

**EQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE
d'assistance aux maîtres d'ouvrage
PLAN LOIRE GRANDEUR NATURE**

Le Comité de Pilotage de l'Equipe rassemble l'Etat, l'EPALA et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne

**Risques d'inondation des vals de la Loire
moyenne par remontée de nappe et par rupture
des endiguements de protection**

**Méthodologie de caractérisation de l'aléa basée sur les
données du site de Muides (Val d'Avaray)**

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 99-D-698

**octobre 1999
R 40832**



**EQUIPE PLURIDISCIPLINAIRE
d'assistance aux maîtres d'ouvrage
PLAN LOIRE GRANDEUR NATURE**

Le Comité de Pilotage de l'Equipe rassemble l'Etat, l'EPALA et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne

**Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne
par remontée de nappe et par rupture des
endiguements de protection**

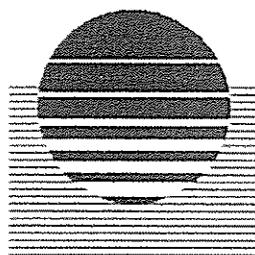
**Méthodologie de caractérisation de l'aléa basée sur les données du
site de Muides (Val d'Avaray)**

N. Doerfliger, J-C. Martin, D. Chassagneux, J-J Seguin

Avec la collaboration de D. Giot

Octobre 1999

R 40832



BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mots clés : inondation, aléa, rupture de levées, modélisation, hydrogéologie, géotechnique, Loire moyenne

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

Doerfliger N., Martin J-Cl., Chassagneux D., J-J. Seguin (1999) – Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe et par rupture des endiguements de protection. Méthodologie de caractérisation de l'aléa basée sur les données du site de Muides (val d'Avaray), BRGM R 40832, 139 p. , 25 fig., 25 tabl. , 5 annexes .

© BRGM, 1999, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les populations des vals de la Loire moyenne sont exposées aux inondations lors de fortes crues de la Loire. Une grande partie des activités économiques et des habitations se situent en zone inondable. Au vu des enjeux humains et économiques, le comité technique de l'équipe pluridisciplinaire du Plan Loire Grandeur Nature a lancé une étude consacrée au rôle des crues sur la remontée des nappes d'eau souterraine des vals et sur la déstabilisation voire la rupture des endiguements de protection.

L'objectif principal de cette étude méthodologique de caractérisation de l'aléa « rupture de levées par remontée de nappe » est de permettre de déterminer dans quels cas les crues de la Loire peuvent être la cause de transferts de pressions suffisants au niveau du sous-sol pour i) causer des remontées de nappes importantes à l'extérieur des levées du côté des vals et ii) déstabiliser voire induire la rupture des levées de protection.

Dans un premier temps, les documents de synthèse existants sur les inondations majeures et leurs causes ainsi que les rapports des études de diagnostic concernant la stabilité des levées de la Loire moyenne ont été examinés afin de rechercher i) les points communs des accidents connus de La Loire moyenne par rupture de digues et/ou par remontée de nappe et ii) d'obtenir des ordres de grandeur des propriétés hydrauliques et géotechniques du système étudié, -lit, levée et val-, puis des méthodes de calculs hydrodynamiques et géotechniques ont été mises en oeuvre sur l'un des vals de la Loire moyenne, le val d'Avaray. Le val d'Avaray a été retenu comme site test au vu de la connaissance géologique acquise par le BRGM dans le cadre du programme de recherche « PRR201 Morphogenèse ».

Des éléments méthodologiques peuvent se dégager des résultats des deux approches menées successivement dans le cadre de cette étude, dans le but de caractériser l'aléa « rupture de levées par remontée de nappes ». Ils permettent de poser des jalons pour la caractérisation de cet aléa pour les vals de la Loire moyenne les plus exposés. Les deux approches sont complémentaires, la première -hydrodynamique- renseigne sur les modalités d'écoulements de la Loire vers le val et permet de calculer la piézométrie ainsi que les débits de débordement de la nappe dans le val et la deuxième -géotechnique- permet de calculer le gradient critique pour la ligne d'eau maximale au sein de la digue et de localiser ainsi les secteurs où peuvent se produire un phénomène de renard.

Trois coupes transversales ont été retenues pour les modélisations au niveau du Val d'Avaray, afin de simuler la propagation de l'onde de crue de la Loire vers le val pour différentes crues de référence (débit pour un temps de retour 50, 100 et 500 ans) pour différentes configurations du système -levée avec ou sans renforcement et tapis drainant, fossés de drainage côté val, exploitation des graviers dans le lit de la Loire-, et de calculer les gradients critiques à l'origine des processus d'instabilité par phénomène de « renard ».

Les modélisations hydrodynamiques ont été effectuées à l'aide du code de calcul MARTHE (© BRGM, version 5.2., nov.1998), utilisant un schéma aux différences finies. Le modèle utilisé est un modèle en coupe verticale à mailles variables en régime transitoire. La simulation des écoulements en zone non saturée n'a pas été prise en considération ; le rôle de ces écoulements dans ce milieu peut être considéré comme négligeable sur le processus à simuler. Les principaux résultats de ces modélisations sont les suivants :

La remontée de la nappe faisant suite à une crue de la Loire est effective principalement au voisinage de la levée côté val ; l'eau sourd essentiellement au niveau du pied de la digue. Le niveau piézométrique remonte rapidement jusqu'à la surface du sol et donne lieu à un débit de débordement au niveau des fossés du val. La piézométrie qui s'établit correspond dans tous les cas à une ligne d'eau dont la partie amont est située au pied de la digue et dont la partie aval correspond au cours d'eau de la Tronne.

Les mécanismes de remontée de nappe, au cours d'une crue exceptionnelle sont présentés par la figure ci-dessous.

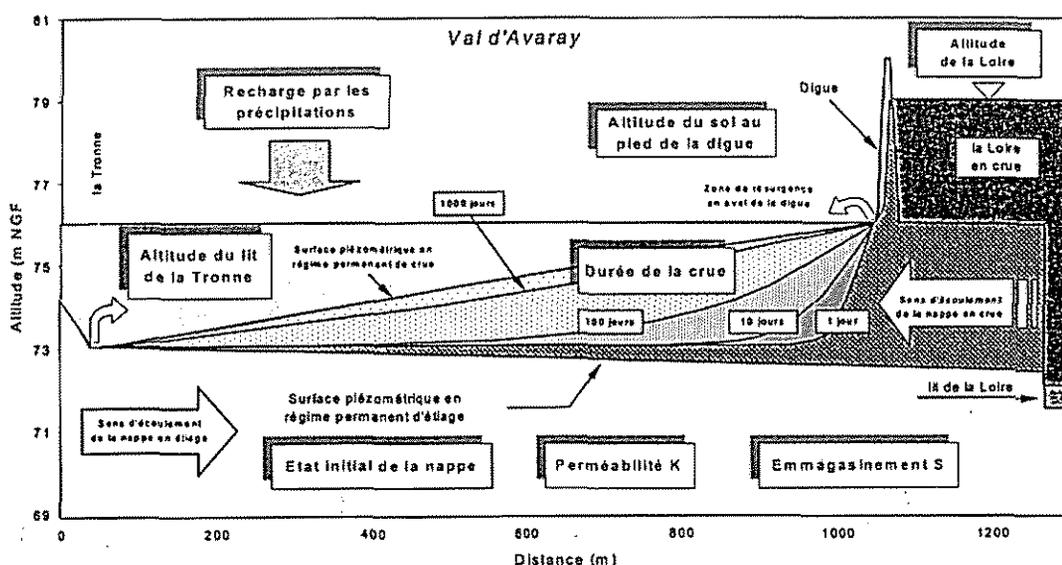
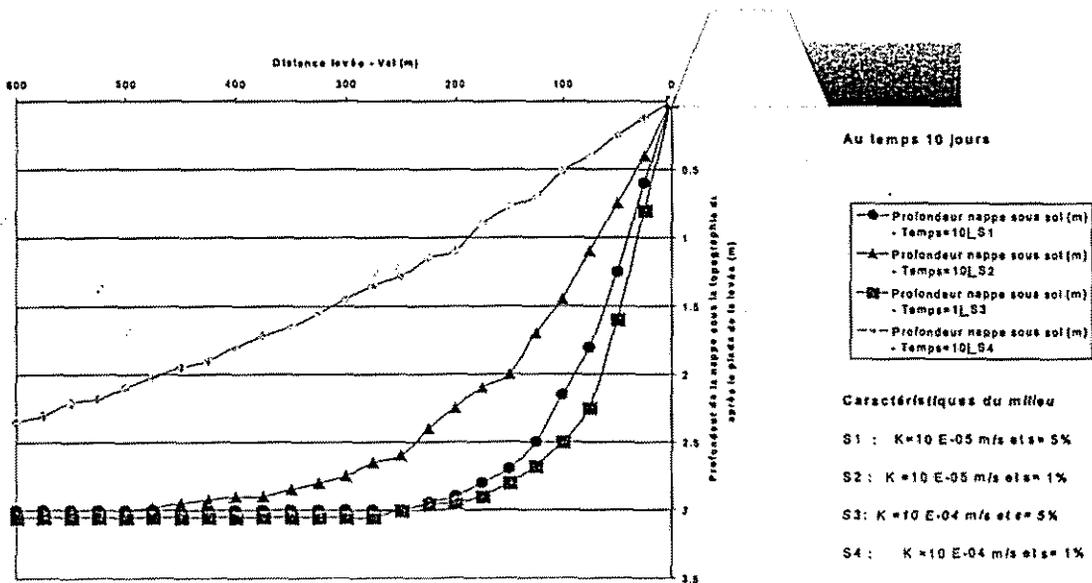
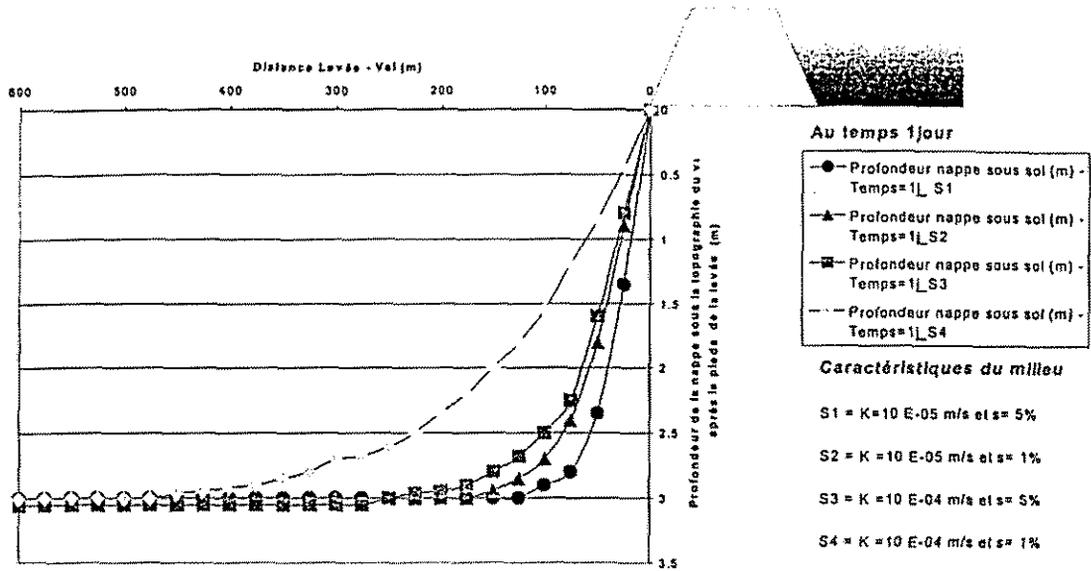


Fig. 1 - Schématisation des phénomènes de remontée de nappe lors d'une crue exceptionnelle de la Loire et inventaire des facteurs principaux intervenants lors d'une crue.

Pour une crue de référence (débit de temps de retour 500 ans), le débit de débordement aux exutoires côté val varie entre 8,5 et 30 m³/h pour 100 m de digue, pour des configurations de digues avec ou sans renforcement et tapis filtrant. Pour une crue de longue durée (30 jours) sur une levée sans renforcement et avec fossés du côté val, les volumes débités passent de 30 à 50 m³/h pour 100 m de digue. A noter que l'existence d'une veine de sable sous une levée avec tapis filtrant engendrerait des débits de pointes égaux à 145 m³/h pour 100 m de digue et des volumes de débits égaux à 625 m³/h pour 100 m de levée. Ces valeurs de débit sont valables pour des cas de digues et d'aquifères avec des perméabilités comprises entre 2 10⁻⁴ et 2 10⁻³ m/s pour le corps de la levée et 2 10⁻⁶ et 2,5 10⁻³ m/s pour l'aquifère. Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 5 à 10 %.

Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe



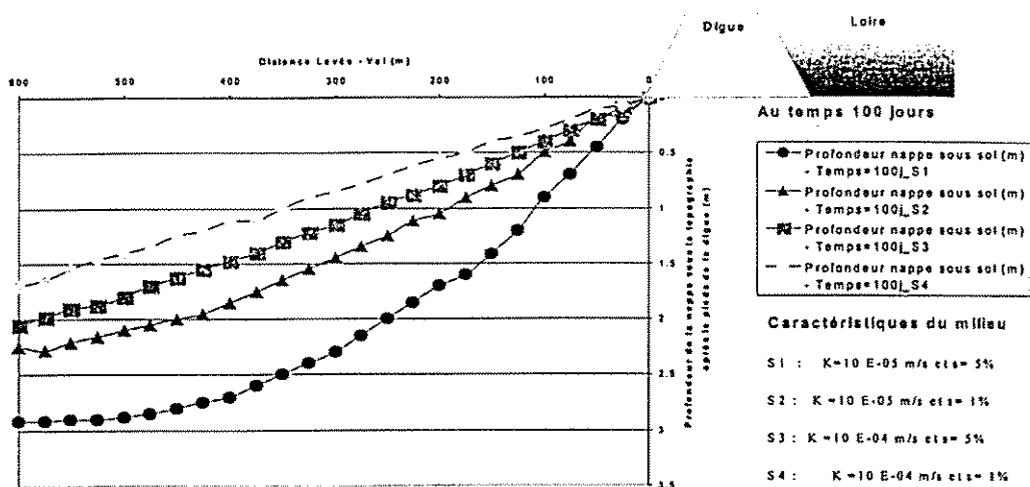


Fig. 2 - Représentation de l'évolution au cours du temps (Temps $T = 1 \text{ j}$ à 100 j) de la propagation d'une onde de crue dans une nappe alluviale en s'éloignant de la levée vers le val pour 4 cas pour lesquels les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère considéré comme homogène varient

Quant à la remontée de niveau de la nappe (vitesse et cote atteinte), elle dépend bien sûr des caractéristiques du milieu géologique (nombre de couches pouvant être différenciées, épaisseur,...) et des paramètres hydrodynamiques (transmissivité T , emmagasinement S , diffusivité T/S). Des simulations réalisées, on peut extraire les chiffres suivants :

A plus de 100 mètres de la levée, pour une petite diffusivité (T/S de 10^{-6} m/s à 10^{-5} m/s), la nappe est située à plus de deux mètres de profondeur sous la surface du sol, 10 j après la crue. Un jour après la crue, la nappe est à sa profondeur maximale à une distance de 150 m de la levée pour les situations à diffusivité comprise entre 10^{-6} m/s à $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$; après 10 j, la nappe est à cette cote pour ces mêmes conditions à plus 400 m de la digue. Cent jours après le début de la crue, la nappe est située à moins d'un mètre sous la surface du sol quelque soit la diffusivité (T/S). Si cette dernière est égale à 10^{-4} m/s , la nappe est à quelques 20 cm du sol.

Ces graphiques permettent de mettre en évidence la sensibilité du système à la remontée de nappe en fonction des conditions hydrodynamiques. Il faut cependant éviter toute généralisation à partir de ces exemples simplifiés et se garder d'en tirer des conclusions hâtives sur les éventuelles remontées de nappe à telle ou telle distance dans un val donné en utilisant une valeur ponctuelle de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement.

Parmi les huit simulations réalisées sur les trois profils du val d'Avaray, quatre ont été examinées en termes de stabilité géotechnique et plus particulièrement pour tester l'occurrence du phénomène de renard. Les configurations des digues suivantes ont été étudiées : **digue sans renforcement avec présence de fossés** du côté du val, digue de même type mais avec en plus une **exploitation de graviers** au niveau du lit de la Loire ou un approfondissement du lit de la Loire suite à une exploitation de matériaux, digue **avec renforcement** (tapis filtrant) mais sans fossés côté val et cette dernière avec une **veine de sable perméable** sous la digue. Pour chacune de ces quatre simulations, la situation correspondant à la ligne d'eau maximale à l'amont de la digue, donc à un gradient entre l'amont et l'aval de la digue a priori maximal, a été analysée en terme de gradient critique pour déterminer l'occurrence d'un phénomène de renard.

L'analyse géotechnique permet de mettre en évidence les points suivants :

- La présence de fossés au pied de digues non renforcées conduit à la présence de gradients critiques au niveau du fossé, qui **peuvent a priori générer un phénomène de renard avec érosion régressive**. A noter que la présence d'une exploitation de graviers du côté Loire de la digue, conduit à un résultat plus défavorable que sans.
- Par comparaison, les simulations pour les **digues renforcées avec tapis filtrant** aboutissent à des **gradients toujours inférieurs au gradient critique**. La présence de fossés en pieds de digue est un élément défavorable vis à vis de l'effet renard, ce dernier étant localisé au niveau du ou des fossés. Ainsi, si le tapis filtrant a pour effet de réduire le gradient critique au sein de la digue, on peut penser qu'il pourra certainement avoir un effet positif sur le gradient au niveau des fossés en le diminuant.
- La présence d'une **veine de sable sous la digue** fait notablement **diminuer le gradient maximal**, qui se déplace au sein de la digue, par rapport au cas de la digue renforcée avec tapis filtrant.
- Il faut remarquer que les **zones à gradients verticaux ascendants** sont en général localisées à **proximité du pied de digue**.

Les facteurs principaux qui déterminent les remontées de nappe, et qui ont été identifiés aux cours des différentes simulations sont les suivants :

- 1) La géologie et la géométrie de l'aquifère (nature et épaisseur des formations géologiques). A partir de la connaissance de la géologie régionale et des travaux de recherche antérieures ainsi que des opérations de service public du BRGM, avec notamment la constitution du base de données des forages sur les vals de la Loire de Nevers à Angers (plus de 1 500 points inventoriés), l'épaisseur moyenne des alluvions constituant l'aquifère alluvial est de 7 m. Due à une forte variation d'épaisseur, passant du simple au double sur l'ensemble des vals le long du cours de la Loire, l'épaisseur peut dépasser 15 à 25 m en particulier d'Orléans à Châteauneuf. A noter qu'en amont d'Orléans, les variations d'épaisseur sont accentuées due à l'existence de morphologies karstiques sous-jacentes (poche ou goulet de 1 à 10 m de diamètre en général). Lorsque le substratum est calcaire, une couche argileuse d'altération est présente entre les sables alluviaux et le substratum. Les sables alluviaux comportent des hétérogénéités plus ou moins importantes marquées par

d'anciens chenaux comblés par des sédiments fins. Très souvent, les formations sableuses (sables fins à sables et graviers) sont surmontées de formations argilo-limoneuses liées aux conditions de dépôt de type fluviales.

- 2) La perméabilité qui est variée entre 10^{-3} à 10^{-6} m/sec et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère compris entre 5 et 10 %.
- 3) La topographie du Val avec la position et l'altitude des exutoires (résurgence au pied de la digue, lit des cours d'eau et fossés) ;
- 4) Les caractéristiques de la crue de la Loire: durée et altitude de la Loire en période de crue. Les crues représentant un intérêt sont les crues d'une période de retour supérieure ou égale à 100 ans.
- 5) Le contexte hydrogéologique de l'aquifère : le sens d'écoulement de la nappe, la situation de la nappe en régime de Hautes Eaux, les alimentations de la nappe (pluie efficace, alimentation souterraine autres que la Loire). La présence de cours d'eau et leur importance et leur relation avec la nappe alluviale, au niveau du Val sont à considérer. Un petit affluent du type de celui de la Tronne ou un cours d'eau tel que le Cher n'aura pas le même rôle sur l'hydrogéologie du val et le phénomène de remontée de nappe conjuguée due à la Loire et au Cher) (exemple de la ville de Tours).
- 6) Connaissance des profils en travers des levées : géométrie, composition des matériaux et propriétés hydrauliques de ceux-ci (perméabilité) et géotechniques (poids volumique sec et saturé). Les digues sont généralement situées sur des reliefs en forme de bourrelets le long de la Loire, les vallons prenant place en contrebas.

Tant du point de vue de la propagation de l'onde de pression de la crue de la Loire vers le val que du point de vue de la genèse du phénomène de renard, les hétérogénéités du terrain que ce soit au niveau de la levée ou au niveau de l'aquifère sont essentielles et doivent être prises en considération.

Sommaire

Introduction	17
Objectifs de l'étude	18
Démarche méthodologique suivie	19
1. Historique des accidents dans le bassin de la Loire moyenne par rupture de digues et remontées de nappe	21
1.1. Analyse historique des ruptures de digues.....	22
1.2. Localisation des brèches historiques sur le site de Muides	23
1.3. Incidence de l'hydrogéologie sur la rupture des levées	25
2. Acquisition des données numériques pour le site du val d'Avaray.....	27
2.1. Contexte géographique, géologique et hydrographique du Val d'Avaray.....	27
2.1.1. Description géographique et hydrographique du Val d'Avaray.....	27
2.1.2. Contexte géologique	29
2.1.3. Contexte hydrogéologique.....	31
2.2. Géométrie du Val et du lit de la Loire	36
2.2.1. La digue du Val d'Avaray	36
2.2.2. Lithologie de la levée et des alluvions sous-jacents	37
2.2.3. Le lit de la Loire	39
2.3. Propriétés géotechniques de la levée	40
2.4. Coupes sélectionnées pour la modélisation	41
2.5. Données hydrauliques de la Loire	42
2.5.1. Hydrogrammes de crues estimées au niveau des profils.....	42
2.5.2. Hauteurs d'eau actuelles observées	43
2.5.3. Fonctionnement du Val d'Avaray en crue.....	43
3. Méthodes de calcul pour déterminer les transferts de pression sous et à l'extérieur des digues – étude hydrodynamique	47
3.1. Les conditions hydrauliques des écoulements de la nappe du Val d'Avaray, et les hypothèses retenues pour la simulation d'une crue de la Loire	47
3.2. Les caractéristiques et les conditions aux limites du modèle coupe	48

3.2.1. Le modèle coupe	48
3.2.2. Les conditions aux limites.....	49
3.2.3. Le régime permanent des écoulements	49
3.3. Localisation des profils étudiés dans le val d'Avaray	50
3.4. La ligne d'eau de la Loire et la crue cinq centennale	50
3.4.1. Altitude de la ligne d'eau de la Loire pour des crues de temps de retour compris entre 50 et 500 ans	50
3.4.2. La crue cinq centennale au droit des Profils 1, 2 et 3.....	51
3.5. Le calcul des débits d'échange par zone	54
3.6. Les différentes simulations réalisées	55
3.6.1. Simulations préliminaires sur une coupe simplifiée.....	55
3.6.2. Simulations réalisées sur les trois profils du Val d'Avaray.....	55
3.7. Simulations préliminaires sur une coupe simplifiée	56
3.7.1. Maillage, caractéristiques et conditions aux limites du modèle.....	56
3.7.2. Incidence des valeurs de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement sur la piézométrie et les débits de débordement	58
3.7.3. Evolution des niveaux de la nappe en fonction des niveaux de la Loire, en dehors des périodes de crues exceptionnelles	61
3.7.4. Description des mécanismes hydrauliques liés aux crues de la Loire, et inventaire des facteurs principaux dans le phénomène de remontée de nappe..	63
3.8. Simulation d'une crue cinq centennale de la Loire sur le Profil 1	64
3.8.1. Le maillage	64
3.8.2. Position et dimensions de la digue	64
3.8.3. Les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle.....	64
3.8.4. Les conditions hydrauliques initiales en régime permanent	65
3.8.5. Les simulations	65
3.9. Simulation d'une crue cinq centennale de la Loire sur le Profil 2	70
3.9.1. Le maillage	70
3.9.2. Position et dimensions de la digue	71
3.9.3. Les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle.....	71
3.9.4. Les conditions hydrauliques initiales en régime permanent	71
3.9.5 - Les simulations	72
3.10. Simulation d'une crue cinq centennale de la Loire sur le Profil 3	73
3.10.1. Le maillage	73
3.10.2. Position et dimensions de la digue	73
3.10.3. Les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle.....	74
3.10.4 - Les conditions hydrauliques initiales en régime permanent.....	74
3.10.5. Simulation P3S1 : Etude de la simulation de référence	74

4. Stabilité géotechnique	75
4.1. Méthodologie générale	75
4.1.1. Phénomènes à prendre en considération.....	75
4.1.2. Les principaux moyens d'analyse de stabilité et de protection	76
4.1.3. Les reconnaissances et études préalables à mettre en œuvre.....	77
4.1.4. Objectif méthodologique.....	78
4.2. Méthode de calcul.....	79
4.2.1. Calcul du gradient critique (effet de Renard).....	79
4.2.2. Scénarios pris en compte.....	79
4.3. Résultats.....	80
4.4. Interprétation des résultats.....	83
5. Synthèse des approches hydrodynamique et géotechnique – caractérisation de l'aléa « rupture par remontée de nappe »	85
5.1. Approche Hydrodynamique.....	85
5.1.1. Les mécanismes de propagation d'une crue de la Loire dans l'aquifère..	85
5.1.2. Les résultats des simulations réalisées	89
5.2. Synthèse des approches hydrodynamiques et géotechniques.....	90
5.3. Les facteurs principaux qui déterminent les remontées de nappe et leurs conséquences sur l'instabilité des levées.....	92
Conclusion et perspectives	95
Caractérisation de l'aléa.....	95
a) Apport de l'étude dans la définition d'un index de vulnérabilité.....	96
b) Cartographie de la vulnérabilité du val aux inondations	98
c) Eléments nécessaires à la caractérisation de la vulnérabilité du val aux inondations par remontée de nappe et rupture de levées	98
Bibliographie.....	101
Annexe 1 : profils des trois digues	
Annexe 2 : profils géologiques des trois sections	
Annexe 3 : simulations préliminaires, profils piézométriques de la nappe.	
Annexe 4 : profils piézométriques de la nappe.	
Annexe 5 : Débits de débordement dans le val.	

Liste des figures

Figure de la Synthèse

- Figure 1 - Schématisation des phénomènes de remontée de nappe lors d'une crue exceptionnelle de la Loire et inventaire des facteurs principaux intervenants lors d'une crue.
- Figure 2 - Représentation de l'évolution au cours du temps (Temps $T = 1 \text{ j}$ à $1\,000 \text{ j}$) de la propagation d'une onde de crue dans une nappe alluviale en s'éloignant de la levée vers la val pour 4 cas pour lesquels les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère considéré comme homogène varient.

Figures du rapport

- Figure 1 - Loire Moyenne, Localisation du Val d'Avaray.
- Figure 2 - Carte géologique du Val d'Avaray.
- Figure 3 - Alimentation de la nappe alluviale par les coteaux calcaires.
- Figure 4 - Carte piézométrique du Val d'Avaray. Étiage de 1982.
- Figure 5 - Modèle numérique de terrain. Surface piézométrique du Val d'Avaray.
- Figure 6 - Profil en long de la digue, rive droite.
- Figure 7 - Localisation des sondages SC1 à SC5 et perméabilités à 3,2 m de profondeur.
- Figure 8 - Carte d'inondabilité du Val d'Avaray, modèle Hydratec 1997.
- Figure 9 - Coupe hydrogéologique schématique du val d'Avaray (Cas du profil 1).
- Figure 10 - Localisation des profils étudiés dans le val d'Avaray et des stations de mesure des niveaux de la Loire.
- Figure 11 - Altitude de la ligne d'eau de la Loire, au droit du profil 1, pour des crues de temps de retour compris entre 50 et 500 ans.
- Figure 12 - Altitude moyenne journalière de la ligne d'eau de la Loire lors d'une crue centennale au droit des Profils 1, 2 et 3.
- Figure 13 - Localisation des zones de calcul du bilan hydraulique du modèle coupe.
- Figure 14 - Débit de débordement en aval de la digue, en régime transitoire, pour plusieurs valeurs de K et de S (Simulations 1 à 4).
- Figure 15 - Évolution des niveaux de la nappe à une distance de 200 et 390 m de la crue de La Loire en fonction des niveaux du fleuve, en dehors des périodes de crues exceptionnelles.

Liste des figures (suite)

- Figure 16 - Position et dimensions de la digue au droit du Profil 1.
- Figure 17 - Volume de débordement en fonction du niveau de la Loire au-dessus du pied de la digue.
- Figure 18 - Position et dimensions de la digue au droit du Profil 2.
- Figure 19 - Position et dimensions de la digue au droit du Profil 3.
- Figure 20 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 1, simulation 1, pas de temps 5 (P1S1PT5).
- Figure 21 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 1, simulation 5, pas de temps 5 (P1S5PT5).
- Figure 22 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 2, simulation 1, pas de temps 5 (P2S1PT5).
- Figure 23 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 2, simulation 2, pas de temps 5 (P2S2PT5).
- Figure 24 - Schématisation des phénomènes de remontée de nappe lors d'une crue exceptionnelle de la Loire et inventaire des facteurs principaux intervenants lors d'une crue.
- Figure 25 - Représentation de l'évolution au cours du temps (Temps T = 1 j à 1 000 j) de la propagation d'une onde de crue dans une nappe alluviale en s'éloignant de la levée vers la val pour 4 cas pour lesquels les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère considéré comme homogène varient.

Liste des tableaux

- Tableau 1 - Taux d'apparition des ruptures de digue entre le Bec d'Allier et Montjean.
- Tableau 2 - Localisation et type de brèches sur le site du Val d'Avaray.
- Tableau 3 - Relevés piézométriques de 1982 dans le Val d'Avaray.
- Tableau 4 - Position des sondages carottés sur les différents profils (CETE, 1993).
- Tableau 5 - Épaisseur moyenne des formations alluviales dans le Val d'Avaray.
- Tableau 6 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations rencontrées.
- Tableau 7 - Essais de perméabilité dans le corps de la digue du Val d'Avaray (CETE).
- Tableau 8 - Essais de perméabilité entre 7 et 10 m de profondeur au niveau des digues du Val d'Avaray (CETE).
- Tableau 9 - Résumé des caractéristiques de profils retenus pour la modélisation.
- Tableau 10 - Numérotation des sections des cours d'eau associés à chaque profil.
- Tableau 11 - Altitude de la Loire aux différents sites répertoriés.
- Tableau 12 - Niveaux maximaux atteints aux échelles de crues.
- Tableau 13 - Hauteur maximale de la Loire, au droit du Profil 1, pour des temps de retour compris entre 50 et 500 ans.
- Tableau 14 - Altitude moyenne journalière calculée de la ligne d'eau de la Loire au droit des Profils 1, 2 et 3 lors d'une crue cinq-centennale.
- Tableau 15 - Les zones de calcul des débits d'échange.
- Tableau 16 - Liste et objectifs des simulations réalisées.
- Tableau 17 - Amplitudes maximales de la nappe pour différentes valeurs de K et de S, pour 2 distances à la Loire.
- Tableau 18 - Perméabilités et coefficients d'emmagasinement affectés aux différents niveaux géologiques du Profil 1.
- Tableau 19 - Résultats des calculs de débordement pour des crues de période de retour différente.
- Tableau 20 - Perméabilités et coefficients d'emmagasinement affectés aux différents niveaux géologiques du Profil 2.
- Tableau 21 - Perméabilités et coefficients d'emmagasinement affectés aux différents niveaux géologiques du Profil 3.

Liste des tableaux (suite)

- Tableau 22 - Résultats du calcul du gradient critique pour 4 simulations hydrodynamiques et pour la ligne d'eau maximale dans la levée.
- Tableau 23 - Débits de pointe et volumes débités en 30 j sur les Profils 1, 2 et 3 pour les simulations de référence.
- Tableau 24 - Hiérarchisation de la vulnérabilité en considérant la configuration du système et sa perméabilité.
- Tableau 25 - Les facteurs principaux et les actions à mener en vue de déterminer l'impact d'une crue de la Loire.

