

Document public

Caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le val d'Orléans

Rapport final

BRGM/RP-52121-FR
janvier 2003



ÉQUIPE
PLURIDISCIPLINAIRE
PLAN LOIRE
GRANDEUR NATURE



Caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le val d'Orléans

Rapport final

BRGM/RP-52121-FR
janvier 2003

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2002-EAU-601

Dans le cadre d'une convention
avec l'agence de l'Eau Loire-Bretagne

Martin J.C., Noyer M.L.
Avec la collaboration de
Amraoui N., Pathirana N.



ÉQUIPE
PLURIDISCIPLINAIRE
PLAN LOIRE
GRANDEUR NATURE



Mots clés : Inondations, Remontée de nappe, Piézométrie, Loire, MARTHE.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Martin J.C., Noyer M.L. avec la collaboration de Amraoui N., Pathirana N. (2003) -
Caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le val d'Orléans.
Étude menée en collaboration avec l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur
Nature. BRGM/RP-52121-FR. 170 p., 70 fig., 18 tabl., 6 ann.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Avant-propos

En partant d'une campagne de relevé de la nappe, conduite en 1966, ainsi que lors d'une petite crue en 1968 et en simulant une crue centennale de la Loire, provenant de l'étude de propagation des crues fortes en Loire moyenne confiée à Hydratec, le BRGM et l'agence de l'Eau Loire-Bretagne, en partenariat avec l'État (DIREN) et l'Établissement Public Loire, viennent d'établir les premiers résultats suivants sur la partie inondable de l'agglomération d'Orléans (Saint-Denis-en-Val, Saint-Jean-le-Blanc, Saint-Cyr-en-Val, Olivet, Orléans, Saint-Pryvé – Saint Mesmin, Saint-Hilaire-Saint-Mesmin). La remontée de la nappe peut présenter un risque d'inondation des sous-sols sur 90 % de ce secteur :

- la nappe sera à la hauteur du premier niveau de sous-sol (1 à 3 m de profondeur) sur 75 % de la superficie du secteur ;
- la nappe sera à moins d'un mètre du sol et pourra même déborder sur 20 % de la superficie de ce secteur, en particulier Saint-Pryvé, même aux abords du bras des Montées (y compris sur Saint-Jean-le-Blanc), quartiers les Bordes et le Carrouge, et dans le secteur de Melleray et de l'île Charlemagne le long de la levée sur Saint-Denis-en-Val ;
- seul 5 % du secteur aurait une nappe à plus de 3 m de profondeur.

Ces résultats justifient de se préoccuper de ce risque, de mieux le connaître et de l'anticiper. Pour ce faire, il est proposé :

- d'actualiser la carte piézométrique de 1966, pour valider les données de base dans le modèle (coût 90 K€) ;
- de disposer d'un dispositif de suivi de la nappe en continu constitué de huit piézomètres à réaliser et à équiper sur des sites stratégiques pour la compréhension du fonctionnement de la nappe, et de huit autres puits ou piézomètres existants à équiper d'un dispositif d'enregistrement en continu (investissement 80 K€, fonctionnement 25 K€ / an) ;
- de faire évaluer le modèle réalisé par le BRGM en un modèle de suivi des évolutions et d'anticipation des situations préoccupantes ;
- de recenser tous les forages et puits privés pouvant permettre de suivre la nappe et d'associer des habitants volontaires à la collecte ponctuelle d'information lors des crues de la Loire.

Synthèse

Le val d'Orléans est en grande partie située en zone inondable du fait des possibilités de remontée des eaux de la Loire par le Loiret ou même de débordement du fleuve par-dessus les levées.

À ces inondations de surface, s'ajoutent les possibilités d'inondation du val par des remontées de la nappe, causées par les infiltrations de la Loire sous les levées et par le ralentissement des écoulements de la nappe en période de hautes eaux du fleuve.

L'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature et le BRGM ont financé cette étude dans le but d'identifier et de caractériser les composantes du risque d'inondation par ces remontées de nappe dans le val d'Orléans, qui présente la particularité de comporter de nombreux passages karstiques dans le sous-sol.

L'étude comprend d'une part une approche globale des écoulements et des remontées de la nappe à l'échelle du val d'Orléans, d'autre part une approche centrée sur les conditions hydrauliques à proximité des zones urbanisées, depuis l'île Charlemagne jusqu'au pont de l'autoroute A 71.

Cette étude bénéficie des travaux et réflexions qui ont été faits sur le val d'Avaray (résultats d'une collaboration préalable entre l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire et le BRGM - action de Service public 99-D-698), et d'un travail de recherche bibliographique sur le val d'Orléans, réalisé par le BRGM en 2001 sur ses crédits de recherche.

Un programme d'instrumentation est proposé pour mieux suivre et anticiper ce risque.

1. CONTEXTE DU VAL D'ORLÉANS

1.1. Contexte hydrogéologique

Le val d'Orléans, situé en rive gauche de la Loire, s'étend d'ouest en est, sur une longueur de 35 km, depuis les communes de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin et Saint-Hilaire-Saint-Mesmin, à la confluence du Loiret avec la Loire (pointe de Courpin), jusqu'à la commune de Guilly, située à une dizaine de kilomètres en amont de Châteauneuf-sur-Loire. Sur ce parcours, la largeur du val d'Orléans varie entre 5 et 7 km, représentant une superficie de 180 km².

D'un point de vue géologique, le val est constitué des alluvions de la Loire, qui reposent sur les formations calcaires de Beauce. Par endroits, les formations argileuses du Burdigalien peuvent être intercalées entre ces deux niveaux. L'épaisseur des alluvions varie entre 5 et 15 m. Les formations calcaires de Beauce sous-jacentes reposent sur les formations de l'Éocène détritique et l'argile à silex dont l'ensemble forme un substratum imperméable. Les formations perméables des calcaires de Beauce sous le val ont une épaisseur d'une soixantaine de mètres, et sont le siège de formations karstiques étendues.

D'un point de vue hydraulique, les études réalisées depuis les années soixante ont mis en évidence des échanges importants entre la Loire et le val, qui donnent naissance à la rivière du Loiret dans la source du Bouillon, située dans le parc Floral de la Source.

Des essais de coloration ont été faits en 1905 par M. Marboutin et en 1973 par le BRGM. Les injections de fluorescéine, faites en aval de Jargeau, sont réapparues à la source du Bouillon au bout de trois jours. Ce qui correspond à des vitesses très rapides, de 150 à 200 m/h, qui traduisent l'existence d'un réseau karstique actif dans les formations calcaires de Beauce du val. Les vitesses d'écoulement dans un aquifère non karstifié sont le plus souvent comprises entre 10 et 100 m/jour.

La carte piézométrique du val, réalisée au cours du second semestre 1966 à partir de plus de 500 points de mesure, permet d'affirmer que la Loire perd une partie de son débit au profit de la plaine alluviale entre Châteauneuf-sur-Loire et Orléans. Les mesures de débits de la Loire, réalisées au cours de l'année 1966, conduisent à des valeurs de perte comprises entre 25 m³/s en étiage et 90 m³/s en période de crue.

Le val reçoit également une alimentation venant du sud soit par des cours d'eau, soit par la nappe des calcaires de Beauce qui se poursuit sous les formations de Sologne. Enfin le val est alimenté directement par les pluies efficaces.

Les observations réalisées en continu sur des piézomètres au cours des périodes de 1968 à 1970 et de 1973 à 1975 montrent que les variations du niveau de la nappe font suite aux crues de la Loire (+ 1,50 à 2,50 m) ou à des épisodes de fortes précipitations dans le val (+ 1,60 m).

Les exutoires naturels du val d'Orléans sont constitués par la source du Bouillon, qui donne naissance à la rivière du Loiret, et par des écoulements souterrains, en période de basses eaux, entre Orléans et la confluence Loire/Loiret.

Du fait de la montée rapide du niveau du fleuve en période de forte crue de la Loire, sur la partie amont du val, les apports à la nappe par les pertes de la Loire sont accrus de façon significative. Pour la même raison, les écoulements des cours d'eau et de la nappe sont ralentis, voire totalement interrompus sur la partie aval. Il s'ensuit un phénomène de stockage d'eau dans l'aquifère qui se traduit par une remontée de son niveau piézométrique, source potentielle d'une inondation par remontée de nappe.

1.2. Contexte socio-économique

Le secteur rive gauche de la Loire du val d'Orléans, isolé des inondations fréquentes du fleuve par la levée, abrite près de 70 000 habitants, dont de l'ordre de 45 000 dans la seule partie agglomérée de la ville d'Orléans et des communes limitrophes.

Une inondation des enjeux exposés, consécutive à une rupture de levée ou une surverse par-dessus la levée ou le déversoir de Jargeau représente un dommage potentiel de plusieurs milliards de francs. La seule remontée de nappe peut aussi provoquer des dommages certes moindres mais aux conséquences indirectes lourdes, dont le coût peut être important. Aussi se préoccuper du risque d'inondation par remontée de nappe pour mieux en identifier le niveau de risque et l'ampleur des atteintes potentielles est un enjeu localement et régionalement important.

1.3. Contexte du risque d'inondation

Le val d'Orléans a été entièrement inondé à trois reprises en 1846, 1856 et 1866 suite aux ruptures des levées, causées par des crues de la Loire de période de retour 150 à 200 ans.

La crue de 1907 s'est traduite par un remous de la Loire dans le Loiret, avec l'inondation de la commune de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin.

Lors de la crue décennale de 1982, on a connu des inondations localisées par remontées de nappe dans le val. Ce phénomène n'a fait l'objet ni d'un recensement géographique, ni d'une cartographie.

Le diagnostic réalisé dans le cadre de l'étude Loire-Moyenne montre que jusqu'à la crue de période de retour 170 ans l'inondation du val est limitée au remous de la Loire dans le Loiret. Pour des crues plus fortes de la Loire, on retombe dans une inondation presque totale du secteur d'Orléans soit par brèche soit par le fonctionnement du déversoir de Jargeau.

2. LES PRINCIPAUX RÉSULTATS OBTENUS

2.1. Recherche bibliographique

Plusieurs études hydrogéologiques ont été réalisées sur le val d'Orléans entre 1964 et 1975. Au cours de ces études, de nombreuses mesures ont été faites (cartes et chroniques piézométriques) qui ont servi de base de travail pour la description et la modélisation des écoulements de la nappe.

2.2. Construction d'un modèle des écoulements souterrains dans le val

Un modèle mathématique des écoulements souterrains, couvrant l'ensemble du val, a été calé en régime permanent sur la piézométrie de 1966, et en régime transitoire sur les chroniques existantes entre 1968 et 1975.

2.3. Simulation du comportement de la nappe lors d'une crue centennale de la Loire

La simulation d'une crue centennale de la Loire permet de calculer la remontée du niveau de la nappe par rapport à une situation d'étiage sur l'ensemble du val, et de quantifier le risque d'inondation du val d'Orléans par remontée de nappe. Ainsi il a été possible de tracer la carte des profondeurs de la nappe au maximum de remontée de la nappe.

La remontée de la nappe est comprise entre 2 et 3 m le long d'une frange de 1 500 m parallèlement à la Loire. Entre cette frange et le Loiret, la remontée de la nappe est comprise entre 1 et 2 m. Sur la plus grande partie du secteur urbanisé entre la Loire et le Loiret (Orléans, Olivet, Saint-Jean-le-Blanc), la profondeur de la nappe serait de 2 m au maximum de la crue. Du point de vue transitoire, on peut considérer que le plus fort

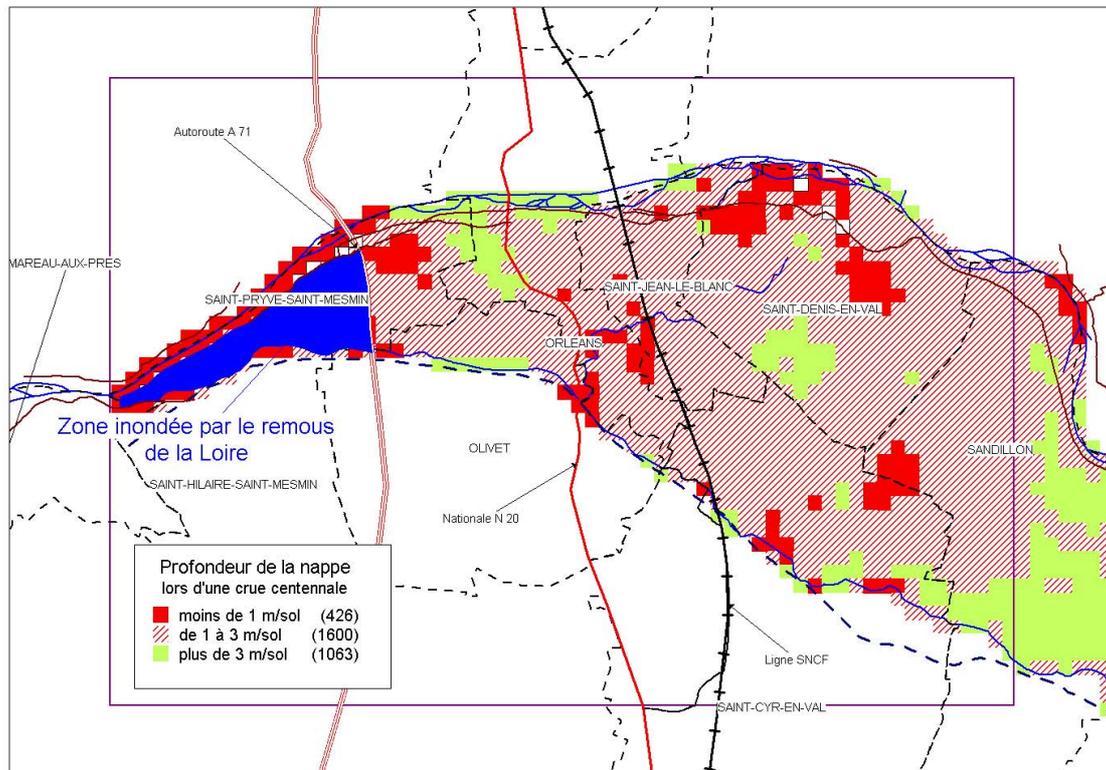
de la crue centennale de la Loire dure six jours, mais que cette crue se traduit par une remontée de la nappe pendant une période de quinze jours.

Du point de vue de la vulnérabilité vis-à-vis des remontées de la nappe, on distingue trois zones (carte A) :

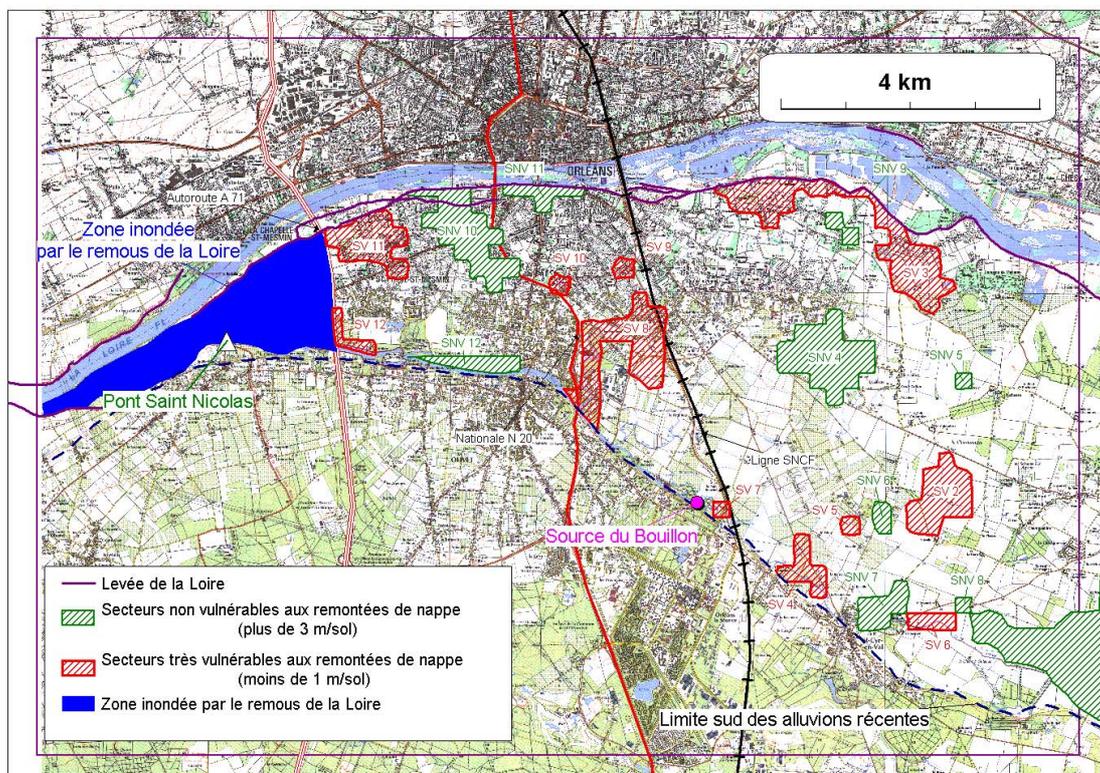
- les secteurs très vulnérables (en rouge sur la carte), où la nappe serait à moins de 1 m du sol, avec un risque important de voir déborder la nappe au niveau du sol ;
- les secteurs vulnérables (en orange sur la carte), où la nappe serait entre 1 et 3 m du sol, avec un risque d'avoir de l'eau dans les caves des habitations ;
- les secteurs non vulnérables (en vert sur la carte), où la nappe serait à plus de 3 m du sol.

Pour une crue de période de retour 170 ans, le niveau de la Loire dépasserait de 50 cm le niveau de la crue centennale au pont Royal à Orléans. Cela entraînerait une aggravation de la situation dans le val avec une remontée du niveau de la nappe de 10 à 20 cm en plus par rapport à la situation d'une crue centennale.

Sur la carte B et le tableau A, on indique les secteurs très vulnérables du val qui pourraient connaître des débordements en surface.



Carte A - Profondeur minimale de la nappe par rapport au sol. Situation d'une crue centennale de la Loire. Zone urbanisée entre Loire et Loiret.



Carte B - Localisation des secteurs non vulnérables et très vulnérables dans la zone urbanisée entre Loire et Loiret.

Numéro du secteur	Localisation des secteurs très vulnérables
SV 1	Commune de Darvoy et pied des levées sur la commune de Jargeau.
SV 2	Zone non habitée au sud de la D 951 sur la commune de Sandillon.
SV 3	Commune de Saint-Denis-en-Val, zone au pied des levées de l'île Charlemagne (ouest) à Melleray (est).
SV 4	Zone non habitée sur la commune de Saint-Cyr-en-Val.
SV 5	
SV 6	
SV 7	Parc Floral d'Orléans à proximité du Dhuy.
SV 8	Zone du bras des Montées, quartier des Bordes et quartier du Carrouge.
SV 9	Saint-Jean-le-Blanc, quartier le Motteau.
SV 10	Orléans, quartiers Pré Pinson et la Mouillère.
SV 11	Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, zone comprise entre la levée et la D95 (la Trésorerie).
SV 12	Saint-Pryvé-Saint-Mesmin et Olivet, zone située entre le Loiret et Bel-Air.

Tabl. A - Identification des secteurs très vulnérables aux remontées de nappe.

2.4. Réflexion sur un programme d'instrumentation

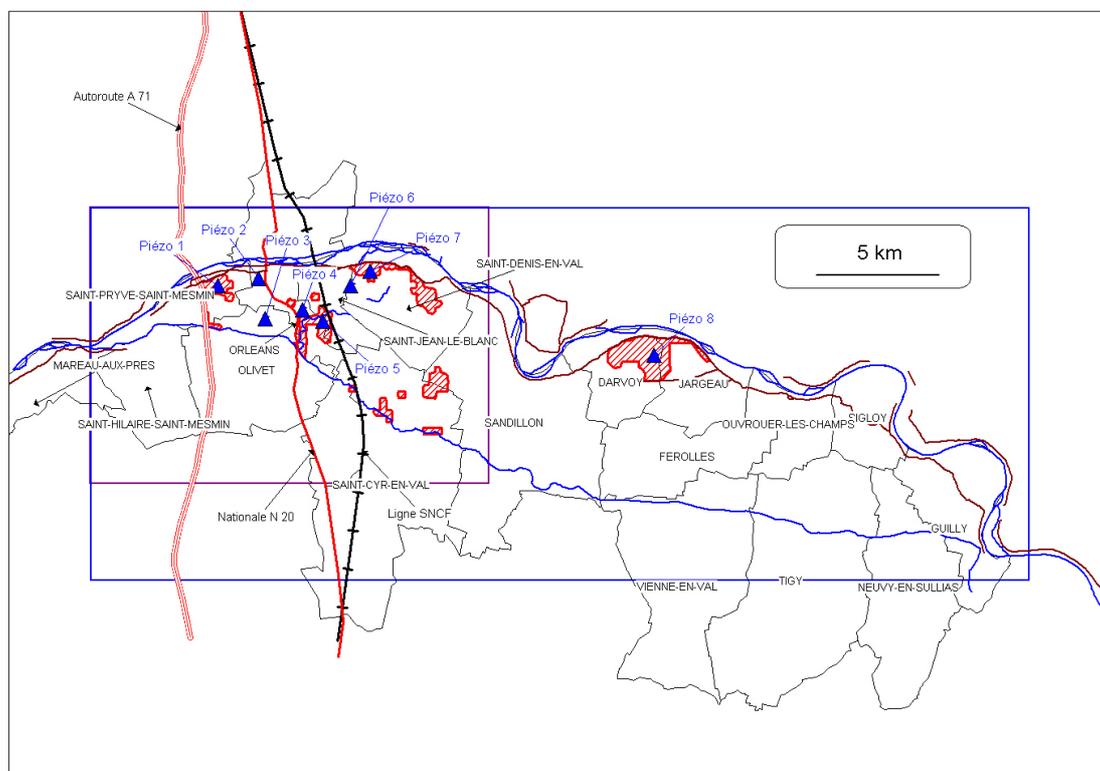
On propose un programme d'instrumentation qui a pour objectif d'une part le suivi de l'état de la nappe, d'autre part de mieux connaître les caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère, donc le risque de remontée de nappe.

Les mesures et suivis à réaliser sont indiqués dans le tableau B. L'emplacement des points de surveillance en continu est indiqué sur la carte C.

N°	Action
1	<p align="center">Carte piézométrique de la nappe du val</p> <ul style="list-style-type: none"> - en situation de Hautes Eaux, en situation de Basses Eaux, - en différenciant les niveaux des alluvions et des calcaires. <p>Domaine : l'ensemble du val depuis Bouteille jusqu'à la pointe de Courpin</p> <p>Coût d'une carte piézométrique réalisée à partir de 400 points de mesure (deux situations : HE et BE, et deux niveaux : alluvions et calcaires) : 90 K€ TTC.</p>
2	<p align="center">Équipement et mesures piézométriques</p> <ul style="list-style-type: none"> - réalisation et équipement de huit piézomètres dans le val (selon emplacement figurant sur la carte) – Investissement : 8 x 6,7 = 53,6 K€ TTC - équipement de 8 puits ou forage existants – Investissement : 8 x 3,6 = 28,8 K€ TTC <p>Investissements (53,6 + 28,8) : environ 80 K€ TTC</p> <p>Fonctionnement (16 x 1,6) : environ 25 K€ TTC/an</p>
3	<p align="center">Mesure du débit du Loiret (DIREN)</p> <ul style="list-style-type: none"> - réalisation d'une station de jaugeage sur le Loiret, à proximité du pont Saint-Nicolas ou plus en aval.
4	<p align="center">Mesure du niveau de la Loire (DIREN)</p> <ul style="list-style-type: none"> - prévoir des campagnes de mesures de la ligne d'eau de la Loire sur les stations de la DIREN lors des campagnes piézométriques.

Tabl. B - Programme de mesure et de surveillance proposé dans le val d'Orléans.

Le montant des investissements pour l'acquisition de données récentes et précises, nécessaires pour une meilleure connaissance des phénomènes de remontée de la nappe, s'élève à 170 K€ TTC. A cela s'ajoute les frais d'exploitation du réseau de surveillance pour un montant de 25 K€ TTC/an. Ces sommes restent minimes par rapport aux coûts des dommages engendrés par un débordement de la nappe qui sont évalués entre 50 et 100 M€..



Carte C - Localisation proposée des piézomètres de surveillance de la nappe.

Sommaire

1. Introduction	19
2. Le contexte hydrogéologique du val d'Orléans	21
2.1. Les alluvions (Quaternaire).....	21
2.2. Le Burdigalien (Miocène).....	22
2.3. Les calcaires de Beauce (Oligocène).....	22
2.4. Le substratum des argiles à silex (Éocène).....	22
2.5. Les formations sous-jacentes (Crétacé).....	23
3. Les études antérieures et les données disponibles	25
3.1. Les études antérieures	25
3.2. Les données disponibles	27
3.2.1. Données hydrogéologiques.....	28
3.2.2. Les données des cours d'eau.....	28
3.2.3. Les prélèvements en nappe	30
4. Études des niveaux piézométriques des nappes du val d'Orléans – Corrélations avec les niveaux de la Loire et du Loiret sur la période 1966 à 1975	33
4.1. Comparaison du niveau de la Loire et du niveau des nappes du val d'Orléans (nappe des alluvions et nappe des calcaires de Beauce).....	33
4.2. Étude des amplitudes du niveau de la Loire et du niveau piézométrique des nappes du val d'Orléans au cours de trois crues importantes.....	43
5. Étude des variations du débit moyen mensuel de la Loire entre Gien et Orléans	49
5.1. Les débits de la Loire mesurés à Gien et à Orléans.....	49

5.2. Étude des variations du débit moyen mensuel de la Loire entre Gien et Orléans	52
6. La modélisation hydrodynamique du val d'Orléans	59
6.1. Définition du modèle hydrodynamique du val d'Orléans	59
6.1.1. Le modèle conceptuel	60
6.1.2. Le modèle numérique.....	68
6.2. Calage du modèle hydrodynamique du val d'Orléans	84
6.3. Calage en régime permanent	84
6.3.1. Paramètres de calage	84
6.3.2. Résultats.....	88
6.4. Calage en régime transitoire.....	88
6.4.1. Historiques utilisés.....	92
6.4.2. Discrétisation temporelle	93
6.4.3. Paramètres de calage	94
6.4.4. Résultats.....	95
6.5. Simulation de la crue centennale.....	101
6.5.1. Données complémentaires et démarche suivie.....	101
6.5.2. Résultats.....	104
7. Les remontées de la nappe dans le val d'Orléans lors d'une crue centennale de la Loire. Résultats de la modélisation.....	113
7.1. Les remontées de la nappe lors d'une crue centennale de la Loire à l'échelle du val.....	113
7.2. Les remontées de la nappe lors d'une crue centennale de la Loire sur la zone urbanisée d'Orléans et d'Olivet	114
7.3. Les remontées de la nappe lors d'une crue centennale de la Loire calculée en régime transitoire sur quatre points situés dans la zone urbanisée d'Orléans et d'Olivet entre Loire et Loiret.....	116
8. Programme de surveillance des niveaux de la nappe	131
8.2. Les chroniques piézométriques.....	131
8.3. Les mesures de débits.....	132

8.4. Évaluation des coûts d'investissement et de fonctionnement d'un dispositif de surveillance.	133
9. Conclusion	135

Liste des figures

Fig. 1 - Les limites de l'étude et les communes du val d'Orléans.....	20
Fig. 2 - Coupe hydrogéologique sud-nord du val d'Orléans.	24
Fig. 3 - Débit du Dhuy à Saint-Cyr-en-Val et du Loiret au pont Saint-Nicolas. Piézomètre de Saint-Cyr-en-Val.....	29
Fig. 4 - Localisation des piézomètres étudiés, des zones d'étude et des mesures de niveau de la Loire et du Loiret dans le val d'Orléans.....	34
Fig. 5 - Chronique piézométrique. Puits Theuriet, puits du Bouchet.	38
Fig. 6 - Chronique piézométrique. Sigloy.	38
Fig. 7 - Chronique piézométrique. Jargeau, Ouvrouer (Les Chevalliers).	39
Fig. 8 - Chronique piézométrique. Sandillon (Le coin tournant et La Féculerie).....	39
Fig. 9 - Chronique piézométrique. Ouvrouer (cimetière et Les Chevalliers), Tigy.....	41
Fig. 10 - Chronique piézométrique. Férolles, Sandillon (La Féculerie et Savigny).....	41
Fig. 11 - Chronique piézométrique. Saint-Cyr-en-Val (Villesancien), Saint-Denis-en-Val.	42
Fig. 12 - Amplitudes du niveau de la Loire et du niveau piézométrique de la nappe du val d'Orléans au cours des trois crues étudiées.....	46
Fig. 13 - Débit de la Loire à Orléans (période 1964 – 2002).	47
Fig. 14 - Localisation des stations de jaugeage de Gien et d'Orléans.....	50
Fig. 15 - Débits moyens mensuels de la Loire à Gien (période 1984 – juin 2002).	50
Fig. 16 - Débits moyens mensuels de la Loire à Orléans (période 1984 – janvier 2002).	51
Fig. 17 - Débits mensuels moyens, maximum et minimum de la Loire à Gien	51
Fig. 18 - Corrélation des débits moyens mensuels de la Loire à Orléans et à Gien...	52
Fig. 19 - Écart des débits moyens mensuels de la Loire entre Gien et Orléans sur la période 1984 – janvier 2002.	53
Fig. 20 - Écarts des débits de la Loire entre Gien et Orléans en fonction du débit de la Loire à Gien (valeurs mensuelles).	54

Fig. 21 - Écarts moyen, maximum et minimum des débits mensuels de la Loire entre Giens et Orléans (m ³ /s) (période 1984 – janvier 2002).....	54
Fig. 22 - Écarts moyens des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (m ³ /s) (période 1984 – janvier 2002).....	55
Fig. 23 - Écarts relatifs moyens, maximum et minimum des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (%) (période 1984 – janvier 2002).....	55
Fig. 24 - Écarts relatifs moyen des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (%) (période 1984 – janvier 2002).....	56
Fig. 25 - Maillage du modèle et conditions aux limites (au nord, la Loire subdivisée en cinq secteurs ; au sud, mailles à potentiel imposé en rouge).....	63
Fig. 26 - Situation des points de prélèvement pour l'AEP sur fond topographique.	64
Fig. 27 - Situation des points de prélèvement industriels sur fond topographique.	65
Fig. 28 - Zones de prélèvements pour l'irrigation et limites des communes (en.....	66
Fig. 29 - Limites du domaine d'étude sur fond topographique.....	70
Fig. 30 - Cotes du substratum : couche 1 (alluvions).	71
Fig. 31 - Cotes du substratum : couche 2 (Burdigalien).	72
Fig. 32 - Cotes du substratum : couche 3 (calcaires).	73
Fig. 33 - Épaisseurs de la couche 1 (alluvions).....	74
Fig. 34 - Épaisseurs de la couche 2 (Burdigalien).....	75
Fig. 35 - Épaisseurs de la couche 3 (calcaires).....	76
Fig. 36 - Sélection des lignes 14, 21 et 40 du modèle pour le tracé des coupes verticales.	77
Fig. 37 - Coupe verticale selon la ligne 40 du modèle (abscisses en km, ordonnées en m NGF).....	78
Fig. 38 - Coupe verticale selon la ligne 21 du modèle (abscisses en km, ordonnées en m NGF).....	79
Fig. 39 - Coupe verticale selon la ligne 14 du modèle (abscisses en km, ordonnées en m NGF).....	80
Fig. 40 - Piézométrie de référence : couche 1 (alluvions).	81
Fig. 41 - Piézométrie de référence : couche 3 (calcaires).	82
Fig. 42 - Zones de perméabilités en 10 ⁻⁴ m/s pour la couche 1 (alluvions).	85
Fig. 43 - Zones de perméabilités en 10 ⁻⁴ m/s pour la couche 3 (calcaires).	86
Fig. 44 - Calage en régime permanent : écarts entre charges simulées et observées dans la couche 1 (alluvions).....	89
Fig. 45 - Calage en régime permanent : écarts entre charges simulées et observées dans la couche 3 (calcaires).....	90
Fig. 46 - Calage en régime transitoire : zones de coefficient d'emmagasinement libre pour la couche 1 (alluvions) (valeurs en % données par la borne inférieure).	96

Fig. 47 - Calage en régime transitoire : zones de coefficient d'emmagasinement libre pour la couche 3 (calcaires) (valeurs en % données par la borne inférieure).	97
Fig. 48 - Calage en régime transitoire : piézométrie en crue le 04 janvier 1969, (pas 20 du tableau 13) couche 1 (alluvions).....	98
Fig. 49 - Calage en régime transitoire : piézométrie en crue le 04 janvier 1969 (pas 20 du tableau 13) couche 3 (calcaires).	99
Fig. 50 - Hydrogramme de crue centennale au pont Thinat et découpage pour le modèle.....	102
Fig. 51 - Simulation de la crue centennale : piézométrie au maximum de la crue de la Loire (pas 7 du tableau 15) couche 1 (alluvions).....	105
Fig. 52 - Simulation de la crue centennale : piézométrie au maximum de la crue de la Loire (pas 7 du tableau 15) couche 3 (calcaires).....	106
Fig. 53 - Simulation de la crue centennale (pas 7) : carte de la profondeur de la nappe en crue (dans la zone rouge, la nappe déborde).....	107
Fig. 54 - Forage de Sandillon : en vert, simulation de la crue centennale.....	109
Fig. 55 - Piézomètre de Jargeau : en vert, simulation de la crue centennale.....	110
Fig. 56 - Piézomètre d'Ouvrouer : en vert, simulation de la crue centennale.....	111
Fig. 57 - Piézomètre de Sigloy : en vert, simulation de la crue centennale.....	112
Fig. 58 - Le phénomène de remontée et de débordement à l'aval immédiat de la levée à la suite d'une crue importante de la Loire.	118
Fig. 59 - Profondeur de la nappe par rapport au sol. Situation de basses eaux (référence 1966). Ensemble du val.	119
Fig. 60 - Remontée du niveau de la nappe lors d'une crue centennale. Ensemble du val.....	120
Fig. 61 - Profondeur minimale de la nappe par rapport au sol. Situation d'une crue centennale de la Loire. Ensemble du val.....	121
Fig. 62 - Localisation des secteurs non vulnérables et très vulnérables dans l'ensemble du val.....	122
Fig. 63 - Profondeur de la nappe par rapport au sol. Situation de basses eaux (référence 1986). Zone urbanisée entre Loire et Loiret.....	123
Fig. 64 - Remontée du niveau de la nappe lors d'une crue centennale. Zone urbanisée entre Loire et Loiret.	124
Fig. 65 - Profondeur minimale de la nappe par rapport au sol. Situation d'une crue centennale de la Loire. Zone urbanisée entre Loire et Loiret.....	125
Fig. 66 - Localisation des secteurs non vulnérables et très vulnérables dans la zone urbanisée entre Loire et Loiret.....	126
Fig. 67 - Emplacement des coupes ouest-est et nord-sud.....	127
Fig. 68 - Coupe ouest-est. Situation du pas 10 du tableau 15, soit 1,5 jour après le pic de la crue centennale de la Loire.....	128

Fig. 69 - Coupe nord-sud. Situation du pas 10 du tableau 15, soit 1,5 jour après le pic de la crue centennale de la Loire.....	129
Fig. 70 - Variations du niveau de la nappe en quatre points entre Loire et Loiret et altitude de la ligne d'eau de la Loire lors d'une crue centennale.....	130
Fig. 71 - Localisation proposée des piézomètres de surveillance de la nappe.	134

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Les différentes formations géologiques rencontrées dans le val d'Orléans (stratigraphie et lithologie).....	21
Tabl. 2 - Volumes prélevés dans le val en fonction des usages (année 2000).	30
Tabl. 3 - Prélèvements pour l'AEP pris en compte dans le modèle.....	30
Tabl. 4 - Prélèvements industriels pris en compte dans le modèle.	31
Tabl. 5 - Prélèvements pour l'irrigation pris en compte dans le modèle.....	31
Tabl. 6 - Tableau chronologique des mesures piézométriques.	35
Tabl. 7 - Tableau des piézomètres.	36
Tabl. 8 - Tableau des amplitudes du niveau de la Loire et du niveau des nappes....	45
Tabl. 9 - Tableau des écarts des débits moyens mensuels (m ³ /s) entre Gien et Orléans.	57
Tabl. 10 - Tableau des écarts relatifs des débits moyens mensuels (%) entre Gien et Orléans.	58
Tabl. 11 - Bilan des flux en régime permanent.	91
Tabl. 12 - Piézomètres disponibles pour le calage.	92
Tabl. 13 - Discrétisation temporelle pour le calage en régime transitoire.....	93
Tabl. 14 - Bilan des flux en crue le 4 janvier 1969.....	100
Tabl. 15 - Discrétisation temporelle pour la simulation de la crue centennale.....	103
Tabl. 16 - Bilan des flux au maximum de la crue centennale.	108
Tabl. 17- Identification des secteurs très vulnérables aux remontées de nappe.....	114
Tabl. 18 - Identification des secteurs non vulnérables aux remontées de nappe.....	115
Tabl. 19 - Niveau de la Loire et des piézomètres lors de la crue centennale.....	117
Tabl. 20 - Programme de mesure et de surveillance proposé dans le val d'Orléans.	134

Liste des annexes

Ann. 1 - Profil en long de la Loire	137
Ann. 2 - Profil en long du Loiret	143
Ann. 3 - Profils en travers de la Loire	149
Ann. 4 - Les prélèvements dans le val de Loire.....	155
Ann. 5 - Profondeur de la nappe lors d'une crue centennale	163
Ann. 6 - Profil type d'un piézomètre dans le val d'Orléans	167

1. Introduction

Le val d'Orléans est en grande partie située en zone inondable du fait des possibilités de remontée des eaux de la Loire par le Loiret ou même de débordement du fleuve par-dessus les levées.

À ces inondations de surface, s'ajoutent les possibilités d'inondation du val par des remontées de la nappe, causées par les infiltrations de la Loire sous les levées et par le ralentissement des écoulements de la nappe en période de hautes eaux du fleuve.

On propose d'identifier et de caractériser les composantes du risque d'inondation par ces remontées de nappe dans le val d'Orléans, qui présente la particularité de comporter de nombreux passages karstiques dans le sous-sol.

Cette étude a été financée conjointement par l'agence de l'Eau Loire-Bretagne, dans le cadre d'un partenariat de l'agence de l'Eau avec l'État (DIREN) et l'EP Loire, et par le BRGM sur ses crédits de Service public. Elle comprend d'une part une approche globale des écoulements et des remontées de la nappe à l'échelle du val d'Orléans, d'autre part une approche centrée sur les conditions hydrauliques à proximité des zones urbanisées depuis l'île Charlemagne jusqu'au pont de l'autoroute A 71.

Un programme d'instrumentation est proposé pour mieux suivre et anticiper ce risque.

La zone étudiée et les communes du val d'Orléans concernées par cette étude sont présentées sur la figure 1.

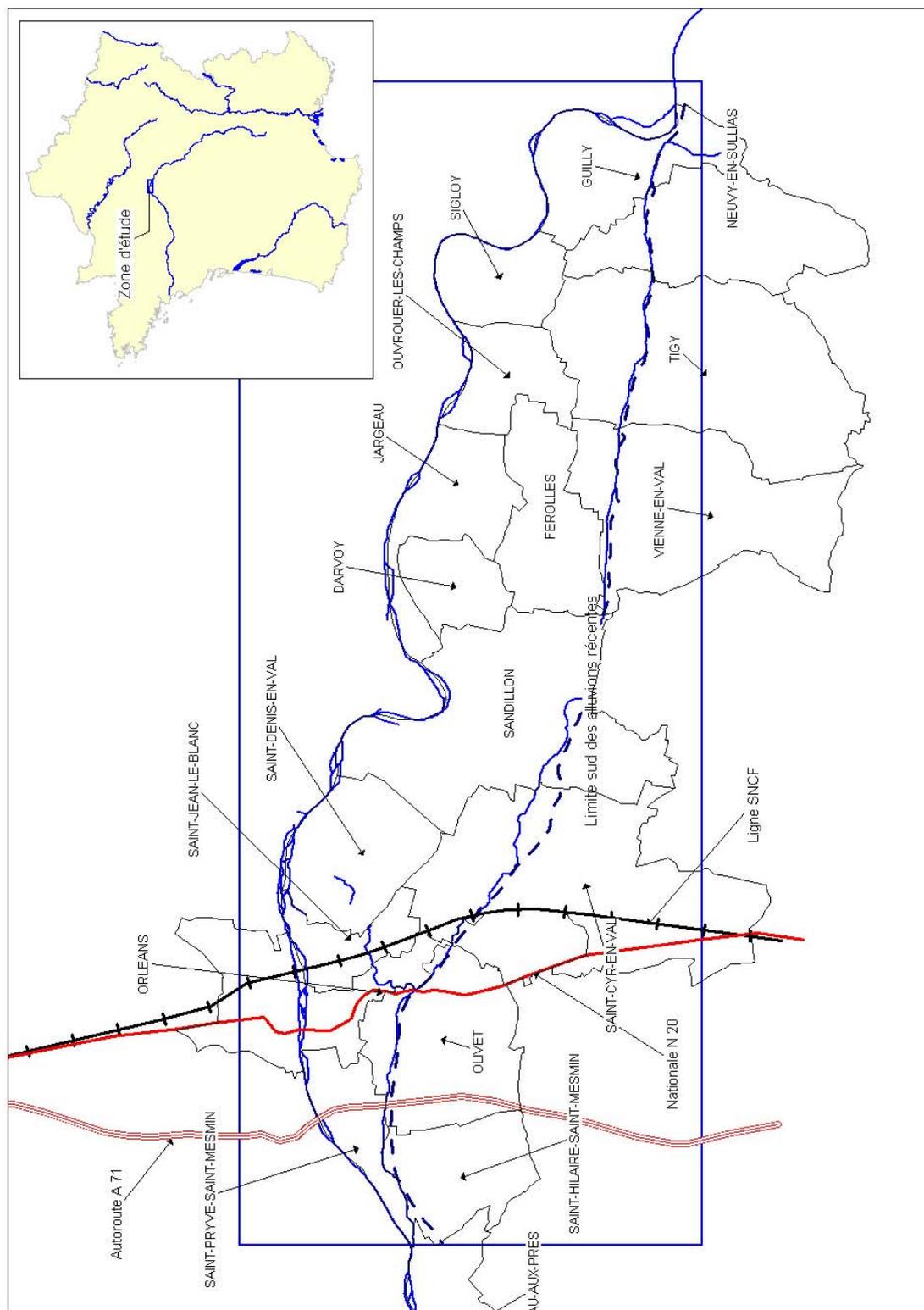


Fig. 1 - Les limites de l'étude et les communes du val d'Orléans.

2. Le contexte hydrogéologique du val d'Orléans

La Loire découvre, sur ses deux rives, des formations continentales, lacustres à la base, détritiques au sommet (Oligocène et Miocène). Une couverture d'alluvions, dépassant les limites du thalweg actuel, masque assez généralement les terrains en place. On présente dans le tableau 1 la liste des formations géologiques rencontrées dans le val d'Orléans (stratigraphie et lithologie). Celles-ci sont présentées ci-dessous depuis les formations les plus récentes aux plus anciennes.

Stratigraphie				Lithologie
Ère	Époque	Étage	Formation	
Quaternaire			Alluvions modernes (Fz)	Alluvions
			Alluvions récentes (Fy)	
			Alluvions anciennes (Fz)	
Tertiaire	Miocène	Burdigalien	Sables et argiles de Sologne	Sables et argiles
			Marnes de l'Orléanais	Argiles vertes
	Oligocène	Aquitainien	Calcaires de Beauce (Pithiviers – Étampes)	Calcaires
	Eocène			Argile à silex
Secondaire	Crétacé	Sénonien - Turonien - Cénomaniens		Craie

Tabl. 1 - Les différentes formations géologiques rencontrées dans le val d'Orléans (stratigraphie et lithologie).

2.1. LES ALLUVIONS (QUATERNAIRE)

Alluvions modernes (Fz) : dans le lit même de la Loire (lit mineur), les alluvions modernes sont représentées par des « sables » à éléments roulés (quartz, feldspath et éléments accessoires des roches cristallines) et des graviers (silex, granite, basalte et éléments calcaires). Dans le lit majeur, ce sont les limons de crues, sablonneux et micacés.

Alluvions récentes (Fy) : ces dépôts subsistent dans le lit majeur sous les limons de crues. Ils sont représentés également par des sables et des graviers, épais de 4 à 13 m. A l'aval d'une ligne Jargeau – Saint-Cyr-en-Val, ils reposent directement sur le calcaire de Beauce. A l'amont de cette ligne, ils reposent sur les marnes de l'Orléanais.

Alluvions anciennes (Fx) : elles constituent les terrasses qui recouvrent les sables de Sologne au-delà du thalweg. Elles sont constituées par des sables roux argileux micacés avec passages de graviers.

À l'exception de quelques zones d'extension limitée, l'épaisseur des alluvions dans le val d'Orléans ne dépasse pas 10 m.

2.2. LE BURDIGALIEN (MIOCÈNE)

Le Burdigalien correspond à des dépôts détritiques grossiers (coulées de boue venant du Massif central à la suite de l'orogénèse alpine), formés de sables et d'argiles. Il n'est connu, sous les alluvions du val, qu'en amont d'une ligne Jargeau – Saint-Cyr-en-Val.

Sables et argiles de Sologne : ces terrains, à dominante d'argiles et de sables argileux, n'affleurent qu'en dehors des limites du val. Ils constituent le sous-sol de la Sologne et de la forêt d'Orléans.

Marnes de l'Orléanais : ces terrains, qui constituent la base du Burdigalien, sont représentés par des argiles vertes, compactes, parfois graveleuses au pied et généralement accompagnées de marne blanche. Ils constituent un repère stratigraphique en forage (gamma ray). Absents à l'ouest d'une ligne Jargeau – Saint-Cyr-en-Val, leur épaisseur est variable, et augmente progressivement en direction de Tigy. Ils se sont mis en place après une phase d'érosion des terrains sous-jacents. Ils ont donc comblé les inégalités du relief et ils ont eux-mêmes subi l'action de l'érosion fluviale au Quaternaire.

2.3. LES CALCAIRES DE BEAUCE (OLIGOCÈNE)

Aquitaniens : l'Aquitaniens est l'étage du calcaire de Beauce, formation lacustre. Il est représenté, en alternance, par des calcaires durs, compacts, souvent siliceux (meulière) pouvant présenter une structure oolithique ou bréchique, par des marnes grises, brunes ou mastic, par des calcaires tendres spongieux.

Les calcaires de Beauce affleurent en bordure du val : à partir de Châteauneuf-sur-Loire en rive droite, et à partir du château de la Source en rive gauche.

Le calcaire de Beauce dans le val, comme en bordure de la Sologne ou en forêt d'Orléans, est caractérisé par un réseau karstique qui se manifeste au jour par des effondrements et des gouffres.

L'ensemble des calcaires de Beauce, dont l'épaisseur est d'environ 70 m, est constitué principalement des niveaux perméables des calcaires de Pithiviers sur sa partie supérieure, et des calcaires d'Étampes sur sa partie inférieure. Ces deux niveaux sont séparés des formations moins perméables de la molasse du Gâtinais.

2.4. LE SUBSTRATUM DES ARGILES À SILEX (ÉOCÈNE)

La formation lacustre des calcaires de Beauce repose sur des argiles graveleuses qui reposent elles-mêmes sur la craie altérée (argile à silex). Cet ensemble essentiellement imperméable, qui constitue le substratum de la nappe des calcaires du Tertiaire, a une épaisseur comprise entre 2 et 14 m.

2.5. LES FORMATIONS SOUS-JACENTES (CRÉTACÉ)

Ces formations géologiques reposent sur les terrains de secondaire du Crétacé : la craie du Sénonien, du Turonien et du Cénomanién.

L'agencement de ces niveaux géologiques est présenté sur une coupe en travers du val d'Orléans sensiblement sud-nord (fig. 2)) Cette coupe montre les échanges hydrauliques entre la Loire et le val par le réseau karstique des calcaires de Beauce).

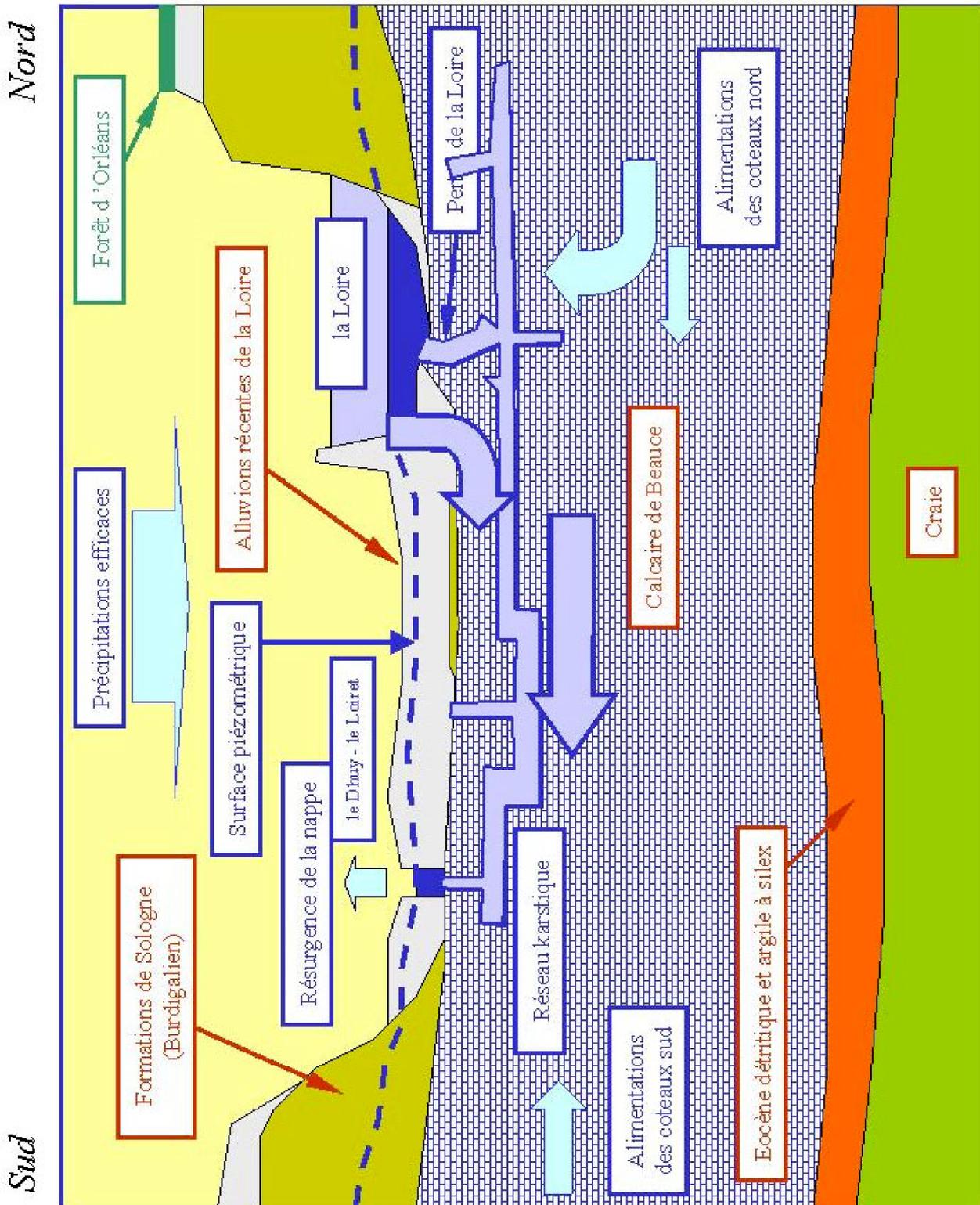


Fig. 2 - Coupe hydrogéologique sud-nord du val d'Orléans.

3. Les études antérieures et les données disponibles

3.1. LES ÉTUDES ANTÉRIEURES

Depuis 1964, de nombreuses études géologiques et hydrogéologiques ont été réalisées sur le val d'Orléans. Celles-ci avaient pour objectifs la connaissance de l'hydrogéologie du val et des écoulements souterrains dans un souci de maîtriser la ressource en eau souterraine destinée à l'alimentation en eau potable.

Les premières études, qui sont aussi les plus importantes, ont été réalisées presque de façon continue entre 1964 et 1976. C'est au cours de cette période, que l'essentiel des données de terrains a été acquis (carte piézométrique, enregistrements de chroniques piézométriques, essais de pompage, essais de coloration et de traçage). Ensuite, entre 1977 et 1989, il n'y a pas eu d'études particulières sur le val d'Orléans. Il faut attendre 1989 puis 1994 pour revoir de nouveau des investigations sur l'hydrogéologie du val. Ces dernières études n'apportent pas de données de terrain nouvelles, mais utilisent pour la première fois l'outil de la modélisation pour quantifier les écoulements souterrains en s'appuyant sur les données anciennes. Ces études ont été menées dans le but de mieux connaître et gérer la ressource en eau souterraine utilisée pour les besoins en eau potable, eau industriel et agricole du val.

On présente ci-dessous succinctement le contenu de chacune de ces études.

Les sources du Loiret – Livret-guide hydrogéologique – M. Caudron et M. Albinet – rapport BRGM DS.64.A86 – octobre 1964

Cette étude est la plus ancienne disponible sur les écoulements souterrains dans le val d'Orléans. Il y est fait un rappel historique des observations et des descriptions des sources du Loiret, en particulier la source du Bouillon, dont la naissance date de 1672. Dès 1865, on a démontré que cette source était alimentée par des pertes de la Loire entre Guilly et Orléans, dont les débits sont de l'ordre de 20 à 25 m³/s (M. Sainjon). Ce rapport présente une description géologique du Val et un profil détaillé au droit du puits du Gouffre jusqu'à 68 m de profondeur. On disposait à cette époque de peu de données sur les caractéristiques hydrodynamiques des niveaux aquifères.

Inventaire et étude hydrogéologique du val d'Orléans (Loiret) – N. Desprez – rapport BRGM DSGR.67.A21 – avril 1967

Cet inventaire a été commandé par la ville d'Orléans et du ministère de l'Équipement. Il a abouti au recensement de 1 271 points d'eau parmi lesquels 612 captages exploités. Deux campagnes de mesures piézométriques ont été réalisées, sur 712 puits ou forage. Elles ont permis de dresser deux cartes piézométriques, une en situation de hautes eaux et une en situation de basses eaux. Outre ces mesures piézométriques, il a été réalisé de nombreuses mesures du débit de la Loire avec des essais de coloration afin de caractériser les alimentations du val par les pertes de la Loire, et

d'estimer les vitesses d'écoulement dans la nappe. L'analyse des débits spécifiques des forages en production a fourni les premières estimations de la transmissivité des niveaux aquifères.

Étude hydrogéologique du val d'Orléans (Loiret) – Observations piézométriques - février 1968 à mars 1970 – M. Caudron et N. Desprez – rapport BRGM 70 SGN 101 BDP – mars 1970

Cette étude avait pour objectif la connaissance de l'hydrogéologie du val d'Orléans. Des mesures de niveaux piézométriques ont été réalisées sur six puits situés à proximité de la Loire entre Châteauneuf-sur-Loire et Sandillon sur une durée de deux ans (février 1968 - mars 1970). Ces données ont été comparées à des mesures des niveaux de la Loire. Ces enregistrements ont permis d'étudier les relations entre les fluctuations des niveaux de la Loire et celles de la nappe, et de calculer la diffusivité des aquifères. Ces données seront reprises et décrites dans ce rapport.

