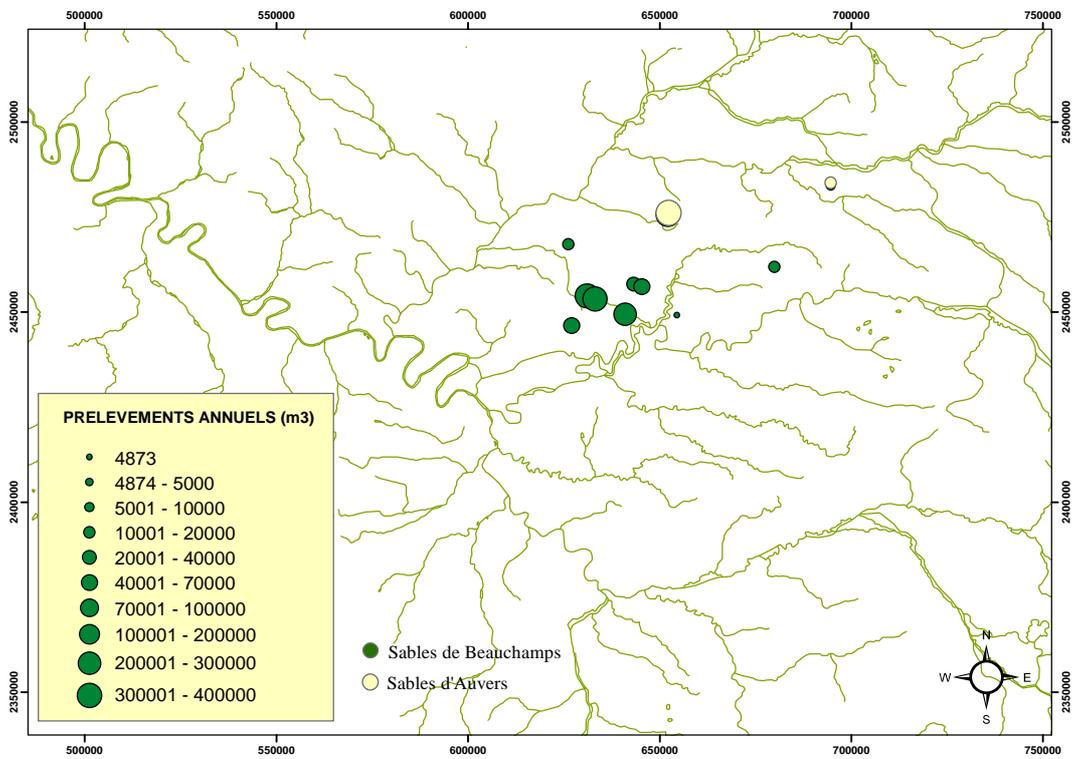


Figure A2-203 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe des sables d'Auvers et de Beauchamp