Introduction

Les populations des vals de la Loire moyenne sont exposées aux inondations lors de fortes crues de la Loire. Dans le but de protéger ces populations contre ce risque naturel, le comité technique de l'Équipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature a lancé un programme pour étudier le rôle des crues sur les remontées de nappes et la déstabilisation, voire la rupture des endiguements de protection.

La Loire moyenne est située entre les bacs d'Allier (Nevers) et de Maine (Angers) ; elle se caractérise par une forte pente (3,5 fois plus importante que pour la Seine, soit 40 cm par 1 000 m) et un lit sableux. Les 450 km de la Loire moyenne sont aménagés à l'aide de quelques 500 km de digues. Ces levées ont pour objectif de retarder l'inondation des vals.

Trois crues exceptionnelles de la Loire constituent des crues de référence, ce sont celles de 1846, 1856 et 1866, tous les 10 ans de façon imprévue. Le 22 octobre 1846, en Haute Loire, le fleuve est monté de 4 mètres en trois heures. Un tiers de la ville de Nevers est submergé, puis c'est le tour des localités de la Loire Moyenne telles que Le Bec d'Allier, Cosne, Sancerre,... Cette crue provoque la destruction de plus de 100 km de digues, ainsi que la nouvelle ligne de chemin de fer Orléans-Tours. A peine 10 ans plus tard, le 2 juin 1856, une crue donne lieu à l'inondation de quelques 100'000 hectares, à la dévastation de plus de 3000 hectares de cultures, soit par ensablement, soit par érosion, entre le Bec d'Allier et Nantes. Les débits atteignent 7 500 m³/s au Bec d'Allier, à la confluence entre la Loire et d'Allier et de 6 000 m³/s à Tours. Le 24 septembre 1866, au terme d'un été humide, un orage d'une durée de 48 heures éclate et donne lieu à la troisième crue dévastatrice en vingt ans.

Dès le Moyen Âge, des petites digues discontinues appelées des « turcies » ont été mises en place afin de s'opposer aux érosions et à l'ensablement des vals ; elles ne s'opposaient pas à l'inondation des vals. A la fin du XV^{ème} siècle, le concept d'endiguement naquit. Les levées modernes deviennent des remblais homogènes limitant les divagations naturelles du fleuve.

A la suite d'inondations au 17^{ème} siècle, qui provoquèrent la destruction partielle des digues, le conseil de Louis XIII mit en place les premiers déversoirs. Du 17^{ème} siècle à 1925, les aménagements des digues n'ont cessé d'évoluer : reconstruction et renforcement. Au cours du 20^{ème} siècle, la menace des crues catastrophiques est largement oubliée. Ce n'est qu'avec l'implantation de centrales électriques ou nucléaires au fil de l'eau que la maîtrise des hautes et des basses eaux réapparaît. Entre 1963 et 1988, ce sont 17 réacteurs nucléaires qui ont été installés le long du fleuve, ainsi que des barrages de soutien d'étiage. C'est ainsi que depuis 1970, jugées complémentaires aux barrages, les digues ou levées font à nouveau l'objet de travaux d'entretien ou de renforcement.

De nombreuses études de diagnostics concernant la stabilité des levées ont été effectuées ces dernières années avec pour but de réduire les risques d'inondation au vue des enjeux économiques et humains. En Loire moyenne, une grande partie des activités économiques et des habitations se situe en zone inondable. La ville de Tours est notamment la plus exposée : 40 % des habitants et 36 % des entreprises de cette agglomération sont situés en zone inondable (Hydratec, 1999).

Un cahier des charges type pour les études hydrauliques et géotechniques a été élaboré en partenariat par l'ISL et le Cemagref en 1998. Il comprend dix étapes pour aboutir à une méthodologie de diagnostic des levées de la Loire moyenne. Ces études de diagnostic sont centrées sur les digues uniquement ; leur étude consiste après une partie descriptive de levé topographique à inspecter de manière visuelle l'état des digues, à procéder à des sondages de reconnaissance puis à des modélisations hydrauliques et géomécaniques. Les résultats de ces étapes permettent de hiérarchiser les risques de rupture et de le représenter sous forme d'une carte synthétique. Des études de confortement pour assurer la sécurité des levées sont alors proposées.

Ces études ne prennent pas en considération la caractérisation de l'aléa « rupture par remontée de nappe ». Pour quels types de scénarios -lit majeur, levée et aquifère- des crues de la Loire moyenne peuvent-elles engendrer des risques d'inondation par rupture de levées ou par remontée de nappe ? Est-il nécessaire de disposer de connaissances géologiques et hydrogéologiques détaillées à l'échelle du val pour établir un diagnostic de rupture de digues induites par des remontées de nappe telles sont les deux questions essentielles auxquelles répond cette étude.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif de l'équipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature est d'apporter des éléments techniques permettant de développer une stratégie de réduction des risques d'inondation par remontée de nappe. Dans ce cadre, l'équipe Pluridisciplinaire a sollicité le BRGM pour monter un projet commun de développement d'une méthodologie de caractérisation de l'aléa « rupture des levées par remontée de nappe », cofinancé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. Cette méthodologie doit permettre de définir dans quels cas, les crues peuvent être la cause de transfert de pressions suffisant au niveau du sous-sol pour :

- déstabiliser voire induire la rupture des levées de protection,
- causer des remontées de nappes importantes à l'extérieur des levées du côté des vals.

Ainsi l'importance du phénomène « remontée de nappe » contribuant à l'inondation du val sera évaluée dans le cadre de ce projet. De plus, le rôle des travaux de renforcement à l'aide de tapis filtrant (géotextiles) sera analysé afin de déterminer s'il s'avère être un moyen de protection efficace et donc s'il est nécessaire d'encourager les collectivités à engager les travaux utiles à l'installation de tels filtres. Les données minimales à acquérir du point de vue de la veille hydrogéologique sur le processus de remontée de nappe dans les vals - piézométrie (couverture spatiale, représentativité spatio-

temporelle), ainsi que sur la connaissance géologique seront prises en considération et évaluées en terme de rentabilité pour les communes exposées au risque s'il s'avère que l'aléa « rupture de levées et inondation par remontée de nappe » est important.

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE SUIVIE

La démarche proposée repose sur la caractérisation des transferts de pression à partir du lit endigué, en crue en direction de la nappe alluviale.

La méthodologie de caractérisation de l'aléa est la première étape d'une analyse de risque. Il s'agit de caractériser l'aléa « rupture de levées par remontée de nappe », aussi bien au niveau des levées qu'à l'extérieur de ces levées. La pression sous les levées ou la hauteur d'eau à l'extérieur des levées induites par les crues sera évaluée pour différents scénarios de crues (temps de retour différents et durée de crues) et d'hétérogénéité du sous-sol.

La caractérisation de l'aléa « rupture de levées par remontée de nappe » se base sur les actions suivantes :

- 1) rechercher les points communs des accidents connus dans le bassin de la Loire : inondations par remontée de nappe et rupture de levées ;
- 2) obtenir des ordres de grandeur des propriétés et des caractéristiques du système -lit-levée -zone non saturée et aquifère-, de leur variabilité, qu'il s'agisse des informations géométriques et géomorphologiques (levées et sous-sol), hydrauliques (Loire), mécanique des sols (levées) et hydrodynamiques (aquifère et zone non saturée) ;
- 3) proposer des méthodes de calcul qui permettent de déterminer les transferts de pression sous et à l'extérieur des levées, puis calculer les pressions induites au niveau de la surface du sol sur un profil perpendiculaire au lit de la Loire pour différents cas simples et scénarios ;
- 4) proposer des méthodes de calcul qui permettent de déterminer la limite de rupture des levées en fonction de leurs différentes morphologies et pour les différentes pressions en jeu selon les scénarios évoqués ;
- 5) déterminer dans quels cas la rupture des levées peut apparaître ;
- 6) rédiger un rapport méthodologique et de synthèse des résultats.

Les informations lithologiques et géophysiques acquises sur le site du val d'Avaray dans le cadre de projets de recherche du BRGM depuis 1996 ont servi comme jeu de données de référence pour toutes les tâches de l'étude qui ont trait à la partie hydrodynamique et géotechnique de l'étude (Projet PRR201 Morphogenèse).

1. Historique des accidents dans le bassin de la Loire moyenne par rupture de digues et remontées de nappe

L'historique des crues ayant donné lieu à des inondations des vals dues à des ruptures de levées ou à des remontées de nappe a été établi à partir d'un document de synthèse, mémoire de Stage de DEA, intitulé « Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire entre le Bec d'Allier et Montjean » de William HALBECQ, 1996.

Il est à noter que ce document réalisé dans le cadre du « Plan Loire » est le résultat d'un travail de recherche de toutes les informations susceptibles d'apporter des éléments sur la genèse des brèches qui se sont formées dans les levées de la Loire durant les crues majeures du siècle dernier, 1846 et 1856 et 1866.

Les levées de la Loire sont le résultat d'une succession d'ouvrages se juxtaposant ; elles ont très souvent fait l'objet de réparations diverses et rapides sans la rigueur et la systématique qui peuvent être trouvées dans un plan de consolidation. Ces levées sont constituées par des alternances de matériaux argileux et de matériaux sableux ; ces matériaux proviennent d'exploitation de granulats ou autres matériaux à proximité de la Loire. Les premières levées remontent à l'époque de Charlemagne ; à cette époque, elles avaient comme objectif d'être des ouvrages submersibles destinés à accroître les surfaces cultivables. Ce n'est qu'à partir du règne de Louis XI, que les levées auront pour vocation d'être non submersibles -, elles auront une hauteur de quelques mètres au-dessus de la ligne d'eau d'étiage de la Loire. Les premières levées de l'époque de Charlemagne nommées « turcies » étaient constituées d'une base de pieux de bois fichés dans le sol sur lesquels prenait place un talus de terre. Par la suite, lors de la construction de digues « insubmersibles », la base en bois tend à disparaître ; les digues sont alors constituées par des matériaux plus ou moins argileux en fonction des matériaux alluvionnaires avoisinants.

Suite à la formation de brèches, les levées vont être protégées côté Loire tout d'abord par des fichages de pieux puis par des empierrements (« perré »). Le côté val de la levée quant à lui est sans protection ; il est ainsi sujet à l'érosion par ruissellement, aux éboulements et à la fragilisation par la présence de terriers notamment de rongeurs.

Les digues sont généralement fondées sur les alluvions du lit majeur de la Loire : ces alluvions reposent sur des formations calcaires (calcaires ou marnes de la Beauce).

Des phénomènes de karstification peuvent se rencontrer à des degrés divers tout au long de la Loire Moyenne (Lino *et al.*, 1998). Dans le lit majeur de la Loire, les phénomènes karstiques se traduisent par la présence de « fontis » et constituent un facteur de risque spécifique pour les levées.

Ce chapitre a pour objectif d'identifier les ruptures de digues, d'en analyser la cause et de déterminer celles liées à des remontées de nappe qui auraient provoqué des ruptures de digues.

1.1. ANALYSE HISTORIQUE DES RUPTURES DE DIGUES

Trois cent trente sept brèches situées dans les levées de la Loire moyenne et provoquées au cours des trois grandes crues du siècle dernier (crues de 1846, 1856 et 1866) ont été recensées par Halbecq. D'après ces travaux, il ressort que la longueur moyenne des brèches est de 190 m.

La longueur des brèches a tendance à diminuer de l'amont vers l'aval de la Loire moyenne.

Les causes directes de rupture des levées ont été analysées sur l'ensemble des trois crues du siècle dernier. Le tableau suivant résume le taux d'apparition des différents types de ruptures des digues.

Cause de la brèche dans la digue	Taux d'apparition par rapport aux 337 brèches
Brèche d'invasion : surverse du fleuve vers le val	48 %
Brèche de retour : rupture due à l'écoulement des eaux du val inondé vers le fleuve	18 %
Rupture de la banquette 1)	15,5 %
Phénomène de renard dans le corps de la levée 2)	4,5 %
Érosions de talus et affouillements	4,5 %
Autres causes ou cause indéterminée	9,5 %

1) Soit par un « phénomène de renard » qui a pris place entre la base de la banquette « perrée » et le sommet de la levée, soit par la formation de fissures et la destruction d'une portion de banquette. La banquette est soit un muret en maçonnerie, soit une levée de terre étroite et à pente raide, rajoutée sur la partie sommitale de la levée, du côté du fleuve. La hauteur de cette banquette peut atteindre voire dépasser le mètre.

2) Le « renard » ou érosion interne est un phénomène qui se déroule à partir du moment où le gradient hydraulique critique est dépassé : le matériel est mis en bouillie, c'est-à-dire que les particules de sable sont entraînées dans le sens de l'écoulement.

Tableau 1 - Taux d'apparition des ruptures de digue entre le Bec d'Allier et Montjean

En considérant les crues chacune séparément, jusqu'à 58 % des brèches de 1846 se sont produites par surverse. Suite à la mise en place de banquettes après la crue de 1846, le pourcentage de rupture par surverse passe de 48 % à 37 % en 1866. Deux tiers des cas de surverse sont liés à l'existence d'un point bas dans le profil en long de la levée.

Concernant les phénomènes d'érosions et d'affouillements des levées de la Loire, ils se produisent en bordure du lit mineur. Le risque semblerait s'être accru depuis le siècle dernier, du fait de l'approfondissement du lit de la Loire et du vieillissement des protections des talus (perrés + fondation sur pieux).

Le risque d'existence du renard de manière générale s'accroît avec la durée de la crue et le vieillissement des levées (affectées de tassements différentiels, présence de terriers d'animaux, de racines d'arbres morts, de constructions dans les levées).

Le risque d'instabilité et de rupture de la levée apparaît pour des levées ayant une faible largeur en crête et de fortes pentes.

1.2. LOCALISATION DES BRÈCHES HISTORIQUES SUR LE SITE DE MUIDES

La zone avale de la RD112 entre Muides et Suèvres est une zone inondée pour les crues de temps de retour de 50 ans.

Les digues du secteur du val d'Avaray à l'amont de la RD112 ont été renforcées jusqu'au lieu-dit Thuy ; la partie des digues situées en rive droite dans la courbure à Avaray, en face de la centrale électrique de St-Laurent-des-Eaux a fait l'objet de renforcement par mise en place de parois moulées de bentonite afin de contrôler les écoulements internes de la levée et d'éviter la rupture par érosion interne.

Les différents types de brèche entre les PK 355 et 380 pour les trois grandes crues du siècle dernier (1846, 1856 et 1866) sont mentionnés dans le tableau 2.

➤ Brèches par surverse

N° feuille topo de 1846	N° réf. sur carte	Site	K (km)	Rive	Type de protection	Type de brèche	Taille de la brèche (m)	Distance levée au lit mineur (m)	Type de rétrécissement
40	15		358,5	Droite	5	CX	700	40	3
40	17		358,9	Droite	5	CX	340	0	3
41	1		360	Droite	2	D	100	0	3
41	7		361,7	Droite	5	D	130	240	2
41	12	La Chaumette	367,5	Droite	5	CX	105	340	1
41	13	Le Château	368	Droite	5	CV	200	280	1
41	14	Briolette	370	Droite	2	D	280	80	4
42	2	Les Tailles	372,3	Droite	5	CV	180	0	3
42	4	Le Domino	374	Droite	5	D	140	240	3

➤ Brèche de la banquette

N° feuille topo de 1846	N° réf. sur carte	Site	K (km)	Rive	Type de protection	Type de brèche	Taille de la brèche (m)	Distance levée au lit mineur (m)	Type de rétrécissement
42	2	Les Tailles	372,3	Droite	5	CV	105	0	3

➤ Brèche « sans raison apparente »

N° feuille topo de 1846	N° réf. sur carte	Site	K (km)	Rive	Type de protection	Type de brèche	Taille de la brèche (m)	Distance levée au lit mineur (m)	Type de rétrécissement
40	5		350,1	Droite	2	CV	100	0	3
41	10	Mer	363,8	Droite	2	CX	110	280	0

➤ Brèches répétées

N° feuille topo de 1846	N° réf. sur carte	Site	PK (km)	Rive	Type de protection	Type de brèche	Distance levée au lit mineur (m)	Type de rétrécissement
40		Baulle	349	Droite	2	CV	0	1
40	13	Le Château	368	Droite	5	CV	280	1
41	2	Les Tailles	372,3	Droite	5	CV	0	3
41	12	La Chaumette	367,5	Droite	5	CX	340	1
41			361,9	Droite	5	D	240	2
41	14	Briolette	370	Droite	2	D	80	4
41	4	Le Domino	374	Droite	5	D	240	3
42	3		358,5	Droite	5	CX	40	3
42	3	St-Laurent	359	Droite	2	D	40	3

Légende

Type de protection

- 1 : Quais
- 2 : Perré
- 3 : Enrochement
- 4 : Végétation
- 5 : Terre simple

Type de brèche

- D : forme droite, dans les portions rectilignes
- CV : forme concave
- CX : forme convexe
- Af : axe du flux

Type de rétrécissement :

- 1 : pas de variation sur les 400 mètres mesurés
- 2 : rétrécissement à l'amont de la brèche
- 3 : rétrécissement au niveau de la brèche
- 4 : rétrécissement à l'aval de la brèche
- 5 : élargissement sur les 400 mètres mesurés

Tableau 2 - Localisation et type de brèches sur le site du Val d'Avaray

1.3. INCIDENCE DE L'HYDROGÉOLOGIE SUR LA RUPTURE DES LEVÉES

A partir des documents consultés et des renseignements pris auprès des services de l'État tels que la DIREN Centre, la DDE, le SMN de Nantes et le CETMEF de Compiègne, il est à noter qu'aucune étude hydrogéologique de caractérisation de la remontée des nappes et de leur impact sur les digues n'a été réalisée à ce jour.

Il faut signaler que ce thème fait partie d'un travail de recherche -thèse de doctorat- du CETMEF à Compiègne : couplage de modèle hydraulique et de modèle d'écoulement souterrain intégrant la zone non saturée et saturée. Ce travail est en cours ; actuellement le couplage des codes de calcul a été réalisé. La phase d'application à un site va débiter ; le site retenu est également le Val d'Avaray, profitant de la richesse d'information du point de vue géologique. L'objectif est d'effectuer une modélisation 3D comprenant l'ensemble du val et de simuler les relations Loire-nappe alluviale pour différentes conditions hydrauliques.

Dans les travaux antérieurs de synthèse sur la répartition des brèches et l'analyse des causes et de leur occurrence, l'état des nappes des vals adjacents aux levées n'est jamais mentionné, faute de données disponibles.

Les données relatives aux propriétés géotechniques et hydrodynamiques des levées ont été traitées dans de nombreuses études locales de diagnostic de levée. Le facteur géotechnique n'a pas été retenu dans l'inventaire des causes de brèche à cause notamment de son hétérogénéité. Dans le cadre de ces études géotechniques, les simulations d'instabilité des levées sont limitées à la levée elle-même ; l'influence de la nappe n'est prise en considération que sur les premiers mètres côté val.

Seule une analyse de la répartition des brèches en fonction des conditions hydrauliques a été effectuée par Halbecq en 1996. De cette analyse, il ressort que l'importance des phénomènes d'infiltration dans les levées est fortement conditionnée par la période à laquelle survient la crue relative au cycle hydrologique de la Loire. Ainsi pour la crue de 1846, les phénomènes d'infiltration sont réduits, la crue arrivant après une période d'étiage important. Le risque majeur pour la formation de brèches est un risque de surverse ; les levées ne possédant pas de banquette sont les plus vulnérables. Alors que pour la crue de 1856, vu qu'elle survient après un mois de mai qui a connu trois crues précédemment, les digues sont en eau sur plus de la moitié de leur hauteur pendant un mois ; dans ces conditions, les phénomènes d'infiltration dans la digue et d'instabilité par mise en boulanges sont importants. Lorsque la crue survient après une période d'étiage, s'il n'y a pas à craindre des phénomènes d'infiltration important dans les levées, en fonction du débit de la crue, il ne faut cependant pas négliger les processus d'érosion de la digue (exemple crue de septembre 1866).

2. Acquisition des données numériques pour le site du Val d'Avaray

Le site du Val d'Avaray ou de Muides a été sélectionné comme zone de référence pour le développement méthodologique de la caractérisation de l'aléa « rupture de levées par remontée de nappe » en raison des connaissances acquises sur la géométrie du sous-sol au cours de plusieurs années d'investigation des profils géophysiques (méthodes électromagnétiques) et 225 forages ont permis de caractériser l'organisation tridimensionnelle des corps sédimentaires. Ces études s'inscrivent dans des projets antérieurs et en cours de recherche au BRGM [« Systèmes fluviaux », « Morphogenèse »].

2.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGRAPHIQUE DU VAL D'AVARAY

2.1.1. Description géographique et hydrographique du Val d'Avaray

Le secteur d'étude retenu est le Val d'Avaray (Loir-et-Cher), situé entre Orléans et Blois, en rive droite de la Loire moyenne (fig. 1). Ce val s'étend sur un domaine de 15 km de long et de 3 km de largeur maximale.

Il comprend les territoires communaux d'Avaray, de Courbouzon, de Mer, de Suèvres, de Muides-sur-Loire et de Nouan-sur-Loire.

Il est limité en amont par le double coude de la Loire, en aval de la centrale nucléaire de St-Laurent des Eaux. Cette inflexion du fleuve est à mettre en rapport avec la traversée de l'anticlinal de Marchenoir par la Loire. Le passage de la Loire le long du coteau au niveau de Cour sur Loire représente sa limite aval.

La plaine alluviale se situe à une altitude comprise entre 78 m NGF et 74 m NGF, d'amont en aval. Les coteaux nord et sud sont à la cote d'environ 90 m NGF.

Du point de vue hydrodynamique, le val est drainé par un réseau composé de petits affluents de la Tronne. La Tronne longe le coteau droit et se jette dans la Loire à Cour sur Loire. Son affluent, le ruisseau des Renardières, draine la partie amont du val dans sa partie centrale. Le ruisseau de Pisse Vache coule à partir d'Avaray et délimite dans sa partie aval l'Île de Nouan. La Petite Loire, bras de Loire que le fleuve utilise en période de hautes eaux, sépare l'Île de Muides du reste du lit majeur endigué.

Bien que le fleuve soit endigué sur la quasi totalité de sa longueur en Loire Moyenne, le val reste une zone inondable (la dernière crue de fréquence décennale date de Janvier 1982). L'habitat y est dispersé et les activités de la zone sont essentiellement agricoles. Des activités liées à l'exploitation des granulats sont existantes comme en témoigne la

présence de ballastières situées essentiellement entre la levée et le lit mineur ; certaines gravières sont situées côté val et laissent affleurer le niveau piézométrique de la nappe alluviale. D'anciennes exploitations ont été remblayées, alors que d'autres sont encore en exploitation notamment en amont de la route départementale 112.

Du point de vue des terrains agricoles, on notera trois zones principales :

- les zones situées entre la Loire et la digue, partiellement cultivées. Il s'agit des Îles de Saint-Dié, de Muides et de Nouan,
- les zones de culture entre la digue et le coteau à sédiments sablo-graveleux,
- les zones situées entre la digue et le coteau parcourues par des ruisseaux, qui constituent un milieu humide à sédiments sablo-argileux dominants.

La Loire Moyenne, localisation du Val d'Avaray.

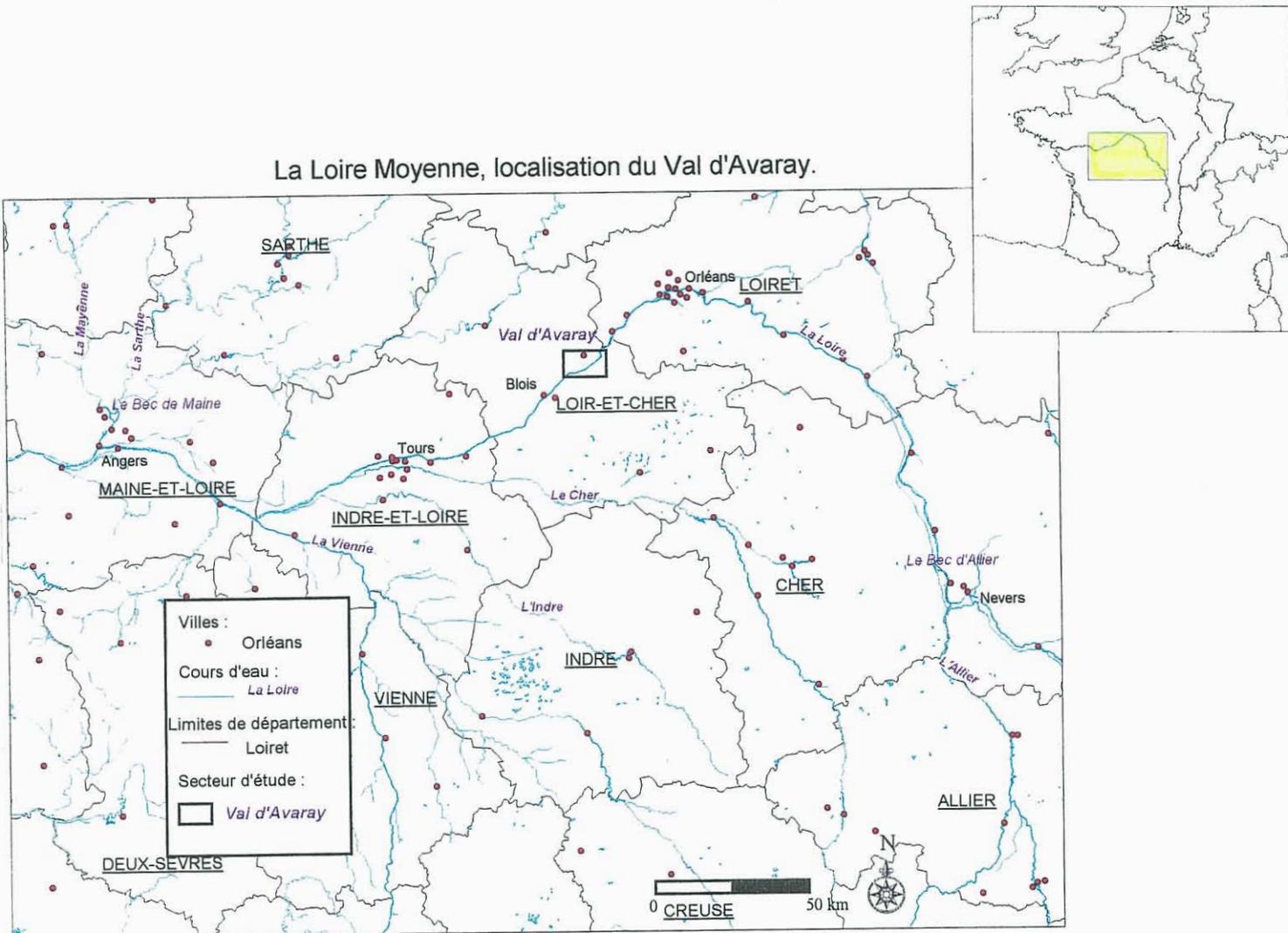


Fig. 1 - Loire Moyenne, localisation du Val d'Avaray

2.1.2. Contexte géologique

Au niveau de Muides, la Loire est encaissée dans les calcaires lacustres de Beauce (calcaire de Pithiviers Molasse du Gâtinais et Calcaires d'Étampes), formant notamment les coteaux. Le calcaire d'Étampe constituant ces derniers, affleure peu et est localement recouvert par les alluvions anciennes ou des dépôts de pente.

En Nord du Val, sur le plateau, les calcaires d'Étampes sont masqués par les sables et argiles de l'Orléanais, d'âge Burdigalien, et par des limons de plateau quaternaires.

Au Sud du Val, les formations de Beauce cèdent leur place aux sables et argiles burdigaliens de Sologne qui les recouvrent (fig. 2).

Dans le secteur du val d'Avaray, l'incision d'origine fluvio-glaciaire est profonde atteignant 24 m (différence entre la cote de la terrasse würmienne et la trace de l'incision). L'accumulation des sédiments alluvionnaires engendre un remblaiement atteignant la cote de + 76 m NGF ; l'épaisseur moyenne des alluvions est de 7 m, pouvant atteindre localement 10 m.

Cinq corps sédimentaires ont été identifiés dans le cadre du projet de recherche du BRGM ; dans un contexte de migration de méandres, chaque corps correspond à un déplacement brutal du cours d'eau principal. L'abandon d'un méandre par le cours d'eau est le résultat d'un ensablement du lit initial et d'une ouverture en amont d'une passe reconstituant un nouveau tracé. Le bras mort subsiste à l'emplacement de l'ancien lit et ne reçoit que les dépôts de crue et des sédiments fins argilo-tourbeux.

A partir des coupes transversales réalisées en intégrant les résultats des sondages et de la géophysique pour l'interpolation spatiale, trois couches principales peuvent être distinguées, à savoir :

- une formation limono-sableuse brune, comportant localement des lentilles argileuses, résultant sûrement de bras morts de la Loire ou de ses affluents,
- une formation de sables fins à moyens propre et dense,
- une formation de sable grossier graveleux, moyennement dense à niveaux lâches.

Géologie et localisation des profils. Val d'Avaray.

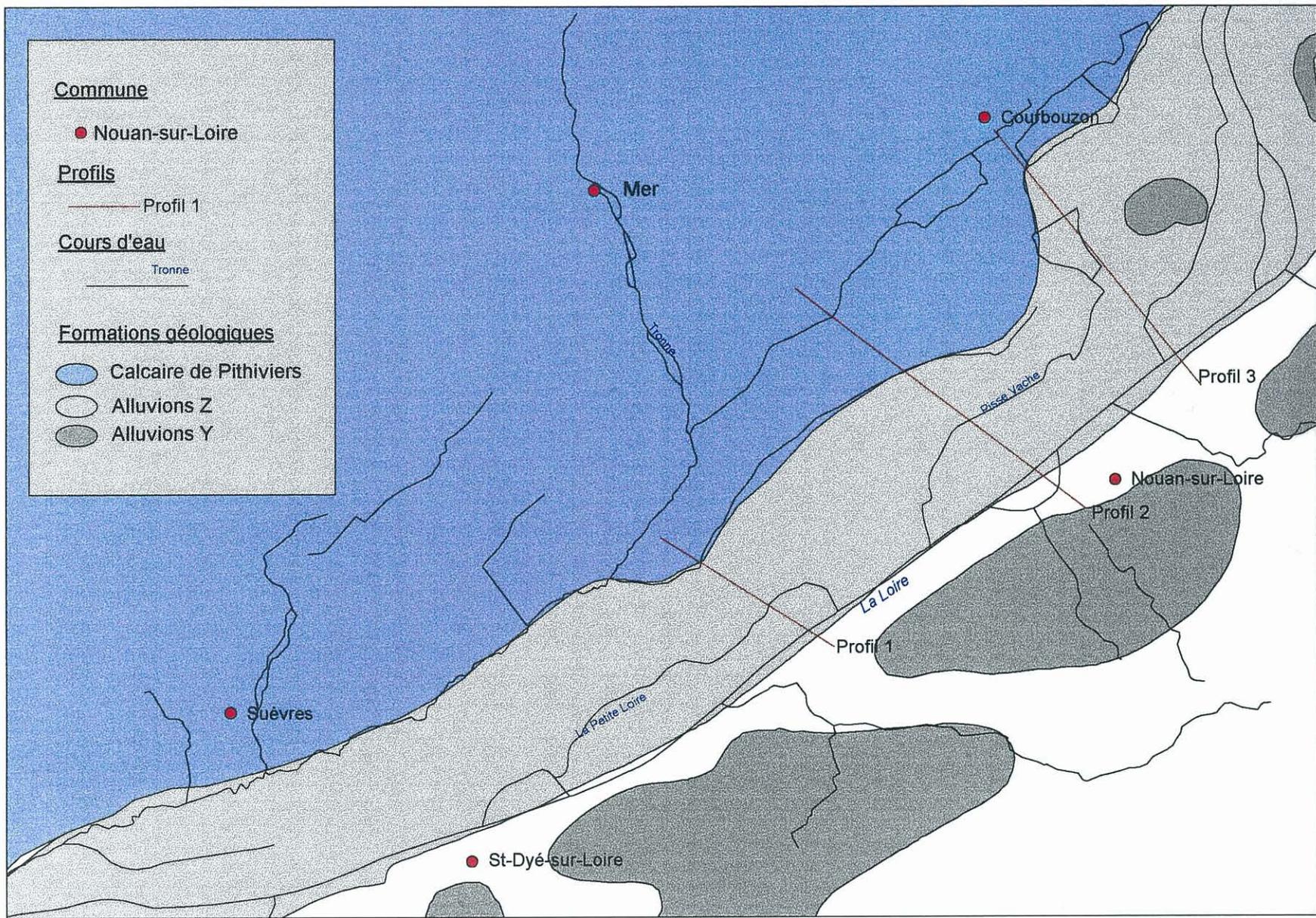


Fig. 2 - Carte géologique du Val d'Avaray

2.1.3. Contexte hydrogéologique

Deux formations aquifères sont à distinguer à l'échelle de ce site :

- 1) l'aquifère de la Beauce, formant à ce niveau une nappe dite de versant,
- 2) l'aquifère alluvial du val.

Le toit de la formation aquifère des calcaires de Beauce est situé sous le lit de la Loire entre les cotes 71 m NGF à l'amont et 66 m NGF à l'aval de la zone d'étude. Cet aquifère est une nappe de coteau drainée par la vallée de la Loire et dont les courbes hydroisohypses parallèles au coteau s'abaissent de 90 m à 75 m NGF au niveau du val (Rapports BRGM R 38572 et R 40379) pour un état de piézométrie moyenne.

La nappe des calcaires d'Étampes est drainée par le val d'Avaray, qui comprend une série de sources de débordement situées en bordure de coteau (fig. 3). Les directions d'écoulement au sein de cet aquifère sont donc NW-SE. En raison de la présence de niveaux marneux et de circulations karstiques, cette nappe est légèrement en charge par rapport à la nappe alluviale. En période de hautes eaux, la nappe des calcaires peut être alimentée par la nappe alluviale ; une inversion de gradient se produit.

L'existence de nombreuses sources de piedmont le long du coteau, aux environs de la cote + 80 m NGF est dues à un phénomène de « bourrage » de la nappe des calcaires de la Beauce au contact de la masse alluviale de perméabilité différente.

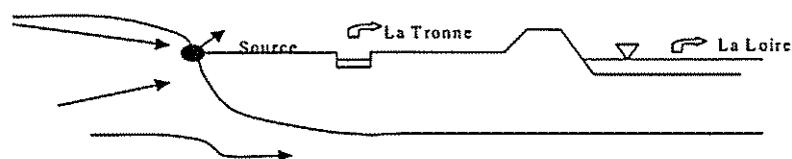


Fig. 3 - Alimentation de la nappe alluviale par les coteaux calcaires

Les matériaux alluviaux de la plaine du Val d'Avaray constituent l'aquifère : sables gris graveleux entrecoupés de lentilles d'argile, marquant d'anciens chenaux. L'épaisseur de ces matériaux alluvionnaires varie de 1,7 m (S22) à 7,9 m (S16) avec une répartition hétérogène.

Les calcaires sous-jacents alimentent la nappe, mais s'ils ont un caractère marneux, ils constituent le mur de cette nappe.

De plus, la nappe alluviale est en relation hydraulique avec la Loire, tantôt alimentée par la nappe des calcaires (en étiage) tantôt rechargée par la Loire en période de crues.

Les données recueillies pour l'élaboration de la carte piézométrique de la nappe alluviale sont issues du rapport 82SGN 878 CEN. Effectuée par le LPC de Blois, la campagne piézométrique, résumée dans le tableau 10, date de juillet 1982 pour les sondages S3 à S11, et de Septembre 1982 pour les sondages suivants. Les données sont peu nombreuses, mais permettent toutefois de comprendre les écoulements en période de basses-eaux. Il est difficile de juger du niveau de précision des données.

La carte piézométrique réalisée est limitée au nord-ouest par les formations calcaires de d'Étampes, et au sud-est par la Loire. Elle est représentée sur la figure 4. Ces données piézométriques sont les seules données qui peuvent servir de référence pour la modélisation hydrodynamique. Les conditions de la pluviométrie en été 1982 ne traduisent pas des conditions d'étiage prononcé ; de ce fait, la modélisation d'une crue dans de telles conditions est intéressante. Une situation extrême d'étiage aurait induit d'autres facteurs, tels qu'une modification des coefficients d'emménagement. De plus, les crues d'une certaine ampleur surviennent au printemps ou à l'automne, quand la nappe a déjà eu le temps de se recharger un peu si elle a été au plus bas pendant l'été.

Par contre à noter que l'on ne dispose pas d'historiques piézométriques qui pourraient nous renseigner sur les amplitudes de variation de la nappe, et l'influence des crues de la Loire sur celles-ci.

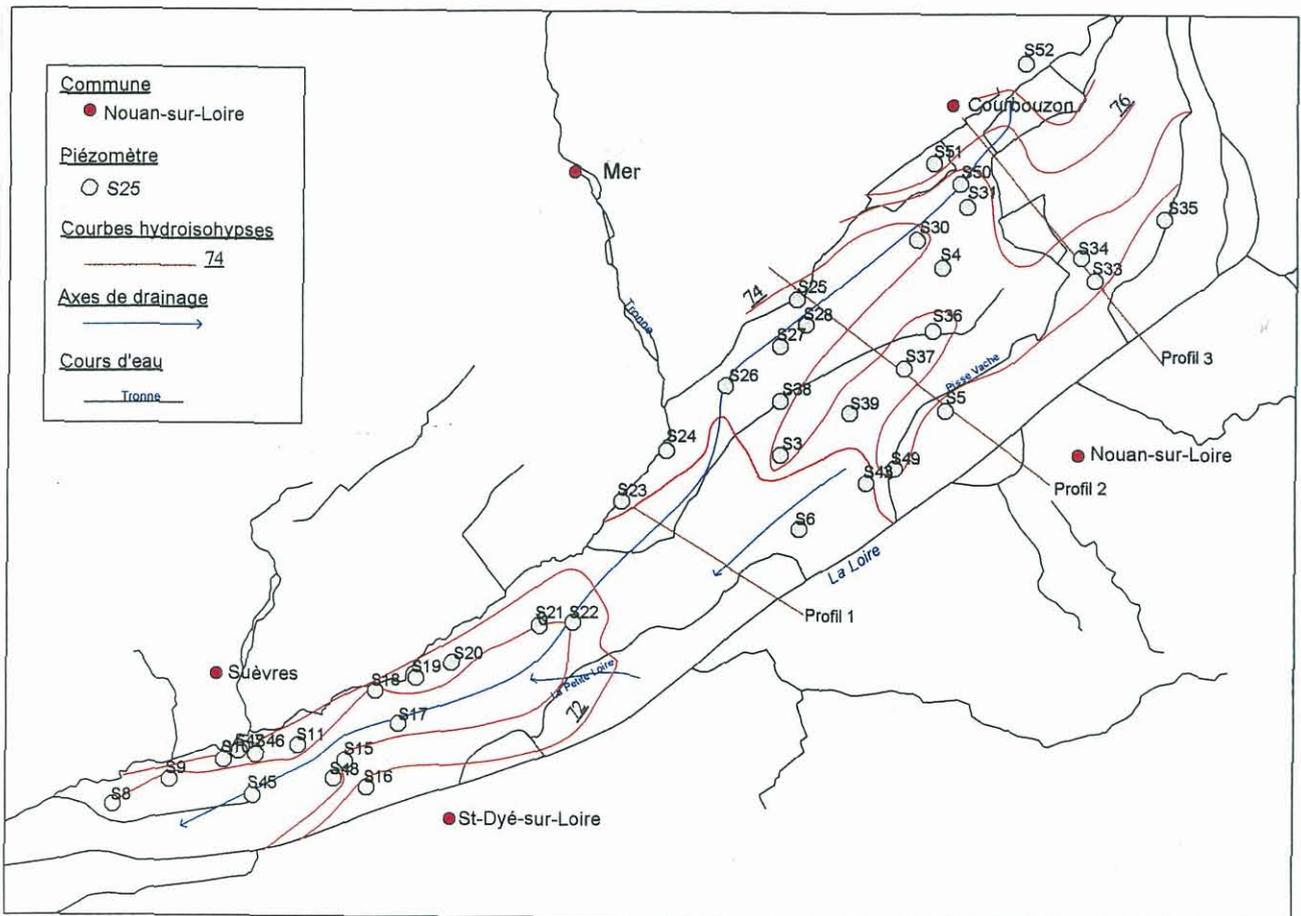


Fig. 4 - Carte piézométrique du Val d'Avaray. Étiage de 1982

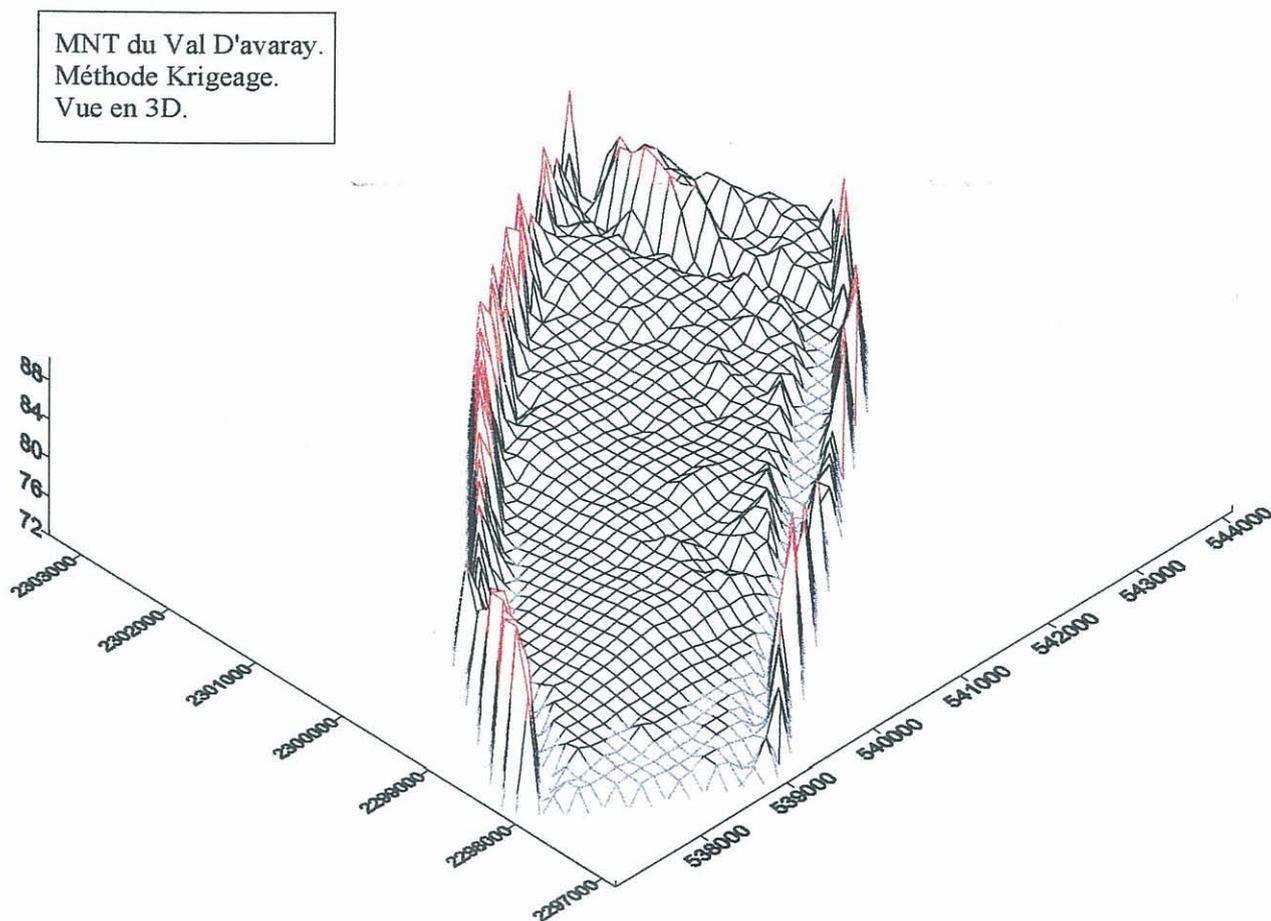
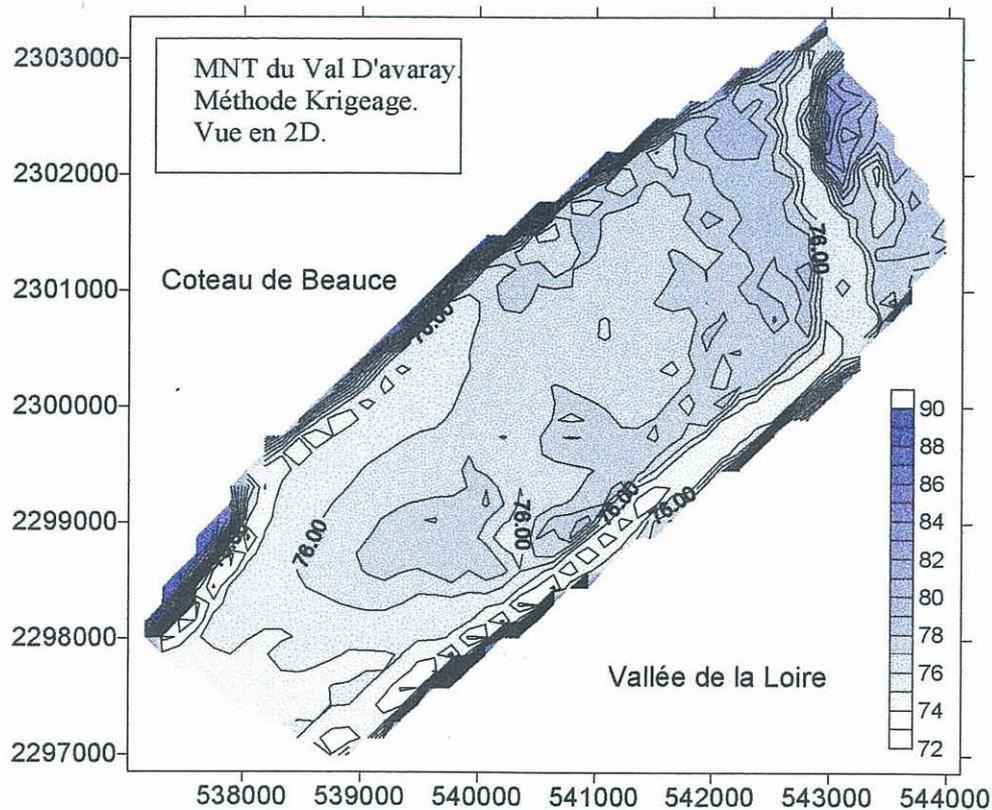


Fig. 5 - Modèle numérique de terrain. Surface piézométrique du Val d'Avara.

Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe

INDR	Indice BSS	Coord X Lambert II étendu	Coord Y Lambert II étendu	Z sol (m NGF)	Prof. nappe (m)	H (m NGF)
S1	04291X0098	533349.976	2294550.05	74	3	71
S2	04291X0095	532390.015	2294750	72.5	3	69.5
S3	04291X0129	539119.995	2298739.99	76.5	1.5	75
S4	03976X0183	540530.029	2300389.89	76.5	2	74.5
S5	04292X0082	540570.007	2299139.89	77	3.5	73.5
S6	04292X0083	539289.978	2298090.09	75	3	72
S7	04291X0106	533260.01	2295409.91	74		74
S8	04291X0104	533299.988	2295659.91	74	3	71
S9	04291X0103	533799.988	2295879.88	74	3.3	70.7
S10	04251X0101	534270.02	2296050.05	74.5	3	71.5
S11	04291X0107	534909.973	2296179.93	74	3	71
S12	04291X0097	533229.98	2294800.05	72.5	3.7	68.8
S13	04291X0100	533750	2294739.99	74.5	4.3	70.2
S14	04291X0096	532539.978	2294679.93	74	2	72
S15	04291X0108	535330.017	2296050.05	75	3.5	71.5
S16	04291X0109	535520.02	2295820.07	75	2.5	72.5
S17	04291X0111	535789.978	2296370.12	74.5	3.6	70.9
S18	04291X0110	535590.027	2296659.91	73.5	2.6	70.9
S19	04291X0112	535950.012	2296770.02	75	3.3	71.7
S20	04291X0123	536260.01	2296909.91	74	2.5	71.5
S21	04291X0114	537020.02	2297229.98	74	3	71
S22	04291X0116	537320.007	2297260.01	74.5	3	71.5
S23	04291X0130	537739.99	2298320.07	74.5	1.7	72.8
S24	04291X0131	538119.995	2298770.02	74.5	1.7	72.8
S25	04292X0076	539260.01	2300100.1	76	2.2	73.8
S26	04291X0125	538640.015	2299340.09	76	2.5	73.5
S27	04291X0127	539109.985	2299689.94	76	2.5	73.5
S28	04292X0077	539340.027	2299879.88	76	2.5	73.5
S29	03976X0180	539919.983	2300360.11	76		76
S30	03976X0181	540309.998	2300629.88	76	2.8	73.2
S31	03976X0182	540750	2300919.92	77	2.4	74.6
S32	04292X0089	541289.978	2300120.12	77		77
S33	04292X0087	541849.976	2300280.03	77	3.3	73.7
S34	03976X0186	541729.98	2300479.98	77.5	2.9	74.6
S35	03976X0189	542450.012	2300820.07	77.5	4.2	73.3
S36	04292X0088	540450.012	2299840.09	77	3.5	73.5
S37	04292X0081	540200.012	2299500	77	3.2	73.8
S38	04291X0128	539119.995	2299209.96	76	2.2	73.8
S39	04292X0078	539729.98	2299110.11	77	3.1	73.9
S40	04291X0126	538539.978	2298320.07	76		76
S41	04291X0117	538270.02	2297899.9	75		75
S42	04292X0080	539679.993	2298350.1	75		75
S43	04292X0084	539880.005	2298500	76	3.3	72.7
S44	04292X0085	539960.022	2298389.89	75.5		75.5

Tableau 3- Relevés piézométriques de 1982 dans le Val d'Avaray

Le gradient relevé sur la carte décroît de l'amont vers l'aval du val, de la cote 77 à 71 NGF. Le gradient hydraulique est de 0,7 ‰. Les courbes hydroisohypses sont parallèles au nord de la carte, et régulièrement espacées, ce qui traduit un gradient constant. En revanche, elles s'écartent vers le centre de la zone d'étude, la pente s'affaiblissant avant de redevenir plus forte au Sud.

Elle indique d'une part une alimentation par les coteaux (nappe de Beauce) et deux axes de drainage principaux correspondant aux ruisseaux de la Tronne et le ruisseau des Renardières, son affluent. Les axes de drainage sont parallèles au coteau droit. Le premier axe parallèle au coteau, part de Courbouzon vers l'Île de St-Dyé où il rejoint la Loire. Le deuxième semble se dessiner entre Mâne et Puteau. Ces axes pourraient correspondre à d'anciens lits délaissés du fleuve.

La carte piézométrique présente un bombement dans la partie médiane du val d'Avaray à la Raudière ; cet axe dénote d'une alimentation importante par le coteau entre Avaray et Courbouzon, il peut également correspondre à une zone de matériaux à dominance argileuse créant une mise en pression de la nappe. Pour ces conditions, la Loire est alimentée par la nappe dans la partie amont du val (en amont de la D112, rejoignant Barreau à Muides), alors qu'en aval de cette limite la nappe draine la Loire (uniquement au niveau de l'île de Muides). En amont de l'Île de St-Dyé, la nappe doit alimenter de nouveau la Loire.

Cette nappe située dans un milieu à porosité d'interstices est libre dans son ensemble. Mais il se peut que localement, en raison de la présence des chenaux argileux, elle présente des caractères de nappe captive ou semi-captive.

En ce qui concerne la piézométrie, on constate en période d'étiage une profondeur de la nappe par rapport au sol qui varie de 1 mètre près du coteau, à 4 m près du fleuve. Les variations du niveau de la Loire sont amorties quand on se rapproche du coteau. Suite aux mesures de février 1982, on observe pour une variation d'un mètre du niveau de la Loire, 90 cm de variation près du fleuve, et seulement 20 cm près du coteau calcaire.

En pied de digues du côté de la plaine alluviale, de nombreuses mares sont présentes ; la profondeur en eau peut dépasser 2,50 m en fonction de la morphologie du terrain. Quelques unes de ces mares sont des marigots à certaines périodes de l'année. D'autres sont à sec en été, alors qu'elles sont en eau en période de recharge. Elles reflètent le niveau de la nappe alluviale.

Lors de crues annuelles, les rivières telles que la Tronne ou la Petite Loire sont en eau notamment par remontée de la Loire dans leur lit ; l'eau peut remonter selon les dires des habitants, jusqu'au niveau d'Herbilly. Lors de ces remontées d'aval en amont, selon les crues, des débordements peuvent avoir lieu et de ce fait des inondations.

2.2. GÉOMÉTRIE DU VAL ET DU LIT DE LA LOIRE

2.2.1. La digue du Val d'Avaray

La digue du Val, d'une longueur de 13 km, se situe d'amont en aval sur les communes d'Avaray, Courbouzon et Suèvres.

Dans la partie amont, sur trois kilomètres, le lit mineur de la Loire décrit deux courbes. La digue se situe alternativement sur une rive concave, puis convexe.

Sur les 10 km en aval, le lit mineur de la Loire décrit une courbe peu prononcée. La distance entre la digue et le lit mineur varie entre 70 et 700 m, variation importante due au rattachement des trois îles, par suite d'alluvionnement récent.

Entre la limite aval et sur 3 km environ, la digue est restée en l'état depuis sa mise en place. Plus en amont, elle est ponctuellement consolidée par un tapis drainant qui permet de drainer l'eau dans la digue afin d'éviter sa déstabilisation lors de crue.

Afin d'établir la géométrie précise des levées au niveau des profils 1, 2 et 3, deux types de documents ont été réunis :

- les profils en long,
- les profils en travers de la digue.

Le profil en long présente l'altitude de la digue, rive droite. La figure 6 comporte deux courbes : la cote au sommet de la levée, et la cote au sommet de la banquette.

Les profils en travers utilisés sont issus du rapport SEEE (1994), ils sont fournis en annexe 1.

Le profil au point 120 + 40 m correspond à notre profil 1. Le profil 162 + 35 m se situe 120 m en aval du profil 2, les données d'altitude ont donc été conservées telles quelles, les coordonnées X et Y ont été recalées sur la coupe.

En revanche, nous avons peu d'information au niveau du profil 3. La forme de la digue du profil 2 a été conservée, mais les altitudes ont été rehaussées de 1 m, d'après le profil en long de la Loire.

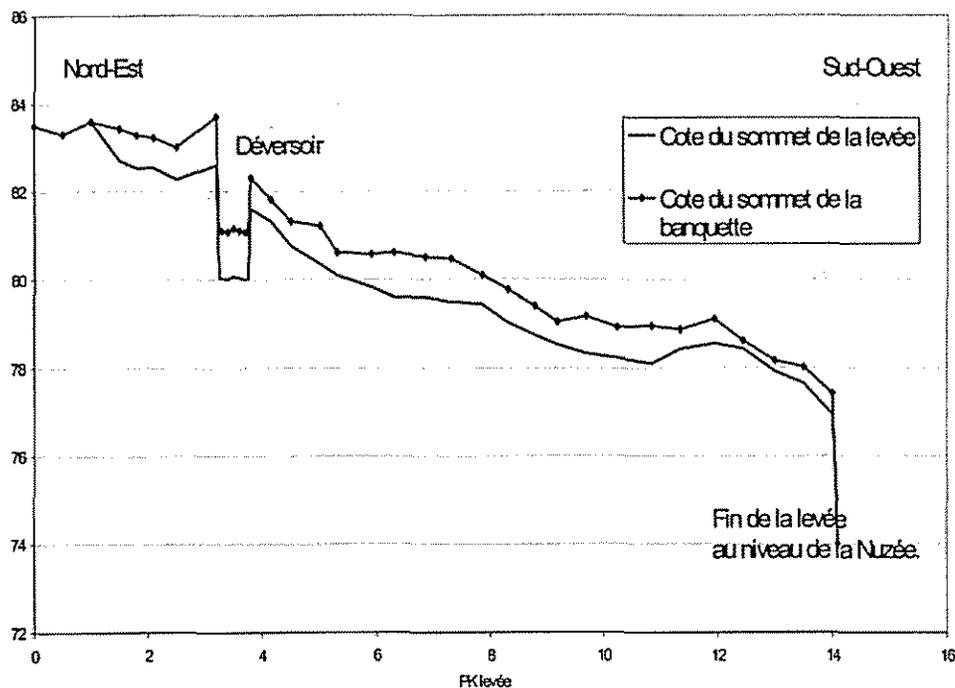


Fig. 6 - Profil en long de la digue, rive droite

2.2.2 Lithologie de la levée et des alluvions sous-jacents

Les données relatives à la lithologie des levées proviennent des données de sondages effectués dans le cadre d'une étude du CETE en 1993 concernant le renforcement des levées du Val d'Avaray. Cinq profils ont été implantés respectivement au P18 + 40 m, P120 + 40 m, P162 + 35 m, P242, P266 -10m. Chaque profil est accompagné d'un sondage carotté (SC1 à SC5) avec pose d'un piézomètre double, complété par trois sondages pénétrométriques (SPd1 à SPd12 et P1 à P3).

N° Profil	Hauteur digue	Épaisseur alluvions	Cote du toit des calcaires
P18 + 40 m	3,3 m	8,8 m	66,0 m NGF
P120 + 40 m	4,0 m	8,2 m	67,4 m NGF
P162 + 35 m	3,3 m	5,9 m	70,9 m NGF
P242	4,9 m	6,8 m	71,9 m NGF
P266 -10 m	5,0 m	7,0 m	72,0 m NGF

Tableau 4 - Position des sondages carottés sur les différents profils (CETE,1993)

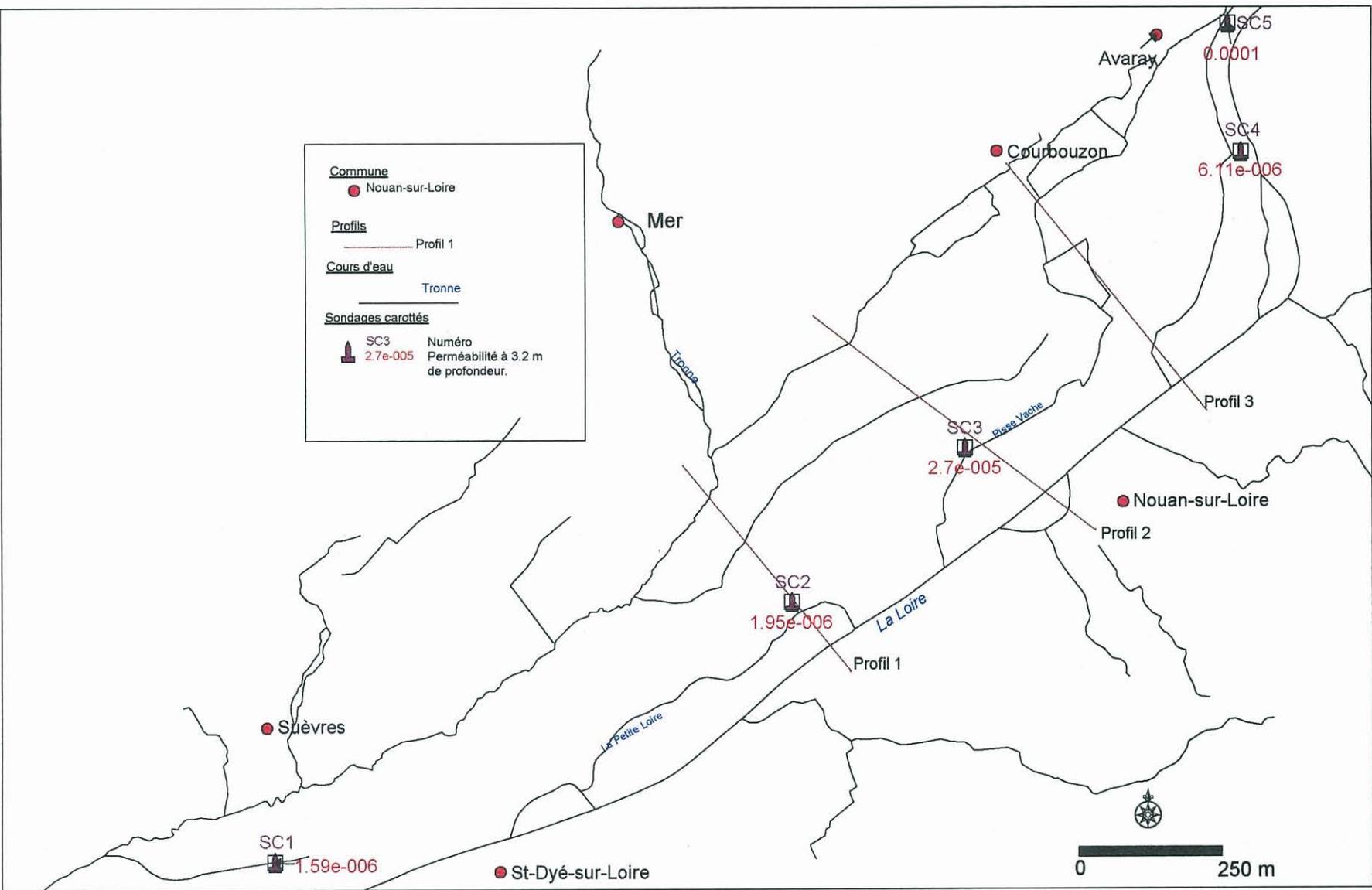


Fig. 7 - Localisation des sondages SC1 à SC5 et perméabilités à 3,2 m de profondeur

La levée de manière générale est composée de sables fins plus ou moins limoneux avec des inclusions de sable grossier ; il s'agit de matériaux issus de formations sous-jacentes remaniés par l'homme lors de la construction des endiguements.

Les alluvions sur lesquelles reposent les levées sont constituées de deux horizons principaux, des limons argilo-sablonneux surmontant des sables graveleux peu dense. Les épaisseurs de ces horizons au droit des sondages sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Formations sédimentaires	P18 + 40 m	P120 + 40 m	P162 + 35 m	P242	P266 -10 m
Limons argilo-sablonneux	1,2 m	1,4 m	1,3 m	2,2 m	2,0 m
Sable graveleux peu dense	4,4 m	4,5 m	2,5 m	1,8 m	2,7 m

Tableau 5 - Épaisseur moyenne des formations alluviales dans le Val d'Avaray

Quant à la formation de Beauce, substratum des alluvions, il a été reconnu sur des épaisseurs entre 3 et 6 m. Une première couche est constituée de calcaire tendre, plus ou moins marneux, poreux, imbibé d'eau mais de perméabilité très faible. Il agit comme une couche imperméable, rendant la nappe de Beauce captive localement. La couche suivante est composée de calcaire d'Étampes massif, où la perméabilité de pores reste faible par rapport à la perméabilité de fissuration.

Les profils géologiques des trois sections des digues retenues figurent à l'annexe 2.

2.2.3. Le lit de la Loire

Nous pouvons dès lors remarquer que le fond du lit de la Loire a une forme évasée et irrégulière. Dans ce profil, on voit apparaître aussi le lit de la Petite Loire, qui est un petit bras du Fleuve.

La montée des eaux se fera en deux temps, en fonction de la géométrie des terrains envahis :

- une montée relativement rapide, des eaux dans le lit mineur de la Loire, et dans le lit de la Petite Loire. Il est à noter que la Loire est le fleuve de France dont le lit est resté le plus naturel. L'absence d'aménagement lourd du lit (béton,...) empêche une montée des eaux brutales, comme nous pouvons en observer sur le Rhin par exemple ;
- une montée plus lente quand la Loire commence à envahir le Val contenu entre son cours et la digue.

2.3. PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DE LA LEVÉE

Des essais géotechniques de type essais granulométriques, mesures de teneur en eau, essais de cisaillement ont été réalisés dans le cadre de l'étude du CETE (1993) sur le renforcement des levées du Val d'Avaray (tableau 6).

Formations rencontrées	W (%)	$\rho_h(t/m^3)$	$\rho_d(t/m^3)$	D_{10}	% tamisat à 80 nm	C' (kPa)	ϕ' (°)
Corps de digue et alluvions sup.	15	1,8	1,6	0,05	56	10	30
Alluvions sablo-graveleuses	-	-	-	0,35	1,4	0	40
Marnes	32	1,8	1,4	0,01	70,5	15	35

Tableau 6 - Caractéristiques géotechniques moyennes des formations rencontrées

Des essais de perméabilité de type Lefranc ont été réalisés sur ces sondages dans le cadre de l'étude mentionnée ci-dessus : sur les 10 essais au total, 5 ont été effectués dans le corps de la digue et 5 dans les alluvions sous-jacentes.

Tous les essais de perméabilité concernant le corps de la digue ont été effectués à une profondeur de 3,2 m. Les données obtenues figurent dans le tableau 7.

Indice de sondage	Date	Perméabilité (m/s)	Lithologie
SC1	08/03/1994	1,59E-06	Sable fin moyennement limoneux
SC2	14/03/1994	1,95E-06	Sable fin à moyen moyennement limoneux
SC3	17/03/1994	2,70E-05	Sable limoneux
SC4	28/03/1994	6,11E-06	Sable fins consistants
SC5	22/03/1994	1,00E-04	Sable limono-argileux

Tableau 7 - Essais de perméabilité dans le corps de la digue du Val d'Avaray (CETE)

Concernant les formations de sables et graviers alluvionnaires situées entre 7 et 10 m de profondeur sous les levées, des essais de perméabilité type Nasberg (Kv) et Lefranc (KI) ont été réalisés.

Indice de sondage	Date	Kv (m/s)	Kl (m/s)	Profondeur	Lithologie
SC1	08/03/1994	7,00E-07		8,2	Sable grossier graveleux moyennement dense
SC2	14/03/1994	5,00E-05	5,30E-05	7,2	Sable moyen à grossier ± graveleux
SC3	17/03/1994	1,50E-04	1,50E-04	7,7	Sable grossier graveleux
SC4	28/03/1994	3,00E-06		9,3	Sable grossier graveleux moyennement dense
SC5	22/03/1994	6,00E-05	5,50E-05	9,3	Sable moyen à grossier ± graveleux

Tableau 8 - Essais de perméabilité entre 7 et 10 m de profondeur au niveau des digues du Val d'Avaray (CETE), dans les alluvions

Dans les alluvions, les formations rencontrées à ces profondeurs sont constituées essentiellement de sables grossiers graveleux. Les différences entre les valeurs pour les différents sondages sont dues aux différences de compactage. Les perméabilités évoluent entre $1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s (SC3) pour un sable grossier lâche et $7 \cdot 10^{-7}$ m/s quand la formation est dense (tableau 8).

Les valeurs moyennes extraites du rapport technique du CETE, pour les digues du Val d'Avaray sont de $2,7 \cdot 10^{-5}$ m/s pour le corps de la digue et de $6 \cdot 10^{-5}$ m/s pour les formations alluviales.

2.4. COUPES SÉLECTIONNÉES POUR LA MODÉLISATION

Trois coupes ont été retenues pour la modélisation. Elles sont représentées sur la figure 7 et notées : profil 1, profil 2 et profil 3. D'aval en amont, une première section située en aval du profil géotechnique de la levée en SC2 entre les Rompures et les Clos du Gué en passant par les Mardrappes, une deuxième située au niveau du profil SC3 de la levée passant par le val alliant Maison Rouge et le Barreau et une troisième en aval du déversoir d'Avaray passant par les Bordes et Rébert à Herbilly.

La section 1 a été retenue pour les raisons suivantes : elle est située dans le secteur où il y aurait une alimentation de la nappe par la Loire. La digue à ce niveau n'a pas fait d'objet de renforcement.

La section 2 comprend une levée renforcée réalisée et de plus, recoupe au niveau de l'île de Nouan, une gravière en exploitation.

La section 3 comprend une levée non renforcée et recoupe la plus grande largeur du val d'Avaray ; ce tronçon du val se distingue des autres par une alimentation en amont par les eaux de la nappe des calcaires de Beauce. De plus le val est constitué par deux corps alluviaux principaux.

Les profils ont été choisis pour la présence de forages carottés et de données géotechniques (Rapport technique du CETE Normandie Centre (Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Blois, 1993)).

Profil N°SC	Données géotechniques/ géométrie de la levée	Type de levée	Position du cours d'eau	Distance digue Loire	Présence de sablières	Hydrogéologie et drainage de surface	Géologie du val – corps sédimentaires
1	Utilisation de SC3 et géométrie de la digue la plus proche	Non renforcée	Légèrement oblique	< 500 m	Non	Ruisseau des Renardières Ruisseau de la Tronne La nappe draine la Loire	Deux corps principaux avec des paléochenaux
2	SC3	Renforcée	Parallèle	> 500 m	Oui en exploitation	Ruisseau des Renardières La Loire draine la nappe en basses eaux	Trois corps principaux avec un paléochenal dans un des trois corps
3	SC2	Non renforcée	Parallèle	< 200 m	Non	La Loire draine la nappe en basses eaux	Deux corps sédimentaires avec un paléochenal dans un des corps derrière la levée

Tableau 9 - Résumé des caractéristiques des profils retenus pour la modélisation

2.5. DONNÉES HDYRAULIQUES DE LA LOIRE

2.5.1. Hydrogrammes de crues estimées au niveau des profils

Des données hydrauliques sont disponibles pour des portions de La Loire et de ses affluents, auprès de l'Équipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature. Chaque cours d'eau est découpé en tronçons ou biefs qui sont numérotés et eux-mêmes à leur tour subdivisés en portions PK (tableau 10).

Profil N°	Bief de la Loire	Portion PK Loire	Bief de la Tronne	Portion PK Tronne
Profil 1	23	222.27	92	105
Profil 2	23	220	92	103
Profil 3	23	218.42	92	100.7

Tableau 10 - Numérotation des sections des cours d'eau associés à chaque profil

Les débits et hauteurs d'eau ont été calculés aux différents PK pour des débits de 4 200, 5 000, 6 000, 6 500, 7 000 et 8 500 m³/s au Bec d'Allier, à l'aide du modèle hydraulique d'Hydratec 1997. Ces débits correspondent respectivement aux crues ayant une période de retour de 50, 70, 100, 170, 200 et 500 ans.

2.5.2. Hauteurs d'eau actuelles observées

Fourni par la DIREN Centre, Service de Bassin, le fichier des hauteurs d'eau de la Loire indique pour 90 stations en Loire Moyenne l'altitude de la Loire pour trois dates :

- 1) Le module pour les données du 16 décembre 1998 ;
- 2) L'étiage avec les données du 12 août 1998 ;
- 3) La crue représentative retenue du 23 mai 1996.

Nom du site	Coord X	Coord Y	Événement	Alt. m NGF
SAINT-LAURENT-NOUAN			Module	77,01
Centrale 40 m à l'amont du seuil face à l'échelle	543637	2303205	Étiage	76,44
			Crue	77,61
SAINT-LAURENT-NOUAN			Module	75,37
Environ 200 m à l'aval du seuil en face échelle la plus à l'aval	543499	2303219	Étiage	74,50
			Crue	76,67
SAINT-LAURENT-NOUAN	543075	2300300	Module	74,30
			Étiage	73,32
SAINT-LAURENT-NOUAN camping	541456	2298975	Module	73,42
			Étiage	72,58
COURBOUZON sous le pont de « Muides »	539144	2297668	Module	72,55
			Étiage	71,52
SAINT-DYE-SUR-LOIRE	536154	2295609	Module	71,18
			Étiage	70,29
			Crue	72,25
AVARAY	542705	2302954	Étiage	73,93

Tableau 11 - Altitude de la Loire aux différents sites répertoriés

2.5.3. Fonctionnement du Val d'Avaray en crue.

a) Crues historiques de référence (1846, 1856, 1866 et 1907)

Ces crues, décrites dans les chapitres précédents, ont bien évidemment touché le Val d'Avaray, qui a été entièrement inondé.

Année	Débit au Bec d'Allier	Débit Max. à Orléans	Hauteur à Avaray	Hauteur au Cavereau	Hauteur à Muides	Hauteur à Blois
			Z0 = 76,03	Z0 = 5,18	Z0 = 73,41	Z0 = 65,94
1846					5,90	6,60
1856	7600	6250	6,58	7,12	6,01	6,78
1866	7600	6250	6,56	6,82	6,00	6,70
1907	4150	4000	5,51	5,43	5,19	5,03

Tableau 12 - Niveaux maximaux atteints aux échelles de crues

Les altitudes de la Loire des crues 1856, 1866 et 1907 ont été répertoriées pour plusieurs points d'observation, dont Les Muides et le Cavereau.

En observant la courbe à Avaray, et celle au Cavereau, on peut déterminer la vitesse de montée des eaux. Ces sites sont distants de 4,5 km, et le décalage de la montée des eaux est de 3 heures pour le premier pic du 28/09/1866.

b) Influence du déversoir

Le rôle d'un déversoir, point bas dans la digue, est de canaliser l'eau lors de crue pour permettre son évacuation dans une portion précise du val. Cela permet de connaître les zones inondables en priorité, et de réduire les risques d'endommagement sur la digue.

La levée est munie d'un déversoir à Avaray, d'une longueur de 550 m dont le seuil de fonctionnement se situe à environ 5 300 m³/s (Atlas des Zones Inondables la Vallée de la Loire, DRE Centre, 1994). Il comporte coté val un perré, qui évite l'infiltration et l'érosion dues à la crue et susceptibles de le détruire.

Ce déversoir est muni d'un fusible, élévation du seuil du déversoir qui, lors de son effacement rapide sous la force de l'eau qui le surverse, déclenche le fonctionnement de l'ouvrage. En général, il y a aussitôt prélèvement d'un grand débit en Loire.

Il faut préciser que depuis leur construction (entre 1870 et 1891 pour la plupart), aucun déversoir n'a fonctionné, même en 1907.

Mais deux problèmes subsistent quant à son fonctionnement, qui n'a jamais été testé.

- Lors de sa construction, le fusible était prévu pour rompre lors d'une crue supérieure à la crue centennale. Mais en raison de l'enfoncement du lit du fleuve, il faut attendre la crue cinq-centennale pour qu'il soit fonctionnel. Pendant ce temps, les levées situées en aval, sur des sites où le lit est moins enfoncé, souffriront davantage.
- Des études menées par l'Équipe Pluridisciplinaire ont montré que lors des premières crues faisant fonctionner le déversoir, l'ouverture quasi instantanée du fusible inonderait plus le val qu'elle n'écarterait la crue en Loire. L'amélioration proposée serait de déclencher volontairement le fonctionnement du fusible de manière anticipée.

c) Les remous dans la Tronne

Les remontées dans les affluents de la Loire, depuis la confluence, sont un facteur supplémentaire de risque d'inondation.

La remontée des eaux dans la Tronne lors des crues n'est conséquente qu'à partir de la crue cinq-centennale.

En effet, ceci est observable à partir des graphiques représentant les côtes de la Tronne pendant une crue (obtenus à partir du CD-ROM de la DIREN Centre). Le remous est présent au profil 1 dès la crue centennale, mais pour qu'il atteigne les profils 2 et 3, une cinq-centennale est nécessaire.

d) Carte d'inondabilité du val

La carte présentée à la figure 8 a été élaborée pour l'Équipe Pluridisciplinaire grâce au modèle Hydratec 1997.

Elle est le résultat de tests de propagation des crues de 4 500 m³/s à 8 500 m³/s au Bec d'Allier.

Les inondations reportées proviennent :

- de la propagation de remous dans les affluents
- du fonctionnement des déversoirs
- de surverse avec ouverture de brèches dans les levées.

Elle ne simule pas les inondations et les écrêtements provoqués par la rupture accidentelle de la levée en l'absence de surverse, ni la remontée de la nappe dans le val.

Diagnostic du fonctionnement de la Loire en crue. Modèle hydratec 1997.

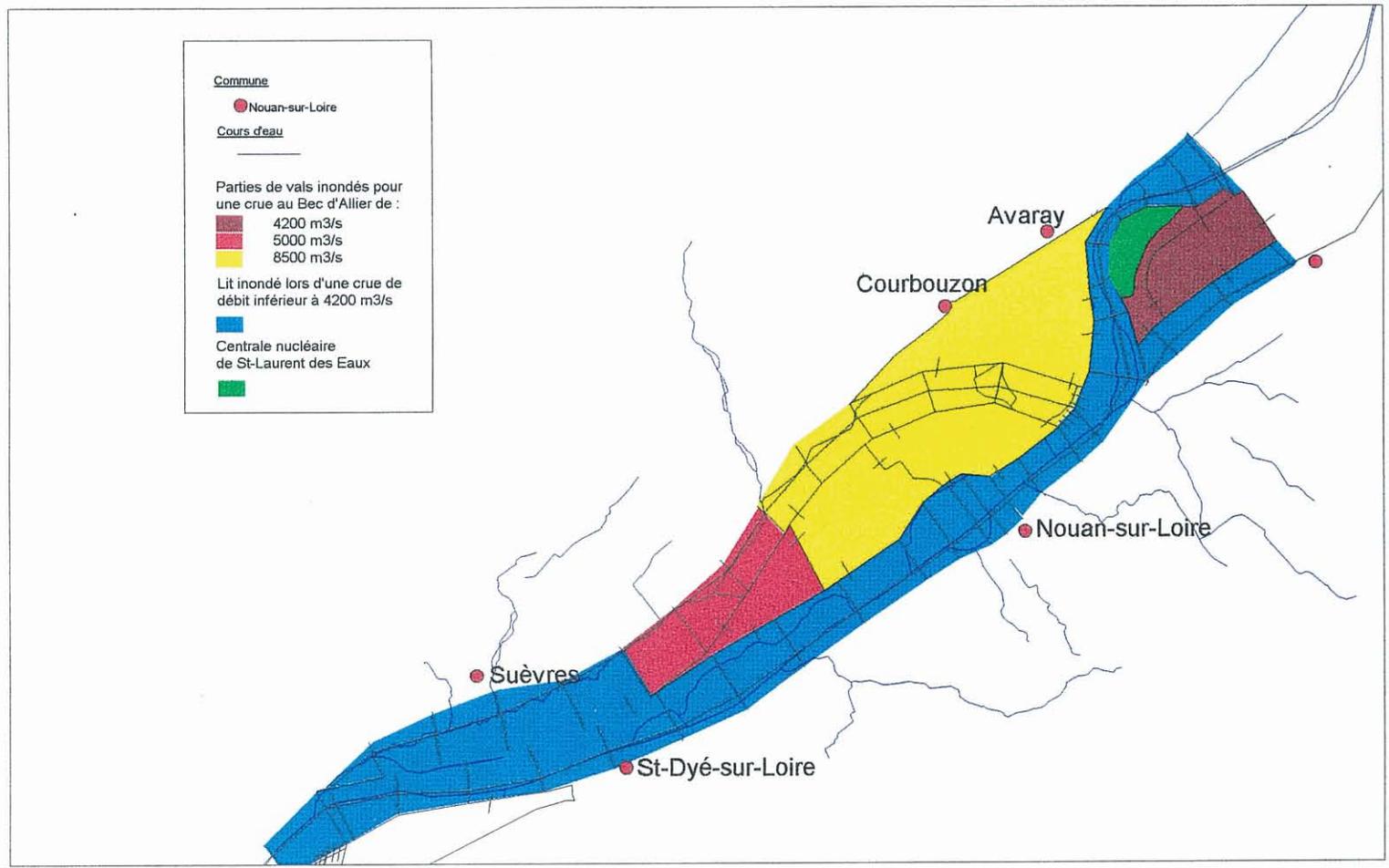


Figure 8 - Carte d'inondabilité du Val d'Avaray, modèle Hydratec 1997

3. Méthodes de calcul pour déterminer les transferts de pression sous et à l'extérieur des digues – étude hydrodynamique

3.1. LES CONDITIONS HYDRAULIQUES DES ÉCOULEMENTS DE LA NAPPE DU VAL D'AVARAY, ET LES HYPOTHÈSES RETENUES POUR LA SIMULATION D'UNE CRUE DE LA LOIRE

Les écoulements dans le val d'Avaray sont connus en particulier grâce à la carte piézométrique des basses eaux de 1982. Cette carte a été tracée à partir de 40 piézomètres mesurés entre les mois de juillet et de septembre. On a représenté sur la figure 1, la localisation des points de mesure, les courbes piézométriques et les axes de drainages déduits de ces mesures. Cette carte est limitée au nord-ouest par les formations calcaires de Beauce, et au sud-est par la Loire.

Les niveaux de la nappe sont sensiblement identiques à ceux de la Loire. Entre Saint-Laurent-Nouan (le camping) et Saint Dyé-sur-Loire, l'altitude de la ligne d'eau de la Loire est comprise entre 74,30 et 71,18 m NGF en module, alors que pour le secteur correspondant l'altitude de la nappe est comprise entre 74 et 72 m NGF. On peut en déduire, qu'en dehors des périodes de forte crue de la Loire, les débits d'échange entre le Val et la Loire restent faibles.

La nappe alluviale est drainée par les cours d'eau de la Tronne et de Pisse Vache qui se jettent dans la Loire. Il en résulte une direction des écoulements souterrains dans le Val parallèle à la Loire.

L'alimentation en eau du val d'Avaray provient des flux provenant des coteaux des calcaires de Beauce et de la recharge des pluies efficaces d'hiver.

En période de forte crue de la Loire, la montée des niveaux du fleuve crée un remous qui remonte dans le val d'Avaray en suivant le cours de la Tronne, et envahit progressivement une partie de la plaine. Lors d'une crue cinq centennale, le niveau de la Loire peut atteindre la cote 79,16 m NGF au droit du pont de Muides. La dénivelée entre les niveaux de la Loire et ceux de la nappe atteint alors 6 m. Dans cette situation, les flux d'échange entre le fleuve et la nappe peuvent être importants.

Pour simuler, à l'aide d'un modèle mathématique, les écoulements souterrains entre la Loire et le val d'Avaray lors d'une crue du fleuve, il est nécessaire de faire les hypothèses suivantes :

- les écoulements superficiels, qui sont dus au remous ou au fonctionnement du déversoir situé en amont, seront ignorés. On limitera l'étude des effets d'une crue à la seule composante souterraine des écoulements. Sur le plan hydraulique, il est possible, en première approximation, de faire l'hypothèse que le résultat global d'une

crue correspond à la superposition des deux effets (écoulements superficiels et écoulements souterrains) considérés de façon indépendante,

- en période de crue importante, le drainage de la nappe est arrêté à cause d'une part de la fermeture des clapets sur les cours d'eau en communication avec la Loire, d'autre part par le remous qui remonte la Tronne et qui interdit de ce fait l'évacuation des eaux du val en direction de la Loire,

Ainsi, lors d'une crue importante de la Loire, les écoulements dans le val, qui sont ordinairement parallèles au fleuve, sont interrompus. Il est possible alors de calculer les échanges entre la Loire et la nappe à l'aide d'un modèle coupe, placé perpendiculairement au lit du fleuve.

3.2. LES CARACTÉRISTIQUES ET LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODÈLE COUPE

La piézométrie de la nappe et les débits d'échange entre la Loire et le Val sont calculés à l'aide du logiciel MARTHE (BRGM - version 5.7 de novembre 1998) sur un modèle coupe à mailles variables en régime transitoire. L'étude des écoulements a porté sur trois profils placés perpendiculairement à la digue. Un maillage particulier a été réalisé pour chacun de ces profils.

Dans ces simulations, les écoulements dans la zone non saturée n'ont pas été pris en compte.

3.2.1. Le modèle coupe

Le modèle coupe est placé perpendiculairement à la digue. Le maillage est un maillage irrégulier, avec des mailles de 1 m de large au droit de la digue et de 50 ou 10 m de large dans le val. La hauteur des mailles est constante, elle est égale à 0,50 m. Ce découpage permet d'avoir une bonne précision des calculs à proximité des digues, là où les gradients hydrauliques et les variations piézométriques sont les plus importantes lors des crues de la Loire.

La largeur de la coupe est fixée à 1 m. Ainsi les résultats présentés concernent une largeur d'un mètre linéaire de digue.

Le nombre et les dimensions des mailles sont précisés au début de chaque paragraphe décrivant les simulations.

Chacune des mailles du modèle est définie par une perméabilité K et un coefficient d'emmagasinement S .

Lorsque le niveau de la nappe atteint la cote topographique, le modèle calcule alors un débit de débordement. Le cours d'eau de la Tronne est représenté par des mailles dont l'altitude est plus basse.

3.2.2. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites du modèle sont des conditions de potentiel imposé aux extrémités de la coupe :

- limites côté Beauce : on impose une piézométrie égale à la piézométrie des basses eaux de 1982 + 1 m pour tenir compte d'une situation plus humide que celle des basses eaux de 1982. Les débits d'alimentation sur ces limites proviennent des écoulements de la nappe de Beauce située en amont du Val d'Avaray ;
- limites côté Loire : on impose une piézométrie égale au niveau de la Loire. Les débits sur ces limites correspondent aux flux échangés entre la Loire et la plaine alluviale.

3.2.3. Le régime permanent des écoulements

Dans les simulations, chaque épisode de crue est précédé d'une situation hydraulique calculée en régime permanent. Cette situation en régime permanent correspond à une piézométrie calculée avec un potentiel imposé côté Loire égale au module du fleuve, côté coteau Beauce à une piézométrie supérieure de 1 m à la situation observée en basses eaux de 1982 et à une recharge par les pluies efficaces de 10 mm/mois. Cette configuration donne une piézométrie avec un dôme piézométrique au centre du Val et des écoulements divergent en direction de la Loire et de la Tronne qui sont les exutoires de la nappe. Le schéma hydrogéologique des coupes est représenté sur la figure 9.

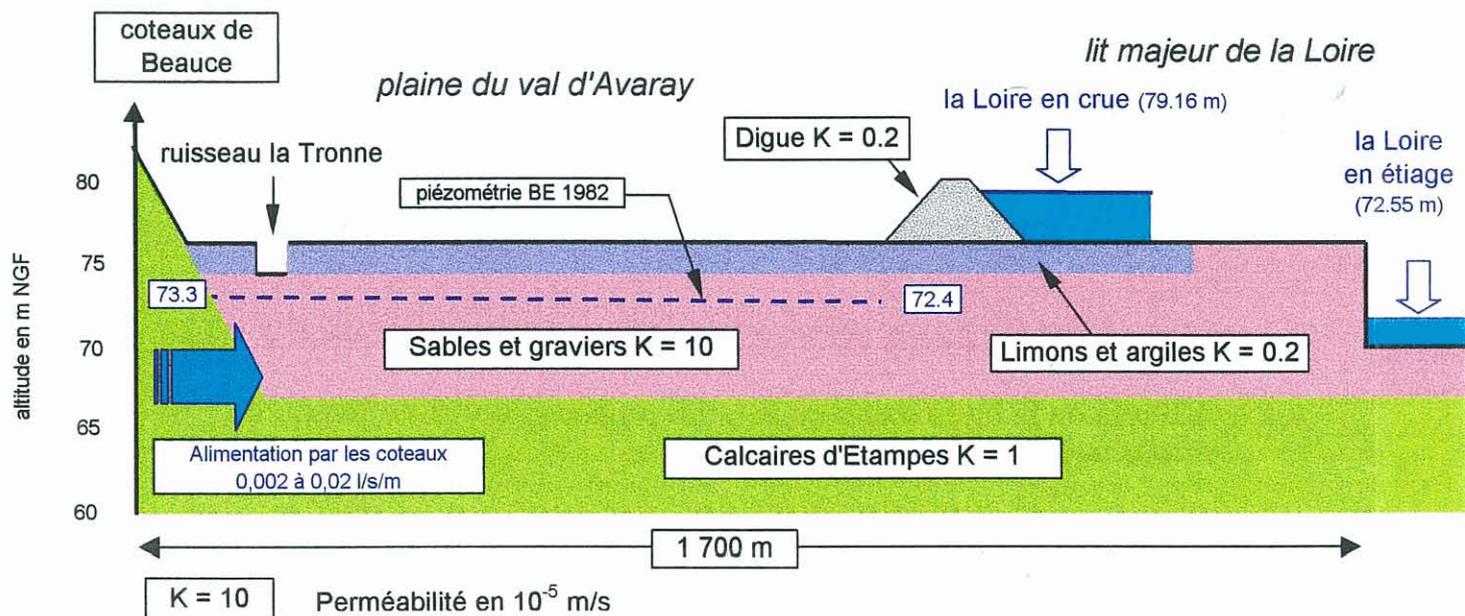


Fig. 9 - Coupe hydrogéologique schématisée du val d'Avaray (cas du Profil 1)

3.3. LOCALISATION DES PROFILS ÉTUDIÉS DANS LE VAL D'AVARAY

Le choix de la localisation des coupes a été fait en fonction de la connaissance géologique du val d'Avaray et des données relatives aux caractéristiques hydrodynamiques et géotechniques au niveau des digues. Ces profils sont indiqués sur la figure 10.

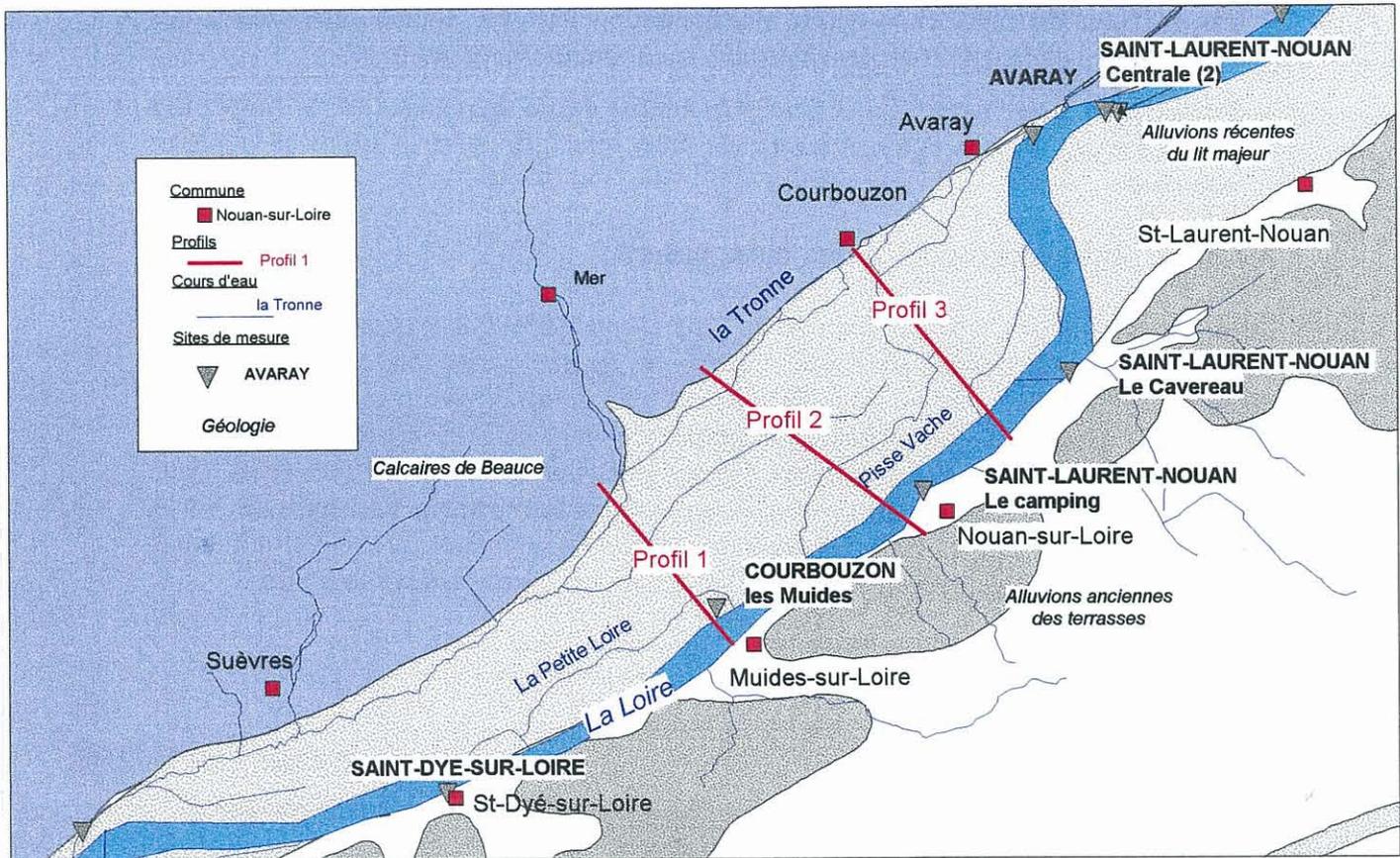


Fig. 10 - Localisation des profils étudiés dans le val d'Avaray et des stations de mesure des niveaux de la Loire

3.4. LA LIGNE D'EAU DE LA LOIRE ET LA CRUE CINQ CENTENNALE

3.4.1. Altitude de la ligne d'eau de la Loire pour des crues de temps de retour compris entre 50 et 500 ans

Les crues de la Loire ont été simulées par l'Équipe Pluridisciplinaire à l'aide du modèle hydraulique Hydratec 1997. On connaît ainsi les débits du fleuve pour des crues de période de retour 50, 70, 100, 170, 200 et 500 ans. Ceux-ci correspondent respectivement à des débits de 4'200, 5'000, 6'000, 6'500, 7'000 et 8'500m³/s au Bec d'Allier qui sert de référence pour la définition des crues de grandes périodes de retour. On a présenté sur la figure 11, l'altitude de la ligne d'eau de la Loire pour ces différentes périodes de retour au droit du Profil 1 de cette étude.

Période de retour (ans)	Hauteur maximale de la Loire au droit du Profil 1 (m NGF)
500	79,24
200	78,94
170	78,82
100	78,57
70	77,84
50	77,22

Tableau 13 - Hauteur maximale de la Loire, au droit du Profil 1, pour des temps de retour compris entre 50 et 500 ans (Équipe Loire)

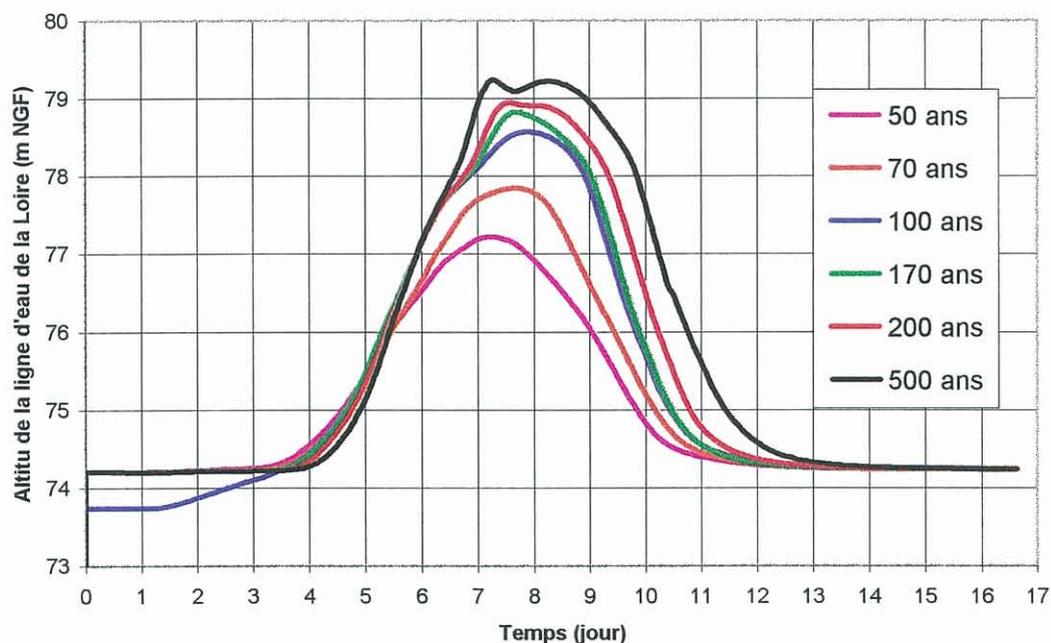


Fig. 11 - Altitude de la ligne d'eau de la Loire, au droit du Profil 1, pour des crues de temps de retour compris entre 50 et 500 ans (Équipe Loire)

3.4.2. La crue cinq centennale au droit des Profils 1, 2 et 3

Les altitudes de la ligne d'eau de la Loire pour la crue cinq centennale, au droit des trois profils étudiés, ont été communiquées par l'Équipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature. Les valeurs moyennes journalières correspondantes sont indiquées dans le tableau 14 et la figure 12.

Date en jour	Altitude moyenne journalière de la ligne d'eau (m NGF)		
	Profil 1	Profil 2	Profil 3
1	74,24	75,36	75,92
2	74,65	75,79	76,36
3	76,25	77,56	78,17
4	78,04	79,26	79,89
5	79,16	80,22	80,81
6	79,24	80,17	80,74
7	78,35	79,45	80,02
8	76,60	77,81	78,38
9	74,90	76,03	76,58
10	74,40	75,52	76,08
11	74,29	75,40	75,96
12	74,25	75,37	75,93

Tableau 14 - Altitude moyenne journalière calculée de la ligne d'eau de la Loire au droit des Profils 1, 2 et 3 lors d'une crue cinq-centennale

La durée moyenne d'une crue est d'environ 12 jours. Le pic de crue dure environ 2 jours.

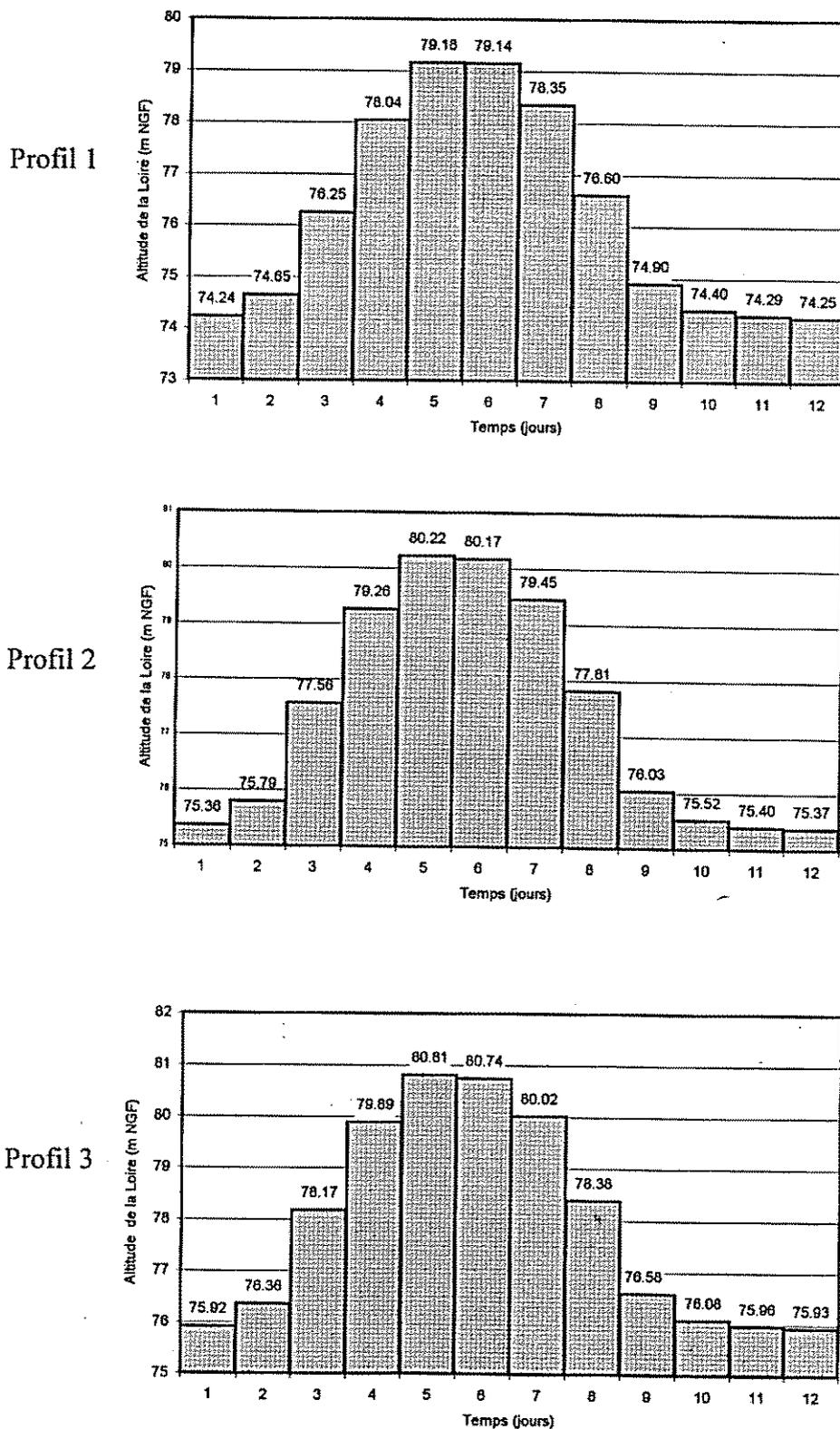


Figure 12 - Altitude moyenne journalière de la ligne d'eau de la Loire lors d'une crue cinq centennale au droit des Profils 1, 2 et 3

3.5. LE CALCUL DES DÉBITS D'ÉCHANGE PAR ZONE

Il est possible d'affecter à chacune des mailles du modèle un numéro de zone, et d'avoir pour chacune d'elles le calcul des flux échangés lors des différentes simulations. Ainsi il est possible de connaître les débits d'échange sur les différentes limites du domaine d'étude. Les zones définies sont indiquées dans le tableau 15 et sur la figure 13.

N° de zone	Correspondance
1	Val entre le coteau et la digue
2	Val à proximité immédiat de la digue
3	Parement aval de la digue
4	Parement amont de la digue
5	Lit de la Loire à proximité de la digue
6	Axe central du lit de la Loire
7	Coteaux de Beauce en limite du modèle
8	Zone interne du modèle
9	Drain dans le corps de la digue

Tableau 15 - Les zones de calcul des débits d'échange

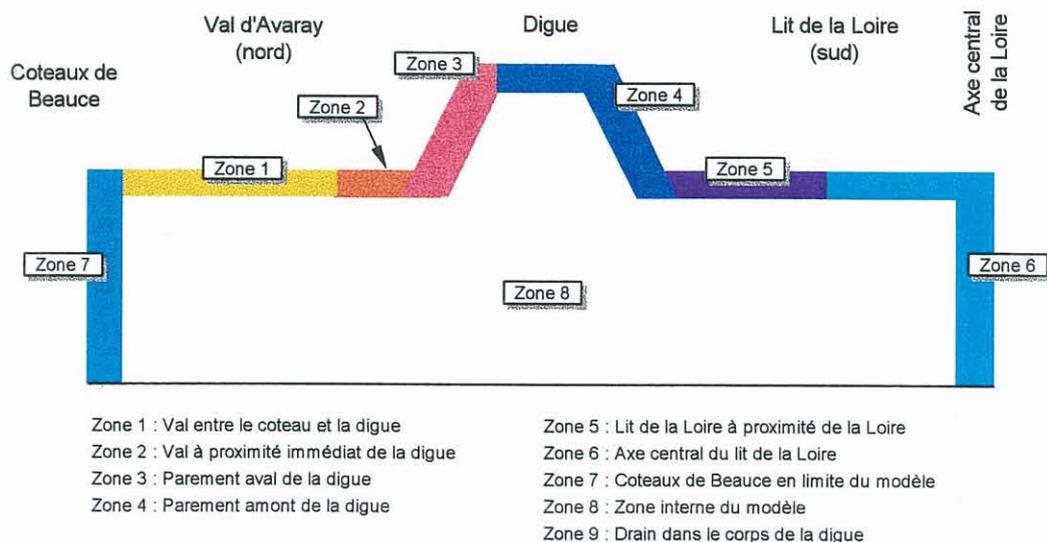


Figure 13 - Localisation des zones de calcul du bilan hydraulique du modèle coupe

3.6. LES DIFFÉRENTES SIMULATIONS RÉALISÉES

Les simulations hydrodynamiques ont été réalisées à l'aide du logiciel MARTHE (Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) développé par le BRGM (© BRGM, version 5.2., nov. 1998). Ce logiciel développé dès 1990 pour résoudre les problèmes hydrogéologiques d'environnement et de stockage, permet de simuler les écoulements tridimensionnels pour des aquifères multicouches à géométrie complexe, un maillage rectangulaire irrégulier pouvant être réalisé. Il permet de prendre en compte les écoulements en zone non saturée ainsi que des mailles avec un dénoyage local et à l'inverse aussi un débordement. Le couplage de ce logiciel a été étendu aux domaines de l'hydrologie, des processus thermiques et hydrochimiques, afin de simuler les échanges nappe-rivière, les intrusions salines et les processus de transport mono- et pluri-phasiques.

3.6.1. Simulations préliminaires sur une coupe simplifiée

Préalablement à la modélisation pour les coupes détaillées des trois profils retenus, on a réalisé une modélisation sur une coupe très simplifiée. Cette étape permet plus facilement d'analyser les mécanismes de propagation d'une crue de la Loire sous la digue de protection, d'évaluer les ordres de grandeur des variations des niveaux de la nappe et des débits de résurgence, ainsi que l'incidence des différentes valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement.

3.6.2. Simulations réalisées sur les trois profils du Val d'Avaray

Le tableau 16 présente les différentes simulations réalisées sur les trois profils avec les objectifs propres de chacune.

Profil	N° de la simulation	Type de Crue	Objectif de la simulation
1 digue sans renforcement	PIS1	Régime permanent + crue Q500 sur 12 pas de temps d'un jour	Calcul de la remontée de nappe dans le val et des débits d'infiltration à la suite d'une crue de la Loire (S aquifère = 5 %).
	PIS2	Régime permanent	Étude de l'incidence de la perméabilité de l'aquifère (K aquifère divisée par 2).
	PIS3	Régime permanent + crue Q500 sur 12 pas de temps d'un jour	Étude de l'incidence du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère (S aquifère = 10 %)
	PIS4	Régime permanent + crue Q500 avec la durée des pas de temps 1, 2 et 3 égale à 10 jours, les suivants à 1 j.	Étude de l'incidence d'une crue précédée d'une longue période de hautes eaux de la Loire.
	PIS5	Régime permanent + crue Q500 avec la durée des pas de temps 1, 2 et 3 égale à 10 jours, les suivants à 1 j.	Étude de l'incidence de l'exploitation du lit de la Loire (simulation d'une fosse à l'amont de la digue).

2 digue avec renforcement	P2S1	Régime permanent + crue Q500 sur 12 pas de temps d'un jour	Calcul de la remontée de nappe dans le val et des débits d'infiltration à la suite d'une crue de la Loire sur une digue renforcée.
	P2S2	Régime permanent + crue Q500 sur 12 pas de temps d'un jour	Calcul de l'incidence d'une veine de sable perméable sous la digue la digue.
3 digue sans renforcement	P3S1	Régime permanent + crue Q500 sur 12 pas de temps d'un jour	Calcul de la remontée de nappe dans le val et des débits d'infiltration à la suite d'une crue de la Loire (S aquifère = 5 %).

Tableau 16 - Liste et objectifs des simulations réalisées

3.7. SIMULATIONS PRÉLIMINAIRES SUR UNE COUPE SIMPLIFIÉE

Le modèle simplifié a été réalisé sur un maillage plan monocouche en 2D. La composante verticale des vitesses n'est pas prise en compte, mais le petit nombre de mailles et l'absence de mailles dénoyées permettent de réaliser plus facilement les simulations. Dans cette configuration, toutes les particularités géologiques du site ne peuvent pas être représentées, mais la précision des résultats obtenus restent suffisante pour dégrossir le calcul des écoulements souterrains lors d'une crue de la Loire.

3.7.1. Maillage, caractéristiques et conditions aux limites du modèle

Le maillage réalisé comprend une couche supérieure qui ne comprend qu'une seule maille représentant la levée, et une couche inférieure représentant l'aquifère comprenant 31 mailles d'épaisseur constante et de largeur variable pour une distance totale de 1 250 m. Le maillage représente une coupe dont les limites sont comprises entre les coteaux de la Beauce et la Loire. La Tronne et la digue occupent une maille de 5 m de large respectivement de 25 m.

Le maillage est découpé comme indiqué ci-dessous :

- sur l'axe des Y : 1 colonne de 25 m + 1 colonne de 20 m + 1 colonne de 5 m + 17 colonnes de 50 m + 5 colonnes de 20 m + 5 colonnes de 10 m + 1 colonne de 25 m + 2 colonnes de 50 m et 1 colonne de 75 m (total : 34 colonnes pour une largeur de 1 250 m).

La colonne numéro 3, de 5 m de large, représente le cours d'eau de la Tronne. La colonne numéro 31, de 25 m de large, représente la digue.

Nombre total de mailles : $34 + 1 = 35$.

Les différentes altitudes fixées correspondent à celles rencontrées avec le Profil 1 :

- substratum de l'aquifère : 56 m NGF,
- cote topographique : 76 m NGF,
- altitude du lit de la Tronne : 73 m NGF,

- sommet de la digue à 80 m NGF (hauteur de la digue 4 m),
- piézométrie de la nappe en amont (coteaux de Beauce) : 74 m NGF,
- altitude de la Loire en étiage : 72,5 m NGF,
- altitude de la Loire en crue : 79 m NGF.

Les conditions aux limites du modèle sont les suivantes :

- en amont (coteaux de Beauce) : piézométrie de la nappe imposée à 74 m NGF,
- en aval (Loire) : piézométrie de la nappe imposée à 72,5 m NGF en étiage, et à 79 m NGF en crue.

On a affecté une perméabilité et un coefficient d'emmagasinement unique sur l'ensemble du modèle.

En régime permanent d'étiage, les écoulements comprennent d'une part un drainage des alimentations des coteaux de Beauce par la Tronne, et un drainage du Val par la Loire située à une altitude inférieure au lit de la Tronne.

La crue de la Loire a été simulée en passant directement d'une situation d'étiage à la situation correspondant au maximum de la crue. Ce niveau maximum a été maintenu pour les différents pas de temps des simulations. Les résultats ont été analysés en régime permanent et en régime transitoire pour les étapes suivantes :

Étape	Conditions hydrauliques
1	Régime permanent en régime d'étiage
2	Crue de la Loire, 1 j après le début de la crue (instantanée)
3	Crue de la Loire, 10 j après le début de la crue
4	Crue de la Loire, 100 j après le début de la crue
5	Crue de la Loire, 1 000 j après le début de la crue
6	Régime permanent en régime de crue

Pour des raisons de simplification d'analyse du comportement de la nappe, on suppose dans cette approche que la nappe n'est pas soumise à une recharge par les précipitations dans le Val. Au cours des simulations des profils 1, 2 et 3 des chapitres suivants, on simulera une recharge de 120 mm/an.

Le calcul de la situation en régime permanent de crue est intéressant car il permet de comprendre complètement le mécanisme des écoulements souterrains au cours d'une crue exceptionnelle de la Loire. Ce régime permanent ne pourra cependant jamais être observé, car il faudrait que le maximum de la crue soit maintenu au moins une centaine de jours pour les situations les plus rapides.

3.7.2. Incidence des valeurs de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement sur la piézométrie et les débits de débordement

Pour évaluer l'incidence des valeurs de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement sur les écoulements, on a réalisé 4 simulations en faisant varier K et S comme il est indiqué dans le tableau ci-dessous :

N° de la simulation	K (m/s)	S (%)	Diffusivité T/S (m ² /s)
1	10 ⁻⁵	5	4. 10 ⁻³
2	10 ⁻⁵	1	20. 10 ⁻³
3	10 ⁻⁴	5	40. 10 ⁻³
4	10 ⁻⁴	1	200. 10 ⁻³

Les valeurs de perméabilité ainsi que les valeurs du coefficient d'emmagasinement ont été choisis de façon à être représentatives du milieu ; les perméabilités sont des ordres de grandeur rencontrée sur le site d'étude, quant aux valeurs du coefficient d'emmagasinement elles sont caractéristiques des valeurs de milieu poreux constitué de sables et graviers.

Le calcul de la diffusivité ($D = K * e/S$) a été fait avec l'épaisseur d'aquifère égale à 20 m.

Les résultats des calculs de la piézométrie sont indiqués sur les figures A3.1, A3.2, A3.3 et A3.4 en Annexe 3.

Dans tous les cas, la surface piézométrique de la nappe en régime permanent de crue est la même. Elle correspond à une ligne d'eau dont l'amont est situé au pied de la digue, sur sa partie Val d'Avaray, et l'aval est situé dans le cours d'eau de la Tronne. Le gradient hydraulique de la nappe, pour ce régime permanent de crue, est déterminé par les altitudes respectives de la cote au sol du pied de la digue, et de la cote du lit de la Tronne (ou plus exactement de la ligne d'eau de ce cours d'eau).

Les 4 simulations vont se différencier d'une part par la vitesse de propagation de l'onde de pression dans l'aquifère, d'autre part par les débits d'écoulement mis en jeu.

Propagation de l'onde de pression

Simulation 1 (diffusivité égale à 4.10⁻³ m²/s): le régime permanent d'équilibre est très long à s'installer. Au bout de 1 000 jours celui-ci n'est pas atteint (annexe 3, fig. A.3.1.).

Simulation 2 (diffusivité égale à 20.10⁻³ m²/s) : Le régime permanent d'équilibre est atteint au bout de 1 000 jours (annexe 3, fig. A.3.2.).

Simulation 3 (diffusivité égale à 40.10⁻³ m²/s) On observe une légère avance de la remontée de la nappe par rapport à la situation précédente (simulation 2). La position de

la nappe au bout de 10 jours est identique à celle obtenue au bout de 100 jours avec la simulation 1 (annexe 3, fig. A.3.3.).

Simulation 4 (diffusivité égale à $200.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) : Au bout de 100 jours, le régime permanent d'équilibre est atteint. La position de la nappe au bout de 1 jour est voisine de celle obtenue au bout de 100 jours avec la simulation 1 (annexe 3, fig. A.3.4.).

Incidence sur les débits de débordement

Les débits de débordement au pied de la digue sont directement proportionnels à la perméabilité des terrains.

Il est possible d'évaluer les débits sous la digue en prenant en compte la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère, et la différence de charge de part et d'autre de la digue.

La loi de Darcy permet d'écrire :

$$V = K \times i$$

$$Q = V \times S$$

$$i = \Delta H / \Delta X$$

$$Q = K \times (\Delta H / \Delta X) \times (\text{épaisseur} \times \text{largeur})$$

où :

V : vitesse de Darcy (m/s),

K : perméabilité de l'aquifère (m/s),

i : gradient hydraulique sous la digue,

Q : débit sous la digue (m^3/s),

S : section de passage (m^2) = épaisseur de l'aquifère x largeur de l'aquifère considérée

ΔH : différence de charge entre l'amont et l'aval de la digue (m),

ΔX : largeur de la base de la digue (m),

avec :

$$K = 10^{-4} \text{ m/s},$$

$$\Delta H = 79 - 76 = 3 \text{ m},$$

$$\Delta X (\text{largeur de la digue}) = 25 \text{ m},$$

$$\text{épaisseur de l'aquifère} = 20 \text{ m},$$

$$\text{largeur de l'aquifère} = 1 \text{ m}.$$

on obtient :

$$Q = 10^{-4} \times 3 \times 25 \times 20 \times 1 = 0.15 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$\text{soit } 0,15 \times 3600 \times 24/1000 = 13 \text{ m}^3/\text{jour}.$$

Cette valeur correspond au débit qui transite sous la digue. Une partie de celui-ci va resurgir au pied de la digue, le reste va alimenter le Val.

On présente sur la figure 14, les débits de débordement calculés pour chacune des simulations aux pas de temps de 1, 10, 100, 1 000 jours et pour le régime permanent de crue.

Pour les simulations 1 et 2 ($K = 10^{-5}$ m/s) les débits de débordement sont inférieurs à $1 \text{ m}^3/\text{jour}$ par mètre linéaire de digue. Pour les simulations 3 et 4 ($K = 10^{-4}$ m/s) les débits de débordement atteignent environ $5 \text{ m}^3/\text{jour}$ par mètre linéaire dès le premier jour de crue pour parvenir assez vite à une valeur de $9 \text{ m}^3/\text{jour}$ par mètre linéaire de digue. Ce débit de $9 \text{ m}^3/\text{jour}$ représente la partie du flux qui va déborder au pied de la digue en régime permanent, et qui est à comparer à la valeur de $13 \text{ m}^3/\text{jour}$ calculée précédemment qui représente le débit total infiltré qui transite sous la digue.

Si, en régime permanent, les débits de débordement sont indépendants du coefficient d'emmagasinement de la nappe, celui-ci peut moduler de façon significative la valeur des débits dans la phase transitoire de mise en équilibre de la nappe. Pour les simulations 3 et 4, les débits de débordement sont égaux respectivement à 3,82 et $6,26 \text{ m}^3/\text{jour}$ à la fin du premier jour de crue. Ainsi, pour une même valeur de la perméabilité, les débits de débordement peuvent varier de 65 % lorsque le coefficient d'emmagasinement passe de 5 à 1 %.

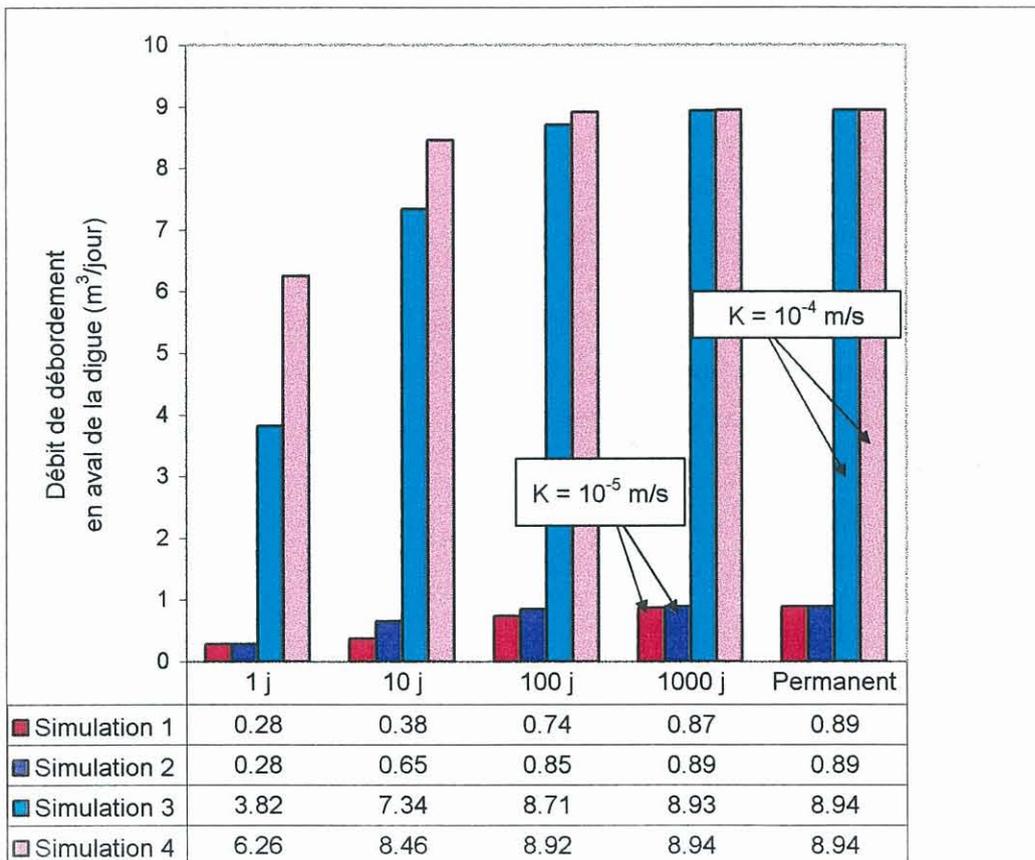


Fig. 14 - Débit de débordement en aval de la digue, en régime transitoire, pour plusieurs valeurs de K et de S (Simulations 1 à 4)

3.7.3. Évolution des niveaux de la nappe en fonction des niveaux de la Loire, en dehors des périodes de crues exceptionnelles

Pour représenter le comportement moyen de la nappe dû aux variations du niveau d'eau de la Loire, on a simulé, pour les quatre situations étudiées, une variation des niveaux de la Loire sur une année, au pas de temps mensuel, entre le niveau d'étiage égal à 72,5 m NGF et un niveau de crue fixé à 74,76 m NGF. Ce dernier est bien inférieur au niveau de la crue décennale qui est égale à 77,22 m NGF.

On a représenté sur la figure 15, les variations de niveau de la nappe sur deux piézomètres fictifs situés à 390 m (Pz1) et 200 m (Pz2) de la Loire. Les amplitudes maximales observées sont indiquées dans le tableau 17.

Simulation	Pz1 - distance = 390 m		Pz2 - distance = 200 m	
	Date du maximum (mois)	Delta H (m)	Date du maximum (mois)	Delta H (m)
1	10	0,35	8	0,76
2	8	0,86	7	1,39
3	7	1,14	7	1,59
4	7	1,44	7	1,80

L'amplitude maximale de la Loire est de 2,17 m et débute au cours du 6^{ème} mois

Tableau 17 - Amplitudes maximales de la nappe pour différentes valeurs de K et de S, pour 2 distances à la Loire

Les courbes piézométriques de la figure 15 mettent en évidence l'effet de la valeur de la diffusivité de l'aquifère sur la propagation d'une onde de crue dans la nappe :

- lorsque la diffusivité est faible (Simulation 1 - $D = 4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), les variations moyennes mensuelles sont retardées et amorties ;
- lorsque la diffusivité est forte (Simulation 4 - $D = 200.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), les variations moyennes mensuelles de piézométrie sont plus rapides et peu amorties.

Cette conséquence peut être mise à profit dans un système de suivi des niveaux de la nappe et du fleuve qui permettrait un calage de la diffusivité de l'aquifère, et une estimation simultanée des valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

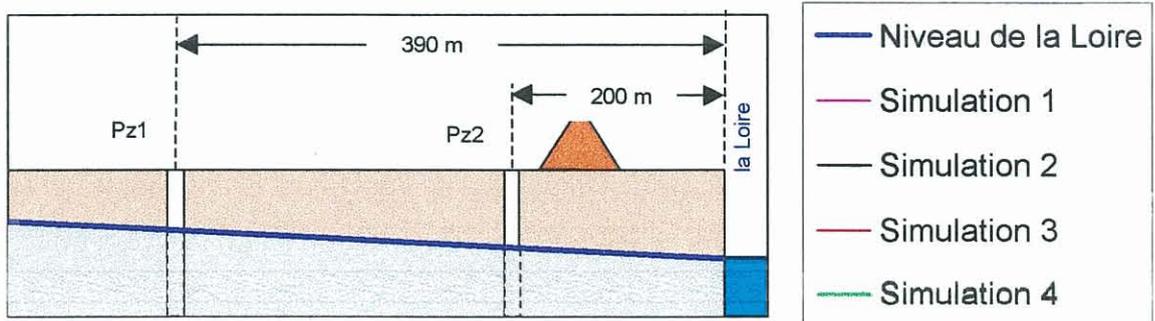
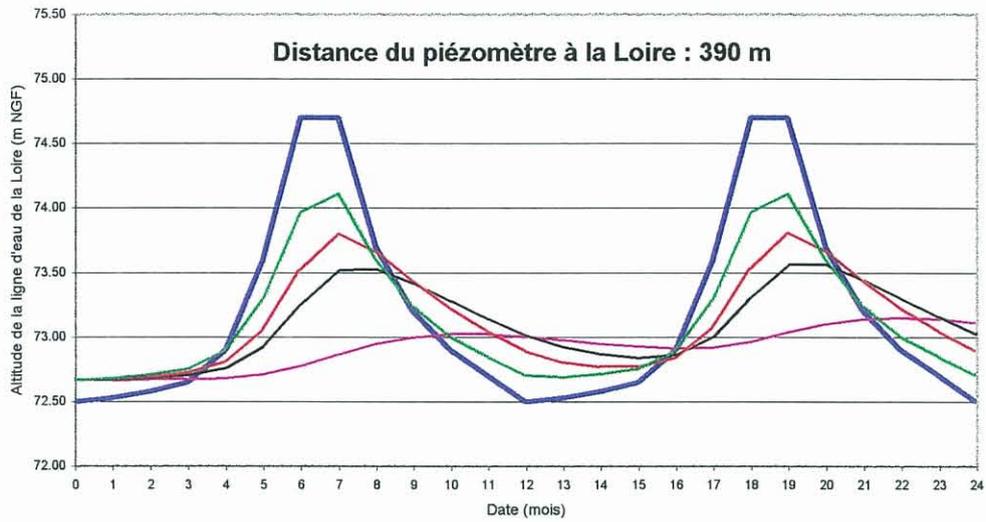
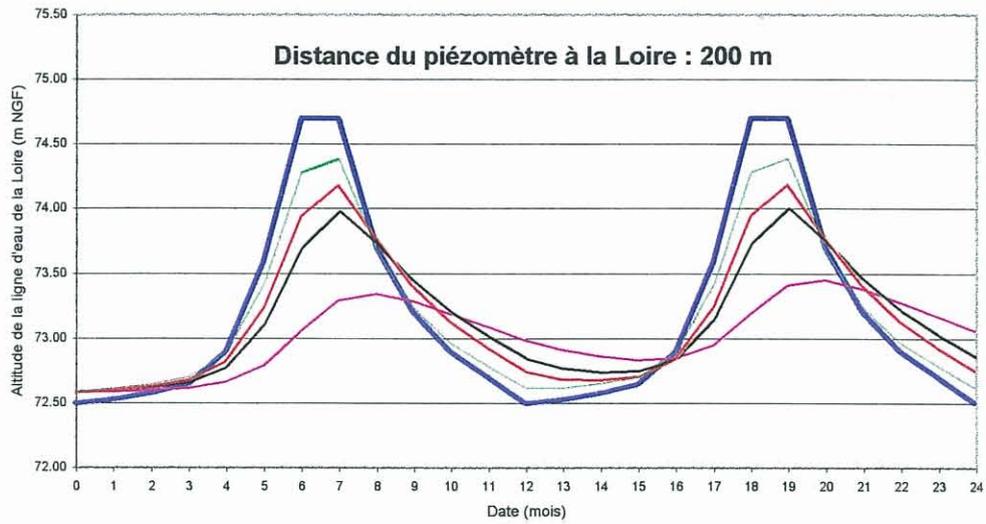


Fig. 15 - Évolution des niveaux de la nappe à une distance de 200 et de 390 m de la Loire en fonction des niveaux du fleuve, en dehors des périodes de crues exceptionnelles

3.7.4. Description des mécanismes hydrauliques liés aux crues de la Loire, et inventaire des facteurs principaux dans le phénomène de remontée de nappe

Il ressort des simulations réalisées, sur le schéma simplifié des écoulements, une série d'enseignements concernant la compréhension des mécanismes de propagation d'une crue de la Loire dans l'aquifère entraînant une remontée de nappe et une résurgence dans le Val. Ces simulations permettent également d'évaluer les facteurs principaux qui interviennent dans ces phénomènes de remontée de nappe. Ces premiers résultats sont résumés ci-dessous, et seront complétées par les simulations réalisées sur les Profils 1, 2 et 3 des paragraphes suivants.

a) Les mécanismes de propagation d'une crue de la Loire dans l'aquifère

Une crue exceptionnelle de la Loire se traduit par l'existence d'une onde de pression qui va se propager dans l'aquifère jusqu'à un régime permanent, qui ne sera dans la pratique jamais atteint. La piézométrie de ce régime permanent, dans le cas du Val d'Avaray, correspond à une ligne d'eau dont l'amont est situé au pied de la digue, sur sa partie Val d'Avaray, et l'aval est situé dans le cours d'eau de la Tronne. Le gradient hydraulique de la nappe, pour ce régime permanent de crue, est déterminé par les altitudes respectives de la cote au sol du pied de la digue, et de la cote du lit de la Tronne (ou plus exactement de la ligne d'eau de ce cours d'eau). Les infiltrations dans l'aquifère trouveront leurs exutoires d'une part au pied de la digue (la plus grande partie du débit) et dans le cours d'eau de la Tronne.

La vitesse de propagation de l'onde de pression dépendra de la diffusivité de l'aquifère (rapport T/S , avec $T = K \times e$). Les débits aux exutoires dépendront principalement de la perméabilité de l'aquifère, mais aussi de son coefficient d'emménagement les premiers jours du régime transitoire, et de la différence de niveau entre l'altitude de la Loire et les altitudes du sol dans le Val.

b) Les facteurs principaux qui déterminent les remontées de nappe et leurs conséquences

Les facteurs principaux sont rappelés ci-dessous :

- géologie et géométrie de l'aquifère (nature et épaisseur des différentes formations géologiques) ;
- perméabilité et coefficient d'emménagement de l'aquifère ;
- topographie du Val ;
- caractéristiques de la crue (durée, hauteur d'eau de la Loire) ;
- contexte hydrogéologique de la nappe lors de la crue (précipitations, niveau de la nappe).

3.8. SIMULATION D'UNE CRUE CINQ CENTENNALE DE LA LOIRE SUR LE PROFIL 1

La digue du Profil 1 est une digue sans renforcement. La position et les dimensions de la digue sont représentées sur la figure 16.

3.8.1. Le maillage

Le maillage réalisé sur cette coupe est indiqué ci-dessous :

- sur l'axe des X : 24 colonnes de 50 m + 40 colonnes de 1 m + 8 colonnes de 50 m et 1 colonne de 60 m (total : 73 colonnes pour une largeur de 1 700 m)
- sur l'axe des Z : 44 lignes (couches) de 0,5 m de X à Y m NGF.

Nombre total de mailles : $73 \times 44 = 3\,212$.

3.8.2. Position et dimensions de la digue

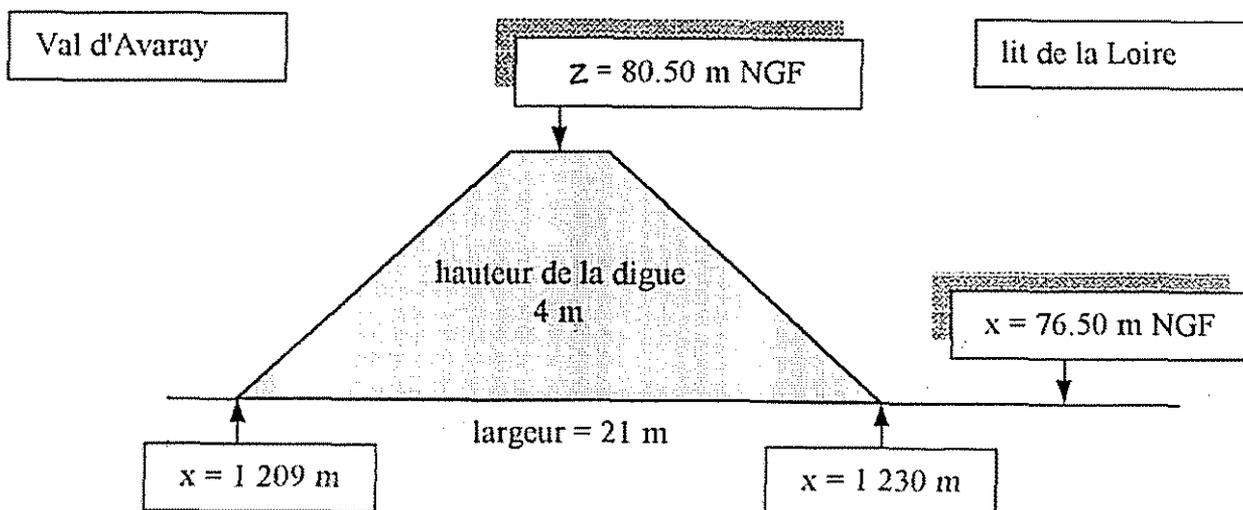


Fig. 16 - Position et dimensions de la digue au droit du Profil 1

3.8.3. Les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle

La perméabilité de l'aquifère est connue grâce aux mesures faites sur les sondages carottés réalisés dans les alluvions et le corps de la digue (annexe 2). Les perméabilités affectées au modèle résultent d'une part de la prise en compte des données ponctuelles disponibles, d'autre part d'un ajustement de la piézométrie en régime permanent pour différentes valeurs de cette perméabilité (piézométrie de référence de basses eaux,

septembre 1982). On présente dans la simulation P1S2 l'incidence de la valeur de la perméabilité de l'aquifère sur l'allure des courbes piézométriques.

Il n'existe aucune mesure du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère. Faute de mieux, on a affecté une valeur estimée à 5 % pour l'aquifère et à 1 % pour le corps de la digue.

Les valeurs de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement retenues sont indiquées dans le tableau 18.

Milieu	Perméabilité (en 10^{-5} m/s)	Coefficient d'emmagasinement (%)
Corps de la digue	0,2	1
Limons et argiles	0,2	5
Sables et graviers	10	5
Calcaires d'Étampes	1	5

Tableau 18 - Perméabilités et coefficients d'emmagasinement affectés aux différents niveaux géologiques du Profil 1

3.8.4. Les conditions hydrauliques initiales en régime permanent

Le régime permanent de la nappe correspond à une situation qualifiée de moyenne avec les conditions hydraulique suivantes, pour le potentiel imposé aux limites :

- coteau de Beauce : situation des basses eaux de 1982 + 1 m soit 74,30m NGF
- Vallée de la Loire : module soit 72,55 m. NGF.
- Recharge de 10 mm/mois soit 120mm/an.

La piézométrie de la nappe présente un dôme au centre du val avec un écoulement dû au drainage de la nappe à la fois par la Tronne et par la Loire.

3.8.5. Les simulations

3.8.5.1. Simulation P1S1 :

Étude de la simulation de référence sur le Profil 1

Objectif de la simulation : calcul de la remontée de nappe dans le Val et des débits d'infiltration à la suite d'une crue de la Loire.

A partir de la situation en régime permanent, on a réalisé la simulation d'une crue cinq centennale en régime transitoire avec un pas de temps de calcul égal à un jour. Pour cela on a imposé aux limites côté Loire un potentiel égal à l'altitude de la ligne d'eau de la Loire en crue indiquée dans le tableau 1 de l'annexe 5.

Les résultats sont présentés ainsi :

- Piézométrie : annexe 4, figures A4.1 et A4.2
- Débit de débordement dans le Val : annexe 5, figure A5.1

Description des phénomènes observés :

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

La phase de montée des niveaux de la Loire (pas 1 à 5) : la montée des niveaux de la Loire se traduit par une montée des niveaux de la nappe. Au cours de cette phase de montée, qui dure 5 jours, l'onde de crue souterraine se propage à moins de 200 m de la digue à l'intérieur du Val.

La phase de descente des niveaux de la Loire (pas 6 à 12) : la descente des niveaux de la Loire entraîne une vidange progressive des terrains envahis précédemment par la crue. Cette vidange se traduit par une baisse des niveaux de la nappe côté lit de la Loire, mais une continuation de la montée des niveaux de la nappe côté Val. Cette vidange de la nappe se réalise lentement. La figure A4.1 montre que la surface piézométrique de la nappe, à proximité de la digue, reste proche de la topographie du val à la fin du jour 30, c'est à dire 15 jours après la fin de la crue.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

Les débits de débordement dans le Val sont observés dans les fossés qui longent la digue. La figure A5.1 montre l'évolution des débits de débordement au cours de la crue. Les premières venues d'eau apparaissent dès le jour 4 lorsque le niveau de la Loire atteint la cote 78,4 m NGF, c'est à dire le milieu de la hauteur de la digue. Les débits augmentent progressivement pour atteindre un débit de $24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ linéaire de digue, soit $2 \text{ m}^3/\text{jour}$, au cours du jour 6 qui est le dernier jour de la pointe de la crue. Au cours des jours 7, 8 et 9, ces débits diminuent rapidement pour atteindre un débit 10 fois plus faible, soit $200 \text{ l}/\text{jour}/\text{m}$ linéaire. Par la suite, ces débits ne diminuent que très lentement, corrélativement à la baisse des niveaux de la nappe. Au cours du jour 12, lorsque la crue est terminée et que la Loire a retrouvé son niveau initial, le débit calculé dans les fossés est égal à $120 \text{ l}/\text{jour}/\text{m}$ linéaire. On a calculé les débits de débordement jusqu'au jour 30. Le volume total de débordement est égal à $6,8 \text{ m}^3$ sur la période comprise entre le jour 1 et 30 inclus. Durant cette crue, il n'est pas apparu de venue d'eau sur le parement aval de la digue.

3.8.5.2. Simulation P1S2 : Incidence de la valeur de la perméabilité de l'aquifère

Objectif de la simulation : étude de l'incidence de la perméabilité de l'aquifère.

Les perméabilités des niveaux géologiques des sables et graviers et des limons et argiles de la simulation précédente ont été divisées par 2. La surface piézométrique, en régime

permanent, ainsi obtenue, est comparée à la surface piézométrique de la simulation P1S1. Les deux résultats sont présentés sur la figure A4.3 (annexe 4).

La diminution de la perméabilité de l'aquifère se traduit par une remontée des niveaux de la nappe au centre du val. En effet, en diminuant la perméabilité de l'aquifère, les gradients hydrauliques de la nappe augmentent afin de permettre l'écoulement vers les exutoires à potentiel imposés des débits résultant de la recharge par la pluie efficace.

Cette simulation montre l'importance du choix de la valeur de la perméabilité sur la définition de la situation initiale de la nappe. Le choix des perméabilités affectées au modèle doit être fait à partir de mesures réalisées lors de pompages d'essai (mesure ponctuelle de la perméabilité) et d'un calage du modèle sur une piézométrie observée en régime permanent et en régime transitoire par comparaison avec une carte piézométrique, respectivement des chroniques piézométriques.

Cette dernière valeur de perméabilité n'a pas été retenue car elle conduit à une surface piézométrique trop différente de celle mesurée dans le Val.

Le choix des valeurs de perméabilité est important surtout pour le calcul des débits de débordement. En effet, ceux-ci seront directement fonction des valeurs des perméabilités retenues.

3.8.5.3. Simulation P1S3 : Incidence de la valeur du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère

Objectif de la simulation : étude de l'incidence du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement des niveaux des sables et graviers et des limons et argiles est multiplié par 2 ($S = 10\%$ au lieu de 5%).

On compare les résultats obtenus avec ceux de la simulation P1S1.

Les résultats sont présentés comme suit :

- Piézométrie de la nappe : annexe 4, figures A.4.4 et A.4.5
- Débit de débordement dans le Val : annexe 5, figure A5.2.

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

Avec un coefficient d'emmagasinement plus élevé, la montée des niveaux de la nappe est moins importante, et la propagation de la crue souterraine se fait sentir moins loin dans le Val.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

Corrélativement, les débits de débordement sont diminués de façon significative. Les débits de débordement n'apparaissent qu'à partir du jour 5. Le débit maximum journalier ne dépasse pas 550 l/jour/m linéaire. Par contre, les débits de débordement, après le maximum de la crue, diminuent sensiblement de la même façon. Au cours des 30 jours de simulation, le volume total débordé passe de 6,8 m³ par mètre linéaire de digue à 3,4 m³ par mètre linéaire.

3.8.5.4. Simulation P1S4 : Incidence d'une crue de longue durée

Objectif de la simulation : étude de l'incidence d'une crue précédée d'une longue période de hautes eaux de la Loire.

Les résultats sont présentés ainsi :

- Piézométrie de la nappe : annexe 4, figures A4.6 et A4.7
- Débit de débordement dans le Val : annexe 5, figure A5.3. et tableau 2.

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

Dans cette simulation, les pas de temps 1, 2 et 3 durent chacun 10 jours. A la fin du pas de temps 3, au bout de 30 jours de crue, lorsque la Loire est à la cote de 76,25 m NGF, la piézométrie de la nappe est sensiblement identique à celle calculée pour une crue de 4 jours (simulation de référence) où la cote de la Loire atteint la cote de 78,04 m. Ainsi une crue de longue durée, mais de faible hauteur, peut se traduire par des remontées de nappe et des débits de débordement identiques à ceux obtenus avec une crue de courte durée et de hauteur d'eau importante.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

Les débits de pointe sont sensiblement supérieurs à ceux de la simulation de référence (2,43 pour 2,06 m³/jour par mètre linéaire de digue). Par contre, comme la crue dure plus longtemps, les volumes de débordement sont plus importants : 11,6 pour 6,8 m³ par mètre linéaire de digue .

3.8.5.5. Simulation P1S5 : Incidence de l'exploitation du lit de la Loire

Objectif de la simulation : étude de l'incidence de l'exploitation du lit de la Loire.

On simule une fosse d'exploitation du lit majeur de la Loire de 2 m de profondeur et de 200 m de large à proximité de la partie amont de la digue, et une crue de longue durée comme pour la simulation P1S4.

Les résultats sont présentés ainsi :

- Piézométrie de la nappe : annexe 4, figures A4.8 et A4.9.

– Débit de débordement dans le val : annexe 5, figure A5.4. et tableau 2.

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

La piézométrie calculée est similaire à la simulation précédente.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

Les débits de débordements sont plus élevés (2,86 pour 2,43 m³/jour/m linéaire de digue) car la fosse d'exploitation met la Loire directement en communication avec les niveaux perméables des sables. Par contre, à la fin de la crue, les débits de débordement dans le Val diminuent rapidement car l'existence d'une fosse à proximité de la digue a pour effet d'accélérer le drainage de la nappe après l'épisode de crue de la Loire.

3.8.5.6. Simulation P1S6 et P1S7 : le volume de débordement pour des crues de période de retour de 200 ans et de 100 ans

Les simulations P1S6 et P1S7 donnent des débits et volumes de débordement pour des crues de période de retour de 200 et 100 ans. Dans chaque cas, le niveau maximum atteint par la crue est inférieur à celui de la crue cinq centennale. Les débits de débordement sont par conséquent différents. Les résultats sont indiqués dans le tableau 19, la figure 17 et à l'annexe 5 (A5.5 et A5.6).

Période de retour (ans)	Niveau maximal de la Loire (m NGF)	Hauteur au-dessus du pied de la digue (m)	Volume débordé (m ³ par m linéaire)	% par rapport à la crue 500 ans
500	79,14	2,64	6,8	100
200	78,76	2,26	4,8	71
100	78,35	1,85	3,2	47

Tableau 19 - Résultats des calculs de débordement pour des crues de période de retour différente

Par rapport au volume de débordement d'une crue cinq centennale, le volume d'eau de débordement dans le val est égal à 71 % pour une crue de période de retour de 200 ans, et à 47 % pour une crue de période de retour de 100 ans. Ces coefficients d'abattement ne peuvent pas être généralisés pour tous les profils car ils dépendent principalement des conditions topographiques, telles que la différence d'altitude entre la ligne d'eau de la Loire à son maximum et l'altitude du sol dans le val à proximité de la digue, où se produit le débordement.

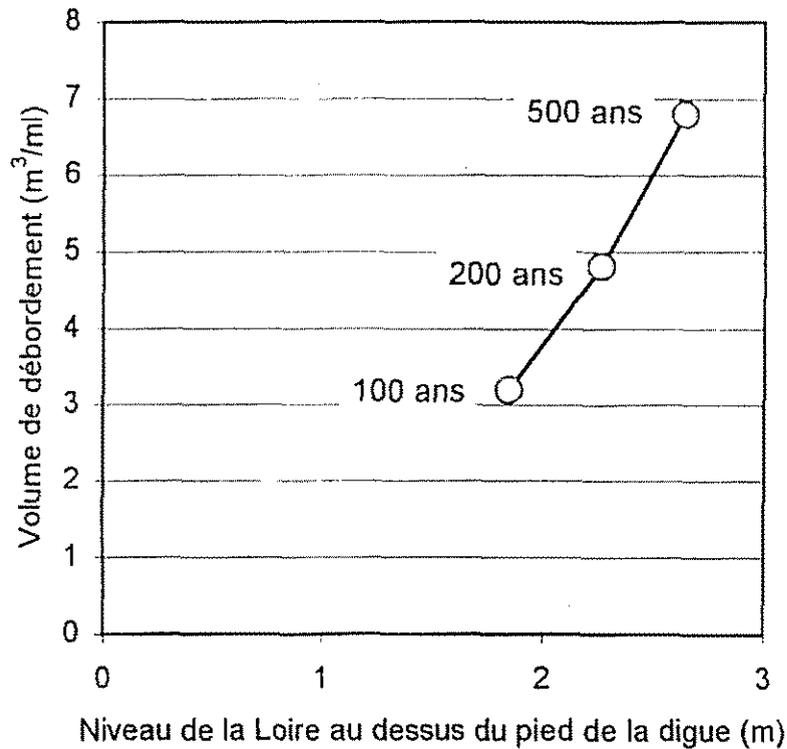


Fig. 17 - Volume de débordement en fonction du niveau de la Loire au-dessus du pied de la digue

3.9 . SIMULATION D'UNE CRUE CINQ CENTENNALE DE LA LOIRE SUR LE PROFIL 2

La digue du Profil 2 est une digue ayant fait l'objet d'un renforcement. La position et les dimensions de la digue sont représentées sur la figure 18.

3.9.1. Le maillage

- sur l'axe des X : 167 colonnes de 10 m + 50 colonnes de 1 m + 78 colonnes de 10 m (total : 295 colonnes pour une largeur de 2 500 m) ;
- sur l'axe des Z : 44 lignes (couches) de 0,5 m.

Nombre total de mailles : $167 \times 44 = 7\,348$.

3.9.2 . Position et dimensions de la digue

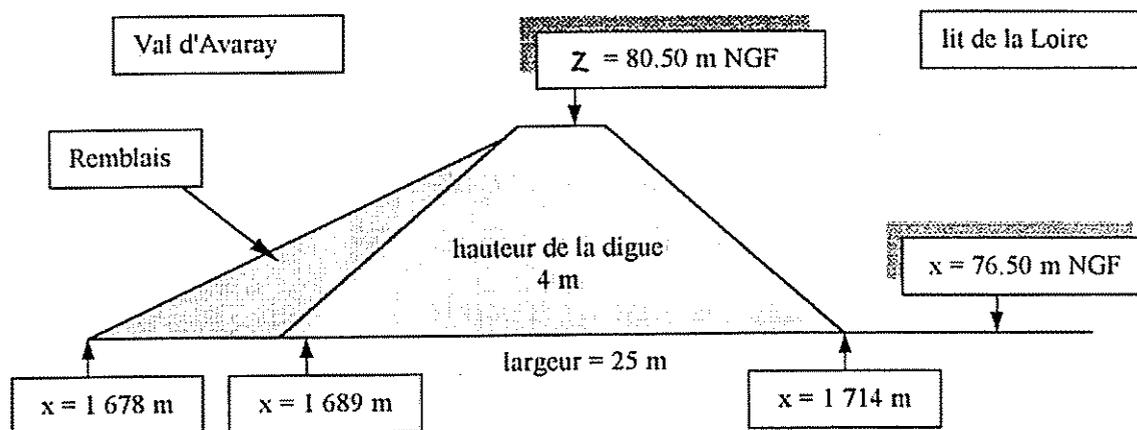


Fig. 18 - Position et dimensions de la digue au droit du Profil 2

3.9.3. Les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle

Milieu	Perméabilité (en 10^{-5} m/s)	Coefficient d'emménagement (%)
Corps de la digue	1	1
Remblai	10	1
Tapis filtrant	100	1
Limons et argiles	0,2	5
Sables et graviers	30	5
Calcaires d'Étampes	1	5

Tableau 20 - Perméabilités et coefficients d'emménagement affectés aux différents niveaux géologiques du Profil 2

3.9.4. Les conditions hydrauliques initiales en régime permanent

Le régime permanent de la nappe correspond à une situation qualifiée de moyenne avec les conditions hydraulique suivantes, pour le potentiel imposé aux limites :

- Coteau de Beauce : situation des basses eaux de 1982 + 1 m, soit 74,95 m NGF
- Vallée de la Loire : module, soit 73,42 m NGF
- Recharge de 10mm/mois soit 120mm/an.

3.9.5 - Les simulations

3.9.5.1 - Simulation P2S1 : Etude de la simulation de référence

Objectif de la simulation : calcul de la remontée de nappe dans le val et des débits d'infiltration à la suite d'une crue de la Loire sur une digue renforcée.

Les résultats sont présentés comme suit :

- Piézométrie de la nappe : annexe 4, figures A4.10 et A4.11,
- Débit de débordement dans le val : annexe 5, figure A5.7.

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

La piézométrie de la nappe est fortement influencée par le profil topographique du Val.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

Les débits de débordement sont plus importants sur ce profil car la perméabilité des sables y est plus élevée. Sur le Profil 1, la perméabilité des sables était égale à 10^{-4} m/s et le débit maximum de débordement à $2.06 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{m}$ linéaire de digue. Sur ce Profil 2, la perméabilité des sables est égale à 3.10^{-4} m/s, si bien qu'on obtient un débit de pointe égal à $6.85 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{m}$ linéaire de digue. Cette simulation met en évidence également l'importance du volume d'eau drainé par le tapis filtrant mis sur le parement aval de la digue.

3.9.5.2. Simulation P2S2 : Incidence d'une veine perméable sous la digue

Objectif de la simulation : Calcul de l'incidence d'une veine de sable perméable sous la digue.

Les résultats sont présentés ainsi :

- Piézométrie de la nappe : annexe 4, figures A4.12 et A4.13
- Débit de débordement dans le val : annexe 5, figure A5.8.

On a simulé une veine de sable très perméable sous le corps de la digue. La veine de sable, d'une longueur de 60 m (de 1665 à 1725 m), qui passe sous la digue (de 1680 à 1714 m), est affectée d'une perméabilité égale à 12×10^{-4} m/s. L'épaisseur de la veine de sable est de 2,5 m (de 74 à 76,5 m NGF).

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

La piézométrie calculée est similaire à celle calculée dans la simulation précédente.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

Du fait de la très forte perméabilité de la veine de sable, les débits de débordement sont importants. Au maximum de la crue, ils atteignent la valeur de $34,91 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{m}$ linéaire de digue et un volume global de $150 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire de digue.

3.10. SIMULATION D'UNE CRUE CINQ CENTENNALE DE LA LOIRE SUR LE PROFIL 3

La digue du Profil 3 est une digue sans renforcement. La position et les dimensions de la digue sont représentées sur la figure 19.

3.10.1. Le maillage

- sur l'axe des X : 42 colonnes de 50 m + 1 colonne de 30 m + 40 colonnes de 1 m + 1 colonne de 30 m + 8 colonnes de 50 m (total : 92 mailles pour une largeur de 2 600 m) ;
- sur l'axe des Z : 46 lignes (couches) de 0,5 m de 60 à 83 m NGF.

Nombre total de mailles : $92 \times 46 = 4\,232$.

3.10.2. Position et dimensions de la digue

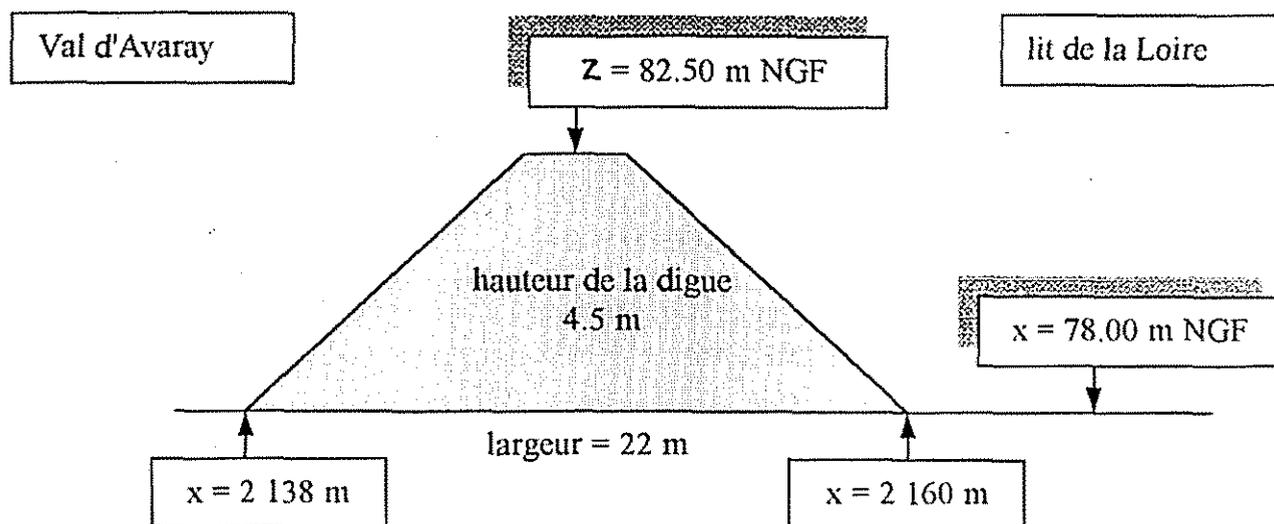


Fig. 19 - Position et dimensions de la digue au droit du profil 3

3.10.3. Les paramètres hydrodynamiques utilisés dans le modèle

Milieu	Perméabilité (en 10^{-5} m/s)	Coefficient d'emmagasinement (%)
Corps de la digue	3	1
Limons et argiles	0,5	5
Sables et graviers	20	5
Calcaires d'Étampes	1	5

Tableau 21 - Perméabilités et coefficients d'emmagasinement affectés aux différents niveaux géologiques du Profil 3

3.10.4 - Les conditions hydrauliques initiales en régime permanent

Le régime permanent de la nappe correspond à une situation qualifiée de moyenne avec les conditions hydraulique suivantes, pour le potentiel imposé aux limites :

- Coteau de Beauce : situation des basses eaux de 1982 + 1m, soit 75,90 m NGF
- Vallée de la Loire : module, soit 73,86 m NGF
- Recharge de 10 mm/mois soit 120 mm/an.

3.10.5. Simulation P3S1 : Etude de la simulation de référence

Objectif de la simulation : calcul de la remontée de nappe dans le val et des débits d'infiltration à la suite d'une crue de la Loire.

Les résultats sont présentés ainsi :

- Piézométrie de la nappe : annexe 4, figures A4.14 et A4.15
- Débit de débordement dans le val : annexe 5, figure A5.9.

1) Du point de vue de la piézométrie de la nappe

La piézométrie est similaire aux précédentes. Elle est contrainte par les cotes de débordement des points bas situés dans la Val d'Avaray.

2) Du point de vue des débits de débordement de la nappe

On voit apparaître un débit de suintement sur le parement aval de la digue qui est dû à la perméabilité supérieures aux simulations de référence précédentes du corps de la digue.

4. Stabilité géotechnique

L'étude de diagnostic de la stabilité géotechnique des digues a déjà fait l'objet d'une littérature abondante, que ce soit de manière générale ou plus spécifiquement concernant les levées du val d'Avaray. Une synthèse concernant la méthodologie optimale pour le diagnostic des digues de la Loire Moyenne à sec et en crue a notamment été établie par l'ISL et le CEMAGREF en juillet 1998.

Le volet géotechnique de cette étude a donc simplement pour but, à partir des documents existants disponibles pour les levées du Val de Loire ou plus spécifiquement de celles du Val d'Avaray :

- de rappeler la méthodologie générale à suivre en termes de stabilité géotechnique ;
- d'examiner, parmi tous les postes qu'il conviendrait de prendre en compte de façon exhaustive un point particulier, le phénomène de renard, à la lumière des résultats acquis lors des modélisations hydrodynamiques présentées au chapitre 3.

4.1. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Le rappel de la méthodologie à suivre en termes de stabilité géotechnique des digues s'appuie sur la nombreuse littérature existante à ce sujet, résultant notamment d'études menées par des bureaux d'études au niveau de certains tronçons de digues de la Loire Moyenne.

4.1.1. Phénomènes à prendre en considération

De manière générale, (c'est-à-dire sans se référer aux ouvrages du val d'Avaray et encore moins aux particularités de telle ou telle levée, comme des renforcements ou dispositions constructives spécifiques), les **phénomènes principaux** à prendre en compte en termes de **stabilité géotechnique de digues** sont les suivants :

- la **surverse** : déversement par-dessus la digue, lorsque la crue est suffisamment importante. Ce phénomène grave qui conduit d'abord à une érosion des matériaux du **talus aval**, aboutit fréquemment à un endommagement définitif de l'ouvrage sur une certaine longueur, donnant lieu à la formation de brèches. Il y a souvent création d'une vaste cuvette côté val, qui peut atteindre plusieurs mètres de profondeur et une superficie importante ;
- la **présence de résurgences** dans le talus aval qui est liée d'une part à la perméabilité plus ou moins forte de la digue, à sa saturation progressive au cours de la crue et d'autre part aux écoulements transitant en son sein. En particulier, en fin de saturation de la levée lors d'une crue, l'existence de résurgences peut conduire à des **glissements** (si le talus aval est trop pentu), et/ou à des phénomènes de **renard** par augmentation des gradients hydrauliques jusqu'à des valeurs critiques, à partir desquelles le matériau constituant la digue est entraîné, avec érosion régressive. Il

s'ensuit une déstabilisation générale du pied de digue qui peut provoquer la ruine de cette dernière. C'est ce qu'on appelle la « rupture hydraulique » ;

Le phénomène de boulangement peut aussi se produire en pied de talus, non plus seulement à cause des écoulements à travers la digue mais aussi du sol de fondation ; ceci peut être aggravé par la présence de fossés en pied de talus aval ou par des perméabilités différentielles (sol superficiel peu perméable, sol sous-jacent plus perméable). Dans ces cas, des variations supplémentaires de charge hydraulique ou de pressions interstitielles sont produites ; ces anomalies de constitution peuvent être localisées, ce qui les rend difficiles à identifier ;

- la réduction de la stabilité de la digue: celle-ci apparaît lorsque des alluvions très perméables sont sous-jacentes à des formations et à une digue relativement beaucoup moins perméables. Cette configuration conduit momentanément à un développement de surpressions interstitielles au sein de ces alluvions, sous digue, qui débiteraient avant les écoulements dans la digue. Il s'agit donc cette fois-ci de stabilité d'ensemble à court terme ;
- le phénomène dit « de retour » : à la décrue, par vidange rapide, le talus amont est soumis à des écoulements, cette fois-ci côté Loire, et à des surpressions interstitielles pouvant affecter sa stabilité (glissement) ;
- l'érosion ou l'affouillement du talus amont ou du pied de talus (dans le sol de fondation), par des courants, en fonction notamment de leur vitesse, de la granulométrie et de la cohésion des sols. La butée de pied est alors progressivement supprimée, avec recul induit du pied de talus et possibilité d'érosion régressive ;
- la réduction des caractéristiques géotechniques des sols due à l'évolution des matériaux dans le temps (pourrissement de souches ou végétaux sous forme d'une consolidation secondaire, ou évolution de sols carbonatés,...), voire existence de galeries (animaux fouisseurs,...), avec entraînement de particules et possibilité d'érosion régressive.

4.1.2. Les principaux moyens d'analyse de stabilité et de protection

La surverse est directement fonction de la cote de la crue relativement à celle de la digue, et se traite donc par rehausse des ouvrages, de manière à obtenir une revanche suffisante. L'autre solution est le déversoir amont.

En-dehors des protections relatives aux parements proprement dits (enrochement, empierrement,...) et en mettant de côté les problèmes spécifiques :

- d'affouillements de talus ou de pied de talus par érosion due aux courants ;
- de diminution des caractéristiques géotechniques dans le temps (consolidation secondaire, évolution de certains sols carbonatés, animaux fouisseurs,...) ;
- de réduction momentanée de la stabilité d'ensemble de la digue, dans le cas d'une configuration particulière (cf. § précédent),

des moyens divers de protection sont aptes à traiter les trois problèmes restants, à savoir les stabilités amont et aval et les phénomènes de renard :

- L'examen de l'occurrence de décrues rapides et les calculs de stabilité au glissement déterminent les éventuelles dispositions à prendre vis-à-vis du talus amont.

- La connaissance du point d'émergence de la ligne d'eau sur le talus aval et des débits associés, pour les différentes hypothèses de crue, est essentielle pour dimensionner des massifs et réseaux drainants. Ces aménagements sont destinés à éviter les phénomènes de glissements du talus aval (qu'on évalue par calculs de stabilité), et de renards (calculs de gradients critique). Vis-à-vis de ces deux phénomènes, il est fait appel en général à deux grands types de méthodes de renforcement : le drainage ou l'étanchement.

Concernant le drainage aval, souvent composé d'un massif drainant, d'un tapis et de filtres anti-contaminants aux interfaces (conditions de filtre à vérifier), ainsi que de puits de décharge, il s'agit d'éviter :

- les résurgences, par rabat des lignes de courant (augmentation de la stabilité au glissement du talus aval) ;
- les renards, par diminution des gradients (puits de décharge), ou effet de surcharge du massif qui s'oppose aux écoulements verticaux ascendants.

Concernant l'étanchement (du corps de la digue et/ou sous cette dernière), il s'agit essentiellement d'allonger les lignes de courant, donc de diminuer le gradient à l'aval, et de réduire la perméabilité, donc les débits de fuite. Ceci peut se faire par exemple par rideau de palplanches, injection ou paroi moulée, voire par compactage en place. Côté amont, une géomembrane (masque étanche) plus ou moins étendue peut être envisagée.

Ajoutons en outre que les éventuels déversoirs, une fois leur seuil de déclenchement dépassé, sont de nature à limiter les phénomènes de renard par réduction du différentiel de charge entre les côtés Loire et val.

4.1.3. Les reconnaissances et études préalables à mettre en œuvre

On peut citer :

- un examen visuel détaillé et systématique des levées, ainsi qu'une consultation et une mise à jour des archives : historique des crues et des dégâts provoqués, géométrie (notamment l'épaisseur des levées, qui a son importance en termes de résurgence, les pentes pour la stabilité, la hauteur pour la surverse) ; présence de laisses de crue, de brèches, d'affouillements de fissures, d'affaissements, de terriers, de fuites et zones humides ; aspect général ; état des parements (présence ou non de protections correspondantes, végétation,...) ; proximité côté amont avec les lits majeurs et mineurs ; ouvrages hydrauliques (déversoirs,...) et moyens de protection existants (massifs drainants, filtres, palplanches, injections,...). Cet état de référence doit être ensuite régulièrement actualisé, notamment après chaque épisode de crue, qu'il soit faible mais répétitif ou important ;
- données topographiques précises (profils en travers réguliers, quelques profils en long) ;
- reconnaissances géotechniques systématiques afin d'apprécier l'homogénéité de constitution des levées et du sol de fondation, et de les regrouper en tronçons homogènes : granulométrie des sols, perméabilité, degré de compacité,... Ces

paramètres conditionnent l'apparition de résurgences dans ou sous le talus aval, et l'érosion des parements (notamment pour les sols non ou peu cohésifs). Sont souvent utilisés :

- les méthodes géophysiques, notamment électrique, électromagnétique (en continu, radio-magnéto-tellurique -R.M.T.-, ou par points), géoradar,... Elles sont d'un bon rendement sur le terrain et d'un coût limité ; elles doivent s'accompagner d'étalonnage par sondages à la tarière mécanique ou carottages. Elles permettent aussi d'implanter judicieusement les autres reconnaissances et éventuellement, selon les techniques, de repérer des vides ;
 - les essais in situ, comme les pénétromètres statiques ou dynamiques, bien adaptés pour détecter des anomalies de compacité ou de nature de matériaux, compte tenu de leur rapidité de mise en oeuvre et de la fréquence de mesure en fonction de la profondeur ; le pressiomètre peut également être envisagé en complément, notamment au niveau des ouvrages hydrauliques. Les essais de perméabilité en place ont un grand intérêt, ceux réalisés au laboratoire sur des échantillons ayant souvent une représentativité beaucoup plus limitée ;
 - les essais en laboratoire, d'une part d'identification (granulométries/sédimentométries, limites d'Atterberg, valeurs au bleu de méthylène, teneurs en eau, poids volumiques secs et humides, teneurs en matières organiques, en carbonates...), d'autre part de résistance au cisaillement (pour mesurer la cohésion et l'angle de frottement nécessaires aux études de stabilité). Les essais oedométriques peuvent également apporter des compléments utiles (évolution de la perméabilité en fonction de l'état de consolidation,...) ;
 - la mise en place et le suivi de piézomètres.
- l'analyse hydrogéologique vient ensuite. En plus de son propre apport, elle tire notamment partie des données géotechniques précédentes pour, en fonction des crues attendues, isoler des zones homogènes d'un point de vue des lignes d'eau, des débits et des incidences côté val en fonction du contexte hydrogéologique local et des aménagements spécifiques (déversoirs avec alimentation du val, présence de tapis filtrants,...).

La stabilité géotechnique est examinée en fonction de l'ensemble des résultats acquis jusqu'alors (reconnaisances géotechniques et modélisations hydrogéologiques).

4.1.4. Objectif méthodologique

En tout état de cause, concernant le volet géotechnique de la présente étude, il ne s'agit pas de caractériser le risque, ni la vulnérabilité, mais l'aléa. La probabilité d'occurrence à considérer pour le phénomène « rupture de levée par remontée de nappe » est celle correspondante à la période de retour de la crue prise en hypothèse dans la modélisation hydrogéologique, et l'on examine succinctement la susceptibilité de quelques profils particuliers au phénomène de renard.

Ce phénomène semble en effet le moins abordé dans la bibliographie dédiée aux digues du val de Loire, les autres ayant fait l'objet d'approches successives approfondies (étude des cercles de rupture du sol selon la méthode de Bishop et calcul de coefficients de sécurité à l'aide des logiciels TALREN de Terrasol ou ANSTAB, description de

l'évolution des charges hydrauliques en régime permanent et transitoire au sein de la levée à l'aide du logiciel SEEP/W développé par GEOSLOPE (Canada)).

4.2. MÉTHODE DE CALCUL

4.2.1. Calcul du gradient critique (effet de Renard)

Pour un sol donné de poids volumique saturé γ_{sat} , le gradient critique vertical ascendant peut être approché par la formule suivante :

$$i_{\text{critique}} = \gamma' / \gamma_w = (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) / \gamma_w$$

avec : γ_w poids volumique de l'eau

γ' poids volumique déjaugé du matériau saturé

Le gradient critique détermine le moment où il n'y a plus aucune contrainte entre les grains, (la force d'écoulement ascendante annule celle due au poids déjaugé), et où ceux-ci se mettent à « flotter » puis à être emportés.

Si $i_{\text{réel}} > i_{\text{critique}}$, le phénomène de renard s'amorce.

Compte tenu des valeurs habituelles de poids volumique, la valeur moyenne de i_{critique} est donc voisine de 0,9 à 1.

Il s'agit donc de comparer les gradients réels, obtenus grâce au modèle et calculs hydrogéologiques réalisés, et cette valeur critique.

4.2.2. Scénarios pris en compte

Parmi les huit simulations réalisées sur les trois profils du val d'Avaray, quatre ont été examinées en terme de stabilité géotechnique dans l'optique spécifique du phénomène de renard.

Il s'agit des simulations :

- P1S1 (« état de référence » pour le profil n° 1, sans renforcement),
- P1S5 (incidence pour ce même profil de l'exploitation du lit de la Loire),
- P2S1 (« état de référence » pour le profil n° 2, avec tapis drainant),
- P2S2 (même profil avec incidence d'une veine de sable perméable sous la digue).

Pour chacune de ces quatre simulations, le logiciel MARTHE fournit autant de fichiers « résultats » que de pas de temps de calcul, (soit 12 en général, selon le pas choisi dans le cadre de cette étude pour représenter l'évolution de la crue). Le pas de temps n° 5 a été retenu, correspondant à une ligne d'eau maximale à l'amont de la digue, donc à un gradient entre l'amont et l'aval de la digue statiquement maximal.

De ces quatre fichiers « résultats » de MARTHE, ont été conservées pour l'approche géotechnique les seules coordonnées X et Y du centre de chacune des mailles du modèle avec la valeur de la charge hydraulique assignée. Le gradient vertical ascendant a été

calculé pour toutes les mailles du modèle ; la valeur maximale obtenue est mise en évidence.

4.3. RÉSULTATS

Les résultats des calculs de gradient critique pour les scénarios retenus sont présentés de manière synthétique dans le tableau 22. Les valeurs des poids volumiques sec et saturé, ainsi que la teneur en eau à saturation sont extraites de l'étude du CETE Normandie Centre de 1993 concernant le renforcement des levées de la Loire sur les communes de Suèvres, Courbouzon et Avaray.

Les figures 20 à 23 indiquent les zones approximatives à gradient vertical ascendant maximal, donc les zones où un tel gradient peut générer un phénomène de renard.

Simulation	Poids volumique sec (kN/m ³)	Teneur en eau de saturation (%)	Poids volumique Saturé (kN/m ³)	Gradient critique vertical ascendant théorique (i _{critique})	Gradient vertical ascendant calculé par le modèle (i)	Centre de la maille concernée (X et Y en m)	Remarques
P1S1PT5 Digue sans Renforcement	16	24,8	20	1	1,24	X=1201.5 Y=74.25 En pied de digue, dans le sol de fondation, sous le fossé ; cf. fig. 20.	i > i _{critique}
P1S5PT5 Digue sans renforcement avec fosse d'exploitation	16	24,8	20	1	1,59	X=1201.5 Y=74.25 (idem cas P1S1PT5). Cf. fig. 21.	i > i _{critique} i P1S5PT5 > i P1S1PT5
P2S1PT5 Digue avec tapis filtrant	16,3	23,6	20,1	1	0,78	X=1677.5 Y=75.75 Interface digue/sol de fondation, un peu en retrait du pied de digue.	i < i _{critique}
	16,3	23,6	20,1	1	0,74	X=1665 Y=75.25 Sol de fondation, pied de digue. Cf. fig. 22.	i < i _{critique}
P2S2PT5 Digue avec tapis filtrant et veine de sable sous la levée	16	24,8	20	1	0,22	X=1691.5 Y=76.75 Au sein de la digue. Cf. fig. 23.	i < i _{critique}

Tableau 22 - Résultats du calcul du gradient critique pour 4 simulations hydrodynamiques et pour la ligne d'eau maximale dans la levée

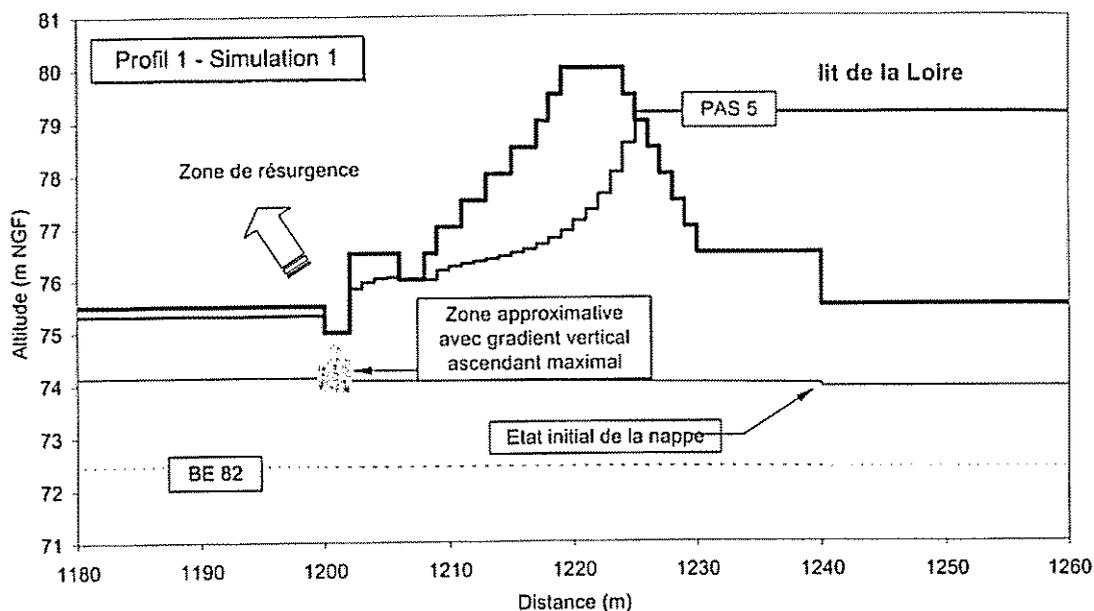


Fig. 20 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 1, simulation 1, pas de temps 5 (PIS1PT5) [Digue sans renforcement, avec fossés en pieds de levée]

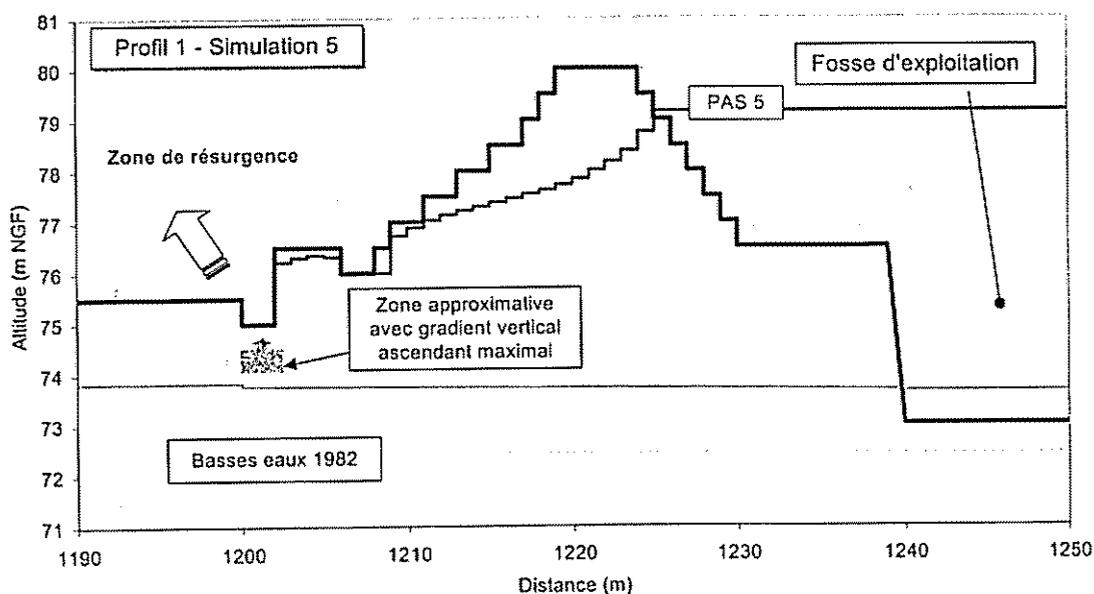


Fig. 21 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 1, simulation 5, pas de temps 5 (PIS5PT5) [Digue sans renforcement avec fossés en pieds de digue et une fosse d'exploitation dans le lit de la Loire]

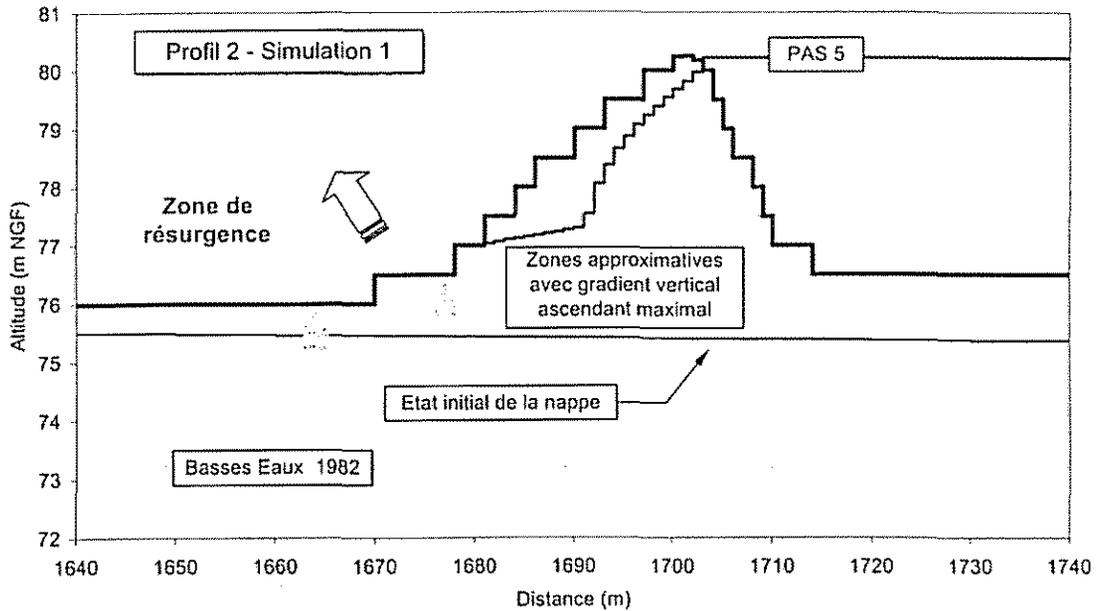


Fig. 22 - Zones approximatives avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 2, simulation 1, pas de temps 5 (P2S1PT5) [Digue avec tapis filtrant et sans fossés en pieds de levée]

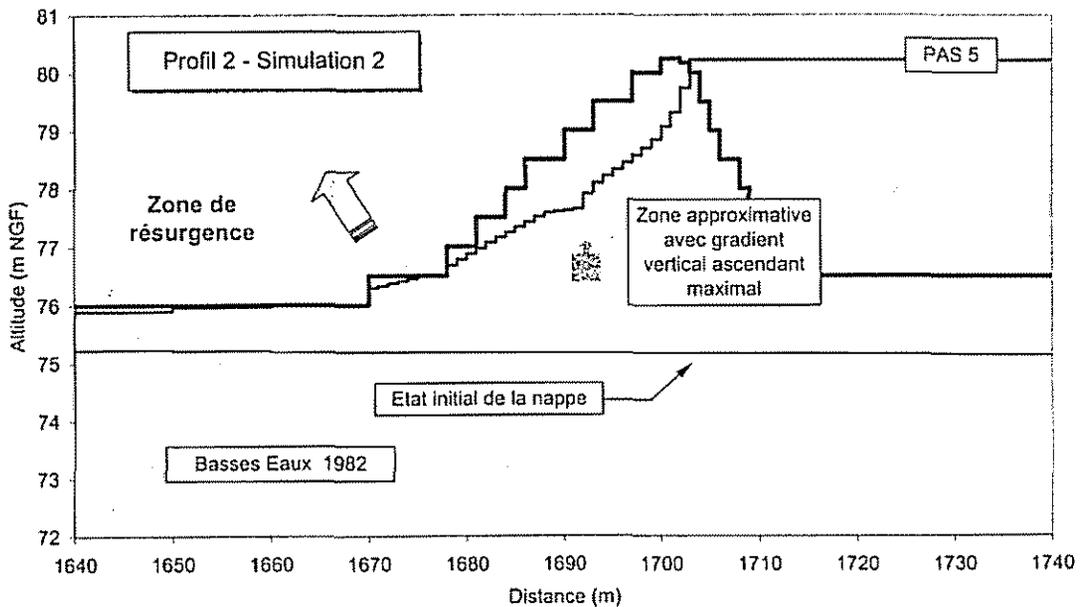


Fig. 23 - Zone approximative avec gradient vertical ascendant maximal ; profil 2, simulation 2, pas de temps 5 (P2S2PT5) [Digue avec tapis filtrant et une veine sableuse sous la levée]

4.4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les constats principaux sont les suivants :

- les deux simulations étudiées sur le profil P1 conduisent à des gradients verticaux ascendants calculés **localement largement supérieurs** au gradient critique estimé ; les valeurs sont respectivement de 1,24 (P1S1 - Digue sans renforcement et avec fossés côté val) et de 1,59 (P1S5 - Digue sans renforcement, avec fossés côté val et fosse d'exploitation de matériaux meubles côté Loire), pour un gradient critique de 1.
- De telles valeurs indiquent que les conditions prises en compte **peuvent a priori générer un phénomène de renard avec érosion régressive** ;
- la simulation P1S5 de la digue sans renforcement avec fossés côté val et avec exploitation côté Loire de la digue conduit à un résultat plus défavorable que la simulation P1S1 du même type de digue sans exploitation. Cependant, les cas P1S1 et P1S5 diffèrent également quant au type de crue pris en compte (crue de longue durée pour P1S5, avec longue période de hautes eaux de la Loire) ; la comparaison est donc partiellement faussée. Il faut par contre garder en tête que des crues de longue durée mais de moindre hauteur peuvent conduire à des remontées de nappe comparables ;
- par comparaison, les simulations P2, (avec une digue renforcée par un tapis filtrant et sans fossés côté val), aboutissent à des gradients toujours inférieurs au gradient critique. Cependant, il faut garder à l'esprit que les simulations P2 ne sont pas directement comparables aux P1. D'une part, seules les configurations P1S1 et P2S1 peuvent être théoriquement comparées ; de plus, même si les caractéristiques géométriques et géotechniques sont globalement proches, la configuration P1 présente la différence notable d'une présence défavorable de 2 fossés en pied de digue. Ainsi, si le tapis filtrant a pour effet de réduire le gradient critique au sein de la digue, on peut penser qu'il pourra certainement avoir un effet positif sur le gradient au niveau des fossés en le diminuant.
- les profils P1 et P2 correspondent tous deux à la situation défavorable d'un sol de fondation superficiel moins perméable que les sols sous-jacents ;
- la présence d'une veine de sable sous la digue (P2S2) fait notablement diminuer le gradient maximal, qui se déplace au sein de la digue, par rapport au cas P2S1 ;
- les zones à gradients verticaux ascendants sont en général localisées à proximité du pied de digue.

Ces résultats sont en concordance avec les résultats des études géotechniques antérieures réalisées au niveau des levées domaniales de la Loire moyenne : résurgences au pied de la digue, apparition du phénomène de renard sous la levée lorsque le sous-sol est perméable et dans la levée lorsque le sous-sol est imperméable, en pieds de digue ou en flanc de talus lors de la présence de sables fins.

Lors des études de diagnostics concernant des levées domaniales particulières de la Loire, les résultats des simulations des écoulements au sein de la digue par paramétrisation des perméabilités de la levée et de son type (présence de terrier, de mare en pieds aval de la digue et érosion en pied amont de la digue) ont donné des gradients critiques avec risque de renard soit au pied de digue aval (Levée de St-Firmin-sur-Loire (Rapport ANTEA A06236 juin 1996), soit au sein de la digue pour le cas extrême de la digue comprenant un terrier, une mare et une érosion en pied amont, avec une perméabilité comprise entre $5 \cdot 10^{-5}$ et 10^{-4} m/s (Levée d'Amboise, Hydratec R 13398/sp, août 1997).

Si les simulations testées dans le cadre de cette étude ont permis de voir l'influence d'une veine sableuse de perméabilité plus forte sous la levée, les contrastes de perméabilité entre les matériaux de la digue et le sous-sol n'ont pas permis de confirmer l'apparition du phénomène de renard dans le levée lorsque le sous-sol est de plus faible perméabilité que la levée. Pour les profils 1 et 2, la perméabilité de la digue est comprise entre 1 et $0.2 \cdot 10^{-5}$ m/s et celle du sous-sol de $0.2 \cdot 10^{-5}$ pour les limons, 1 à $3 \cdot 10^{-4}$ m/s pour les sables et de $1 \cdot 10^{-5}$ m/s pour les calcaires sous-jacents.

5. Synthèse des approches hydrodynamique et géotechnique – caractérisation de l'aléa « rupture par remontée de nappe »

5.1. APPROCHE HYDRODYNAMIQUE

Il ressort de la modélisation réalisée sur le Val d'Avaray une série d'enseignements relatifs à la compréhension des mécanismes de propagation d'une crue de la Loire dans le Val. Cette modélisation permet d'évaluer les facteurs principaux qui interviennent dans les phénomènes de remontée de nappe, et de calculer la piézométrie et les débits de débordement de la nappe dans le Val.

5.1.1. Les mécanismes de propagation d'une crue de la Loire dans l'aquifère

Une crue exceptionnelle de la Loire se traduit par l'existence d'une onde de pression qui va se propager dans l'aquifère jusqu'à un régime permanent. La piézométrie de ce régime permanent, dans le cas du Val d'Avaray, correspond à une ligne d'eau dont l'amont est situé au pied de la digue, sur sa partie Val d'Avaray, et l'aval est situé dans le cours d'eau de la Tronne. Le gradient hydraulique de la nappe, pour ce régime permanent de crue, est déterminé par les altitudes respectives de la cote au sol du pied de la digue, et de la cote du lit de la Tronne (ou plus exactement de la ligne d'eau de ce cours d'eau). Les infiltrations dans l'aquifère trouveront leurs exutoires d'une part au pied de la digue (la plus grande partie du débit) et dans le cours d'eau de la Tronne.

La vitesse de propagation de l'onde de pression dépendra de la diffusivité de l'aquifère (rapport T/S , avec $T = K * e$). Les débits aux exutoires dépendront principalement de la perméabilité de l'aquifère, mais aussi de son coefficient d'emmagasinement, et de la différence de niveau entre l'altitude de la Loire et les altitudes respectives du pied de la digue et du lit de la Tronne.

Les mécanismes de remontée de nappe, au cours d'une crue exceptionnelle de la Loire, sont présentés sur la figure 24.

La figure 25 permet d'illustrer les mécanismes de propagation de l'onde de pression de la digue vers le val pour 4 valeurs de diffusivité.

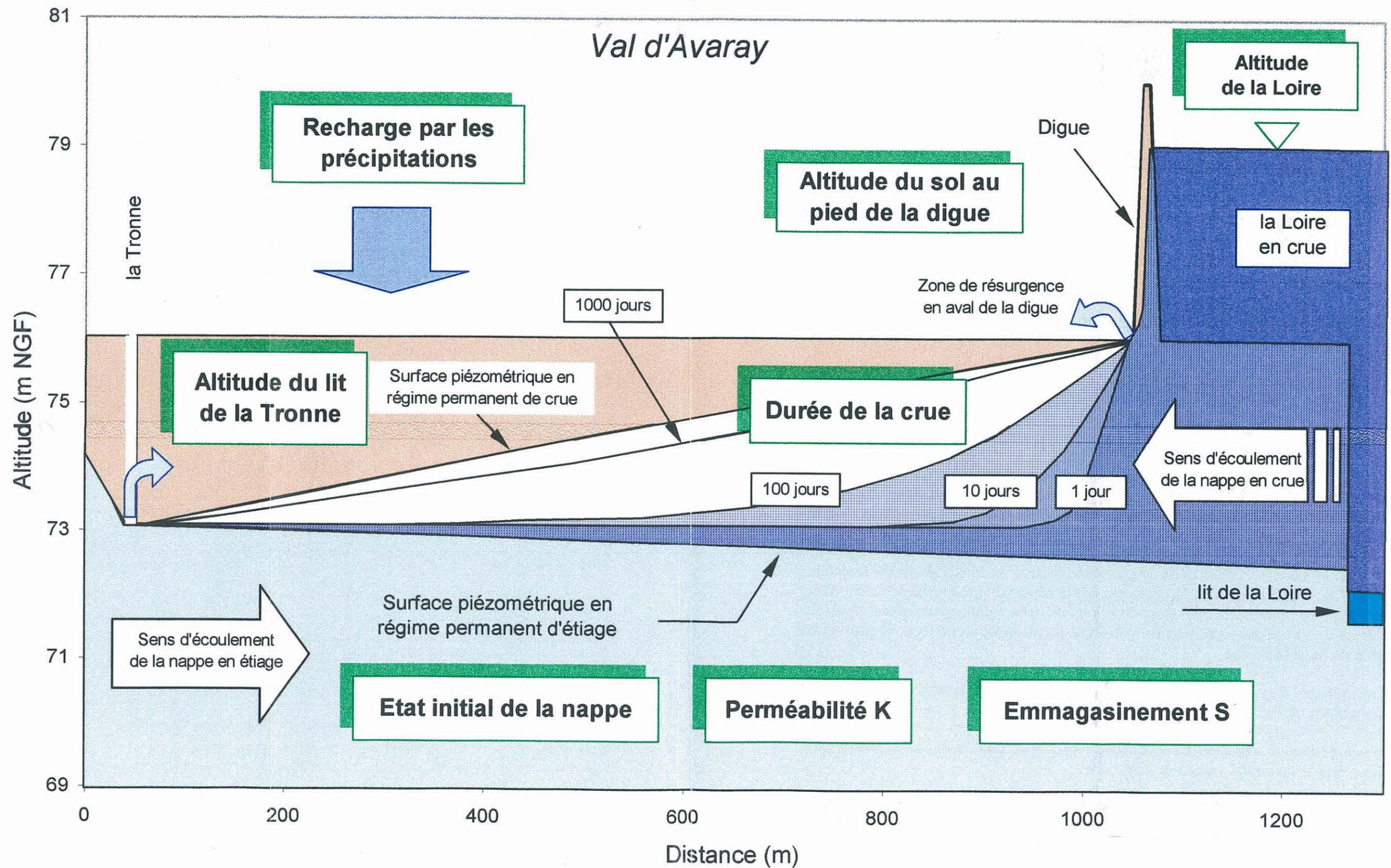
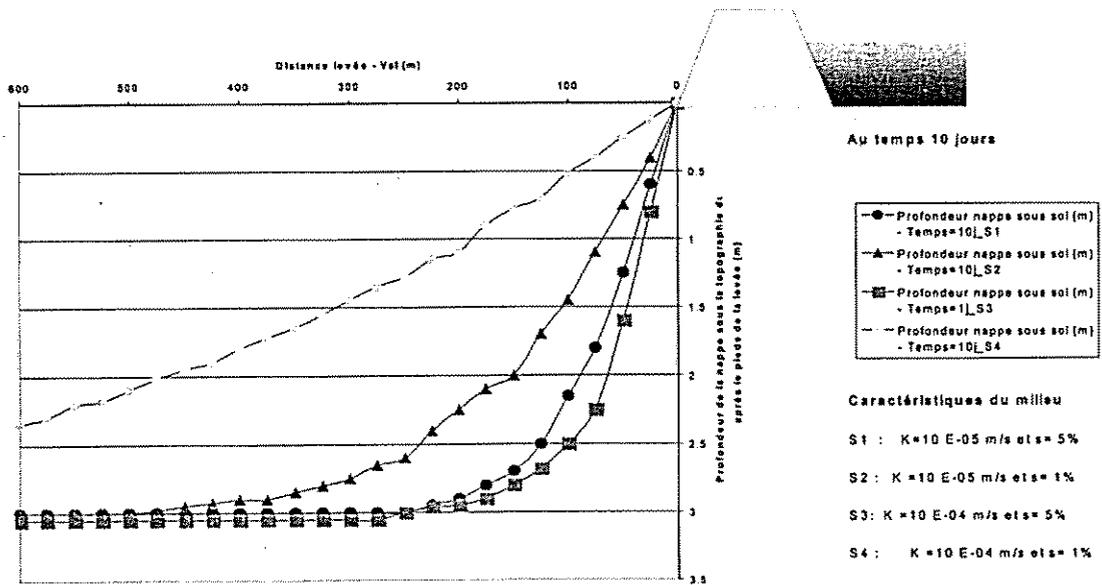
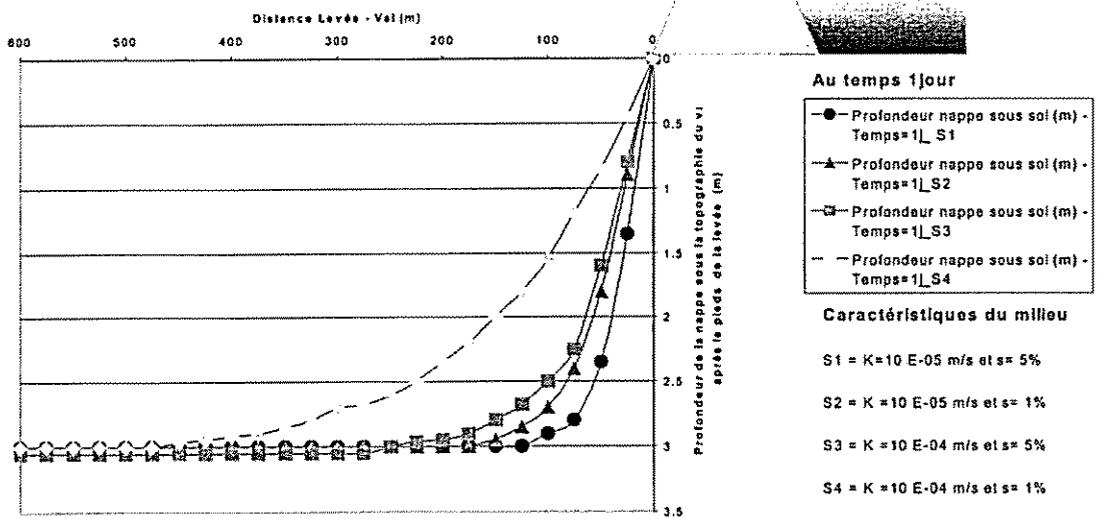


Fig. 24 - Schématisation des phénomènes de remontée de nappe lors d'une crue exceptionnelle de la Loire et inventaire des facteurs principaux intervenants lors d'une crue

Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe



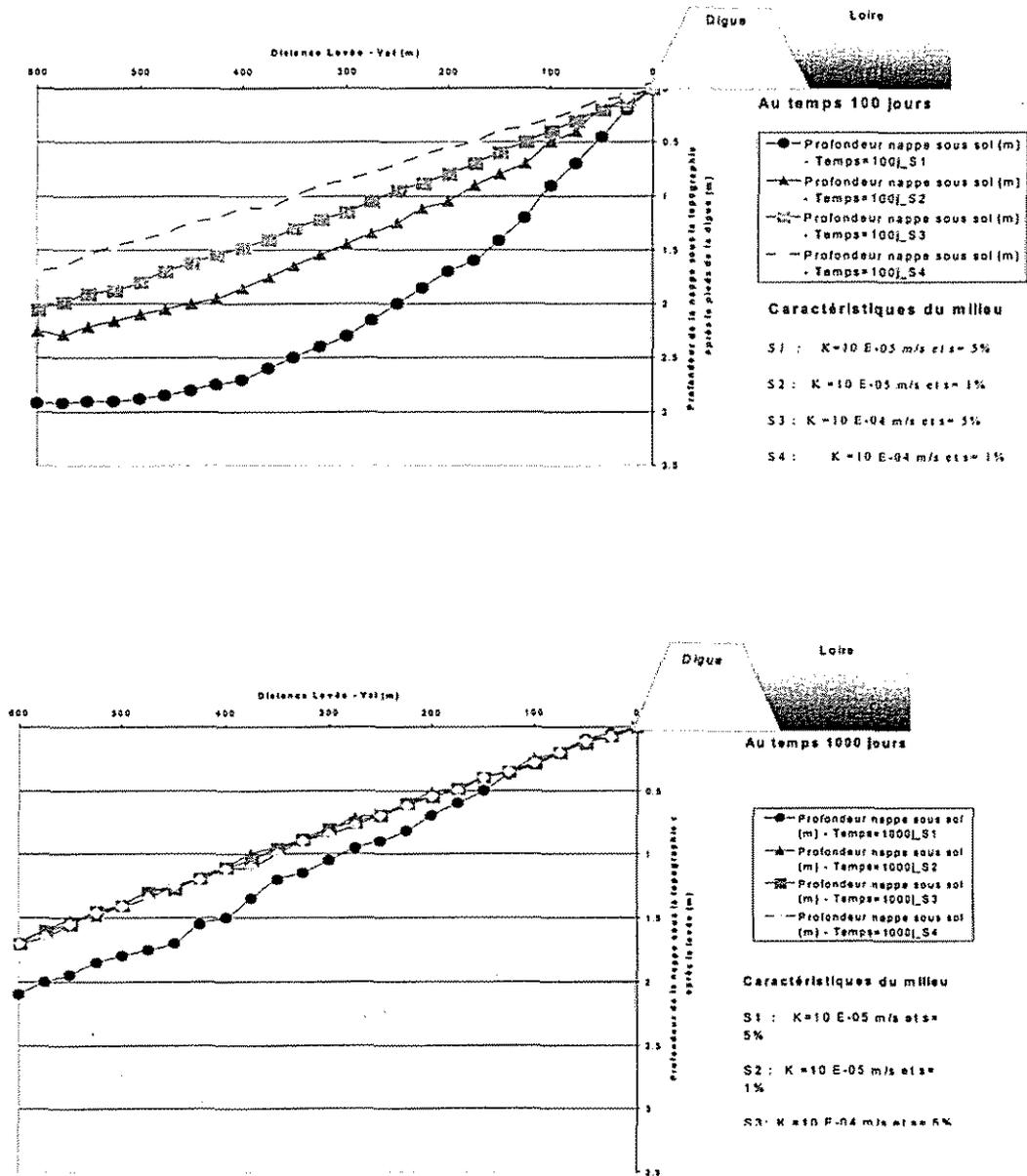


Fig. 25 - Représentation de l'évolution au cours du temps (Temps T = 1 jour à 1000 jours) de la propagation d'une onde de crue dans une nappe alluviale en s'éloignant de la levée vers le val pour 4 cas pour lesquels les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère considéré comme homogène varient

A partir de ces simulations sur des profils simplifiés où d'une part la topographie du val est considérée comme plane et d'autre part l'aquifère est considéré homogène, les observations suivantes peuvent être faites :

- A plus de 100 m de la levée, pour une petite diffusivité (de 10^{-6} m/s à 10^{-5} m/s), la nappe est située à une profondeur supérieure à 2,0 m, 10 j après la crue. Un jour après la crue, la nappe est à sa profondeur maximale à une distance de 150 mètres de la levée pour les situations à diffusivité comprise entre 10^{-6} m/s à $2 \cdot 10^{-5}$ m/s ; après 10 j, la nappe est à cette cote pour ces conditions à plus 400 m de la digue. Alors qu'après 100 j, la nappe est située à moins d'un mètre sous la surface quelque soit la diffusivité. Si cette dernière est égale à 10^{-4} m/s, la nappe est à quelques 20 cm du sol.

Ces graphiques permettent de mettre en évidence la sensibilité du système à la remontée de nappe en fonction des conditions hydrodynamiques. Il faut cependant éviter toute généralisation à partir de ces exemples simplifiés et se garder d'en tirer des conclusions hâtives sur les éventuelles remontées de nappe à telle ou telle distance dans un val donné en utilisant une seule valeur mesurée de perméabilité et de coefficient d'emménagement. L'hétérogénéité des formations et de leur caractéristiques hydrodynamiques ne permet pas de réduire l'étude de la remontée de nappe en prenant en considération qu'une seule valeur pour tout l'aquifère ou pour la digue.

5.1.2. Les résultats des simulations réalisées

La remontée de la nappe est effective principalement dans le voisinage de la digue. Selon la configuration de la topographie du côté val, une remontée de nappe peut également avoir lieu au centre du val (ex : Profil 3). Le niveau piézométrique remonte rapidement jusqu'à la surface du sol et donne lieu à un débit de débordement dont les principaux résultats sont rappelés ci-dessous.

Profil	Débit de pointe (m ³ /jour/m linéaire de digue)	Volume débité en 30 j (m ³ /m linéaire de digue)
1	2	7
2	7	33
3	2,5	7

Tableau 23 - Débits de pointe et volumes débités en 30 j sur les Profils 1, 2 et 3 pour les simulations de référence

Les différents scénarios étudiés montrent que ces débits et ces volumes peuvent être plus élevés en fonction des situations rencontrées :

- pour une crue de longue durée (30 j) sur le Profil 1, les volumes débités passent de 7 à 12 m³/mètre linéaire de digue ;
- l'existence d'une veine de sable sur le Profil 2 engendrerait des débits de pointes égaux à 35 m³/jour/m linéaire de digue et des volumes débités égaux à 150 m³/mètre linéaire de digue en 40 jours.

Pour une crue de référence (Débit de temps de retour 500 ans), le débit de débordement aux exutoires côté val varie entre $8,5$ à 30 m^3 par jour pour 100 m de digue à évacuer, pour des configurations de digues avec ou sans renforcement et tapis filtrant.

Pour une crue de longue durée (30 j) sur une levée sans renforcement et avec fossés du côté val, les volumes débités passent de 30 à 50 m^3 par jour pour 100 m de digue à évacuer.

A noter que l'existence d'une veine de sable sous une levée avec tapis filtrant engendrerait des débits de pointes égaux à 145 m^3 par jour pour 100 m de digue et des volumes de débits égaux à 625 m^3 par jour pour 100 m de levée.

5.2. SYNTHÈSE DES APPROCHES HYDRODYNAMIQUES ET GEOTECHNIQUES

Parmi les huit simulations réalisées sur les trois profils du val d'Avaray, quatre ont été examinées en terme de stabilité géotechnique et plus particulièrement pour tester l'occurrence du phénomène de renard.

Les configurations des digues suivantes ont été étudiées :

- digue sans renforcement avec présence de fossés du côté du val,
- digue de même type mais avec en plus une exploitation de graviers au niveau du lit de la Loire,
- digue avec renforcement (tapis filtrant), mais sans fossé côté val,
- digue avec renforcement et une veine de sable perméable sous la digue.

A partir des simulations hydrodynamiques et du calcul du gradient critique sur la ligne d'eau maximale sur les différentes configurations de digues rappelées ci-dessus, les observations suivantes peuvent être faites :

- Du point de vue hydraulique, la présence de fossés au pied de digues non renforcées conduit à des débits de débordement moindres que pour des digues avec tapis filtrant. Du point de vue de la stabilité des digues, l'existence des fossés au pied des levées quelles qu'elles soient conduit à la présence de gradients critiques au niveau du fossé ou des fossés qui peuvent a priori générer un phénomène de renard avec érosion régressive. A noter que la présence d'une exploitation de graviers du côté Loire de la digue, conduit à un résultat plus défavorable que sans uniquement en ce qui concerne l'occurrence d'un phénomène de renard.
- Les simulations pour les digues renforcées avec tapis filtrant aboutissent à des gradients toujours inférieurs au gradient critique. La présence de fossés en pied de digue étant également un élément favorable à la genèse d'un phénomène d'instabilité par renard, l'absence de tapis filtrant n'est donc pas seule en cause pour expliquer l'augmentation du gradient maximum pour une digue non renforcée avec fossés côté val par rapport à une digue renforcée sans fossé. Du point de vue des

débits de débordement, ceux-ci sont plus importants à cause de l'effet drainant du tapis.

- La présence d'une **veine de sable sous la digue** fait notablement **diminuer le gradient maximal**, qui se déplace au sein de la digue, par rapport au cas de la digue renforcée avec tapis filtrant. Par contre, les débits de débordement sont importants à cause de la forte perméabilité de la veine de sable sous la digue.
- Il faut remarquer que les **zones à gradients verticaux ascendants** sont en général localisés à **proximité du pied de digue**.

En raison des simplifications des modélisations hydrodynamiques, (notamment concernant l'anisotropie de perméabilité des sols et la représentativité locale compte tenu des hétérogénéités géométriques dans la répartition des couches), il faut souligner les limites suivantes de l'approche géotechnique :

- les hétérogénéités sont essentielles du point de vue du phénomène de renard, qui peut être relativement localisé en terme de zone de déclenchement. On a vu par exemple l'influence notable que peut avoir la présence d'une veine sableuse ;
- outre le gradient critique, la granulométrie et la nature des matériaux est importante. En effet, la probabilité d'entraînement des grains est d'autant plus élevée qu'ils sont de petit diamètre et qu'ils sont moins « collés » les uns aux autres par la cohésion. Ce facteur n'est pas pris en compte dans l'approche menée. Cependant, la description fournie des sols situés en pied de digue, (limons sablonneux à argileux), est défavorable de ce point de vue ;
- la cohésion complémentaire due à la présence de systèmes racinaires en surface du pied de digue peut améliorer la stabilité locale au renard (effet de peau) ;
- enfin, l'approche n'a pas pris en compte les longueurs de cheminement verticaux et horizontaux.

Du point de vue de l'instabilité par « renard », le cas le plus défavorable pourrait être le cas d'une digue sans renforcement et sans tapis filtrant, mais avec un ou deux fossés du côté val. A contrario concernant les débits de débordement, c'est le cas d'une digue avec renforcement et tapis filtrant qui serait le plus défavorable.

La proximité des pieds des levées et des fossés est le lieu d'une part des débits de débordement à gérer et d'autre part des possibles rupture de digues par « renard ».

Afin d'éviter des généralisations simplificatrices, il est nécessaire de garder à l'esprit que notamment l'anisotropie de perméabilité du système -levée et aquifère- ainsi que la configuration topographique peuvent influencer localement positivement ou négativement l'importance des débits de débordement d'une part et d'autre part, la genèse du phénomène de « renard ».

5.3. LES FACTEURS PRINCIPAUX QUI DÉTERMINENT LES REMONTÉES DE NAPPE ET LEURS CONSÉQUENCES SUR L'INSTABILITÉ DES LEVÉES

Les facteurs principaux qui déterminent les remontées de nappe, et qui ont été identifiés aux cours des différentes simulations sont les suivants :

- 1) La géologie et la géométrie de l'aquifère (nature et épaisseur des formations géologiques). A partir de la connaissance de la géologie régionale et des travaux de recherche antérieures ainsi que des opérations de service public du BRGM, avec notamment la constitution du base de données des forages sur les vals de la Loire de Nevers à Angers (plus de 1 500 points inventoriés), l'épaisseur moyenne des alluvions constituant l'aquifère alluvial est de 7 m. Due à une forte variation d'épaisseur, passant du simple au double sur l'ensemble des vals le long du cours de la Loire, l'épaisseur peut dépasser 15 à 25 m en particulier d'Orléans à Châteauneuf. A noter qu'en amont d'Orléans, les variations d'épaisseur sont accentuées due à l'existence de morphologies karstiques sous-jacentes (poche ou goulet de 1 à 10 m de diamètre en général). Lorsque le substratum est calcaire, une couche argileuse d'altération est présente entre les sables alluviaux et le substratum. Les sables alluviaux comportent des hétérogénéités plus ou moins importantes marquées par d'anciens chenaux comblés par des sédiments fins. Très souvent, les formations sableuses (sables fins à sables et graviers) sont surmontées de formations argilo-limoneuses liées aux conditions de dépôt de type fluviales.
- 2) La perméabilité qui est variée entre 10^{-3} à 10^{-6} m/sec et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère compris entre 5 et 10 %.
- 3) La topographie du Val avec la position et l'altitude des exutoires (résurgence au pied de la digue, lit des cours d'eau et fossés).
- 4) Les caractéristiques de la crue de la Loire: durée et altitude de la Loire en période de crue. Les crues représentant un intérêt sont les crues d'une période de retour supérieure ou égale à 100 ans.
- 5) Le contexte hydrogéologique de l'aquifère : le sens d'écoulement de la nappe, la situation de la nappe en régime de Hautes Eaux, les alimentations de la nappe (pluie efficace, alimentation souterraine autre que la Loire). La présence de cours d'eau et leur importance et leur relation avec la nappe alluviale, au niveau du Val sont à considérer. Un petit affluent du type de celui de la Tronne ou un cours d'eau tel que le Cher n'aura pas le même rôle sur l'hydrogéologie du val et le phénomène de remontée de nappe conjuguée due à la Loire et au Cher) (exemple de la ville de Tours).
- 6) La connaissance des profils en travers des levées : géométrie, composition des matériaux et propriétés hydrauliques de ceux-ci (perméabilité) et géotechniques (poids volumique sec et saturé). Les digues sont généralement situées sur des reliefs en forme de bourrelets le long de la Loire, les vallons prenant place en contrebas.

A noter que l'approche méthodologique en coupe est satisfaisante pour cette problématique où les relations nappe-rivière sont principalement perpendiculaires au val. Pour des cas particuliers plus complexes du point de vue de l'organisation des écoulements dans le système à étudier, une approche 3D pourrait être nécessaire.

Conclusion et Perspectives

Des éléments méthodologiques peuvent se dégager des résultats des deux approches menées successivement dans le cadre de cette étude, dans le but de caractériser l'aléa « rupture de levées par remontée de nappes ».

Les deux approches sont complémentaires, la première -hydrodynamique- renseigne sur les modalités d'écoulements de la Loire vers le val et permet de calculer la piézométrie ainsi que les débits de débordement de la nappe dans le val et la deuxième -géotechnique- permet de calculer le gradient critique correspondant à la ligne d'eau maximale au sein de la digue et d'apprécier ainsi le risque d'apparition du phénomène de renard.

Ce dernier chapitre a pour objectif de poser des jalons pour la caractérisation de l'aléa « rupture de levées par remontée de nappe » sur la Loire moyenne : de la cartographie de ce dernier, à la cartographie de la vulnérabilité et des risques, jusqu'à des dispositifs pour une surveillance au niveau de la digue tout comme au niveau de la nappe.

CARACTÉRISATION DE L'ALEA

A l'issue de cette étude, le problème se pose du mode de caractérisation de l'aléa « rupture des levées par remontée de nappe » dans les vals de la Loire moyenne, aléa que l'on peut définir au sens strict comme la probabilité d'occurrence du phénomène.

Cet aléa résulte de la composition de nombreux facteurs, certains probabilistes, ayant une probabilité d'occurrence propre, soit temporelle (crue décennale, centennale, ..), soit spatiale (paramètre régionalisé au sens géostatistique, par exemple perméabilité des alluvions). Interviennent bien sûr aussi les caractéristiques des levées, certaines bien connues (levée avec ou sans tapis filtrant, présence ou non de fossés,...), d'autres probablement moins bien (fragilisation éventuelle).

La quantification probabiliste apparaît donc très délicate et l'on propose pour caractériser cet aléa une démarche basée sur une cartographie de type multicritères aboutissant dans une première phase à l'élaboration de cartes de vulnérabilité du val à la submersion et dans une deuxième phase à la construction de cartes de risque.

On entend ici par vulnérabilité la plus ou moins grande capacité de « défense » du val vis-à-vis d'une submersion. Cette vulnérabilité ne concerne donc que les facteurs physiques déterminant la possibilité d'une submersion, à savoir, pour une crue d'intensité donnée :

- des paramètres hydrauliques (caractéristiques du lit de la Loire),
- des caractéristiques de la digue (présence de tapis filtrant, fragilisation éventuelle,...),

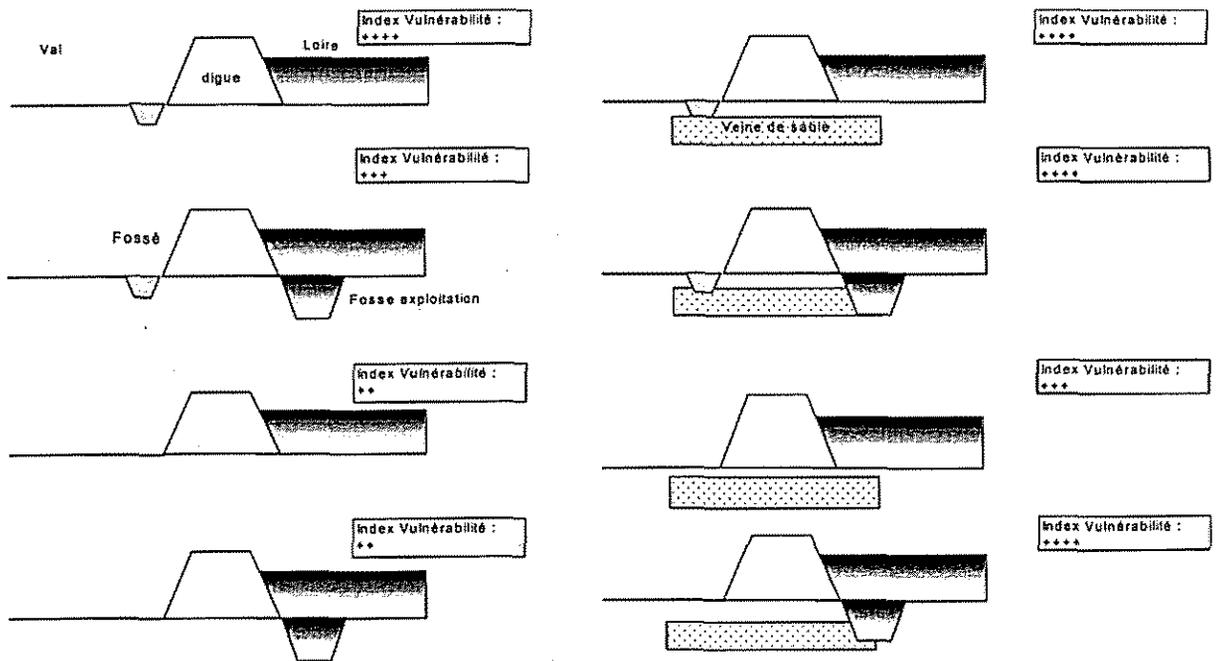
- des caractéristiques géologiques (nombre de couches, épaisseur,...),
- des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, coefficient d'emmagasinement),
- de la profondeur de la nappe en état piézométrique « moyen »,
- de la topographie,
- de la densité et du fonctionnement du réseau de drainage en période de crue.

La vulnérabilité d'une zone géographique du val, définie sur une certaine échelle de notation qu'il faudra définir en s'appuyant sur une démarche objective, sera maximale quand tous les facteurs recensés sur cette zone seront défavorables.

Quant au risque, il intègre non seulement la vulnérabilité mais aussi la présence humaine (densité de population, installations industrielles,...). La carte de risque sera donc construite en croisant la carte de vulnérabilité et la carte d'occupation du val.

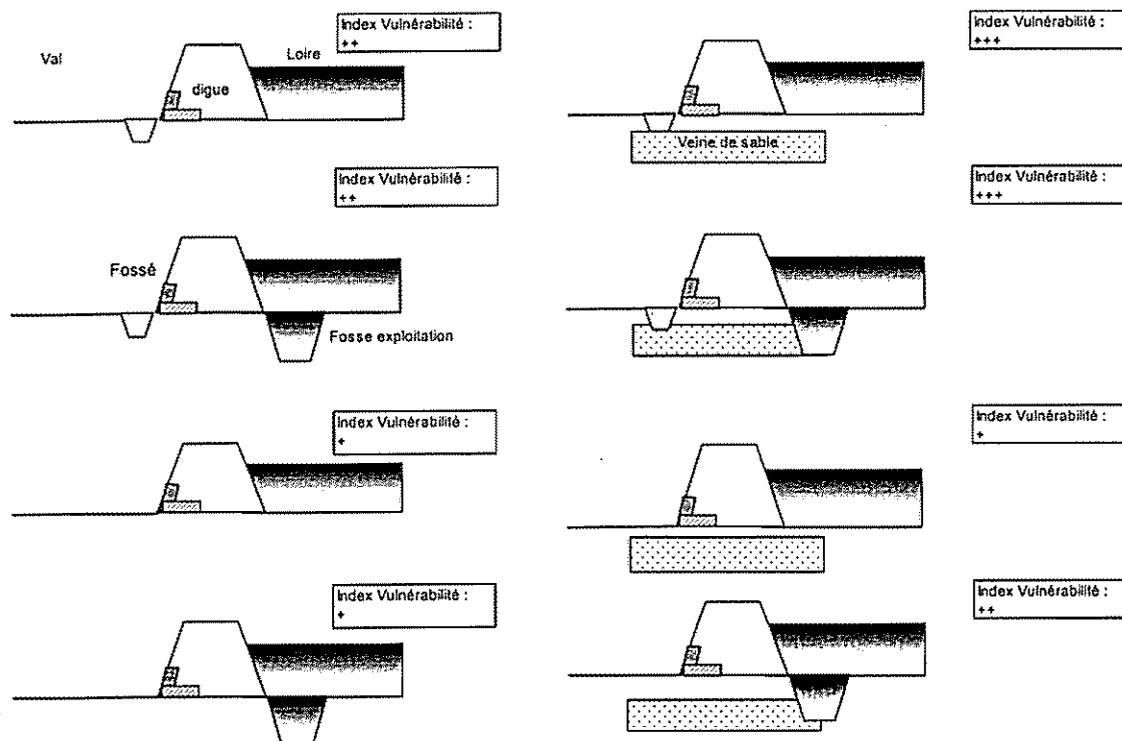
a) Apport de l'étude dans la définition d'un index de vulnérabilité

A partir des simulations hydrodynamiques et des calculs géotechniques réalisés dans cette étude, il est possible d'extraire de manière qualitative les éléments à retenir dans la construction d'un index de vulnérabilité. A titre d'exemple, on propose une hiérarchisation de la vulnérabilité du val pour les configurations modélisées en croisant deux à deux les facteurs ainsi retenus. Un index de vulnérabilité qualitatif est indiqué à l'aide de croix ; plus le nombre de croix est élevé, plus la vulnérabilité est grande.



Rupture/Instabilité de la digue par renard pour une digue sans renforcement

Rupture/Instabilité de la digue par renard pour une digue avec renforcement



Remontée de nappe

	T aquif. < 2 10 ⁻⁴	T aquif. entre 2 10 ⁻⁴ et 2 10 ⁻³	T > 2 10 ⁻³
Aquifère monocouche			
T Digue < 2 10 ⁻⁴	+++	+++	++
T Digue entre 2 10 ⁻⁴ et 2 10 ⁻³	+++	+++	++
T Digue > 2 10 ⁻³	++	++	+

	Couche 1 T = 2 10 ⁻⁶ Couche 2 T = 8 10 ⁻⁴ Couche 3 T = 7.5 10 ⁻⁵	Couche 1 T = 2 10 ⁻⁶ Couche 2 T = 2.5 10 ⁻³ Couche 3 T = 7.5 10 ⁻⁵
Aquifère multicouche		
T digue = 8 10 ⁻⁶	++++	+++
T digue = 4 10 ⁻⁵	+++	++

Tableau 24 - Hiérarchisation de la vulnérabilité en considérant la configuration du système et sa perméabilité

Remarque : La remontée de niveau à une cote donnée est dépendante de la transmissivité ; plus celle-ci sera faible, plus la remontée sera importante. La vitesse de remontée quant à elle est fonction de la diffusivité (rapport T/S).

b) Cartographie de la vulnérabilité du val aux inondations

Cette cartographie doit généraliser la démarche ci-dessus et être menée sur l'ensemble des vals de la Loire moyenne à enjeux socio-économiques, en prenant en compte les facteurs déterminant une possibilité de rupture de levée par remontée de nappe. Elle pourra prendre la forme d'une analyse multicritères aboutissant à la définition d'un index de vulnérabilité. Elle nécessite au préalable la définition d'unités spatiales auxquelles les index de vulnérabilité seront attribués (il pourra s'agir de mailles dont la taille sera à définir en fonction de l'information spatiale disponible).

Chaque critère (facteur physique) retenu est découpé, comme ci-dessus, en classes d'occurrence, par exemple :

- critère « type de digue » : [avec tapis filtrant], [sans tapis filtrant], [avec fossé],...
- critère « perméabilité » : [10^{-3} m/s], [10^{-4} m/s], [10^{-5} m/s]
- critère profondeur « initiale de la nappe » : [entre 3 m et 4 m], entre [2 m et 3 m],...
- etc..

Chaque classe est caractérisée par une note reflétant son influence sur une possibilité de submersion (échelle de notation à définir).

Différentes méthodes peuvent ensuite être utilisées pour obtenir l'index de vulnérabilité relatif à une unité spatiale, la plus simple consistant à calculer une somme pondérée des notes attribuées à chaque critère pour l'unité spatiale considérée (ce qui implique de choisir aussi un système de pondération des critères).

La carte de vulnérabilité ainsi obtenue peut ensuite être aisément croisée avec une carte d'occupation du val pour obtenir une carte de risque. Le risque est une traduction humaine, socio-économique, financière et politique du problème ; il est le résultat de la combinaison de la vulnérabilité et des enjeux. Cette caractérisation permet de faire ressortir les priorités en termes de planification préventive, de gestion de crise et de plan d'alerte et de secours et de mise en place de dispositifs de suivi (digue et aquifère avec piézomètre suivi par télétransmission).

c) Eléments nécessaires à la caractérisation de la vulnérabilité du val aux inondations par remontée de nappe et rupture de levées

Ce tableau ci-dessous fait la synthèse des facteurs principaux à retenir dans une telle démarche.

Facteurs principaux	Action
1) géologie et géométrie de l'aquifère : nature et épaisseur des formations géologiques,	- exploitation de la Banque de données du Sous-Sol (BSS du BRGM), - étude et carte géologique, - Base de données du forage du lit majeur de la Loire de Nevers à Angers (Rapport BRGM public R 40497)
2) perméabilité et coefficient d'emmagasinement de l'aquifère,	- pompages d'essai, - suivi des variations des niveaux de la nappe et de la Loire,
3) altitude topographique du Val : position et l'altitude des exutoires,	- relevé topographique précis du terrain, en particulier les points bas,
4) caractéristiques de la crue de la Loire : durée et altitude de la Loire en crue,	- exploitation des mesures réalisées sur le fleuve,
5) contexte hydrogéologique de l'aquifère : sens d'écoulement et alimentations de la nappe (pluie efficace en particulier), situation de la nappe en régime de Hautes Eaux (HE).	- étude hydrogéologique, - carte piézométrique en Hautes Eaux, - étude des chroniques piézométriques,
6) Digue (géométrie et composition)	- cf. étude de diagnostic ISL - CEMAGREF

Tableau 25 - Les facteurs principaux et les actions à mener en vue de déterminer l'impact d'une crue de la Loire

Pour les secteurs à enjeu humain et économique important, un programme de suivi de l'évolution du niveau piézométrique du système levée – val devrait être mis en place ; ces secteurs sont d'une longueur de 500 à 1 000 m. Les écoulements entre la Loire et l'aquifère alluvial du val s'organisant principalement perpendiculairement, un ou deux transects de 5 piézomètres maximums chacun. Les piézomètres seront implantés de la digue au coteau bordant le val en prenant en considération l'existant (Base de données du Sous-Sol) et les études de synthèse. On aura recours à de nouveaux ouvrages si les sondages existants ne permettent pas un suivi piézométrique de qualité (coupe de sondage, type d'équipement et nature de l'ouvrage (complet ou partiel au niveau de l'aquifère). Les sondages pour ce tronçon seront implantés comme suit :

- en crête de digue, côté val : un sondage carotté jusqu'à la fondation (15 m env.), équipé d'un piézomètre (coût 15 000 F HT/sondage)
- en bas de talus, côté val : un sondage carotté de 10 à 12 m, équipé d'un piézomètre (coût 12 000 F HT/sondage)
- en section transversale dans le val : 3 sondages carottés de 8 à 10 m, équipé d'un piézomètre (coût 11 000 F HT/sondage)

Des tests de perméabilité Lefranc dans les ouvrages sont à réaliser (coût : 1 500 F HT/ouvrage).

Sur une transversale de 5 points, un minimum de trois points devra faire l'objet d'un suivi en continu du niveau piézométrique ; ils seront équipés de capteurs de pression avec système d'acquisition de données (précision du cm requise) (coût : 7 500 F HT/appareil). Un suivi mensuel des appareils pour vider la mémoire des acqui-seurs de données est nécessaire. Au cours de ces visites de routine, des relevés piézométriques sur les autres points non instrumentés pourront être effectués. Avant équipement des piézomètres, un nivellement des points par un géomètre est nécessaire (coût : 1 500 F HT/point).

Le prix de revient global du suivi piézométrique de la propagation d'une crue dans le val est de l'ordre de 100 000 F HT (une transverse, trois points instrumentés) à 190 000 F HT (deux transverses, 7 points instrumentés) pour un tronçon d'un kilomètre. Ce prix ne comprend pas le suivi de routine.

Bibliographie

Étude systématique des levées de la Loire. Étude de sols ; note de présentation des résultats et rapport SIMECSOL n° 1.017, 1964.

Étude du renforcement des digues de BLOIS-VIENNE. Note technique CETE NORMANDIE-CENTRE M. 1142/1, 1981. 50pp, réf. 81/LB/EN/SD, M.1142/1
Renforcement des levées de la Loire, Val d'Avaray. Étude hydraulique S.E.E.E. INFRA, 1994.

Digues du Val d'Avaray ; renforcement des levées de la Loire sur les communes de SUEVRES, COURBOUZON et AVARAY. Reconnaissance géotechnique générale de la digue, de l'ouvrage hydraulique du ruisseau de Pisse Vache et du seuil-déversoir d'Avaray. Rapport technique CETE NORMANDIE CENTRE n°93.2943.0 DGM.2241, 1994.

Étude du schéma d'aménagement de la levée de Luynes-Fondettes en rive droite de la Loire. Rapport principal HYDRATEC, 1995.

Levées de Loire Domaniales, levées de Saint-Firmin-sur-Loire (45), études et diagnostics. Rapport général de reconnaissance et d'étude, pièce 2, ANTEA A06236, 1996.

Études et diagnostics des levées domaniales de la Loire ; levées du Bec d'Allier de Rauches et d'Espagne. Fascicule F, annexe V (modélisation hydraulique), annexe VI (modélisation géotechnique) ; Fascicule A (rapport de synthèse). GEOTEC/CSD AZUR, 1996.

Levée de protection du Val de l'Authion contre les inondations. Étude de définition en vue d'un diagnostic de l'ouvrage. Synthèse des investigations, définition et étude des risques ; propositions. CEBTP, 1996.

État des levées de la Loire Moyenne. Étude visant à établir une procédure pertinente et efficace de diagnostic et de surveillance ; méthodologie de diagnostic. ISL/CEMAGREF, 1997.

État des levées de la Loire Moyenne. