



Suivi de la nappe du Val d'Orléans au droit de 5 piézomètres - Valorisation des données 2012-2013

Rapport final

BRGM/RP-63864-FR

Septembre 2014





Suivi de la nappe du Val d'Orléans au droit de 5 piézomètres - Valorisation des données 2012-2013

Rapport final

BRGM/RP-63864-FR
Septembre 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM

D. Salquèbre, J.F. Vernoux,
Avec la collaboration de
N. Amraoui et E. Le Boucher

Vérificateur :

Nom : A. Wulleumier

Date : 23/09/2014

Signature :

Approbateur :

Nom : E. Gomez

Date : 28/10/2014

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Mots-clés : Val d'Orléans, Piézomètres, Karst, Alluvions, Logiciel CATHERINE

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

Salquère D., Vernoux J.F., avec la collaboration de N. Amraoui et E. Le Boucher (2014) – Suivi de la nappe du Val d'Orléans au droit de 5 piézomètres – Valorisation des données 2012-2013. Rapport final BRGM/RP-63864-FR, 61 p., 21 ill., 6 tab., 3 ann.

Synthèse

Pour mieux connaître et pouvoir anticiper le risque représenté par les remontées de nappe dans le Val d'Orléans consécutives à de fortes crues de la Loire, la ville d'Orléans a fait réaliser 5 piézomètres équipés de moyens de mesure en continu des niveaux d'eau. Les centrales de mesures, installées sur ces piézomètres en 2010, permettent de suivre l'évolution du niveau de la nappe du Val d'Orléans, entre Loire et Loiret.

Après une année 2011 durant laquelle le suivi du niveau de la nappe a été discontinu, en raison de dysfonctionnements du matériel et de l'absence de maintenance régulière, une convention a été établie entre la ville d'Orléans et le BRGM pour la période 2012-2015.

La mission du BRGM se décline en 2 objectifs principaux :

- gestion/maintenance courante des 5 piézomètres du réseau piézométrique ;
- valorisation des mesures de niveau de la nappe, afin de mieux connaître son fonctionnement et les relations avec la Loire, et à terme simuler l'impact des crues importantes de la Loire sur la nappe.

Le suivi piézométrique mis en place pour la période 2012-2013 a permis d'acquérir des données précises sur l'évolution du niveau de la nappe. Les fluctuations de celle-ci sont directement liées à celles du niveau de la Loire, comme le montrent les chroniques des piézomètres les plus proches du fleuve, à savoir ceux de l'Hippodrome, du Jardin des plantes, et du Dojo.

Pour les deux piézomètres les plus éloignés, au Parc du Moins Roux et en particulier au Stade des Montées, une autre composante a été identifiée : on constate qu'une augmentation du niveau du Dhuy, affluent du Loiret, se traduit par une légère hausse du niveau de la nappe. Cette hausse est toutefois faible au regard de celle provoquée par une crue de la Loire, comme cela a été constaté en mai 2013.

D'une manière générale, le temps de propagation d'une crue de la Loire sur le niveau de la nappe est très rapide, de l'ordre de 3 à 5 h pour les piézomètres les plus proches de la Loire, et de l'ordre de 10 à 20 h pour les piézomètres plus éloignés.

Le logiciel CATHERINE a été utilisé pour simuler l'influence d'une crue centennale de la Loire, sur le niveau de la nappe au droit des piézomètres. Après un calage sur les chroniques piézométriques acquises, ce logiciel a permis d'extrapoler le niveau de la nappe pour une crue centennale du fleuve.

Les résultats obtenus par modélisation montrent qu'il n'y aurait pas de submersion par remontée de nappe au droit des piézomètres, avec pour les 3 piézomètres les plus proches de la Loire, des niveaux simulés entre 0,6 et 1,3 m de profondeur. Des ennoissements de cave ou de parkings souterrains seraient néanmoins susceptibles de se produire. Les résultats sont cohérents avec ceux de la modélisation de 2003 (Martin, Noyer, 2003).

Ces résultats n'empêchent pas qu'une submersion par remontée de nappe puisse avoir lieu en cas de crue centennale, dans des secteurs où la cote altimétrique du sol est plus basse qu'au droit des piézomètres suivis.

En complément de la poursuite du suivi piézométrique initié, des actions complémentaires sont proposées en conclusion de ce rapport.

Sommaire

1. Contexte du projet	9
2. Caractéristiques des stations piézométriques	11
2.1. POINTS DE SUIVI (PIÉZOMÈTRES).....	11
2.2. CAPTEURS DE PRESSION ET CENTRALES D'ACQUISITION	12
3. Interprétation des données acquises	13
3.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES ACQUISES	13
3.2. INTERPRÉTATION DES CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES	14
4. Éléments de modélisation	19
4.1. RAPPEL : MODÉLISATION RÉALISÉE EN 2003	19
4.2. MODÉLISATIONS AVEC LE LOGICIEL CATHERINE	20
4.2.1. Données d'entrée	20
4.2.2. Calcul de la diffusivité hydraulique de l'aquifère	23
4.2.3. Simulation des variations de niveau piézométrique sur la période 2000-2013	26
4.2.4. Simulation des variations de niveau piézométrique pour une crue centennale	28
4.2.5. Synthèse des résultats de modélisation avec le logiciel CATHERINE	30
5. Proposition de seuils d'alerte pour le risque d'inondation par remontée de nappe	31
6. Conclusion	33
6.1. BILAN DE LA VALORISATION DES DONNÉES EN 2014.....	33
6.2. PROPOSITIONS D'ACTION COMPLÉMENTAIRES	34
7. Bibliographie	37

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Extrait de la carte piézométrique de la nappe des calcaires du Val d'Orléans, Hautes eaux, 21-24 novembre 1966 (Desprez, 1967)	9
Illustration 2 :	Localisation des piézomètres sur un extrait de carte géologique à 1/50 000 du BRGM (n° 363, feuille d'Orléans)	10
Illustration 3 :	Mesure du niveau de la nappe – piézomètre de l'Hippodrome (cliché BRGM).....	12
Illustration 4 :	Photographies de la station piézométrique du parc du Moins roux (clichés BRGM) ...	12
Illustration 5 :	Plan du Val d'Orléans entre Loire et Loiret, position des stations hydrométriques	14
Illustration 6 :	Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, niveaux de la Loire et du Dhuy (cote en m NGF), et pluviométrie à Orléans (RR - cumul en mm), du 26/11/12 au 03/12/12	15
Illustration 7 :	Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, niveaux de la Loire et du Dhuy (cote en m NGF), et pluviométrie à Orléans (RR - cumul en mm), du 08/04/2013 au 15/04/2013	15
Illustration 8 :	Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, niveaux de la Loire et du Dhuy (cote en m NGF), et pluviométrie à Orléans (RR - cumul en mm), du 12/09/2012 au 19/09/2012	16
Illustration 9 :	Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, du niveau de la Loire (cote en m NGF), et débit du fleuve (en m ³ /s), du 09/11/12 au 30/12/12.....	17
Illustration 10 :	Simulation avec le modèle hydrodynamique du val d'Orléans du niveau de la nappe lors d'une crue centennale (Martin, Noyer, 2003)	19
Illustration 11 :	Chroniques de niveau d'eau disponibles (cf. chroniques détaillées en annexe 1).....	21
Illustration 12 :	Situation des piézomètres utilisés pour la modélisation CATHERINE (fond carto. IGN)	22
Illustration 13 :	Débits journaliers de la Loire à Orléans (station K4350010)	22
Illustration 14 :	Piézomètre « Hippodrome » : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013)	24
Illustration 15 :	Piézomètre « Jardin » : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013)	24
Illustration 16 :	Piézomètre « Parc du Moins Roux » : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013)	25
Illustration 17 :	Piézomètre « Dojo (parc Léon Chesnault) » : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013).....	25
Illustration 18 :	Piézomètre « Stade des Montées » : Comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013)	26
Illustration 19 :	Simulation des niveaux piézométriques sur la période 2000-2014 à partir des données de niveau de la Loire au pont Royal	27
Illustration 20 :	Simulation des niveaux piézométriques sur la période de novembre 2003 à février 2004 à partir des données de niveau de la Loire au pont Royal	28
Illustration 21 :	Simulation des niveaux piézométriques lors d'une crue centennale de la Loire	30

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Caractéristiques des piézomètres	11
Tableau 2 :	Informations relatives aux piézomètres, modélisés avec le logiciel CATHERINE	21
Tableau 3 :	Estimation des valeurs de diffusivité hydraulique	23
Tableau 4 :	Estimation des cotes piézométriques pour une crue vicennale	27
Tableau 5 :	Estimation des cotes piézométriques pour une crue centennale	29
Tableau 6 :	Comparaison des niveaux calculés avec CATHERINE pour une crue centennale et une crue vicennale.....	29

Liste des annexes

Annexe 1 :	Chroniques piézométriques trimestrielles des années 2012 et 2013.....	39
Annexe 2 :	Résultats des calculs réalisés avec le logiciel CATHERINE	49
Annexe 3 :	Courbe de tarage de la station hydrologique de la Loire à Orléans (K4350010)	59

1. Contexte du projet

La Ville d'Orléans, partenaire du projet européen INTERREG « FloodResilienCity » : villes et territoires résilients vis à vis de l'inondation, s'est engagée dans une démarche de caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le Val d'Orléans.

Dans le cadre d'une convention de partenariat avec la ville d'Orléans, le BRGM a d'abord réalisé une étude hydrogéologique du Val (Martin, Noyer, 2003). Ce travail avait donné lieu notamment à un modèle des écoulements souterrains dans le Val. Ce modèle numérique maillé (logiciel MARTHE du BRGM), couvrant l'ensemble du Val, avait été calé en régime permanent sur la piézométrie de 1966, et en régime transitoire sur les chroniques existantes entre 1968 et 1975.

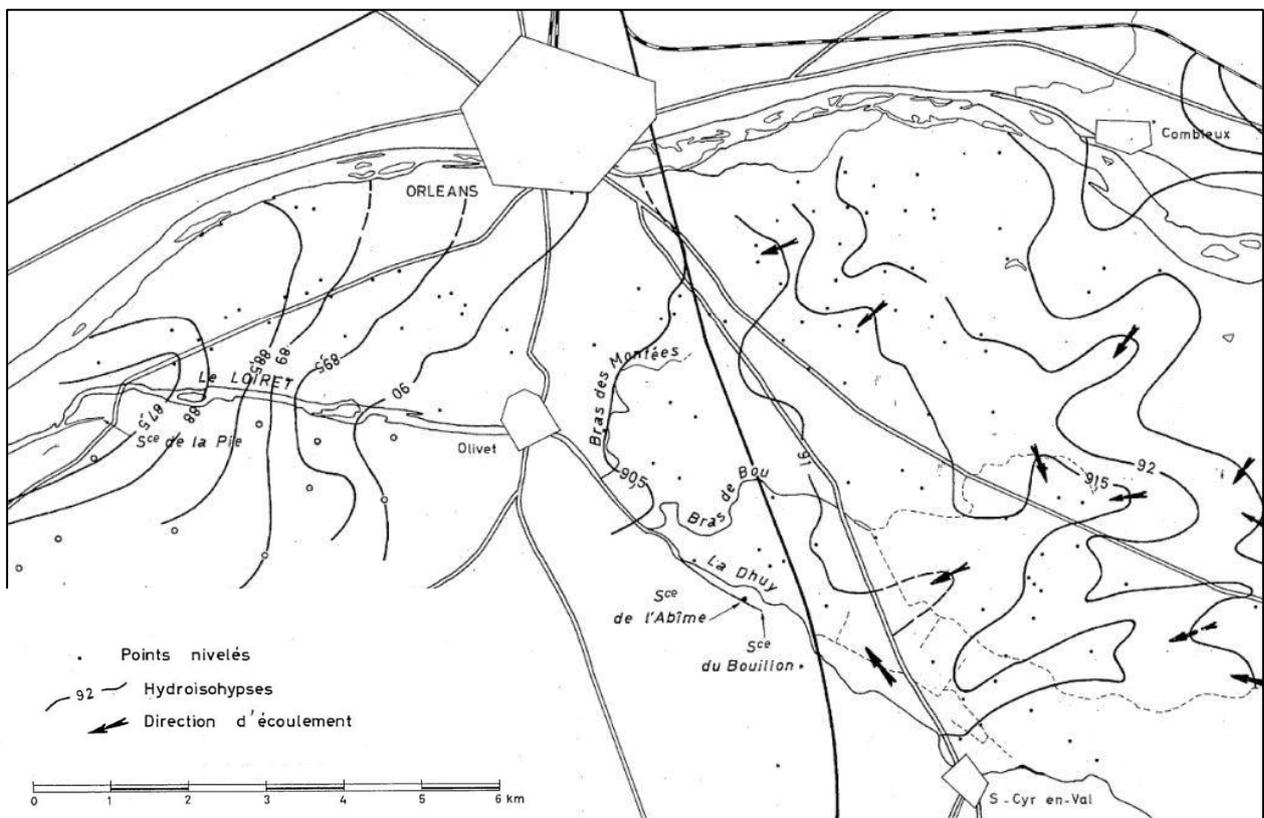


Illustration 1 : Extrait de la carte piézométrique de la nappe des calcaires du Val d'Orléans, Hautes eaux, 21-24 novembre 1966 (Desprez, 1967).

Dans le cadre d'une convention de partenariat avec la ville d'Orléans, le BRGM a ensuite été chargé en 2009-2010 de déterminer les secteurs d'implantation de 5 forages, et de procéder aux tests de télétransmission des données, à l'issue de la réalisation des forages et de l'installation des centrales d'acquisition.

Ces 5 piézomètres implantés au sud de la Loire, entre la Loire et le Loiret (cf. Illustration 2), ont pour vocation de permettre :

- une meilleure compréhension de la nature des échanges entre la Loire et la nappe du Val ;
- d'anticiper le risque d'inondation par remontée de nappe.



Fy, Fz : alluvions récentes, Fw : alluvions anciennes, X : Dépôts artificiels, g3 : calcaires de Beauce

Illustration 2 : Localisation des piézomètres sur un extrait de carte géologique à 1/50 000 du BRGM (n° 363, feuille d'Orléans).

Une deuxième convention a été établie entre la ville d'Orléans et le BRGM pour la période 2012-2015 afin d'assurer la gestion de ce réseau piézométrique.

La mission du BRGM se décline en 2 objectifs principaux :

1. gestion/maintenance courante du réseau piézométrique, qui consiste à vérifier le bon fonctionnement du matériel, par interrogations à distance, visites de contrôle et si besoin remplacement de matériel ;
2. valorisation des mesures de niveau de la nappe, afin de mieux connaître son fonctionnement et les relations avec la Loire, et à terme simuler¹ l'impact de crues importantes de la Loire sur la nappe.

Les résultats de la surveillance réalisée en 2012 et en 2013 sont présentés respectivement dans les rapports BRGM/RP-62022-FR et BRGM/RP-63209-FR.

Ce rapport présente les résultats de la valorisation des données acquises en 2012 et 2013, avec notamment les résultats d'une simulation de l'impact des crues de la Loire au niveau des piézomètres.

¹ Simulation réalisée avec le logiciel CATHERINE développé par le BRGM, qui fait intervenir notamment la diffusivité de la nappe (rapport de la transmissivité de l'aquifère à son coefficient d'emmagasinement)

2. Caractéristiques des stations piézométriques

2.1. POINTS DE SUIVI (PIÉZOMÈTRES)

Les caractéristiques des forages sont présentées dans le rapport BRGM/RP-57215-FR de mai 2010, qui présente un compte-rendu de la sélection des zones d'implantation des piézomètres, et de la réalisation (forage et équipement) de quatre d'entre eux. Le piézomètre du stade des Montées correspond à un ouvrage déjà existant et exploité pour l'arrosage des pelouses. Les piézomètres sont équipés d'appareils de mesure depuis le printemps 2010.

Ces ouvrages sont implantés dans la plaine alluviale du Val d'Orléans, entre Loire et Loiret (*cf.* Illustration 2). Ils traversent les formations alluviales et atteignent les calcaires de Beauce sous-jacents. Les crépines des piézomètres sont positionnées en face des formations calcaires. Les deux formations sont perméables, et dans ce secteur, les alluvions reposent souvent directement sur les calcaires de Beauce. Les alluvions sont peu épaisses et ce sont les calcaires karstiques qui constituent le principal aquifère. La nappe qui s'écoule dans ces formations est généralement désignée sous le nom de « nappe du Val d'Orléans ».

Les variations piézométriques dans les alluvions résultent de leur alimentation et des échanges avec les conduits karstiques établis dans les calcaires sous-jacents (Lepiller, in Roux, 2006).

Les caractéristiques des ouvrages sont rappelées ci-dessous (*cf.* Tableau 1).

CODE_BSS	Désignation	Lieu-dit	Coord X (L2E)	Coord Y (L2E)	Cote altimétrique ² du repère de mesure	Profondeur de foration (en m/sol)
03635X0545	PZ1	Hippodrome Ile Arrault	566307.21	2321527,81	93.27	12.1
03636X1060	PZ2	Jardin des Plantes	567160.42	2321544,54	94.40	15.0
03636X1061	PZ3	Dojo (parc Léon Chesnault)	568003.45	2321257,51	94.52	15.9
03636X1062	PZ4	Parc du Moins Roux	567616.30	2320585,71	94.96	15.0
03982X1045	F	Stade des Montées	569437.94	2318772,50	94.25	20.0

Tableau 1 : Caractéristiques des piézomètres.

Le repère de mesure correspond au rebord du cuvelage en béton (*cf.* Illustration 3). Une barre en fer est positionnée sur le cuvelage et la mesure à la sonde piézométrique manuelle est prise sur le côté inférieur de la barre.

² Altitude du repère, mesurée par un géomètre expert



Illustration 3 : Mesure du niveau de la nappe – piézomètre de l'Hippodrome (cliché BRGM).

2.2. CAPTEURS DE PRESSION ET CENTRALES D'ACQUISITION

Chaque station piézométrique est équipée avec le même matériel, à savoir un capteur de pression (marque STS ATM/M, 0-10 H₂O) plongé dans le tube piézométrique, une centrale d'acquisition des données (marque Solophème), avec un modem GSM de télétransmission intégré. Les centrales de mesure sont raccordées au réseau électrique.

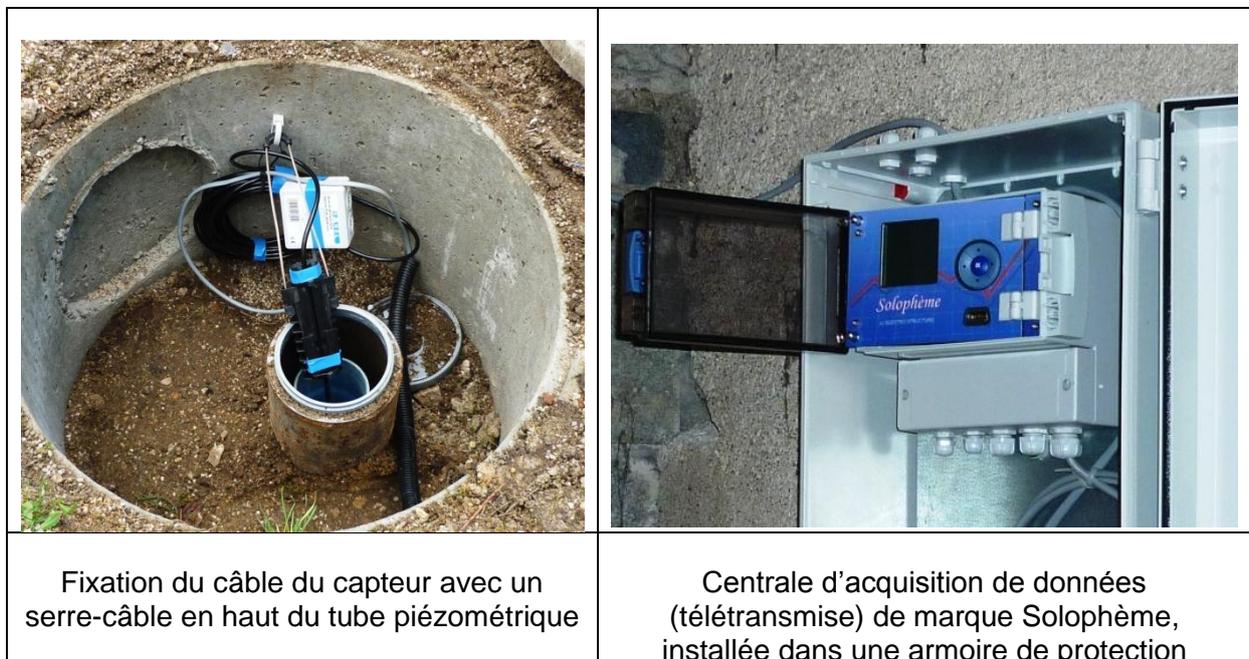


Illustration 4 : Photographies de la station piézométrique du parc du Moins roux (clichés BRGM).

La fréquence d'acquisition des données est d'une mesure par heure.

3. Interprétation des données acquises

3.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES ACQUISES

Le suivi au droit des 5 stations piézométriques a permis de collecter les données du niveau de la nappe du Val d'Orléans, à une fréquence d'une mesure par heure au cours des années 2012 et 2013.

Les données maximales journalières³ acquises sont présentées dans les tableaux de synthèse des rapports de bilan de suivi de 2012 et 2013, en annexe des rapports BRGM/RP-62022-FR et BRGM/RP-63209-FR.

Les courbes piézométriques obtenues figurent en annexe 1 de ce rapport, ainsi que les cotes des niveaux de la Loire et du Dhuy (affluent du Loiret) et le cumul de précipitations journalières.

Les stations hydrométriques du pont Georges V à Orléans sur la Loire, et « Gobson » à Saint-Cyr-en-Val sur le Dhuy sont les stations les plus proches des piézomètres.

Le niveau de la Loire est une donnée de référence essentielle pour comprendre l'évolution du niveau de la nappe au droit des piézomètres, puisque la nappe du Val d'Orléans est alimentée majoritairement par les pertes des eaux de la Loire. Ces pertes ont lieu principalement en amont d'Orléans, dès le secteur de Châteauneuf-sur-Loire, soit environ 20 km en amont d'Orléans.

Par ailleurs, le niveau du Dhuy apporte des éléments complémentaires. Ce cours d'eau situé en bordure sud du Val présente un régime d'écoulement a priori peu influencé par la nappe du Val. Il présente un régime très fortement variable qui dépend essentiellement des pluies efficaces sur l'impluvium local (Lepiller in Roux, 2006).

Le Loiret présente un régime d'écoulement influencé à la fois par la source du Bouillon, principale résurgence donnant naissance au Loiret (composante souterraine) et par le Dhuy, affluent en rive droite à environ 1 km de la source du Bouillon (cf. Illustration 5). Pour mémoire, la source du Bouillon représente environ 15 % du débit total des exutoires du système aquifère du Val d'Orléans (Lepiller, in Roux, 2006).

Les données hydrologiques de la Loire et du Dhuy sont issues du site de la banque hydro : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>.

Les données de pluviométrie correspondent aux cumuls quotidiens de précipitations à Orléans, fournis par Météo France.

³ Sélection de la cote piézométrique la plus haute parmi les données horaires d'une journée

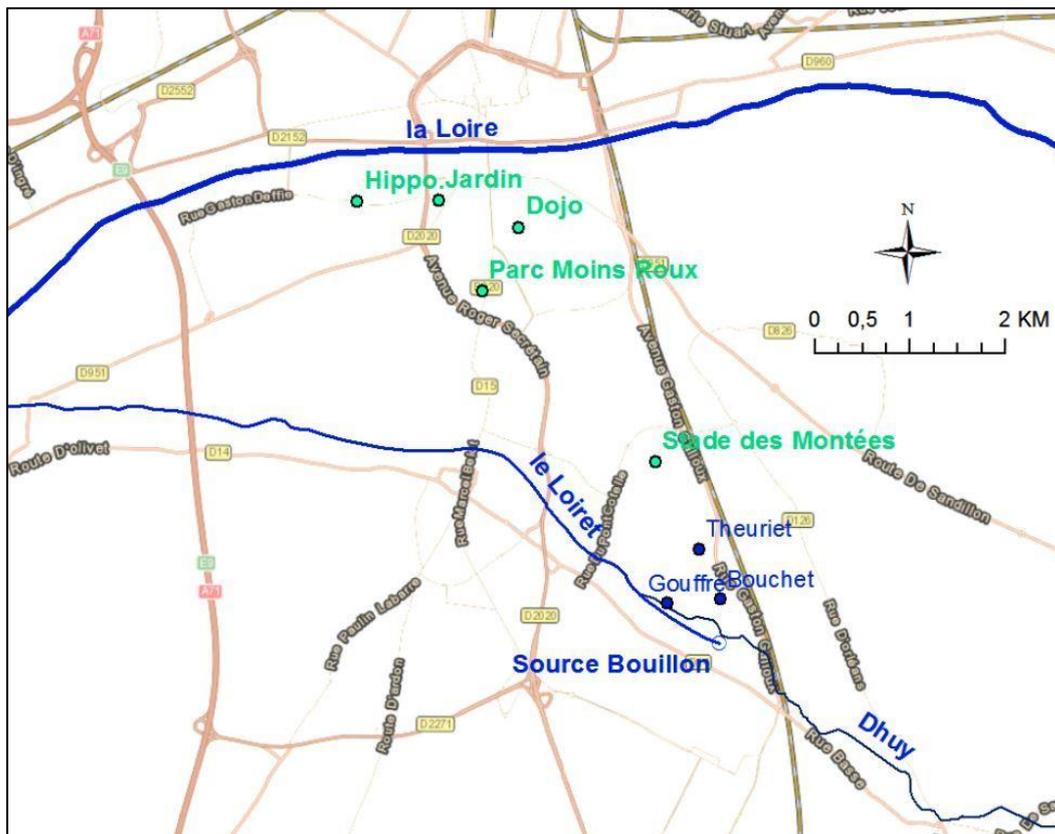


Illustration 5 : Plan du Val d'Orléans entre Loire et Loiret, position des stations hydrométriques.

3.2. INTERPRÉTATION DES CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES

Les courbes piézométriques (cf. Annexe 1) présentent une évolution similaire à celle du niveau de la Loire. On peut constater un cycle à caractère annuel, lié au régime hydrologique du fleuve. La période de basses eaux correspond à l'été (juillet, août, septembre) et les hautes eaux correspondent à la fin de l'automne et à l'hiver, ou au printemps. Le niveau le plus haut relevé pour la Loire pour la période de suivi correspond à la crue du 6 mai 2013.

Les stations piézométriques les plus proches de la Loire (Hippodrome, Jardin des plantes, Dojo) présentent les plus fortes amplitudes, de l'ordre de 2 à 3 m pour la période 2012-2013. L'amplitude maximale est constatée pour le piézomètre de l'Hippodrome, avec une cote minimale de 88,1 m NGF le 23/08/12 et une cote maximale de 91,2 m NGF le 08/05/13, soit une amplitude d'un peu plus de 3 m. Les stations piézométriques plus éloignées, à savoir celle du Moins Roux, et surtout celle du stade des Montées, présentent une amplitude plus faible.

En cas de hausse du niveau de la Loire, les niveaux piézométriques de la nappe réagissent rapidement. Cela est illustré à titre d'exemple pour la période du 26/11/12 au 03/12/12 (cf. Illustration 6). Le 29/11/12, une hausse de 60 cm du niveau de la Loire a lieu en 1 jour. La hausse des niveaux piézométriques est constatée 3 à 5 heures après pour les ouvrages les plus proches de la Loire (Hippodrome, Jardin), et 10 heures après pour les plus éloignés (Moins Roux, Stade).

Le 13/09/2012, pour une hausse moins forte de la Loire (environ 50 cm en 3 j), la hausse des niveaux piézométriques est constatée 4 heures après au piézomètre de l'Hippodrome et environ 20 heures après au puits du Stade des Montées (cf. Illustration 8).

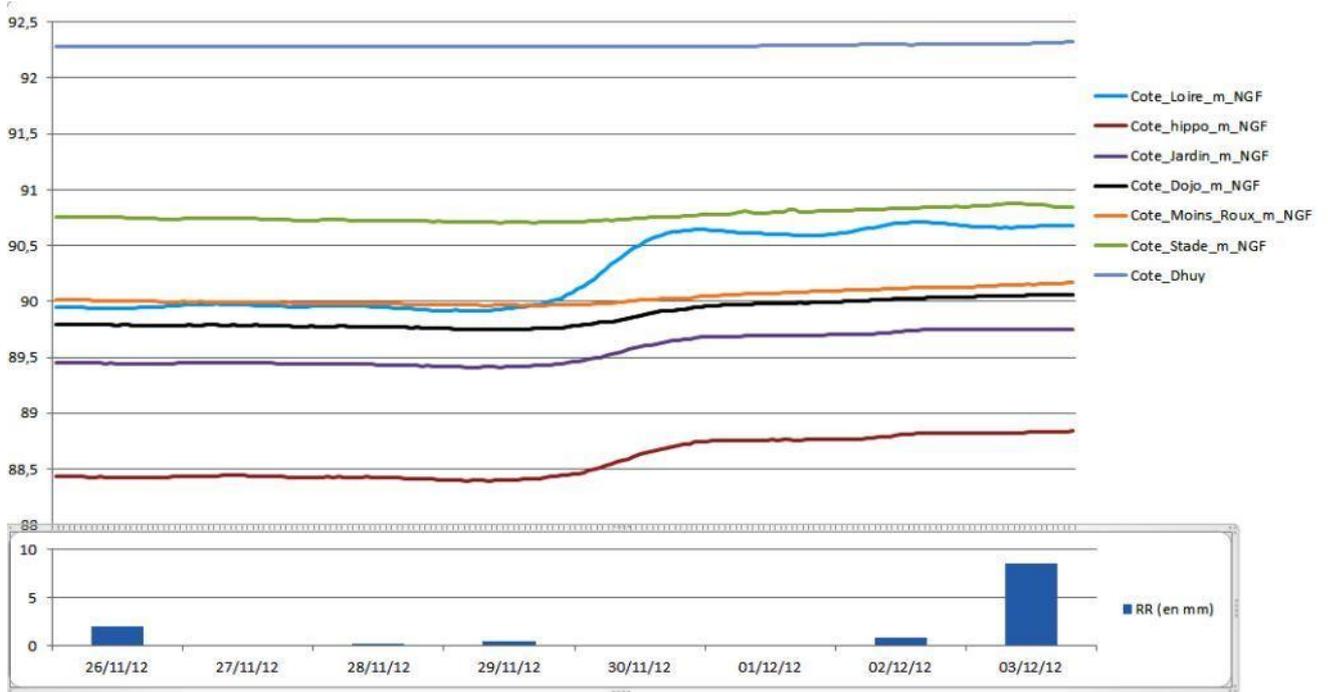


Illustration 6 : Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, niveaux de la Loire et du Dhuy (cote en m NGF), et pluviométrie à Orléans (RR - cumul en mm), du 26/11/12 au 03/12/12.

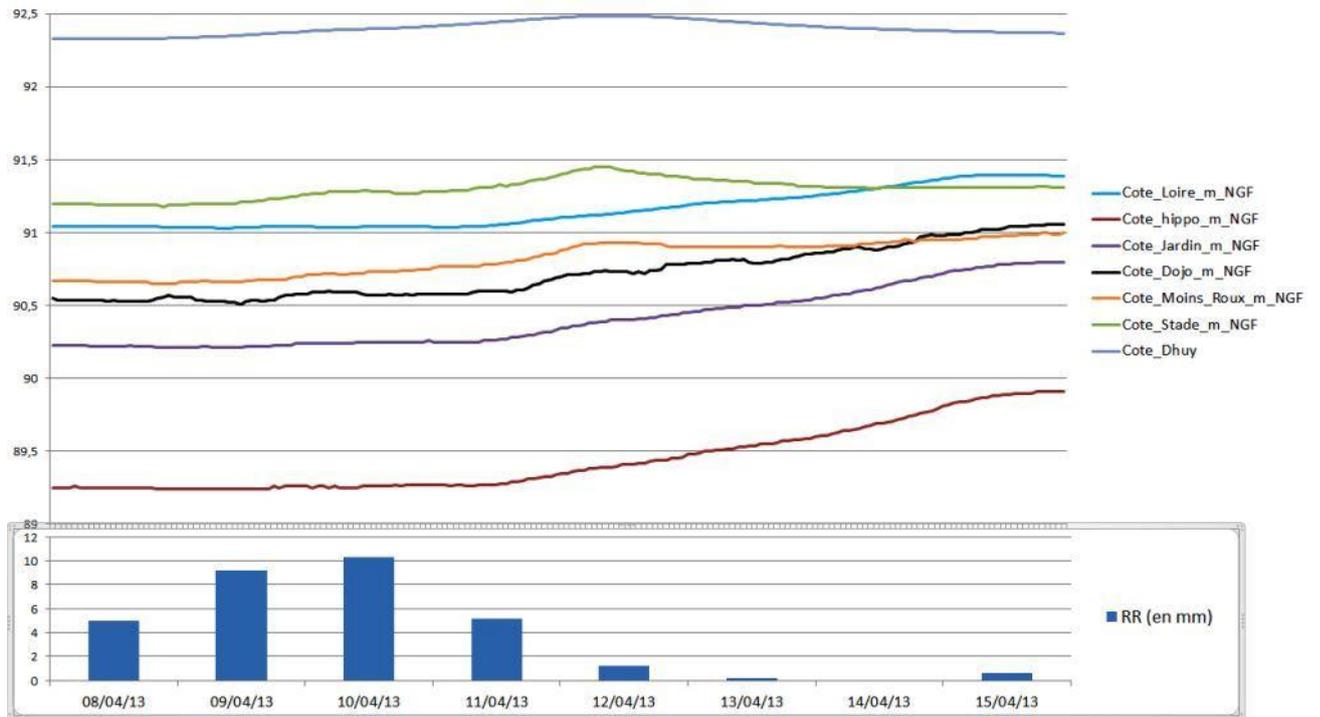


Illustration 7 : Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, niveaux de la Loire et du Dhuy (cote en m NGF), et pluviométrie à Orléans (RR - cumul en mm), du 08/04/2013 au 15/04/2013.

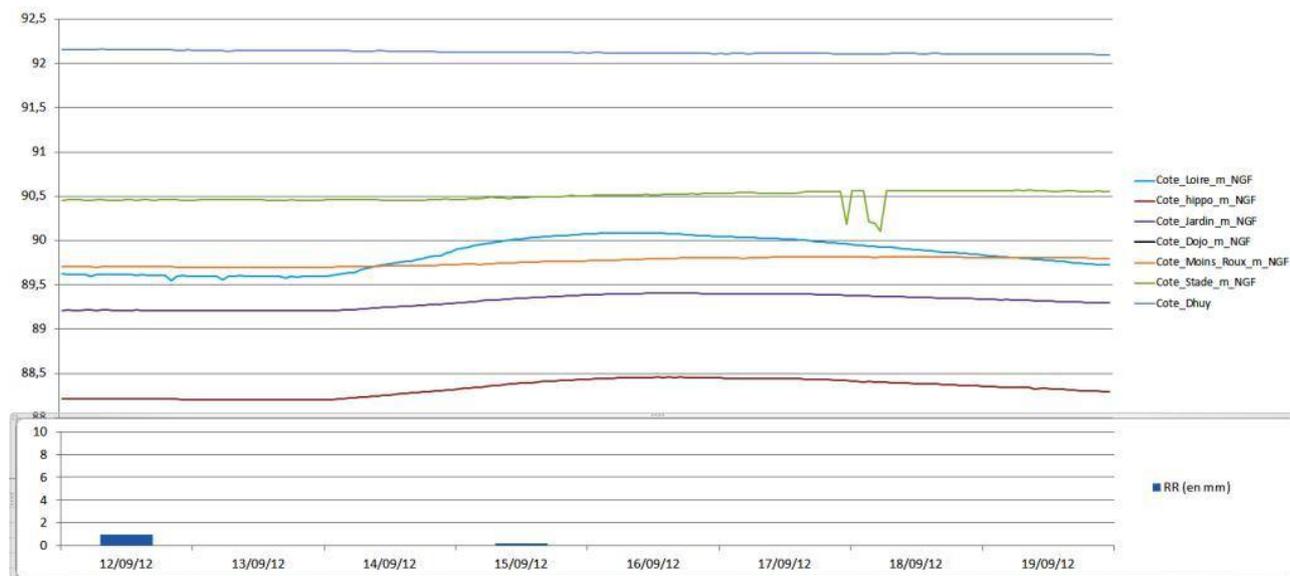


Illustration 8 : Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, niveaux de la Loire et du Dhuy (cote en m NGF), et pluviométrie à Orléans (RR - cumul en mm), du 12/09/2012 au 19/09/2012.

L'évolution du niveau piézométrique au Stade présente des différences par rapport à celles observées aux piézomètres situés à proximité de la Loire. Les 8, 9 et 10 avril 2013 par exemple (cf. Illustration 7), une hausse du niveau de la nappe est constatée au puits du Stade de manière corrélée avec un événement pluvieux à Orléans, et une hausse du Dhuy. Au même moment, le niveau de la Loire reste stable, de même que les piézomètres de l'Hippodrome, du Jardin, et du Dojo.

Au droit de la station piézométrique du Stade des Montées, située à proximité du Loiret (et du Dhuy), à un peu plus de 3 km au sud de la Loire, la nappe semble donc présenter un comportement différent, et être moins influencée par le niveau de la Loire. La station piézométrique du Parc du Moins Roux présente un comportement intermédiaire avec une légère influence également de l'événement pluvieux local des 8, 9 et 10 avril 2013.

Le graphique présenté en annexe 1, montre par ailleurs que lors de la crue de mai 2013, le niveau du Dhuy évolue peu, ce qui confirme que son régime d'écoulement est peu influencé par la Loire et par la nappe du Val.

Parmi les informations issues de l'analyse des courbes piézométriques, on peut noter par ailleurs une différence d'amplitude dans la réaction de la nappe à une hausse du niveau de la Loire. Par exemple, fin novembre 2012, une augmentation d'environ 60 cm du niveau de la Loire se traduit par une augmentation de 20 à 30 cm du niveau de la nappe aux piézomètres de l'Hippodrome, du Jardin et du Dojo (cf. Illustration 9). Entre le 5 et le 7 décembre, une augmentation d'environ 45 cm du niveau de la Loire se traduit par une augmentation de 50 à 60 cm aux mêmes piézomètres.

Cette différence de réaction (amplitude) du niveau de la nappe s'explique par la traduction en débit de la mesure du niveau de la Loire au pont Georges V. Au-delà d'un certain seuil, le niveau de la Loire (h) augmente peu tandis que le débit global⁴ du fleuve (Q) augmente en fait fortement (cf. annexe 3). Cela s'explique par un accroissement de la largeur du lit occupé

⁴ Le débit du fleuve est fourni par le site de la banque hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Il est basé sur une courbe de tarage qui met en corrélation la hauteur au niveau de l'échelle du pont George V et le débit du cours d'eau.

par le fleuve : on observe un phénomène de surverse par-dessus la levée des Duits, avec transfert du débit supplémentaire vers le bras gauche de la Loire.

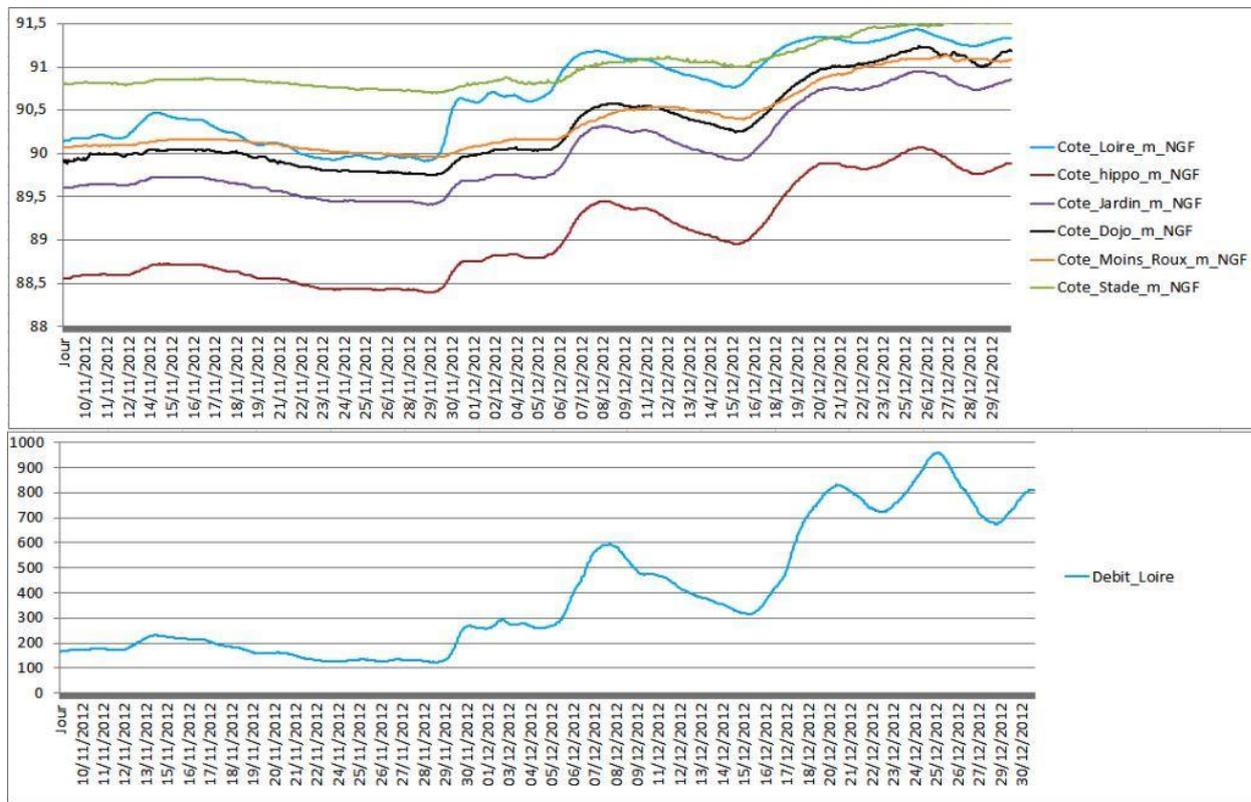


Illustration 9 : Courbes d'évolutions des niveaux piézométriques, du niveau de la Loire (cote en m NGF), et débit du fleuve (en m³/s), du 09/11/12 au 30/12/12.

En conclusion, on constate que les fluctuations du niveau de la nappe du Val d'Orléans sont contrôlées très majoritairement par l'évolution du niveau (ou débit) de la Loire. La propagation d'une hausse ou d'une baisse du débit de la Loire se répercute rapidement sur le niveau de la nappe, en quelques heures. Le temps de propagation est de 3 à 4 heures à proximité de la Loire (Hippodrome) et de l'ordre de 10 à 20 h dans la partie sud du Val (Stade des Montées). Par ailleurs, dans la partie sud du Val, la nappe est influencée également par la pluviométrie locale et le niveau du Dhuy, mais cette composante « locale » est mineure, en particulier en cas de crue, comme cela a été constaté en mai 2013.

Pour mémoire, les résultats des traçages hydrogéologiques réalisés dans le Val (Lepiller, 2006) indiquent une vitesse moyenne d'écoulement des eaux souterraines, dans le système karstique, de l'ordre de 100 à 200 m/h, entre Jargeau et la source du Bouillon notamment.

NB : La transmission de différences de charge (hydraulique) ou de pression se fait généralement à des vitesses plus grandes que le déplacement des particules d'eau elles-mêmes.

4. Éléments de modélisation

4.1. RAPPEL : MODÉLISATION RÉALISÉE EN 2003

Pour mémoire, l'étude de caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe initiée au début des années 2000 (Martin, Noyer, 2003) a conduit à la construction d'un modèle des écoulements souterrains dans le Val. Il s'agit d'un modèle mathématique des écoulements souterrains, couvrant l'ensemble du val, qui a été calé en régime permanent sur la piézométrie de 1966, et en régime transitoire sur les chroniques existantes entre 1968 et 1975.

Le modèle a permis notamment de simuler le niveau de la nappe pour une crue centennale, et de disposer ainsi d'un état des lieux pour l'ensemble du Val (cf. Illustration 10).

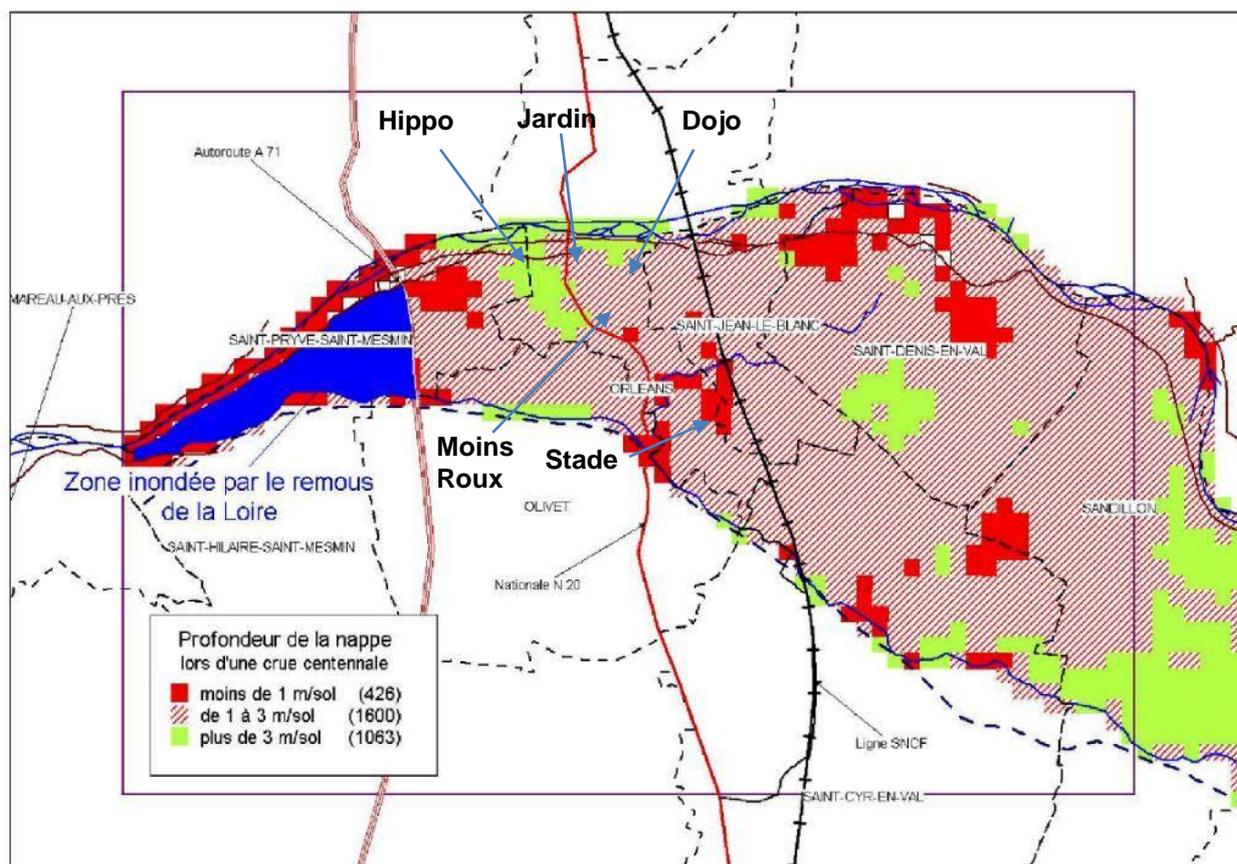


Illustration 10 : Simulation avec le modèle hydrodynamique du val d'Orléans du niveau de la nappe lors d'une crue centennale (Martin, Noyer, 2003).

4.2. MODÉLISATIONS AVEC LE LOGICIEL CATHERINE⁵

La modélisation réalisée avec le logiciel CATHERINE dans le cadre de cette étude repose sur la représentation des relations nappe-rivière. Elle a été focalisée sur les piézomètres pour lesquels des chroniques piézométriques ont pu être acquises en 2012-2013.

Le code de calcul CATHERINE v4.1 du BRGM (Thiéry, 2012) permet de réaliser les opérations suivantes, pour un aquifère bordé par un cours d'eau dont le niveau varie au cours du temps, avec un pas de temps des données qui peut être horaire, journalier, mensuel ou annuel :

- calcul de la diffusivité hydraulique⁶ d'un aquifère (T / S^7) à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées du niveau piézométrique en un point d'une nappe souterraine et du niveau d'eau dans une rivière ;
- calcul des variations de niveau piézométrique en un point d'une nappe dont on connaît la diffusivité, bordée par une rivière dont on connaît les variations temporelles de hauteur.

NB : Une modélisation avec le logiciel CATHERINE assimile l'aquifère à un milieu poreux et homogène. Il s'agit d'une simplification puisque l'aquifère présente en fait 2 niveaux (alluvions et calcaires), et avec une porosité au sein des calcaires qui est influencée par les karsts, avec des zones d'écoulement préférentiel. Il est également considéré pour chaque modélisation que l'impact de la rivière sur la nappe est homogène sur l'ensemble du linéaire du cours d'eau.

4.2.1. Données d'entrée

Des chroniques horaires sont disponibles pour la période 2012-2013 pour 5 piézomètres et 2 cours d'eau (La Loire et la Dhuy) (cf. Illustration 11).

La simulation a porté sur :

- la chronique de niveaux de la Loire ;
- les chroniques des piézomètres Dojo, Parc du moins Roux, Hippodrome et du jardin des plantes ;
- la chronique du piézomètre du Stade des Montées a fait l'objet à titre exploratoire d'une simulation (en complément).

La chronique de l'ouvrage 03982X1045/F « Stade des Montées » est influencée par des pompages, ce qui a nécessité une reconstitution de la chronique en supprimant les données influencées. Ceci est rendu possible par le fait que le piézomètre réagit immédiatement aux pompages et que les pompages ne durent que quelques heures. On peut facilement reconstituer le niveau non influencé à partir des niveaux statiques en début et fin de pompage.

Par ailleurs, la chronique des niveaux du Dhuy présente des données douteuses et surtout une faible amplitude de variation (moins d'un mètre). Elle n'a pas été prise en compte.

⁵ CATHERINE : **CA**lcul **TH**éorique de l'**E**ffet d'une **R**ivière sur une **N**appe

⁶ La diffusivité caractérise la vitesse de réaction d'un aquifère lors d'une perturbation (variation de niveau de la rivière, de la nappe, pompage). Elle s'exprime par le rapport entre la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement

⁷ T : Transmissivité, S : Emmagasinement

Nous avons donc retenu pour la modélisation les données de la station hydrométrique du pont Royal (ou pont Georges V) sur la Loire (station K4350010 de la banque hydro - <http://www.hydro.eaufrance.fr/>) et des 5 piézomètres (cf. Illustration 11).

Indice national	nom	X_L2E (m)	Y_L2E (m)	distance Loire (m)	Date début	Date fin
03635X0545/PZ1	Hippodrome	566307	2321528	360	01/01/2012	31/12/2013
03636X1060/PZ2	Jardin des Plantes	567160	2321545	268	01/01/2012	31/12/2013
03636X1061/PZ3	Dojo	568003	2321258	550	27/09/2012	31/12/2013
03636X1062/PZ4	Moins Roux	567616	2320586	1230	06/01/2012	31/12/2013
03982X1045/F	Stade des Montées	569438	2318773	3110	01/01/2012	31/12/2013

Tableau 2 : Informations relatives aux piézomètres, modélisés avec le logiciel CATHERINE.

Les données de niveaux d'eau de la Loire sont fournies en mm par rapport au repère 0 de l'échelle situé à la cote 90.467 m NGF.

Il existe par ailleurs une chronique 1965-2013 de niveaux d'eau de la Loire (au pas de temps journalier) à la station du pont Royal et des débits journaliers de la Loire depuis 1964 (Illustration 13). La plus grande crue observée sur la période est celle de décembre 2003 (3 130 m³/s le 8/12/2003) avec un niveau à 94,22 m NGF (3,75 m au-dessus du repère). Ce débit est très voisin de celui d'une crue vicennale⁸ (3 100 m³/s) selon les calculs effectués par la DREAL Centre.

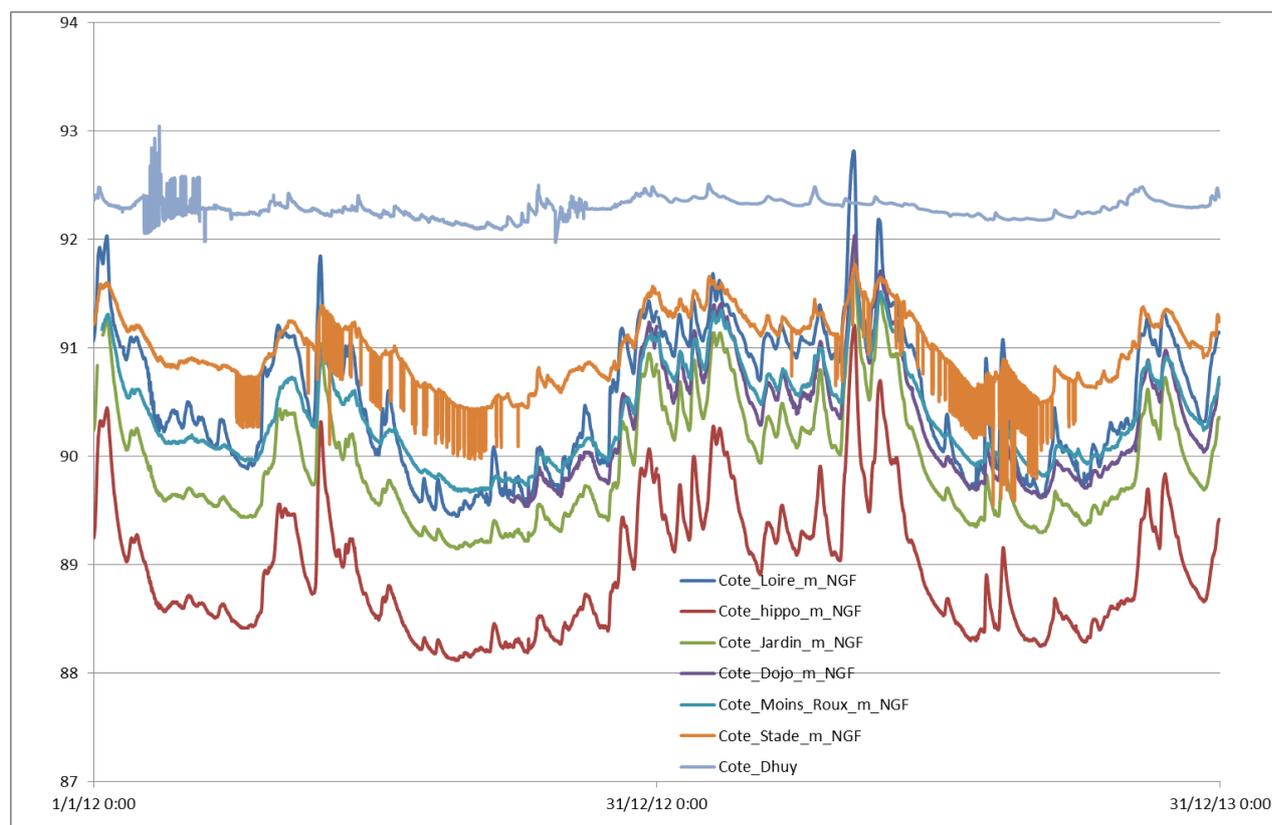


Illustration 11 : Chroniques de niveau d'eau disponibles (cf. chroniques détaillées en annexe 1).

⁸ Crue vicennale : crue dont la probabilité d'apparition sur une année est de 1/20



Illustration 12 : Situation des piézomètres utilisés pour la modélisation CATHERINE (fond carto. IGN).

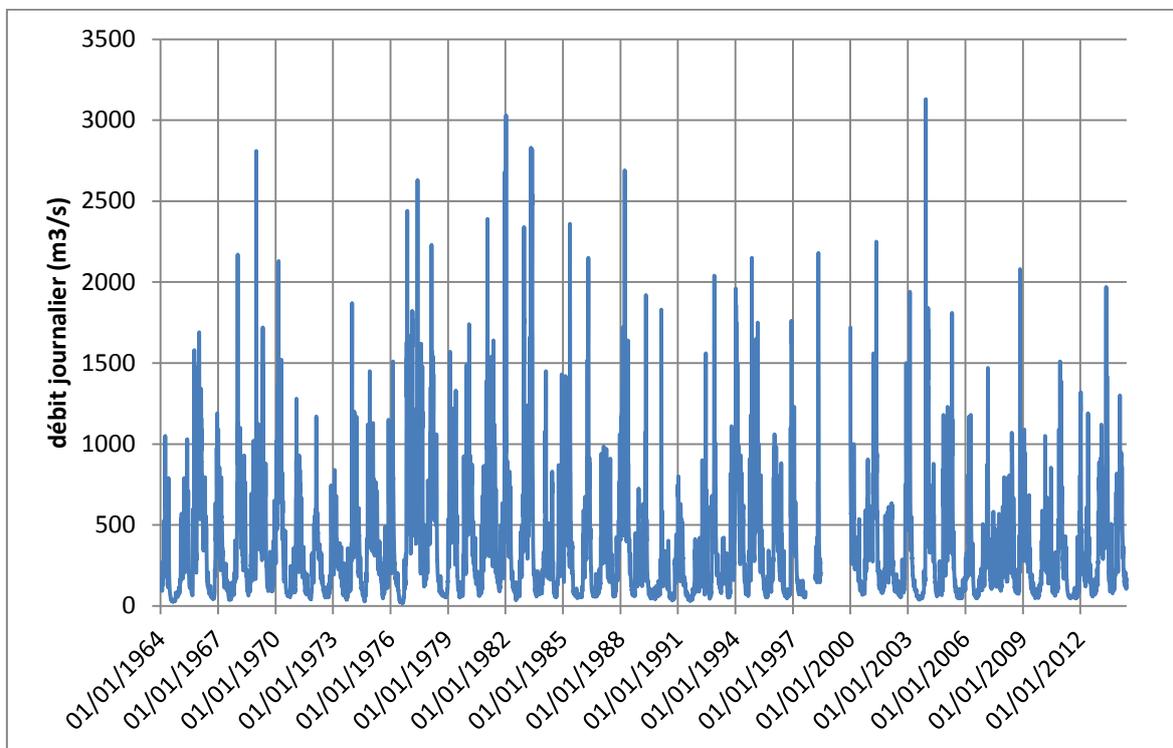


Illustration 13 : Débits journaliers de la Loire à Orléans (station K435010).

4.2.2. Calcul de la diffusivité hydraulique de l'aquifère

Pour chacun des 5 piézomètres modélisés, le détail des paramètres et des calculs figure en annexe 2. Les données ont été utilisées **au pas de temps horaire**. Le tableau ci-dessous fournit pour chacun des piézomètres, la diffusivité T / S obtenue et le coefficient de corrélation entre les niveaux piézométriques observés et simulés à partir du niveau de la Loire.

	Distance Loire	Diffusivité (m ² /s)	Coef. de détermination ⁹
Hippodrome	360	9.75	0.94
Jardin des Plantes	268	1.65	0.93
Dojo	550	4.72	0.95
Moins Roux	1230	5.18	0.91
Stade des montées	3110	8.39	0.70

Tableau 3 : Estimation des valeurs de diffusivité hydraulique.

Pour les 5 piézomètres, les graphiques ci-après (cf. Illustration 14, Illustration 15, Illustration 16, Illustration 17, Illustration 18) montrent la qualité de l'ajustement obtenu.

Les coefficients de diffusivité obtenus avec le modèle sont élevés ($> 1.5 \text{ m}^2/\text{s}$), ce qui traduit une forte transmissivité et/ou un faible coefficient d'emmagasinement. On trouve dans Caudron et Desprez (1970) des valeurs de diffusivité estimées en 5 points du Val d'Orléans à partir de fluctuations de la piézométrie et du niveau de la Loire entre février 1968 et mars 1970. Ces valeurs varient entre $0,07 \text{ m}^2/\text{s}$ dans les zones d'alluvions isolées à $1 \text{ m}^2/\text{s}$ dans les zones de contact entre alluvions et calcaires karstifiés. Les calcaires sont en effet karstifiés dans le secteur d'étude.

Si on s'intéresse à la qualité du calage en période de hautes eaux (mais sans crue majeure sur la période 2012-2013), on peut faire les constatations suivantes :

- pour le piézomètre de l'Hippodrome, le calage tend à sous-estimer les niveaux en période de hautes eaux. Pour le pic du 6 mai 2013, on constate une différence de 20 cm ;
- pour le piézomètre du Jardin des plantes, le calage tend à légèrement sous-estimer les niveaux en période de hautes eaux. Pour le pic du 6 mai 2013, la différence est inférieure à 10 cm ;
- pour le piézomètre du Parc du Moins Roux, le calage est très bon. Pour le pic du 6 mai 2013, la différence est de moins d'un cm ;
- pour le piézomètre du Dojo, le calage est très bon également. Pour le pic du 6 mai 2013, la différence est inférieure à 5 cm ;
- pour le piézomètre du Stade des montées, le plus éloigné, le calage est moins bon ; on observe un léger décalage temporel sur certaines périodes ; les niveaux sont sous-estimés lors de la période d'étiage de l'été 2012 alors qu'ils sont surestimés lors de la période de crue de mai 2013. Pour le pic du 6 mai 2013, la différence est supérieure à 30 cm.

Pour simuler l'impact des crues de la Loire sur les eaux souterraines dans le Val d'Orléans, les piézomètres du Dojo et du Moins Roux apparaissent les plus pertinents. On peut également remarquer que la diffusivité estimée pour ces deux piézomètres est du même ordre, et correspond à une valeur moyenne pour les simulations.

⁹ Coefficient de détermination = coefficient de corrélation au carré

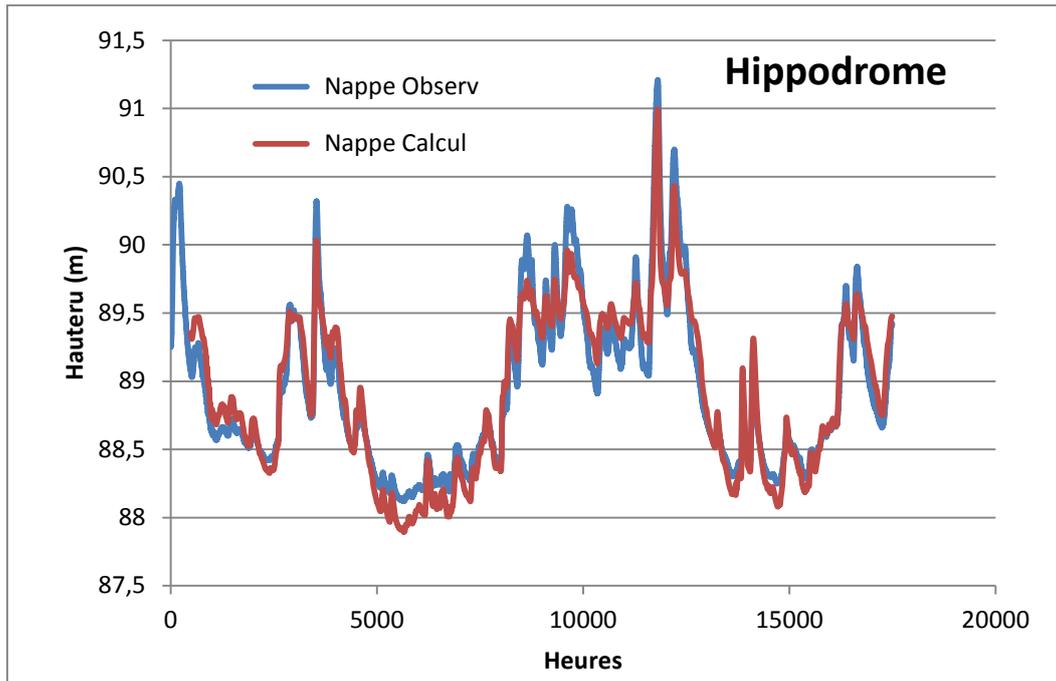


Illustration 14 : Piézomètre « Hippodrome » : comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013).

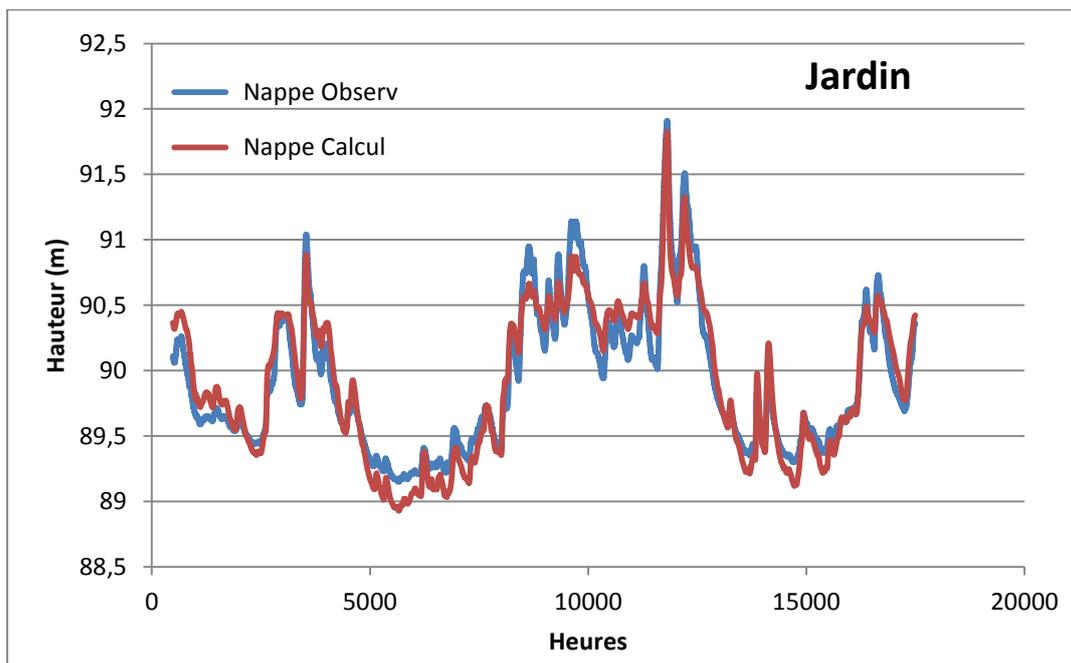


Illustration 15 : Piézomètre « Jardin » : comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013).

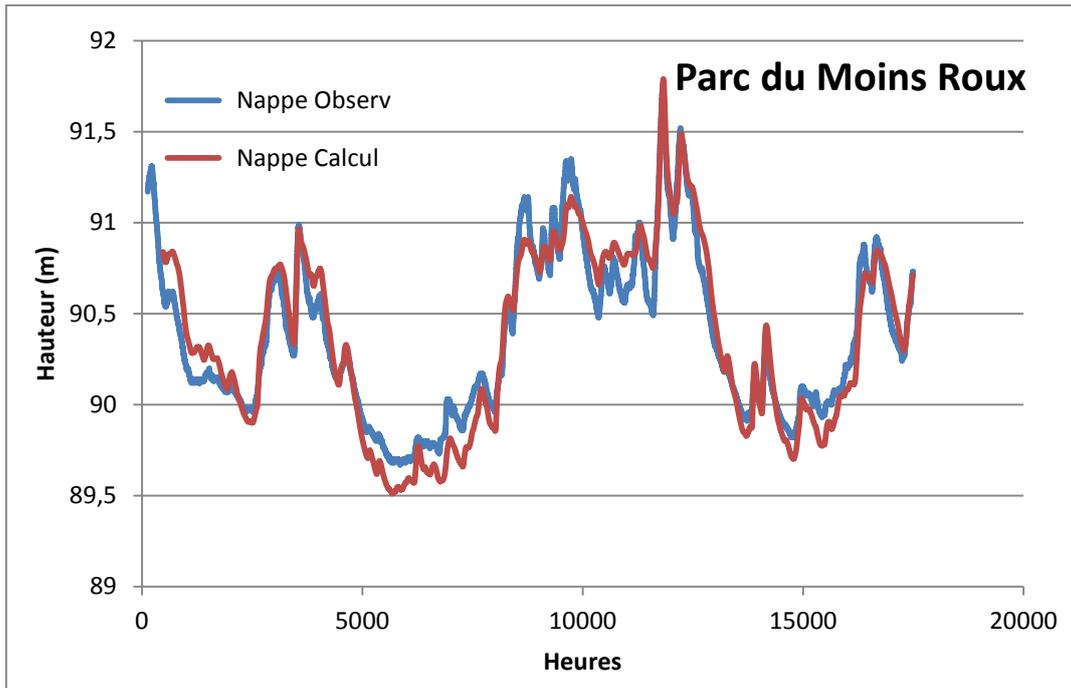


Illustration 16 : Piézomètre « Parc du Moins Roux » : comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013).

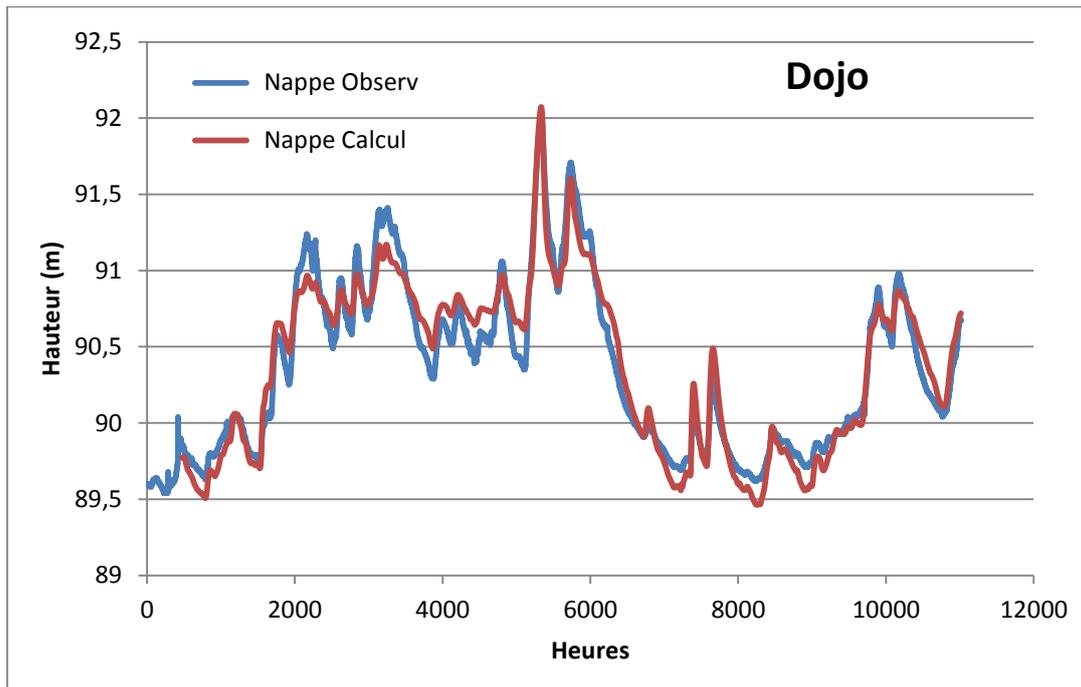


Illustration 17 : Piézomètre « Dojo (parc Léon Chesnault) » : comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013).

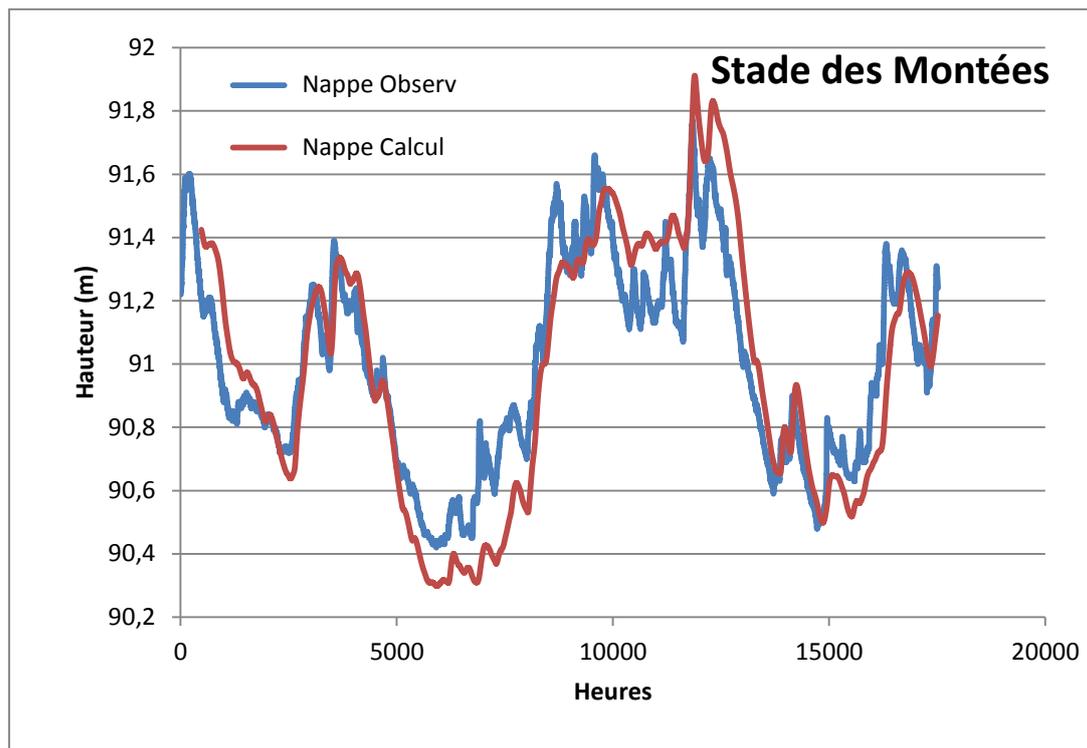


Illustration 18 : Piézomètre « Stade des Montées » : comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés (période 2012-2013).

4.2.3. Simulation des variations de niveau piézométrique sur la période 2000-2013

Si les données de hauteur d'eau de la Loire au pont Royal sont disponibles depuis 1965, la mise en œuvre du barrage de Villerest en 1984 a modifié les conditions d'écoulement de la Loire. On observe par ailleurs des « lacunes » importantes dans la chronique, en particulier en 1993, 1998 et 1999. Nous n'avons donc pris en compte que les données de la période 2000-2013 pour simuler les niveaux piézométriques, avec cette fois **un pas de temps journalier**.

Les variations de niveau piézométrique sont simulées en reprenant les valeurs de diffusivité calculées précédemment (cf. Illustration 19).

Pour le piézomètre du Stade des Montées, du fait de son éloignement par rapport à la Loire, et de fluctuations piézométriques influencées par d'autres composantes (pluviométrie, Dhuy), les résultats de la simulation avec le logiciel CATHERINE ne sont pas satisfaisants. Toutefois, les calculs ont été faits et certains résultats (courbes piézométriques simulées) sont présentés pour mémoire dans ce paragraphe.

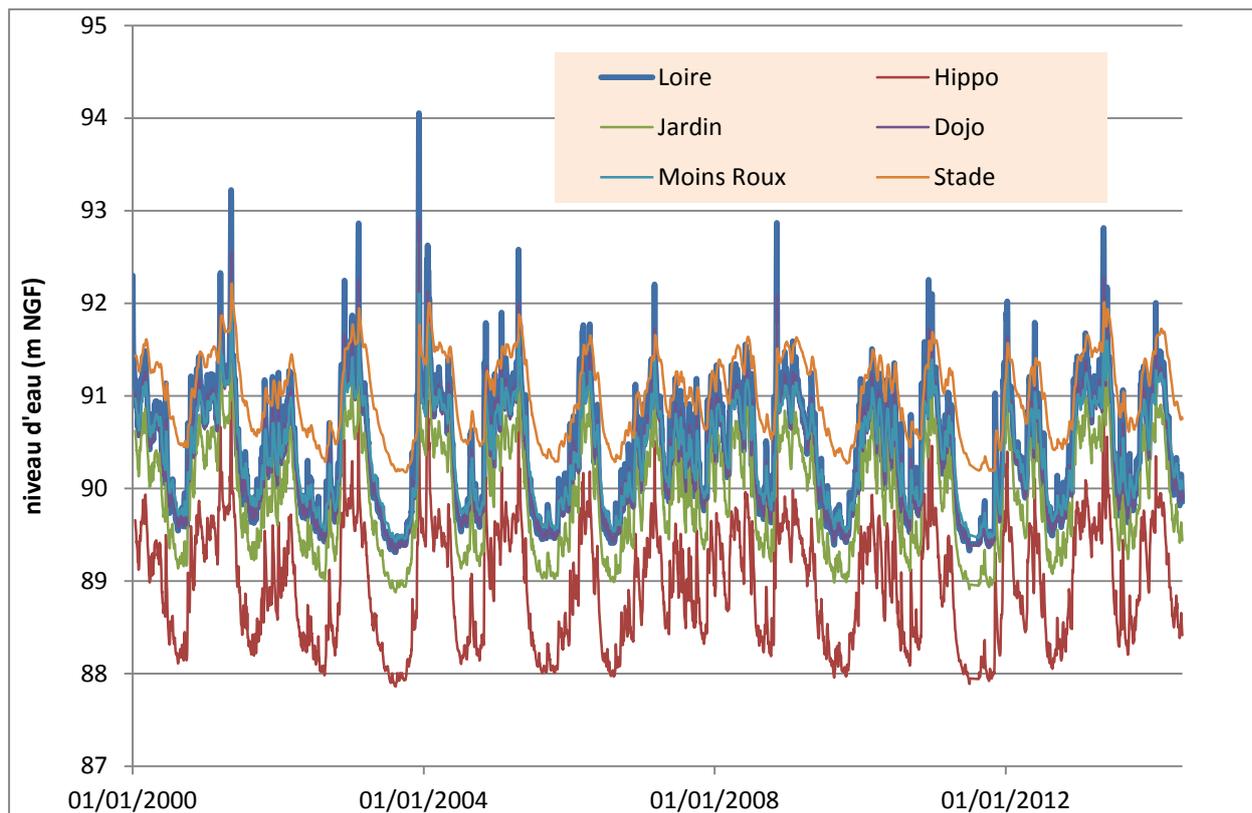


Illustration 19 : Simulation des niveaux piézométriques sur la période 2000-2014 à partir des données de niveau de la Loire au pont Royal.

La simulation montre que le pic de la crue vicennale du 8 décembre 2003 se propage le jour même jusqu'aux 3 piézomètres les plus proches, dès le lendemain au Moins Roux et au bout de 3 jours au stade des montées (cf. Illustration 20). Cette onde de crue est suivie d'une deuxième le 17 et le 21 janvier 2004, avec des niveaux plus bas sauf pour le piézomètre du stade des montées (92.00 m NGF), dont on a pu voir précédemment que le calage était moins bon. Les niveaux piézométriques maximums simulés sont les suivants :

	distance Loire (m)	pic « crue vicennale »	Cote « crue vicennale » CATHERINE (m NGF)	Altitude du piézomètre (m NGF)	profondeur d'eau / sol (m)
Hippodrome	360	08/12/2003	92.07	93.27	1.2
Jardin des Plantes	268	08/12/2003	92.66	94.4	1.74
Dojo	550	08/12/2003	92.90	94.52	1.62
Moins Roux	1230	09/12/2003	92.10	94.96	2.86

Tableau 4 : Estimation des cotes piézométriques pour une crue vicennale.

Le niveau le plus haut est observé sur le piézomètre du Dojo qui est plus éloigné de la Loire que les piézomètres Hippodrome et Jardin des plantes. Cela s'explique par sa position, située plus en amont par rapport au sens d'écoulement de la nappe, lequel est orienté globalement vers l'ouest.

L'impact de la crue sur les niveaux piézométriques dépend de la cote de la Loire mais également de la durée de l'épisode de crue. Si on considère que la cote 92 m correspond au début de la crue, sa durée est de 4 jours.

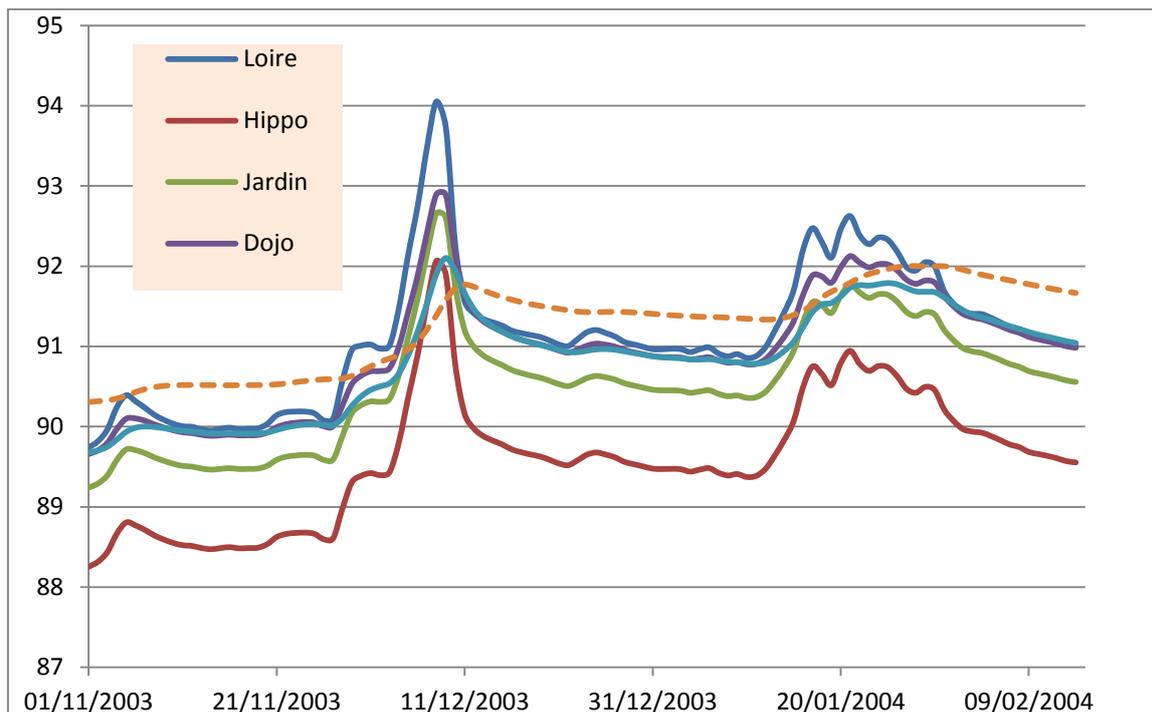


Illustration 20 : Simulation des niveaux piézométriques sur la période de novembre 2003 à février 2004 à partir des données de niveau de la Loire au pont Royal.

4.2.4. Simulation des variations de niveau piézométrique pour une crue centennale

Dans le cadre du projet de caractérisation du risque d'inondation par remontée de nappe sur le Val d'Orléans mené au début des années 2000 (Martin, Noyer, 2003), les remontées de la nappe lors d'une crue centennale de la Loire avaient été simulées en régime transitoire sur 4 points (notés PZ3, PZ4, PZ5 et PZ6) situés dans la zone urbanisée d'Orléans et d'Olivet, entre Loire et Loiret. Pour mémoire, le piézomètre PZ4 est situé à 500 m des levées, à proximité du piézomètre Dojo.

À titre de comparaison, nous avons simulé une crue centennale avec le logiciel CATHERINE en reprenant les cotes maximum de la Loire calculées par Hydratec à partir d'un modèle hydraulique (Martin, Noyer, 2003). La simulation est réalisée dans les mêmes conditions que la crue vicennale, sur 2 mois, au pas de temps journalier. Il ne s'agit donc pas d'une série de niveaux mesurés mais reconstitués. La cote maximale atteinte au pont Royal est de 95.35 m NGF. La durée de la crue (calculée pour une cote > 92 m NGF) est de 5 jours.

Comme pour la crue de décembre 2003 (crue vicennale), on observe que le pic de crue se propage très rapidement : le même jour pour les piézomètres de l'hippodrome, du jardin des plantes et du dojo, avec un jour de décalage pour le piézomètre de Moins-Roux et avec trois jours de décalage pour le piézomètre du stade (cf. Illustration 21).

Les niveaux piézométriques maximums simulés sont les suivants :

	Distance Loire (m)	Niveau de nappe « crue centennale » par maille ¹⁰ (2003)	Niveau de nappe « crue centennale » (m NGF) - CATHERINE	Altitude du piézomètre (m NGF)	Prof. d'eau / sol (m)
Hippodrome	360	92,29	92.69	93.27	0.58
Jardin des Plantes	268	92,40	93.13	94.4	1.27
Dojo	550	92,5	93.30	94.52	1.22
Moins Roux	1230	92,01	92.17	94.96	2.79

Tableau 5 : Estimation des cotes piézométriques pour une crue centennale.

Si on compare les niveaux simulés avec le logiciel CATHERINE pour un scénario « crue centennale » et un scénario « crue vicennale » (cf. Tableau 6), on voit que pour les 3 piézomètres les plus proches de la Loire les différences sont notables (entre 40 et 60 cm), alors que pour le piézomètre du Moins Roux, plus éloigné, elle est beaucoup plus faible (moins de 10 cm). Ceci peut s'expliquer par la distance des piézomètres à la Loire.

	Niveau de nappe « crue centennale » (m NGF) - CATHERINE	Niveau de nappe « crue vicennale » (m NGF) - CATHERINE
Hippodrome	92.69	92.07
Jardin des Plantes	93.13	92.66
Dojo	93.30	92.90
Moins Roux	92.17	92.10

Tableau 6 : Comparaison des niveaux calculés avec CATHERINE pour une crue centennale et une crue vicennale.

Les niveaux d'eau simulés sont à une profondeur comprise entre 0,6 et 2,8 mètres de la surface du sol. Si on compare ces résultats à ceux de l'étude de 2003, on voit que les niveaux simulés avec Catherine sont supérieurs, en particulier pour les trois piézomètres les plus proches de la Loire.

NB : pour le piézomètre de l'hippodrome, le niveau de la nappe pour une crue centennale avait été estimé à plus de 3 m sous le sol, alors que la simulation réalisée avec CATHERINE indique une profondeur d'un peu moins d'1 mètre sous le sol. Cela s'explique par le fait que le modèle de 2003 donne un résultat unique pour la maille (250 x 250 m), dont la cote altimétrique moyenne associée est de 96 m NGF, tandis que la cote au sol du piézomètre est en fait de 93,27 m.

¹⁰ Correspond à la maille (250 x 250 m) du modèle numérique maillé MARTHE (Martin, Noyer, 2003), dans laquelle se situe le piézomètre

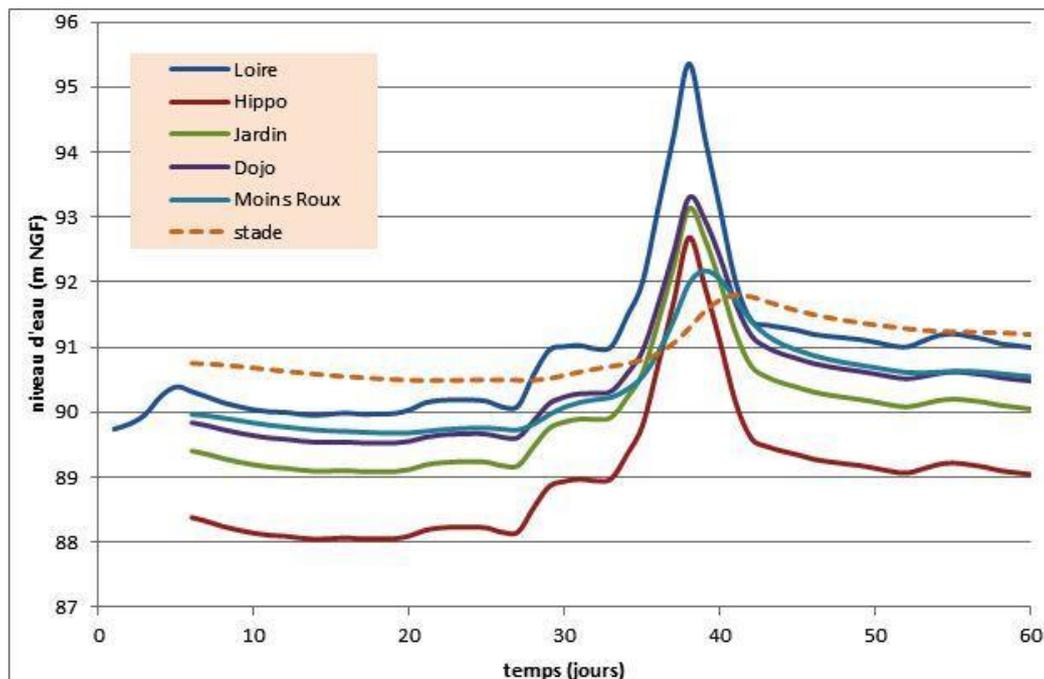


Illustration 21 : Simulation des niveaux piézométriques lors d'une crue centennale de la Loire.

4.2.5. Synthèse des résultats de modélisation avec le logiciel CATHERINE

Les modélisations réalisées avec le logiciel CATHERINE avaient pour objectif de simuler les niveaux piézométriques au droit des piézomètres suivis depuis 2012, pour une crue centennale de la Loire, afin d'appréhender le risque d'inondation lié à la remontée de la nappe.

Ce travail a été réalisé en plusieurs étapes :

- la diffusivité hydraulique de l'aquifère, laquelle traduit la vitesse de propagation de la charge hydraulique, a été estimée pour les 5 piézomètres. Pour celui du Stade, influencé par les pompages, la chronique a été reconstituée en supprimant les niveaux influencés ;
- l'estimation de la diffusivité s'est faite en calant les chroniques piézométriques de la période 2012-2013. Chacune des 5 chroniques a donc fait l'objet d'une modélisation spécifique ;
- une simulation a ensuite été réalisée pour la période 2000-2013, en focalisant sur la crue vicennale de décembre 2003 ;
- enfin, la simulation des niveaux piézométriques pour les 5 ouvrages a été réalisée pour un événement de type crue centennale, avec une série de débits reconstituée.

Les modélisations réalisées avec le logiciel CATHERINE sont apparues pertinentes pour les 4 piézomètres de l'Hippodrome, du Jardin des Plantes, du Dojo et du Moins Roux, mais pas pour le piézomètre du Stade des Montées, compte-tenu :

- d'un « calage » jugé satisfaisant pour les 4 piézomètres, par rapport aux niveaux de la nappe mesurés durant la période 2012-2013 ;
- du fait que les niveaux de nappe simulés pour une crue centennale sont proches, bien que légèrement supérieurs, à ceux issus de la modélisation en 2003 (Martin, Noyer, 2003).

Il est toutefois nécessaire de prendre ces résultats simulés avec précaution, dans la mesure notamment où il n'y a pas eu d'épisode de crue « majeure » durant la période de suivi.

5. Proposition de seuils d'alerte pour le risque d'inondation par remontée de nappe

Il existe actuellement plusieurs seuils d'alerte pour le risque d'inondation, basés sur le niveau de la Loire au pont Georges V (informations fournies par les services de la Ville d'Orléans) :

- à partir de 2,2 m (cote de 92,67 m NGF), les services de la Ville d'Orléans sont alertés par la Préfecture ;
- à partir de 3,5 m (cote de 93,97 m NGF), la population du Val d'Orléans est informée du risque d'inondation ;
- à partir de 4,2 m (cote de 94,67 m NGF), des systèmes de délestage vers le Loiret sont mis en place ;
- à partir de 4,6 m (cote de 95,07 m NGF), il est prévu une évacuation des habitants de la zone inondable.

NB : Pour mémoire, durant la période de suivi des piézomètres en 2012 et 2013, le niveau maximum atteint par le niveau de la Loire est de 2,35 m (cote de 92,82 m NGF) le 7 mai 2013.

La question posée est de savoir s'il est possible de fixer des seuils d'alerte au niveau des piézomètres, basés sur des niveaux piézométriques de référence.

Techniquement, les stations piézométriques sont équipées d'un système d'alerte avec envoi de SMS, qui peut être paramétré avec un niveau piézométrique de référence.

Néanmoins, compte-tenu de l'évolution du niveau de la nappe, qui est directement dépendante du niveau de la Loire, la définition de seuils d'alerte au niveau de la nappe ne semble pas pertinente pour la prévision d'une crue. Cela n'apportera pas d'indications supplémentaires en termes d'alerte par rapport au système d'alerte aux crues mis en place sur la Loire, et qui permet d'anticiper ce risque en prenant en compte notamment la pluviométrie sur le bassin versant du fleuve, le niveau de remplissage des barrages, etc.

Par contre, des seuils piézométriques d'alerte peuvent être utiles, pour des infrastructures souterraines du Val d'Orléans qui pourraient être sensibles à la remontée de nappe.

C'est le **cas du Dojo** (gymnase du parc Léon Chesnault), dont le sous-sol a été inondé à plusieurs reprises au cours de la période 2012-2013.

Selon les informations obtenues, des infiltrations en sous-sol ont été constatées notamment le 11/01/2012 et le 28/01/2014. Pour l'évènement de janvier 2012, la chronique piézométrique n'est pas disponible (Salquèbre, 2013). Pour celui de janvier 2014, la cote maximale enregistrée est de 91,295 m NGF (-3,225 m / repère). Sur la base de ces observations, **un seuil piézométrique pourrait être fixé** par exemple à **-3,3 m** par rapport au repère de mesure (cote de 91,22 m NGF), soit 6 à 7 centimètres en-dessous du niveau pour lequel des infiltrations ont été constatées.

Si l'on observe la courbe piézométrique complète sur la période 2012-2013, ce seuil piézométrique a été dépassé 6 fois. La station pourrait donc être paramétrée pour envoyer un SMS alertant sur le risque d'infiltrations en sous-sol.

À ce stade, les informations sont insuffisantes pour évaluer un délai entre le pic de crue et l'apparition des infiltrations en sous-sol du Dojo. Toutefois, il semble qu'en janvier 2014,

à titre indicatif, les infiltrations aient été constatées environ 3 jours après le pic de crue. Cela montre la nécessité de poursuivre le suivi piézométrique et de disposer d'informations complémentaires sur les dates où des infiltrations sont constatées, avant de mettre en place un éventuel système d'alerte.

Pour les autres piézomètres, il n'y a pas d'infrastructures sensibles qui aient été identifiées. Afin de préciser l'existence éventuelle d'enjeux, il serait utile de disposer d'informations complémentaires sur l'existence éventuelle de caves d'habitations ou de parkings où des inondations ont pu être constatées dans le Val d'Orléans, entre Loire et Loiret.

Il est à noter que la voie rapide Roger Secrétain présente un point bas au niveau du passage sous le pont (trémie) à proximité du lycée Charles Péguy, à une cote de 89,15 m. Or, le niveau de la nappe est régulièrement supérieur à cette cote, notamment lors de la crue de mai 2013, avec, à titre de comparaison, des niveaux de 91,2 m NGF relevé à l'Hippodrome et de 91,9 m NGF au Jardin des plantes. Une étanchéité complète a donc vraisemblablement été prévue lors de la construction de cette infrastructure.

6. Conclusion

6.1. BILAN DE LA VALORISATION DES DONNÉES EN 2014

Le suivi piézométrique mis en place pour la période 2012-2013 a permis d'acquérir des données précises sur l'évolution du niveau de la nappe. Les fluctuations de celle-ci sont directement liées à celles du niveau de la Loire, comme le montrent les chroniques des piézomètres les plus proches du fleuve, à savoir ceux de l'Hippodrome, du Jardin des plantes, et du Dojo.

Pour les deux piézomètres les plus éloignés (Parc du Moins Roux et en particulier au Stade des Montées), une autre composante a été identifiée : on constate qu'une augmentation du niveau du Dhuy, affluent du Loiret, se traduit par une légère hausse du niveau de la nappe. Cette hausse est toutefois faible au regard de celle provoquée par une crue de la Loire, comme cela a été constaté en mai 2013.

D'une manière générale, la propagation d'une crue de la Loire sur le niveau de la nappe est très rapide, de l'ordre de 3 à 5 h pour les piézomètres les plus proches de la Loire, et de l'ordre de 10 à 20 h pour les piézomètres plus éloignés. Cela est cohérent avec le caractère fissuré/karstique du système aquifère du Val d'Orléans, constitué par les calcaires de Beauce (et les alluvions sus-jacentes).

Le logiciel CATHERINE a été utilisé pour simuler l'influence d'une crue centennale de la Loire, sur le niveau de la nappe au droit des piézomètres. Après un calage sur les chroniques piézométriques acquises, ce logiciel a permis d'extrapoler le niveau de la nappe pour une crue centennale du fleuve. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y aurait pas d'élévation de la nappe au-dessus du niveau du sol, donc pas de submersion par remontée de nappe au droit des piézomètres, avec pour les 3 piézomètres les plus proches de la Loire, des niveaux simulés entre 0,6 et 1,3 m de profondeur. Des ennoissements de cave ou de parkings souterrains seraient néanmoins susceptibles de se produire.

Ces résultats n'empêchent pas qu'une submersion par remontée de nappe puisse avoir lieu dans des secteurs où la cote altimétrique du sol est plus basse qu'au droit des piézomètres suivis. D'ailleurs, la carte établie grâce au modèle maillé réalisé avec le logiciel MARTHE (Martin, Noyer, 2003) indique que certains secteurs sont plus sensibles au risque de remontée avec un niveau de nappe à moins d'1 mètre sous la surface du sol.

En ce qui concerne la définition de seuils piézométriques d'alerte, compte-tenu du fait que les niveaux de la nappe les plus hauts sont directement liés à une crue de la Loire, il ne semble pas pertinent d'ajouter un système d'alerte basé sur le suivi de la nappe. Le système d'alerte le plus adapté est celui mis en place dans le cadre de la surveillance hydrologique de la Loire.

Pour le gymnase du Dojo, dont le sous-sol est fréquemment inondé par des remontées de nappe, un seuil d'alerte pourrait être envisagé. Il serait toutefois pertinent de disposer d'informations complémentaires sur les dates où des infiltrations sont constatées, avant de mettre en place un éventuel système d'alerte.

6.2. PROPOSITIONS D' ACTIONS COMPLÉMENTAIRES

Il est prévu que la surveillance piézométrique pour les 5 ouvrages situés dans le Val d'Orléans se poursuive en 2014, ainsi qu'en 2015. Le maintien de ce suivi après 2015 permettrait d'identifier des dynamiques non observées à ce jour, notamment en cas de survenue de crue(s) importantes(s). Elle permettrait aussi d'identifier des niveaux piézométriques de référence pour des situations de très hautes eaux. À l'inverse, un étiage sévère pourrait également modifier les sens d'écoulement dans l'aquifère.

Une enquête auprès du responsable du Dojo permettrait de préciser les dates pour lesquelles des infiltrations sont, ou ont été, constatées en sous-sol. Il serait pertinent de disposer d'informations complémentaires avant de mettre en place un éventuel système d'alerte.

Le logiciel CATHERINE ayant fourni des résultats satisfaisants dans la partie nord du Val d'Orléans, il pourrait être utilisé également pour d'autres piézomètres, dans le cadre de projets d'aménagement par exemple. La mise en place d'un suivi piézométrique minimum de plusieurs semaines ou idéalement plusieurs mois, permettrait ensuite à l'aide du logiciel CATHERINE d'estimer l'effet d'une crue centennale sur le niveau de la nappe au droit du projet.

En ce qui concerne l'identification des zones les plus sensibles au risque de remontée de nappe dans le Val d'Orléans, l'étude menée au début des années 2000 (Martin, Noyer, 2003) avait permis de présenter un état des lieux de la situation (cf. Illustration 10), à l'aide d'un modèle numérique maillé. Une mise à jour de cette modélisation pourrait être utile dans le cas où l'on souhaiterait affiner cet état des lieux des zones les plus sensibles. Toutefois, un tel travail mériterait au préalable de disposer d'une carte piézométrique complète du Val d'Orléans mise à jour, la dernière piézométrie disponible datant de 1966.

Pour rappel, les modélisations réalisées constituent des estimations sur la base des données scientifiques disponibles. Elles comportent une part d'incertitudes qui rend difficile la prédiction d'une submersion par remontée de nappe en un lieu donné du Val d'Orléans, en cas d'événement extrême. Pour affiner les modélisations, il est recommandé de poursuivre l'acquisition de données complémentaires lors d'événements extrêmes.

Afin de mieux cerner le risque d'inondation par remontée de nappe dans le Val d'Orléans, la réalisation de piézomètres complémentaires serait utile dans le Val d'Orléans :

- dans la partie sud du Val, afin de vérifier le régime piézométrique de la nappe à proximité du Loiret : 1 à 2 station(s) serai(en)t pertinente(s) à Olivet, vers le lieu-dit des Muloitières et du Moulin de Saint Julien par exemple et/ou à proximité de la RN20 ;
- dans la partie est du Val, vers Saint-Denis-en-Val et Sandillon, soit des secteurs situés plus en amont, afin d'évaluer le régime piézométrique de la nappe entre les zones principales de pertes d'eau de la Loire (vers Jargeau notamment) et Orléans : la mise en place de 2 stations piézométriques est conseillée ;
- le cas échéant, dans des secteurs qui présentent un risque plus fort de remontée de la nappe (< 1 m / sol) : 1 station pourrait être réalisée à proximité de la RN20, près du lycée horticole de la Mouillère par exemple.

Cela pourrait présenter un intérêt pour d'autres acteurs, notamment pour les questions d'étiage en lien avec le SAGE Val Dhuy Loiret.

Compte-tenu de la proximité des 3 piézomètres de l'Hippodrome, du Jardin des plantes et du Dojo, et de chroniques piézométriques similaires. L'abandon du piézomètre du Jardin des plantes est envisageable dans un objectif de réduction des frais de fonctionnement.

Lors de la réalisation de forages complémentaires, il s'agira de veiller à bien identifier les formations géologiques traversées, et l'atteinte éventuelle de conduits karstiques. Par ailleurs, des pompages d'essai pourraient être envisagés afin de préciser les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, au droit des piézomètres.

7. Bibliographie

Caudron et Desprez (1970) – Étude hydrogéologique du Val d'Orléans (Loiret) ; Observations piézométriques février 1968 – mars 1970, rapport BRGM 70 SGN 101 BDP, 34 p.

Desprez (1967) – Inventaire et étude hydrogéologique du Val d'Orléans. Rapport BRGM n°DSGR.67.A21. 24 p., 3 ann., 6 pl.

Lepiller M. in Roux J.C. (2006) – Aquifères et eaux souterraines en France. p.200-214 – 6. Val d'Orléans.

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. Etude menée en collaboration avec l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature. BRGM/RP-52121-FR. 170 p., 70 fig., 18 tabl., 6 ann.

Martin J.C. (2010) – Projet « Floodresiliency ». Suivi des niveaux de la nappe du Val d'Orléans, BRGM/RP-57215-FR, 53 p., 32 ill., 3 ann.

Salquèbre D. (2013) – Suivi de la nappe du Val d'Orléans au droit de 5 piézomètres pour la période 2012-2015 – Bilan de l'année 2012. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-62022-FR, 17 p., 4 ill., 2 ann.

Salquèbre D. (2014) – Suivi de la nappe du Val d'Orléans au droit de 5 piézomètres pour la période 2012-2015 – Bilan de l'année 2013. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-63209-FR, 13 p., 4 ill., 2 tab., 2 ann.

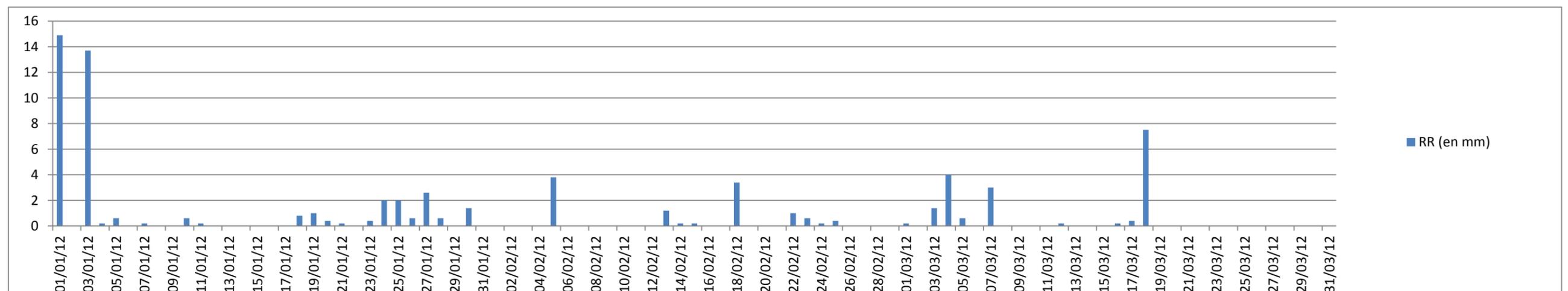
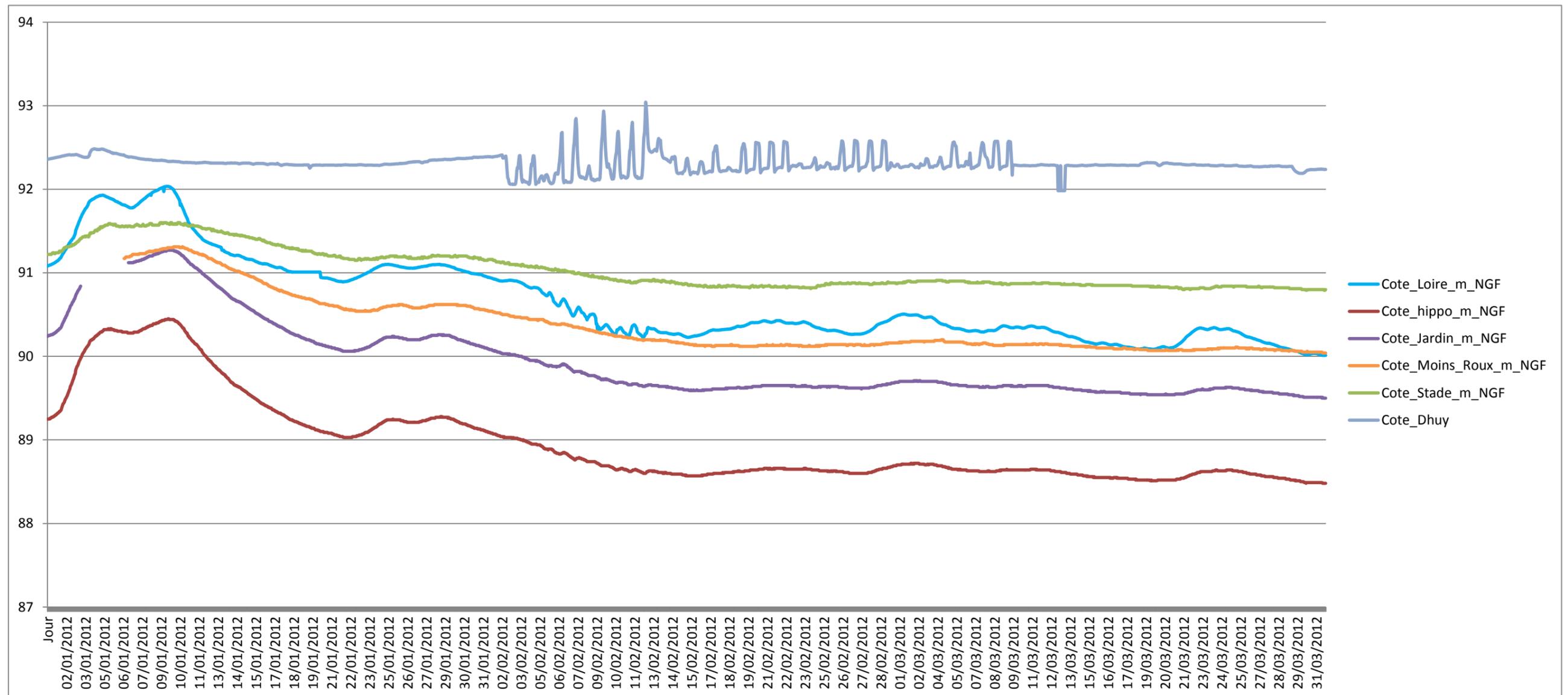
Thiéry D. (2012) – Code de calcul CATHERINE - Principe et mode d'emploi. Rapport final. BRGM/RP-61430-FR, 39 p., 16 fig., 5 tabl.

Annexe 1

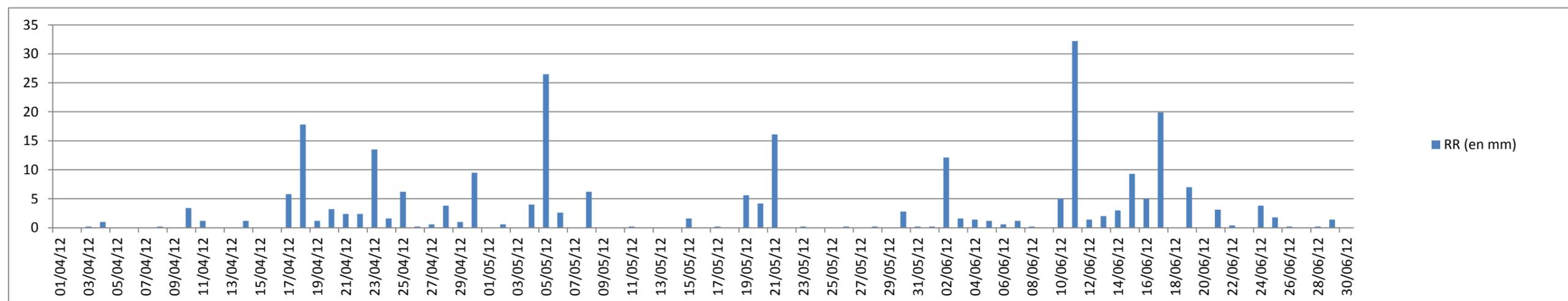
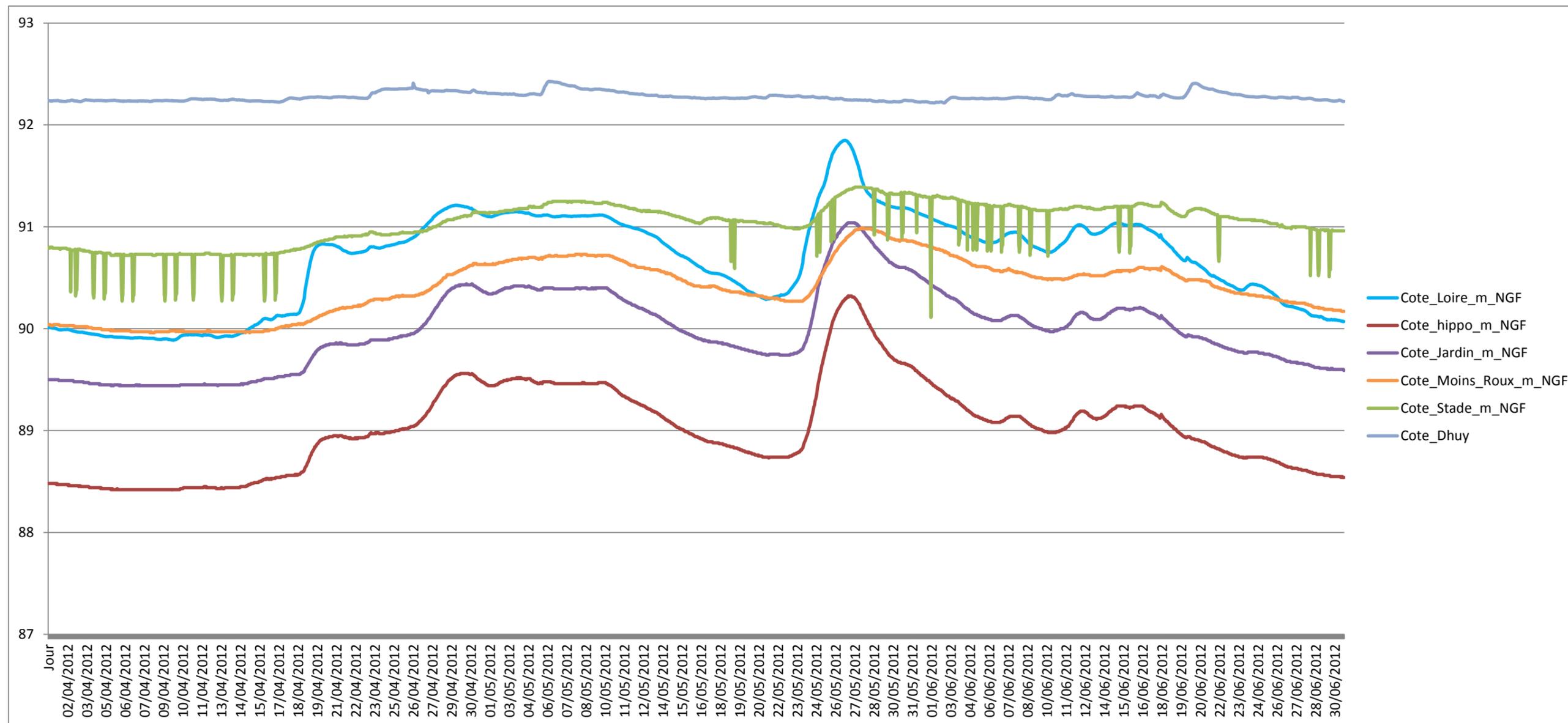
Chroniques piézométriques trimestrielles des années 2012 et 2013

Cotes de la nappe en m NGF (données BRGM), comparées au niveau de la Loire au pont George V à Orléans et au niveau du Dhuy à Saint-Cyr-en-Val (données DREAL Centre), ainsi qu'aux données pluviométriques (Météo France)

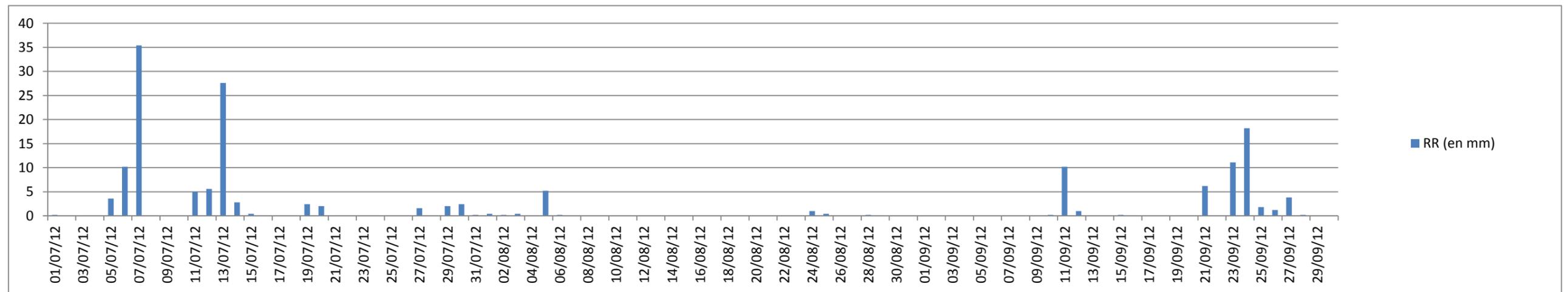
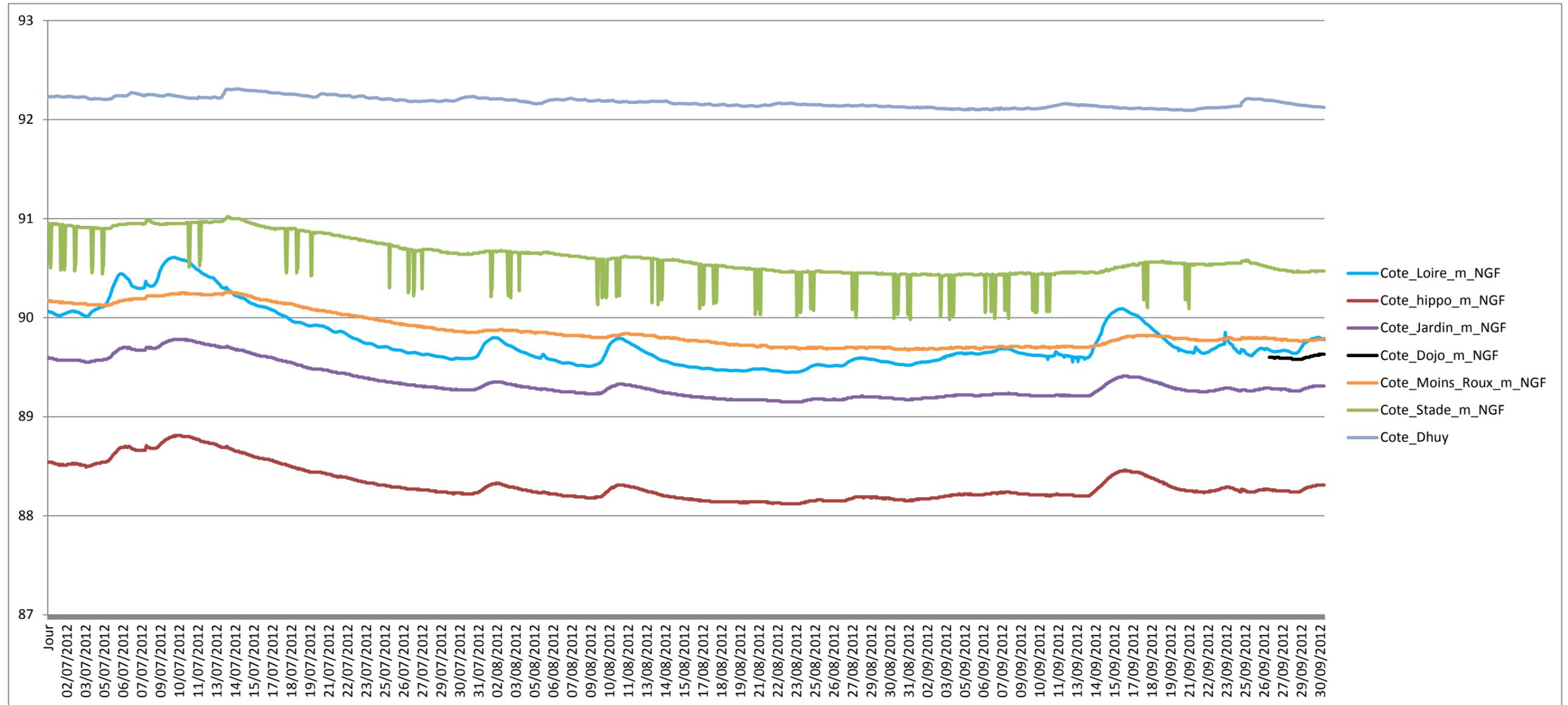
Période de janvier à mars 2012



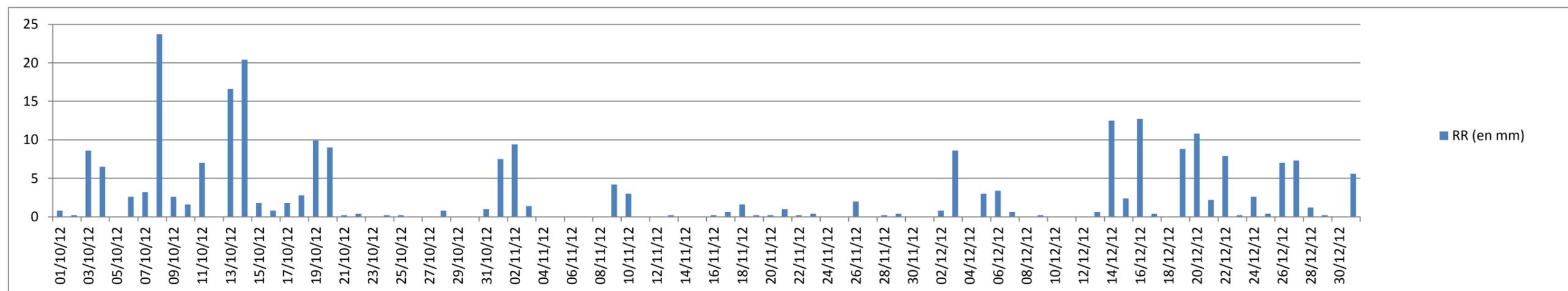
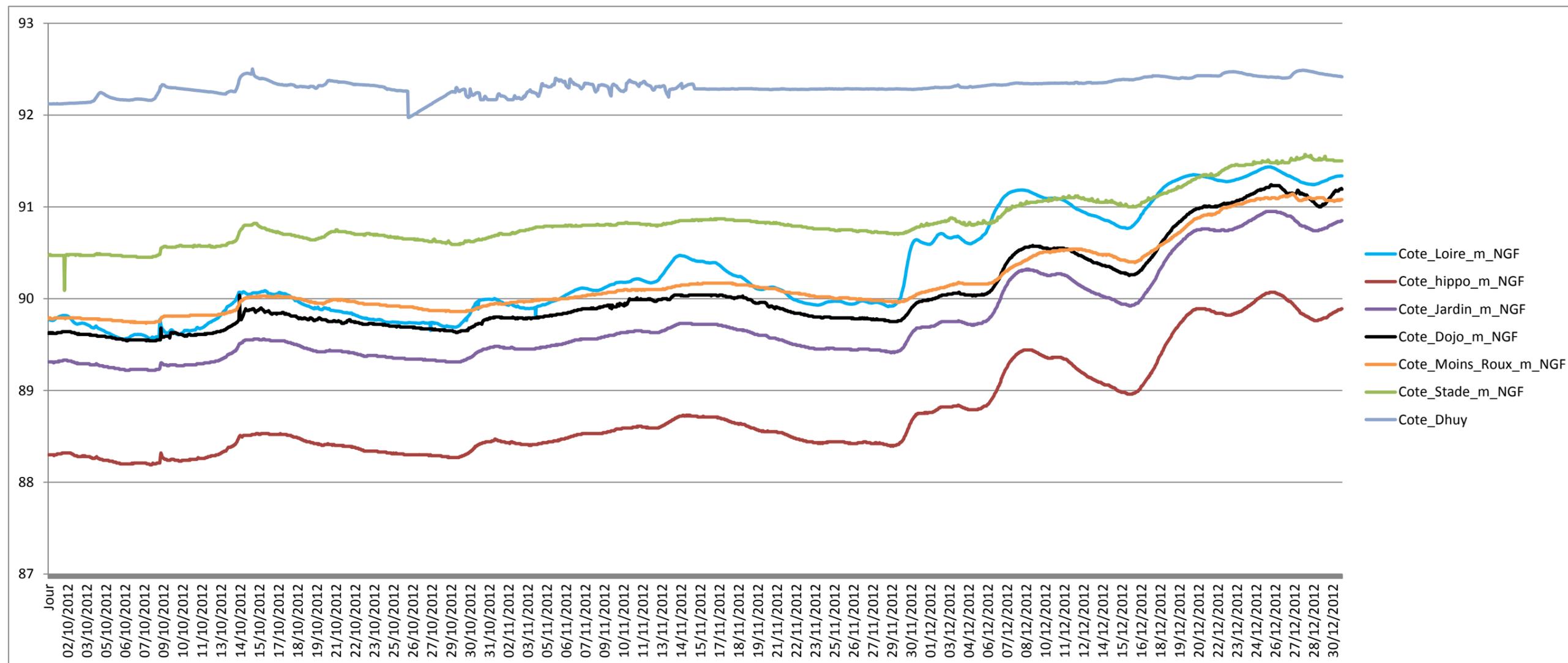
Période d'avril à juin 2012



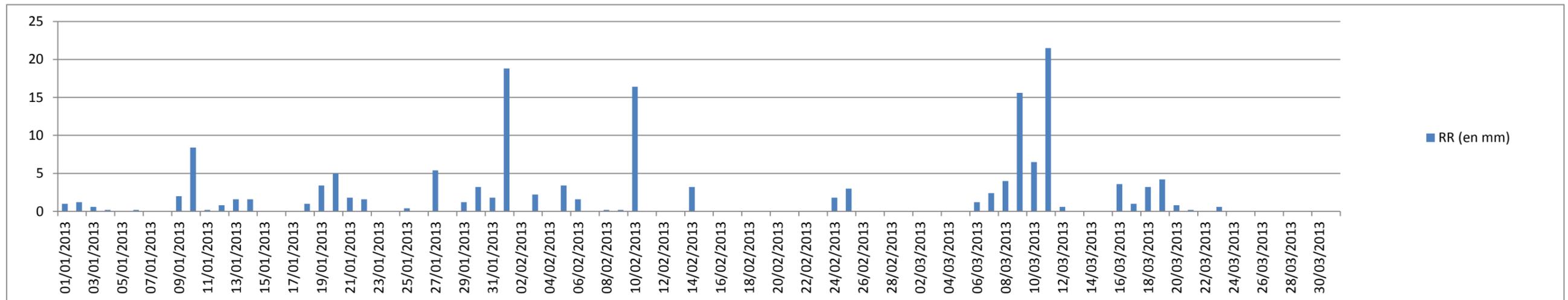
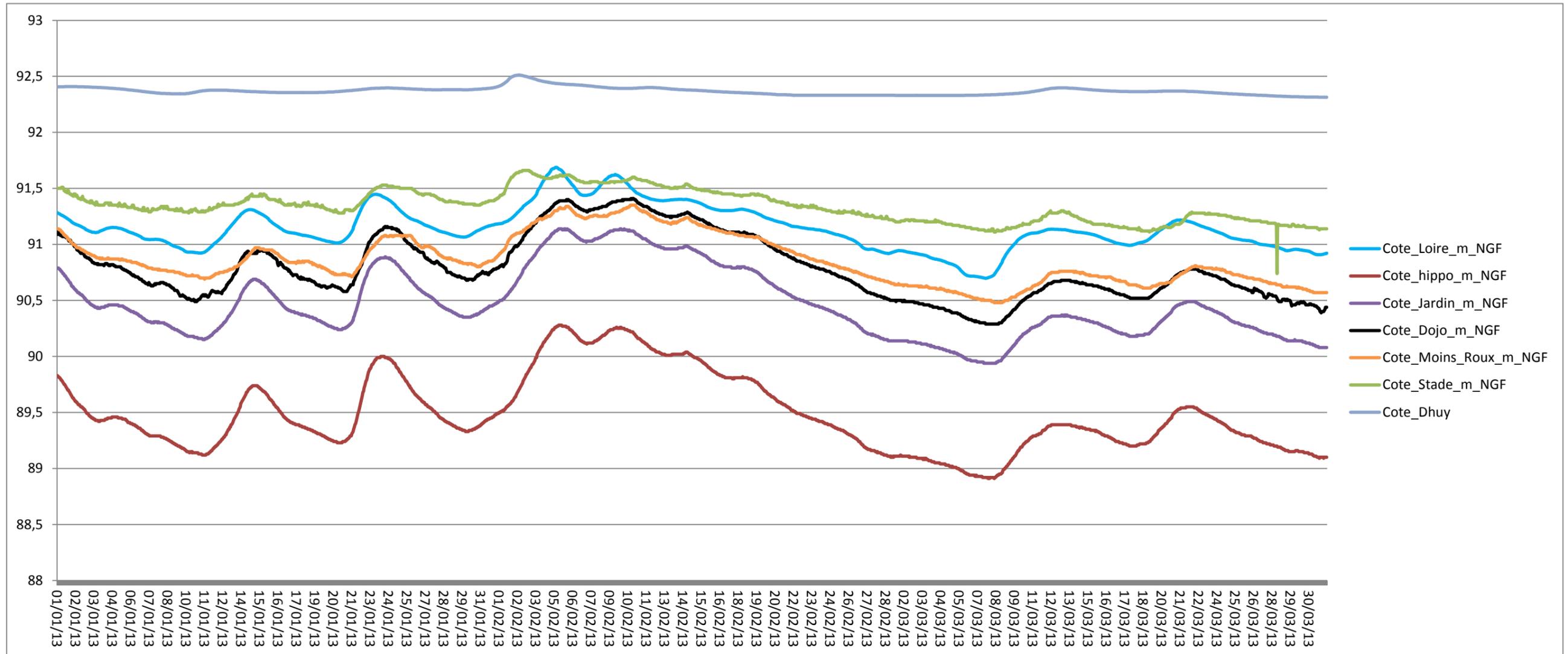
Période de juillet à septembre 2012



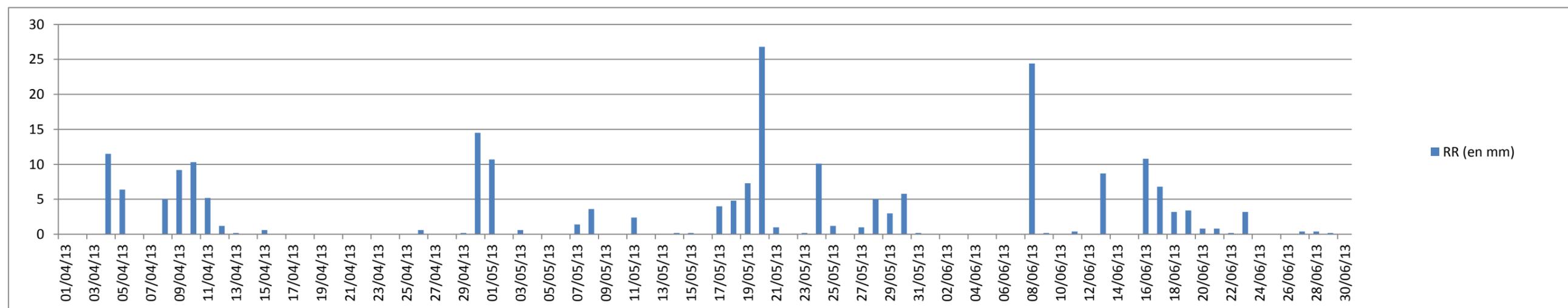
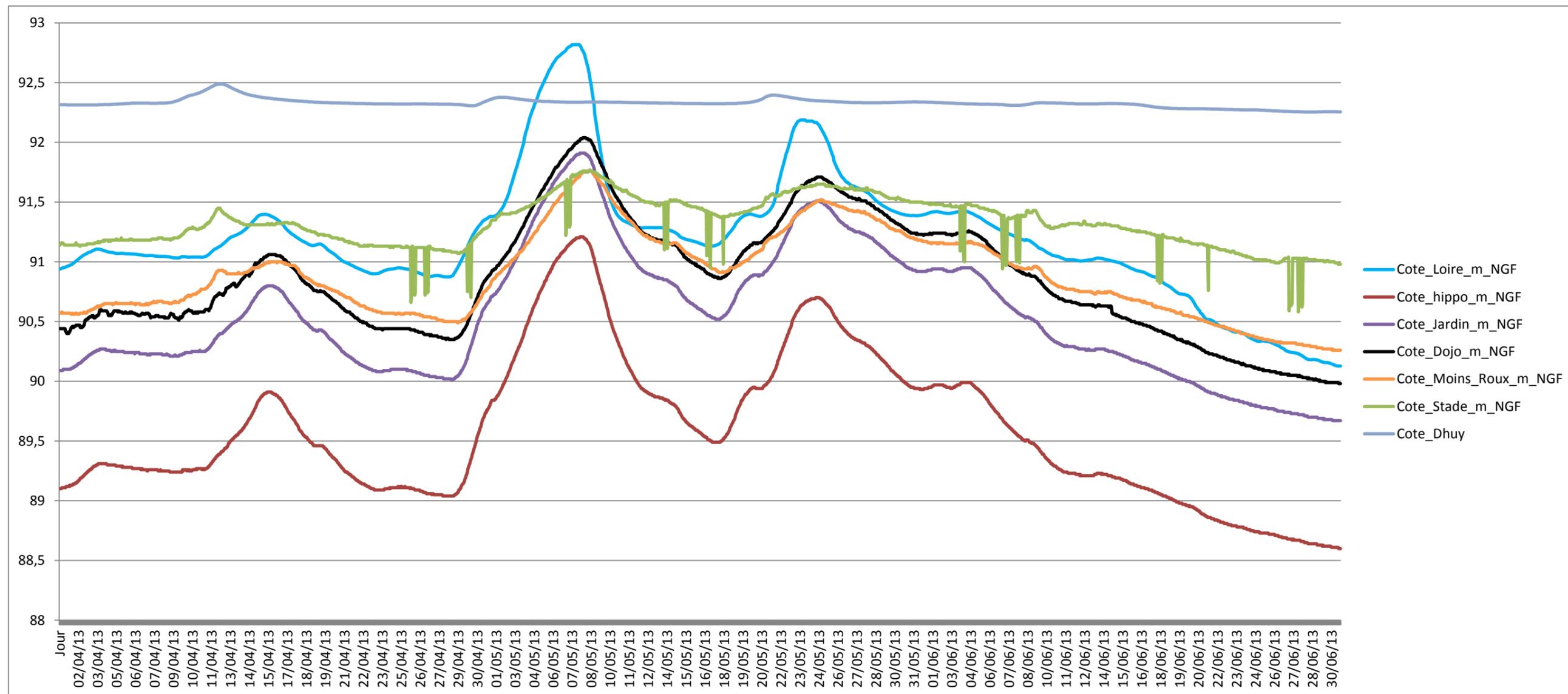
Période d'octobre à novembre 2012



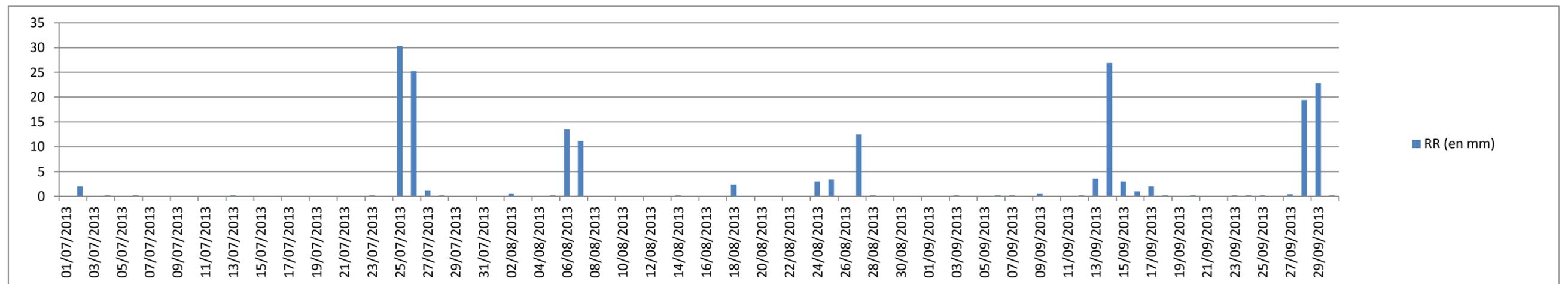
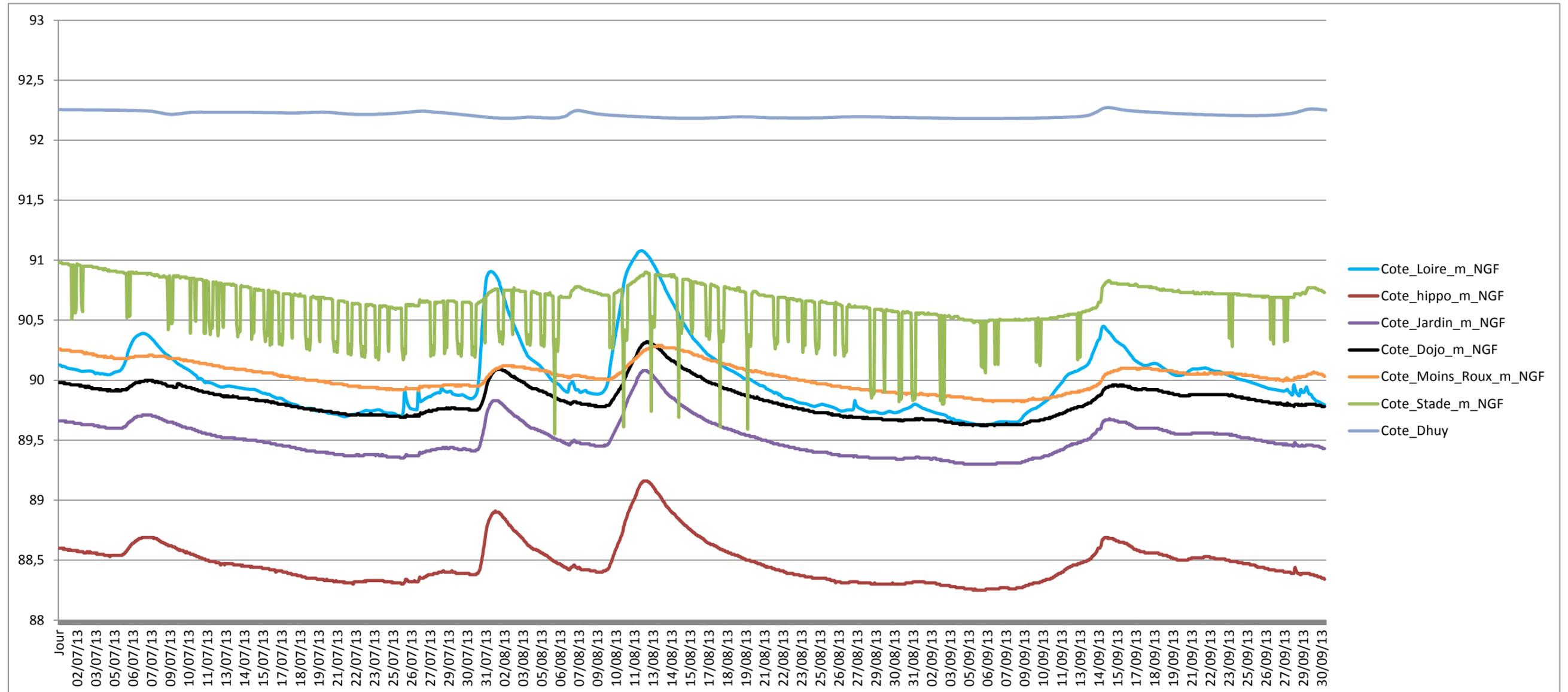
Période de janvier à mars 2013



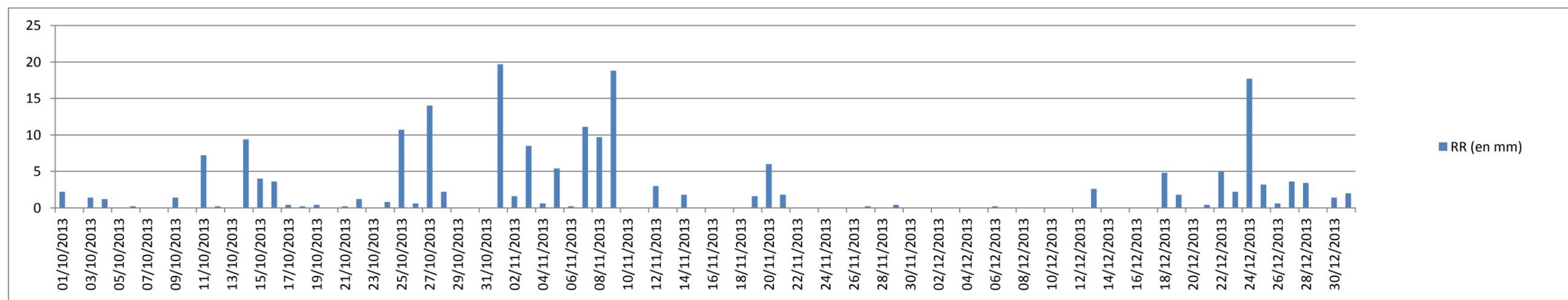
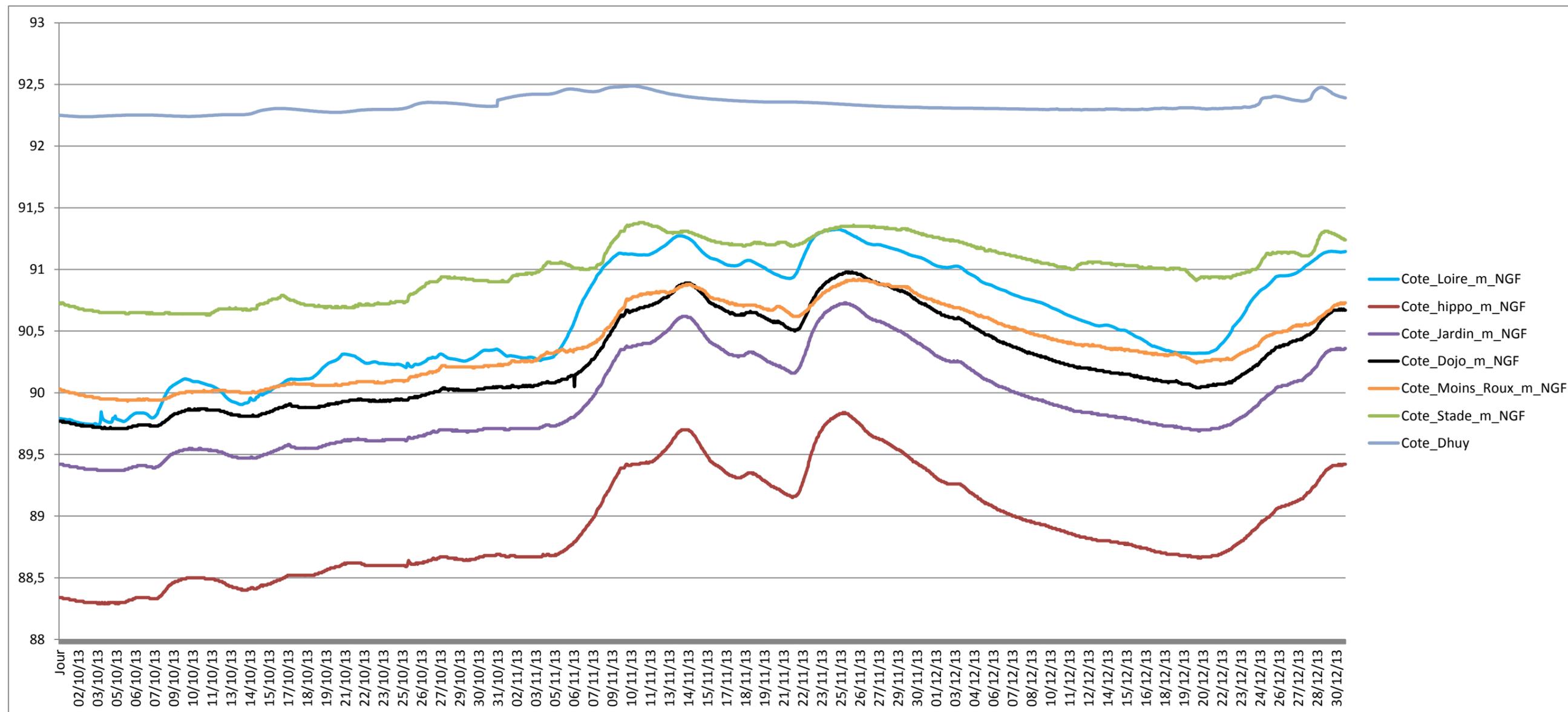
Période d'avril à juin 2013



Période de juillet à septembre 2013



Période d'octobre à décembre 2013



Annexe 2

Résultats des calculs réalisés avec le logiciel CATHERINE

Logiciel : Catherine Version : 4.1
 J /M/ Ann
 le 10/06/2014 à 15h47

Fichier projet utilisé : loire_hippo.cather

Nombre de pas de temps de démarrage = 480
 Existence d'observations de Niveaux de Nappe = 1
 (Sinon : simulation sans calibration)
 Graphiques = 1
 Niveaux changés de signe (0 = non ; 1 = changés) = 0

Distance (mètres) = 360.00
 Diffusivité minimale (m²/s) = 5.000E-02
 Diffusivité maximale (m²/s) = 1.500E+01
 Hauteur constante (mètres) = 0.00 (ou température
 constante °C)
 Unité des pas de temps des données = 0
 (0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Minutes)
 Durée du pas de temps dans cette unité = 1.00

Fichier des 2 Séries (Influencante et Influencée) = loire_hippo.txt
 Série Influencante : colonne 2 du fichier
 Série Influencée : colonne 3 du fichier
 Après le 1er balayage : meilleure diffusivité = 7.525E+00 =>
 Corrélation = 0.9675
 => Valeur précédente : 3.787E+00 (Corrélation = 0.9658)
 => Valeur suivante : 1.500E+01 (Corrélation = 0.9674)

Optimisation par dichotomie

Diffusivité m ² /s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.000E-02	0.7023	88.93	2.386E+00
1.500E+01	0.9674	88.94	-5.781E-05
7.525E+00	0.9675	88.94	1.076E-04
1.126E+01	0.9675	88.94	-2.990E-05
9.394E+00	0.9676	88.94	1.196E-05
1.033E+01	0.9676	88.94	-1.395E-05
9.861E+00	0.9676	88.94	-1.993E-06
9.627E+00	0.9676	88.94	3.987E-06
9.744E+00	0.9676	88.94	1.993E-06
9.803E+00	0.9676	88.94	0.000E+00
9.773E+00	0.9676	88.94	0.000E+00
9.759E+00	0.9676	88.94	0.000E+00
9.751E+00	0.9676	88.94	1.993E-06
9.755E+00	0.9676	88.94	1.993E-06
9.757E+00	0.9676	88.94	0.000E+00
9.756E+00	0.9676	88.94	0.000E+00
9.756E+00	0.9676	88.94	0.000E+00
9.755E+00	0.9676	88.94	0.000E+00

En fin de calcul

Diffusivité m2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
9.755E+00	0.9676	88.94	0.000E+00

Influence du démarrage < 5 % après 470 pas de temps
 Influence du démarrage < 1 % après 11779 pas de temps

=====
 Logiciel : Catherine Version : 4.1
 J /M/ Ann
 le 10/06/2014 à 15h48

Fichier projet utilisé : loire_jardin.cather

Nombre de pas de temps de démarrage	=	480
Existence d'observations de Niveaux de Nappe (Sinon : simulation sans calibration)	=	1
Graphiques	=	1
Niveaux changés de signe (0 = non ; 1 = changés)	=	0

Distance (mètres)	=	268.00
Diffusivité minimale (m2/s)	=	5.000E-02
Diffusivité maximale (m2/s)	=	1.500E+01
Hauteur constante (mètres)	=	0.00 (ou température constante °C)
Unité des pas de temps des données (0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Minutes)	=	0
Durée du pas de temps dans cette unité	=	1.00

Fichier des 2 Séries (Influencante et Influencée) = loire_jardin.txt
 Série Influencante : colonne 2 du fichier
 Série Influencée : colonne 3 du fichier
 Après le 1er balayage : meilleure diffusivité = 1.918E+00 =>
 Corrélation = 0.9646
 => Valeur précédente : 9.839E-01 (Corrélation = 0.9634)
 => Valeur suivante : 3.787E+00 (Corrélation = 0.9628)

Optimisation par dichotomie

Diffusivité m2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.000E-02	0.8176	89.92	1.665E+00
1.500E+01	0.9568	89.94	-2.831E-04
7.525E+00	0.9599	89.94	-6.000E-04
3.788E+00	0.9628	89.94	-9.927E-04
1.919E+00	0.9646	89.93	-5.183E-04

9.844E-01	0.9634	89.93	5.087E-03
1.452E+00	0.9646	89.93	7.077E-04
1.685E+00	0.9646	89.93	-7.974E-05
1.568E+00	0.9646	89.93	2.552E-04
1.627E+00	0.9646	89.93	7.575E-05
1.656E+00	0.9646	89.93	-3.987E-06
1.641E+00	0.9646	89.93	3.389E-05
1.649E+00	0.9646	89.93	1.595E-05
1.652E+00	0.9646	89.93	5.980E-06
1.654E+00	0.9646	89.93	1.993E-06
1.655E+00	0.9646	89.93	-1.993E-06
1.655E+00	0.9646	89.93	-1.993E-06
1.654E+00	0.9646	89.93	1.993E-06

En fin de calcul

Diffusivité m ² /s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
1.654E+00	0.9646	89.93	1.993E-06

Influence du démarrage < 5 % après 1536 pas de temps
Influence du démarrage < 1 % après 38494 pas de temps

Logiciel : Catherine Version : 4.1
J /M/ Ann
le 10/06/2014 à 15h51

Fichier projet utilisé : loire_dojo.cather

Nombre de pas de temps de démarrage	=	480
Existence d'observations de Niveaux de Nappe (Sinon : simulation sans calibration)	=	1
Graphiques	=	1
Niveaux changés de signe (0 = non ; 1 = changés)	=	0

Distance (mètres)	=	550.00
Diffusivité minimale (m ² /s)	=	5.000E-02
Diffusivité maximale (m ² /s)	=	1.500E+01
Hauteur constante (mètres) constante °C)	=	0.00 (ou température
Unité des pas de temps des données (0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Minutes)	=	0
Durée du pas de temps dans cette unité	=	1.00

Fichier des 2 Séries (Influencante et Influencée) = Loire_dojo.txt
Série Influencante : colonne 2 du fichier
Série Influencée : colonne 3 du fichier

Après le 1er balayage : meilleure diffusivité = 3.787E+00 =>
 Corrélation = 0.9724
 => Valeur précédente : 1.918E+00 (Corrélation = 0.9665)
 => Valeur suivante : 7.525E+00 (Corrélation = 0.9717)

Optimisation par dichotomie

Diffusivité m2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.000E-02	0.5563	90.37	3.823E+00
1.500E+01	0.9678	90.35	-4.406E-04
7.525E+00	0.9717	90.35	-5.283E-04
3.788E+00	0.9724	90.35	7.176E-04
5.656E+00	0.9725	90.35	-3.170E-04
4.722E+00	0.9727	90.35	0.000E+00
4.255E+00	0.9726	90.35	2.851E-04
4.488E+00	0.9727	90.35	1.276E-04
4.605E+00	0.9727	90.35	6.180E-05
4.663E+00	0.9727	90.35	2.990E-05
4.693E+00	0.9727	90.35	1.395E-05
4.707E+00	0.9727	90.35	7.974E-06
4.715E+00	0.9727	90.35	3.987E-06
4.718E+00	0.9727	90.35	1.993E-06
4.720E+00	0.9727	90.35	0.000E+00
4.719E+00	0.9727	90.35	0.000E+00
4.719E+00	0.9727	90.35	1.993E-06
4.719E+00	0.9727	90.35	0.000E+00

En fin de calcul

Diffusivité m2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
4.719E+00	0.9727	90.35	0.000E+00

Influence du démarrage < 5 % après 2268 pas de temps
 Influence du démarrage < 1 % après 56837 pas de temps

Logiciel : Catherine Version : 4.1
 J /M/ Ann
 le 10/06/2014 à 15h52

Fichier projet utilisé : loire_moins_roux.cather

Nombre de pas de temps de démarrage = 480
 Existence d'observations de Niveaux de Nappe = 1
 (Sinon : simulation sans calibration)
 Graphiques = 1
 Niveaux changés de signe (0 = non ; 1 = changés) = 0

Distance (mètres) = 1230.00
 Diffusivité minimale (m²/s) = 5.000E-02
 Diffusivité maximale (m²/s) = 1.500E+01
 Hauteur constante (mètres) = 0.00 (ou température constante °C)
 Unité des pas de temps des données = 0
 (0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Minutes)
 Durée du pas de temps dans cette unité = 1.00

Fichier des 2 Séries (Influencante et Influencée) =
 loire_moins_roux.txt
 Série Influencante : colonne 2 du fichier
 Série Influencée : colonne 3 du fichier

Après le 1er balayage : meilleure diffusivité = 3.787E+00 =>
 Corrélation = 0.9516
 => Valeur précédente : 1.918E+00 (Corrélation = 0.9301)
 => Valeur suivante : 7.525E+00 (Corrélation = 0.9514)

Optimisation par dichotomie

Diffusivité m ² /s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.000E-02	-0.3136	90.36	1.213E+01
1.500E+01	0.9381	90.38	-1.661E-03
7.525E+00	0.9514	90.38	-1.575E-03
3.788E+00	0.9516	90.38	3.441E-03
5.656E+00	0.9535	90.38	-5.522E-04
4.722E+00	0.9535	90.38	7.555E-04
5.189E+00	0.9537	90.38	-7.974E-06
4.955E+00	0.9536	90.38	3.409E-04
5.072E+00	0.9536	90.38	1.595E-04
5.131E+00	0.9537	90.38	7.376E-05
5.160E+00	0.9537	90.38	3.190E-05
5.174E+00	0.9537	90.38	1.395E-05
5.182E+00	0.9537	90.38	1.993E-06
5.185E+00	0.9537	90.38	-1.993E-06
5.184E+00	0.9537	90.38	0.000E+00
5.183E+00	0.9537	90.38	1.993E-06
5.183E+00	0.9537	90.38	0.000E+00
5.183E+00	0.9537	90.38	1.993E-06

En fin de calcul

Diffusivité m ² /s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
5.183E+00	0.9537	90.38	1.993E-06

Influence du démarrage < 5 % après 10329 pas de temps
 Influence du démarrage < 1 % après 258814 pas de temps

Logiciel : Catherine Version : 4.1

J /M/ Ann

le 26/08/2014 à 14h34

Fichier projet utilisé : loire_stade.cather

Nombre de pas de temps de démarrage = 38828
 Existence d'observations de Niveaux de Nappe = 1
 (Sinon : simulation sans calibration)
 Graphiques = 1
 Niveaux changés de signe (0 = non ; 1 = changés) = 0

 Distance (mètres) = 3110.00
 Diffusivité minimale (m2/s) = 1.000E+00
 Diffusivité maximale (m2/s) = 1.000E+01
 Hauteur constante (mètres) = 0.00 (ou température constante °C)
 Unité des pas de temps des données = 0
 (0=Heures 1=Jours 2=Mois 3=Ans 4=Minutes)
 Durée du pas de temps dans cette unité = 1.00

 Fichier des 2 Séries (Influencante et Influencée) = Loire_stade.txt
 Série Influencante : colonne 2 du fichier
 Série Influencée : colonne 3 du fichier

Après le 1er balayage : meilleure diffusivité = 1.000E+01 =>
 Corrélation = 0.8346
 => Valeur précédente : 5.500E+00 (Corrélation = 0.8253)
 *** Attention c'est la limite supérieure => Mettre une borne supérieure plus grande

Optimisation par dichotomie

Diffusivité m2/s	Coefficient de corrél.	Niveau constant	Dérivée d.R/d.Dif
1.000E+00	0.4574	90.99	4.440E-01
1.000E+01	0.8346	91.00	-1.967E-03
5.500E+00	0.8253	90.99	9.778E-03
7.750E+00	0.8360	91.00	1.209E-03
8.875E+00	0.8362	91.00	-7.318E-04
8.312E+00	0.8364	91.00	1.258E-04
8.594E+00	0.8364	91.00	-3.278E-04
8.453E+00	0.8364	91.00	-1.093E-04
8.383E+00	0.8364	91.00	6.623E-06
8.418E+00	0.8364	91.00	-5.298E-05
8.400E+00	0.8364	91.00	-2.318E-05
8.392E+00	0.8364	91.00	-6.623E-06
8.387E+00	0.8364	91.00	0.000E+00
8.385E+00	0.8364	91.00	3.311E-06
8.386E+00	0.8364	91.00	0.000E+00
8.386E+00	0.8364	91.00	3.311E-06

8.386E+00	0.8364	91.00	0.000E+00
8.386E+00	0.8364	91.00	3.311E-06

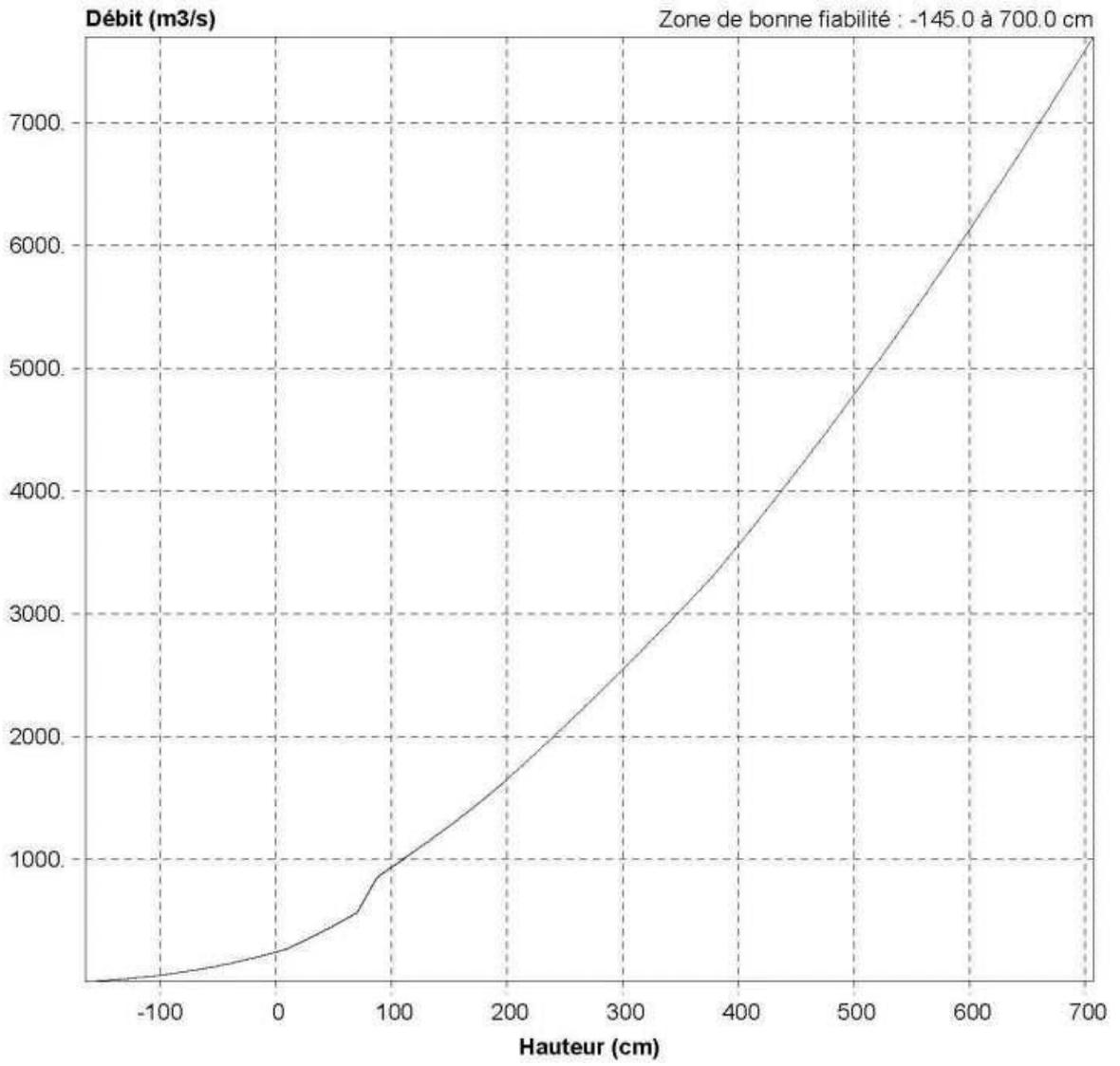
En fin de calcul

Diffusivité	Coefficient	Niveau	Dérivée
m ² /s	de corrél.	constant	d.R/d.Dif
8.386E+00	0.8364	91.00	3.311E-06

Annexe 3

Courbe de tarage de la station hydrologique de la Loire à Orléans (K4350010)

Station située au pont Georges V - courbe de tarage en vigueur à la date du 15/09/2014 (source : DREAL Centre)





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Centre

3, avenue Claude Guillemain
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 31 92