FORMATION DE LA NAPPE DE LA CRAIE

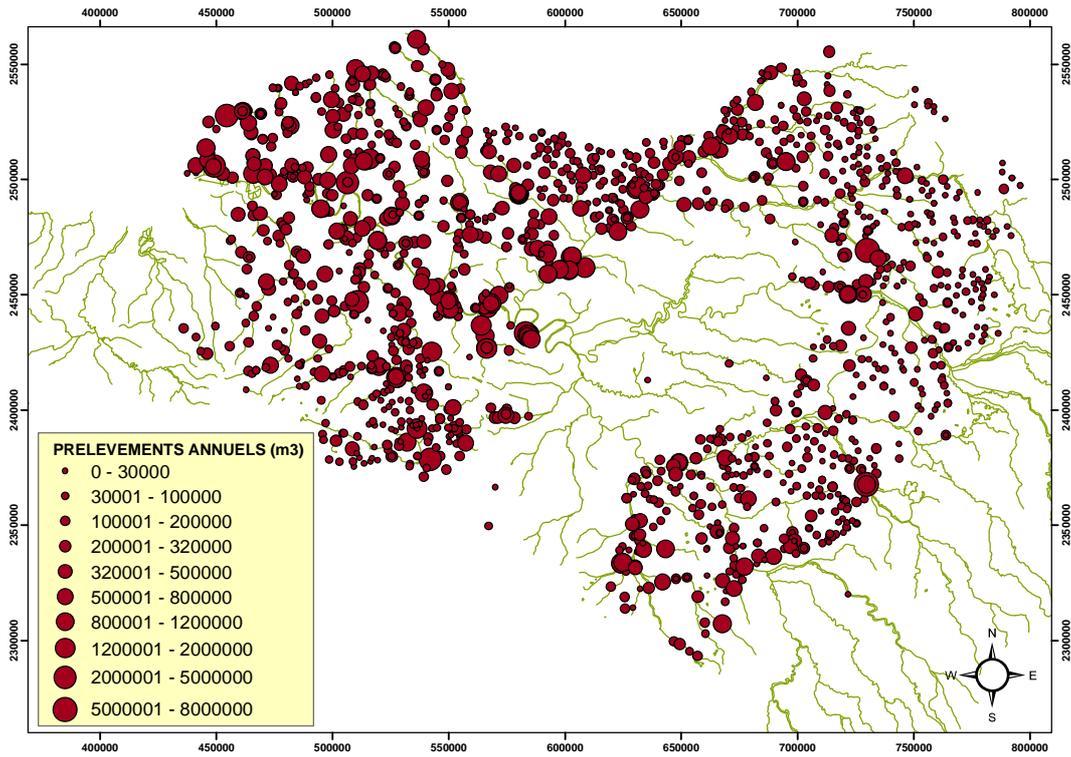


Figure A2-204 : Prélèvements A.E.P. dans la nappe de la Craie

ANNEXE 3

PRELEVEMENTS INDUSTRIELS EN NAPPE DANS LES DIFFERENTES FORMATIONS AQUIFERES (MOYENNE 2000-2004)

FORMATIONS DU TERTIAIRE

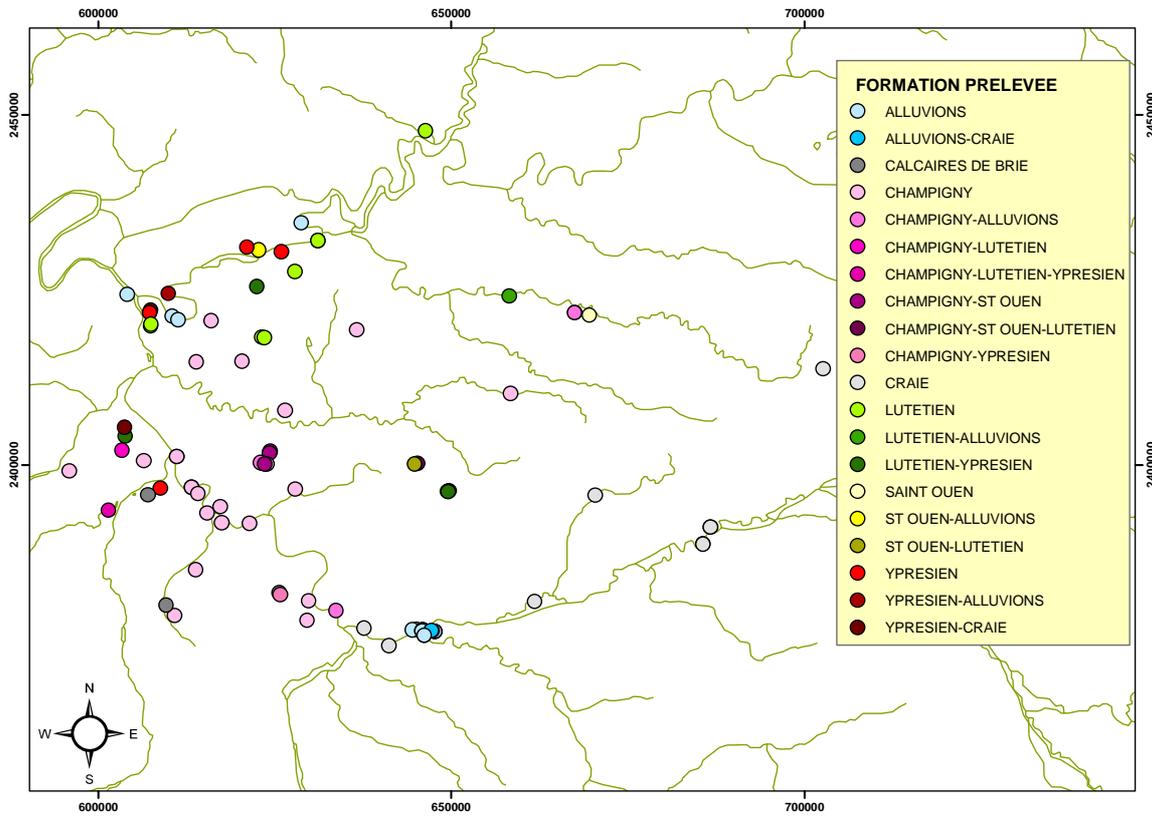


Figure A3-205 : Formations prélevées par les forages industriels (source AQUI-Brie)

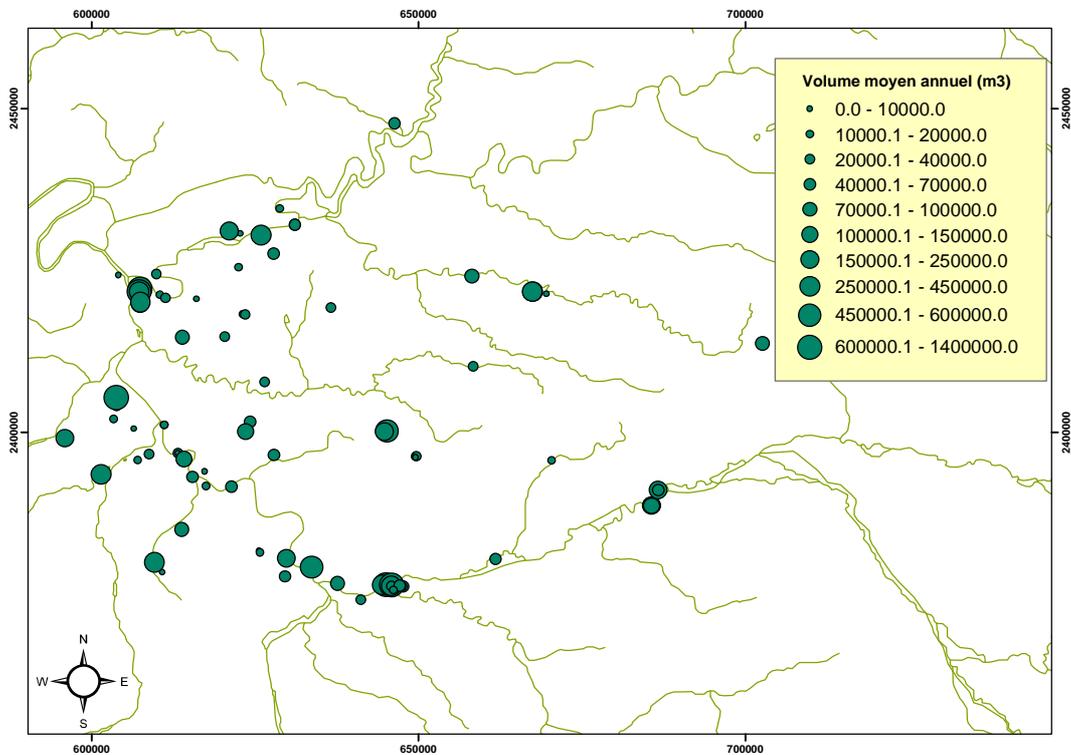


Figure A3-206 : Prélèvements industriels en nappe : volumes prélevés (source AQUI-Brie)

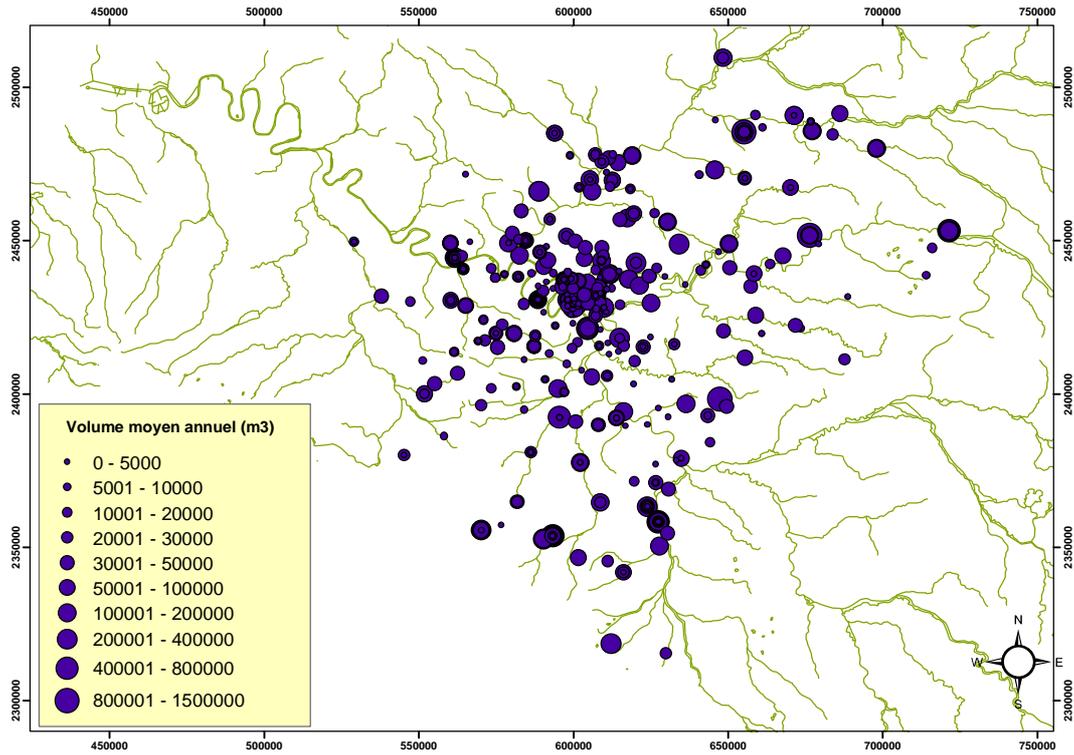


Figure A3-207 : Prélèvements industriels en nappe : Volumes moyens prélevés des forages non renseignés au niveau de l'aquifère capté

FORMATION DE LA CRAIE

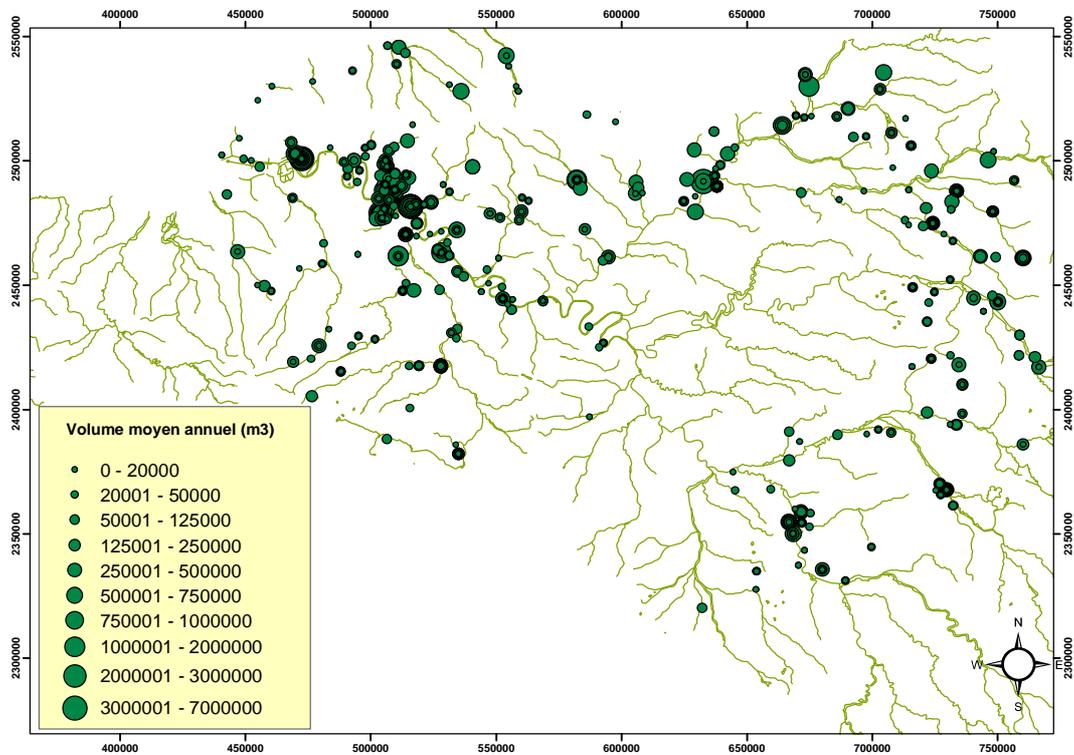


Figure A3-208 : Localisation des ouvrages et volumes moyens annuels prélevés à des fins industrielles dans l'aquifère de la Craie

8 TRANSFERT DE L'APPLICATION A LA DIREN ÎLE-DE-FRANCE

Le modèle, une fois requalifié, est destiné à être transféré dans les locaux de la DIREN dans le but de pouvoir être exploité plus aisément.

L'application MODCOU dans sa globalité comporte un certain nombre de fichiers sensés ne plus être amenés, à court terme tout au moins, à être modifiés. Il s'agit principalement de l'ensemble des fichiers décrivant la géométrie des maillages, les relations de voisinage entre mailles d'une même couche (relations « horizontales ») ou entre deux couches superposées (relations « verticales »), la description du réseau de drainage, des mailles rivières, etc. L'ensemble de ces paramètres est contenu dans trois fichiers principaux appelés génériquement f10n, fic11n et fic18n.

A partir de là, une modélisation MODCOU dans sa globalité et telle que détaillée au chapitre 2, se décline en trois grandes phases successives :

- le calcul du bilan hydrique des précipitations et du réservoir sol par le module de surface ;
- le transfert dans la zone non saturée ;
- le calcul MODCOU proprement dit qui permet le calcul couplé entre écoulements en rivières et formations aquifères.

L'ensemble des codes de calcul sont écrits en langage Fortran et seront compilés afin de pouvoir être utilisés sur des ordinateurs de type PC sous Windows.

8.1 MODULE DE SURFACE : CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DES PRECIPITATIONS

Le bilan hydrique des précipitations est effectué par des fonctions de production dont les paramètres sont calés à partir d'un certain nombre de données physiographiques (carte des sols, de la végétation, ...). Les paramètres de forçage de ce module (encore appelés paramètres d'entrée) sont constitués par les données météorologiques journalières que sont la pluie (sous forme liquide ou de neige) et l'évapotranspiration potentielle. Ces données, fournies par Météo France et générées par la méthode SAFRAN, font l'objet d'une convention de recherche entre l'École des mines de Paris et Météo France et ne peuvent donc pas être mises à disposition en l'état.

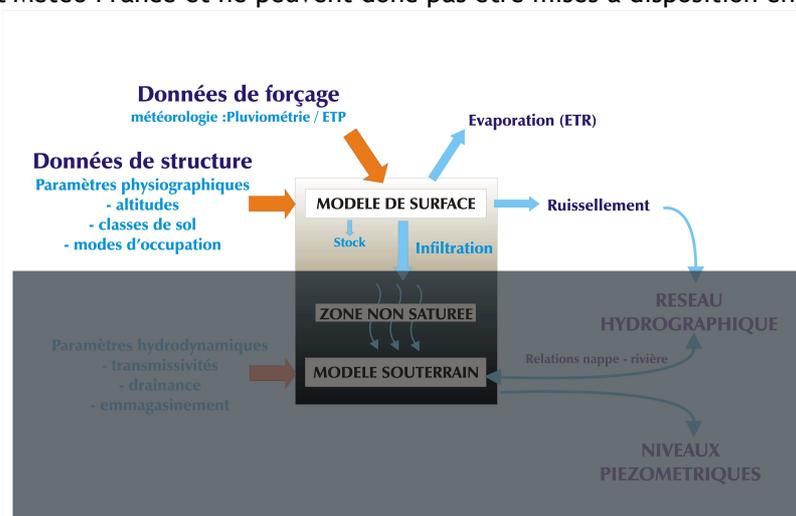


Figure 209: Module de surface - bilan hydrique des précipitations

Sorties du module : les résultats de calcul du module de surface seront donc fournis sous forme de fichiers binaires (appelés génériquement « fic08 ») qui fourniront, année hydrologique par année hydrologique de calcul, les débits ruisselés et infiltrés calculés, jour par jour, et ce pour l'ensemble des mailles de surface du modèle.

8.2 TRANSFERT DANS LA ZONE NON SATURÉE

Le transfert dans la zone non saturée s'effectue tel que décrit au chapitre 2.4. Les données d'entrée de ce module (figure 154) sont donc les résultats stockés dans les fichiers « fic08 » présentés ci-dessus.

Sorties du module : ce module génère des fichiers ayant exactement la même structure que ces fichiers c'est-à-dire des débits ruisselés (non modifiés par le calcul) et infiltrés (retardés et lissés par rapport à ceux des « fic08 ») qui là sont susceptibles d'alimenter directement les formations aquifères. Le nom générique des fichiers de sortie du module non saturé est « fic17 ».

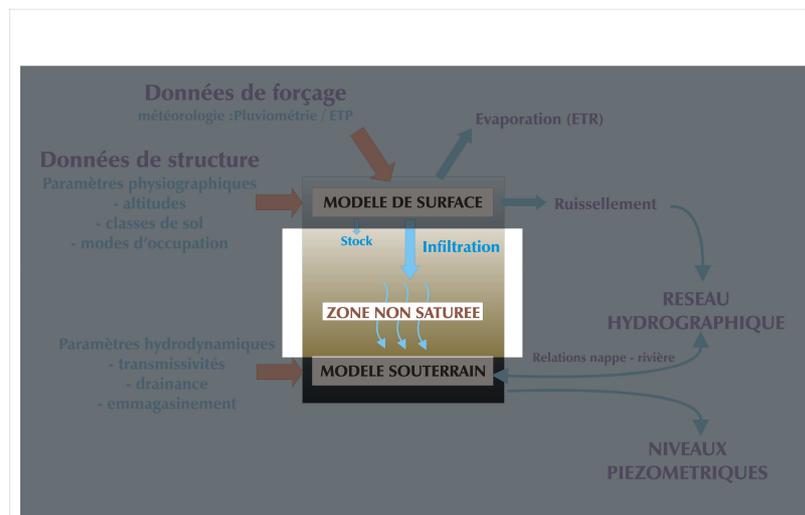


Figure 210 : Module de calcul du transfert dans les formations non saturées

Dans la pratique, les fichiers annuels « fic08 » sont concaténés sur la période de simulation choisie avant passage par le « module non saturé » ce qui permet de générer ensuite, par calcul à travers le non saturé, un et un seul fichier « fic17 » utilisable par le module MODCOU et permettant d'effectuer par la suite un calcul complet sur N années.

8.3 CALCUL MODCOU

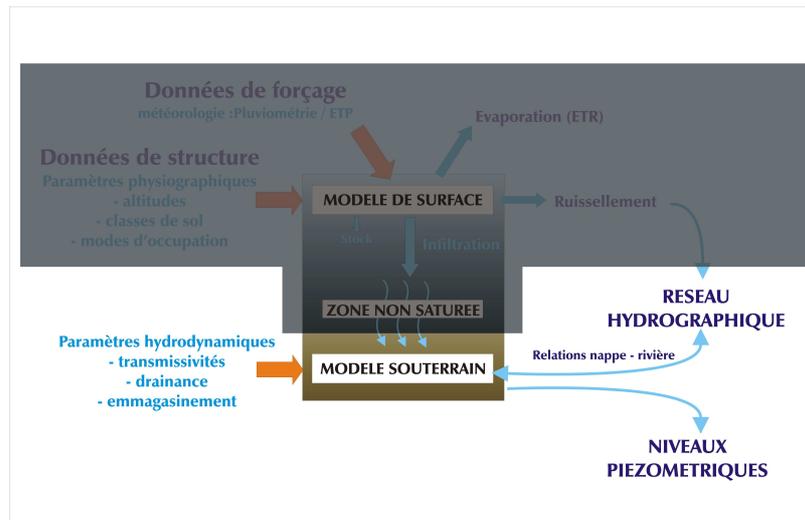


Figure 211 : Module de calcul des écoulements couplés surface-souterrain

Le module de calcul « MODCOU » permet réelle le couplage entre le module de surface (par l'intermédiaire du calcul des débits ruisselés essentiellement), le module non saturé qui calcule les lames d'eau infiltrées alimentant les formations aquifères et le module souterrain qui permet la simulation du comportement hydrodynamique des aquifères modélisés. La figure 156 présente un exemple type de fichier d'entrée du modèle MODCOU.

Les paramètres d'entrée de MODCOU sont essentiellement constitués par les paramètres hydrodynamiques des formations aquifères modélisées : transmissivité, coefficient d'emmagasinement, cotes et coefficients de drainage des rivières. Ces paramètres seront livrés calés et ne demanderont donc pas à être modifiés en phase d'exploitation du modèle.

Sorties du module MODCOU : débits journaliers calculés aux stations hydrométriques définies (on peut ainsi créer des stations virtuelles ou non en tout point du réseau hydrographique décrit dans le modèle et représenté par les mailles rivières), évolution piézométrique journalière aux points définis, carte piézométrique générale à chaque fin de phase de calcul (décadaire, mensuel, annuel, ...).

De plus, un ensemble d'utilitaires seront fournis à la DIREN pour faciliter la mise en forme et l'exploitation des résultats. Ces utilitaires viseront essentiellement à faciliter la cartographie 2D à intégrer dans un SIG (Arcgis et/ou Mapinfo) et de création de fichiers d'évolution temporelle de tel ou tel paramètre.

Enfin, différents scénarios de forçages climatiques pourront également être prédéfinis pour la réalisation de calculs prospectifs (succession d'années sèches, succession d'années moyennes, ...). Les forçages seront intégrés à partir de fichiers fic08 particuliers intégrant dans leurs résultats le forçage climatique souhaité et donc son influence sur le bilan hydrique des précipitations.

fic_modcou

mar nov 27 11:00:51 2007

1

<pre> 10,'old ','fic10n ','unformatted' 11,'old ','fic11n ','unformatted' 12,'old ','fic18n ','unformatted' 21,'old ','ini_piezo','unformatted' 17,'old ','fic17 ','unformatted' 19,'unknown ','sortie ','unformatted' 31,'old ','donstat ','formatted' 32,'old ','donpiezo ','formatted' 51,'old ','Cote_drainage','unformatted' 52,'old ','Transmissivite','unformatted' 53,'old ','Coef_transfert','unformatted' 54,'old ','Coef_drainage','unformatted' 55,'old ','Emmagasinement','unformatted' 56,'old ','pompages ','unformatted' f i n </pre>	<p>NOMS DES FICHIERS</p> <p>Fichier de structure de MODCOU (géométrie, tables de voisinages, mailles rivière ...)</p> <p>Fichier contenant l'initialisation de la piézométrie Fichier issu du module non saturé contenant les débits infiltrés et ruisselés Fichier de résultats du calcul Modcou (débits, niveaux piézométriques)</p> <p>Fichiers décrivant la localisation des stations et des piézomètres (n° de maille, couche, ...)</p> <p>Fichiers décrivant les paramètres des couches souterraines (transmissivités, coefficient d'emménagement, cote des rivières)</p> <p>Fichier contenant les débits pompés dans les aquifères</p>
<pre> programme MODCOU Seine 1 2 3 0.70 12 23 1 2 5 init 1 1. 3 21 3 1. 3 51 3 6 1. 3 52 3 7 1. 3 53 9 1. 3 54 9 1. 3 55 # Albien (600l/s) b 3 1.00E-12 00 0 114812 1 9. \$ * oo non 1 1 2 3 non non # transitoire 9 # donnees hydrologiques de la phase e 1. 3 56 * 1 365 1.1.e-5 500 00 55 0 1 5 oui 1 1 2 3 non non # FIN DES PHASES DE CALCUL stop </pre>	<p>INITIALISATION DU CALCUL</p> <p>Lecture des paramètres d'initialisation du calcul dans les fichiers adhoc</p> <p>Alimentation de la nappe de la Craie à partir de la formation de l'Albien</p>
<pre> # transitoire 9 # donnees hydrologiques de la phase e 1. 3 56 * 1 365 1.1.e-5 500 00 55 0 1 5 oui 1 1 2 3 non non # FIN DES PHASES DE CALCUL stop </pre>	<p>PHASES DE CALCUL</p> <p>Nombre de phase de calcul en régime transitoire (9 x 365 jours)</p> <p>Lecture des débits pompés à chaque pas de temps</p>

Figure 212 : Exemple de fichier d'entrée du programme MODCOU