Formations aquifères en relation avec la Loire de Nevers à Nantes – Rassemblement des données existantes – H. Talbo – rapport BRGM 70 SGN 294 HYD – octobre 1970

Cette étude contient une description hydrogéologique du val d'Orléans à partir de nombreuses données de débit spécifique, de transmissivité. Elle présente de nombreux calculs de la diffusivité des aquifères.

Expérience de coloration dans le val d'Orléans – M. Albinet et G. Brossier – Rapport BRGM 73 SGN 095 AME – mars 1973

Cette opération a été menée dans le cadre des études relatives à la pollution des aquifères. Un essai de coloration a été réalisé entre un gouffre de la Loire, sur la commune de Jargeau, et la source du Bouillon. Les résultats ont permis de confirmer ceux obtenus par M. Marboutin, 70 ans auparavant, de préciser les relations entre la Loire et le système nappe alluviale – Loiret, ainsi que les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine.

Val d'Orléans à l'Est d'Orléans (Loiret) – Étude hydrogéologique – N. Desprez – rapport BRGM 76 SGN 109 BDP – mars 1976

Cette étude a été réalisée dans le cadre des travaux d'aménagement du val d'Orléans (taxe parafiscale). Les études précédentes sont complétées par de nouvelles données de terrain (sondages nouveaux, essais de pompage). Un suivi de huit piézomètres a permis d'estimer les hauteurs dénoyées pour une crue de la Loire de type décennal.

Diversification de l'alimentation en eau potable de l'agglomération orléanaise – Projet de trois forages au calcaire d'Étampes à Saint-Cyr-en-Val (45) – Actualisation et exploitation du modèle de simulation – Ch. Filippi – Rapport BRGM 89 SGN 108 CEN – février 1989

L'objectif de cette étude était de quantifier, à l'aide d'un modèle hydrodynamique, l'alimentation et l'impact de pompes nouveaux destinés à l'alimentation en eau potable de l'agglomération orléanaise. Il s'agit de forages réalisés au sud du val d'Orléans, captant les calcaires de Beauce sous les formations imperméables des sables et argiles de Sologne. Les résultats de cette modélisation sont intéressants pour la connaissance des écoulements dans le val d'Orléans dans la mesure où ils fournissent des informations sur les conditions hydrauliques en limite sud du val (débits souterrains et niveaux piézométriques).

Captages d'alimentation en eau potable du val – Étude de modélisation hydrodynamique et hydrodispersive du système aquifère – D. Rousselot, N. Sinan – Ville d'Orléans, Lyonnaise des Eaux – Dumez – C158621066 – Rapport BRGM N 1733 – septembre 1994

Outre l'étude présentée dans ce rapport, cette étude est la plus récente réalisée sur les écoulements souterrains du val d'Orléans. Elle concerne la zone du val comprise entre Jargeau et la source du Bouillon. Cette étude avait pour objectif la mise en conformité avec la législation de la protection des prélèvements en nappe et destinés à la consommation humaine. Pour cela, un modèle hydrodynamique et un modèle hydrodispersif ont été mis en œuvre sur la zone étudiée. Cette étude s'appuie principalement sur les données présentées dans les travaux antérieurs (description géologique, campagne piézométrique d'octobre 1966, pompes d'essai). Afin de vérifier les données de la campagne piézométrique de 1966, des mesures complémentaires ont été faites sur 42 points en octobre 1992. Pour ces points, la différence moyenne entre les deux campagnes est voisine de 5 cm. Ce qui a permis de valider les relevés piézométriques de 1966 pour le calage de la piézométrie. Les résultats de cette modélisation (distribution du champ de perméabilité, identification des chenaux karstiques bilan des flux), faite sur trois couches avec des mailles régulières de 250 m de côté, ont été utiles pour la mise au point du modèle de l'ensemble du val.

Lit majeur de la Loire de Nevers à Angers – Réalisation d'une base de données forages – D. Giot – Rapport BRGM R40497 – février et juin 1999.

À l'initiative de l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, en partenariat avec le BRGM, une base de données a été mise au point à partir des sondages réalisés dans les alluvions du lit majeur de la Loire. Un traitement cartographique a permis une restitution de l'épaisseur des alluvions et de la morphologie du toit du substrat. Les résultats de cette étude ont servi à préciser la géométrie du modèle hydrodynamique du val d'Orléans.

3.2. LES DONNÉES DISPONIBLES

On dispose de très nombreuses informations tant sur les données hydrogéologiques que sur les données de débits des cours d'eau et des volumes prélevés en nappe. L'origine de ces données est présentée ci-après.

3.2.1. Données hydrogéologiques

Les données hydrogéologiques (géologie, géométrie des formations, transmissivité et coefficient d'emmagasinement des aquifères, carte piézométrique, chroniques piézométriques) sont issues des études et rapports cités dans le paragraphe précédent.

Le calage du modèle hydrodynamique des écoulements (chap. 6) sera fait sur la carte piézométrique de 1966 pour le régime permanent et sur les chroniques piézométriques réalisées entre 1966 et 1975 pour le régime transitoire.

Concernant les mesures piézométriques récentes, on signalera l'existence d'un piézomètre sur la commune de Saint-Cyr-en-Val. Ce piézomètre capte la nappe des calcaires de Beauce sous les formations imperméables de Sologne. Il n'est pas représentatif de la situation hydrogéologique du val, et est peu en relation avec les variations de niveau de la Loire (fig. 3).

3.2.2. Les données des cours d'eau

a) Les débits des cours d'eau

On dispose des données du débit de la Loire depuis 1964 sur les stations de Gien et d'Orléans. On présente au chapitre 5 une étude des variations du débit de la Loire entre ces deux stations qui permet d'évaluer les pertes du fleuve qui représentent une source d'alimentation pour les aquifères du val d'Orléans.

Les débits du Dhuy sont mesurés depuis 1965 à la station de Saint-Cyr-en-Val, située immédiatement en amont de la confluence du Dhuy et du Loiret. Les débits du Dhuy correspondent principalement au ruissellement des eaux de pluie tombées dans le val ou sur les coteaux qui dominent le val. On dispose de quelques mesures de débits du Loiret au pont Saint-Nicolas sur la période 1985-1991. Ces données sont présentées sur le graphique de la figure 3. Outre ces données, il existe quelques mesures du débit du Loiret sur la période 1965-1986, au pont Saint-Nicolas et au pont du Bouchet.

b) Les profils en long du Loiret et de la Loire

Pour la Loire, on dispose du profil en long de la ligne d'eau du fleuve en étiage, mesurée par la DIREN de bassin. On dispose également de la ligne d'eau de la Loire pour une crue centennale, calculée par le modèle HYDRATEC. Ces données sont introduites dans le modèle hydrodynamique (ann. 1).

Pour le Loiret, on dispose d'un profil long en période d'étiage et de crue centennale de la Loire (ann. 2).

c) Les profils en travers de la Loire

Entre Bouteille et la pointe de Courpin, on dispose de 44 profils en travers de la Loire qui ont été utilisées pour la définition des mailles du modèle au droit de la Loire.

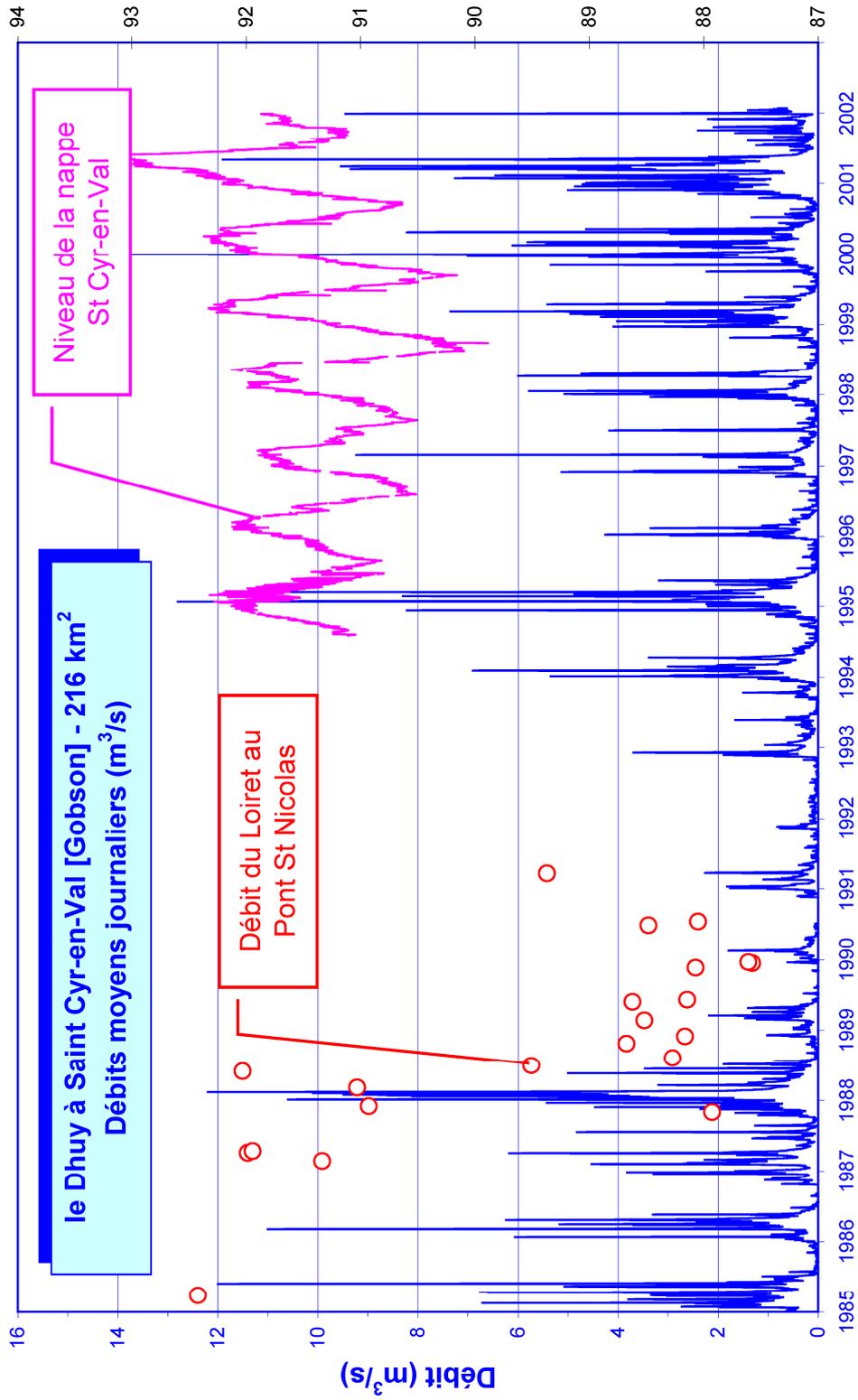


Fig. 3 - Débit du Dhuy à Saint-Cyr-en-Val et du Loiret au pont Saint-Nicolas. Piézomètre de Saint-Cyr-en-Val.

On présente en annexe 3 l'emplacement des profils en travers connus et en exemple les profils n° 102, 97 et 89.

3.2.3. Les prélèvements en nappe

Les prélèvements en nappe ont été communiqués par l'agence de l'eau Loire-Bretagne. On présente en annexe 4 les résultats du dépouillement des données des communes du val d'Orléans pour la période 1996-2000, avec la répartition par usage (AEP, industrie, et irrigation).

On indique ci-dessous (tabl. 2) les volumes prélevés en nappe en fonction de l'usage et la part des prélèvements qui est faite dans le val.

	Communes du val (Mm ³)	Prélèvements dans le val (Mm ³)
AEP	12,9	10,9
Industrie	3,6	2
Irrigation	7	7

Tabl. 2 - Volumes prélevés dans le val en fonction des usages (année 2000).

On indique dans les tableaux 3, 4 et 5 les prélèvements pris en compte dans le modèle hydrodynamique.

PRELEVEMENTS AEP 2000							
INDICE	X_L2E	Y_L2E	Z_SOL	COMMUNE	LIEU_DIT	PROF_TX	VOLUME (m3/an)
03984X0003	582220	2317800	105.00	DARVOY	BOURG LA PLACE	78.20	90 600
03984X0004	583970	2315170	102.00	FEROLLES	CLOS DES GRASINS	59.00	0
03992X0201	593970	2311260	109.00	GUILLY	LES PLACES - AEP	80.00	169 900
03984X0007	584110	2318100	103.00	JARGEAU	CHATEAU D'EAU AEP	69.55	336 500
03982X0009	570150	2317290	93.53	SAINT-CYR-EN-VAL	PUITS DU BOUCHET S / P3	25.00	2 503 000
03982X0006	569900	2317840	94.23	SAINT-CYR-EN-VAL	PUITS THEURIET	17.00	4 079 600
03982X0007	569550	2317300	93.68	OLIVET	PUITS DU GOUFFRE	26.14	3 252 500
03983X0004	577720	2315800	98.00	SANDILLON	LES CAILLOUX	83.00	254 700
03991X0009	590270	2315320	106.20	SIGLOY	LA JONCHERE AEP	82.00	97 400
03991X0008	586660	2316450	111.49	TIGY	CHEMIN SABLE - CHATEAU D'EAU AEP	81.10	118 300
				TOTAL			10 902 500

Tabl. 3 - Prélèvements pour l'AEP pris en compte dans le modèle.

PRELEVEMENTS INDUSTRIELS 2000						
Indice BBS	X	Y	Commune	nom du point	Profondeur des travaux	Volume (m3/an)
03984X0008	584 850	2 317 900	Jargeau	puits	21.97	17 000
03982X9901	567 900	2 319 600	Olivet	archette		8 100
03982X0309	569 030	2 318 950	Orléans	les montées no1 et no2	34	796800
03982X0018	570 650	2 319 540	St-jean-le-blanc	puits	30	13 400
03981X0081	563 500	2 319 540	St-pryvé-st-mesmin	puits	5.2	400
03984X9906	580 515	2 314 768	Sandillon	sandillon PC1 et PC2		1 184 400
TOTAL						2 020 100

Tabl. 4 - Prélèvements industriels pris en compte dans le modèle.

PRELEVEMENTS POUR L'IRRIGATION en 2000						
Commune	Irrigation (m3/an)	Superficie commune dans le Val (km2)	Superficie bâtie (km2)	Superficie effective irriguée Val (km2)	Débit (m3/mois/km2)	Débit (m3/mois/maille)
DARVOY	279 400	8.55	0	8.55	8 170	511
FEROLLES	560 100	17.06	0	17.06	8 208	513
GUILLY	356 400	12.67	0	12.67	7 032	440
JARGEAU	224 700	14.67	1.12	13.55	4 146	259
NEUVY-EN-SULLIAS	151 500	4.11	0	4.11	9 215	576
OLIVET	40 600	3.49	1.75	1.74	5 833	365
ORLEANS (rive gauche)	49 800	7.72		1.58	7 880	492
OUVROUER-LES-CHAMPS	439 500	10.48	0	10.48	10 484	655
SAINT-CYR-EN-VAL	1 236 600	11.05	0	11.05	27 977	1 749
SAINT-DENIS-EN-VAL	667 400	17.3		14.36	11 619	726
SAINT-HILAIRE-SAINT-MESMIN	191 700	0	0	0	0	
SAINT-JEAN-LE-BLANC	87 200	7.62		3.39	6 431	402
SAINT-PRYVE-SAINT-MESMIN	132 500	5.19	0	5.19	6 382	399
SANDILLON	905 000	33.11	1.34	31.77	7 121	445
SIGLOY	423 800	10.59	0.23	10.36	10 227	639
TIGY	683 400	12.18	0	12.18	14 027	877
VIENNE-EN-VAL	548 000	4.58	0	4.58	29 913	1 870
Total m³	6 977 600	180		163		

Tabl. 5 - Prélèvements pour l'irrigation pris en compte dans le modèle.

4. Études des niveaux piézométriques des nappes du val d'Orléans – Corrélations avec les niveaux de la Loire et du Loiret sur la période 1966 à 1975

4.1. COMPARAISON DU NIVEAU DE LA LOIRE ET DU NIVEAU DES NAPPES DU VAL D'ORLÉANS (NAPPE DES ALLUVIONS ET NAPPE DES CALCAIRES DE BEAUCE)

Le dépouillement des archives a permis de retrouver trois études hydrogéologiques du val d'Orléans qui portent sur l'évolution des niveaux de la nappe des alluvions et de la nappe des calcaires de Beauce, en fonction des fluctuations du régime de la Loire et du Loiret :

- inventaire et étude hydrogéologique du val d'Orléans – 1966 – (DSGR.67.A21²),
- étude hydrogéologique du val d'Orléans – 1968 à 1970 – (70 SGN 101 BDP),
- étude hydrogéologique, val d'Orléans à l'est d'Orléans – 1973 à 1975 – (76 SGN 109 BDP).

Les variations de la surface piézométrique et de la ligne d'eau de la Loire ont été suivies dans trois secteurs, au cours de trois périodes différentes (fig. 4). Le tableau 6 regroupe les périodes et les points de mesure suivis au cours de ces trois études. Le tableau 7 regroupe les données relatives aux piézomètres.

Etude n° 1 (période 1966)

La première étude, réalisée entre septembre et décembre 1966, concerne le secteur situé en aval du val, entre Saint-Cyr-en-Val et Orléans (zone n° 1). Pendant cette période, ont été mesurés :

- le niveau de la Loire au pont Georges V,
- le niveau du Loiret au pont du Bouchet,
- le niveau de la nappe dans deux piézomètres de Saint-Cyr-en-Val :
- puits Theuriet (03982X0006) et puits du Bouchet (03982X0009).

Les niveaux géologiques captés par les deux forages sont ceux des calcaires de Beauce.

Les variations du niveau du Loiret et de la nappe sont corrélées (fig. 5). Les enregistrements montrent qu'en étiage ou en crue, la nappe se trouve à une cote supérieure à celle du Loiret, ce qui correspond à un drainage de la nappe par le Loiret.

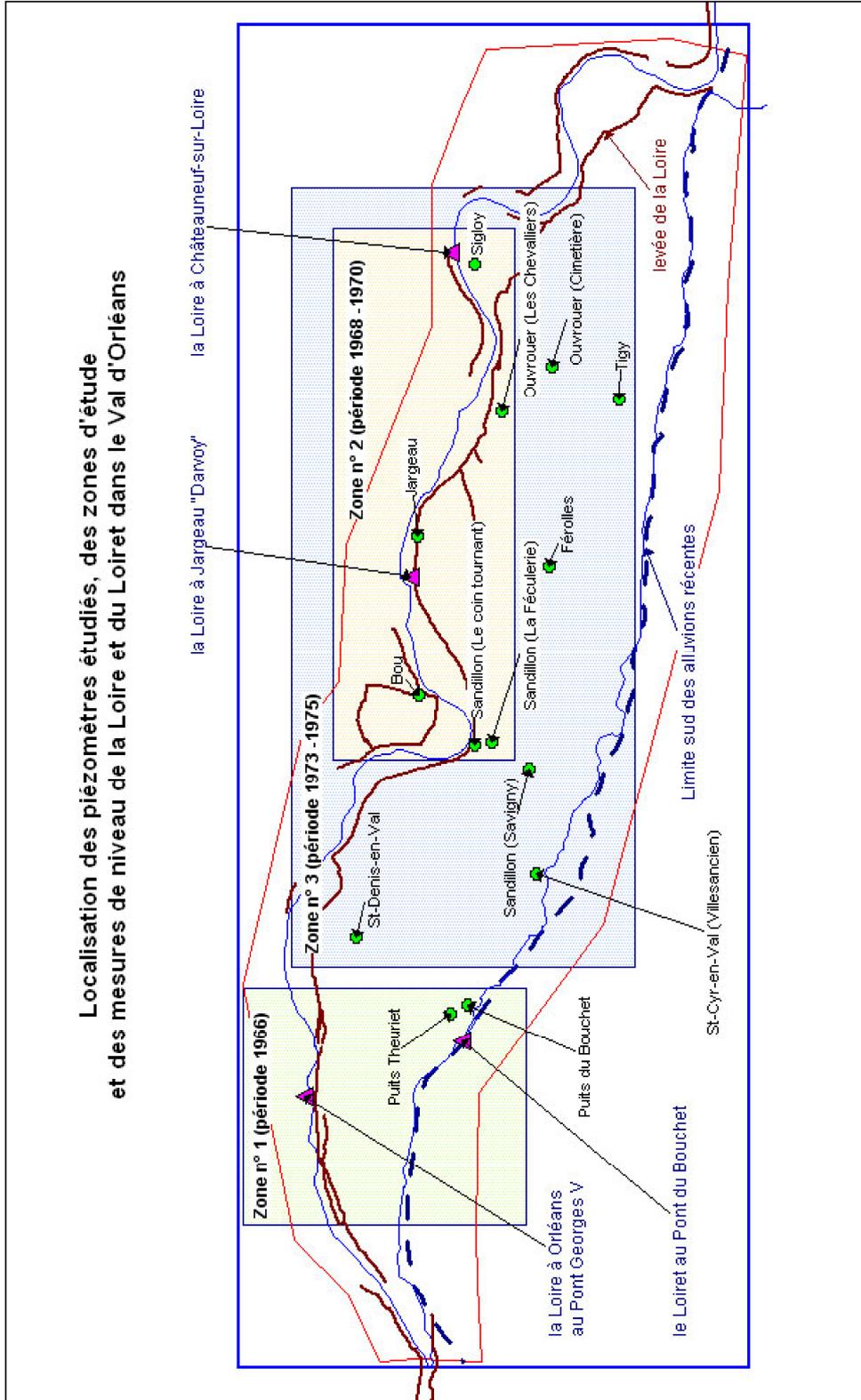


Fig. 4 - Localisation des piézomètres étudiés, des zones d'étude et des mesures de niveau de la Loire et du Loiret dans le val d'Orléans.

ANNEE		1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
ETUDE	n° 1 - (DSGR.67.A21 ²)													
	n° 2 - (70 SGN 101 BDP)													
	n° 3 - (76 SGN 109 BDP)													
la Loire	S1 (Châteauneuf)													
	S2 (Jargeau)													
	S3 (GeorgesV)													
	S4													
POINTS DE MESURE	03636X0284													
	03982X0006													
	03982X0009													
	03983X0083													
	03983X0101													
	03983X0145													
	03983X0156													
	03983X0157													
	03984X0167													
	03984X0224													
03991X0004														
03991X0039														
03991X0192														
03991X0194														

Tabl. 6 - Tableau chronologique des mesures piézométriques.

INDICE	COMMUNE	LIEU_DIT	PROFONDEUR DES TRAVAUX (m/sol)	NIVEAU DU SOL (m NGF)	NIVEAUX GEOLOGIQUES CAPTES
03636X0284	SAINT-DENIS-EN-VAL	410 RUE DES PRES	8,55	96,15	Calcaires
03982X0006	SAINT-CYR-EN-VAL	PUITS THEURIET	17,00	94,23	Calcaires
03982X0009	SAINT-CYR-EN-VAL	PUITS DU BOUCHET	25,00	93,53	Calcaires
03983X0083	SAINT-CYR-EN-VAL	VILLESANCIEN	7,30	98,00	Alluvions
03983X0101	SANDILLON	SAVIGNY	9,10	98,00	Calcaires
03983X0145	BOU	CLOS MASSIAS	8,90	100,15	Alluvions
03983X0156	SANDILLON	LE COIN TOURNANT	6,50	97,00	Alluvions
03983X0157	SANDILLON	LA FECULERIE	34,50	100,00	Calcaires
03984X0167	FEROLLES	LES CLOSERIES	8,00	101,58	Alluvions
03984X0224	JARGEAU	LA SAUSSAIE	8,50	103,00	Alluvions et Calcaires
03991X0004	OUVROUER-LES-CHAMPS	CIMETIERE	8,50	105,37	Calcaires
03991X0039	TIGY	VILLAME	20,00	104,53	Calcaires
03991X0192	SIGLOY	LE BY 1	5,40	107,00	Alluvions
03991X0194	OUVROUER-LES-CHAMPS	LES CHEVALLIERS	8,20	105,00	Alluvions et Calcaires

Tabl. 7 – Tableau des piézomètres.

La cote de la Loire se situe environ à un mètre en dessous du niveau de la nappe en étiage. En période de crue les niveaux s'équilibrent et peuvent même s'inverser. En étiage, la Loire draine donc la nappe, mais en période de crue de la Loire, les sens d'écoulements sont inversés.

La crue de 1966 est une crue moyenne où le débit s'élève à 1 140 m³/s (fig. 13). La nappe réagit assez rapidement à la crue mais son amplitude reste inférieure à 1m, alors que celle de la Loire atteint environ 2.50 m. Il y a une remontée différenciée des niveaux d'eau entre la Loire et la nappe.

Etude n° 2 (période 1968 - 1970)

La deuxième étude, qui s'est déroulée de février 1968 à mars 1970, porte sur la zone située en bordure de la Loire (moins de 1 km) entre Châteauneuf-sur-Loire et Sandillon (zone n° 2).

La Loire est suivie en deux points, à Châteauneuf-sur-Loire et à Jargeau « Darvoy », alors que les points de mesure des nappes sont assez dispersés le long du fleuve :

- piézomètre de Sigloy (03991X0192), situé près de la station de Châteauneuf-sur-Loire,
- piézomètre d'Ouvrouer – Les Chevalleries (03991X0194),
- piézomètre de Jargeau (03984X0224), situé près de la station de Jargeau,
- piézomètre de Sandillon – Le coin tournant (03983X0156),
- forage de Sandillon – La Féculerie (03983X0157).

Remarque

La comparaison des niveaux piézométriques de la nappe avec les niveaux de la Loire doit être faite en tenant compte de ce que les mesures des niveaux de la Loire peuvent être éloignées de celles faites sur les piézomètre (exemple : le piézomètre de Sandillon est situé environ 5 km en amont de la station de mesure à Jargeau – fig. 8).

Comme l'indique la carte piézométrique de 1966, le piézomètre de Sigloy, qui atteint les alluvions à 5,4 m/sol, est situé dans un secteur où le niveau de la nappe est au-dessus de la ligne d'eau de la Loire en étiage (fig. 6). Cette formation alluviale se trouve isolée du réservoir de Beauce par les assises basales marneuses ou argileuses du Burdigalien. De ce fait, dans ce secteur les alluvions constituent une nappe perchée en étiage.

En période de crue, le niveau de la Loire dépasse le niveau de la nappe alluviale. Lors des crues importantes, comme celui du 30 décembre 1968 où le débit de la Loire atteint 2 810 m³/s, le piézomètre réagit rapidement avec la même amplitude que la Loire. Cela provient du fait que ce piézomètre est situé dans une boucle de la Loire où la nappe est fortement influencée par les infiltrations du fleuve. Cependant, pour les autres pointes de crue la nappe ne présente quasiment pas de réaction. Il semblerait qu'elle évolue de façon assez indépendante, en réagissant plutôt aux précipitations.

Sur les piézomètres d'Ouvrouer, de Jargeau et de Sandillon, la Loire est située au-dessus de la nappe alluviale (fig. 7 et 8). Elle alimente la nappe en imposant son régime. En effet, les diagrammes montrent une bonne corrélation entre la piézométrie de la nappe et la ligne d'eau de la Loire.

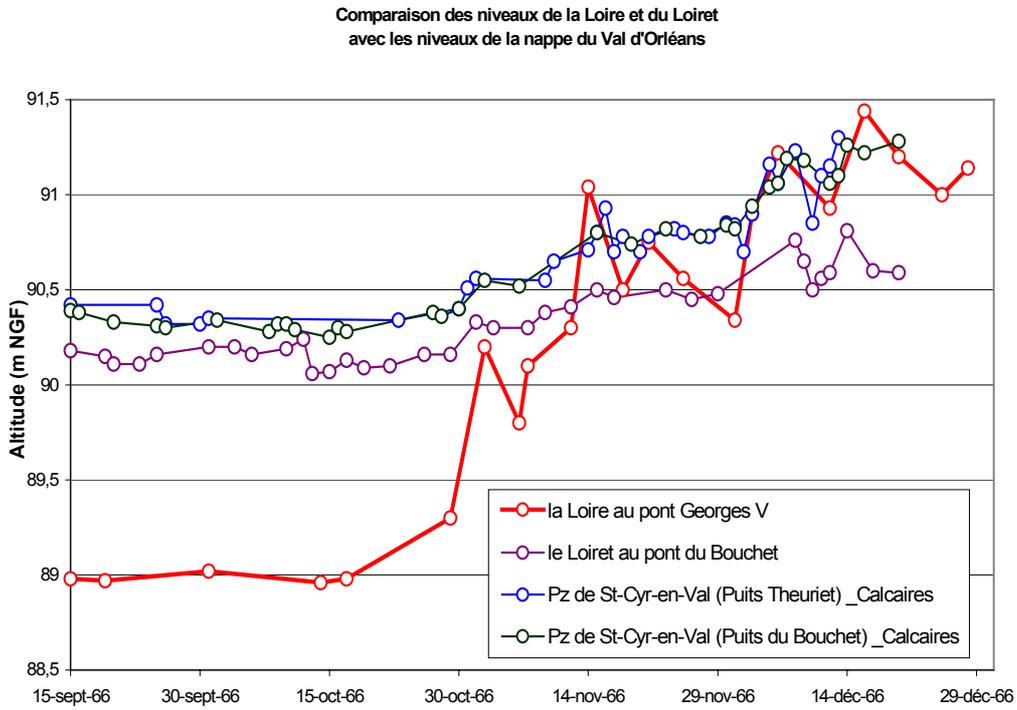


Fig. 5 - Chronique piézométrique. Puits Theuriet, puits du Bouchet.

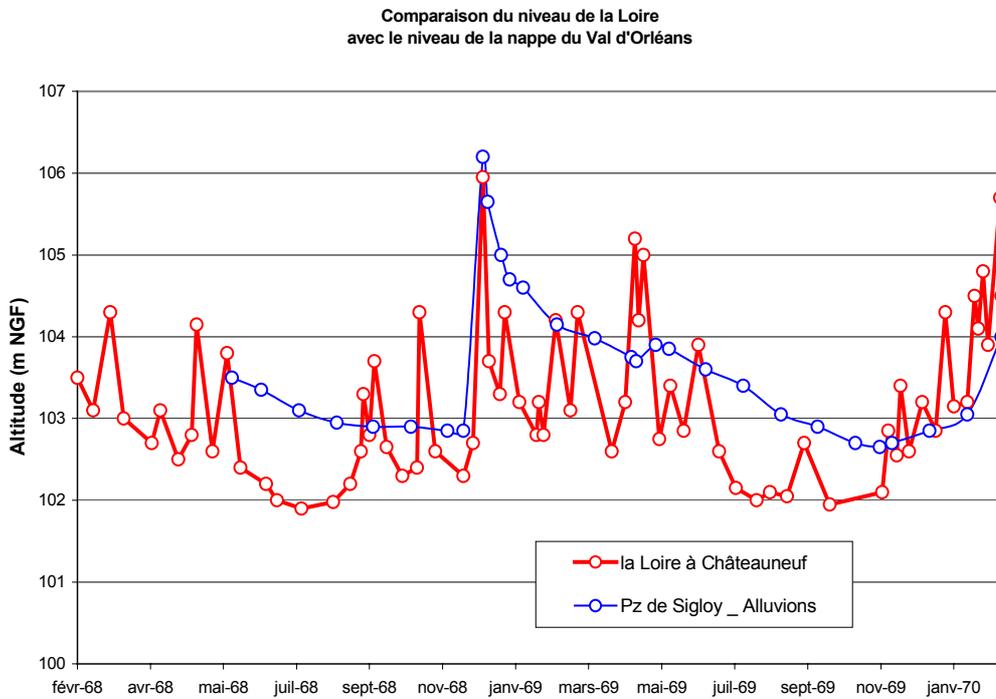


Fig. 6 - Chronique piézométrique. Sigloy.

Caractérisation du risque d'inondation sur le val d'Orléans

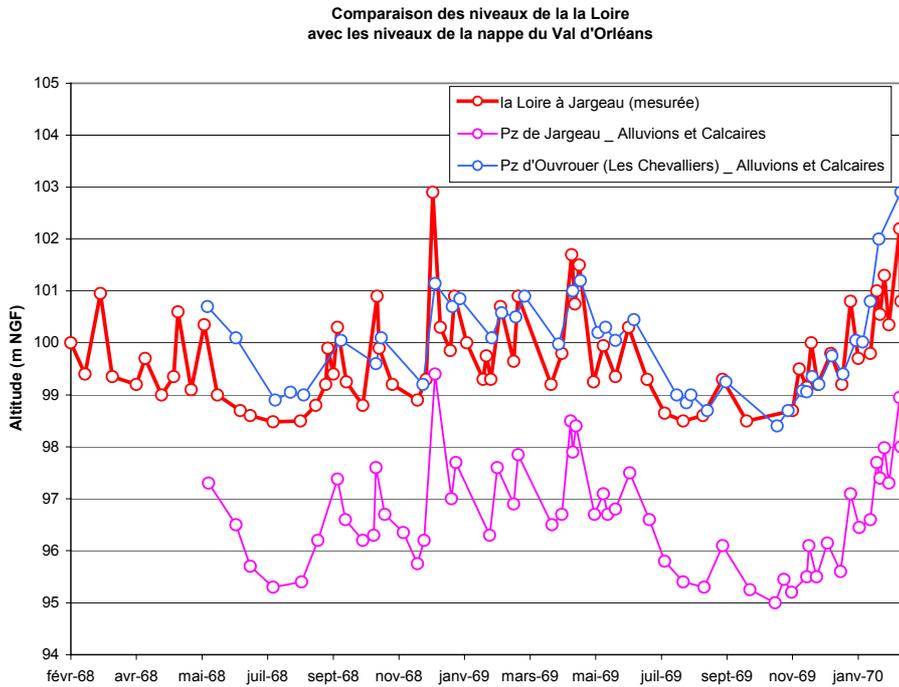


Fig. 7 - Chronique piézométrique. Jargeau, Ouvrouer (Les Chevalliers).

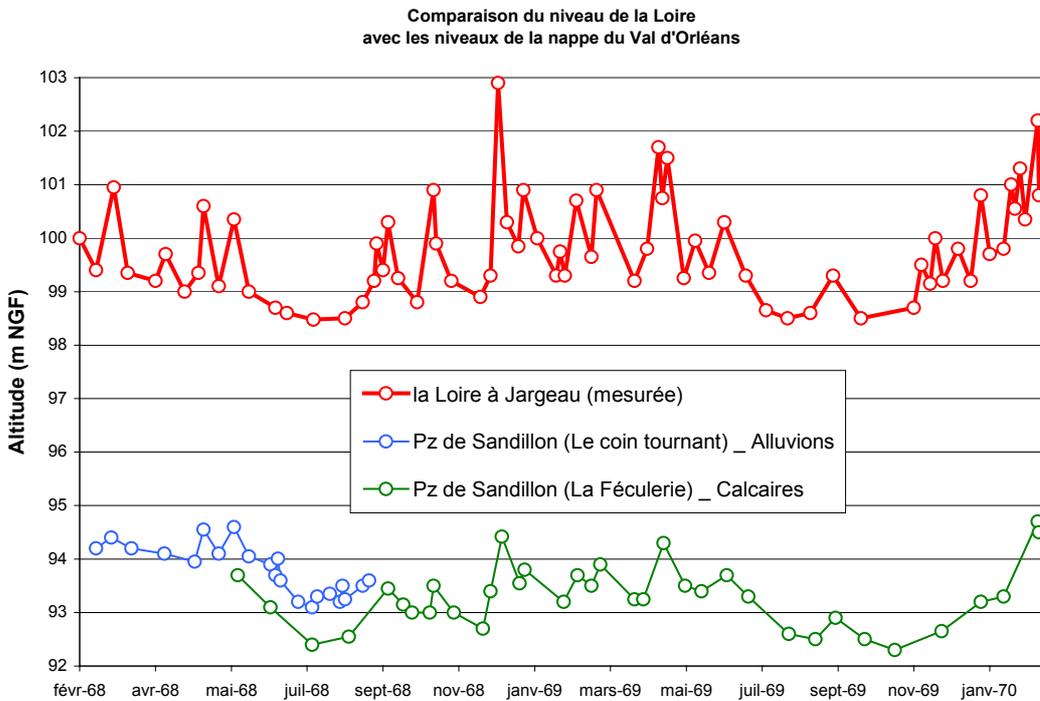


Fig. 8 - Chronique piézométrique. Sandillon (Le coin tournant et La Féculerie).

A Jargeau les différences de cotes entre la Loire et la surface piézométrique sont comprises entre 3 et 3,5 m. Les amplitudes de crues sont quasi identiques. La nappe réagit très rapidement aux variations de la Loire. A Ouvrouer, les variations piézométriques sont également synchrones avec la Loire, par contre, elles sont plus amorties. En effet, le piézomètre de Jargeau étant beaucoup plus près de la rivière, les fluctuations de la ligne d'eau sont fortement ressenties.

A Sandillon, la Loire alimente les deux nappes, et les alluvions alimentent à leur tour les calcaires. Les variations piézométriques sont plus atténuées et quelquefois légèrement déphasées. Globalement, les niveaux de la nappe suivent les variations de la Loire aussi bien en montée qu'en descente. La décharge des nappes est donc aussi rapide que la recharge.

Etude n° 3 (période 1973 - 1975)

La dernière étude, effectuée entre janvier 1973 et décembre 1975, s'étend pratiquement sur tout le val, de Saint-Jean-le-Blanc à Châteauneuf-sur-Loire (zone n° 3).

Huit piézomètres bien dispersés et deux stations de la Loire (Jargeau et Châteauneuf-sur-Loire) ont été suivis pendant cette période :

- les deux piézomètres d'Ouvrouer – Cimetièrre (03991X0004), Les Chevalliers (03991X0194) et celui de Tigy (03991X0039) sont comparés à la Loire mesurée à Châteauneuf-sur-Loire,
 - les puits de Sandillon – Savigny (03983X0101), La Féculerie (03983X0157) et le piézomètre de Férolles (03984X0167) sont comparés à la Loire mesurée à Jargeau,
- le piézomètre de Saint-Denis-en-Val (03636X0284) et celui de Saint-Cyr-en-Val – Villesancien (03983X0083) sont comparés à la Loire mesurée à Jargeau.

Entre Ouvrouer et Jargeau, les deux nappes (alluvions et calcaires) sont alimentées par la Loire. Le piézomètre d'Ouvrouer Les Chevalliers, situé au niveau de la limite des alluvions et des calcaires, montre l'influence du fleuve sur ces deux nappes : les variations enregistrées par le piézomètre et celles de la Loire sont bien corrélées (fig. 9). De plus, en étant situé assez près de la rivière, les réactions y sont plus fortes et plus rapides.

Les piézomètres d'Ouvrouer cimetièrre et celui de Tigy, qui captent la nappe des calcaires, montrent que plus on s'éloigne de la rivière plus les variations piézométriques s'amortissent, car l'influence de la Loire diminue. Ils indiquent également l'existence d'un gradient dans la nappe des calcaires, d'amont en aval. En effet, la cote de la nappe à Tigy est inférieure à celle d'Ouvrouer cimetièrre.

Le décalage qui existe entre les pics de la nappe et les pics de la Loire peut provenir du fait que la Loire mesurée à Châteauneuf-sur-Loire est éloignée des piézomètres.

La Loire continue à alimenter la nappe des alluvions à Férolles et la nappe des Calcaires à Sandillon (fig. 10). Le piézomètre de Férolles montre que le niveau de la nappe alluviale se trouve au-dessus des calcaires, mais il faut les comparer avec prudence car Férolles se situe plus en amont par rapport à Sandillon.

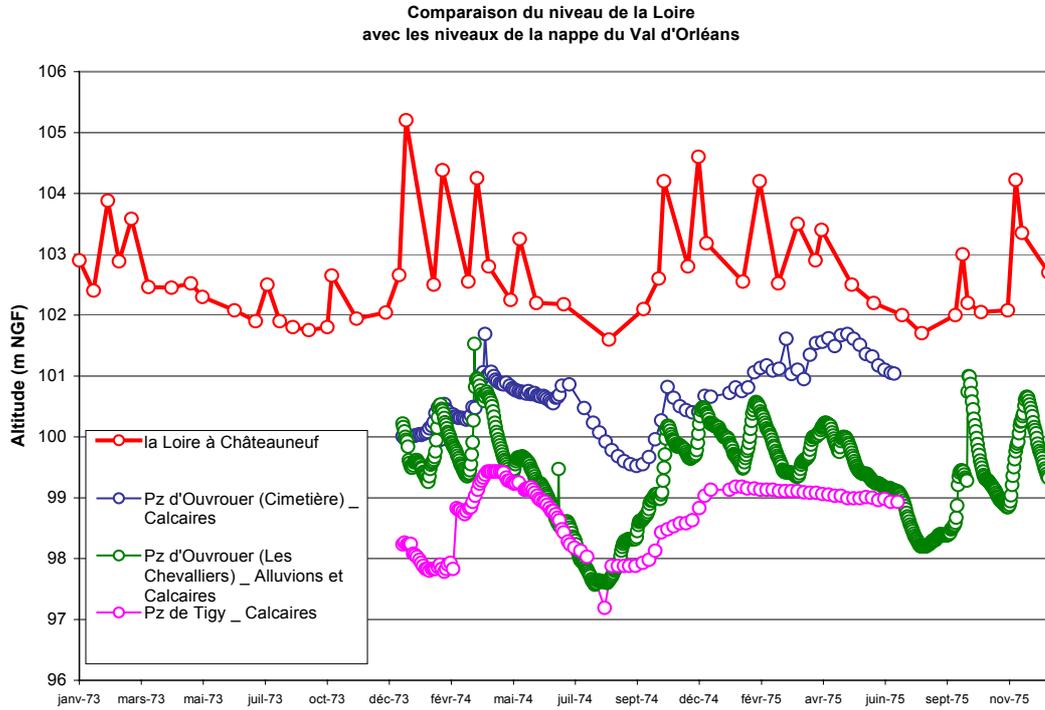


Fig. 9 - Chronique piézométrique. Ouvrouer (Cimetière et Les Chevalliers), Tigy.

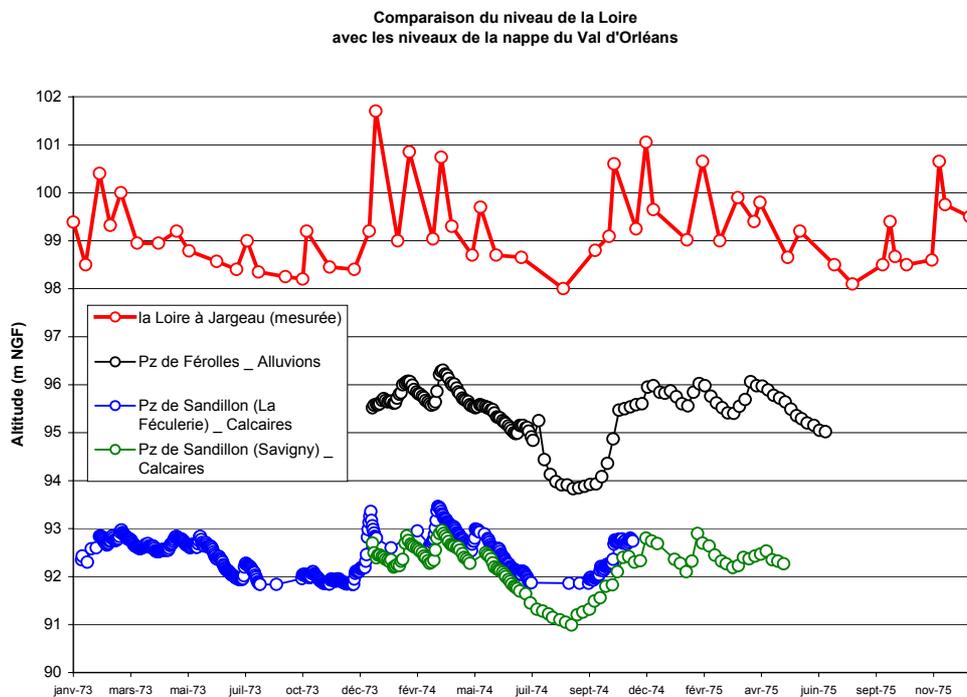


Fig. 10 - Chronique piézométrique. Férolles, Sandillon (La Féculerie et Savigny).

Les variations piézométriques dans les alluvions sont fortement atténuées et les pics sont quelque peu décalés à cause de la distance importante entre Férailles et la Loire. La nappe des calcaires semble réagir plus rapidement aux variations du niveau de la Loire. Il existe, donc une influence directe de la Loire sur cette nappe.

Plus en aval, à Saint-Cyr-en-Val, l'influence de la Loire sur la nappe des alluvions devient de plus en plus faible à cause de la distance au fleuve. Mais la nappe des alluvions se situe au dessus de la nappe des calcaires, enregistrée à Saint-Denis-en-Val. Mesuré à proximité de la Loire, le niveau des calcaires réagit assez rapidement aux fluctuations de la Loire. L'amplitude moyenne varie de 2 m pour la nappe, quand celle de la Loire varie de 3,5 m (fig. 11).

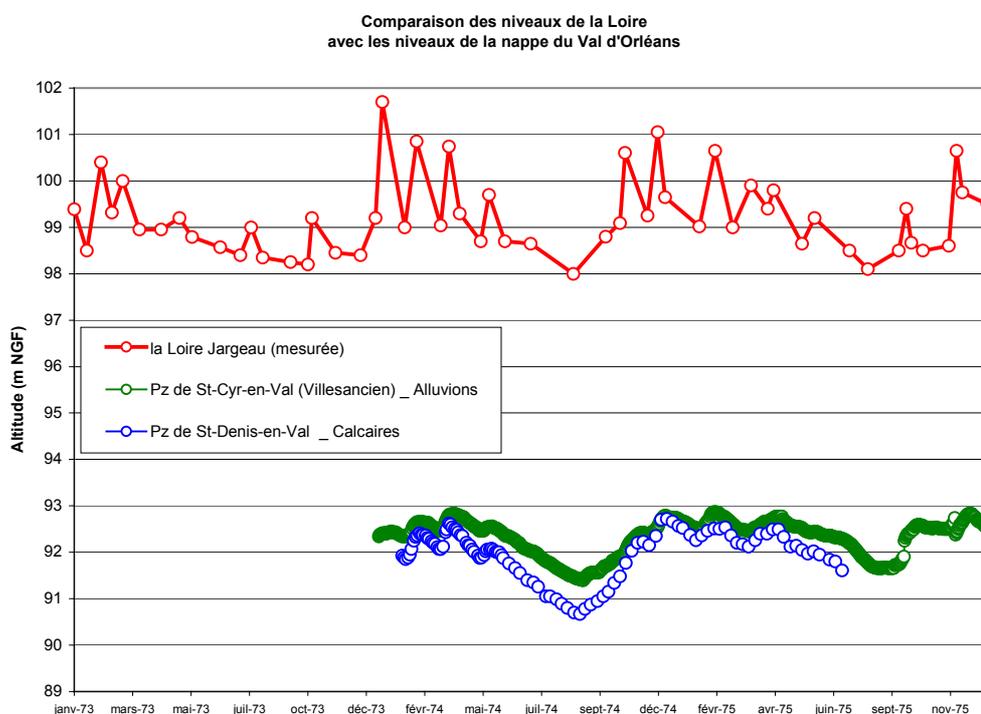


Fig. 11 - Chronique piézométrique. Saint-Cyr-en-Val (Villesancien), Saint-Denis-en-Val.

Conclusion

La comparaison de la ligne d'eau de la Loire avec les niveaux piézométriques des nappes (alluvions et calcaires) montre qu'il est possible de distinguer trois zones dans le val :

- en amont d'Ouvrouer, la nappe est au-dessus de la Loire en étiage,
- entre Ouvrouer et Saint-Jean-le-Blanc, la Loire alimente les nappes alluviale et calcaire, ce qui correspond à des pertes de la Loire dans les deux nappes,
- en aval, la nappe des calcaires alimente la Loire, sauf en crue.

Le caractère principal de l'évolution des nappes c'est la rapidité de la réaction aux fluctuations de la Loire ; tout de même, la nappe des calcaires semble réagir plus rapidement que celle des alluvions. L'eau des alluvions transite dans les calcaires, ce qui explique la rapidité de vidange du réservoir et sa recharge. Cependant, il faut noter que ces variations s'atténuent avec la distance piézomètre – rivière, en présentant parfois un décalage de quelques jours.

4.2. ÉTUDE DES AMPLITUDES DU NIVEAU DE LA LOIRE ET DU NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE DES NAPPES DU VAL D'ORLÉANS AU COURS DE TROIS CRUES IMPORTANTES

Les mesures du niveau de la Loire et du niveau piézométrique de la nappe, effectuées au cours des trois études, ont permis de calculer :

- l'amplitude des crues de la Loire pour chacune des trois périodes,
- l'amplitude maximale de la nappe sur chaque piézomètre.

Les résultats synthétiques obtenus sont présentés dans le tableau 3, ainsi que sur la figure 9, qui exprime l'altitude de la Loire et de la nappe, en fonction de la distance du point de mesure à la Loire.

Au cours de la crue de 1966, les variations du niveau de la Loire enregistrées à Orléans montrent que, pour une crue d'amplitude 2 m, la nappe peut remonter d'environ 1 m à 4 km du fleuve. Les deux piézomètres suivis au cours de cette période, indiquent l'existence d'un gradient d'amplitude : situé plus près de la Loire, le puits Theuriet présente une amplitude plus forte que celle du puits du Bouchet.

La seconde crue (1968-1970) concerne les quatre piézomètres situés à moins d'1 km de la Loire. Trois d'entre eux (Jargeau, Sigloy et Ouvrouer - Les Chevalliers) sont fortement influencés par cette crue dont l'amplitude de la Loire est de 3,60 m. La remontée de la nappe est d'environ 3 m dans la zone de proximité de la Loire.

Par contre, à Sandillon - La Féculerie l'amplitude de la nappe est plus faible. Elle est de l'ordre de 1,50 m. Cette observation est à rattacher à la profondeur importante de ce piézomètre, (soit 34,5 m) qui capte les calcaires d'Étampes, situés sous la molasse de Gâtinais. Rappelons en effet, que les calcaires de Beauce regroupent trois formations, calcaires de Pithiviers, molasse de Gâtinais semi-perméable et calcaires d'Étampes. L'influence de la crue semble être atténuée par la couche semi-perméable.

Entre Jargeau et Ouvrouer - Les Chevalliers également, nous retrouvons un gradient d'amplitude en fonction de la distance à la Loire. A Sigloy, où la nappe est perchée, l'amplitude est plus forte. Cela peut provenir de l'influence directe de la pluie, qui sera étudiée ultérieurement.

Au cours de la troisième crue (1973-1975), l'amplitude du niveau de la Loire, calculée à Châteauneuf-sur-Loire, atteint 2,60 m. La crue est moins importante que la seconde. Son influence est plus faible. Les amplitudes de la nappe sont calculées sur huit piézomètres :

- deux piézomètres situés à moins d'1 km de la Loire (Sandillon La Féculerie et Ouvrouer Les Chevalliers),

- six piézomètres situés entre 1 km et 4,5 km de la Loire.

À Sandillon La Féculerie, la réaction de la nappe est toujours atténuée. Cependant, l'amplitude des variations de la nappe a diminué d'environ 0,3 m, pour une baisse d'amplitude de crue de 1 m. A Ouvrouer Les Chevalliers, l'écart des amplitudes de la nappe entre les deux crues est plus important. Il est de l'ordre de 1,5 m.

Les cinq autres piézomètres (sauf Férolles), montrent clairement que plus on s'éloigne de la Loire, plus l'amplitude des variations de la nappe diminue. Entre 1,77 km et 4,15 km, l'amplitude de la nappe diminue d'environ 1 m.

Le piézomètre de Férolles, bien que situé à 4,05 m de la Loire, indique une amplitude assez forte par rapport aux autres points. Il capte les alluvions dont l'épaisseur dépasse facilement 10 m, reposant sur l'assise Burdigalien imperméable. La nappe est donc perchée dans ce secteur ; la forte amplitude observée, comme à Sigloy, peut être expliquée par l'influence directe de la pluie.

Conclusion

Les amplitudes du niveau de la Loire et du niveau piézométrique de la nappe du val d'Orléans (tabl. 8 et fig. 12), étudiées au cours des trois crues, montrent que :

- les variations du niveau piézométrique de la nappe sont fonction des variations du niveau de la Loire (lorsque l'amplitude des crues augmente, l'amplitude des variations piézométriques augmente),
- les variations du niveau de la nappe sont fonction de la distance à la Loire (lorsque la distance piézomètre à la Loire augmente, l'amplitude des variations piézométriques s'atténue).

Pour les crues étudiées, de période de retour 1 à 8 ans, l'amplitude de la Loire comprise, entre 2,5 et 3,5 m, s'est traduite par une remontée de la nappe :

- de 1 à 3 m, à moins d'1 km de la Loire en amont de Sandillon,
- de 1 à 0,5 m, à une distance supérieure à 1 km.

	Point de mesure	Distance du point de mesure à la Loire (km)	Altitude maximale (m NGF)	Altitude minimale (m NGF)	Amplitude (m)	Niveau d'étiage (m NGF)
Crue n° 1 (1966)	la Loire à Orléans	-	91,44	88,98	2,46	89,25
	St-Cyr-en-Val (Puits Theuriet)	4,1	91,3	90,33	0,97	
	St-Cyr-en-Val (Puits du Bouchet)	4,7	91,28	90,4	0,88	
Crue n° 2 (1968 - 1970)	la Loire à Jargeau	-	102,9	99,3	3,60	96,56
	Jargeau	0,34	99,4	96,35	3,05	
	Sigloy	0,45	106,2	102,95	3,25	
	Sandillon (La Féculerie)	0,65	94,42	93	1,42	
	Ouvrouer (Les Chevalliers)	0,9	102,9	100,02	2,88	
	la Loire à Châteauneuf	-	105,2	102,52	2,68	
Crue n° 3 (1973 - 1975)	Sandillon (La Féculerie)	0,65	93,41	92,3	1,11	101,8
	Ouvrouer (Les Chevalliers)	0,9	100,91	99,68	1,23	
	Ouvrouer (Cimetière)	1,77	101,69	100,3	1,39	
	Sandillon (Savigny)	1,95	92,96	92,1	0,86	
	St-Dens-en-Val	2	92,7	91,89	0,81	
	Tigy	3,97	99,43	98,63	0,80	
	Férolles	4,05	96,3	94,84	1,46	
	St-Cyr-en-Val (Villesancien)	4,15	92,87	92,38	0,49	

Tabl. 8 - Tableau des amplitudes du niveau de la Loire et du niveau des nappes.

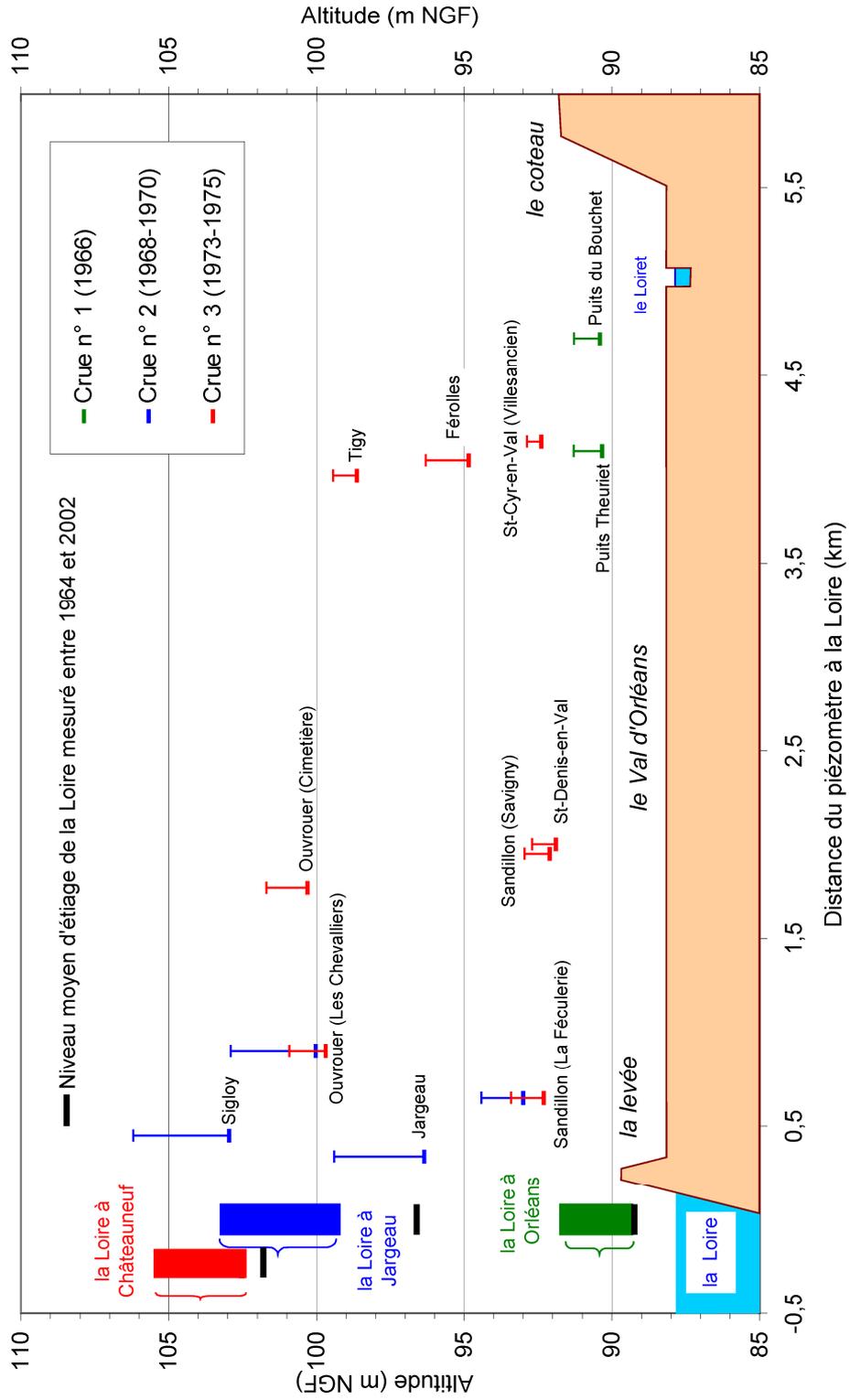


Fig. 12 - Amplitudes du niveau de la Loire et du niveau piézométrique de la nappe du val d'Orléans au cours des trois crues étudiées.

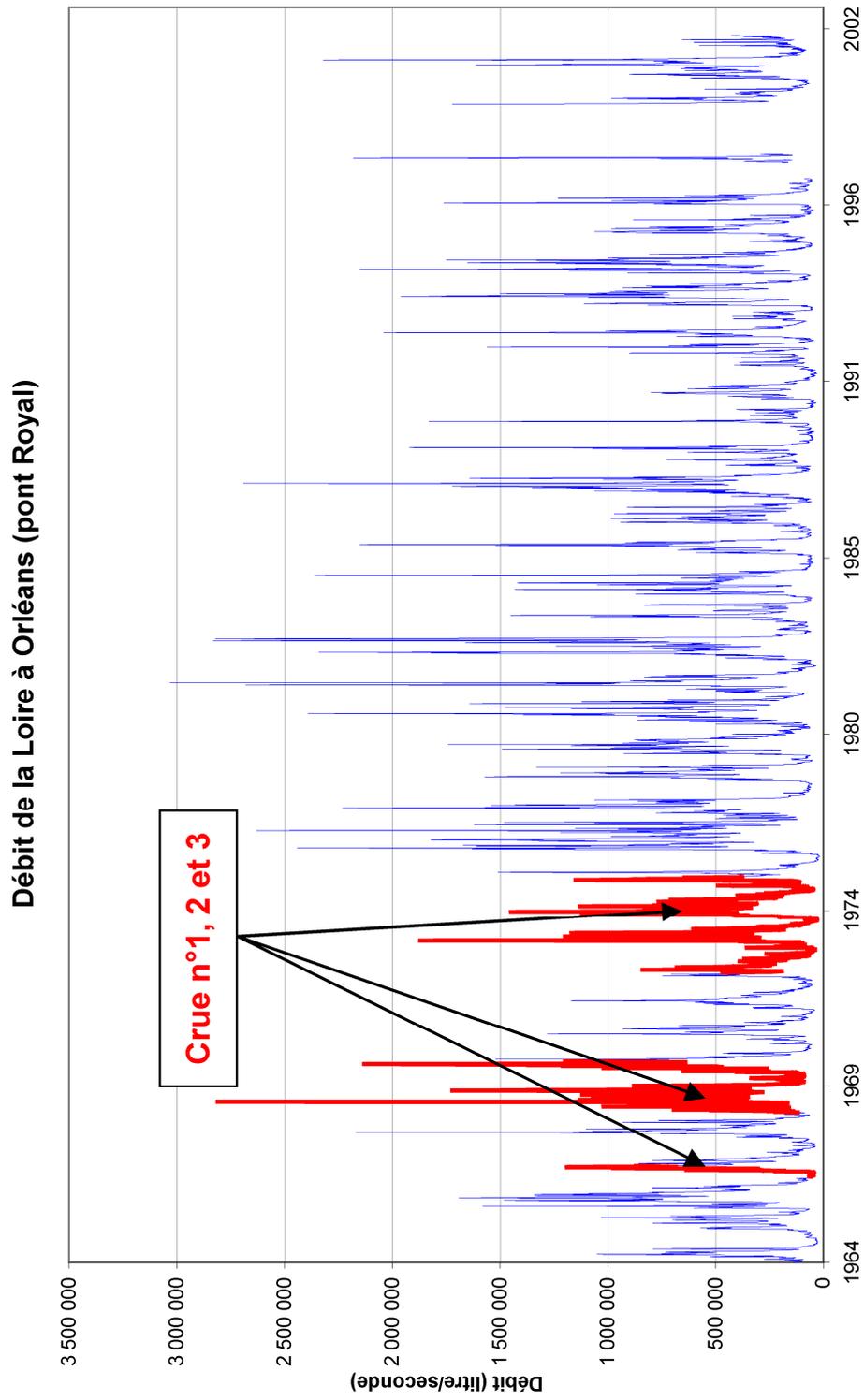


Fig. 13 - Débit de la Loire à Orléans (période 1964-2002).

5. Étude des variations du débit moyen mensuel de la Loire entre Gien et Orléans

Introduction

Le débit de la Loire varie le long de son parcours. Il peut bénéficier d'apports mais aussi subir des pertes suivant les conditions hydrologiques et géologiques que le fleuve rencontre. Dans le but d'évaluer les échanges entre la Loire et le val d'Orléans, sur la section rive gauche comprise entre Sully-sur-Loire et Orléans, on a analysé les débits moyens mensuels de la Loire aux stations de Gien et d'Orléans sur la période 1984 à janvier 2002.

5.1. LES DÉBITS DE LA LOIRE MESURÉS À GIEN ET À ORLÉANS

Afin d'étudier les variations du débit de la Loire entre Gien et Orléans, nous avons exploité les débits moyens mensuels relevés aux stations de Gien et d'Orléans sur la période qui va de janvier 1984 à janvier 2002, période au cours de laquelle les deux stations étaient en fonctionnement simultanément. L'utilisation des débits moyens mensuels, plutôt que les débits moyens journaliers, permet de s'affranchir des phénomènes liés au décalage dans le temps des hydrogrammes de crue entre les deux stations distantes de 70 km (effet de retard et d'aplatissement).

Les données utilisées proviennent de la banque HYDRO.

La figure 14 indique la localisation des stations de Gien et d'Orléans distantes de 70 km.

Les figures 15 et 16 représentent les débits moyens mensuels de la Loire à Gien et à Orléans entre 1984 et janvier 2002.

La figure 17 indique les valeurs des débits mensuels moyen, minimum et maximum de la Loire à Gien au cours d'une année (période 1984 à janvier 2002). En étiage et en particulier au mois d'août, ces débits sont peu variables d'une année sur l'autre, et ne sont jamais inférieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ grâce au soutien d'étiage assuré par les barrages situés en amont dans le bassin de la Loire. En période de crue, le débit moyen mensuel de la Loire a la particularité d'être très variable (variations observées comprises entre 80 et $1\,300 \text{ m}^3/\text{s}$).

Sur la figure 18, on a reporté les valeurs des débits moyens mensuels de la Loire à Orléans en fonction des débits à Gien. Ce graphique montre la très forte corrélation qui existe entre ces deux stations sans toutefois mettre en évidence des écarts significatifs entre elles.

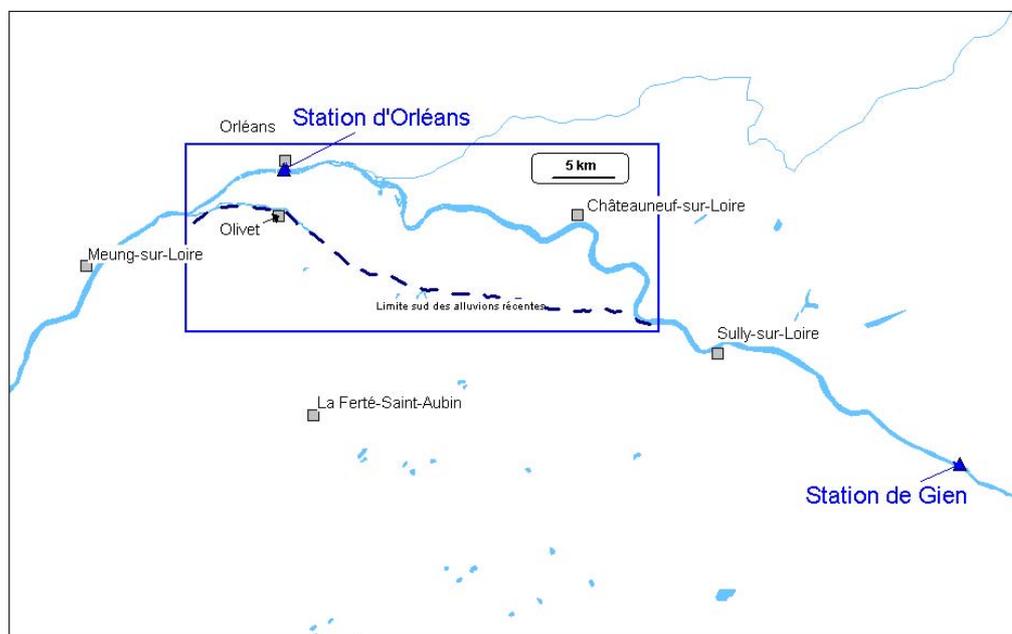


Fig. 14 - Localisation des stations de jaugeage de Gien et d'Orléans.

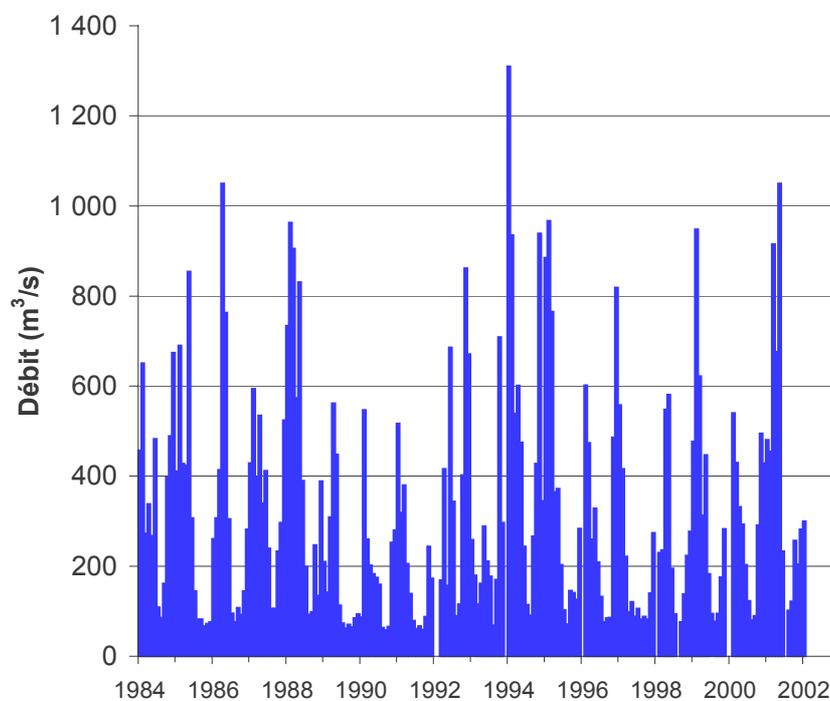


Fig. 15 - Débits moyens mensuels de la Loire à Gien (période 1984 – juin 2002).

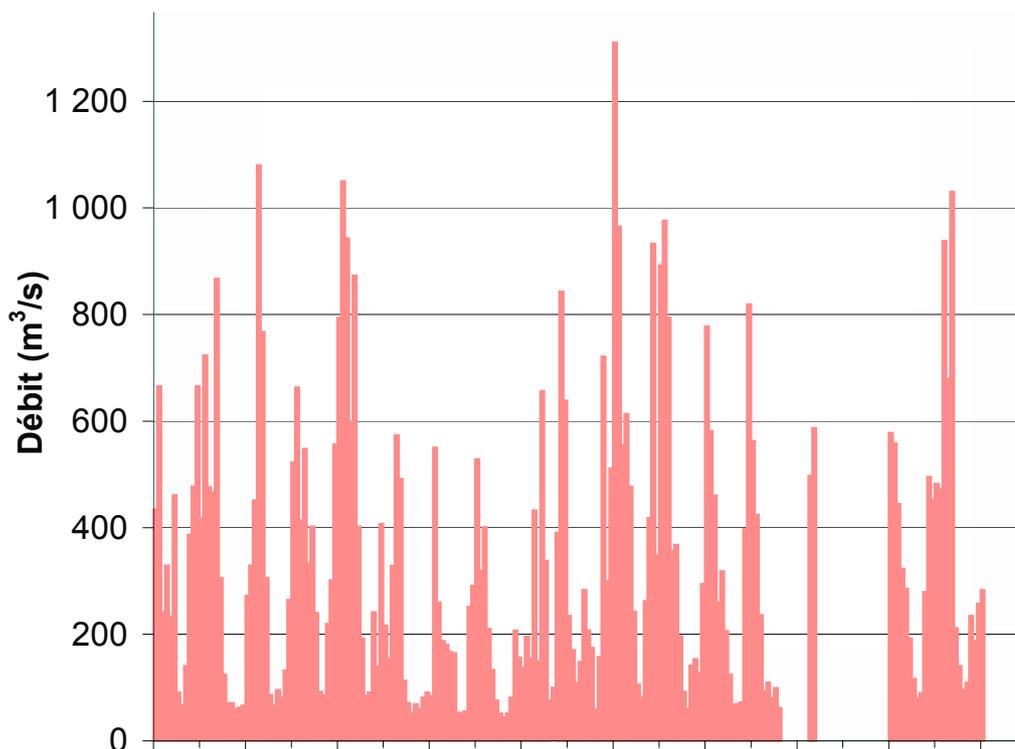


Fig. 16 - Débits moyens mensuels de la Loire à Orléans (période 1984 – janvier 2002).

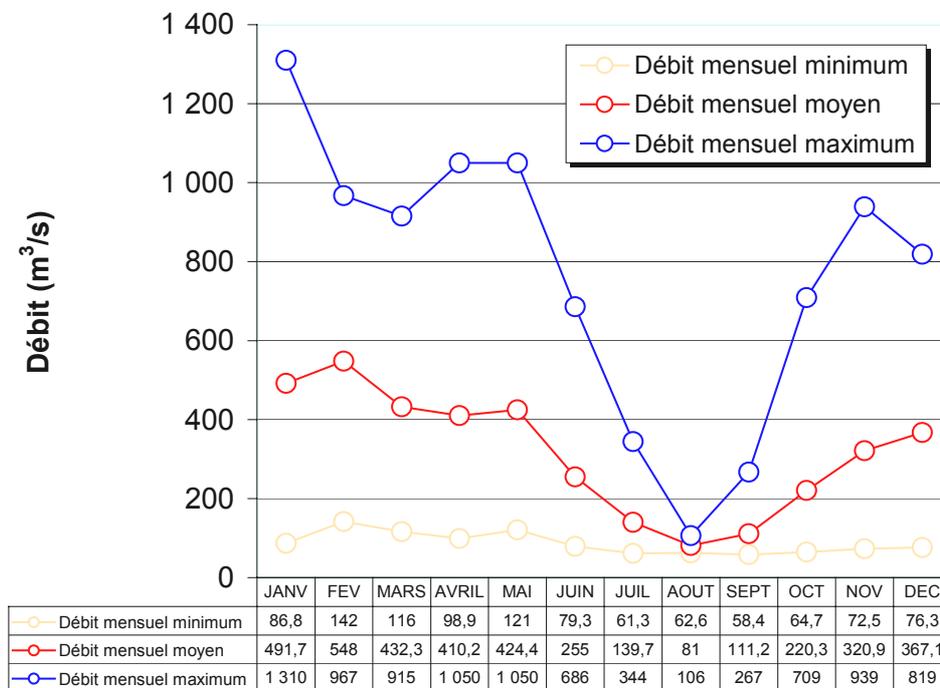


Fig. 17 - Débits mensuels moyens, maximum et minimum de la Loire à Gien (période 1984 – juin 2002).

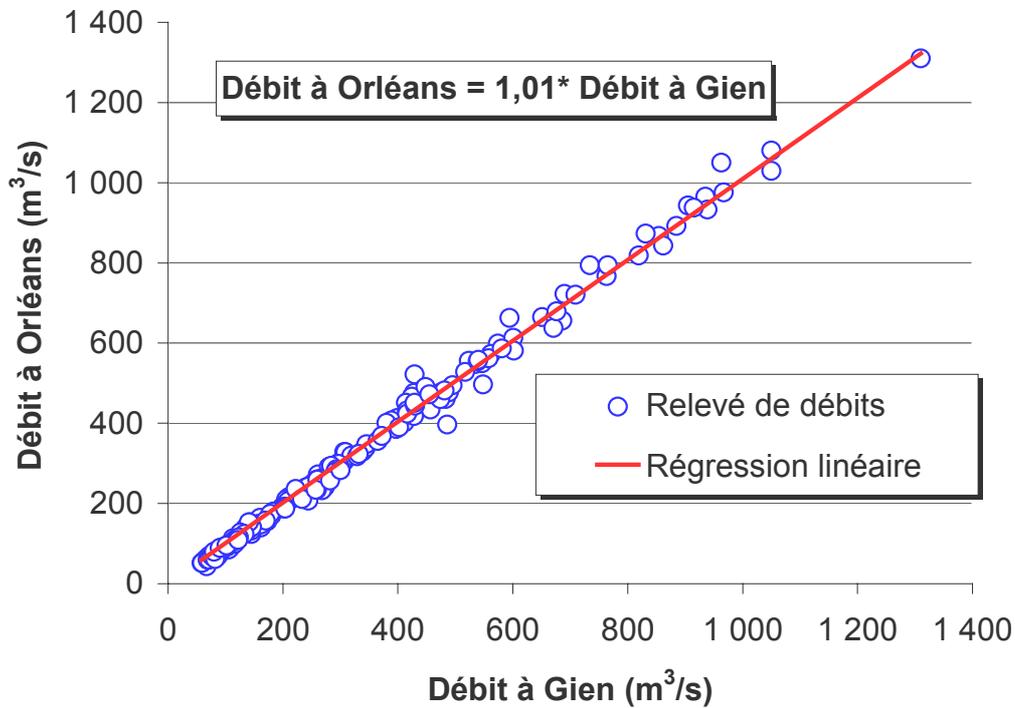


Fig. 18 - Corrélation des débits moyens mensuels de la Loire à Orléans et à Gien.

5.2. ÉTUDE DES VARIATIONS DU DÉBIT MOYEN MENSUEL DE LA LOIRE ENTRE GIEN ET ORLÉANS

Les différences du débit moyen mensuel de la Loire entre Gien et Orléans ont été reportées dans le tableau 5 (écarts absolus du débit Orléans - Gien), et dans le tableau 6 (écarts relatifs du débit Orléans - Gien, divisés par le débit de la Loire à Gien).

La figure 19 représente la différence du débit entre Gien et Orléans (débit à Orléans – débit à Gien) en fonction du temps sur la période 1984 - janvier 2002. Celle-ci met en évidence un phénomène cyclique, où il est possible d'observer une alternance entre des périodes où les écarts sont positifs (augmentation du débit entre Gien et Orléans) et des périodes où les écarts sont négatifs (diminution du débit entre Gien et Orléans).

La figure 20 indique la valeur des écarts observés en fonction du débit de la Loire à Gien. Pour des débits moyens mensuels inférieurs à 400 m³/s, les écarts sont dans leur grande majorité négatifs (diminution du débit de la Loire). Pour des débits supérieurs à 400 m³/s, on constate un plus grand nombre de valeurs positives, mais avec une dispersion beaucoup plus grande autour de zéro.

Les figures 21 et 22 représentent les écarts absolus du débit mensuel, pour chaque mois, entre Gien et Orléans. Ainsi, on constate que les débits d'étiage mesurés, en août et en septembre, à la station d'Orléans sont inférieurs à ceux mesurés à Gien. La diminution du débit de la Loire entre ces deux stations est comprise - en valeur moyenne de juin à novembre - entre 7,6 et 13,3 m³/s. En période de crue, de décembre à mars, les écarts constatés sont généralement positifs, mais avec des amplitudes fortes entre le minimum (-51 m³/s) et le maximum (93 m³/s).

On a reporté sur les figures 23 et 24 les écarts du débit mensuel par rapport au débit de la Loire à Gien, pour chaque mois. Ces courbes montrent qu'en période d'étiage, la diminution du débit de la Loire est relativement importante au regard de son débit. Cette diminution relative est comprise entre 5,5 % et 15,3 % au cours des mois de juillet à octobre. Par contre les écarts relatifs constatés en janvier, février et mars représentent moins de 3 % du débit de la Loire.

En hiver, l'incertitude de la mesure des forts débits de la Loire est comprise entre 5 et 10 % du débit mesuré. Cette incertitude est bien supérieure aux écarts relatifs constatés. Par conséquent, les écarts positifs constatés en hiver ne sont pas avérés.

Par contre, la diminution du débit de la Loire constaté en été est certaine.

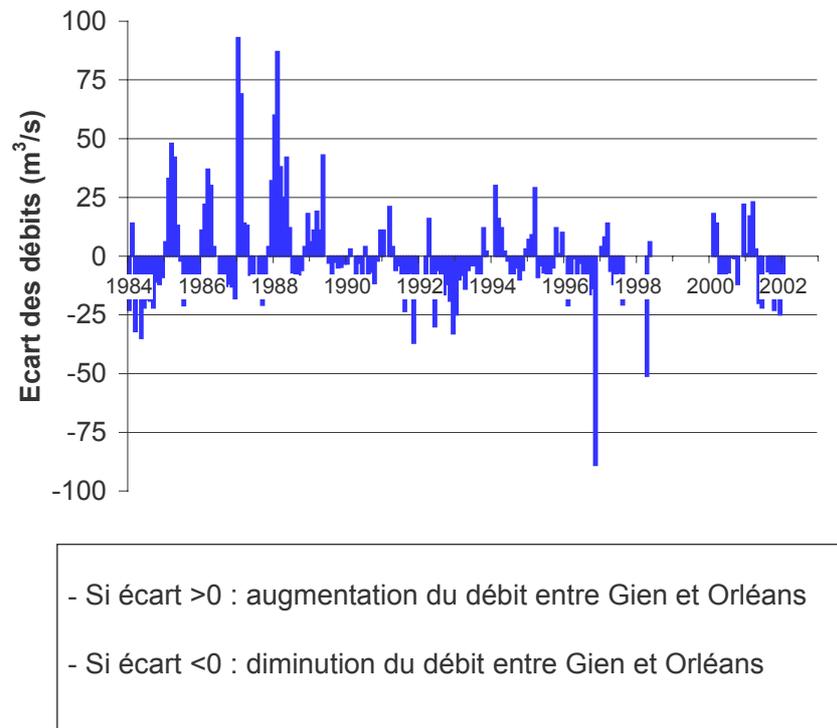


Fig. 19 - Écart des débits moyens mensuels de la Loire entre Gien et Orléans sur la période 1984 – janvier 2002.

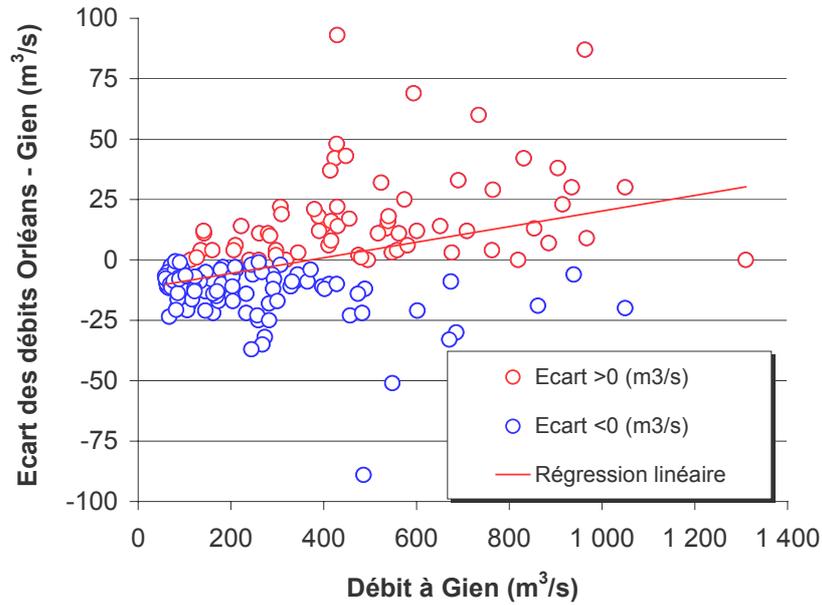


Fig. 20 - Écarts des débits de la Loire entre Gien et Orléans en fonction du débit de la Loire à Gien (valeurs mensuelles).

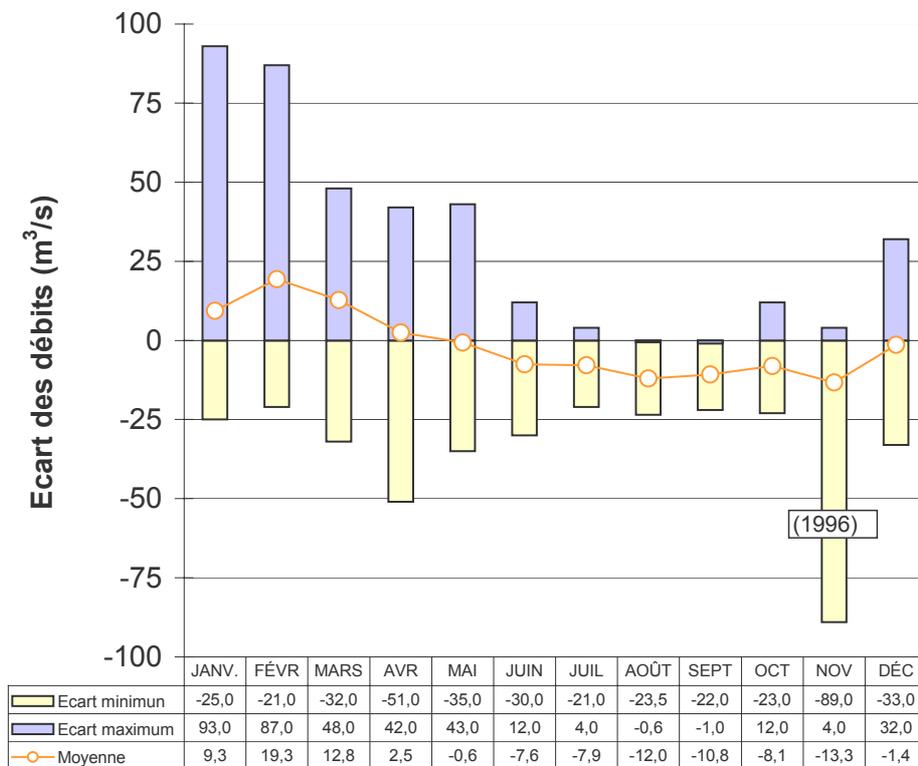


Fig. 21 - Écarts moyen, maximum et minimum des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (m³/s) (période 1984 – janvier 2002)

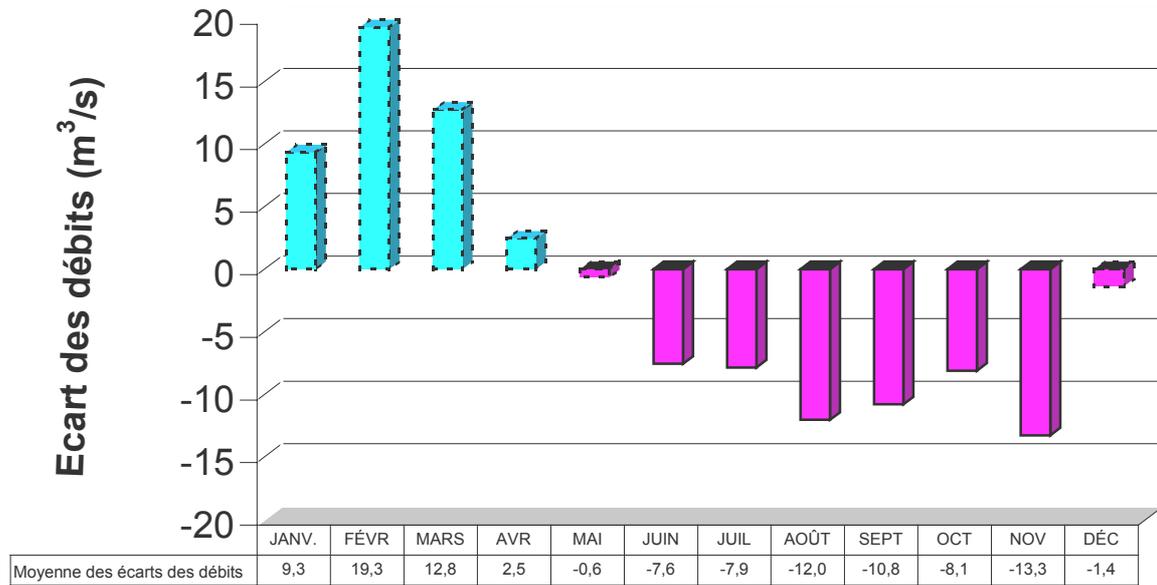


Fig. 22 - Écarts moyens des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (m^3/s) (période 1984 – janvier 2002).

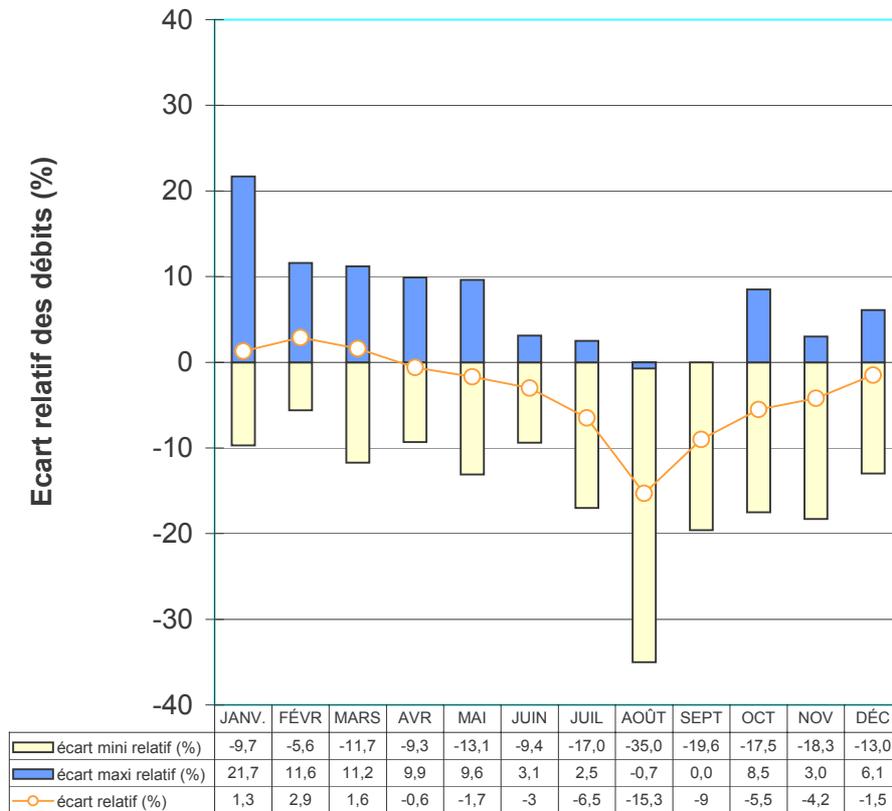


Fig. 23 - Écarts relatifs moyens, maximum et minimum des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (%) (période 1984 – janvier 2002).

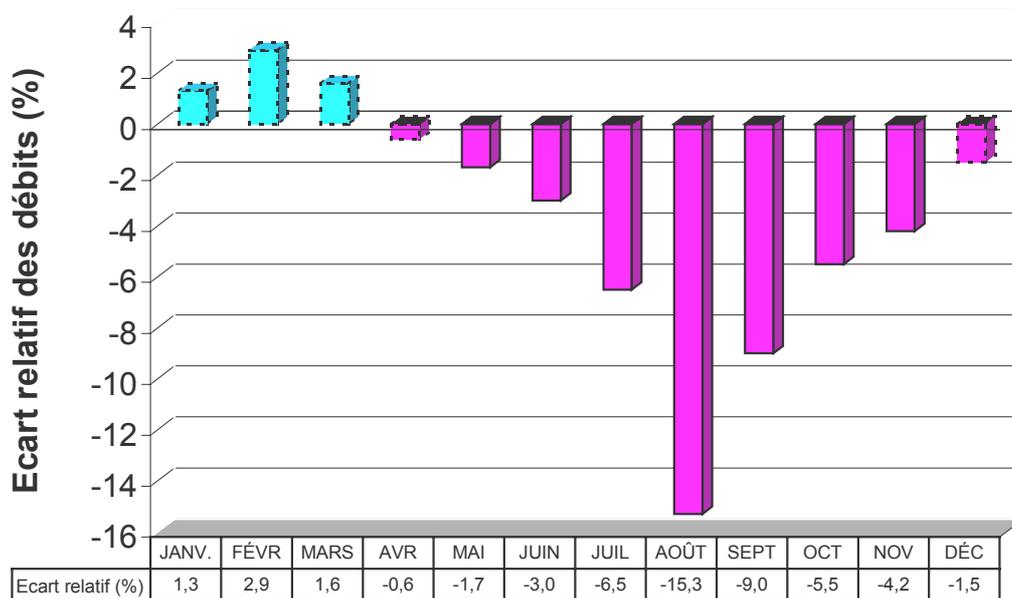


Fig. 24 - Écarts relatifs moyen des débits mensuels de la Loire entre Gien et Orléans (%) (période 1984 – janvier 2002).

Évaluation des pertes par évaporation et des apports par la pluie du plan d'eau de la Loire entre Gien et Orléans.

La longueur de la Loire entre Gien et Orléans est égale approximativement à 70 km. En période de Basses Eaux (juillet et août) la largeur moyenne de la Loire peut être évaluée à 150 m.

La superficie totale du plan d'eau de la Loire est égale à : $70\ 000 \times 150 = 10\ 500\ 000\ \text{m}^2$.

D'après les données de Météo France (station d'Orléans-Bricy), l'évapotranspiration potentielle (ETP) atteinte ou dépassée chaque année en juillet/août est égale à 120 mm/mois.

Ainsi, il est possible de calculer le volume évaporé sur le plan d'eau de la Loire :

Volume évaporé par mois : $10\ 500\ 000\ (\text{m}^2) \times 0,120\ (\text{m}^3/\text{m}^2/\text{mois}) = 1\ 260\ 000\ \text{m}^3$.

Cela correspond à un prélèvement de $42\ 000\ \text{m}^3/\text{jour}$, (soit $1\ 750\ \text{m}^3/\text{h}$ ou $0,5\ \text{m}^3/\text{s}$) sur une distance de 70 km.

Il est nécessaire de tenir compte des précipitations qui ont lieu sur le plan d'eau de la Loire. En été, celles-ci sont de l'ordre de 50 mm/mois. Si l'on soustrait cet apport aux pertes par évaporations (120 mm/mois), on aboutit à un bilan négatif égal à $-0,3\ \text{m}^3/\text{s}$.

Ces résultats montrent que l'apport des pluies ou les pertes par évaporation du plan d'eau de la Loire sont négligeables vis-à-vis des débits du fleuve ou de ses pertes par infiltration entre Gien et Orléans.

Conclusion

L'analyse des débits moyens mensuels de la Loire aux stations de Gien et d'Orléans (tabl. 9 et 10) met en évidence des pertes comprises entre 7,6 et 13,3 m³/s pour les mois de juin à novembre. Lors des trois mois successifs où le débit de la Loire est le plus faible - c'est à dire juillet, août et septembre - cette diminution du débit représente 6 à 15 % du débit du fleuve. Ces pertes doivent probablement exister en hiver, voire être plus importantes à cause de l'augmentation du niveau de la Loire. Par contre l'incertitude sur la mesure des forts débits (5 à 10 % des forts débits) ne permet pas de les mettre en évidence et de les quantifier.

La diminution du débit de la Loire est due à des infiltrations sous les levées de la Loire, entre Sully-sur-Loire et Orléans, à l'occasion d'ouvertures dans le massif calcaire karstique de Beauce qui est par endroit en contact direct avec le lit du fleuve. Ces pertes ont été mises en évidence par le passé lors d'opérations de traçage. Elles alimentent ainsi le val d'Orléans et donne naissance à la source du Bouillon dans le parc Floral de la ville d'Orléans. Ces pertes en rive gauche de la Loire ne sont probablement pas les seules pertes que connaît la Loire entre Gien et Orléans. En effet, à l'aval immédiat de Gien, la Loire coule sur les formations calcaires du système Beauce (calcaires d'Étampes), et il existe dans ce secteur de fortes possibilités d'alimentation de la nappe de Beauce en rive droite de la Loire, en direction du bassin du Loing.

Ces résultats permettent d'établir un ordre de grandeur des débits d'alimentation du val d'Orléans par la Loire. Ceux-ci seraient compris entre 5 et 15 m³/s au maximum en été. En hiver, ces alimentations pourraient être plus importantes sans que l'on puisse y indiquer un ordre de grandeur.

Tableau des écarts des débits moyens mensuels (m ³ /s) entre Gien et Orléans												
	JANV.	FÉVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DÉC
1984	-23,0	14,0	-32,0	-9,0	-35,0	-22,0	-18,5	-19,0	-22,0	-11,0	-12,0	-9,0
1985	6,0	33,0	48,0	42,0	13,0	-2,0	-21,0	-12,2	-11,8	-8,5	-10,4	-9,9
1986	11,0	22,0	37,0	30,0	4,0	0,0	-9,8	-10,8	-12,8	-11,8	-13,0	-18,0
1987	93,0	69,0	14,0	13,0	-8,0	-10,0	0,0	-14,1	-20,8	-14,0	4,0	32,0
1988	60,0	87,0	38,0	25,0	42,0	12,0	-7,0	-8,7	-7,9	-6,0	4,0	18,0
1989	6,0	11,0	19,0	11,0	43,0	0,0	-2,9	-11,1	-2,5	-5,0	-4,7	-3,3
1990	-3,3	3,0	0,0	-15,0	-3,0	-8,0	4,0	-11,1	-6,7	-11,6	-2,0	11,0
1991	11,0	0,0	21,0	4,0	-6,0	-4,1	-9,8	-23,5	-7,7	-7,2	-37,0	-17,0
1992			-15,0	16,0	-8,0	-30,0	-6,0	-14,7	-16,4	-12,0	-19,0	-33,0
1993	-25,0	-10,0	-8,0	-14,0	-6,0	-4,0	-4,0	-10,1	-13,0	12,0	2,0	
1994	0,0	30,0	16,0	12,0	2,0	-2,0	-9,0	-9,5	-5,0	-10,0	-6,0	3,0
1995	7,0	9,0	29,0	-9,0	-4,0	-7,0	-10,8	-11,4	-5,0	12,0	1,0	10,0
1996		-21,0	-14,0	-1,0	-11,0	-3,0	-9,0	-8,7	-16,3	-13,7	-89,0	0,0
1997	4,0	8,0	14,0	-6,3	-12,0	-8,0	-7,0	-20,7				
1998				-51,0	6,0							
1999												
2000		18,0	14,0	-9,0	-8,0	-11,0	-7,0	-0,6	-1,0	-12,0	0,0	22,0
2001	1,0	17,0	23,0	3,0	-20,0	-22,0		-6,5	-13,0	-23,0	-17,0	-25,0
2002	-17,0											
Mini	-25,0	-21,0	-32,0	-51,0	-35,0	-30,0	-21,0	-23,5	-22,0	-23,0	-89,0	-33,0
Moyenne	9,3	19,3	12,8	2,5	-0,6	-7,6	-7,9	-12,0	-10,8	-8,1	-13,3	-1,4
Maxi	93,0	87,0	48,0	42,0	43,0	12,0	4,0	-0,6	-1,0	12,0	4,0	32,0

Tabl. 9 - Tableau des écarts des débits moyens mensuels (m³/s) entre Gien et Orléans.

Caractérisation du risque d'inondation sur le val d'Orléans

Tableau des écarts relatifs des débits moyens mensuels (%) entre Gien et Orléans												
Année	JANV.	FÉVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DÉC
1984	-5,0	2,2	-11,7	-2,7	-13,1	-4,6	-17,0	-22,1	-13,6	-2,8	-2,5	-1,3
1985	1,5	4,8	11,2	9,9	1,5	-0,7	-14,5	-14,8	-14,4	-12,7	-14,3	-13,0
1986	4,2	7,2	8,9	2,9	0,5	0,0	-10,3	-14,1	-11,9	-12,8	-9,0	-6,4
1987	21,7	11,6	3,5	2,4	-2,4	-2,4	0,0	-13,3	-19,6	-6,0	1,3	6,1
1988	8,2	9,0	4,2	4,4	5,1	3,1	-3,5	-9,3	-8,0	-2,4	3,0	4,6
1989	2,9	7,7	6,1	2,0	9,6	0,0	-3,9	-17,7	-3,5	-7,7	-5,5	-3,5
1990	-3,8	0,5	0,0	-7,4	-1,6	-4,6	2,5	-17,4	-11,5	-17,5	-0,8	3,9
1991	2,1	0,0	5,5	1,9	-4,3	-5,2	-16,0	-35,0	-13,0	-8,2	-15,2	-9,8
1992			-8,9	3,8	-5,1	-4,4	-1,7	-16,4	-14,1	-3,0	-2,2	-4,9
1993	-9,7	-5,6	-6,9	-8,6	-2,1	-1,9	-2,2	-14,6	-7,6	1,7	0,7	
1994	0,0	3,2	3,0	2,0	0,4	-0,8	-7,8	-10,5	-1,9	-2,3	-0,6	0,9
1995	0,8	0,9	3,8	-2,5	-1,1	-3,4	-10,5	-15,9	-3,4	8,5	0,8	3,5
1996		-3,5	-3,0	-0,4	-3,3	-1,4	-6,8	-11,4	-19,1	-15,9	-18,3	
1997	0,7	1,9	6,3	-6,4	-9,9	-9,0	-6,6	-25,2				
1998				-9,3	1,0							
1999												
2000		3,3	3,3	-2,7	-2,7	-5,4	-5,7	-0,7	-1,1	-4,1	0,0	5,1
2001	0,2	3,7	2,5	0,4	-1,9	-9,4		-6,4	-10,7	-8,9	-8,3	-8,9
2002	-5,7											
Mini	-9,7	-5,6	-11,7	-9,3	-13,1	-9,4	-17,0	-35,0	-19,6	-17,5	-18,3	-13,0
Moyenne	1,3	2,9	1,6	-0,6	-1,7	-3,0	-6,5	-15,3	-9,0	-5,5	-4,2	-1,5
Maxi	21,7	11,6	11,2	9,9	9,6	3,1	2,5	-0,7	0,0	8,5	3,0	6,1

Tabl. 10 - Tableau des écarts relatifs des débits moyens mensuels (%) entre Gien et Orléans.

6. La modélisation hydrodynamique du val d'Orléans

6.1. DÉFINITION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE DU VAL D'ORLÉANS

La mise au point d'un modèle hydrodynamique comprend plusieurs étapes qui sont :

- une **synthèse hydrogéologique** des connaissances sur la géologie, en particulier la stratigraphie des formations rencontrées dans l'emprise du futur modèle, permettant de définir l'extension horizontale et verticale de ces différentes formations et leurs caractéristiques hydrogéologiques (aptitudes des formations contenues dans le domaine à l'écoulement et au stockage de l'eau souterraine) ;
- la définition d'un **modèle conceptuel** des écoulements, c'est-à-dire une représentation simplifiée des écoulements réels au sein du domaine d'étude ; cette représentation doit être suffisamment proche de la réalité pour restituer correctement les phénomènes à étudier (dans le cas présent, l'impact d'une crue de la Loire sur les niveaux aquifères du val) et suffisamment schématisée pour pouvoir être utilisée en entrée d'un code de modélisation hydrodynamique, lequel va résoudre les équations de l'écoulement pour diverses « sollicitations » qui sont les interactions, variables dans le temps, avec le milieu extérieur au domaine ; ces interactions sont des « entrées » (infiltration de la pluie, flux entrant aux limites du domaine, interaction avec les rivières) ou des « sorties » (prélèvements par pompage AEP, industriels, agricoles ..., flux sortant aux limites, interactions avec les rivières) ;
- la résolution des équations de l'écoulement passe par la « discrétisation » du domaine d'étude, c'est-à-dire son découpage dans les trois dimensions, en éléments, ou « mailles », dans lesquels on fait l'hypothèse que les différents paramètres physiques sont homogènes pour chaque maille, alors qu'ils sont hétérogènes à l'échelle de l'ensemble du domaine d'étude ; cette discrétisation des paramètres et la création de la base de données correspondante, au format lisible par le code hydrodynamique choisi résulte en un **modèle numérique** des écoulements pour le domaine d'étude considéré ;
- une fois « **calé** » (calibré) sur des situations réellement observées, le modèle numérique peut être utilisé comme un outil de **prévision** et de gestion pour tester les impacts sur le milieu aquifère de différents scénarios hypothétiques, par exemple des augmentations de prélèvements dans les captages existants, la création d'un nouveau champ captant, l'occurrence d'une sécheresse plus ou moins longue ou, dans le cas présent, la survenue d'une crue centennale de la Loire. Le « calage » du modèle numérique qui consiste à estimer aussi précisément que possible les paramètres physiques non directement accessibles à la mesure (perméabilité et coefficient d'emménagement des couches aquifères, coefficients d'échange avec la rivière, etc) constitue l'étape la plus importante et la plus délicate dans la mise au point d'un modèle hydrodynamique.

Le code utilisé dans cette étude est le progiciel MARTHE du BRGM, qui est un outil de modélisation 3D aux différences finies, applicable aux milieux poreux équivalents et pouvant traiter des configurations aquifères variées, des plus simples aux plus

complexes. Il permet en particulier de traiter les interactions dynamiques entre un système aquifère stratifié à plusieurs couches et un réseau hydrographique superficiel (rivières et/ou canaux).

6.1.1. Le modèle conceptuel

Le domaine d'étude comprend la partie du val d'Orléans comprise entre la Loire au nord, le Loiret, le Dhuy et les coteaux de Sologne au sud, de Bouteille à l'est à la pointe de Courpin à l'ouest soit environ 40 km de long sur une largeur moyenne de 6 km.

a) Géométrie et stratification

La synthèse hydrogéologique présentée aux chapitres précédents conduit à la représentation suivante du domaine à modéliser :

- le modèle comportera **trois couches** superposées qui sont de haut en bas :
 - le quaternaire sous forme d'une couche d'alluvions, continue sur toute la superficie du domaine d'étude, d'épaisseur variable pouvant atteindre une quinzaine de mètres ;
 - le Burdigalien (Miocène) représenté par les marnes de l'Orléanais, discontinu, dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à une vingtaine de mètres à l'est du domaine ;
 - l'Aquitaniens (Miocène-Oligocène) représenté par les calcaires de Beauce, de loin la formation la plus puissante avec des épaisseurs pouvant dépasser 80 m ;
- le « fond » du modèle correspond au substratum des calcaires, constitué d'argiles graveleuses sur craie altérée ;
- le « toit » du modèle est constitué par la topographie ;
- les couches 1 et 3 (alluvions et calcaires) sont considérées comme **aquifères**. La couche 2 (Burdigalien) est considérée comme **très peu perméable** ; on testera au cours du calage l'effet d'une drainance verticale à travers cette couche.

b) Piézométrie observée

On trouve dans Desprez (1967) les cartes piézométriques des alluvions et des calcaires en situation de Basses Eaux (BE) et de Hautes Eaux (HE) de 1966, telles que résultant des mesures d'environ 700 points d'eau et de l'interprétation de l'hydrogéologue.

Ces cartes de 1966 sont les seules dont on dispose pour appréhender la piézométrie dans le domaine d'étude.

On constate que les cotes des deux niveaux aquifères sont très proches (avec un écart souvent inférieur à 50 cm).

Quelques remarques importantes sont formulées par l'auteur sur cette piézométrie de 1966.

Pour la nappe alluviale :

- existence possible d'une zone d'engouffrement de la nappe alluviale dans le réservoir calcaire entre Férolles et Sandillon ;
- intercommunication possible avec le réservoir calcaire à la limite ouest du Burdigalien ;
- alimentation par les pertes de la Loire localisées de Châteauneuf-sur-Loire à Combleux ;
- en amont de Châteauneuf sur Loire et en aval de Combleux, la Loire draine les alluvions ;
- au sud, de Guilly à Saint-Cyr, alimentation probable par les coteaux ;
- en aval d'Orléans, possibilité d'alimentation par le Loiret ;
- la nappe est en contact avec la nappe des calcaires au niveau des gouffres et des axes de drainage du karst (non connus).

Pour la nappe des calcaires :

- pas de captage à l'est de la zone ;
- existence probable d'axes de drainage karstiques de Châteauneuf-sur-Loire à Vienne-en-Val et de Jargeau à Sandillon ;
- convergence des axes de drainage vers les sources du Loiret et le champ captant du val (Saint-Cyr-en-Val) ;
- possibilité d'axes karstiques entre Chécy et Combleux et à l'aplomb de Bou ;
- le Loiret peut perdre une partie de son débit vers la nappe des calcaires ;
- le Loiret draine la nappe par des gouffres ;
- à l'étiage 66, le niveau du Loiret reste à 1 m au-dessus de celui de la Loire dans son cours supérieur ;
- recharge maximale de la nappe des calcaires 24 h après une crue de la Loire ;
- alimentation par les coteaux calcaires en rive droite et directement par des pertes de la Loire au droit de Châteauneuf-sur-Loire et Sandillon ;
- possibilités d'apport par la nappe alluviale et les coteaux de Sologne ;
- la nappe devient artésienne au voisinage du thalweg du Loiret qui constitue son exutoire principal, et au voisinage de la Loire en aval d'Orléans.

Ces observations seront prises en compte dans la définition de la piézométrie de référence et dans le processus de calage du modèle.

c) Conditions aux limites

Les conditions aux limites horizontales et verticales sont les suivantes (fig. 25) :

- la topographie constitue une cote de débordement pour l'aquifère phréatique alluvial ; l'aquifère des calcaires peut, quant à lui, se mettre en charge sous le Burdigalien ;

- au nord, on retient une condition d'interaction dynamique de l'aquifère alluvial avec la Loire dont on a lieu de penser qu'elle n'impose pas son potentiel instantanément lorsque son niveau varie ; une hypothèse de potentiel imposé sur cette limite serait trop grossière et brutale pour l'objectif que nous poursuivons de modélisation de l'impact des crues. En ce qui concerne les calcaires, on retient une condition de flux nul, ce qui n'est qu'approximatif car les calcaires s'étendent sur la rive droite mais on ne dispose d'aucune information sur les flux d'alimentation par cette limite ;
- au sud, il faut distinguer la limite constituée par le Loiret et le Dhuy de la partie à l'amont du Dhuy : en effet le Loiret et le Dhuy sont toujours en eau contrairement au cours d'eau en amont de la source du Dhuy qui est à sec en été. Le Loiret et le Dhuy quoique toujours en eau sont des petites rivières à l'aval de l'écoulement souterrain sur lequel elles influent peu, comparativement à la Loire. Pour cette limite, on considère donc qu'il est suffisant de prendre une condition de potentiel imposé ; ce potentiel sera variable dans le temps pour tenir compte de la remontée du Loiret au cours d'une crue de la Loire. Dans la partie à l'amont de la source du Dhuy (sud-est du modèle), le ruisseau qui est à sec en été n'est pas en mesure d'imposer son potentiel : il faudrait connaître les flux entrants depuis les coteaux de Sologne dont on sait qu'ils peuvent alimenter le domaine d'étude ; en l'absence de cette donnée on conserve une condition de potentiel imposé qui correspond à la charge de la nappe au droit du cours d'eau, laquelle sera ajustée au cours du calage.

d) Sollicitations : recharge et prélèvements

Les prélèvements sont de trois types : AEP, industrie, irrigation tels que détaillés aux chapitres précédents. On dispose des valeurs de l'année 2000.

La figure 26 présente la localisation des prélèvements AEP du val sur un fond topographique. Seuls les captages dans le val seront pris en compte. Ils captent tous la nappe des calcaires.

La figure 27 présente les points de prélèvements pour l'industrie. Dans le val, deux captent la nappe alluviale (Olivet Archette et Saint-Pryvé), les quatre autres captant la nappe des calcaires de Beauce.

Les prélèvements pour l'irrigation sont effectués quatre mois par an de juin à septembre sur la plus grande partie du val, et dans l'une ou l'autre nappe. Connaissant les volumes prélevés par commune et les superficies des communes, on a représenté à la figure 28 une carte des zones de prélèvement pour l'irrigation, chacune correspondant à une commune sauf la zone 0 qui correspond aux zones urbanisées et où on suppose qu'aucune irrigation n'est effectuée.

En dehors des alimentations par les rivières, le système multicouche est alimenté par la recharge provenant des précipitations. A l'échelle du val, les précipitations sont homogènes ; au cours du calage, on considèrera cependant deux zones de recharge, l'une recouvrant les zones urbanisées (zone 0 de la carte précédente), l'autre le reste du domaine de modélisation, l'évapotranspiration et le ruissellement étant probablement assez différents entre ces deux zones.

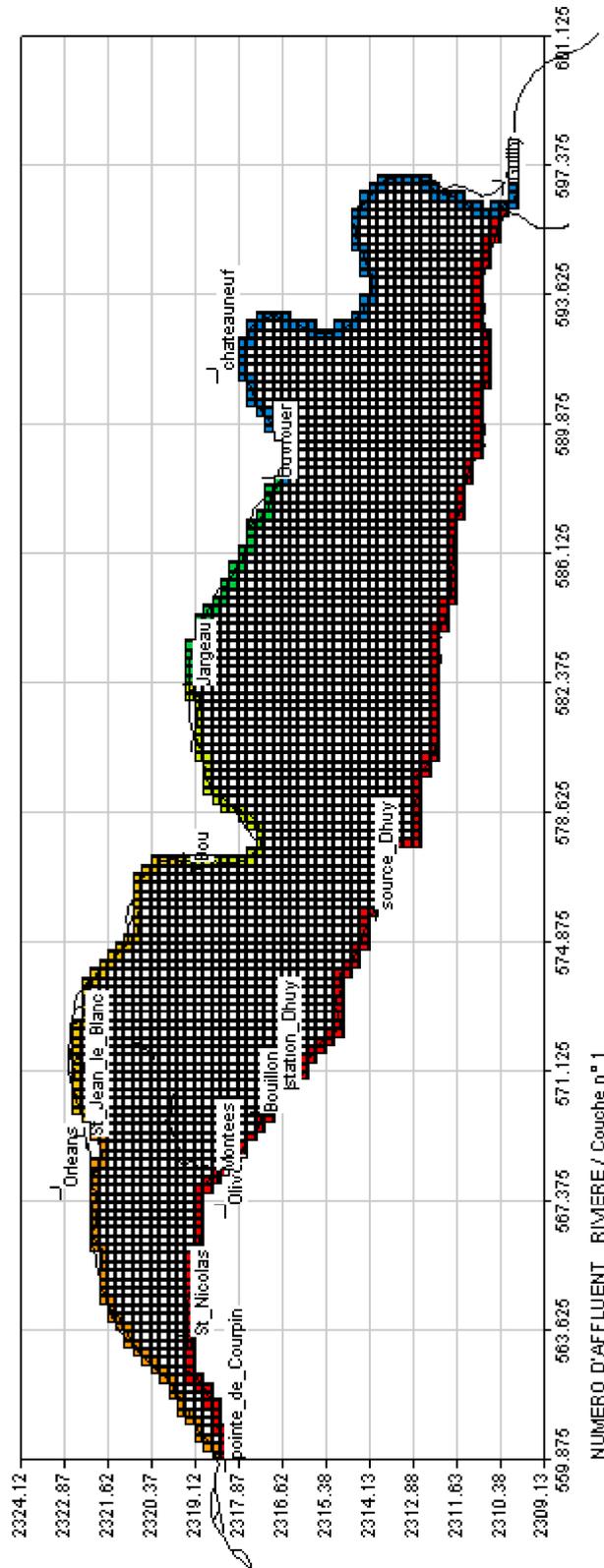


Fig. 25 - Maillage du modèle et conditions aux limites (au nord, la Loire subdivisée en cinq secteurs ; au sud, mailles à potentiel imposé en rouge).

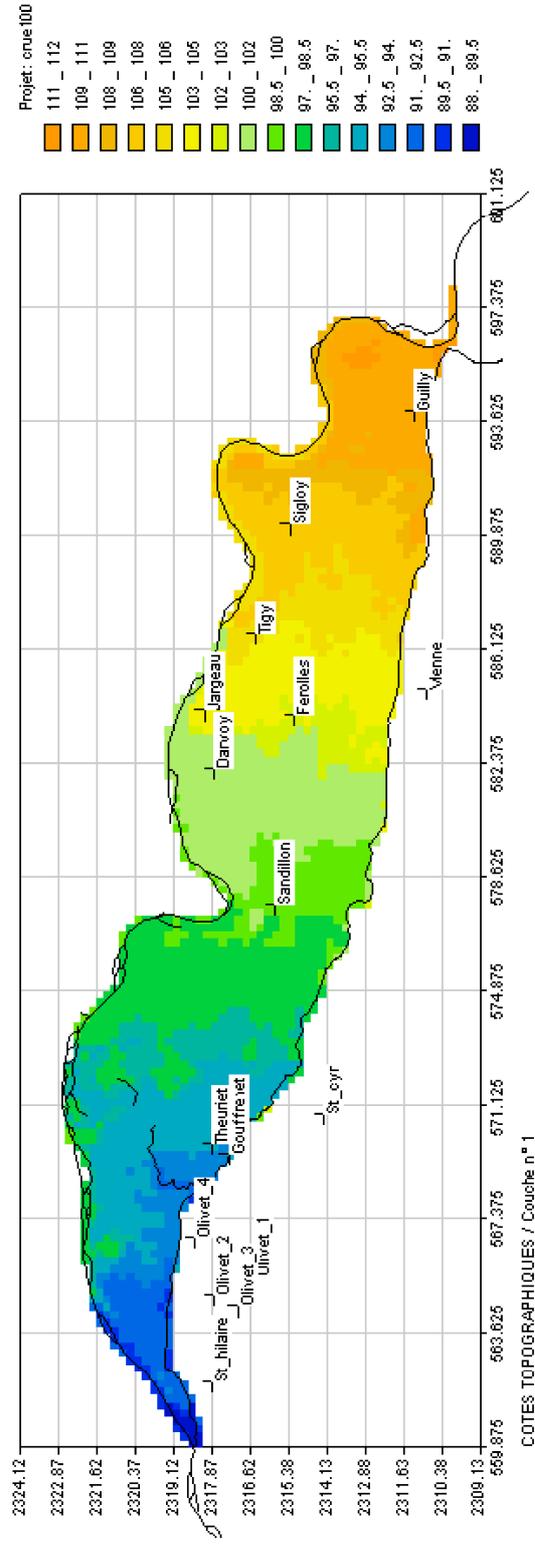


Fig. 26 - Situation des points de prélèvement pour l'AEP sur fond topographique.

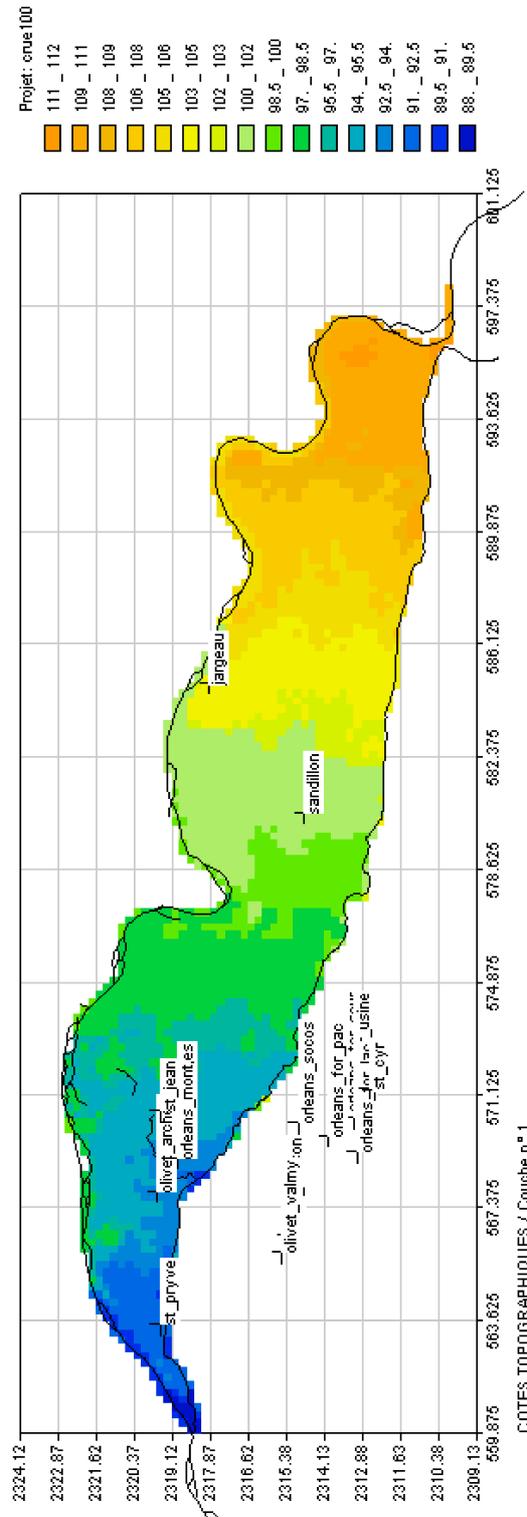


Fig. 27 - Situation des points de prélèvement industriels sur fond topographique.

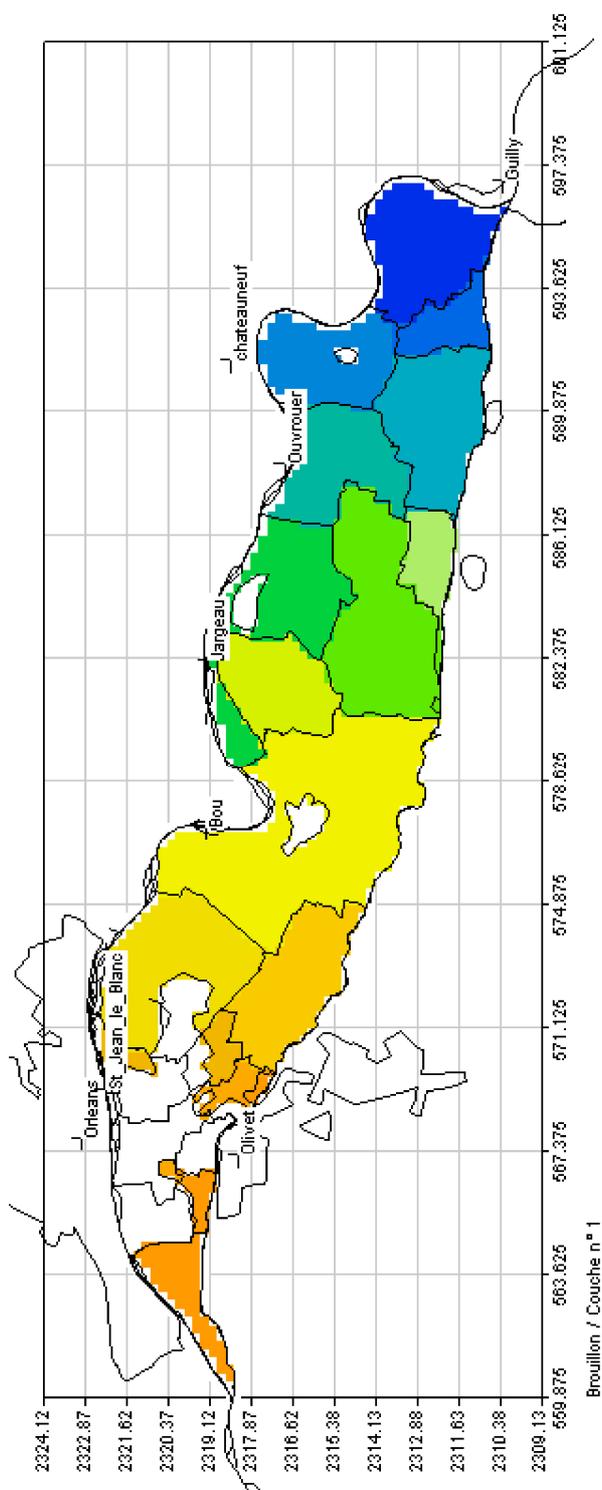


Fig. 28 - Zones de prélèvements pour l'irrigation et limites des communes (en blanc, zone urbanisée sans prélèvement pour l'irrigation).

e) Première estimation des paramètres hydrodynamiques

L'objectif du calage est d'identifier ces paramètres. Pour ce faire, il est préférable de connaître leur ordre de grandeur et leur plage de variation pour le type de formations rencontrées.

Au cours des travaux antérieurs, quelques essais de pompage ont été effectués donnant des estimations de la transmissivité T , plus rarement du coefficient d'emmagasinement S .

On trouve dans Caudron et Desprez (1970) des valeurs de la diffusivité T/S estimée en cinq points à partir des fluctuations de la piézométrie et du niveau de la Loire entre février 1968 et mars 1970 :

- on obtient des variations de T/S de $0,064 \text{ m}^2/\text{s}$ au puits de Sandillon à $1,3 \text{ m}^2/\text{s}$ au puits d'Ouvrouer ; en fait T/S est proche de 1 dans les zones de contact alluvions/calcaires par le karst, de l'ordre de 0,07 dans les zones d'alluvions isolées ; la décroissance de la diffusivité d'un facteur 10 traduit soit la présence de zones de colmatage des berges soit l'indépendance locale de la nappe alluviale par rapport à celle des calcaires ;
- les essais de débit donnent T entre 10^{-2} et $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la nappe alluviale ; S serait donc de l'ordre de 1 à 3 % dans la zone de contact alluvions/calcaires ;
- S serait compris entre 1 et 3 % dans les zones d'intercommunication et de l'ordre de 15 % pour la nappe alluviale seule.

Par ailleurs, Talbo (1970) donne pour le calcaire du val d'Orléans les estimations suivantes :

- T de 10^{-3} à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$,
- S de 0,1 à 0,5 %.

Pour une étude portant sur une petite partie du domaine qui nous intéresse (de Jargeau à Olivet) et avec des options différentes, Rousselot et Sinan obtiennent les valeurs de calage en régime permanent suivantes :

- perméabilité moyenne des alluvions, 10 à $120 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$,
- perméabilité moyenne du calcaire hors chenaux karstiques, 5 à $30 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

Filippi a modélisé la nappe des calcaires au sud du domaine de la présente étude, secteur compris entre le val d'Orléans au nord et l'axe de la vallée du Cosson au sud ; il obtient des valeurs de calage variant de 1 à $15 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, les plus élevées étant directement au contact de la partie est du val.

On constate un bon accord entre ces deux études sur les ordres de grandeur de la perméabilité du calcaire.

6.1.2. Le modèle numérique

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, le passage du modèle conceptuel au modèle numérique se fait par le découpage du domaine d'étude en mailles élémentaires et la constitution de la base de données correspondante, au format des fichiers d'entrée du code de calcul, en l'occurrence le code MARTHE du BRGM.

L'examen de l'extension du domaine d'étude et de l'hétérogénéité des champs spatialisés disponibles, en particulier la piézométrie, conduit à retenir un pas d'interpolation de 250 m dans les deux dimensions horizontales ; pour la dimension verticale, le pas d'interpolation est variable et imposé par l'épaisseur de chacune des trois couches du modèle soit de haut en bas : alluvions, Burdigalien et calcaires.

Le domaine étudié est subdivisé en trois couches de 3 125 mailles chacune.

a) Données géométriques

Les champs spatialisés sont interpolés à l'aide des outils géostatistiques du BRGM sur la grille représentée à la figure 25 ; cette figure présente également les limites du modèle :

- au nord, la Loire subdivisée en cinq secteurs :
 - secteur 1 : Guilly à Ouvrouer
 - secteur 2 : Ouvrouer à Jargeau
 - secteur 3 : Jargeau à Bou
 - secteur 4 : Bou à Saint-Jean-le-Blanc
 - secteur 5 : Saint-Jean-le-Blanc à la pointe de Courpin ;
- au sud, les rivières du Dhuy et du Loiret (en rouge).

Les données géométriques spatialisées fournies au domaine sont les suivantes :

- la topographie, à des cotes variant entre 88 et 112 m NGF (fig. 29) ;
- le substratum (ou mur) de chacune des trois couches. Le substratum de la couche 3 constituant le fond imperméable du modèle a des cotes variant entre 3 et 50 m NGF (fig. 30, 31, 32).
- pour l'information du lecteur, on présente également aux figures 30 à 35 les cartes des épaisseurs de chaque couche du modèle :
 - fig. 33 : **couche 1**, représentant l'épaisseur des alluvions, continue sur toute la superficie du domaine d'étude. Son épaisseur varie entre quelques cm et une quinzaine de mètres ;
 - fig. 34 : **couche 2**, représentant l'épaisseur du Burdigalien, discontinue. Son épaisseur varie de quelques centimètres à une vingtaine de mètres à l'est du domaine ; afin d'éviter des problèmes numériques au cours de la modélisation, on a seuillé le Burdigalien à 50 cm, c'est-à-dire qu'on l'a considéré comme absent pour des épaisseurs inférieures à cette valeur ;
 - fig. 35 : **couche 3**, représentant l'épaisseur des calcaires de Beauce, de loin la formation la plus puissante avec des épaisseurs variant entre 40 m et 90 m.

Les figures 36 à 39 présentent trois coupes verticales du modèle selon les sections indiquées. A noter que l'échelle verticale (en m) est fortement dilatée par rapport à l'échelle horizontale (en km).

b) Données piézométriques

Une carte piézométrique de référence qui servira en particulier au calage du modèle en régime permanent doit être définie pour chaque couche de calcul, soit ici pour les couches 1 et 3, puisque le Burdigalien est considéré comme très peu perméable.

La qualité des cartes piézométriques de référence conditionne fortement les résultats du modèle de simulation puisque ces cartes servent de base au calage. On essaie en général d'utiliser une carte de situation moyenne représentative d'un état stabilisé.

Une première difficulté se présente ici car les seules données disponibles comportent un mélange de valeurs des HE et des BE de 1966, mesurées dans les alluvions ou dans les calcaires, sans information permettant de les classer par couche et par situation.

Les cartes numérisées de référence (fig. 40 et 41) sont établies à l'aide de ces données complétées des informations apportées par les cartes établies dans les rapports antérieurs et la connaissance des niveaux d'étiage dans la Loire, le Loiret et le Dhuy. Ces cartes piézométriques ne sont donc pas totalement réalistes puisque les conditions aux limites sur les rivières sont celles de l'étiage alors que la piézométrie dans le modèle correspond à une situation intermédiaire dans le temps et moyennée sur les deux couches aquifères.

Elles sont très proches l'une de l'autre sauf dans la partie est du domaine où la piézométrie des alluvions est supérieure d'environ 2 m à celle des calcaires.

c) Données hydroclimatiques

La synthèse hydrogéologique conduit à une estimation de l'ordre de grandeur de la pluie efficace dans le val de 150 mm/an ; le calage permettra d'en déduire la recharge sur chacune des deux zones définies au § 6.1.1.

Pour le calage en transitoire, il faudra évaluer les fluctuations de la recharge sur la période de calage. Pour ce faire, on a acquis auprès de Météo-France, les données journalières de précipitation et d'évapotranspiration potentielle (ETP) entre le 1^{er} janvier 1965 et le 31 décembre 1975.

Plus précisément, Météo-France a fourni :

- les précipitations à la station de Chécy du 1^{er} janvier 1965 au 31 décembre 1967 ;
- les précipitations à la station de La Source du 1^{er} janvier 1968 au 31 décembre 1975 ;
- les ETP calculées par la méthode de PENMAN à la station de Bricy du 1^{er} janvier 1965 au 31 décembre 1975.

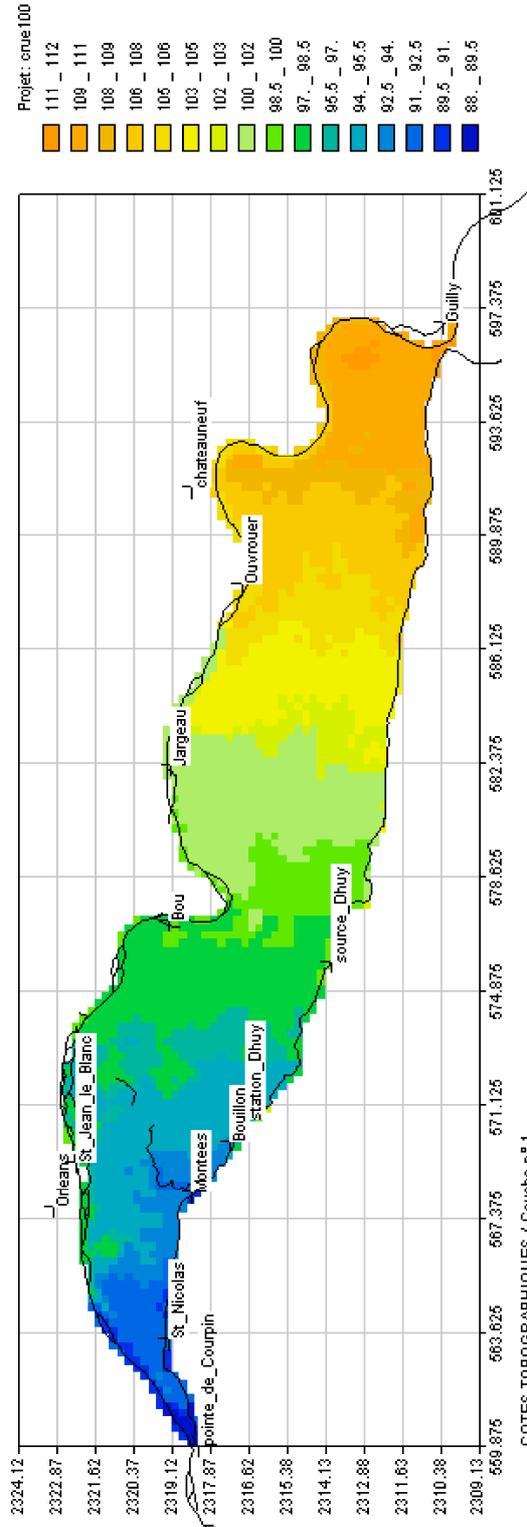


Fig. 29 - Limites du domaine d'étude sur fond topographique.

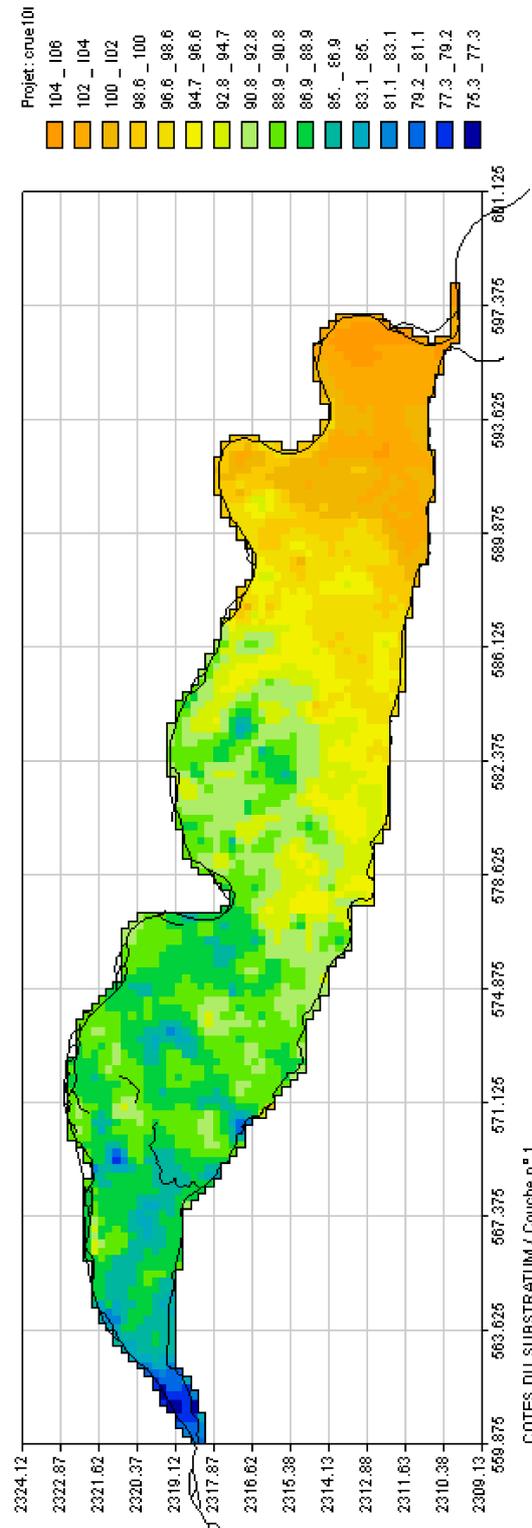


Fig. 30 - Cotes du substratum : couche 1 (alluvions).

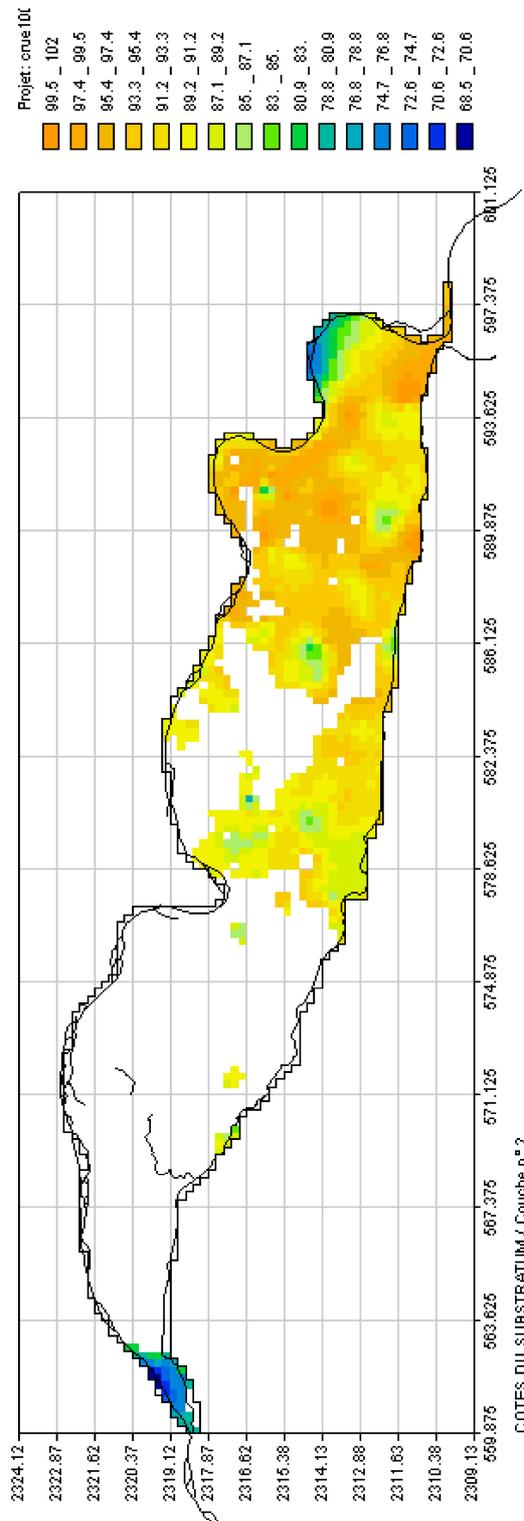


Fig. 31 - Cotes du substratum : couche 2 (Burdigalien).

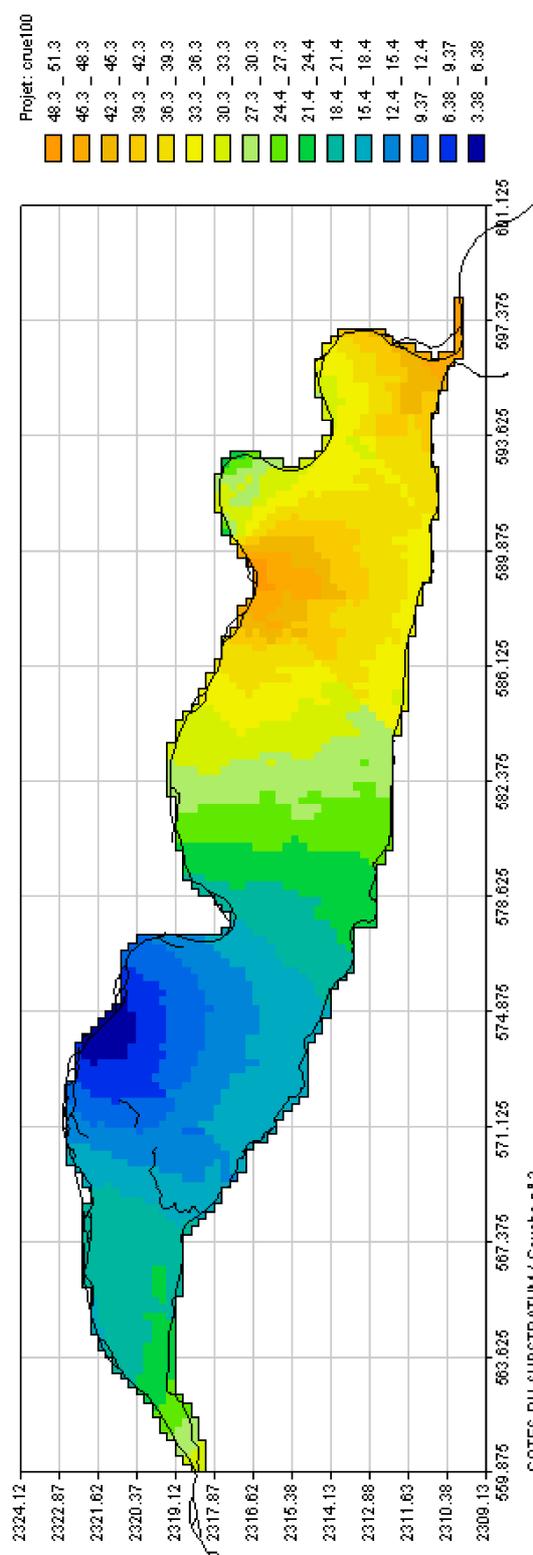


Fig. 32 - Cotes du substratum : couche 3 (calcaires).

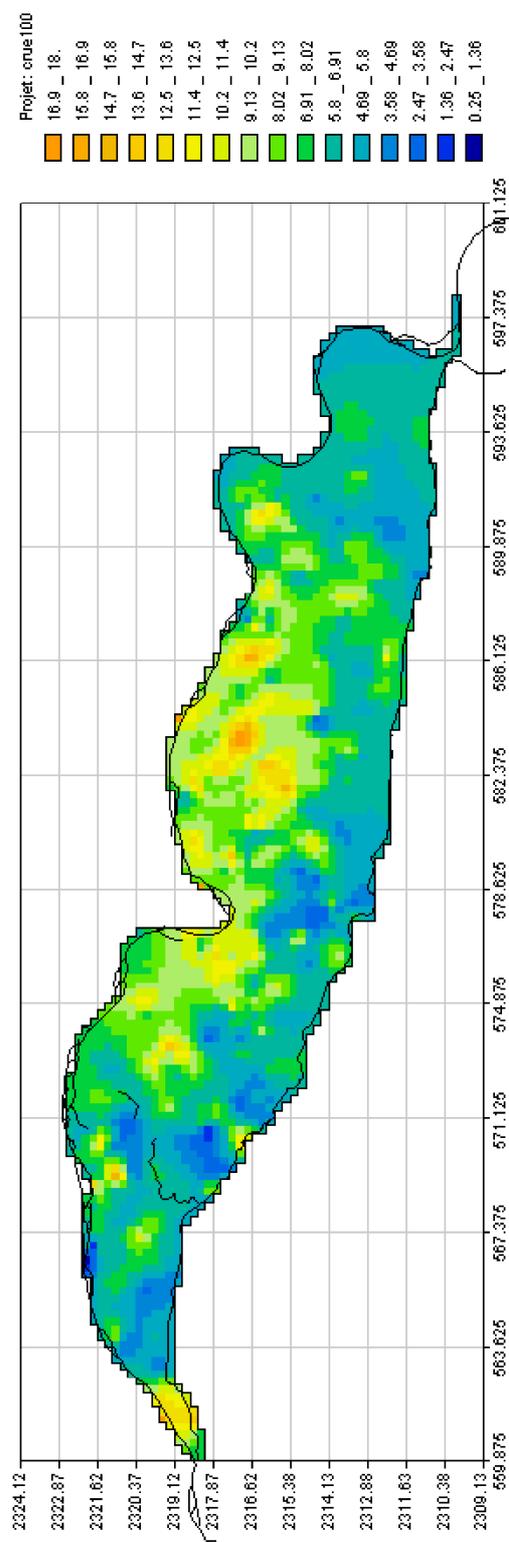


Fig. 33 - Épaisseurs de la couche 1 (alluvions).

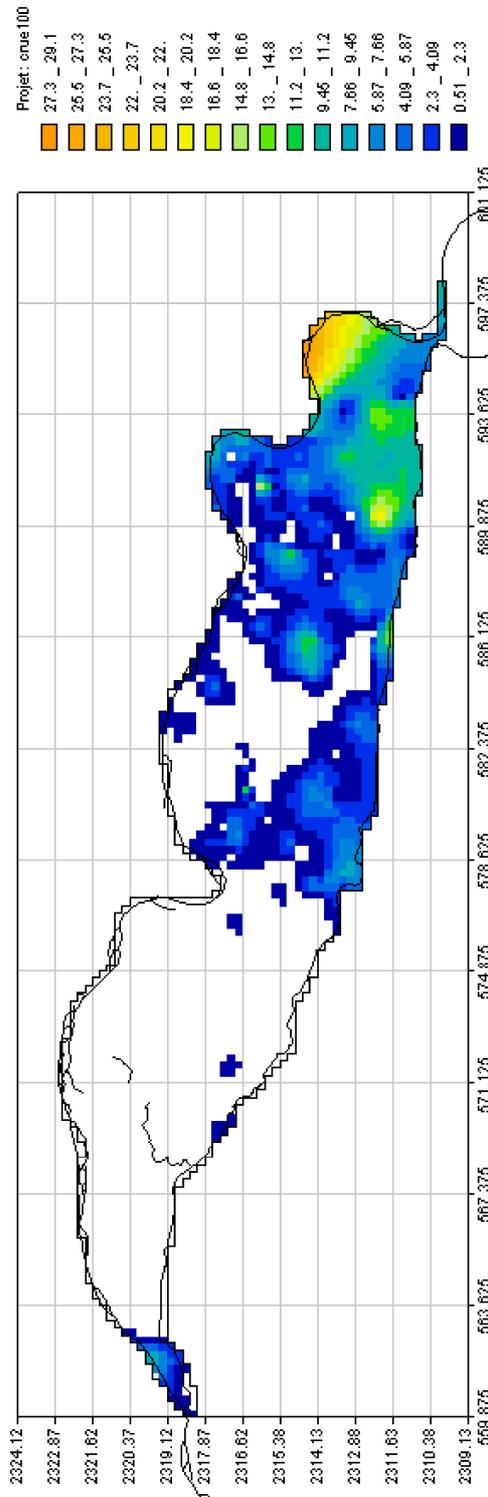


Fig. 34 - Épaisseurs de la couche 2 (Burdigalien).

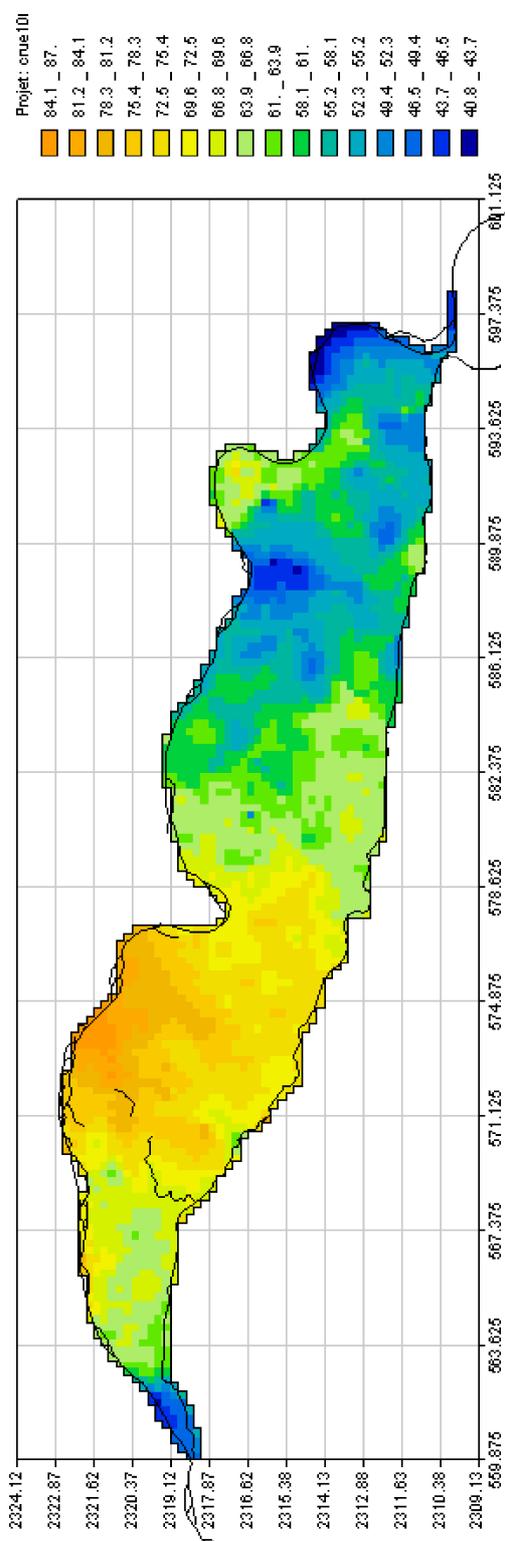


Fig. 35 - Épaisseurs de la couche 3 (calcaires).

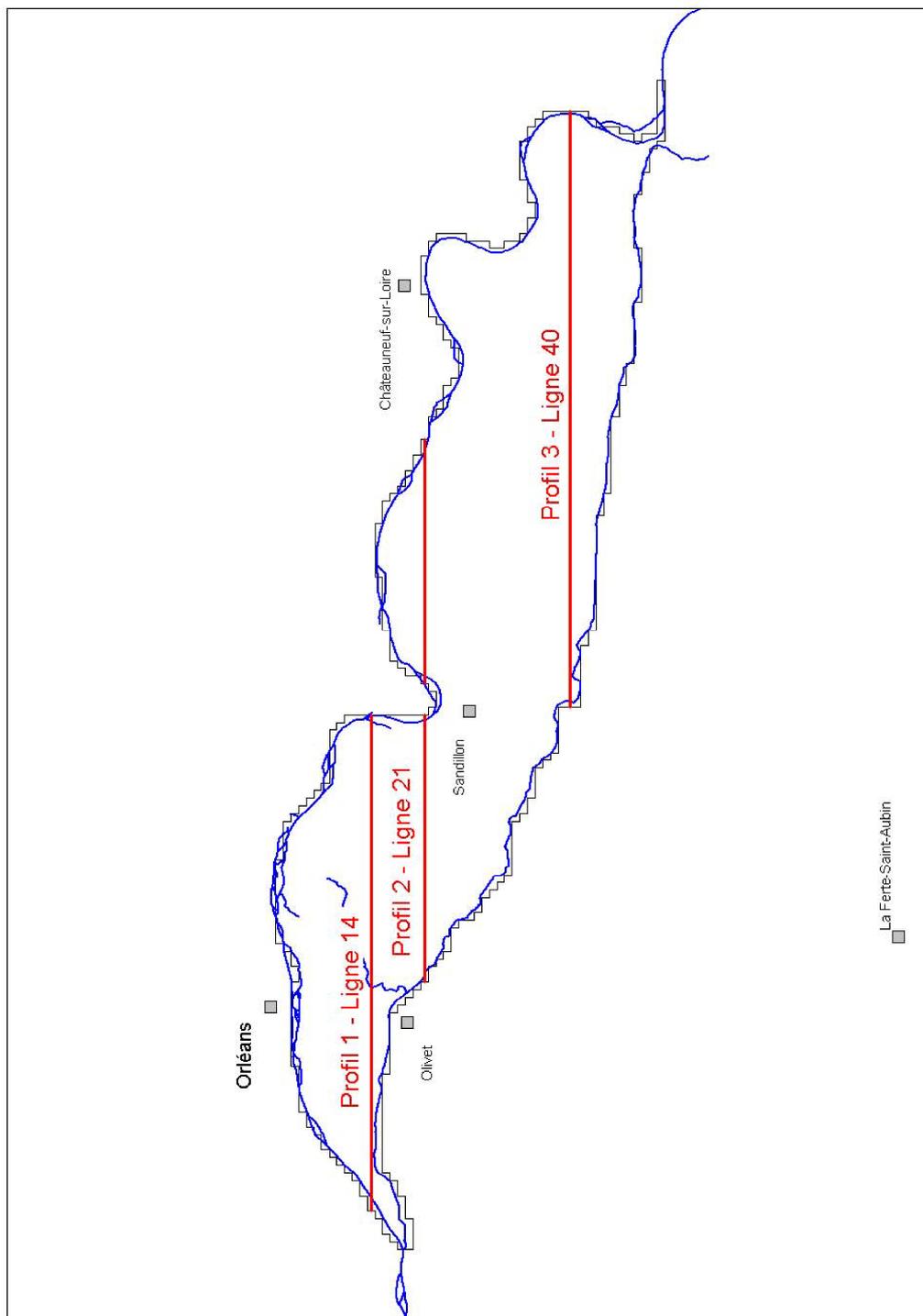


Fig. 36 - Sélection des lignes 14, 21 et 40 du modèle pour le tracé des coupes verticales.

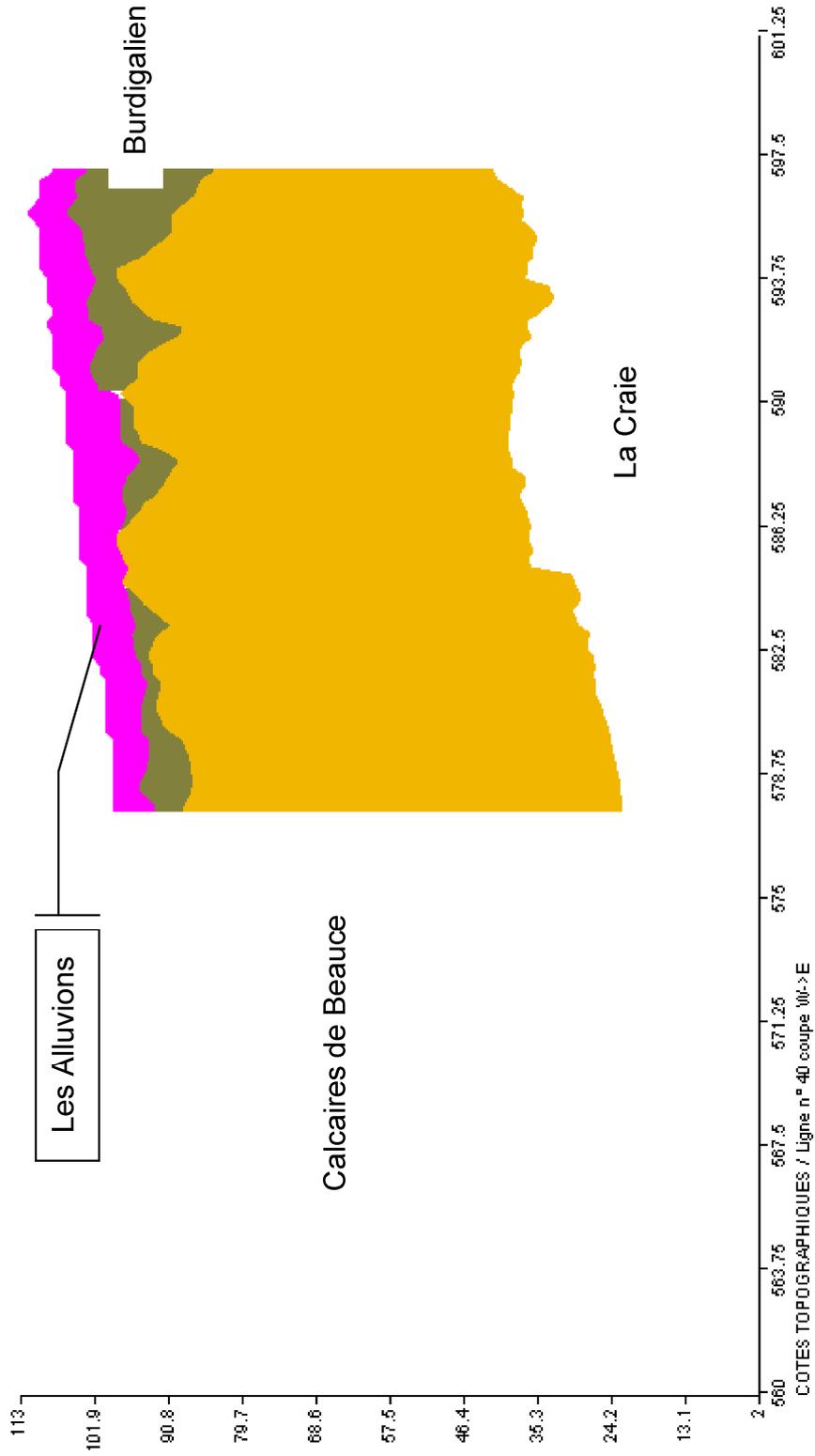


Fig. 37 - Coupe verticale selon la ligne 40 du modèle (abscisses en km, ordonnées en m NGF).

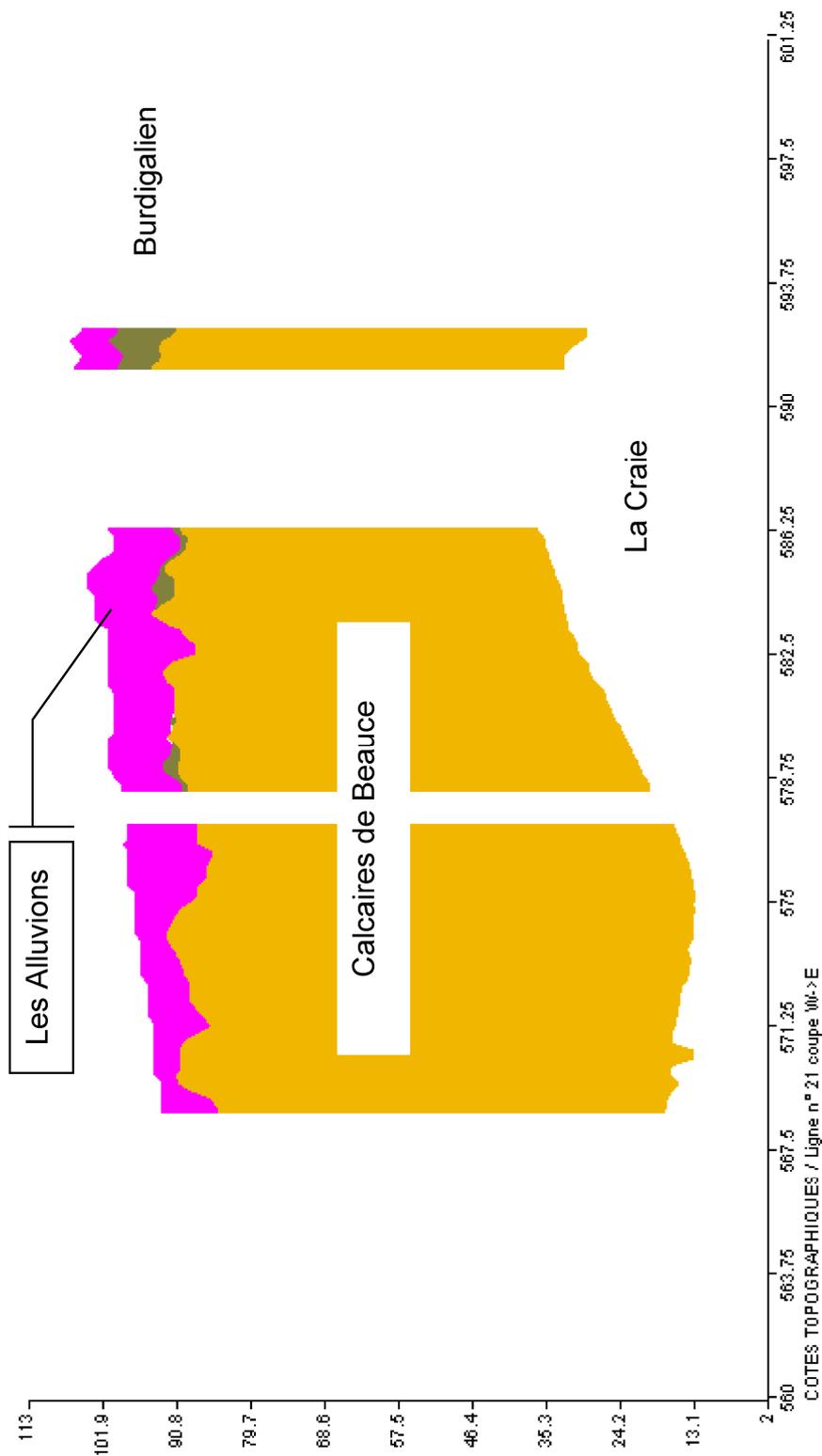


Fig. 38 . Coupe verticale selon la ligne 21 du modèle (abscisses en km, ordonnées en m NGF).

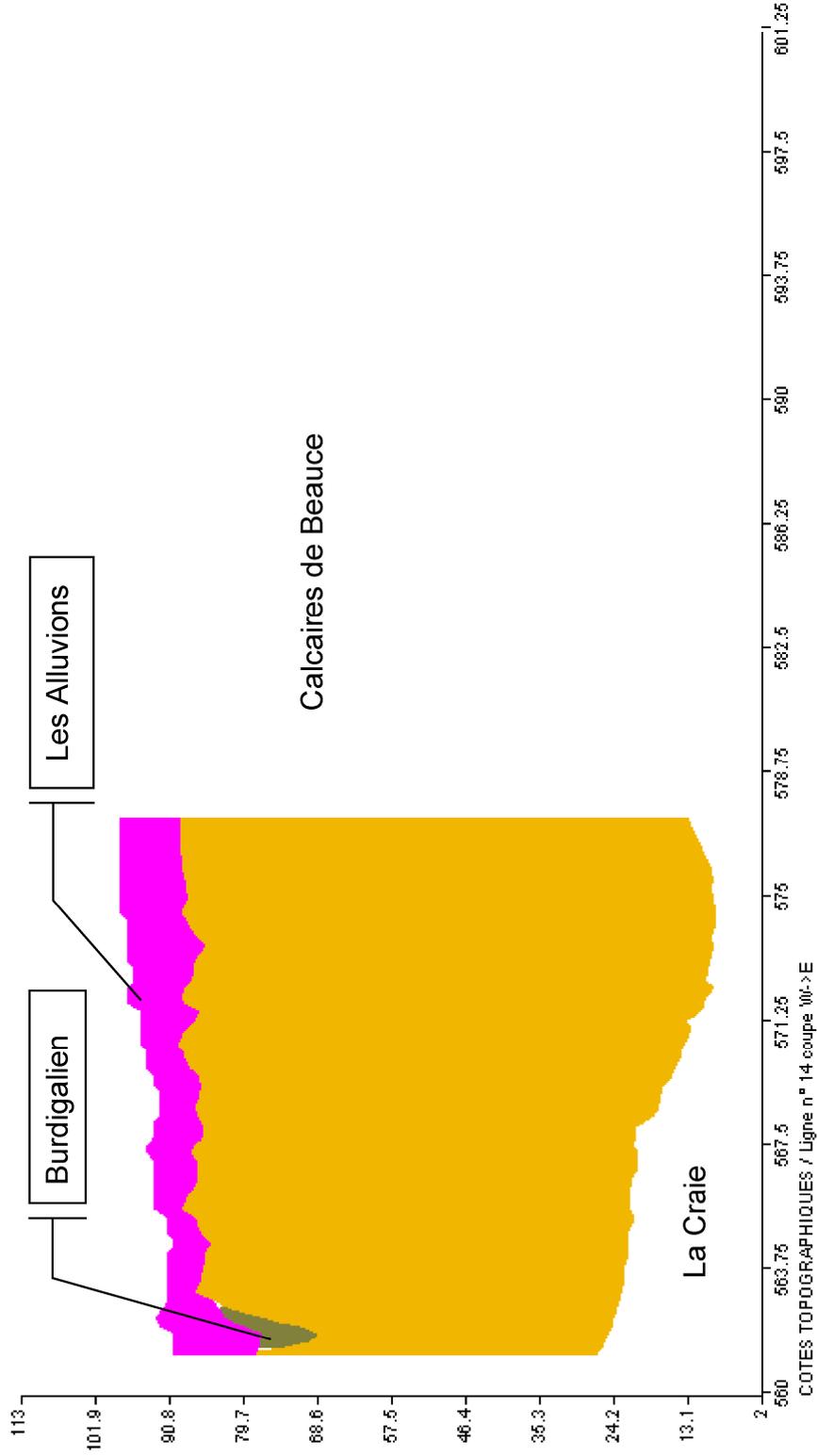


Fig. 39 - Coupe verticale selon la ligne 14 du modèle (abscisses en km, ordonnées en m NGF).

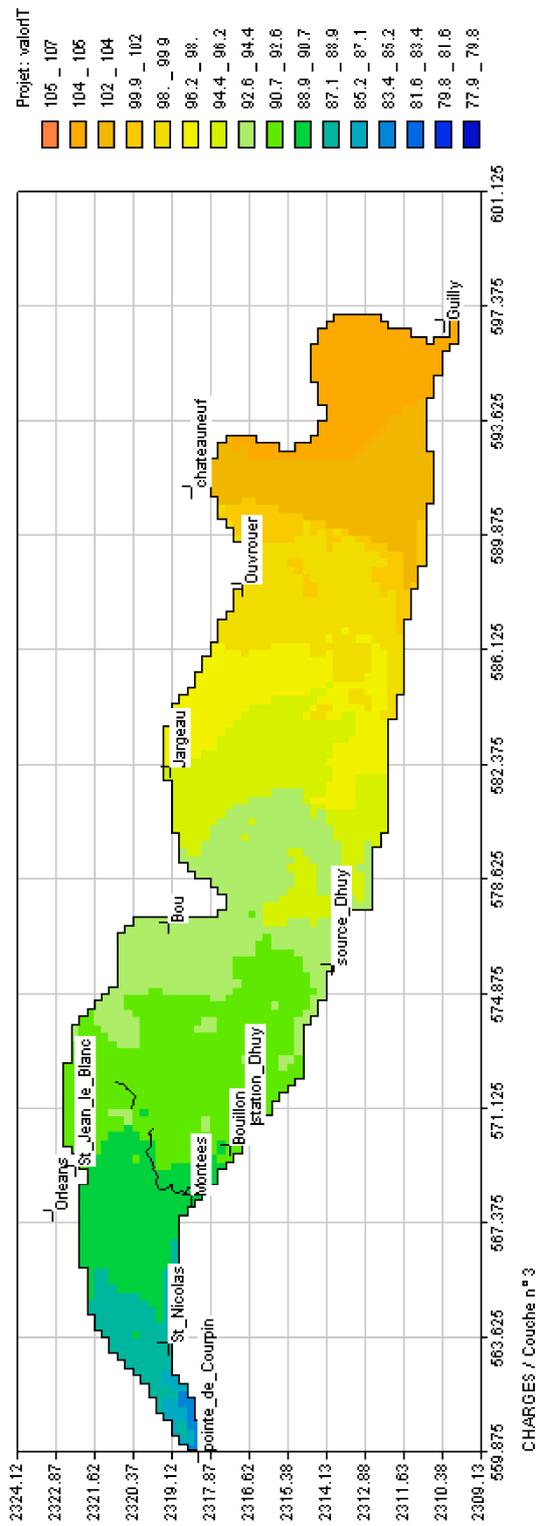


Fig. 41 - Piézométrie de référence : couche 3 (calcaires).

d) Données hydrologiques

Les données sont de type différent selon que l'on considère la Loire ou l'ensemble Dhuy-Loiret.

Loire

La Loire est découpée en cinq secteurs (fig. 25) chacun étant composé d'une suite de tronçons ; il y a au total 265 tronçons, un par maille du modèle traversé par le fleuve.

Pour chaque tronçon, il faut disposer des données suivantes :

- longueur du tronçon ;
- largeur du tronçon ;
- cote de la ligne d'eau de la Loire dans le tronçon ;
- cote du fond de la Loire dans le tronçon ;
- épaisseur de colmatage du lit de la Loire dans le tronçon ;
- perméabilité de colmatage du lit de la Loire dans le tronçon.

Les deux derniers paramètres ne sont pas connus et doivent être calés.

De plus, on doit connaître le débit de la Loire à l'entrée du modèle (à Bouteille).

La cote de l'eau et le débit d'entrée doivent être connus à l'étiage pour le calage en régime permanent et à chaque pas de temps de calcul du régime transitoire. De plus, on prendra en compte deux valeurs de largeur des tronçons :

- une valeur normale (largeur du lit mineur) ;
- une valeur supérieure pour rendre compte du débordement dans le lit majeur en période de crue exceptionnelle.

Dhuy-Loiret

Sur cette limite, on a choisi une condition de potentiel imposé ; il suffit donc de connaître la cote de l'eau dans ces rivières en étiage et à chaque pas de temps de calcul du régime transitoire.

La cote du fond de l'ensemble Dhuy-Loiret a été fournie par l'équipe Plan Loire Grandeur Nature ainsi que les niveaux en crue centennale et deux-centennale (ann. 1 et 2).

A la pointe de Courpin, (pk 21) la cote du fond du Loiret est 83,6 m NGF proche de celle de la Loire (en moyenne 83,5 m sur un profil transversal) et par ailleurs l'étiage de la Loire est donné à 84,28 m NGF. Par continuité, on en déduit que la hauteur d'eau dans le Loiret à l'étiage et à la pointe de Courpin est de 84,28 m – 83,5 m soit 78 cm.

Cette hauteur est considérée comme uniforme à l'étiage sur toute la ligne d'eau, on imposera donc un potentiel égal à ZF + 0,78 m NGF pour le calage en régime permanent.

Pour le calage en régime transitoire et la simulation des crues, il faudra tenir compte de la remontée de la Loire dans le Loiret.

6.2. CALAGE DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE DU VAL D'ORLÉANS

Comme indiqué au chapitre précédent, le calage du modèle numérique consiste à estimer aussi précisément que possible les paramètres physiques non directement accessibles à la mesure (perméabilité et coefficient d'emmagasinement des couches aquifères, coefficients d'échange avec les rivières) ou connus avec insuffisamment de précision (recharge).

Au cours de cette étape, on doit aussi tester et valider les différents choix effectués pendant la construction du modèle sur les conditions aux limites et les interactions entre couches (par exemple, faut-il considérer la couche 2 représentant le Burdigalien comme semi-perméable, c'est-à-dire autorisant les échanges verticaux par l'effet d'une drainance entre les deux aquifères des alluvions et des calcaires, ou comme pratiquement imperméable, permettant la mise en charge de la nappe des calcaires dans certaines conditions...).

Le calage du modèle du val d'Orléans se décompose en deux phases :

- le calage en régime permanent sur la piézométrie « moyenne » de 1966 intégrant des conditions d'étiage sur les rivières ;
- le calage en régime transitoire qui permet de prendre en compte l'inertie du système aquifère par le biais des coefficients d'emmagasinement, sur la crue de la Loire de décembre 1968 - janvier 1969 pour laquelle on dispose de chroniques piézométriques.

6.3. CALAGE EN RÉGIME PERMANENT

Le calage en régime permanent est une étape préliminaire au véritable calage qui ne peut se faire qu'en régime transitoire.

Il permet cependant de vérifier la validité de la zonation des perméabilités et des recharges et de tester, comme indiqué ci-dessus, différentes hypothèses sur les conditions aux limites et le mode de connexion entre couches.

6.3.1. Paramètres de calage

a) Zones de recharge

Deux zones de recharge sont conservées ; l'une pour les zones urbanisées (en blanc sur la figure 28), l'autre pour le reste du modèle. La valeur estimée pour la recharge de 150 mm/an est conservée partout pour le régime permanent sauf dans la zone urbanisée où elle est fixée à 75 mm/an.

b) Zones de perméabilités

Le calage des perméabilités aboutit à la zonation présentée aux figures 42 et 43. Les valeurs sont exprimés en 10^{-4} m/s.

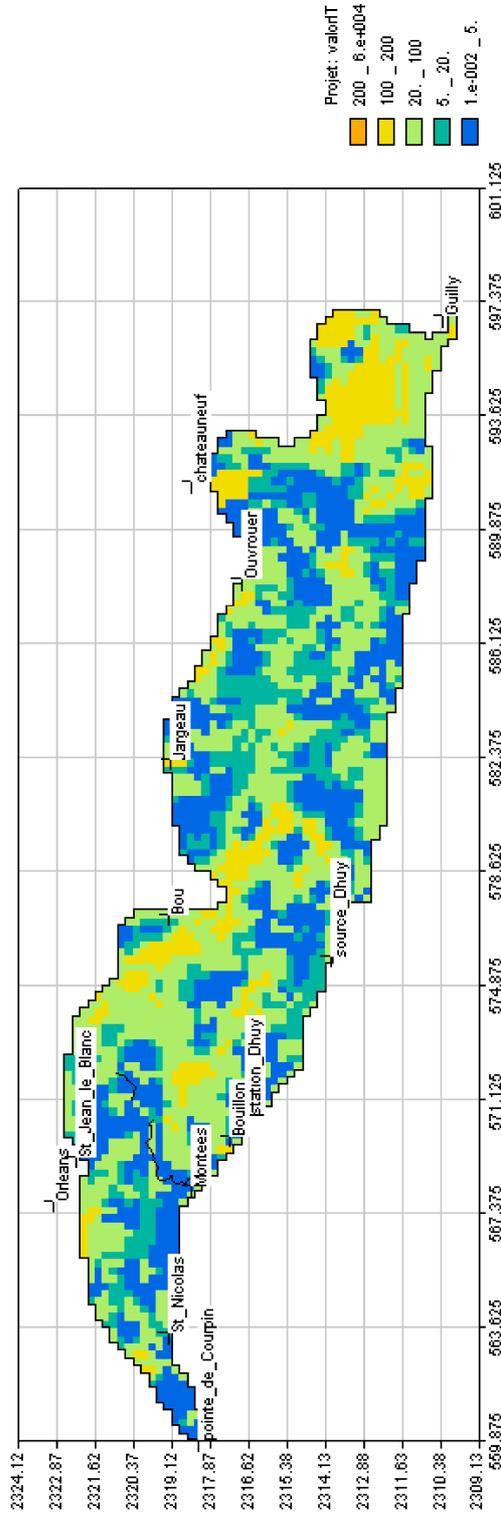


Fig. 42 - Zones de perméabilités en 10^{-4} m/s pour la couche 1 (alluvions).

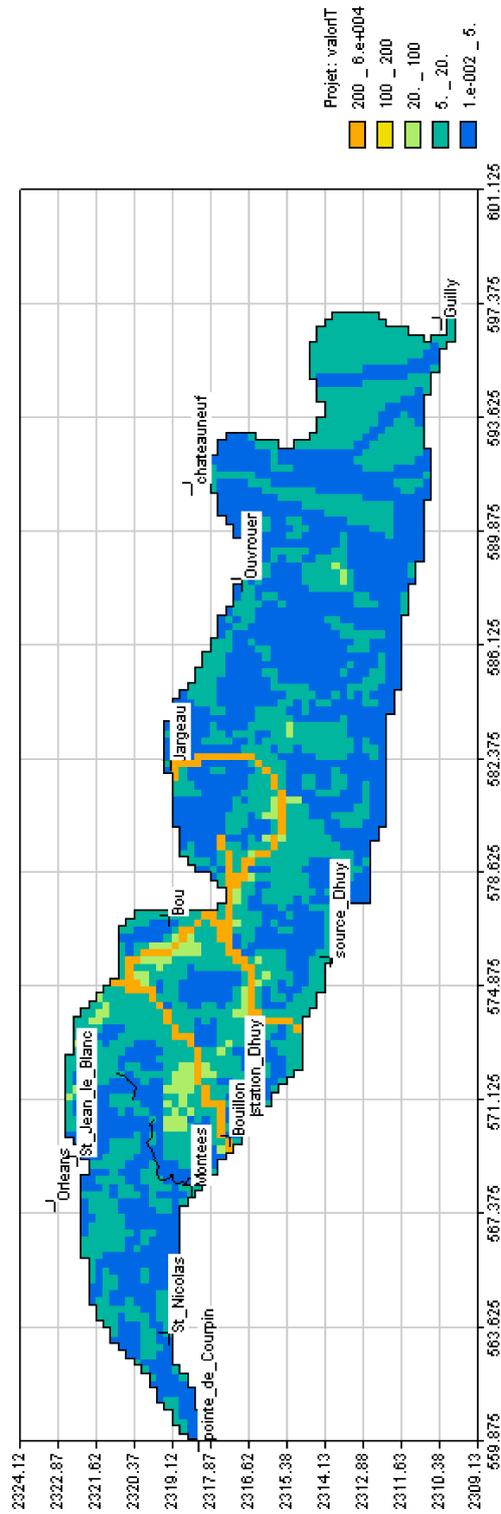


Fig. 43 - Zones de perméabilités en 10^{-4} m/s pour la couche 3 (calcaires).

Dans la couche 1 des alluvions, la classe la plus représentée est la classe 20 à 100 avec un maximum à 47.

Dans la couche 3 des calcaires, la classe la plus représentée est la classe 5 à 20 avec un maximum à 19. La classe 100 à 200 n'est pas représentée.

Par contre, pour pouvoir caler correctement le modèle, il a été nécessaire d'introduire des chenaux karstiques (classe 200 à 60 000) à la figure 43 ; la valeur de K retenue dans ces chenaux à la fin du calage en régime permanent est de 10 000 soit 1 m/s ; cette valeur qui n'a pas de signification physique dans un milieu poreux classique correspond à un artifice de calcul pour représenter les écoulements très rapides dans des chenaux karstiques dont on sait qu'ils existent réellement sans pouvoir préciser leur localisation exacte. Cet artifice numérique a d'ailleurs déjà été utilisé dans l'étude antérieure de Rousselot et Sinan (1974).

Les résultats du calage sont en bon accord avec ceux des études antérieures soit :

- alluvions : 10 à 120, 10^{-4} m/s pour Rousselot et Sinan,
- calcaires : 5 à 30, 10^{-4} m/s pour Rousselot et Sinan et 7 m/s dans les chenaux karstiques, 1 à 15, 10^{-4} m/s pour Filippi (1989).

c) Coefficients d'échange avec la Loire

Ils dépendent de deux paramètres de calage qui sont les épaisseurs et les perméabilités de colmatage du lit de la Loire.

A l'issue du calage en régime permanent, on retient une première valeur uniforme soit 1,5 m d'épaisseur et 10^{-7} m/s de perméabilité ; ces valeurs demandent à être affinées au cours du calage en régime transitoire.

d) Autres hypothèses testées

Au cours du calage, on a testé différentes hypothèses, en particulier pour tenter d'éviter l'introduction des chenaux karstiques pour lesquels la loi de Darcy, valable pour les milieux poreux équivalents, n'est pas vraiment applicable.

On a donc testé :

- le coefficient d'anisotropie verticale de chaque couche ; il est finalement pris égal à 0,1 pour toutes les couches ;
- la possibilité d'une drainance verticale à travers le Burdigalien ; cette hypothèse n'a pas été retenue ; le Burdigalien est donc considéré comme quasiment imperméable ;
- la condition à la limite à l'amont du Dhuy ; on a tenté de caler un flux entrant mais finalement on est revenu à la condition de potentiel imposé après avoir ajusté la charge sur les calcaires à partir de résultats antérieurs (Filippi, 1989).

De plus, une fois admis la nécessité de l'introduction d'un réseau karstique, on a testé différentes configurations de ce réseau.

6.3.2. Résultats

a) Carte des écarts sur la piézométrie

On présente aux figures 44 et 45, les cartes des écarts entre les piézométries simulée et observée, pour chaque couche de calcul.

On peut faire les observations suivantes :

- à l'exception de quelques zones limitées (en bleu foncé pour les valeurs négatives et orange pour les valeurs positives), les écarts restent partout acceptables (inférieurs à 1 m) étant donné les imprécisions sur la piézométrie observée ;
- le modèle est calé à mieux que 50 cm près sur une grande partie du domaine, en particulier la zone ouest sensible ;
- il est moins bien calé au voisinage de la limite sud-est du fait, d'une part des imprécisions sur la piézométrie observée, d'autre part de la condition à la limite à l'amont du Dhuy qu'il n'a pas été possible de représenter avec précision.

b) Bilan des flux

Le bilan des flux en régime permanent est présenté au tableau 11. On observe que :

- à l'étiage, les échanges entre la Loire et l'aquifère se font dans l'un ou l'autre sens ; ainsi de Guilly à Ouvrouer, le flux net est négatif c'est-à-dire que la Loire draine la nappe ; il en est de même de Sandillon (Bou) à la confluence. Par contre, entre Ouvrouer et Bou, la Loire alimente la nappe, principalement de Jargeau à Bou ;
- les flux sortant dans le Dhuy/Loiret sont faibles et proches de 0 ; c'est bien ce qui est observé à l'étiage.

6.4. CALAGE EN RÉGIME TRANSITOIRE

Pour le calage en régime transitoire, il est nécessaire de disposer de données complémentaires, en particulier d'historiques d'évolution de la piézométrie et d'historiques de variation des niveaux des rivières (Loire, Loiret et Dhuy).

De plus, il faut disposer des chroniques de pluie, d'ETP et des variations des prélèvements.

Au vu des données disponibles, on a décidé de caler le modèle sur une période allant des Basses Eaux d'août 1968 à la fin de la pointe de crue de décembre 1968 - janvier 1969.

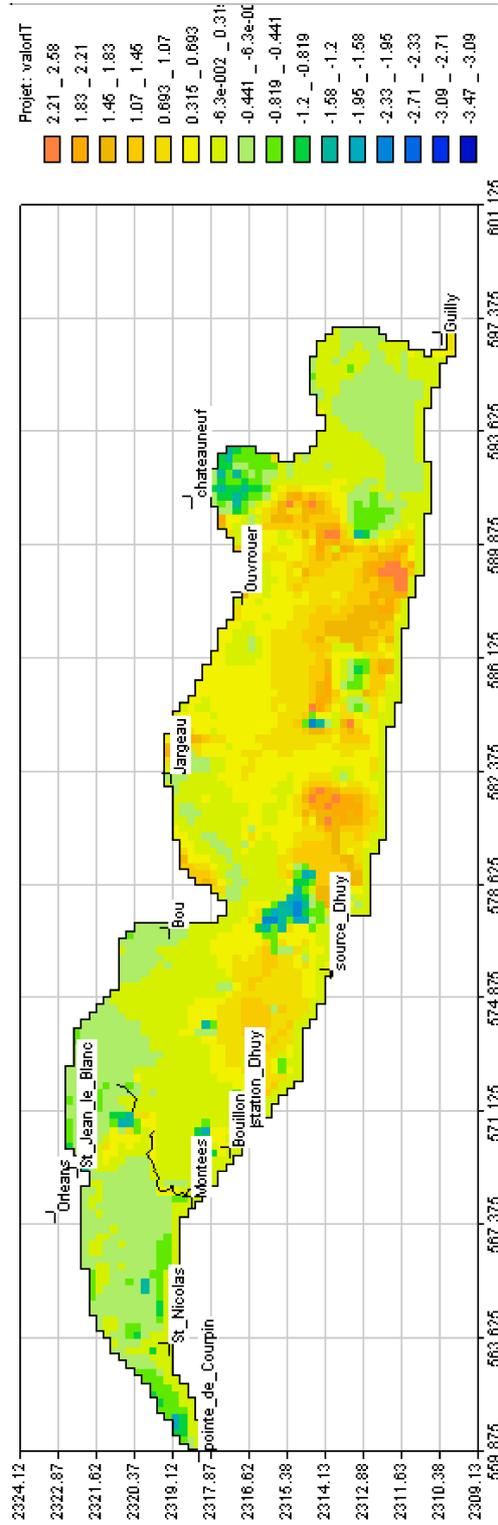


Fig. 44 - Calage en régime permanent : écarts entre charges simulées et observées dans la couche 1 (alluvions).

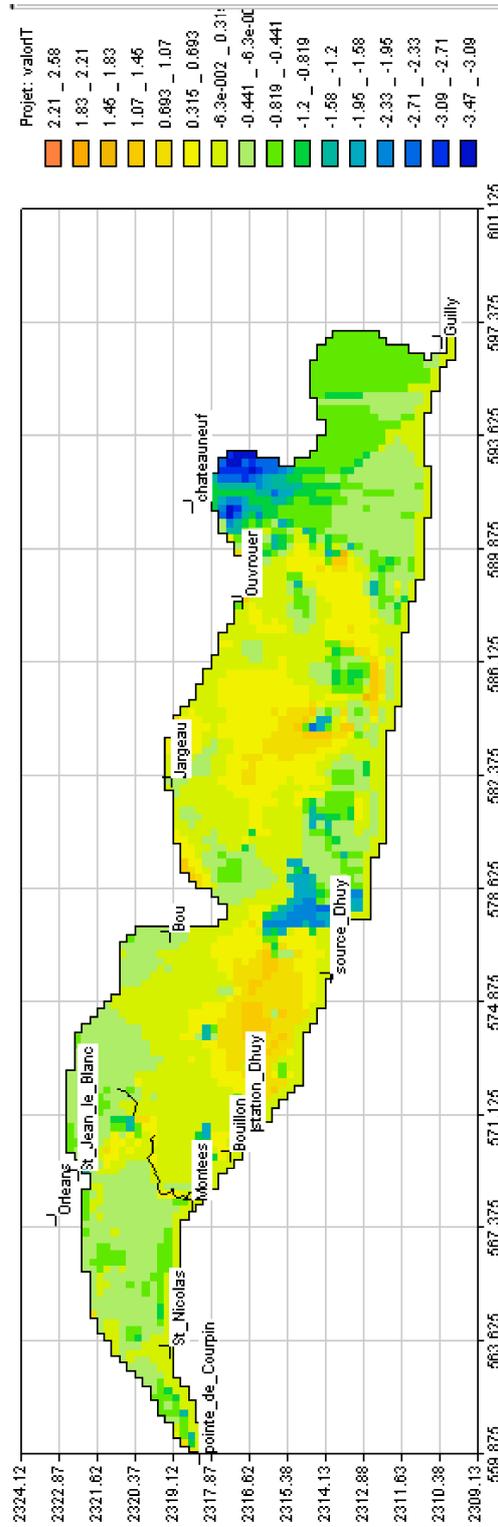


Fig. 45 - Calage en régime permanent : écarts entre charges simulées et observées dans la couche 3 (calcaires).

Modèle Val d'Orléans - 3 couches - Bilan global des flux - régime permanent

	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)
Limite H imposé sud	0,67	-0,73
Prélèvements		-0,99
Infiltration	0,83	
Loire->nappe	0,48	-0,25 total 0,23 entrant nappe (principalement secteur 3)
Total	1,97	-1,97

Détail Loire -> nappe

	Entrant nappe (m ³ /mois)	Sortant nappe (m ³ /mois)	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)	Net
Secteur 1 Guilly-Ouvrouer	7,27E+04	-2,31E+05	0,0276	-0,0877	-0,0601
Secteur 2 Ouvrouer- Jargeau	2,41E+05	-3,92E+02	0,0915	-0,0001	0,0914
Secteur 3 Jargeau-Sandillon	8,82E+05	-1,62E+04	0,3346	-0,0061	0,3284
Secteur 4 Sandillon-St Jean le Blanc	5,51E+04	-1,34E+05	0,0209	-0,0507	-0,0298
Secteur 5 St Jean- confluence	2,52E+03	-2,76E+05	0,0010	-0,1047	-0,1038
contrôle			0,4756	-0,2494	0,2262

Détail zones pot. Imposé

	Entrant nappe (m ³ /mois)	Sortant nappe (m ³ /mois)	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)	Net
Courpin -Bras des Montées (10+11+30+31)	6,71E+04	-9,80E+04	0,0255	-0,0372	-0,0117
Bras des Montées - Sce Bouillon (12+32)	1,28E+05	-7,37E+04	0,0487	-0,0280	0,0207
Sce Bouillon - Sce Dhuy (13+33)	7,10E+05	-1,20E+06	0,2692	-0,4535	-0,1843
Amont Sce Dhuy (14+34)	8,59E+05	-5,59E+05	0,3260	-0,2122	0,1138
contrôle			0,6694	-0,7309	-0,0615

Tabl. 11 - Bilan des flux en régime permanent.

6.4.1. Historiques utilisés

a) Chroniques piézométriques

Sur cette période, on dispose de quatre piézomètres décrits au tableau 12 :

INDICE	COMMUNE	LIEU DIT	PROFONDEUR (m/sol)	NIVEAUX CAPTÉS
03983X0157	Sandillon(forage)	La Féculerie	34,50	Calcaires
03984X0224	Jargeau (piézo.)	La Saussaie	8,50	Alluv. et Calc.
03991X0194	Ouvrouer (piézo.)	Les Chevalliers	8,20	Alluv. et Calc.
03991X0192	Sigloy (piézo.)	Le By 1	5,40	Alluvions

Tabl. 12 - Piézomètres disponibles pour le calage.

La localisation de ces piézomètres est indiquée à la figure 4.

À noter qu'on ne dispose d'aucune chronique piézométrique dans la partie ouest du modèle, par ailleurs zone sensible ; les valeurs de coefficients d'emmagasinement qui seront calées là où on dispose de suivi piézométrique devront donc être extrapolées à la partie ouest du modèle.

b) Variations des niveaux de la Loire

On dispose des niveaux de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire et Jargeau mesurés entre février 1968 et mars 1970, à des pas de temps variables. On utilise ces niveaux pour construire les lignes d'eau de la Loire, soit une valeur de cote dans chacun des 265 tronçons ; pour ce faire, on suppose que la Loire monte ou descend uniformément sur toute la ligne d'eau.

À chaque pas de temps de calcul du modèle, on fera lire une ligne d'eau correspondant aux nouvelles valeurs de la cote de la Loire.

c) Variations des débits de la Loire

Les débits de la Loire à l'entrée du modèle (Bouteille) sont lus à chaque pas de temps ; ils ne sont pas utilisés dans le calcul mais servent à contrôler les résultats numériques du calage en régime transitoire (on vérifie par exemple que le débit apporté en amont est suffisant pour alimenter les échanges simulés avec le système aquifère et qu'on ne vidange pas la Loire dans la nappe au cours du calage...).

d) Remontée de la Loire dans le Loiret

On tient compte des fluctuations de niveau à la pointe de Courpin pour faire remonter la Loire dans le Loiret, à chaque pas de temps de calcul.

e) Variations des prélèvements

En l'absence d'information précise sur les variations des prélèvements, on a conservé les valeurs utilisées pour le calage en régime permanent, c'est-à-dire les valeurs moyennes de l'année 2000. On a tenu compte de la saisonnalité des prélèvements pour l'irrigation que l'on a interrompue à fin septembre.

6.4.2. Discrétisation temporelle

Le calcul en régime transitoire nécessite de découper la période de calage en pas de temps de durée égale ou non. Dans le cas présent, la période de calage va du 4 août 1968 au 12 février 1969 ; on a choisi d'adapter le pas de temps aux fluctuations du niveau mesuré de la Loire soit de deux jours en période de montée rapide des niveaux (au voisinage de la pointe de crue) à quinze jours en période plus stationnaire.

Le tableau 13 résume les caractéristiques des pas de temps avec la valeur des paramètres hydroclimatiques qui servent à calculer les fluctuations de recharge.

Le code MARTHE effectue le bilan hydroclimatique à chaque pas de temps à partir de ces valeurs.

DATE	Nombre de jours sur la période	Numéro du pas	Durée cumulée (jours)	Moyenne de la pluie sur la période (mm)	Moyenne de l'ETP sur la période (mm)
04/08/1968	0	0	0		
12/08/1968	8	1	8	2,78	2,50
20/08/1968	8	2	16	2,78	3,54
29/08/1968	9	3	25	6,29	3,91
05/09/1968	7	4	32	4,03	2,01
12/09/1968	7	5	39	0,19	2,71
21/09/1968	9	6	48	1,36	1,83
28/09/1968	7	7	55	0,20	2,41
02/10/1968	4	8	59	0,70	1,83
10/10/1968	8	9	67	0,71	1,39
25/10/1968	15	10	82	0,35	0,94
31/10/1968	6	11	88	0,05	1,23
07/11/1968	7	12	95	1,57	0,70
14/11/1968	7	13	102	0,00	0,51
21/11/1968	7	14	109	2,01	0,47
02/12/1968	11	15	120	0,15	0,51
14/12/1968	12	16	132	0,33	0,30
22/12/1968	8	17	140	2,00	0,51
28/12/1968	6	18	146	2,55	0,45
30/12/1968	2	19	148	1,05	0,15
04/01/1969	5	20	153	0,00	0,16
13/01/1969	9	21	162	1,27	0,76
17/01/1969	4	22	166	1,95	0,68
23/01/1969	6	23	172	0,00	0,68
28/01/1969	5	24	177	1,40	0,54
12/02/1969	15	25	192	0,50	0,69

Tabl. 13 - Discrétisation temporelle pour le calage en régime transitoire.

À chaque pas de temps, en plus des paramètres hydroclimatiques, le code lit les autres valeurs modifiées soit :

- la ligne d'eau de la Loire ;
- le débit de la Loire à l'entrée du modèle ;
- les niveaux dans le Loiret.

Toutes ces valeurs sont celles mesurées à **la fin du pas de temps précédent**.

Au pas de temps 8 (début octobre) le fichier des débits est modifié (arrêt des prélèvements pour l'irrigation).

6.4.3. Paramètres de calage

Le calage en transitoire sur la période allant du 4 août 1968 au 12 février 1969 a permis d'affiner les valeurs des coefficients d'échange avec la Loire et de la « perméabilité » des chenaux karstiques ainsi que d'estimer les coefficients d'emmagasinement libres et captifs pour chacune des deux couches du modèle.

a) Coefficients d'échange avec la Loire

Ils sont déterminés par les épaisseurs et perméabilités de colmatage du lit par tronçon. Le flux d'échange entre la Loire et la nappe est proportionnel au rapport perméabilité/épaisseur.

Le calage indique que les échanges sont plus forts (perméabilités plus grandes, épaisseurs plus faibles) dans la zone située entre Châteauneuf-sur-Loire (piézomètre de Sigloy) et la boucle de Bou.

Ceci correspond bien à ce qu'on sait des zones de pertes de la Loire dans ce secteur.

b) Amélioration de la carte des perméabilités

À l'issue de cette étape du calage, la zonation des perméabilités n'est pas sensiblement modifiée par rapport aux résultats présentés aux figures 42 et 43.

La perméabilité des chenaux karstiques est augmentée de 1 m/s à 5 m/s.

c) Zonation des coefficients d'emmagasinement

Si la perméabilité caractérise la capacité du milieu poreux saturé à favoriser l'écoulement, le coefficient d'emmagasinement caractérise sa capacité à stocker et à restituer l'eau.

Dans le modèle, il faut prendre en compte deux sortes de coefficient d'emmagasinement : le coefficient en nappe libre et le coefficient en nappe captive puisque la couche des calcaires peut se mettre en charge sous le Burdigalien :

- en nappe libre, le coefficient d'emménagement est proche de la porosité efficace de la formation exprimée en % ;
- en nappe captive, il caractérise la quantité d'eau que l'on peut extraire en décompressant la formation saturée ; dans le modèle, on considère en fait le coefficient d'emménagement spécifique, exprimé en m^{-1} qui correspond à la proportion d'eau récupérée, rapportée à une hauteur unité de formation saturée.

Le calage conduit à une valeur de $10^{-7} m^{-1}$ du coefficient d'emménagement spécifique S_S partout dans le domaine sauf dans les chenaux karstiques où il est calé à $10^{-9} m^{-1}$.

En ce qui concerne l'emménagement libre S_L , on présente la zonation résultant du calage aux figures 46 et 47. On observe que :

- pour la couche des Alluvions, $S_L = 0.1 \%$ dans la zone centrale d'intercommunication avec les calcaires et $0,5 \%$ ailleurs ;
- pour les Calcaires, $S_L = 0,1 \%$ dans les chenaux karstiques et 1% ailleurs.

6.4.4. Résultats

a) Cartes de la piézométrie en crue

Les figures 48 et 49 présentent les cartes de charge calculée à la pointe de crue (pas 20 = 4/1/69) avec une échelle de couleur identique aux cartes piézométriques de références (fig. 40 et 41) pour comparaison. En fait, pour les alluvions, la charge dépasse 110 m sur quelques mailles à l'extrême est du modèle.

Pour cette crue de 1968, les débordements sont peu importants limités à huit mailles à la pointe de Courpin.

b) Bilan des flux en crue

Le bilan des flux en crue est présenté au tableau 14. On observe que :

- à la différence de l'étiage, la Loire alimente la nappe sur toute la limite du domaine ; le débit moyen d'échange au cours du pas de temps de durée égale à 5 jours reste assez faible soit environ $2,5 m^3/s$;
- les flux sortant dans le Loiret/Dhuy sont de l'ordre de $1 m^3/s$.

c) Historiques de charge

On présente aux figures 54 à 57 les historiques d'évolution de charge aux quatre points d'observation (Sandillon, Jargeau, Ouvrouer, Sigloy).

Les courbes observées sont en bleu (trait gras) et les simulées en rose (trait fin). On observe que :

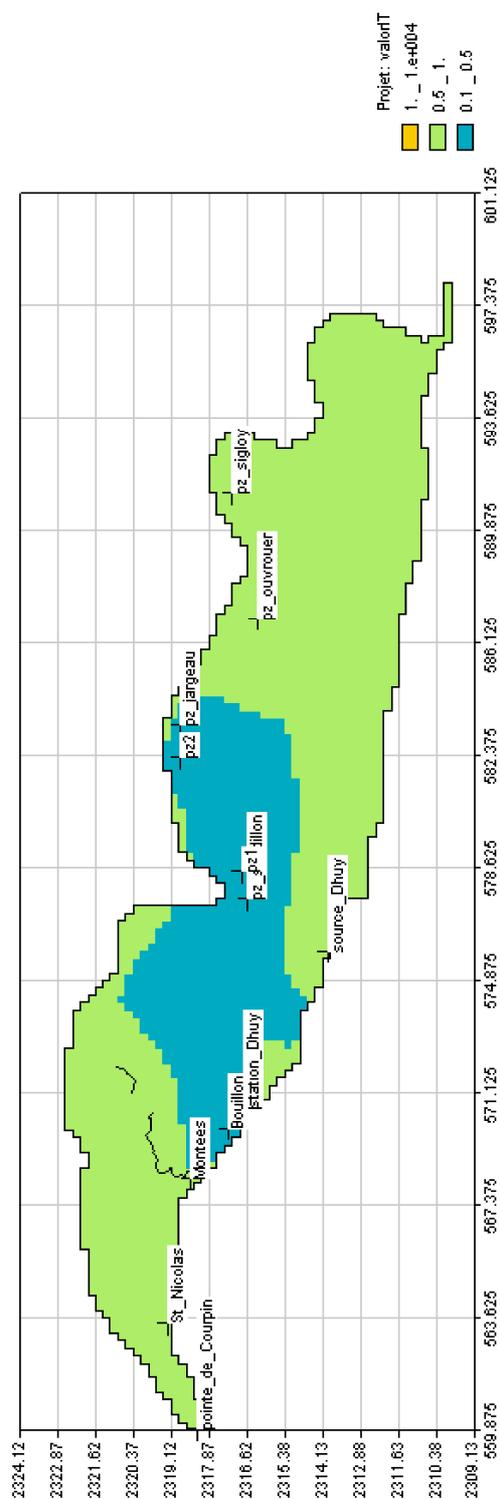


Fig. 46 - Calage en régime transitoire : zones de coefficient d'emmagasinement libre pour la couche 1 (alluvions) (valeurs en % données par la borne inférieure).

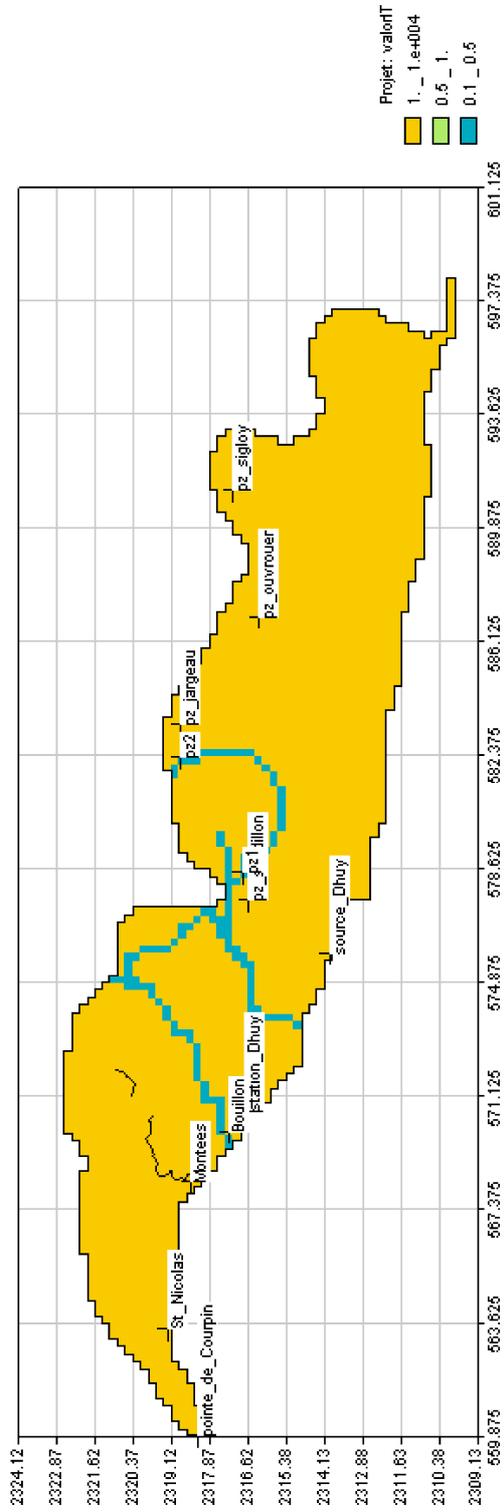


Fig. 47 - Calage en régime transitoire : zones de coefficient d'emmagasinement libre pour la couche 3 (calcaires) (valeurs en % données par la borne inférieure).

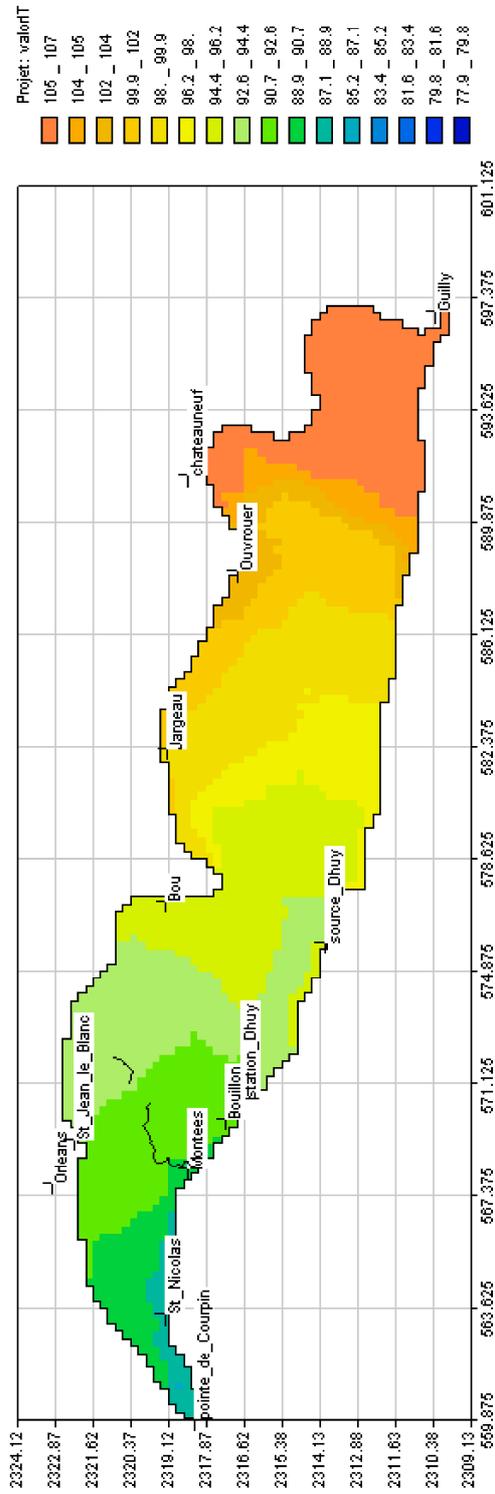


Fig. 48 - Calage en régime transitoire : piézométrie en crue le 04 janvier 1969 (pas 20 du tableau 13) couche 1 (alluvions).

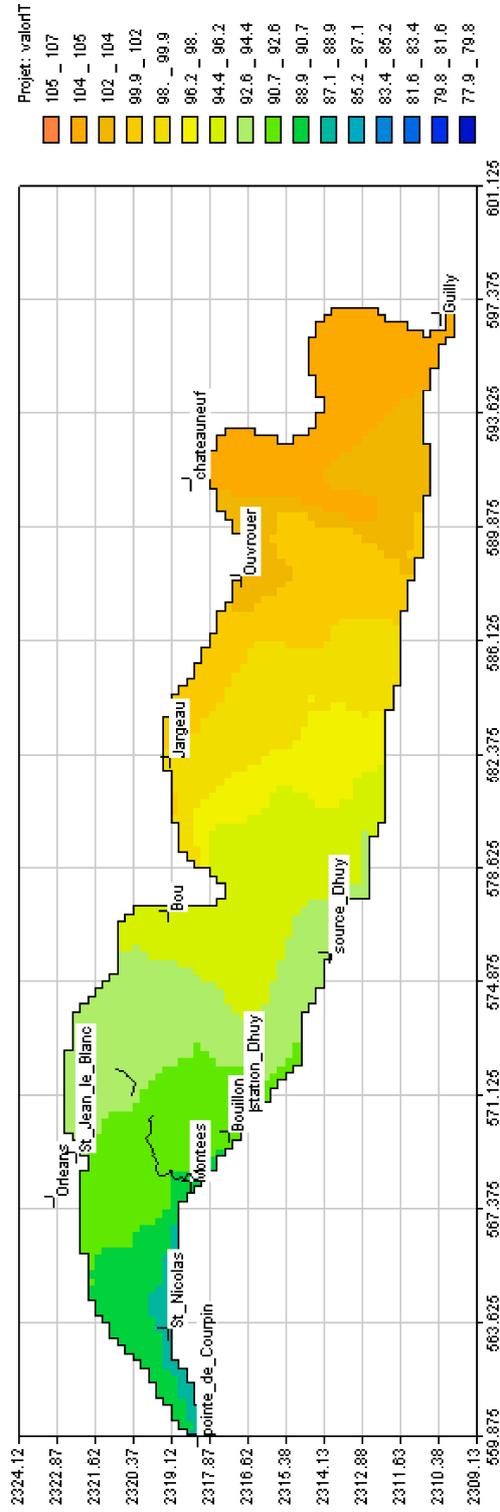


Fig. 49 - Calage en régime transitoire : piézométrie en crue le 04 janvier 1969 (pas 20 du tableau 13) couche 3 (calcaires).

Modèle Val d'Orléans - 3 couches - Bilan des flux en crue (4/1/69)

	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)
Limite H imposé sud	0,50	-1,66
Prélèvements		-0,41
Infiltration	0,00	
Débordement		-0,08
Loire->nappe	2,48	0,00
		total 2,48 entrant nappe (principalement secteur 3)
Total	2,98	-2,14
Différence (stockage)	0,84	

Détail Loire -> nappe

	Entrant nappe (m ³ /mois)	Sortant nappe (m ³ /mois)	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)	Net
Secteur 1 Guilly-Ouvrouer	1,00E+06	0	0,3795	0,0000	0,3795
Secteur 2 Ouvrouer- Jargeau	8,96E+05	0	0,3400	0,0000	0,3400
Secteur 3 Jargeau-Sandillon	3,25E+06	0	1,2341	0,0000	1,2341
Secteur 4 Sandillon-St Jean le Blanc	8,21E+05	0	0,3116	0,0000	0,3116
Secteur 5 St Jean- confluence	5,68E+05	0	0,2155	0,0000	0,2155
contrôle			2,4806	0,0000	2,4806

Détail zones pot. Imposé

	Entrant nappe (m ³ /mois)	Sortant nappe (m ³ /mois)	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)	Net
Courpin -Bras des Montées (10+11+30+31)	5,17E+04	-3,14E+05	0,0196	-0,1190	-0,0994
Bras des Montées - Sce Bouillon (12+32)	0,00E+00	-3,29E+05	0,0000	-0,1250	-0,1250
Sce Bouillon - Sce Dhuy (13+33)	5,84E+05	-2,84E+06	0,2218	-1,0783	-0,8566
Amont Sce Dhuy (14+34)	6,83E+05	-8,82E+05	0,2592	-0,3345	-0,0753
contrôle			0,5006	-1,6569	-1,1563

Tabl. 14 - Bilan des flux en crue le 4 janvier 1969.

- l'allure générale des fluctuations observées est assez bien restituée sauf pour le piézomètre de Sigloy dont le comportement observé est difficilement compréhensible et impossible à modéliser correctement ;
- les points de départ des courbes simulées (régime permanent) sont assez fortement décalés par rapport aux points de départ des courbes observées (début août 1968) ; ceci vient du fait que le régime permanent simulé ne correspond pas à une situation observée d'étiage de la nappe mais représente une « moyenne » entre les HE et les BE de 1966.

Pour avoir un meilleur calage, il faudrait une meilleure représentation du point de départ des courbes ; ceci pourrait être obtenu de différentes manières :

- soit en disposant de la piézométrie mesurée en début août 1968 ainsi que de paramètres hydroclimatiques tels que le déficit du sol à cette date et en calant le permanent sur cette carte ;
- soit en initialisant le modèle sur plusieurs cycles hydrologiques à partir du calage actuel en régime permanent sur une piézométrie « moyenne » ; ceci nécessiterait qu'on dispose des chroniques nécessaires sur tous ces cycles (en particulier les lignes d'eau de la Loire).

En tout état de cause, l'objectif du calage en transitoire est ici de caler les paramètres hydrodynamiques, en particulier les coefficients d'emménagement.

Cet objectif est atteint lorsque l'on restitue correctement l'allure des fluctuations. C'est le cas, après une mise en régime d'environ deux mois, pour le piézomètre d'Ouvrouer.

6.5. SIMULATION DE LA CRUE CENTENNALE

6.5.1. Données complémentaires et démarche suivie

Les données nécessaires à la modélisation de la crue centennale sont déduites des hydrogrammes fournis par l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, calculés à l'aide d'un modèle hydraulique HYDRATEC sur une durée de 400 heures.

a) Hydrogramme de crue centennale

La figure 50 présente l'hydrogramme de la crue centennale au pont Thinat avec le découpage en pas de temps de 12 heures. On observe qu'il y a 12 pas de 12 heures pour passer de la cote 93,62 m à la cote 93,12 m NGF au pont Thinat.

Or lors de la crue de 1968, la cote au pont Thinat était :

- 93,40 m le 28 décembre 1968,
- 94,24 m le 30 décembre 1968,
- 92,08 m le 4 janvier 1969.

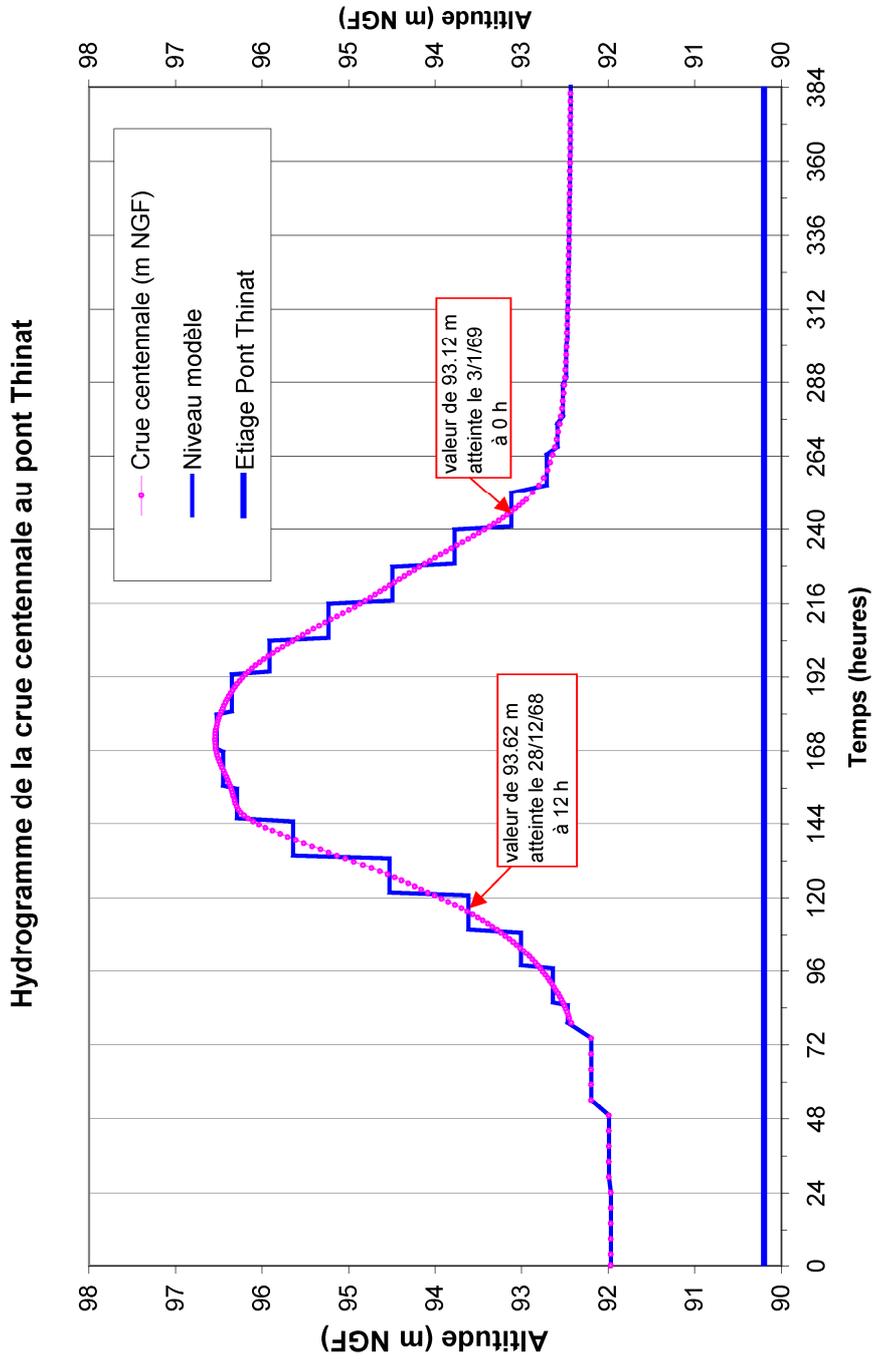


Fig. 50 - Hydrogramme de crue centennale au pont Thinat et découpage pour le modèle.

On se propose donc de raccorder la simulation de la crue centennale sur les résultats du calage de la crue de 1968 de la façon suivante :

- le 28 décembre 1968 à 0 h, cote 93,40 m : initialisation avec les résultats du calage en régime transitoire ;
- du 28 décembre 1968 à 12 h, cote 93,62 m au 3 janvier 1969 à 0 h, cote 93,12 m : simulation de la crue centennale au pas de 12 heures ;
- à partir du 4 janvier 1969, raccordement sur la descente de la crue de 1968.

b) Discrétisation temporelle

Le tableau 15 résume les caractéristiques des pas de temps avec les valeurs des paramètres hydroclimatiques qui servent à calculer les fluctuations de recharge.

En ce qui concerne ces données de pluie et d'ETP pendant la crue centennale, on conserve les valeurs observées en décembre 1968 - janvier 1969.

Pendant les 12 pas de temps de la crue centennale, on modifie la largeur du lit de la Loire (passage du lit mineur au lit majeur).

DATE		Nombre de jours sur la période	Numéro de pas	Durée cumulée (jours)	Moyenne de la pluie sur la période (mm)	Moyenne de l'ETP sur la période (mm)
28/12/1968	0 heure	0,0	0	0,0		
28/12/1968	12 heures	0,5	1	0,5	1,00	0,30
29/12/1968	0 heure	0,5	2	1,0	2,10	0,30
29/12/1968	12 heures	0,5	3	1,5	2,10	0,30
30/12/1968	0 heure	0,5	4	2,0	0,00	0,00
30/12/1968	12 heures	0,5	5	2,5	0,00	0,00
31/12/1968	0 heure	0,5	6	3,0	0,00	0,10
31/12/1968	12 heures	0,5	7	3,5	0,00	0,10
01/01/1969	0 heure	0,5	8	4,0	0,00	0,10
01/01/1969	12 heures	0,5	9	4,5	0,00	0,10
02/01/1969	0 heure	0,5	10	5,0	0,00	0,10
02/02/1969	12 heures	0,5	11	5,5	0,00	0,10
03/01/1969		0,5	12	6,0	0,00	0,10
04/01/1969		1,0	13	7,0	0,00	0,40
13/01/1969		9,0	14	16,0	1,27	0,76
17/01/1969		4,0	15	20,0	1,95	0,68
23/01/1969		6,0	16	26,0	0,00	0,68
28/01/1969		5,0	17	31,0	1,40	0,54
12/02/1969		15,0	18	46,0	0,50	0,69

Tabl. 15 - Discrétisation temporelle pour la simulation de la crue centennale.

À chaque pas de temps, comme pour le calage en régime transitoire, le code lit :

- la ligne d'eau de la Loire ;
- le débit de la Loire à l'entrée du modèle ;
- les niveaux dans le Loiret dans lequel on fait remonter la Loire à partir de la pointe de Courpin.

Toutes ces valeurs sont celles mesurées à **la fin du pas de temps précédent**.

6.5.2. Résultats

a) Cartes de la piézométrie en crue centennale

Les figures 51 et 52 présentent les cartes de charge calculée au maximum de la crue de la Loire (pas 7) avec une échelle de couleur identique aux cartes piézométriques de références (fig. 40 et 41) pour comparaison. En fait, pour les alluvions, la charge dépasse 110 m sur quelques mailles à l'extrême est du modèle.

Pour cette crue centennale, les débordements affectent 47 mailles qui sont visualisées en rouge à la figure 53.

b) Bilan des flux en crue centennale

Le bilan des flux au maximum de la crue centennale est présenté au tableau 16. On observe que :

- pendant ce pas de temps de 12 heures, la Loire alimente la nappe à hauteur de près de $10 \text{ m}^3/\text{s}$;
- le débit de débordement est d'environ $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- entre la pointe de Courpin et le bras des Montées, le flux net est positif du Loiret vers la nappe pour $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

c) Historiques de charge

On présente aux figures 54 à 57 les historiques d'évolution de charge aux quatre points d'observation (Sandillon, Jargeau, Ouvrouer, Sigloy).

La courbe simulée de la crue centennale, en vert, est surimposée sur la courbe en rose du calage en transitoire. On observe que les piézomètres de Jargeau, Sigloy sont limités dans leur montée du fait du débordement de la nappe.

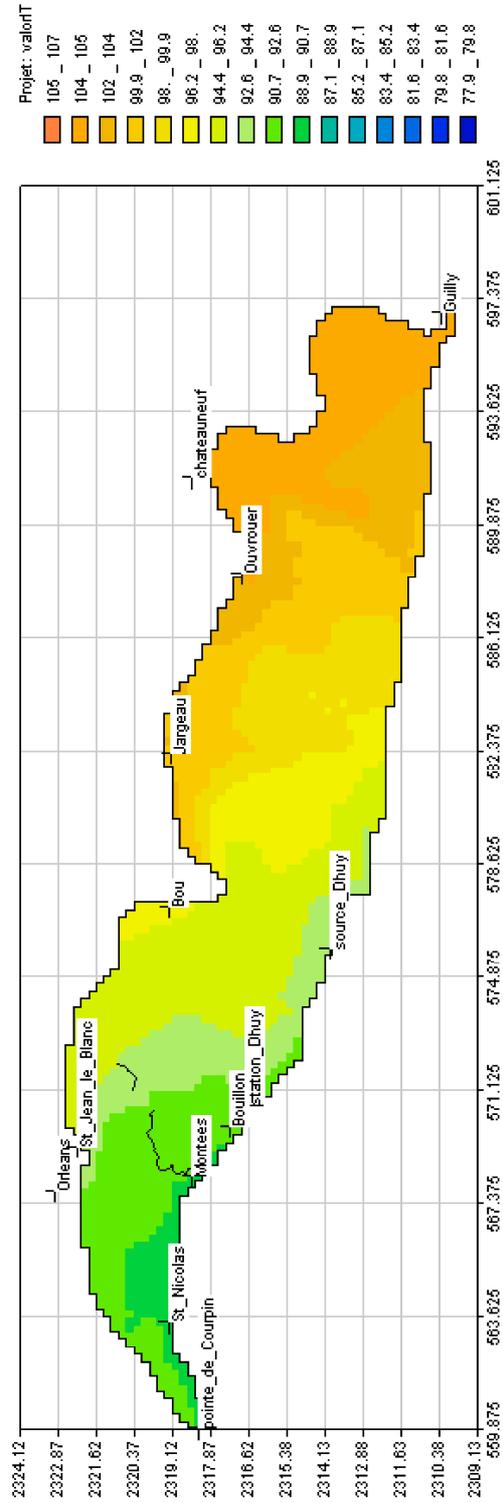


Fig. 52 - Simulation de la crue centennale : piézométrie au maximum de la crue de la Loire (pas 7 du tableau 15) couche 3 (calcaires).

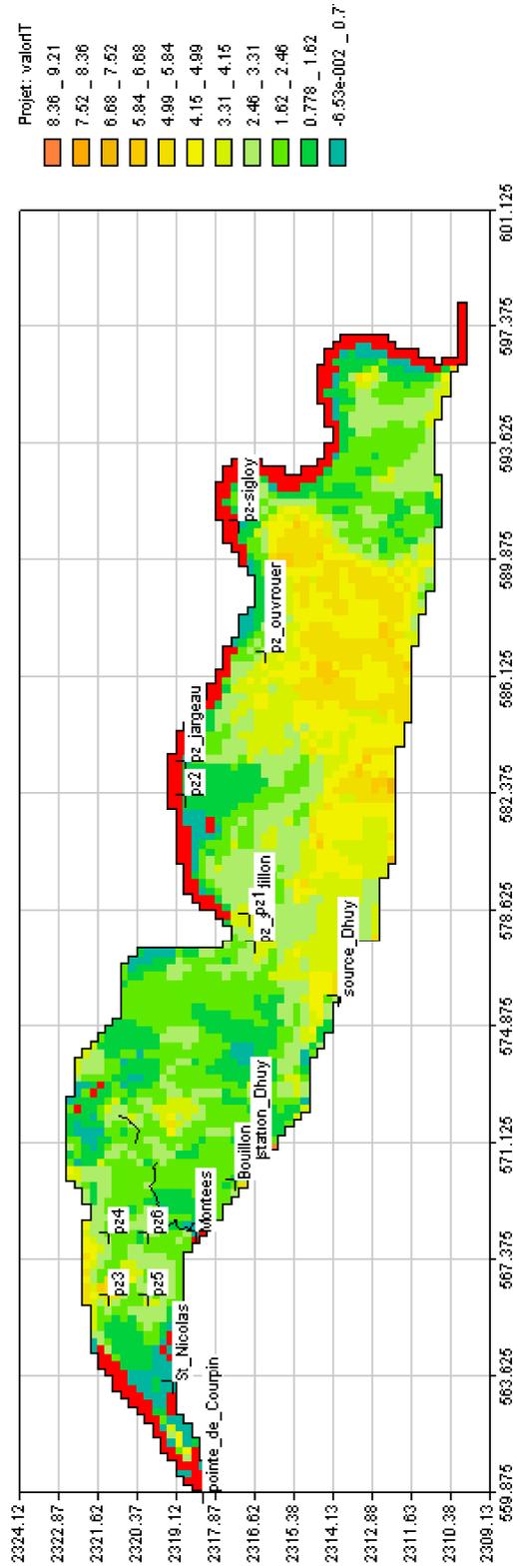


Fig. 53 - Simulation de la crue centennale (pas 7 du tableau 15) : carte de la profondeur de la nappe en crue (dans la zone rouge, la nappe déborde).

Modèle Val d'Orléans - 3 couches - Bilan des flux en crue centennale

	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)
Limite H imposé sud	0,74	-2,38
Prélèvements		-0,41
Infiltration	0,00	
Débordement		-5,61
Loire->nappe	9,82	0,00
		total 9.82 entrant nappe (principalement secteur
Total	10,55	-8,39
Différence (stockage)	2,16	

Détail Loire -> nappe

	Entrant nappe (m ³ /mois)	Sortant nappe (m ³ /mois)	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)	Net
Secteur 1 Guilly-Ouvrouer	5,51E+06	-1,12E+02	2,0909	0,0000	2,0909
Secteur 2 Ouvrouer- Jargeau	2,46E+06	0	0,9316	0,0000	0,9316
Secteur 3 Jargeau-Sandillon	1,43E+07	0	5,4076	0,0000	5,4076
Secteur 4 Sandillon-St Jean le Blanc	2,10E+06	0	0,7961	0,0000	0,7961
Secteur 5 St Jean- confluence	1,55E+06	0	0,5886	0,0000	0,5886
contrôle			9,8148	0,0000	9,8148

Détail zones pot. Imposé

	Entrant nappe (m ³ /mois)	Sortant nappe (m ³ /mois)	Entrant nappe (m ³ /s)	Sortant nappe (m ³ /s)	Net
Courpin -Bras des Montées (10+11+30+31)	7,28E+05	-7,87E+04	0,2764	-0,0299	0,2466
Bras des Montées - Sce Bouillon (12+32)	0,00E+00	-5,73E+05	0,0000	-0,2175	-0,2175
Sce Bouillon - Sce Dhuy (13+33)	5,39E+05	-4,28E+06	0,2046	-1,6234	-1,4188
Amont Sce Dhuy (14+34)	6,76E+05	-1,33E+06	0,2566	-0,5046	-0,2481
contrôle			0,7376	-2,3754	-1,6378

Tabl. 16 - Bilan des flux au maximum de la crue centennale

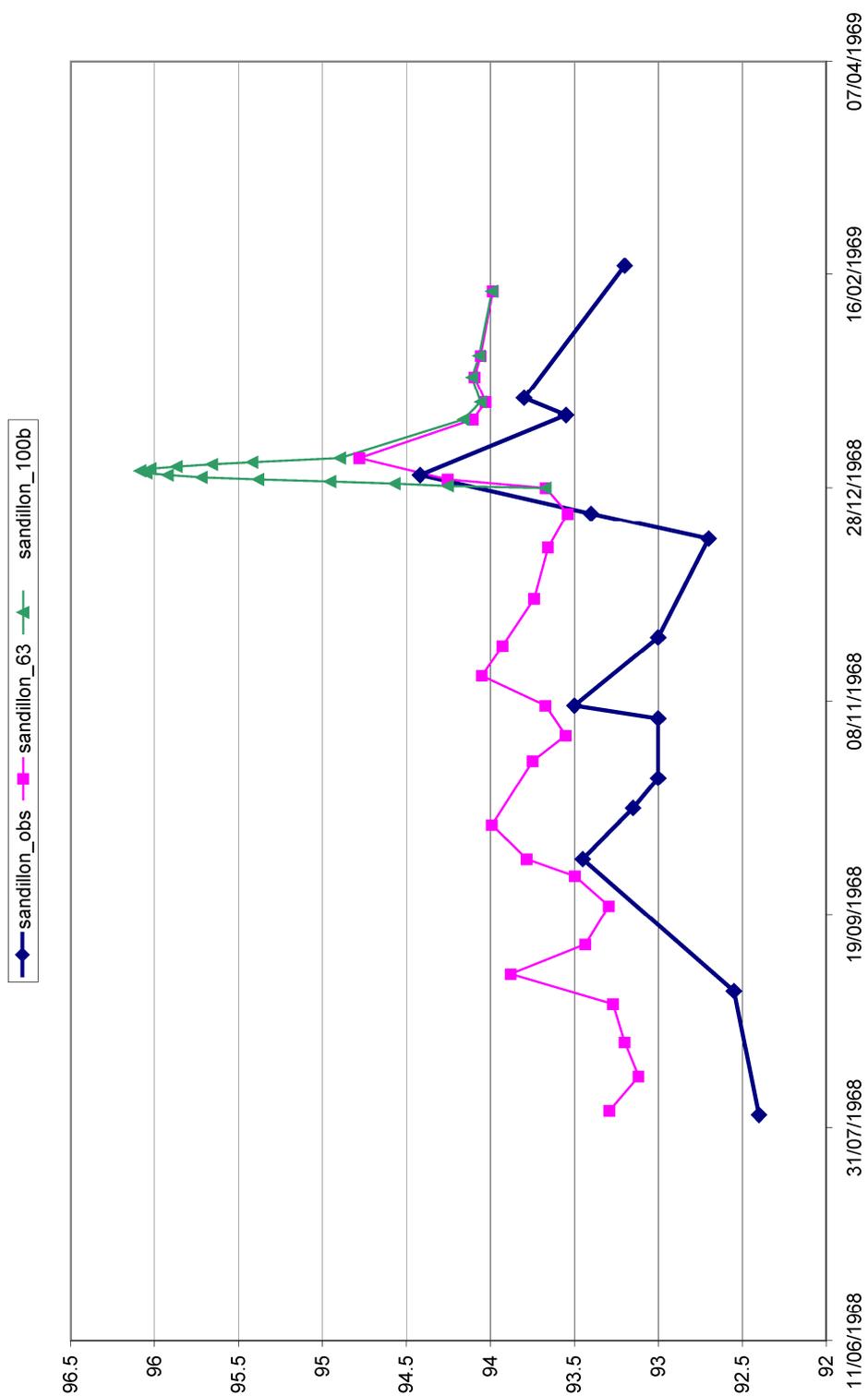


Fig. 54 - Forage de Sandillon : en vert, simulation de la crue centennale.

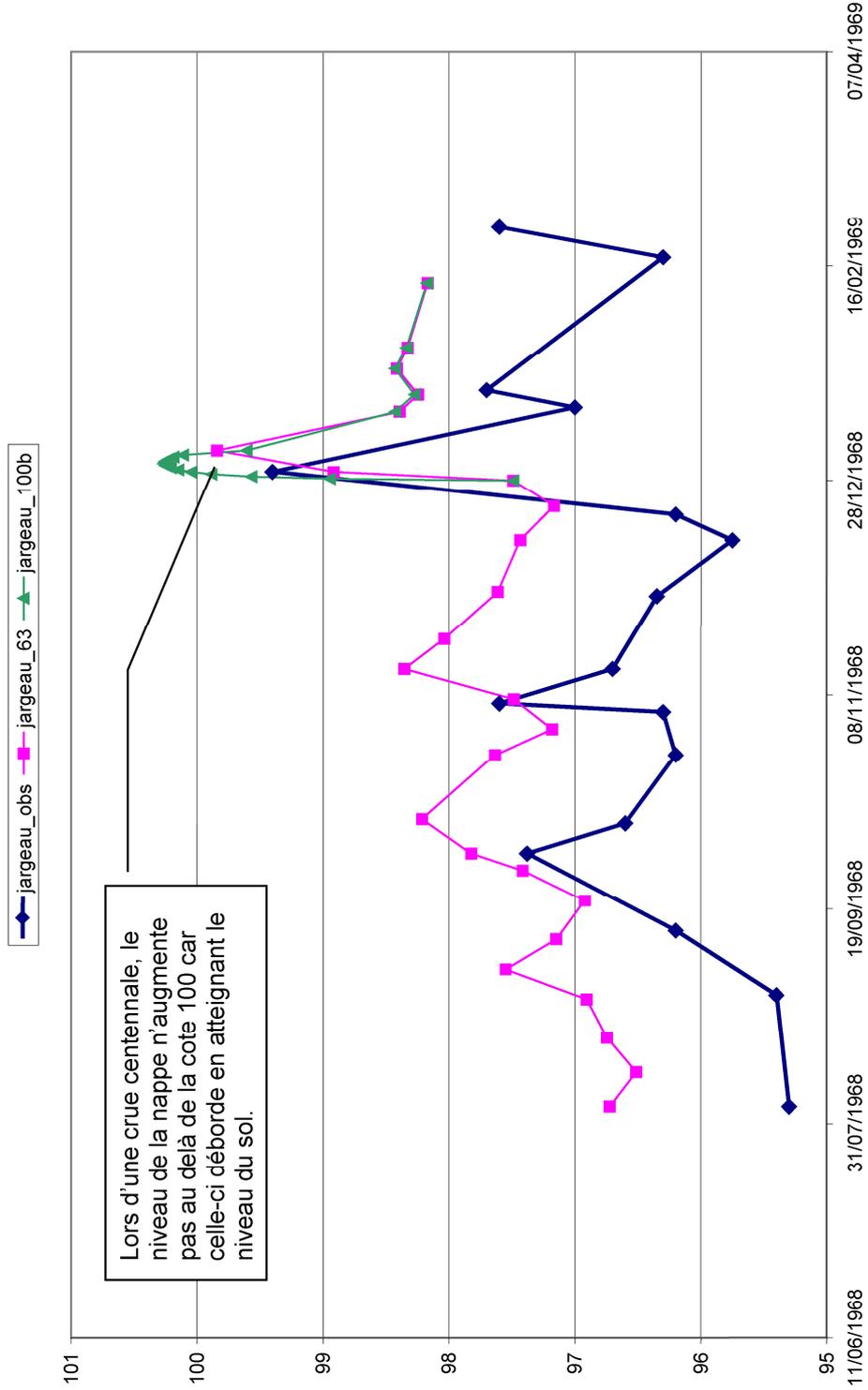


Fig. 55 - Piézomètre de Jargeau : en vert, simulation de la crue centennale.

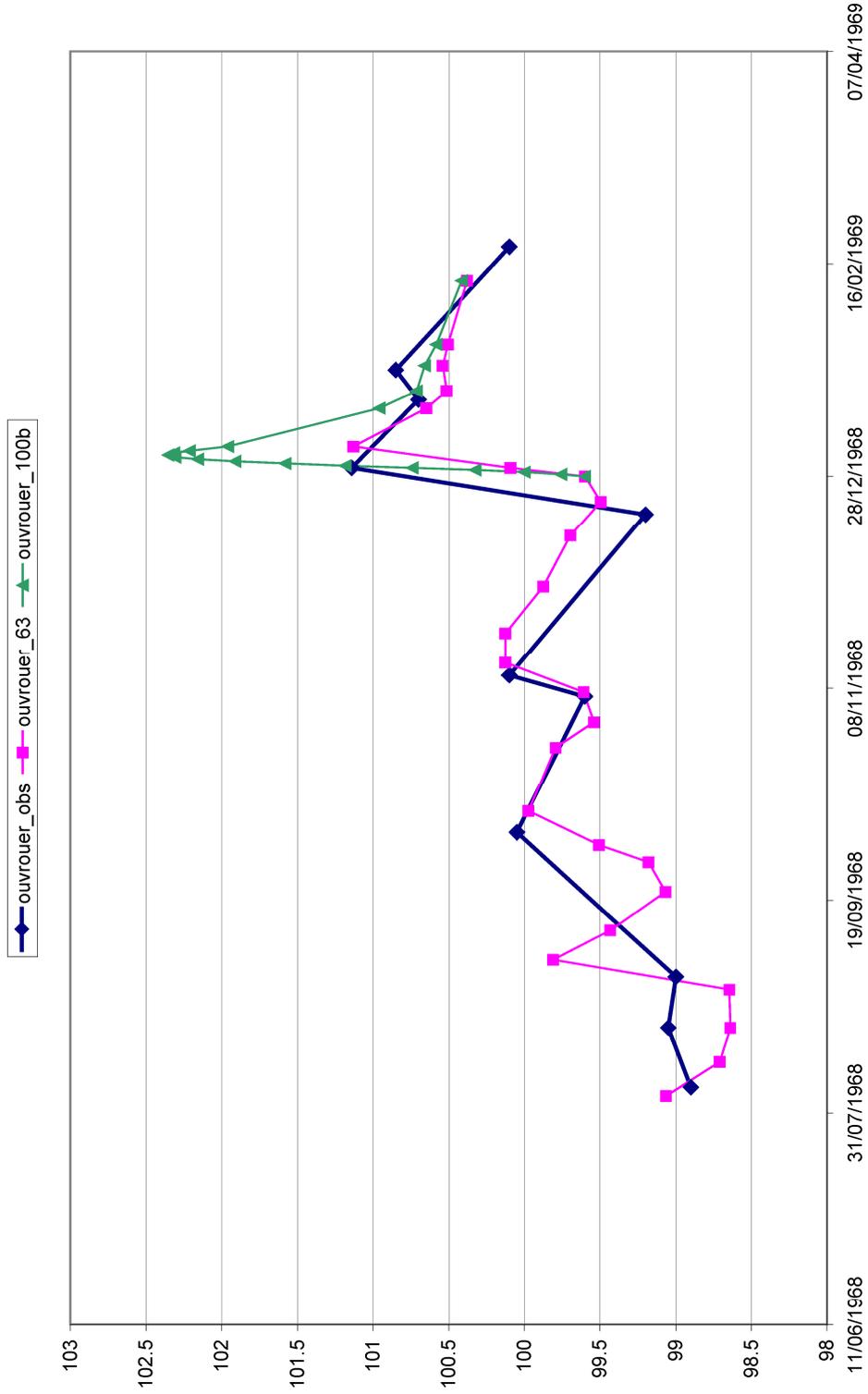


Fig. 56 - Piézomètre d'Ouvrouer : en vert, simulation de la crue centennale.

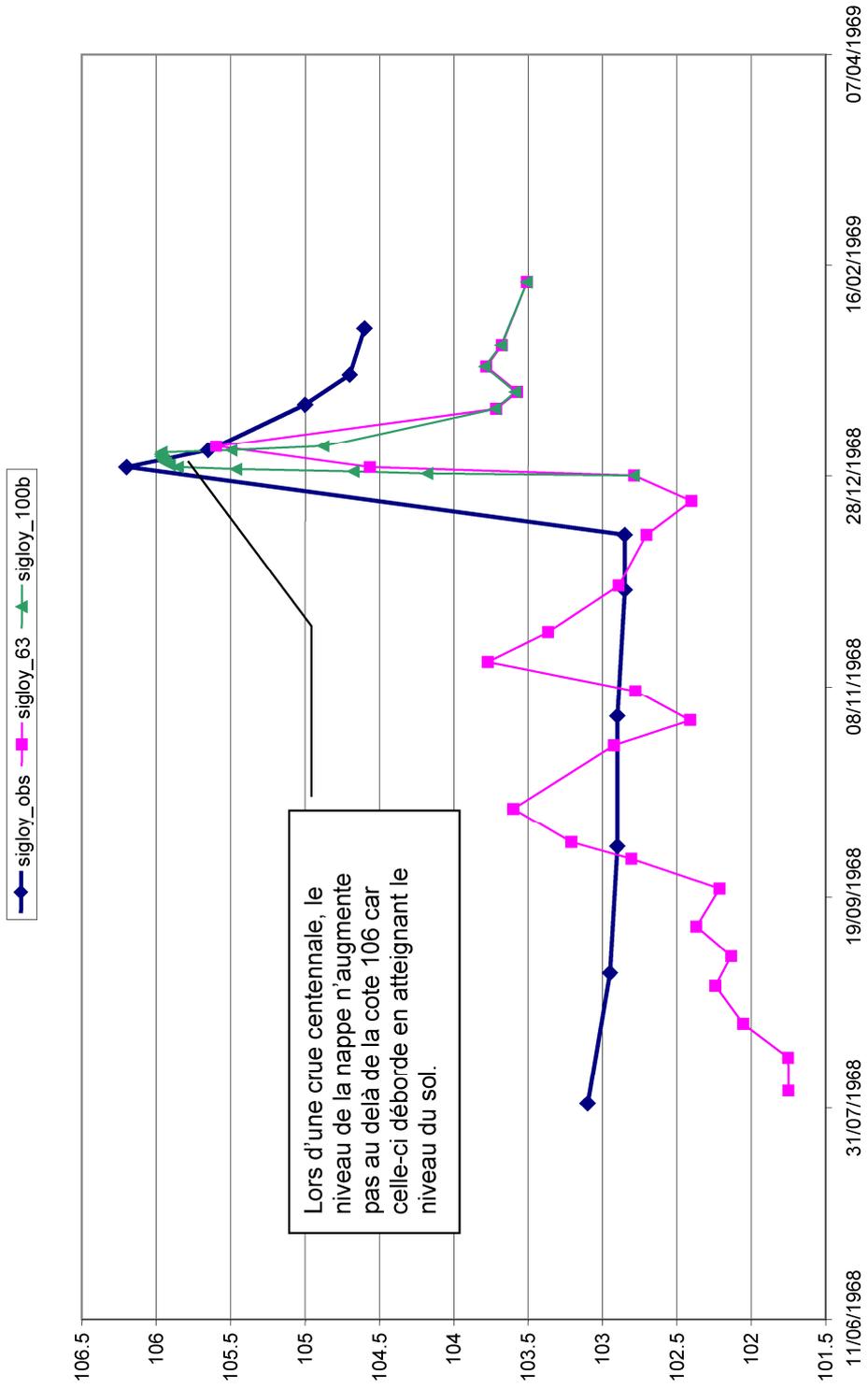


Fig. 57 - Piézomètre de Sigloy : en vert, simulation de la crue centennale.

7. Les remontées de la nappe dans le val d'Orléans lors d'une crue centennale de la Loire. Résultats de la modélisation

On présente dans ce chapitre, de façon plus détaillée, les résultats de la simulation d'une crue centennale de la Loire par le modèle hydrodynamique, à l'échelle de l'ensemble du val entre Bouteille et la pointe de Courpin, et un agrandissement de la zone urbanisée entre Loire et Loiret pour les communes de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, Orléans, Olivet, Saint-Jean-le-Blanc et Saint-Denis-en-Val.

7.1. LES REMONTÉES DE LA NAPPE LORS D'UNE CRUE CENTENNALE DE LA LOIRE À L'ÉCHELLE DU VAL

La profondeur de la nappe en situation d'étiage est présentée sur la figure 59. Cette situation correspond à un niveau de nappe rencontré huit mois sur douze dans le val. En hiver, à l'exception des périodes de crue exceptionnelle de la Loire, la profondeur de la nappe diminue de 50 cm en moyenne (rapport BRGM DSGR.67.A21 – avril 1967).

Sur près de 60 % de la superficie du val, la profondeur de la nappe par rapport au sol est supérieure à 4 m. Sur une superficie d'environ 37 %, située en amont sur les communes de Guilly et de Neuvy-en-Sullias, et de Saint-Cyr-en-Val et d'Olivet en aval à proximité du Loiret, la profondeur de la nappe est comprise entre 2 et 4 m/sol. On rencontre peu de secteurs (moins de 5 % de la superficie totale du val) où la profondeur de la nappe est inférieure à 2 m du sol.

La figure 60 présente la carte de la remontée maximale de la nappe par rapport à une situation d'étiage lors d'une crue centennale de la Loire sur l'ensemble du val. Les remontées les plus fortes, de 3 à 5 m, ont lieu immédiatement en deçà des levées dans le val. Ces remontées de la nappe diminuent progressivement lorsque l'on s'éloigne des levées. Au sud d'une ligne située sensiblement au milieu du val et parallèle à la Loire, la remontée de la nappe est inférieure à 2 m. En amont de Sandillon et au sud de cette ligne, la remontée de la nappe est inférieure à 50 cm, tandis qu'en aval de Sandillon la remontée de la nappe est comprise entre 1 et 2 m en rive gauche du Loiret. La frange concernée par la zone de forte remontée de nappe (entre 3 et 5 m/sol) est très importante à proximité de la ville de Jargeau. Cette zone s'étend sur 4 km au sud des levées. Ce résultat s'explique par la présence d'un réseau karstique dans les calcaires de Beauce qui met directement en communication les eaux de la Loire avec la nappe du val. Sur ce secteur de Jargeau, dans un premier temps, cette venue d'eau importante se propage perpendiculairement à la Loire, principalement en direction du sud du val, et dans une moindre mesure en direction de l'aval. Les autres secteurs concernés par cette forte remontée de la nappe en bordure de la Loire sont situés sur les communes d'Ouvrouer-les-Champs (amont de Jargeau), et de Sandillon et de Saint-Denis-en-Val (aval de Jargeau). Sur ces communes, cette zone s'étend sur une frange de 1 km parallèlement à la levée. Sur la commune d'Orléans, en aval de la ligne de chemin de fer, l'extension de cette zone de forte

remontée de la nappe est limitée, et concerne une frange de moins de 500 m des levées.

Le résultat de ces remontées de nappe se traduit par une profondeur de la nappe par rapport au sol plus faible présentée sur la figure 61. En amont de Sandillon, sur la partie sud du val, la profondeur de la nappe reste supérieure à 3 m/sol. Partout ailleurs, c'est-à-dire pour 65 % de la superficie du val, la profondeur de la nappe est inférieure à 2 m du sol. Sur près de 40 % du val, la profondeur de la nappe est inférieure à 2 m. Les zones concernées par ce dernier secteur sont situées en majorité sur les communes situées en aval : Saint-Denis-en-Val, Saint-Jean-le-Blanc, Olivet, Orléans sud, et Saint-Pryvé-Saint-Mesmin.

7.2 LES REMONTÉES DE LA NAPPE LORS D'UNE CRUE CENTENNALE DE LA LOIRE SUR LA ZONE URBANISÉE D'ORLÉANS ET D'OLIVET

On présente sur les figures 63 à 66 un agrandissement des cartes précédentes. Sur ce secteur, la profondeur de la nappe en situation d'étiage est supérieure à 3 m, à l'exception d'une zone située au sud de Saint-Jean-le-Blanc, de part et d'autre de la ligne de chemin de fer, où la profondeur de la nappe est comprise entre 2 et 3 m du sol.

Les tableaux 17 et 18 indiquent les communes concernées par les secteurs très vulnérables et non vulnérables.

Numéro du secteur	Localisation des secteurs très vulnérables
SV 1	Commune de Darvoy et pied des levées sur la commune de Jargeau.
SV 2	Zone non habitée au sud de la D 951 sur la commune de Sandillon.
SV 3	Commune de Saint-Denis-en-Val, zone au pied des levées de l'île Charlemagne (ouest) à Melleray (est).
SV 4	Zone non habitée sur la commune de Saint-Cyr-en-Val.
SV 5	
SV 6	
SV 7	Parc Floral d'Orléans à proximité du Dhuy.
SV 8	Zone du bras des Montées, quartier des Bordes et quartier du Carrouge.
SV 9	Saint-Jean-le-Blanc, quartier le Motteau.
SV 10	Orléans, quartiers Pré Pinson et la Mouillère.
SV 11	Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, zone comprise entre la levée et la D95 (la Trésorerie).
SV 12	Saint-Pryvé-Saint-Mesmin et Olivet, zone située entre le Loiret et Bel-Air.

Tabl. 17 - Identification des secteurs très vulnérables aux remontées de nappe.

Numéro du secteur	Localisation des secteurs très vulnérables
SNV 1	Large zone sur les communes de Fairolles, Jargeau, Ouvrouer-les-Champs
SNV 2	Darvoy, zone non habitée
SNV 3	Darvoy, zone du quartier les Pointes
SNV 4	Saint-Denis-en-Val, quartiers Beaulieu, Dinetard, les Sables
SNV 5	Saint-Denis-en-Val, le bois de la Cloche
SNV 6	Saint-Cyr-en-Val, proximité le Ligny
SNV 7	Saint-Cyr-en-Val, Château de la Mothe
SNV 8	Saint-Cyr-en-Val, proximité Villesancien
SNV 9	Saint-Denis-en-Val, quartier la Boulaie
SNV 10	Orléans, quartiers Le Soleil Levant et Clos Rosé
SNV 11	Orléans, partie haute du quartier Saint-Marceau
SNV 12	Olivet. Bordure du Loiret

Tabl. 18 - Identification des secteurs non vulnérables aux remontées de nappe.

Lors d'une crue centennale de la Loire, la remontée de la nappe est plus importante sur une bande de 1,5 km, située parallèlement à la Loire, au sud des levées. Dans cette zone, la remontée de la nappe est supérieure à 2 m, et peut atteindre dépasser 3 m à proximité immédiat de la Loire. On a représenté sur la figure 62, la zone inondée par le remous de la Loire entre la confluence du Loiret et de la Loire et le tracé de l'autoroute A 71.

Au maximum de la crue centennale, sur les communes de Saint-Denis-en-Val, Saint-Jean-le-Blanc, Olivet et Orléans sud, la profondeur de la nappe est comprise entre 1 et 2 m du sol sur de nombreux secteurs.

On indique sur la figure 67 le tracé des deux coupes (ouest-est et nord-sud) présentées sur les figures 68 et 69.

La coupe ouest-est (fig. 68) indique le niveau de la nappe au cours des trois situations suivantes :

- en situation d'étiage (Basses Eaux 1966) ;
- maximum de la crue de janvier 1969 ;
- maximum de la crue centennale(simulation) ;

et les niveaux de la Loire en étiage et au maximum de la crue centennale.

Cette coupe met bien en évidence les échanges entre la nappe et la Loire au cours de ces différentes périodes. En étiage, la Loire alimente la nappe en amont (profil n° 89), et draine la nappe en aval (profil n° 102). En situation de crue centennale, le niveau de la Loire est supérieur aux niveaux de la nappe aussi bien en amont qu'en aval. Il s'ensuit une alimentation du val par les infiltrations sous les levées, et une remontée du niveau de la nappe entre Loire et Loiret. Le phénomène qui se produit comprend d'une part à une augmentation des apports de la Loire, d'autre part un blocage des écoulements de la nappe vers l'aval.

La coupe nord-sud (fig. 69) indique le niveau de la nappe pour ces trois situations, ainsi que l'altitude de la ligne d'eau de la Loire et du Loiret. Sur ce profil, on notera le Loiret, dont l'altitude de la ligne d'eau lors de la crue de la Loire, est inférieure à celle de la Loire au pont Royal. Au maximum de la crue de la Loire, le Loiret, dont la ligne d'eau est à la cote 90,7 m NGF (pas 7 du tableau 15), alimente la nappe. Ensuite, à la cote 89,4 m NGF (pas 10 du tableau 15), la rivière va drainer cette nappe. Ce drainage est limité car le remous de la Loire dans le Loiret interdit toute évacuation rapide des débits du Loiret.

7.3 LES REMONTÉES DE LA NAPPE LORS D'UNE CRUE CENTENNALE DE LA LOIRE CALCULÉE EN RÉGIME TRANSITOIRE SUR QUATRE POINTS SITUÉS DANS LA ZONE URBANISÉE D'ORLÉANS ET D'OLIVET ENTRE LOIRE ET LOIRET

On présente sur la figure n° 70, l'évolution du niveau de la nappe sur ces deux points (PZ4 et PZ5), avec en regard les variations du niveau de la Loire au pont Royal. Les données sont indiquées dans le tableau 19.

Les piézomètres PZ3 et PZ4 sont situés à 500 m des levées, tandis que les piézomètres PZ5 et PZ6 sont situés à 1 800 m des levées (fig. 67).

Lors de la simulation, le pic de la crue centennale a lieu le 31 décembre à midi (cote atteinte au pont Royal : 95,83 m NGF). Les pics de crue dans la nappe ont lieu le 2 janvier à 0 h au piézomètre PZ3 et le 2 janvier à midi au piézomètre PZ4. Pour ces piézomètres, situés à 500 m des levées, le décalage entre le pic de crue de la Loire et le pic de crue dans la nappe est de 1,5 jour sur PZ3 et 2 jours sur PZ4.

Aux piézomètres PZ5 et PZ6, situés à 1 800 m des levées, les pics de crue ont lieu le 4 janvier à 0 h, soit 3,5 jours après le maximum de la crue de la Loire.

Si l'on considère la durée au cours de laquelle le niveau de la Loire dépasse la cote 93 m NGF au pont Royal, la crue de la Loire dure six jours, du 29 décembre à 0 h au 3 janvier à 0 h. Le maximum de la crue (cote supérieure à 95 m NGF) dure 48 h, du 30 décembre 12 h au 1^{er} janvier 12 h. Cette remontée brutale du niveau de la Loire de près de 3 m en six jours va engendrer une remontée des niveaux de la nappe qui sera décalée dans le temps en fonction de la distance du point de référence à la Loire, et dont le retour à l'équilibre sera plus lent que celui du fleuve. À une distance de 500 m, le décalage du pic de crue de la nappe est compris entre 1,5 et 2 jours, à 1 800 m ce décalage est de 3,5 jours. La remontée du niveau de la nappe, par rapport à son niveau au moment du début du maximum de la crue de la Loire, est voisine de 2 m dans tous les cas. Le retour à l'équilibre de la nappe est lent puisque trois semaines après le début de la crue, la nappe n'est descendue que de 1 m par rapport à son maximum. Il faut au moins deux mois pour que la nappe retrouve son niveau d'équilibre d'avant la crue.

Les remontées de la nappe lors d'une crue centennale de la Loire dans le voisinage immédiat des levées

DATE	crue68b	date	Rivière	Nappe sandillon	Nappe jargeau	Nappe ouvrouer	Nappe sigloy	Nappe Piézomètre PZ3	Nappe Piézomètre PZ4	Nappe Piézomètre PZ5	Nappe Piézomètre PZ6
			La Loire au pont Royal								
146		28/12/68 0:00	90,59	93,6712	97,4894	99,5995	102,787	89,8764	90,373	89,767	90,355
146,5		28/12/68 12:00	92,7	94,2539	98,9478	99,7561	104,178	90,0384	90,5316	89,7965	90,3876
147		29/12/68 0:00	92,92	94,5704	99,5692	99,9991	104,674	90,2185	90,7057	89,8564	90,4489
147,5		29/12/68 12:00	93,83	94,9544	99,8859	100,324	105,463	90,4627	90,9238	89,952	90,541
148		30/12/68 0:00	94,94	95,3834	100,047	100,738	105,855	90,7833	91,2083	90,0992	90,6729
148,5		30/12/68 12:00	95,59	95,7212	100,15	101,183	105,908	91,1201	91,5209	90,2943	90,8548
149		31/12/68 0:00	95,75	95,9229	100,209	101,58	105,933	91,4445	91,8123	90,5191	91,0612
149,5		31/12/68 12:00	95,83	96,0494	100,249	101,911	105,948	91,7295	92,0744	90,756	91,2758
150		1/1/69 0:00	95,65	96,0852	100,265	102,157	105,959	91,9556	92,2903	90,9863	91,4795
150,5		1/1/69 12:00	95,22	96,0262	100,258	102,307	105,966	92,1087	92,4441	91,1932	91,6544
151		2/1/69 0:00	94,53	95,8696	100,228	102,354	105,97	92,1775	92,5239	91,3621	91,7999
151,5		2/1/69 12:00	93,8	95,6585	100,188	102,315	105,963	92,1724	92,5375	91,4859	91,9104
152		3/1/69 0:00	93,08	95,4187	100,112	102,213	105,494	92,1069	92,4971	91,5641	91,983
153		4/1/69 0:00	92,42	94,8958	99,6067	101,958	104,877	91,9493	92,3591	91,5991	92,0174
162		13/1/69 0:00	91,38	94,1592	98,4275	100,959	103,719	91,1191	91,5844	91,0137	91,4836
166		17/1/69 0:00	91,3	94,0575	98,2723	100,712	103,585	90,884	91,3554	90,7906	91,2795
172		23/1/69 0:00	91,56	94,1087	98,4279	100,658	103,789	90,7828	91,2522	90,6496	91,1527
177		28/1/69 0:00	91,43	94,0672	98,3369	100,583	103,681	90,6939	91,165	90,5616	91,0743
192		12/2/69 0:00	91,26	93,9907	98,1745	100,415	103,508	90,5379	91,0121	90,4097	90,9398

Tabl. 19 - Niveau de la Loire et des piézomètres lors de la crue centennale.

L'étude réalisée par le BRGM en 1999 sur le site du val d'Avaray (Rapport BRGM R 40832 – octobre 1999) pour le compte de l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature décrit complètement les phénomènes particuliers d'écoulement à l'aval immédiat des levées en bordure de Loire.

On présente sur la figure 58 l'effet d'une crue de la Loire sur les remontées de la nappe à l'aval immédiat d'une levée de la Loire et le phénomène de débordement qui peut entraîner l'apparition d'un débit d'exhaure au pied des levées.

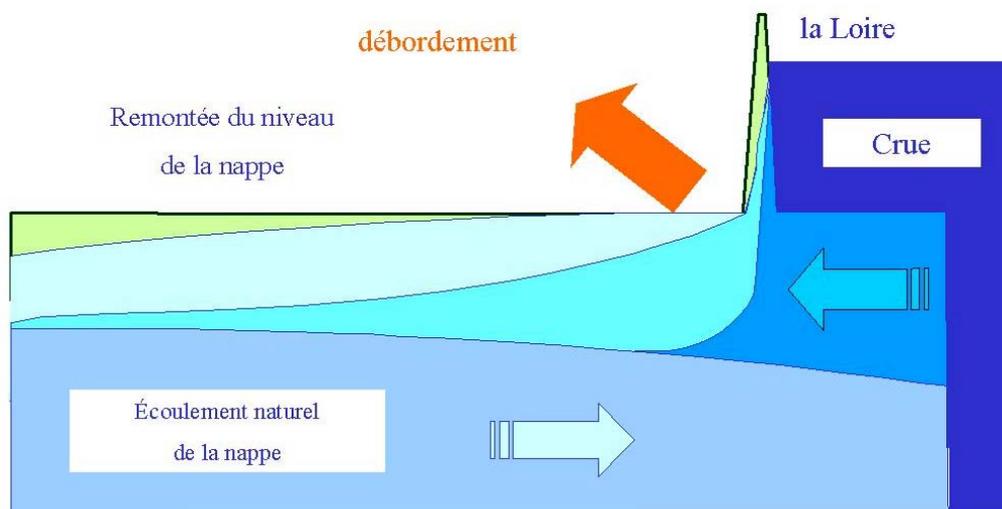


Fig. 58 - Le phénomène de remontée et de débordement à l'aval immédiat de la levée à la suite d'une crue importante de la Loire.

Comme on l'a vu précédemment, les remontées les plus importantes de la nappe ont lieu à proximité immédiate des levées. Dans le cas où l'altitude du sol au pied de la levée serait proche de la surface piézométrique, on peut assister alors à un débordement de la nappe qui produirait un débit d'exhaure. Les volumes d'eau ainsi produits se traduiraient par la création d'une zone inondée. Les calculs faits sur le val d'Avaray ont montré que la zone inondée peut s'étendre sur les premiers 100 m en de çà de la levée, et représenter une lame d'eau de 20 à 50 cm de hauteur en fonction des caractéristiques hydrodynamiques environnantes.

Cette situation pourrait se voir sur les communes de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, Saint-Denis-en-Val et Jargeau, principalement.

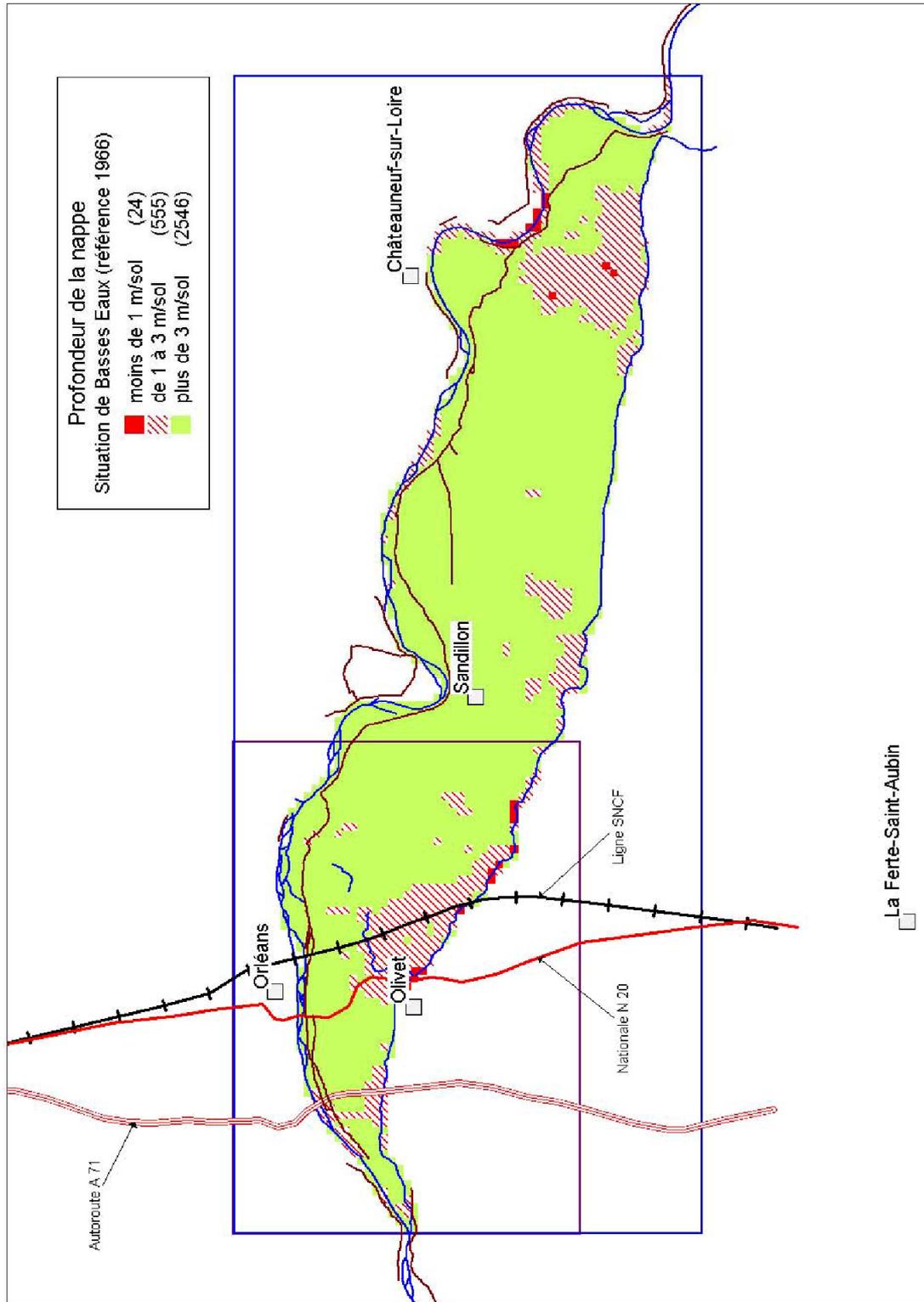


Fig. 59 - Profondeur de la nappe par rapport au sol. Situation de Basses Eaux (référence 1966). Ensemble du val.

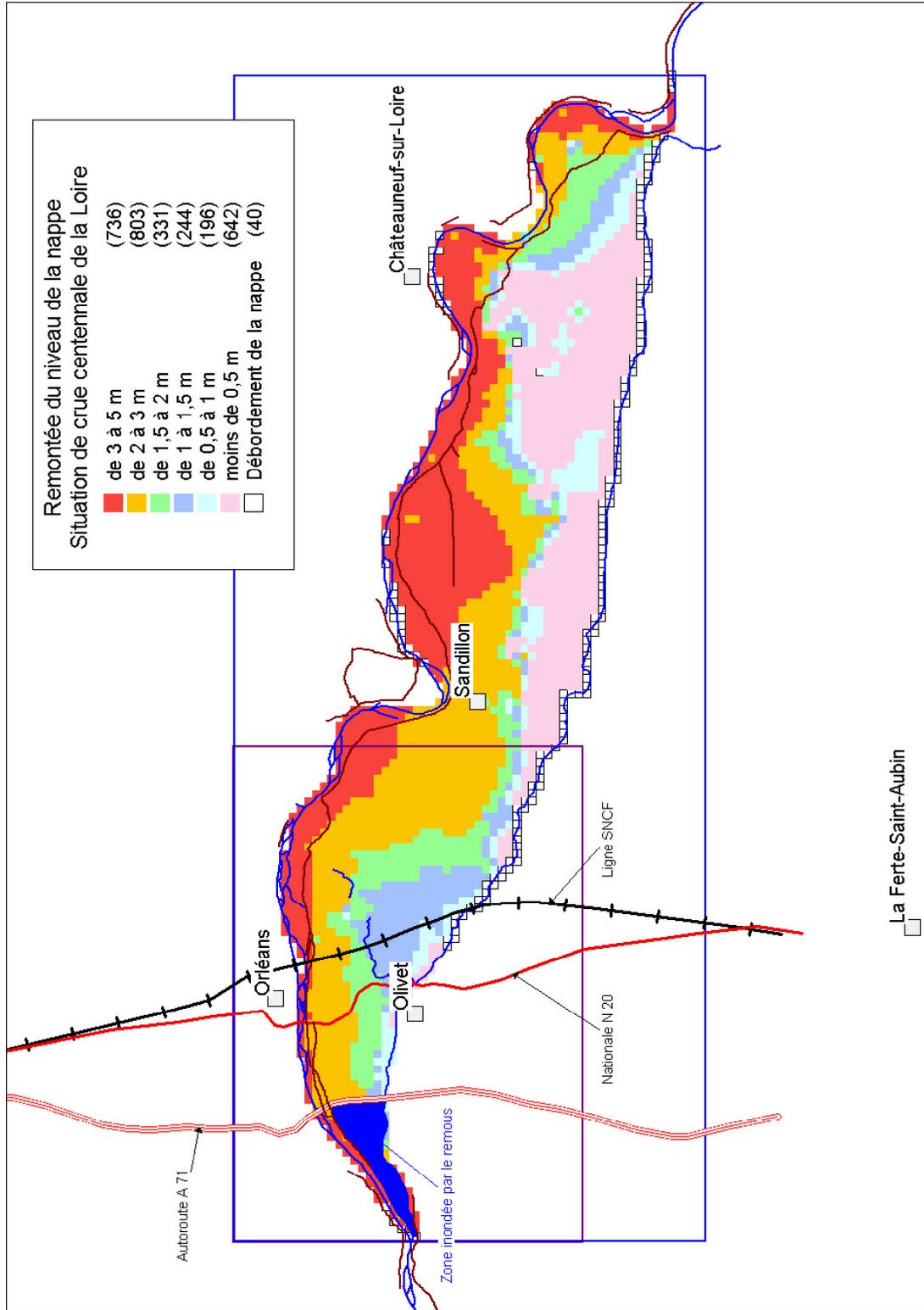


Fig. 60 - Remontée du niveau de la nappe lors d'une crue centennale. Ensemble du val.

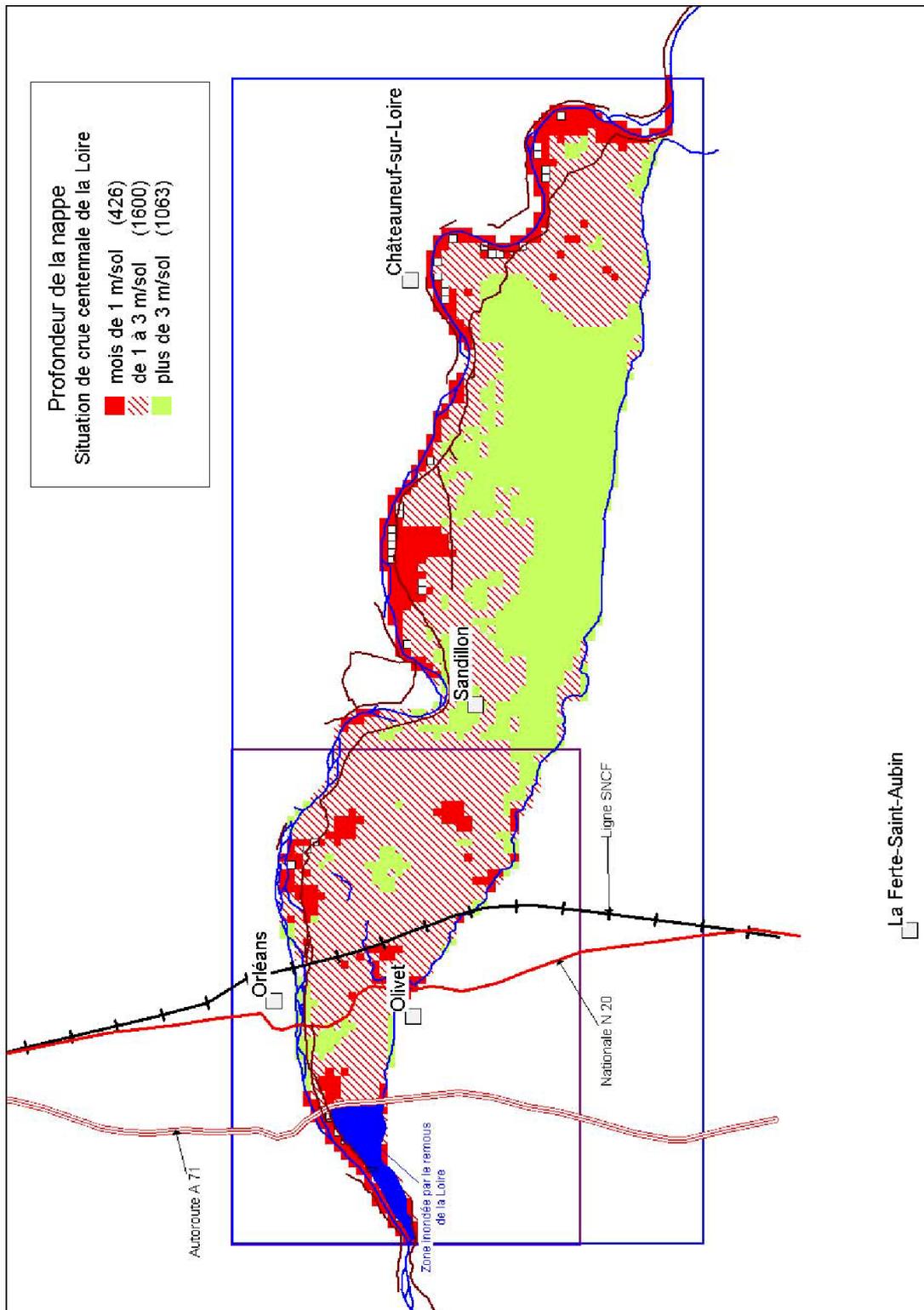
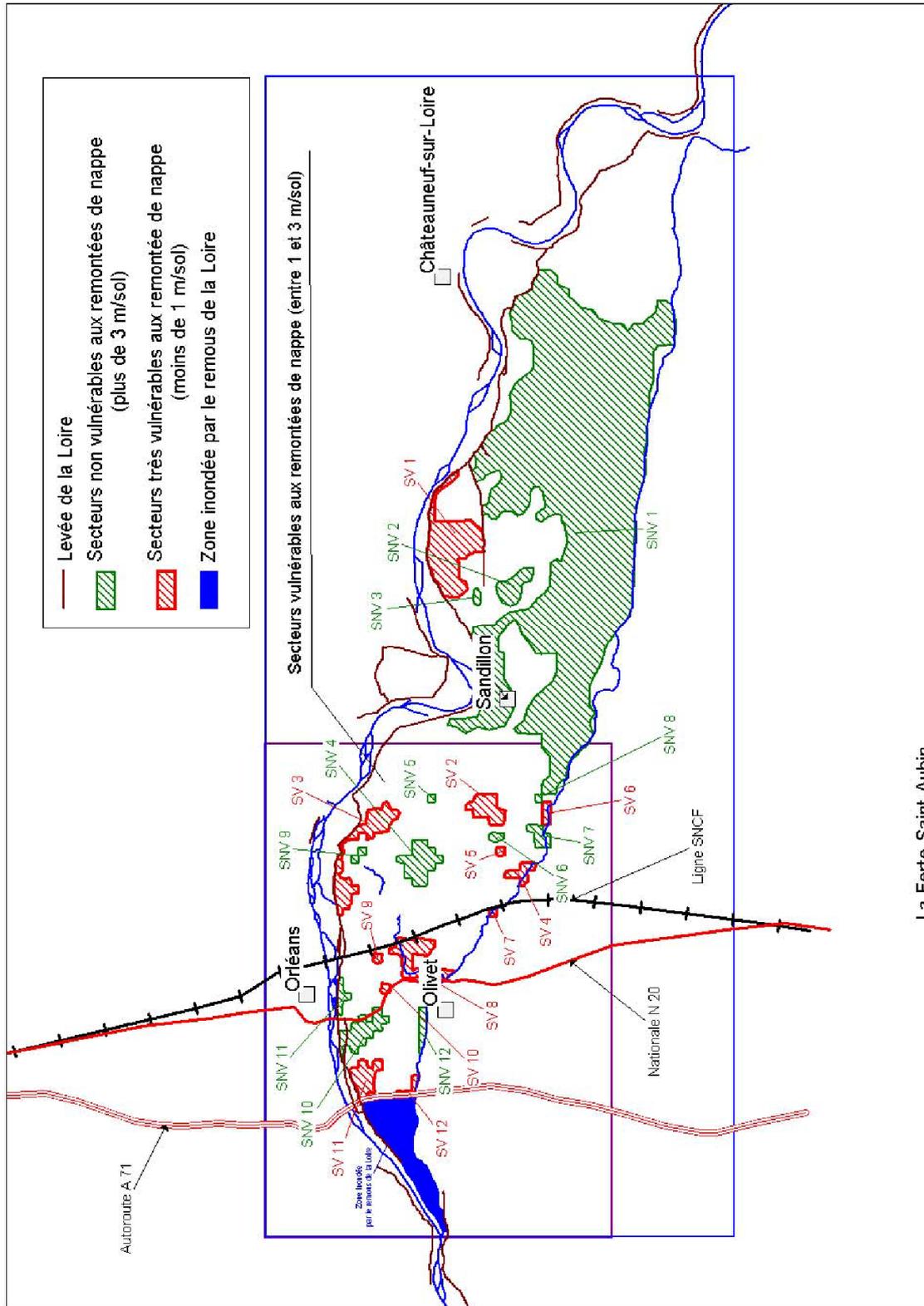


Fig. 61 - Profondeur minimale de la nappe par rapport au sol. Situation d'une crue centennale de la Loire. Ensemble du val.



La Ferte-Saint-Aubin

Fig. 62 - Localisation des secteurs non vulnérables et très vulnérables dans l'ensemble du val.

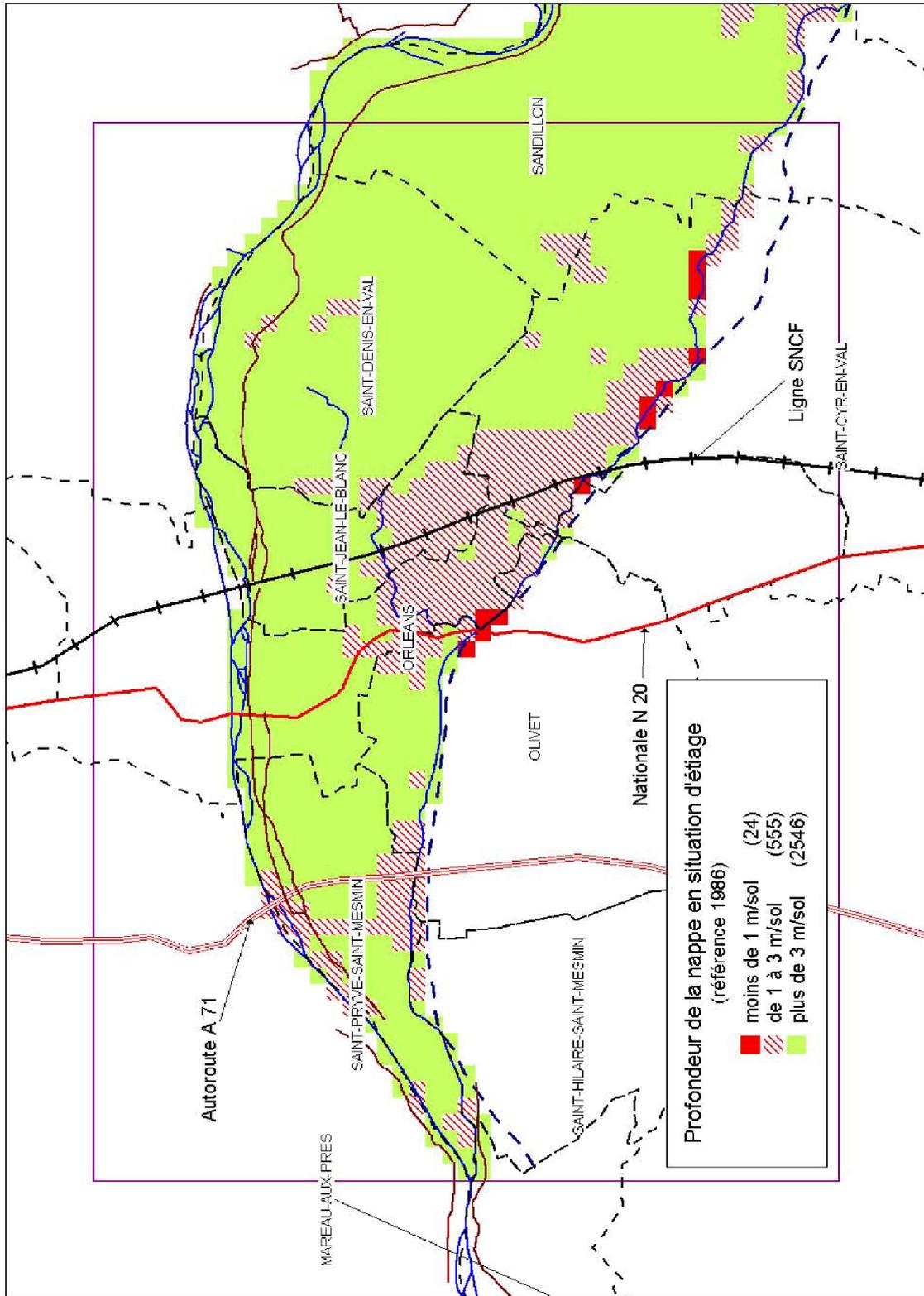


Fig. 63 - Profondeur de la nappe par rapport au sol. Situation de Basses Eaux (référence 1986). Zone urbanisée entre Loire et Loiret.

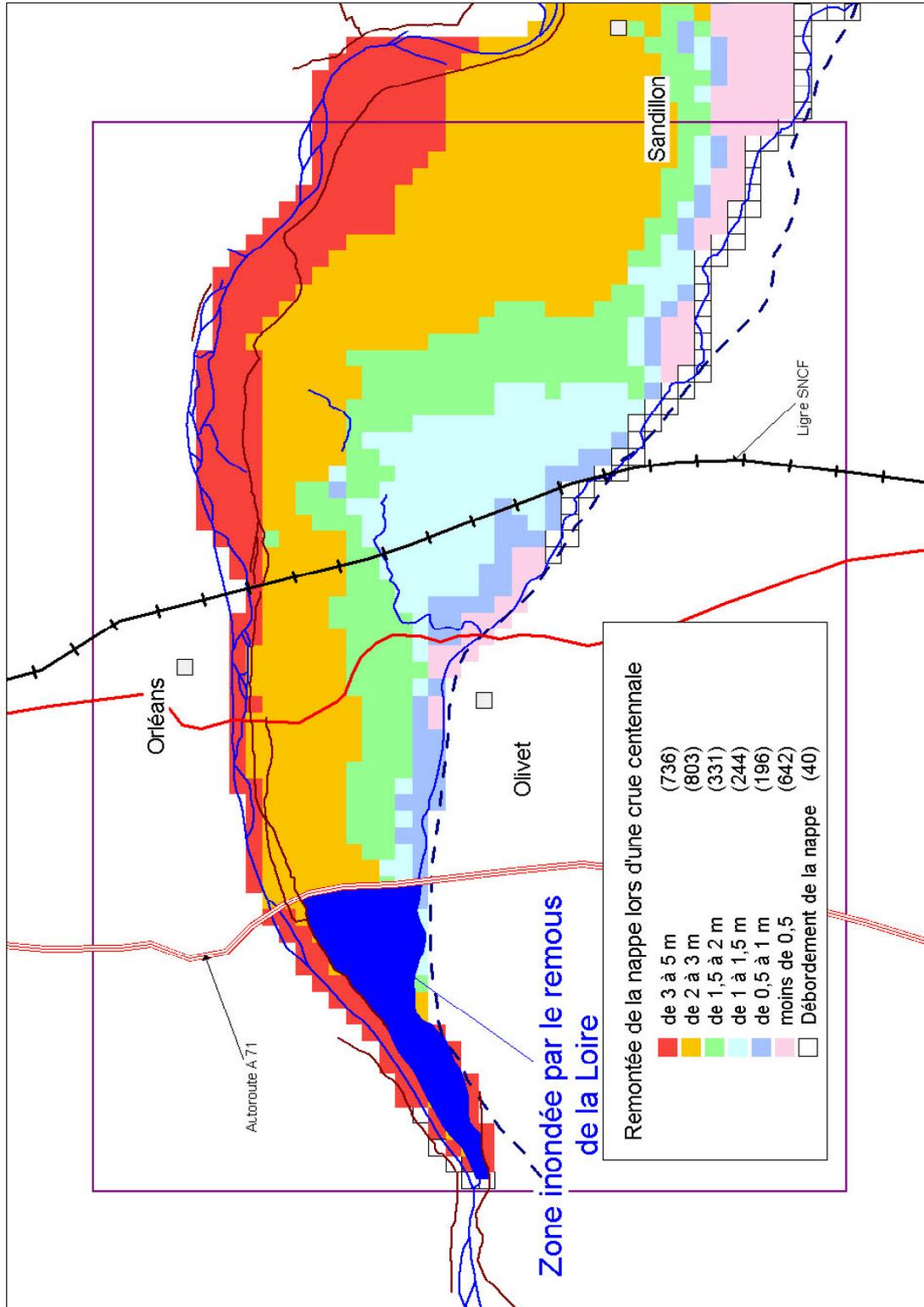


Fig. 64 - Remontée du niveau de la nappe lors d'une crue centennale. Zone urbanisée entre Loire et Loiret.

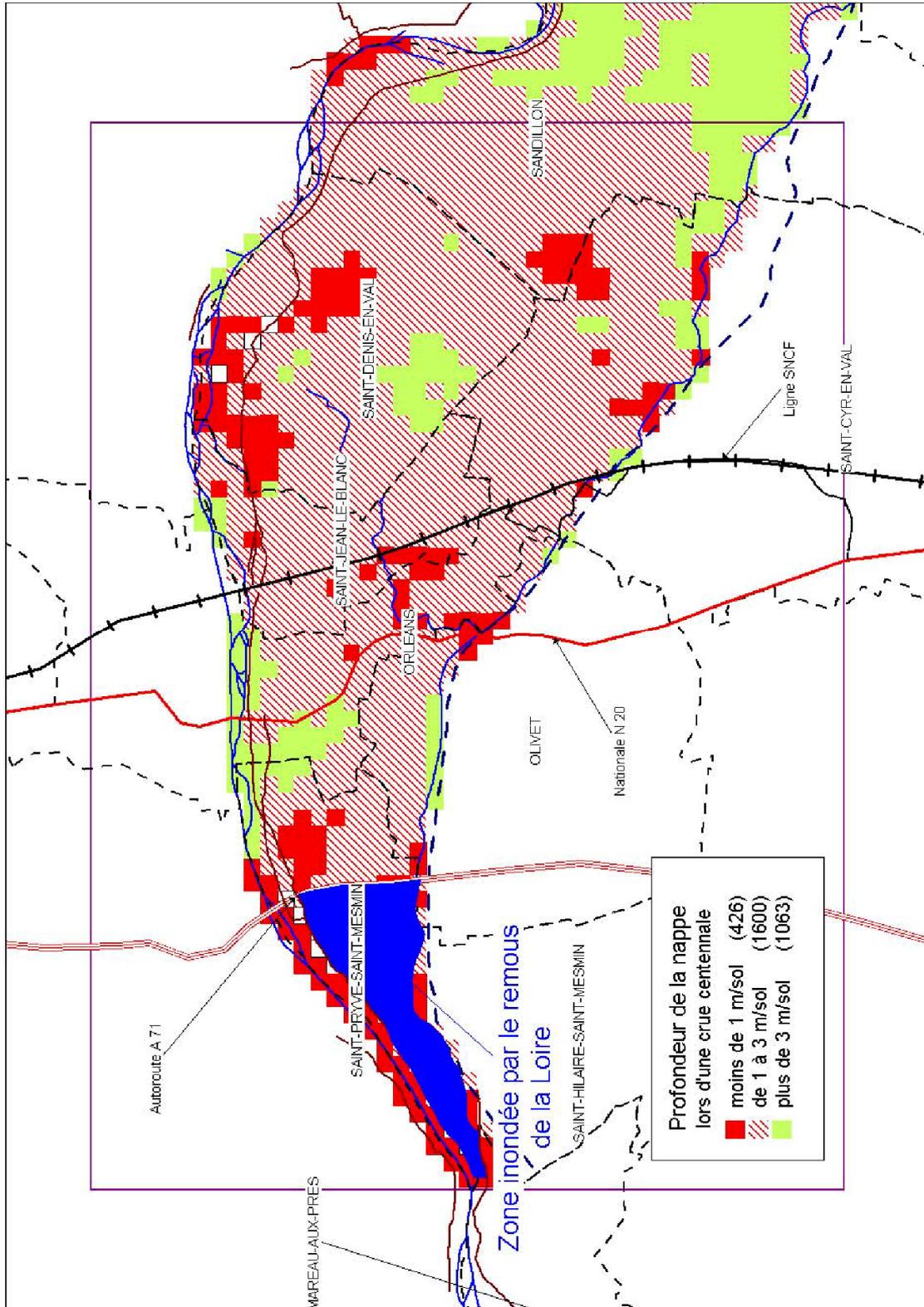


Fig. 65 - Profondeur minimale de la nappe par rapport au sol. Situation d'une crue centennale de la Loire. Zone urbanisée entre Loire et Loiret.

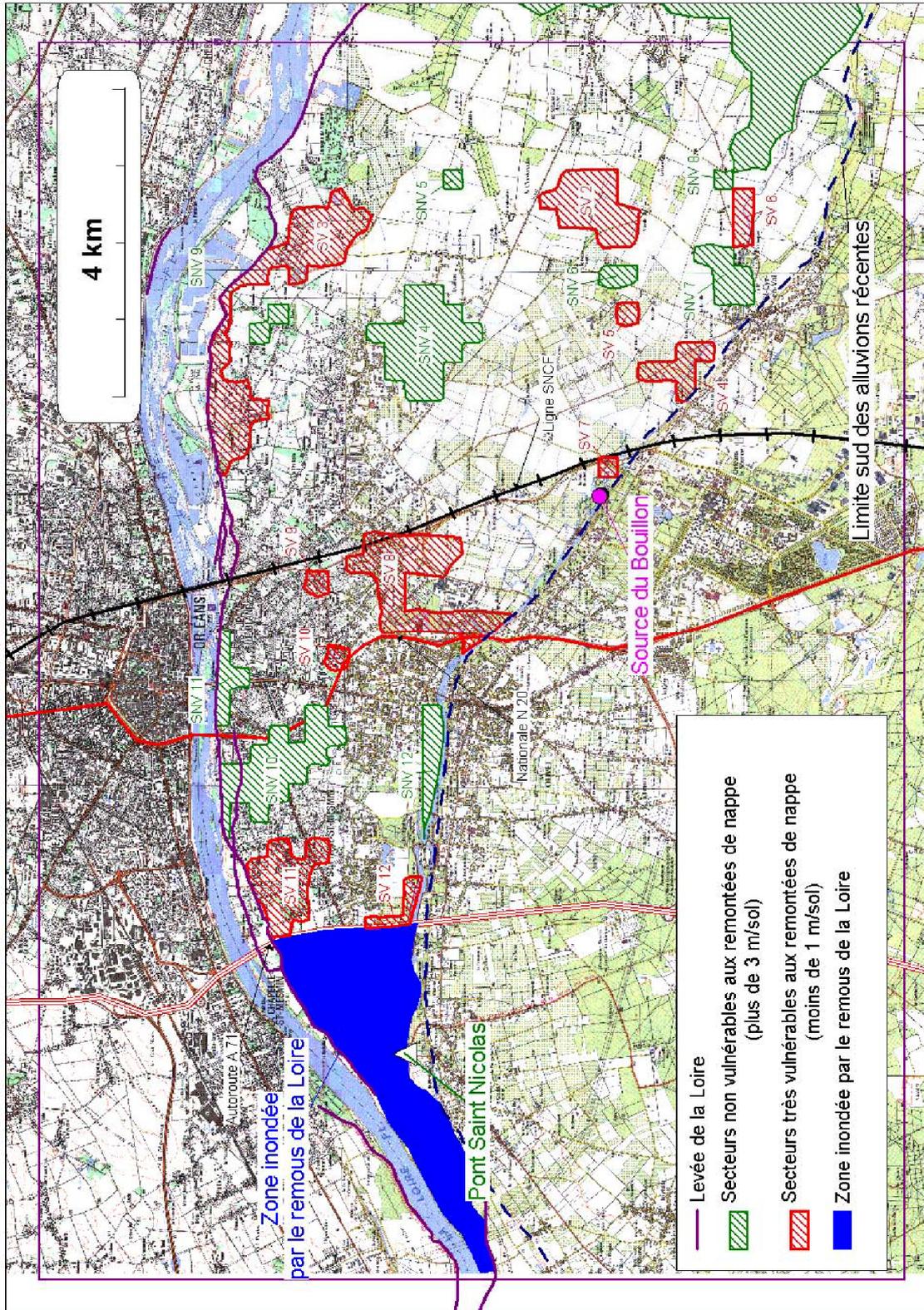


Fig. 66 - Localisation des secteurs non vulnérables et très vulnérables dans la zone urbanisée entre Loire et Loiret.

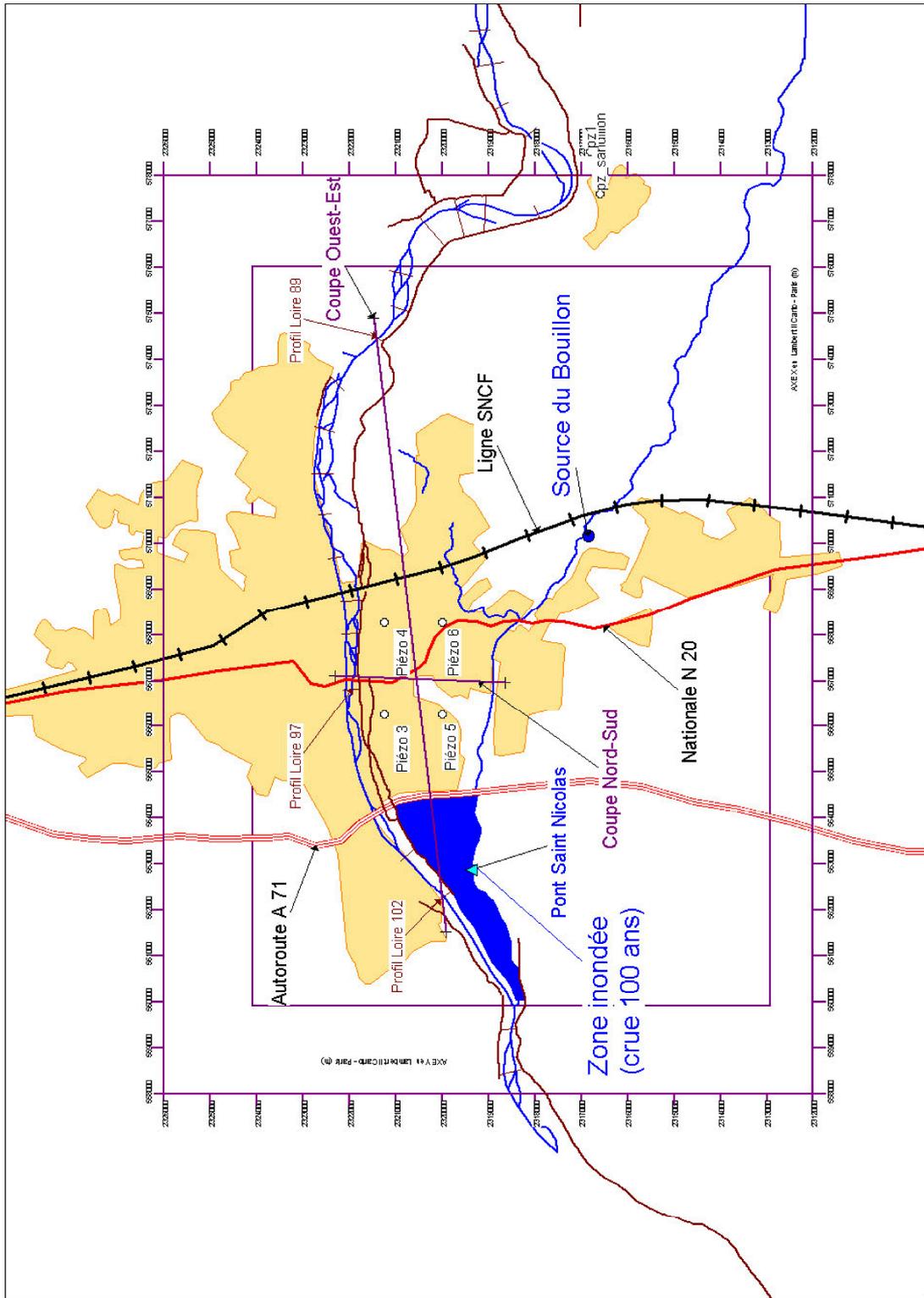


Fig. 67 - Emplacement des coupes ouest-est et nord-sud.

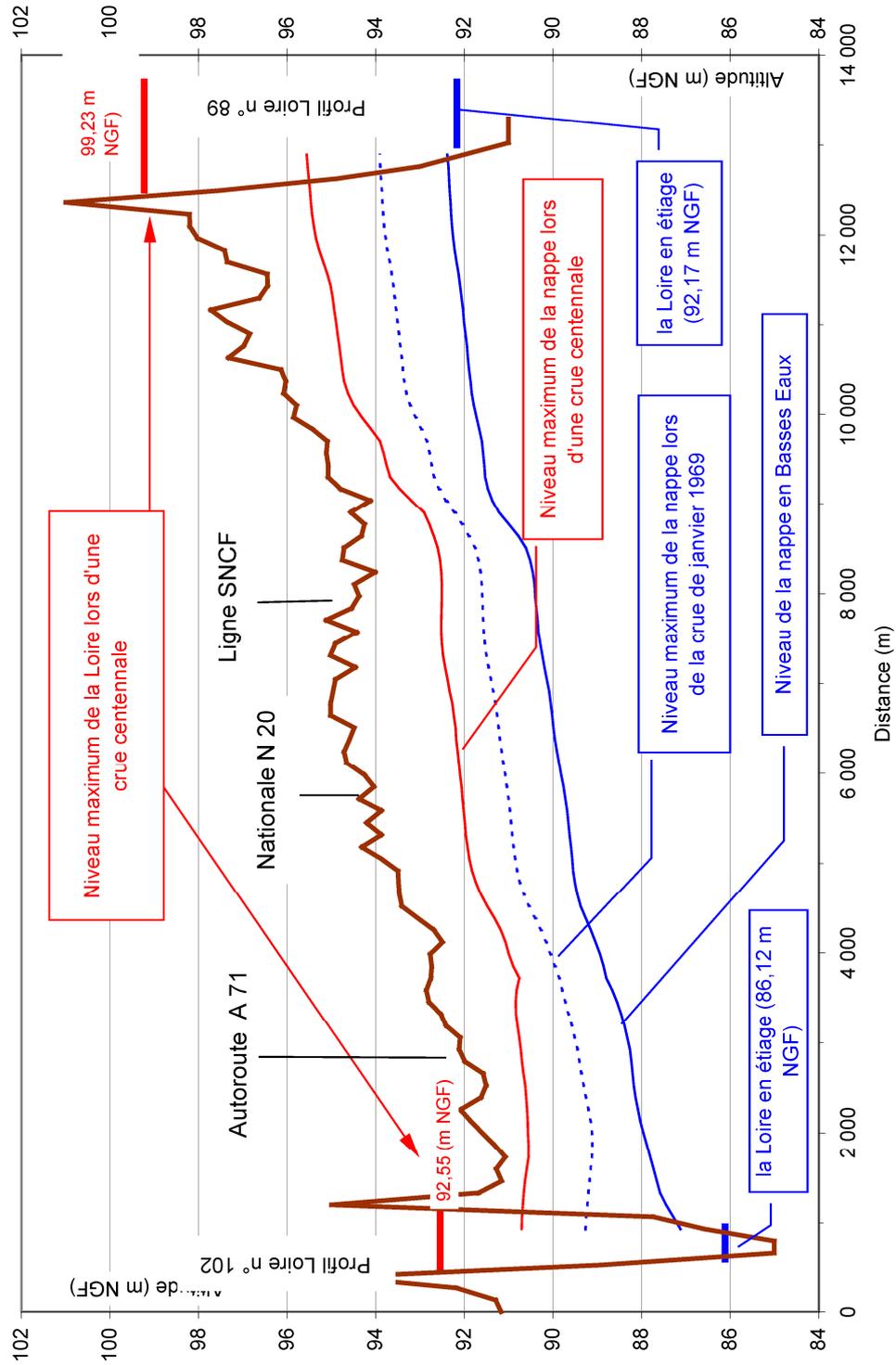


Fig. 68 - Coupe ouest-est. Situation du pas 10 du tableau 15, soit 1,5 jour après le pic de la crue centennale de la Loire.

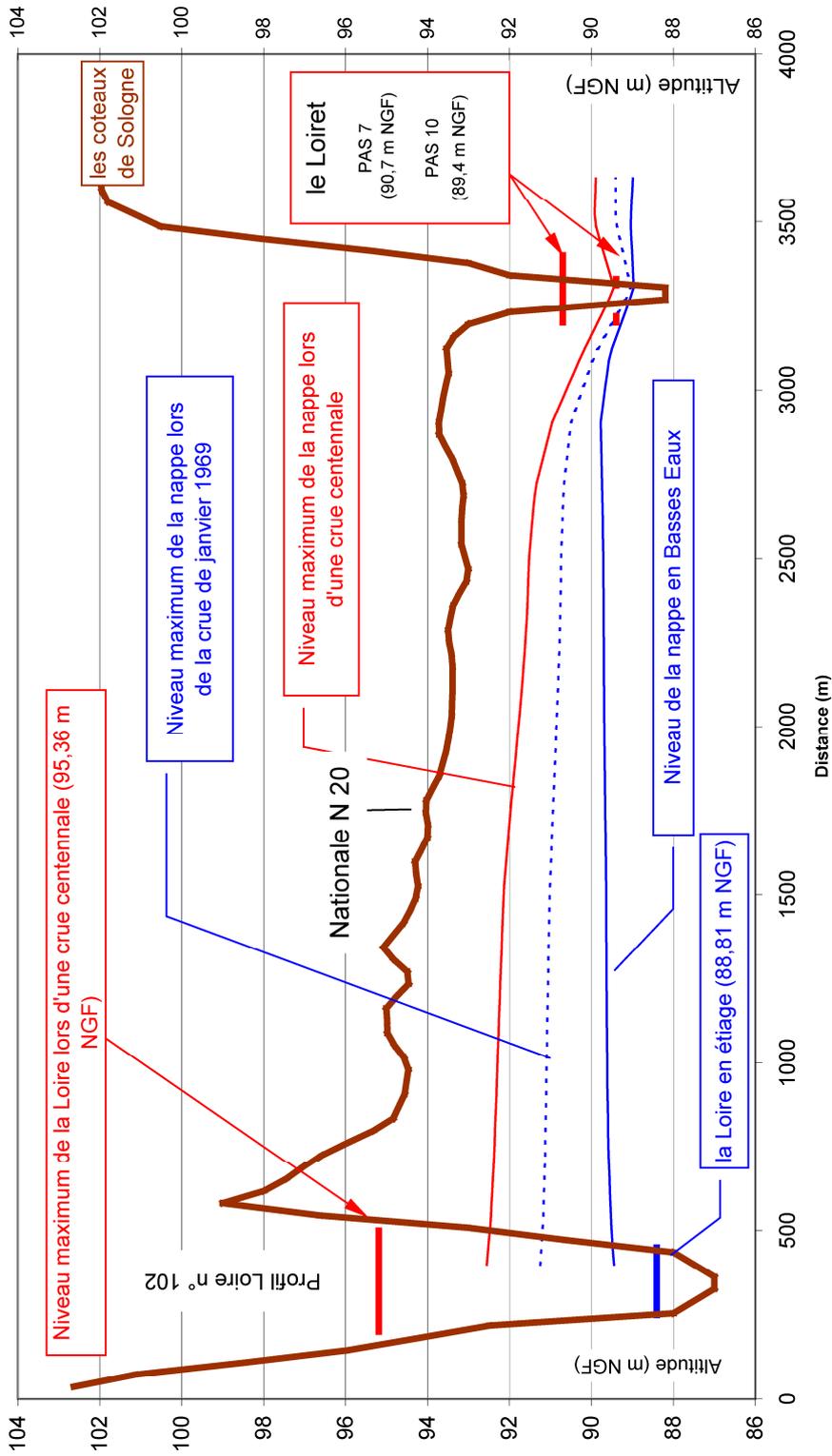


Fig. 69 - Coupe nord-sud. Situation du pas 10 du tableau 15, soit 1,5 jour après le pic de la crue centennale de la Loire.

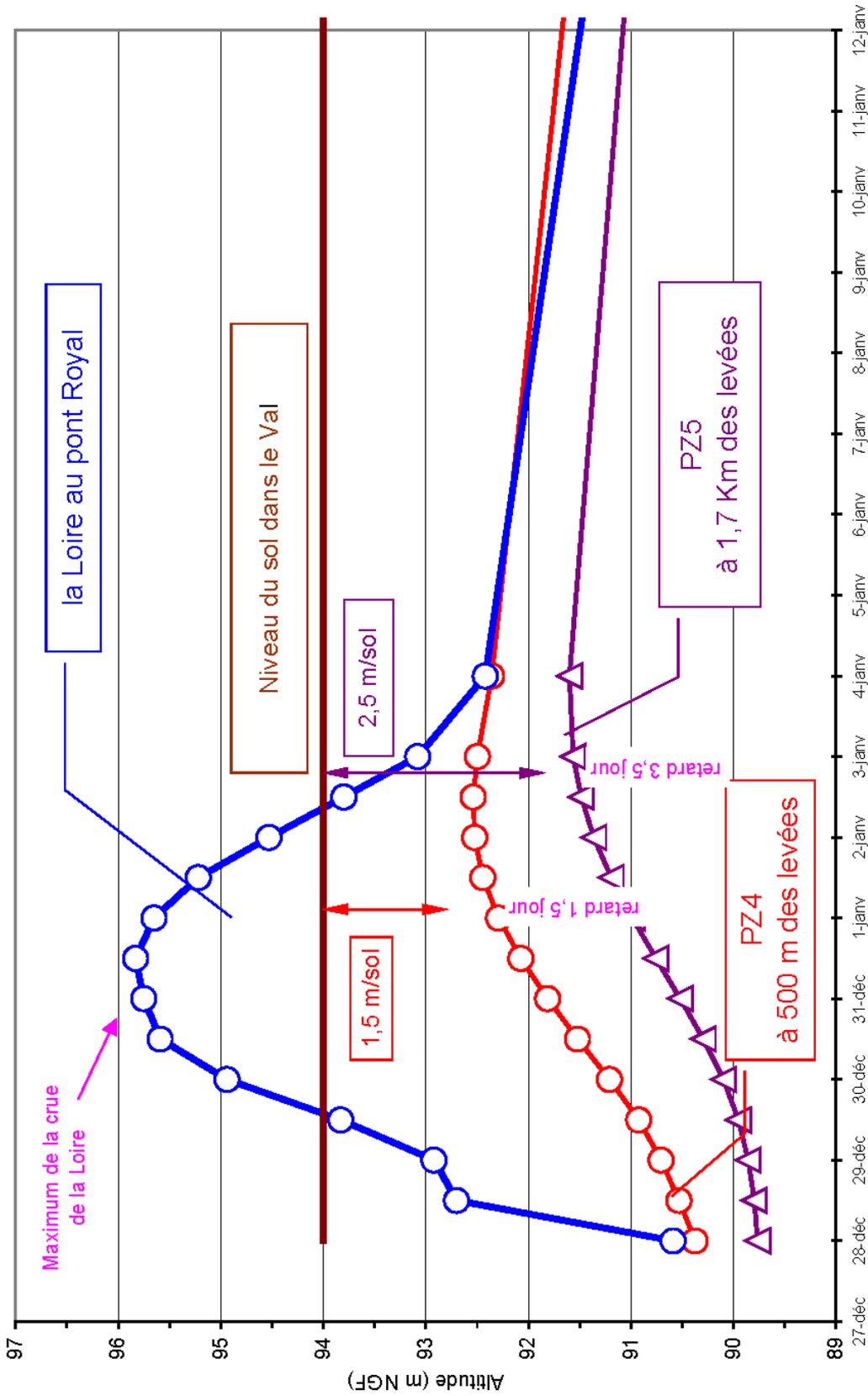


Fig. 70 - Variations du niveau de la nappe en quatre points entre Loire et Loiret et altitude de la ligne d'eau de la Loire lors d'une crue centennale.

8. Programme de surveillance des niveaux de la nappe

L'interprétation des données hydrogéologiques anciennes et la modélisation des écoulements de la nappe ont permis de décrire complètement les processus d'échange entre la Loire et la nappe, d'écoulements souterrains dans le val et de remontée de nappe au cours d'une crue importante de la Loire.

Les données disponibles sont très nombreuses, mais présentent quelques inconvénients et quelques lacunes que l'on présente ci-dessous.

8.1. LA CARTE PIÉZOMÉTRIQUE DE LA NAPPE

Cette carte aura deux intérêts :

- approcher l'impact sur la nappe de la modification du lit de la Loire depuis 1966,
- disposer d'une série de données plus récentes et surtout plus fiables en qualité pour vérifier et améliorer le calage du modèle hydrodynamique mis au point au cours de cette étude.

La seule carte piézométrique disponible du val est ancienne. **Elle date de 1966, et ne s'étend pas à l'ouest de la route nationale RN 20.** Cette carte piézométrique a été faite en période de Basses Eaux et de Hautes Eaux, et différencie les niveaux des alluvions et les niveaux calcaires. Les repères altimétriques des mesures n'avaient pas été nivelés à l'époque. Lors de la recherche bibliographique de ces données, il n'a pas été possible de retrouver tous les points mesurés. Pour le calage de la modélisation, seule une carte piézométrique moyenne des écoulements du val a pu être faite à partir de ces données.

Il semble indispensable de revenir sur la réalisation d'une nouvelle carte piézométrique du val, à faire dans les mêmes conditions, c'est à dire une carte en période de Hautes Eaux et une carte en période de Basse Eaux, en différenciant les niveaux des alluvions de ceux des calcaires. Les mesures de niveaux de la nappe doivent s'accompagner d'un nivellement précis des forages. Lors des campagnes de mesures des niveaux, il serait nécessaire de réaliser une campagne de mesure concomitante des niveaux de la Loire sur le réseau de surveillance de la DIREN.

L'actualisation de cette carte piézométrique permettrait de connaître plus précisément les niveaux de la nappe sur l'ensemble du val actuellement. En effet, ces niveaux ont pu être modifiés en plus de 35 ans, en fonction de la baisse du lit de la Loire depuis 1966. Le domaine de cette nouvelle carte devrait s'étendre entre Bouteille en amont et la pointe de Courpin en aval.

8.2. LES CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES

Les chroniques présentent trois intérêts :

- d'abord elles reconstitueront une conscience et une culture du risque de remontée de nappe au sein des services techniques ;

- elles fourniront des données réelles et fiables permettant d'asseoir une politique de prévention et de prévoir une mise en alerte lors des crues ;
- elles permettront d'améliorer le modèle hydrodynamique existant pour le faire évoluer vers un modèle de suivi.

Il a été possible de caler le modèle hydrodynamique en régime transitoire grâce aux mesures faites sur quatre piézomètres entre 1966 et 1975. Si ces piézomètres, situés en bordure de Loire, ont permis un calage précis des paramètres du modèle à proximité des communes de Jargeau et de Sandillon, on ne dispose pas de données chronologiques du niveau de la nappe sur la zone urbanisée d'Orléans et d'Olivet. Ce secteur étant le plus sensible de l'étude, il est indispensable de pouvoir disposer d'enregistrements précis entre Loire et Loiret. Compte tenu du caractère rapide des variations du niveau de la nappe au cours d'une crue de la Loire, il est indispensable d'avoir des mesures en continu avec un échantillonnage à un pas de temps horaire.

Pour bien mettre en évidence les résultats prévus par la modélisation hydrodynamique (décalage dans le temps et amortissement des variations des niveaux de la nappe en fonction de la distance à la Loire), il serait utile de disposer de plusieurs piézomètres répartis entre la Loire et le Loiret.

Il résulte de cette situation une incertitude sur les niveaux de référence de la nappe (carte piézométrique sur l'ensemble du val et variation piézométrique dans la zone urbanisée). Les résultats des simulations hydrodynamiques sont entachés d'un intervalle de confiance plus important dans les secteurs vulnérables des zones urbanisées (exemple : zone des Bras des Montées).

8.3. LES MESURES DE DÉBITS

Il existe une station de jaugeage en fonctionnement sur le Dhuy, en amont immédiat de la confluence avec le Loiret. Les débits du Dhuy proviennent en majorité des écoulements de surface et des apports sud des coteaux (Morchêne). Ces débits sont peu représentatifs des échanges avec la nappe. Les sorties de la nappe commencent réellement à partir de la source du Bouillon et se continuent tout au long du Loiret. On dispose de quelques mesures ponctuelles du débit du Loiret qui ont été réalisées entre 1985 et 1991 au pont Saint-Nicolas. L'emplacement du pont Saint-Nicolas permet d'avoir une bonne connaissance du débit du Loiret et, par différence avec les débits mesurés à la station du Dhuy, de connaître le débit d'exhaure de la nappe. Par contre les données disponibles au pont Saint-Nicolas ne correspondent pas à des périodes pour lesquelles il existe des mesures piézométriques dans le val, ce qui rend difficile toute interprétation d'échange entre la nappe et le Loiret.

Il s'avère nécessaire de pouvoir disposer de mesure en continu des débits du Loiret au niveau du pont Saint Nicolas ou plus en aval éventuellement afin de pouvoir faire un bilan précis des écoulements dans le Loiret qui se trouve être un exutoire principal de la nappe.

8.4. ÉVALUATION DES COÛTS D'INVESTISSEMENT ET DE FONCTIONNEMENT D'UN DISPOSITIF DE SURVEILLANCE.

Carte piézométrique

Celle-ci devra comprendre une campagne en situation de Hautes Eaux (de janvier à mars) et une campagne en situation de Basses Eaux (de septembre à octobre), en différenciant les niveaux dans les alluvions des niveaux dans les calcaires. Cette carte serait faite à partir de 400 points de mesure répartis dans l'ensemble du val entre Bouteille et la pointe de Courpin.

Coût de réalisation de cette carte : **90 K€ TTC.**

Réalisation des piézomètres de suivi des niveaux de la nappe

On propose la réalisation d'un dispositif de surveillance de la nappe en continu constitué de 16 points de mesure. Huit d'entre eux seront constitués de piézomètres nouveaux à réaliser et à équiper sur des sites stratégiques pour la compréhension du fonctionnement de la nappe (voir leur emplacement sur la carte de la figure 71), les huit autres seront des équipements de mesure à installer sur des puits ou des piézomètres existants qui seront mis à disposition par leur propriétaire.

Chaque piézomètre sera équipé d'un système de mesure en continu avec une télésurveillance.

Constitution des piézomètres (forages à réaliser) (voir schéma en annexe 6) :

- profondeur : 15 m,
- forage principal de 10 m (traversée des alluvions) : foration en 216 mm, équipé d'un tubage en acier de 180 mm avec cimentation de l'annulaire entre le terrain et le tubage acier ;
- partie crépinée de 10 à 15 m (captage de la zone des calcaires) : foration en 152 mm avec un tubage en PVC 80/88 mm, crépiné en partie basse et remontant jusqu'à la surface.

Ce piézomètre permettrait un accès aux équipements de mesure de niveau et à une pompe de 2 pouces pour des prélèvements pour analyse.

Coût de réalisation d'un piézomètre : 3 100 € TTC.

Équipement de mesure et de télé-suivi : 3 600 € TTC.

Coût d'investissement pour un piézomètre équipé : $3\ 100 + 3\ 600 = 6\ 700$ **K€ TTC/piézomètre.**

Les frais de fonctionnement comprennent la gestion et la maintenance du matériel, la récupération et le traitement des données piézométriques. Coût de fonctionnement par piézomètre : **1 600 € TTC/an/piézomètre.**

On résume dans le tableau 20 le programme de mesure et de surveillance qu'il serait nécessaire de réaliser dans le val.

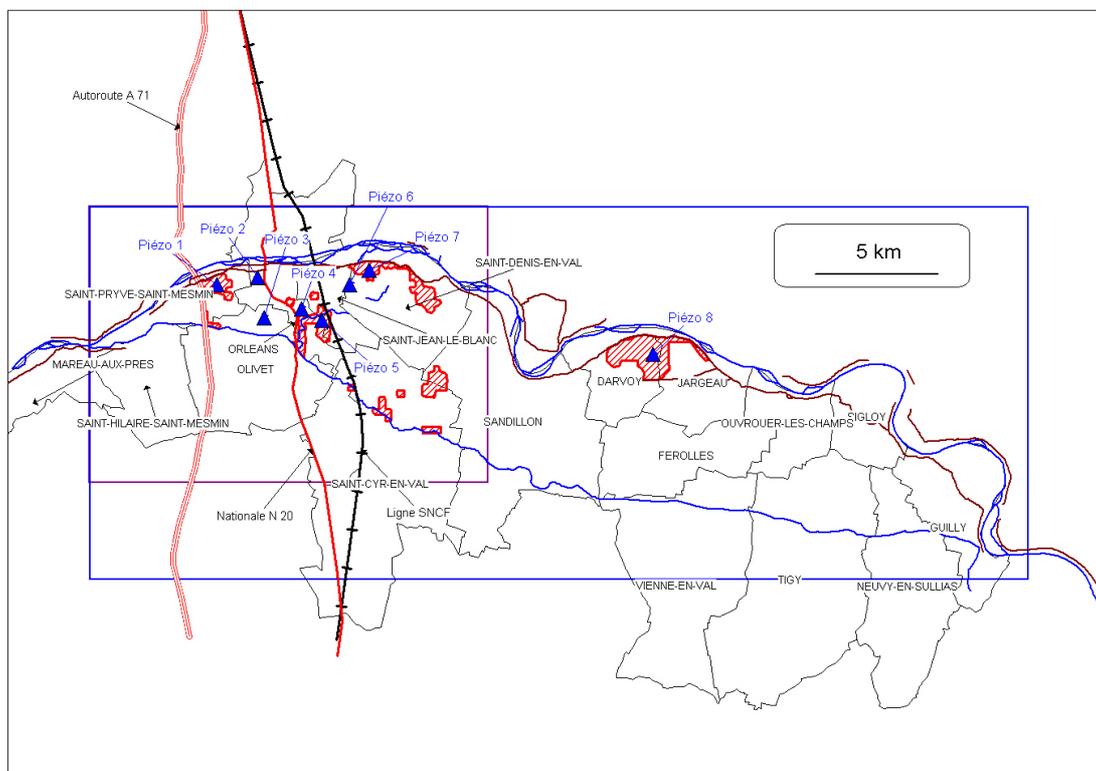


Fig. 71 - Localisation proposée des piézomètres de surveillance de la nappe.

N°	Action
1	<p align="center">Carte piézométrique de la nappe du val</p> <ul style="list-style-type: none"> - en situation de Hautes Eaux, en situation de Basses Eaux, - en différenciant les niveaux des alluvions et des calcaires. <p>Domaine : l'ensemble du val depuis Bouteille jusqu'à la pointe de Courpin</p> <p>Coût d'une carte piézométrique réalisée à partir de 400 points de mesure (deux situations : HE et BE, et deux niveaux : alluvions et calcaires) : 90 K€ TTC.</p>
2	<p align="center">Equipement et mesures piézométriques</p> <ul style="list-style-type: none"> - réalisation et équipement de huit piézomètres dans le val (selon emplacement figurant sur la carte) – Investissement : 8 x 6,7 = 53,6 K€ TTC - équipement de 8 puits ou forage existants – Investissement : 8 x 3,6 = 28,8 K€ TTC <p>Investissements (53,6 + 28,8) : environ 80 K€ TTC</p> <p>Fonctionnement (16 x 1,6) : environ 25 K€ TTC/an</p>
3	<p align="center">Mesure du débit du Loiret (DIREN)</p> <ul style="list-style-type: none"> - réalisation d'une station de jaugeage sur le Loiret, à proximité du pont Saint-Nicolas ou plus en aval.
4	<p align="center">Mesure du niveau de la Loire (DIREN)</p> <ul style="list-style-type: none"> - prévoir des campagnes de mesures de la ligne d'eau de la Loire sur les stations de la DIREN lors des campagnes piézométriques.

Tabl. 20 - Programme de mesure et de surveillance proposé dans le val d'Orléans.

9. Conclusion

Ces résultats montrent que le risque d'atteinte par remontée de nappe dans la zone urbanisée de l'agglomération d'Orléans au sud de la Loire est réel et préoccupante.

Lors d'une crue centennale de la Loire, il existe un risque de situation vulnérable pour la quasi totalité du val où le niveau maximal de la nappe sera compris entre 1 et 3 m/sol, inondant les caves des habitations.

Un débordement de la nappe serait observé dans les quartiers les plus bas des communes de Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, d'Olivet, de Saint-Jean-le-Blanc et de Saint-Denis-en-Val.

Seuls quelques rares secteurs seraient à l'abris des remontées de nappe. Sur la commune d'Orléans, il s'agit en particulier de la partie haute du quartier Saint-Marceau.

Au vue du fonctionnement de notre société urbaine avec de nombreux équipements souterrains, une remontée de la nappe de cette ampleur peut réellement provoquer des dégâts. On évalue entre 50 et 100 millions d'Euros le montant des dégâts occasionnés par la remontée de la nappe à la suite d'une crue centennale de la Loire. C'est un enjeu en terme d'atteinte et de gestion de crise.

Cette étude a permis d'avoir une bonne vision du fonctionnement de la nappe. Elle a révélé que dans la partie du val comprise entre la Loire et le Loiret, le risque n° 1 est celui d'une remontée de la nappe. Ce phénomène n'avait pas été étudié avec une telle précision jusque là.

Les résultats de l'étude montrent la nécessité d'avoir un système plus précis de suivi des niveaux de la nappe. Il est proposé la réalisation d'une carte piézométrique dans le contexte hydraulique actuel et l'équipement de huit piézomètres pour suivre les évolutions de la nappe en continu.

Le montant des investissements pour l'acquisition de ces données est estimé à un peu moins de 150 K€, avec un coût de fonctionnement annuel de 13 K€. Ces chiffres restent minimes par rapport aux dommages provoqués par une remontée de la nappe lors d'une crue centennale.

ANNEXE 1

Profil en long de la Loire

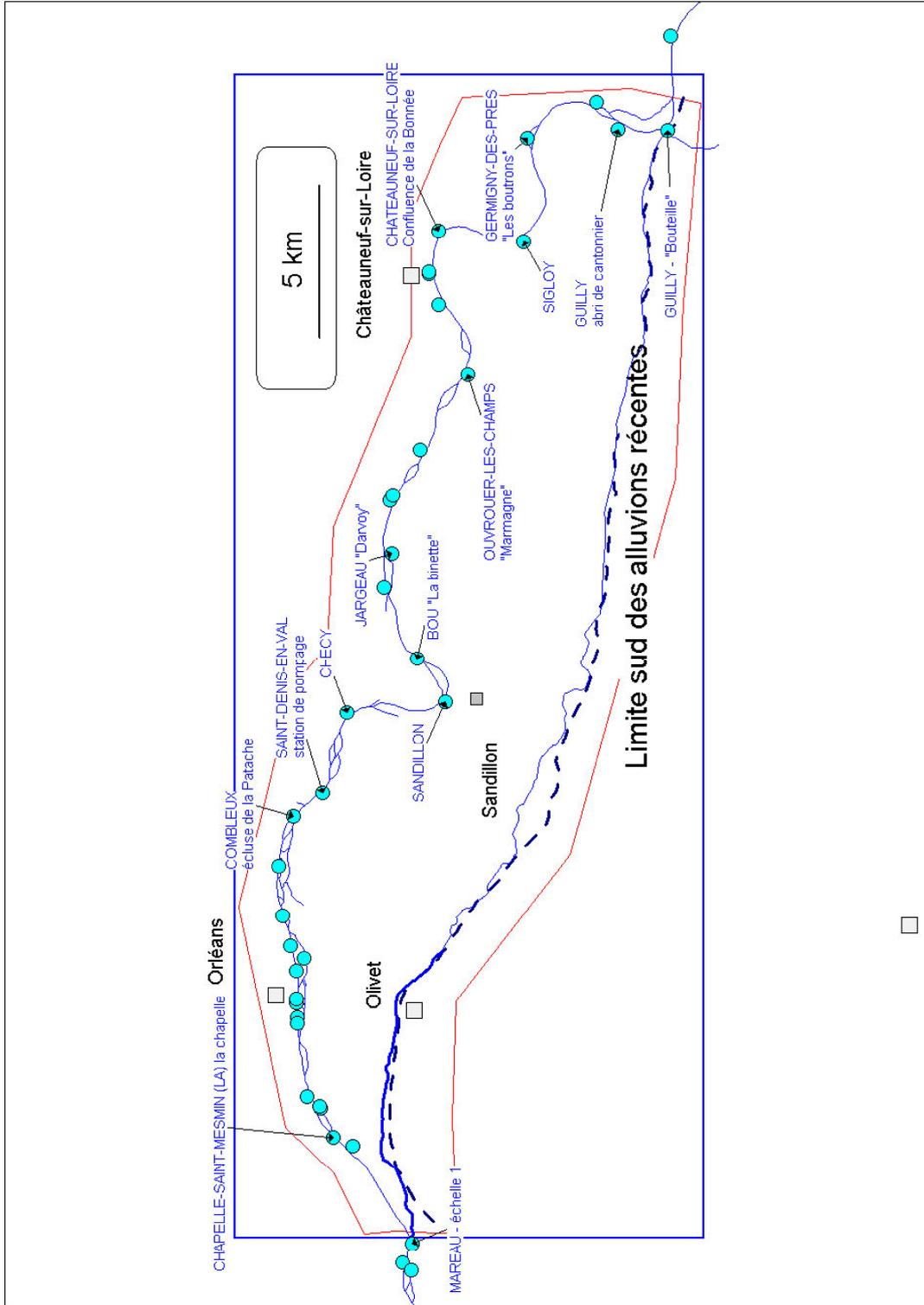


Fig. 1 - Emplacement des stations de mesure de la ligne d'eau de la Loire (DIREN).

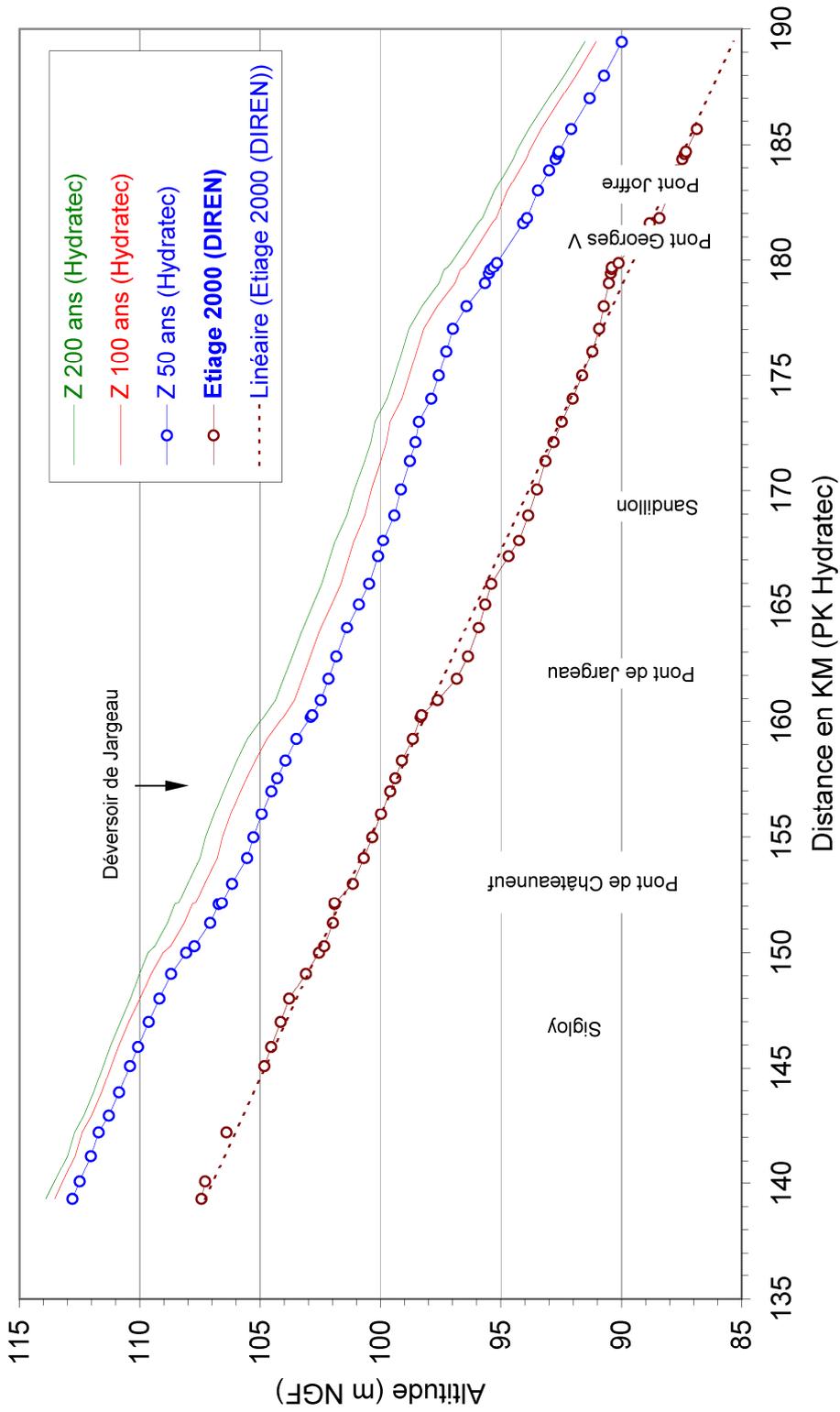


Fig. 2 - Profil en long de la ligne d'eau de la Loire en étiage et en crue.

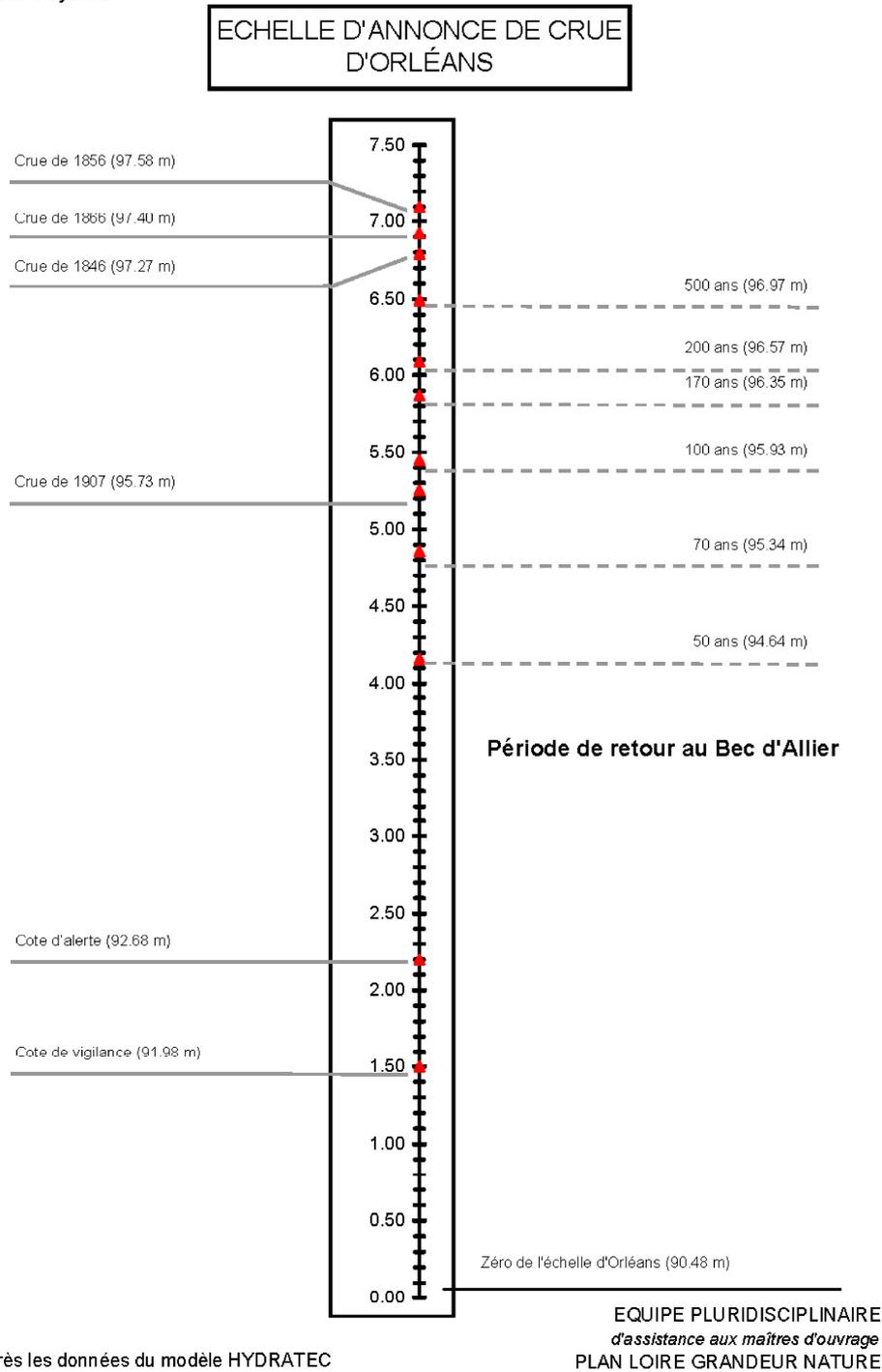


Fig. 3 - Échelle d'annonce de crue de la Loire à Orléans (pont Royal).

ANNEXE 2

Profil en long du Loiret

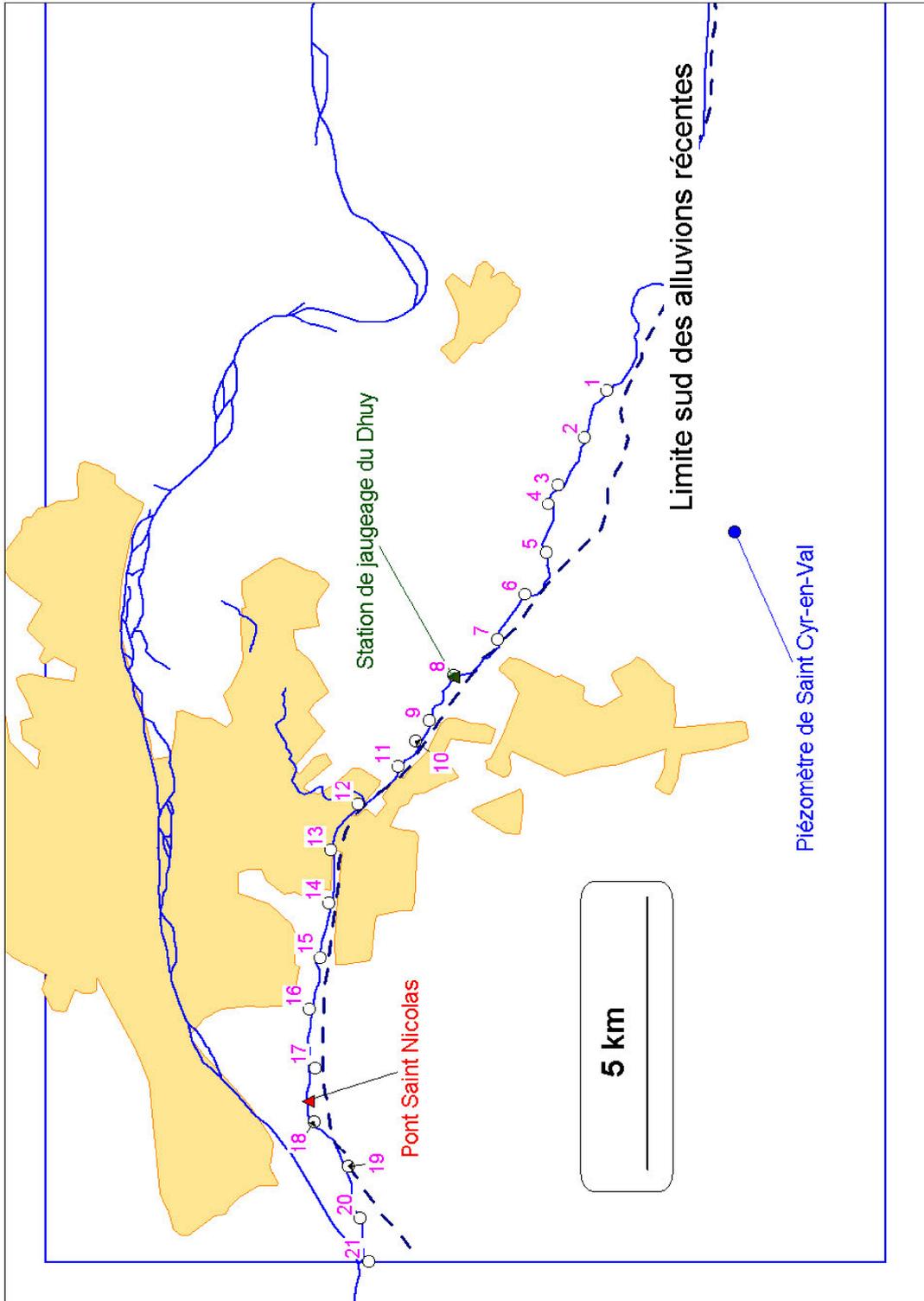


Fig. 1 - Emplacement des points cotés sur le Loiret.

n° point	pk modèle	Coordonnées Lambert 2			ZF (m NGF)	Crue 100 ans		Crue 200 ans	
		X	Y	Zmax m.NGF		Zmax m.NGF	Zmax m.NGF		
1	21,7	575 874,97	2 313 945,02	95,4	96,824	96,824	96,824	96,824	
2	22,7	575 004,50	2 314 349,00	94,88	96,29	96,29	96,29	96,29	
3	23,7	574 137,50	2 314 833,43	94,63	95,946	95,946	95,946	95,946	
4	24,1	573 792,00	2 315 004,41	94,55	95,736	95,736	95,737	95,737	
5	25	572 910,00	2 315 045,00	94,1	94,986	94,986	95,045	95,045	
6	26	572 145,03	2 315 429,97	92,5	93,803	93,803	94,551	94,551	
7	27	571 304,97	2 315 935,02	92,1	93,315	93,315	94,521	94,521	
8	28	570 655,01	2 316 734,96	91,75	92,651	92,651	94,458	94,458	
9	29	569 815,02	2 317 169,99	90,9	91,621	91,621	94,062	94,062	
10	29,437	569 452,30	2 317 416,90	90,043	91,03	91,03	93,966	93,966	
11	30	568 985,00	2 317 735,00	89,59	90,927	90,927	93,947	93,947	
12	31,01	568 273,15	2 318 457	88,964	90,879	90,879	93,888	93,888	
13	32,02	567 450,30	2 318 950,90	88,773	90,871	90,871	93,732	93,732	
14	33,014	566 476,03	2 318 997,10	87,63	90,869	90,869	93,571	93,571	
15	34	565 485,05	2 319 144,99	87,72	90,742	90,742	92,54	92,54	
16	35	564 519,90	2 319 340,00	87,68	90,741	90,741	92,316	92,316	
17	36	563 445,00	2 319 250,10	87,48	90,736	90,736	91,821	91,821	
18	37	562 470,00	2 319 255,00	86,088	90,73	90,73	91,4	91,4	
19	38,038	561 639,44	2 318 641,89	84,349	90,729	90,729	91,268	91,268	
20	39	560 700,74	2 318 429,29	84,32	90,729	90,729	91,198	91,198	
21	39,8	559 909,80	2 318 274,90	83,6	90,727	90,727	91,194	91,194	

Tabl. 1 - Altitude du lit du Loiret et de la ligne d'eau lors d'une crue centennale ou deux centennales.

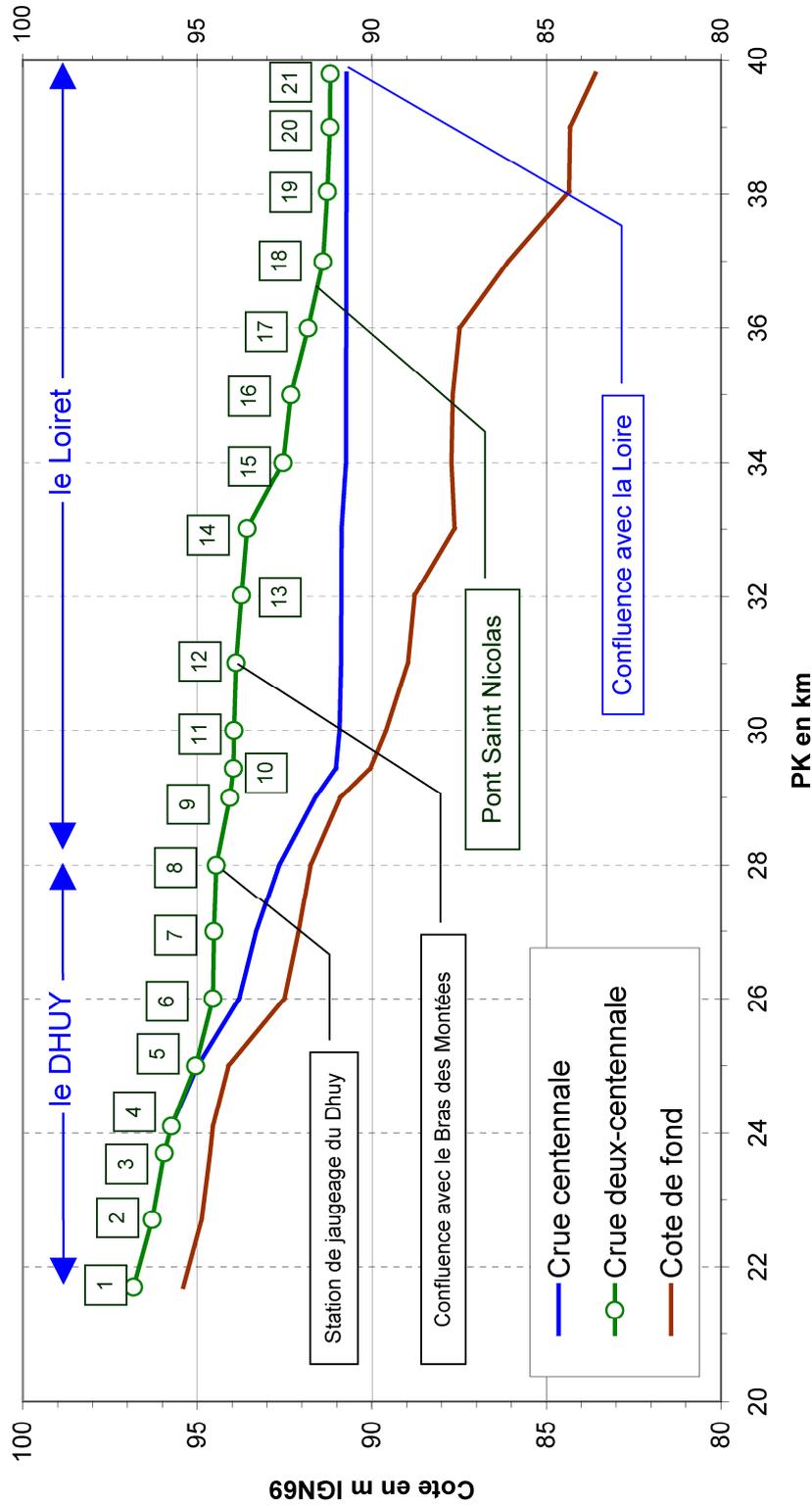


Fig. 2 - Altitude maximale de la ligne d'eau dans le Loiret pour différentes crues.

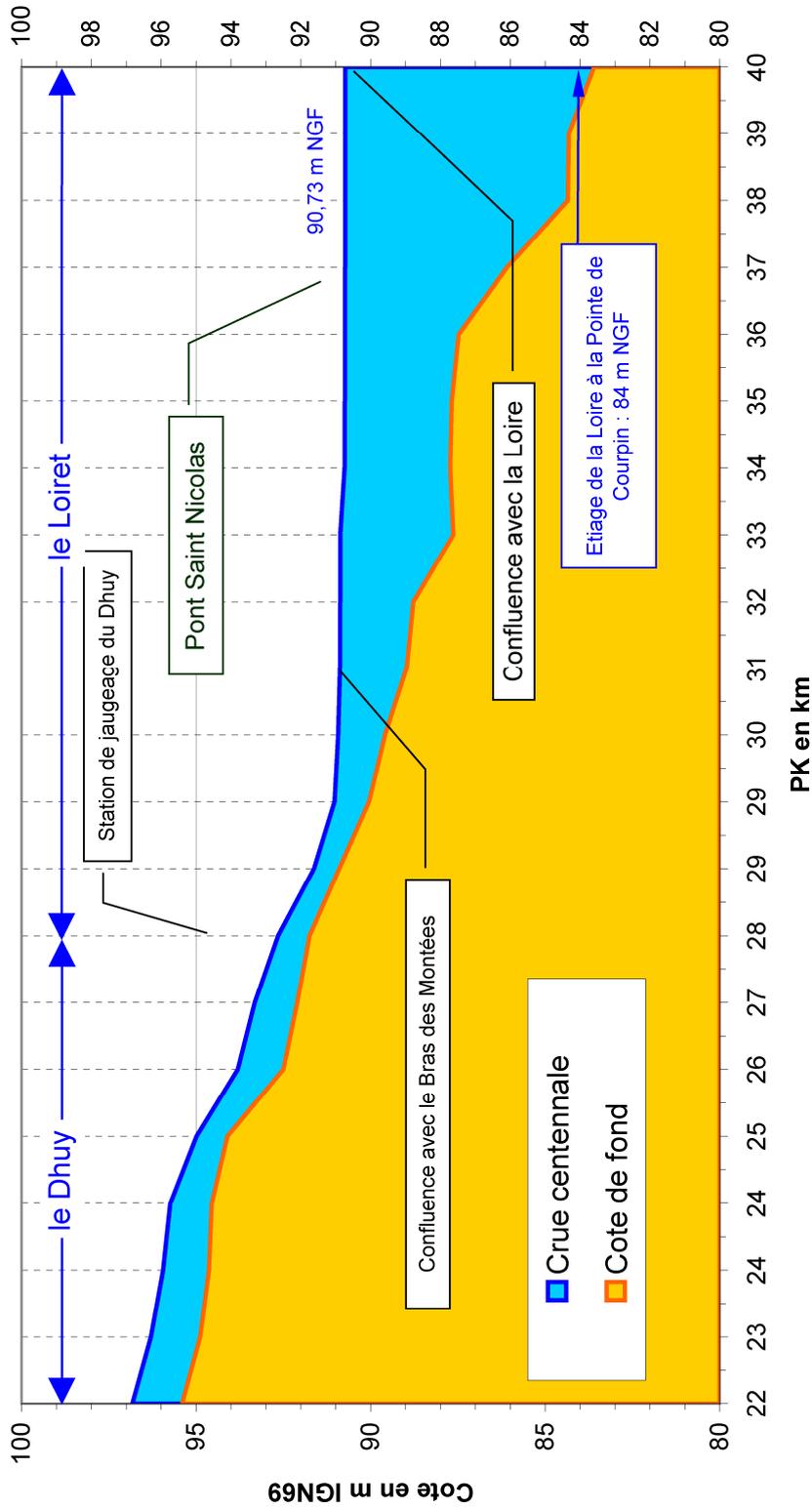


Fig. 3 - Altitude maximale de la ligne d'eau dans le Loiret lors d'une crue centennale.

ANNEXE 3

Profils en travers de la Loire

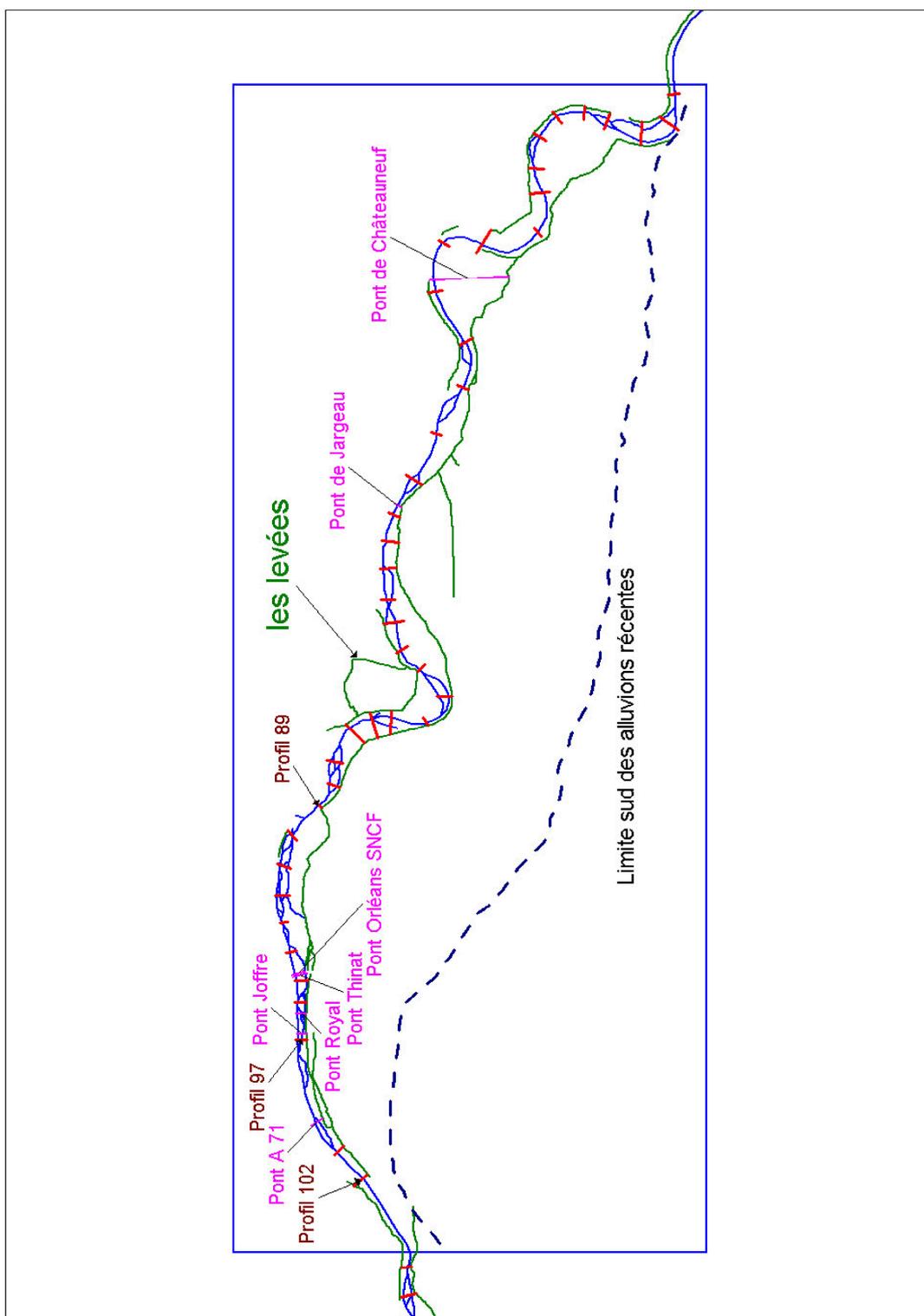


Fig. 1 - Localisation des profils en travers connus de la Loire.

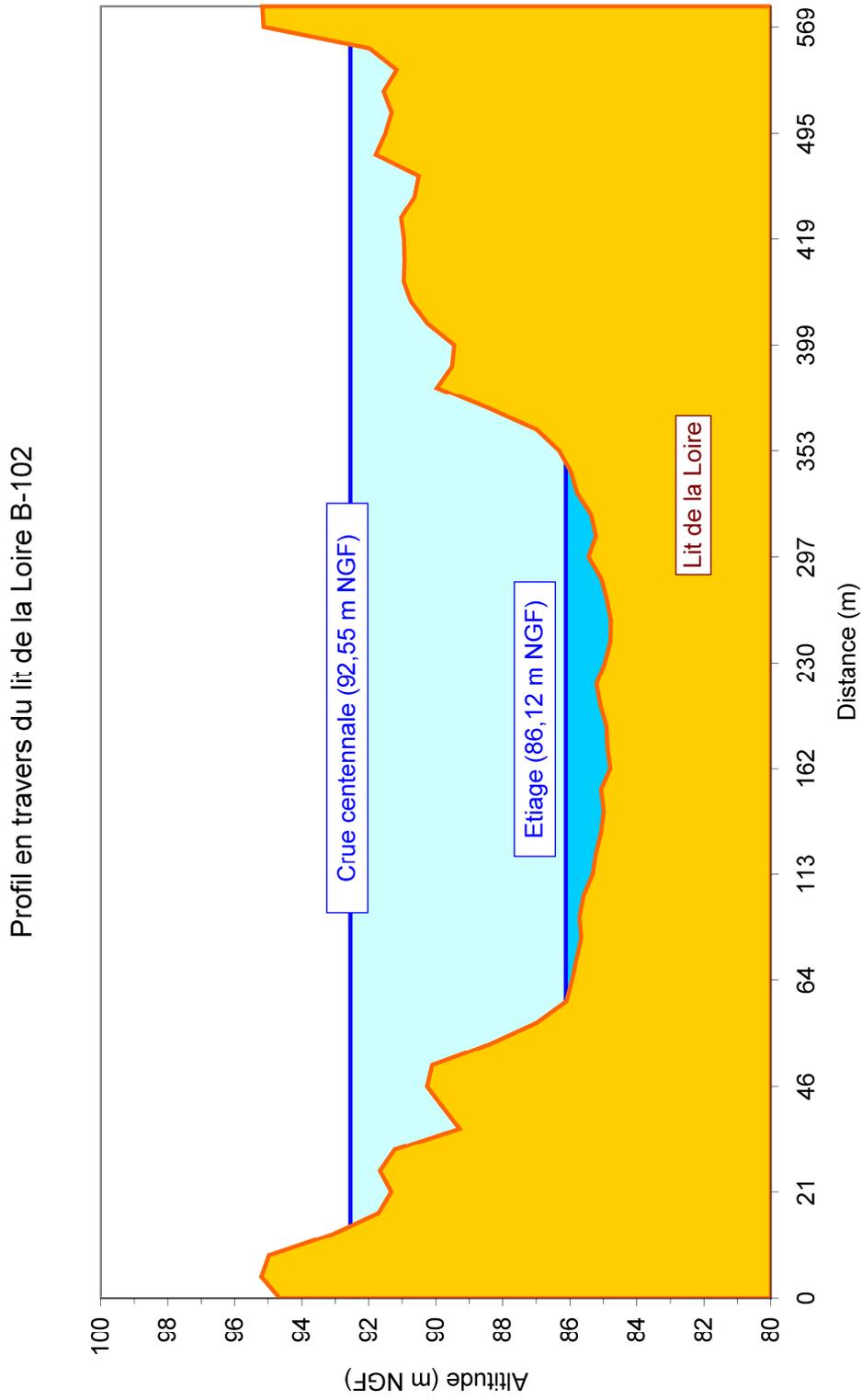


Fig. 2 - Profil en travers n° 89.

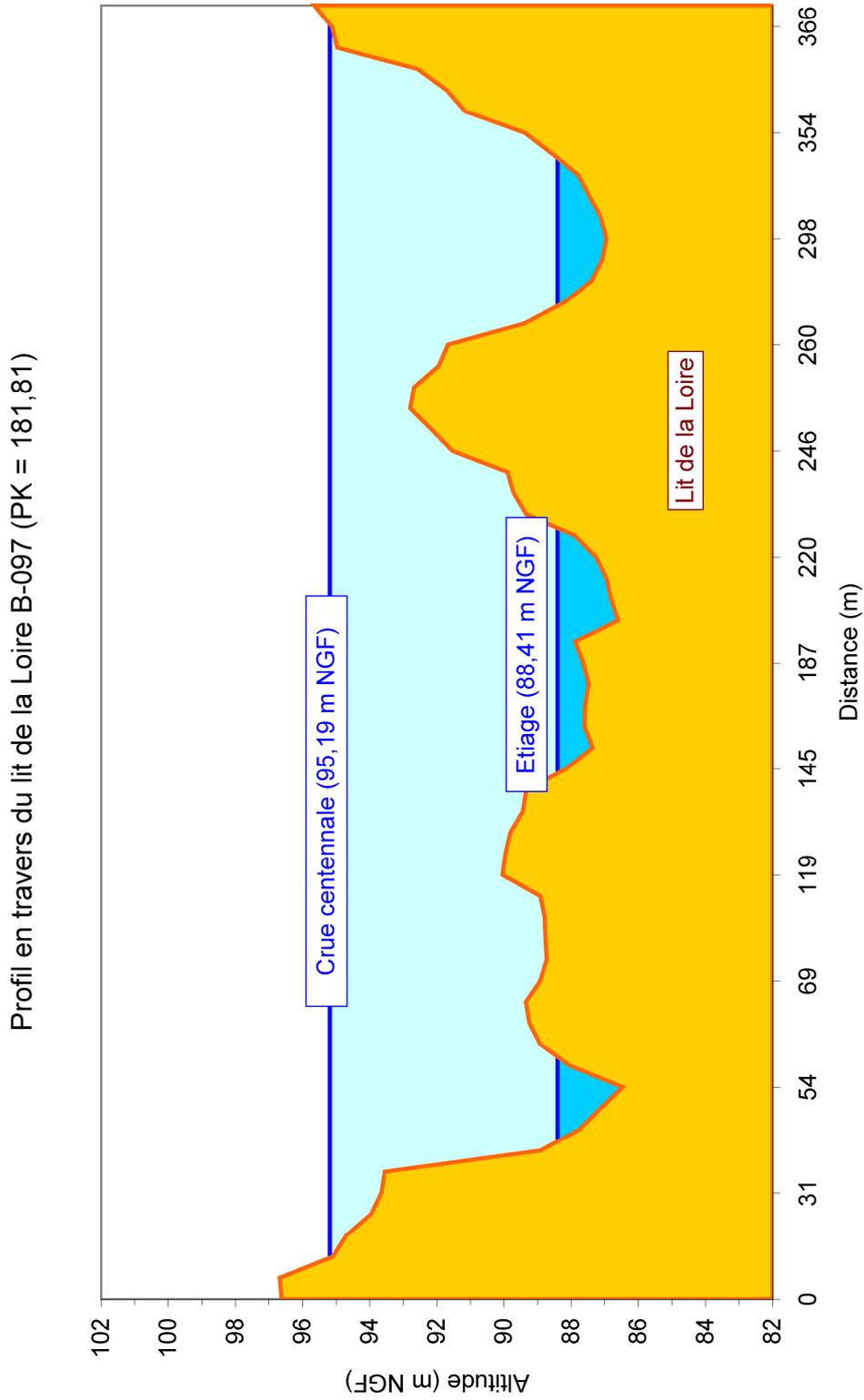


Fig. 3 - Profil en travers n° 97.

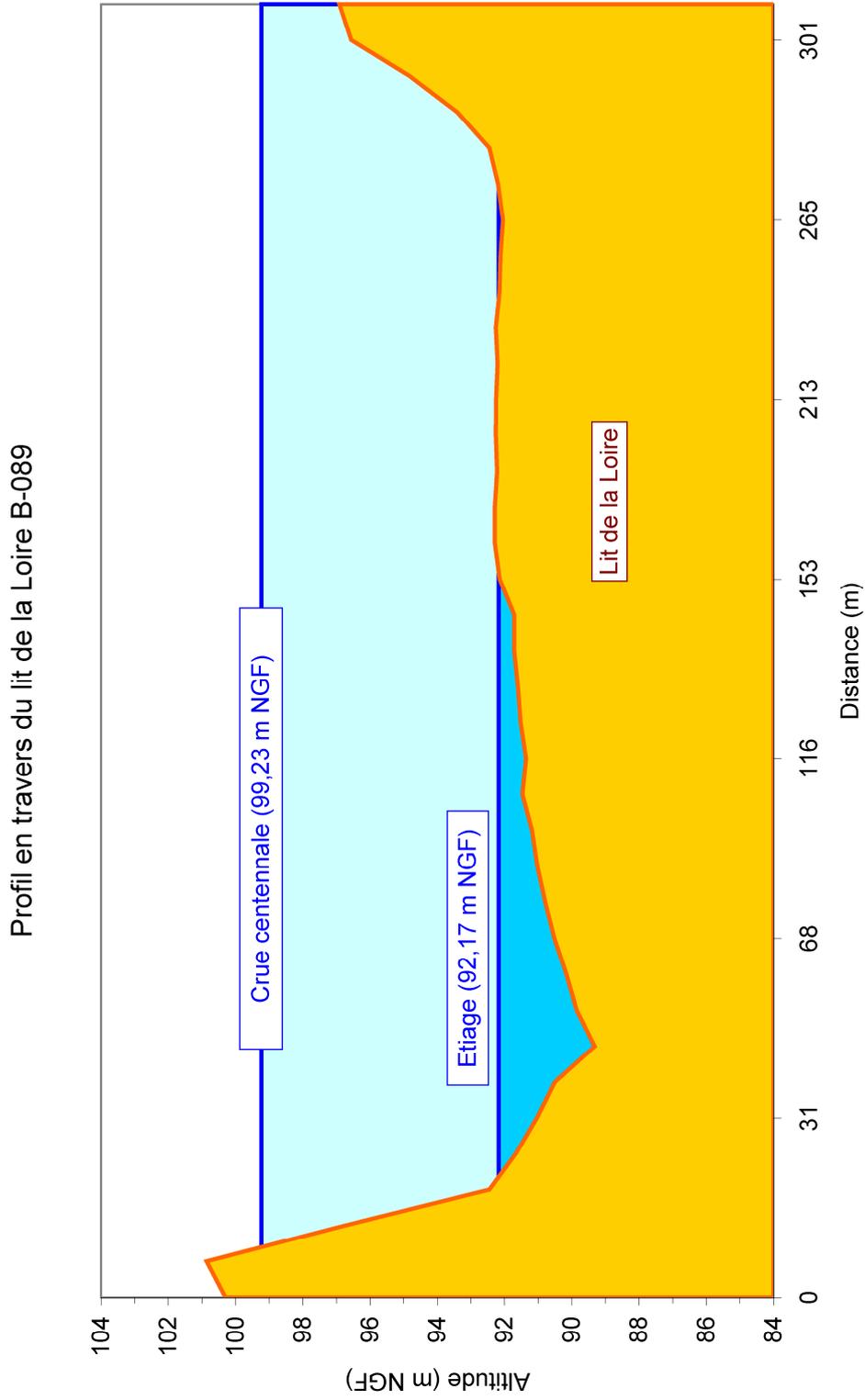


Fig. 4 - Profil en travers n° 102.

ANNEXE 4

Les prélèvements dans le val de Loire

1. Les communes du val de Loire

Commune	INSEE
DARVOY	45123
FEROLLES	45144
GUILLY	45164
JARGEAU	45173
NEUVY-EN-SULLIAS	45226
OLIVET	45232
ORLEANS (rive gauche Loire)	45234
OUVROUER-LES-CHAMPS	45241
SAINT-CYR-EN-VAL	45272
SAINT-DENIS-EN-VAL	45274
SAINT-HILAIRE-SAINT-MESMIN	45282
SAINT-JEAN-LE-BLANC	45286
SAINT-PRYVE-SAINT-MESMIN	45298
SANDILLON	45300
SIGLOY	45311
TIGY	45324
VIENNE-EN-VAL	45335

Tabl. 1 - Les communes du val d'Orléans.

Dix-sept communes sont concernées : en totalité ou partiellement Orléans au sud de la Loire.

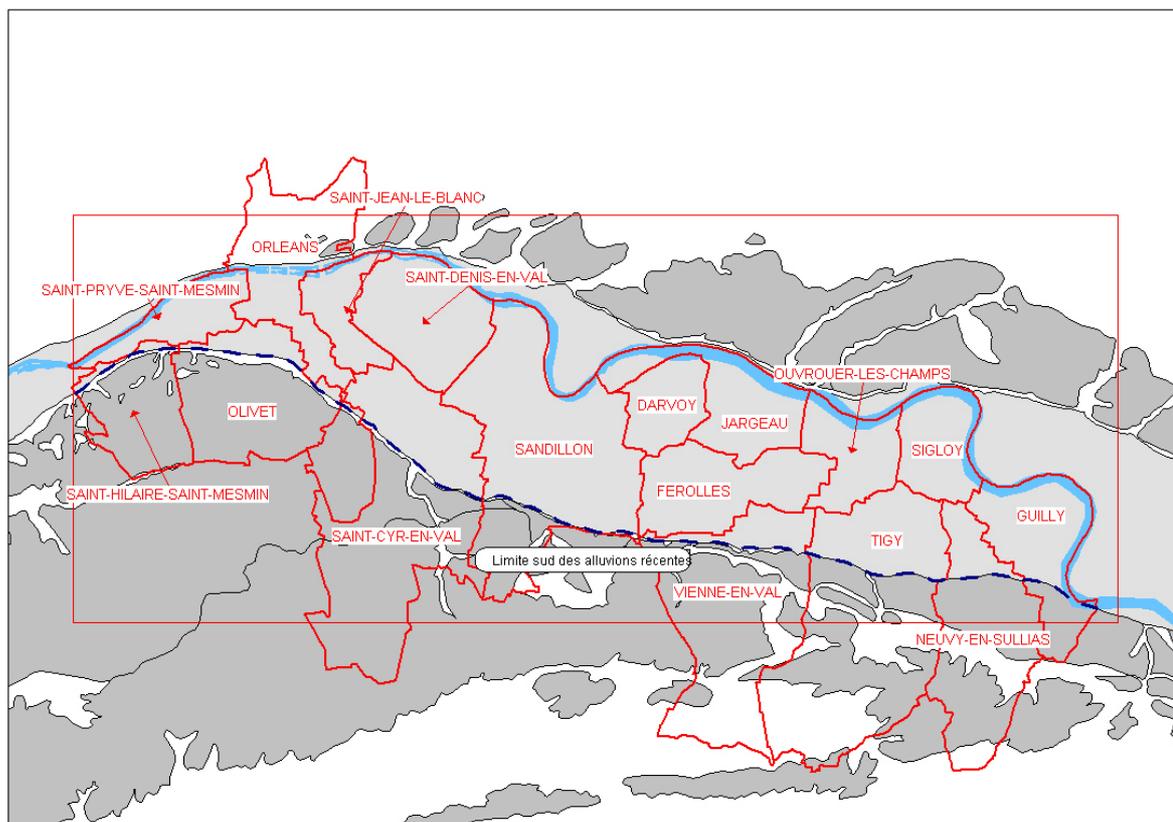


Fig. 1 - Carte des communes du val de Loire.

2. Origine des données

Les données des prélèvements ont été communiquées par les services de l'agence de l'eau Loire-Bretagne.

3. Répartition des prélèvements par usage de 1996 à 2000

Année	Usage			Total
	AEP	Industrie	Irrigation	
1996	13,5	3,7	9,4	26,6
1997	13,7	2,8	8,8	25,3
1998	13,2	3,0	10,2	26,4
1999	12,6	3,8	8,9	25,2
2000	12,9	3,6	7,0	23,5
Moyenne (5 ans)	13,2	3,4	8,9	25,4

Tabl. 2 - Volumes prélevés par usage dans le val d'Orléans (Mm³/an).

Année	Usage			Total
	AEP	Industrie	Irrigation	
1996	20	17	409	446
1997	21	17	397	435
1998	21	17	435	473
1999	21	18	430	468
2000	21	18	417	456

Tabl. 3 - Nombre de forages par usage recensés dans le val d'Orléans.

Le nombre de forages et les volumes prélevés sur la période 1996-2000 sont stables.

Seuls les prélèvements pour l'irrigation peuvent changer en fonction des conditions hydro-climatiques d'été.

Les volumes prélevés pour l'AEP et l'industrie se répartissent tout au long de l'année, alors que les prélèvements pour l'irrigation sont concentrés sur quatre mois.

Comparaison prélèvement/pluie efficace

Surface du Val d'Orléans : 300 km².

Pluie efficace moyenne annuelle estimée : 200 mm.

Volume annuel moyen apporté par les pluies efficaces : $300 \times 10^6 \text{ (m}^2\text{)} \times 0,2 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{)}$

$$V_{PE} = 60 \text{ Mm}^3\text{/an}$$

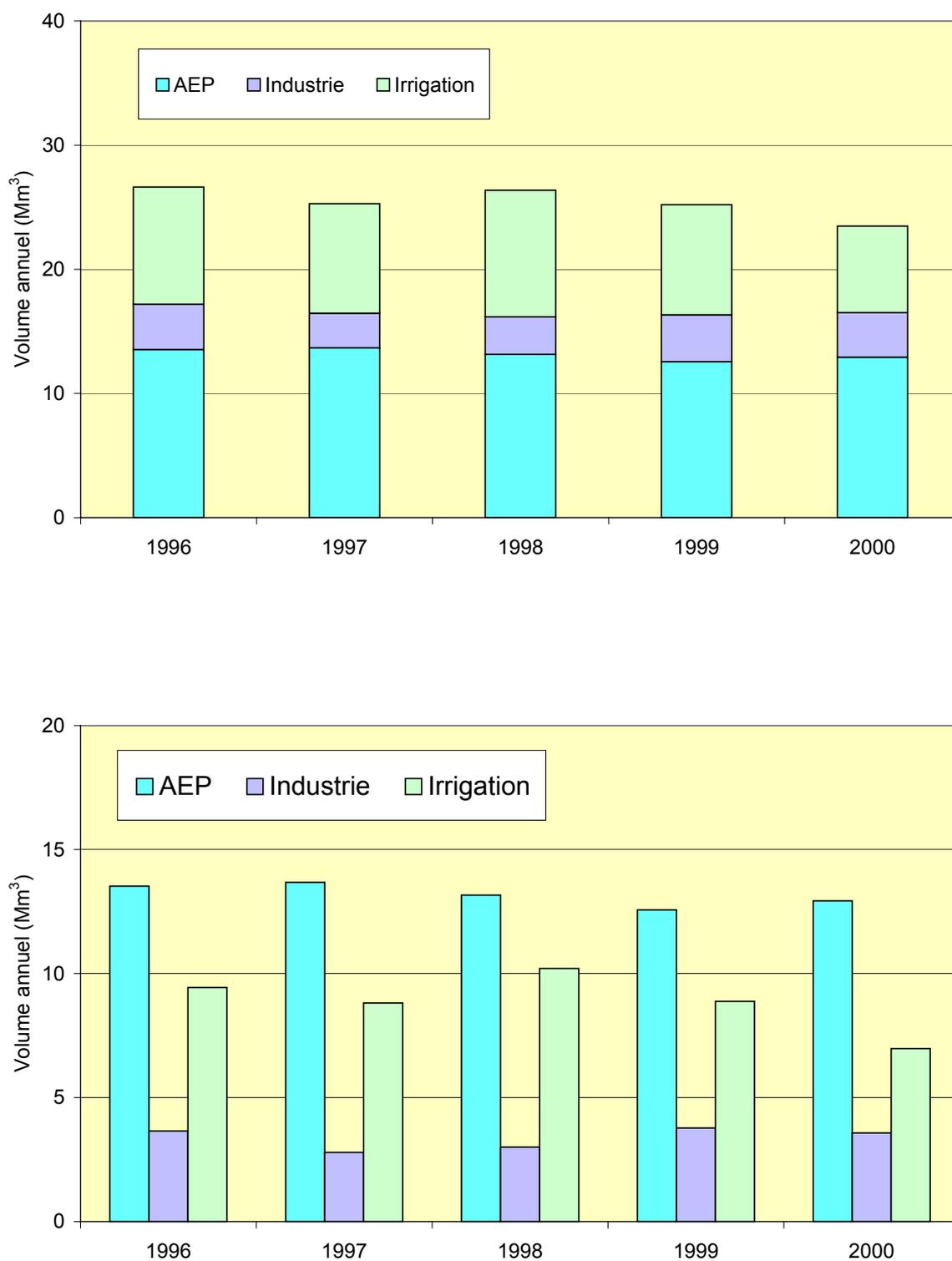


Fig. 2 - Les prélèvements dans le val d'Orléans selon les usages entre 1996 et 2000 (origine des données agence de l'Eau Loire-Bretagne).

4. Prélèvements en 2000

4.1 - Répartition des prélèvements par usage et par commune

Commune	AEP	Industrie	Irrigation	Total
DARVOY	90 600		279 400	370 000
FEROLLES	0		560 100	560 100
GUILLY	169 900		356 400	526 300
JARGEAU	336 500	17 000	224 700	578 200
NEUVY-EN-SULLIAS			151 500	151 500
OLIVET	1 543 000	57 100	40 600	1 640 700
ORLEANS (rive gauche Loire)	9 835 100	1 409 800	49 800	11 294 700
OUVROUER-LES-CHAMPS			439 500	439 500
SAINT-CYR-EN-VAL	195 400	887 600	1 236 600	2 319 600
SAINT-DENIS-EN-VAL			667 400	667 400
SAINT-HILAIRE-SAINT-MESMIN	177 900		191 700	369 600
SAINT-JEAN-LE-BLANC		13 400	87 200	100 600
SAINT-PRYVE-SAINT-MESMIN		400	132 500	132 900
SANDILLON	254 700	1 190 700	905 000	2 350 400
SIGLOY	97 400		423 800	521 200
TIGY	118 300		683 400	801 700
VIENNE-EN-VAL	111 900		548 000	659 900
Total m³	12 930 700	3 576 000	6 977 600	23 484 300

Tabl. 4 - Volumes prélevés par usage et par commune (m³/an) - Année 2000.

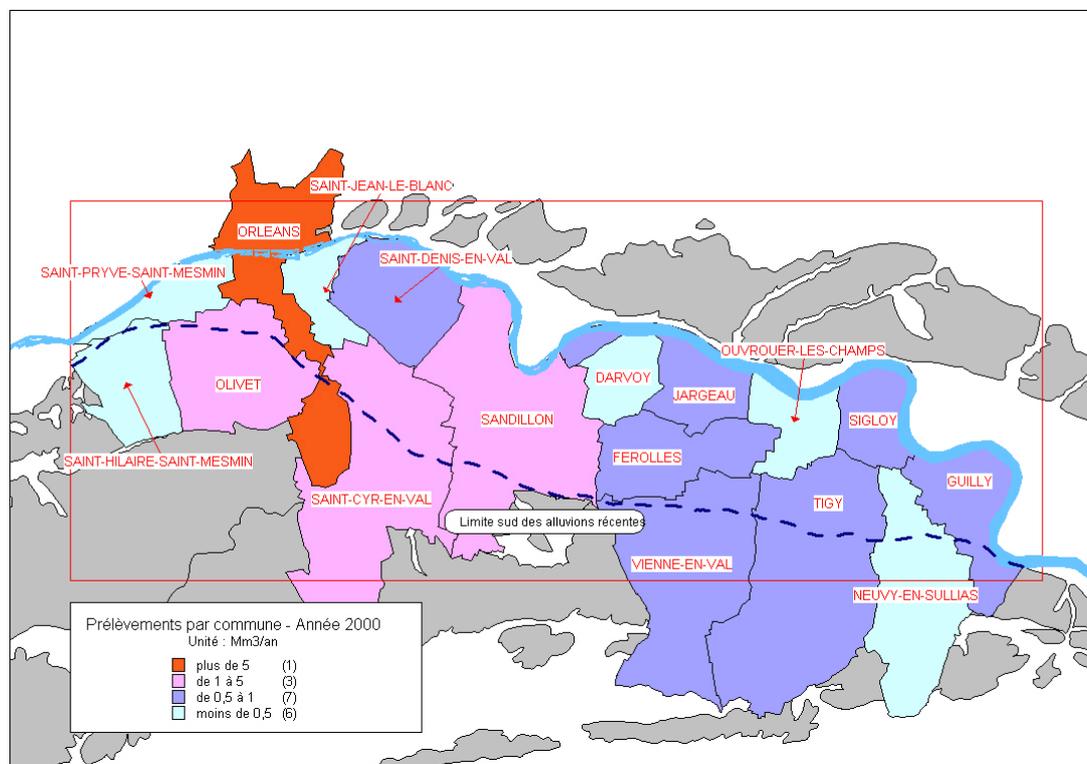


Fig. 3 - Carte des volumes prélevés par commune (m³/an) - Année 2000.

4.2 - Répartition des prélèvements par ouvrage

En 2000, 456 forages recensés

Répartition :

- 3 forages de plus de 2 Mm³/an. Il s'agit des forages AEP de la ville d'Orléans qui ont prélevé 9,8 Mm³ en 2000, soit 42 % du total ;
- 17 forages (AEP et industriels principalement) ont les prélèvements compris entre 100 000 et 1 Mm³/an, pour un total de 6,3 Mm³ en 2000, soit 27 % ;
- le reste (456 forages) ont des prélèvements inférieurs à 100 000 m³/an, pour un total de 7,3 Mm³/an, soit 31 %.

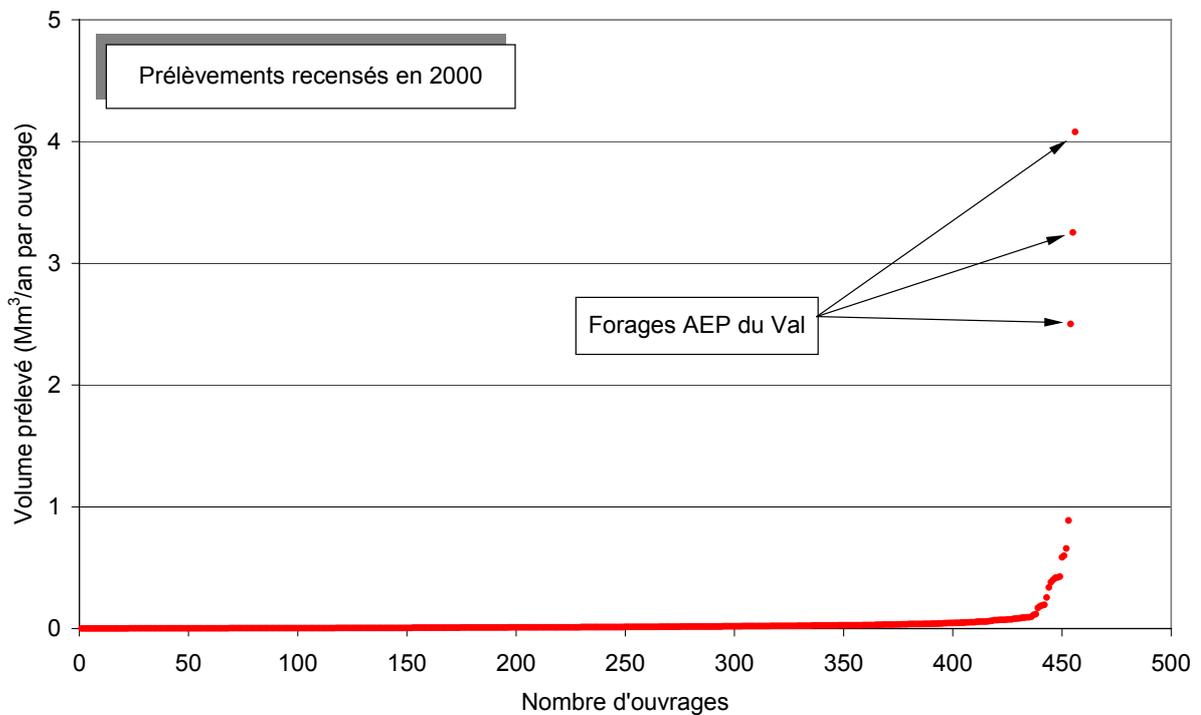


Fig. 4 - Classement des forages de prélèvement en fonction du volume prélevé annuellement.

4.3 - Répartition des prélèvements par profondeur

Nombre de forages en fonction de la profondeur :

64 forages sur 456 ont moins de 10 m de profondeur.

Volume prélevé en fonction de la profondeur :

2,1 Mm³/an prélevés sur les dix premiers mètres.

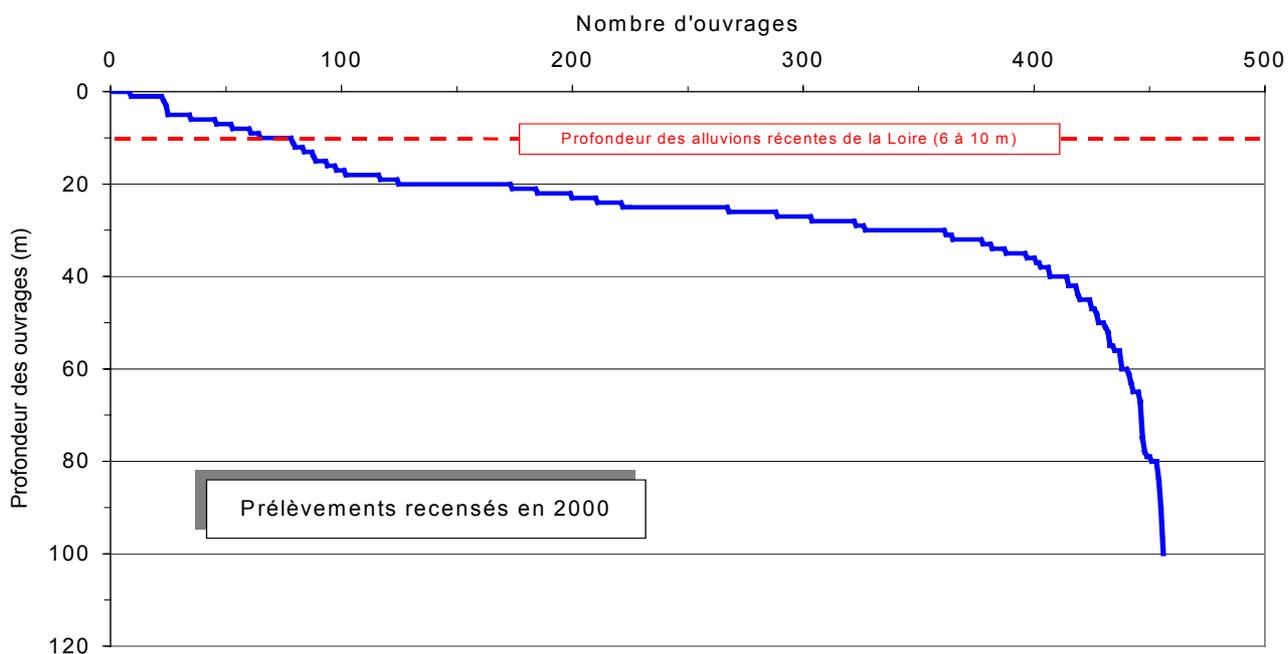


Fig. 5 - Classement des forages en fonction de la profondeur.

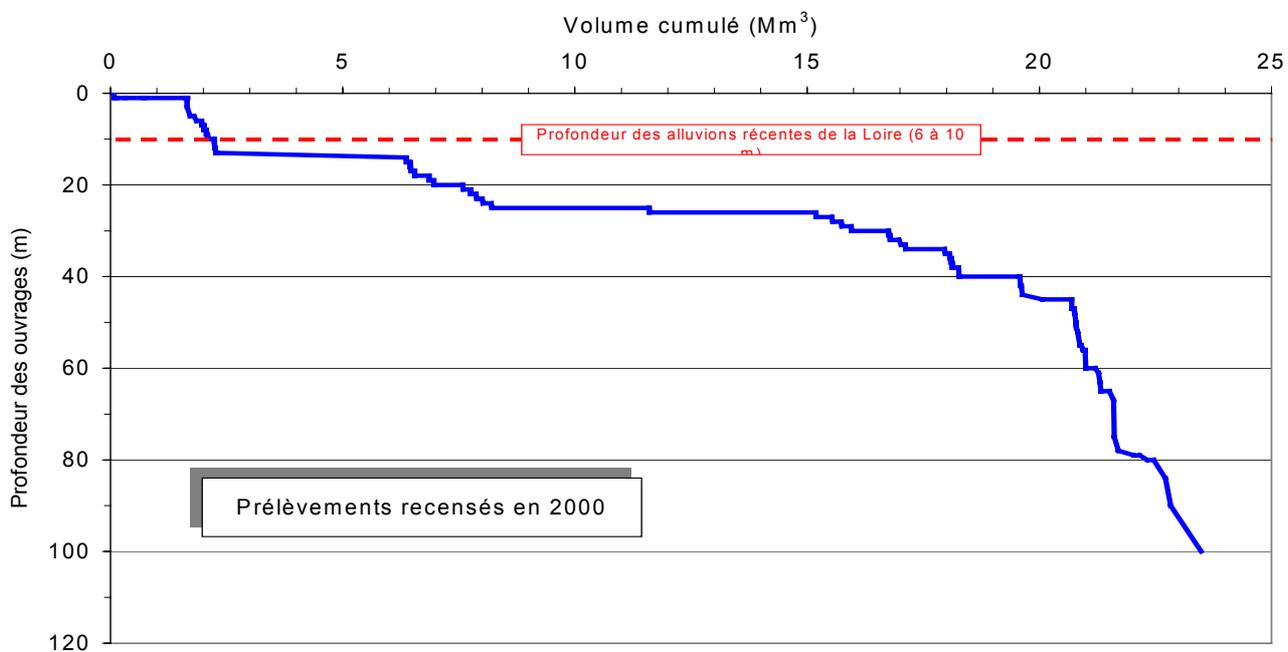
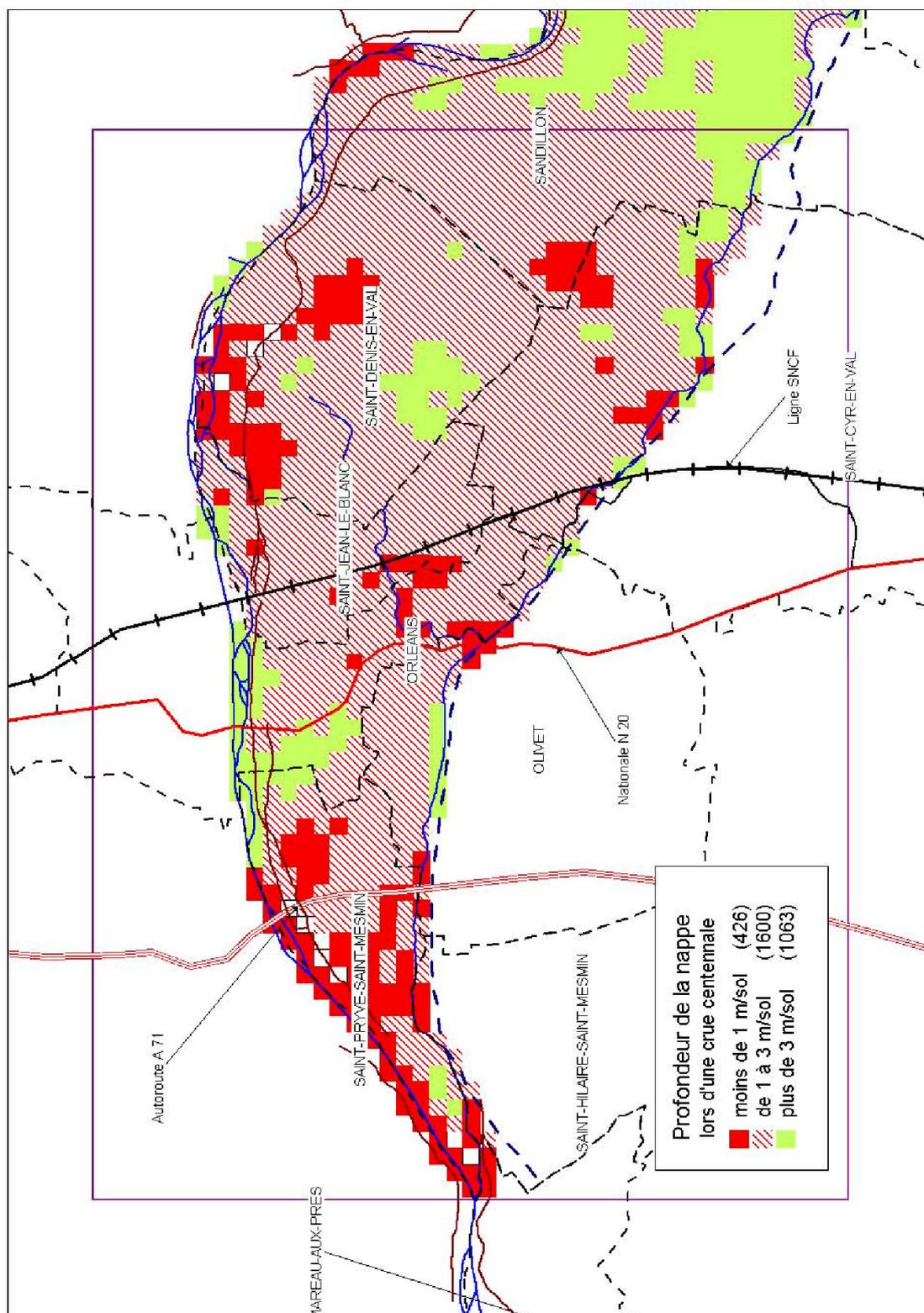


Fig. 6 - Volume cumulé des forage en fonction de la profondeur.

ANNEXE 5

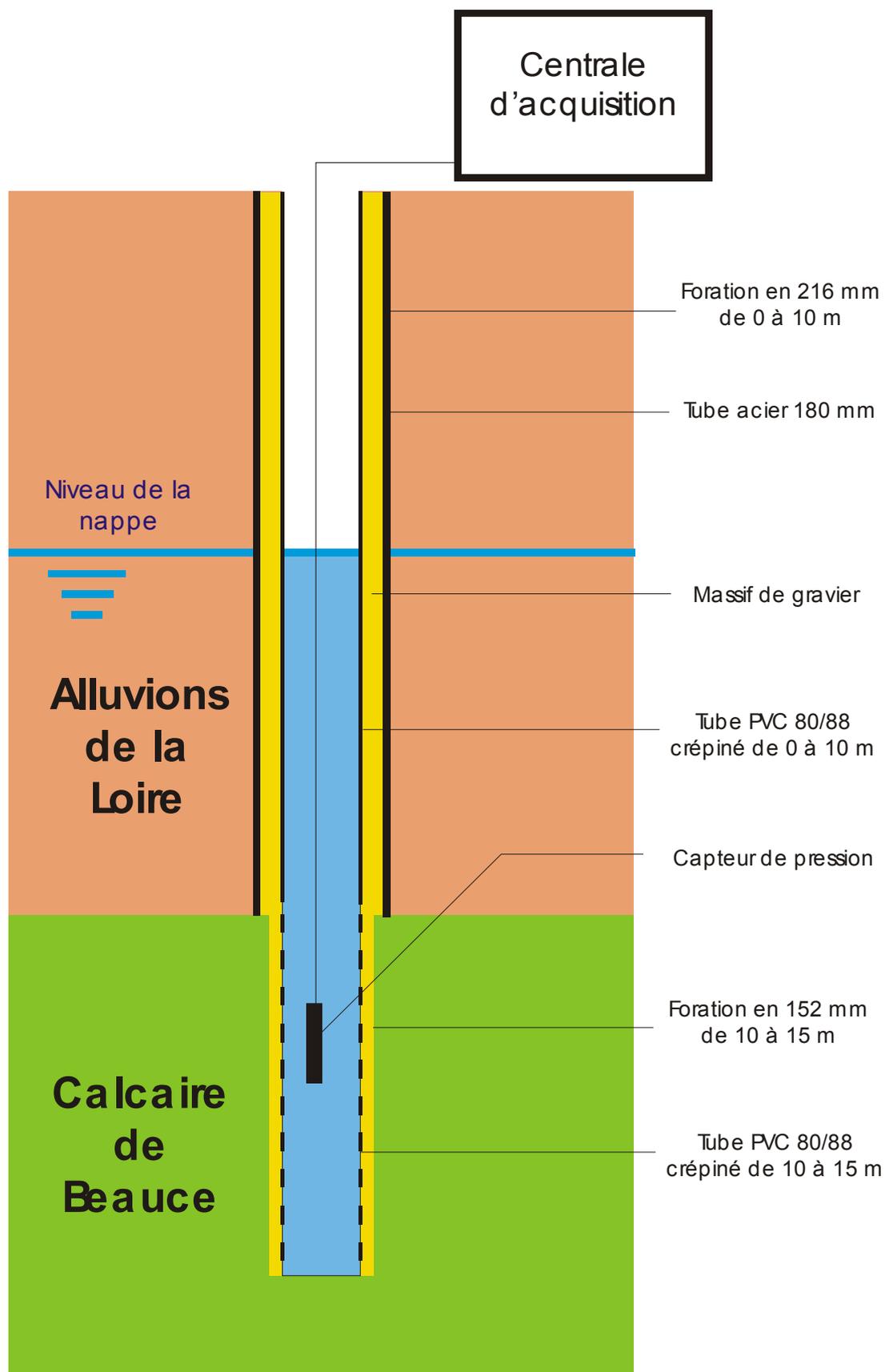
Profondeur de la nappe lors d'une crue centennale

Situation d'une crue centennale de la Loire. Zone urbanisée entre Loire et Loiret (copie de la figure 65 sans la zone inondée par le remous de la Loire).



ANNEXE 6

Profil type d'un piézomètre dans le val d'Orléans





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Centre
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34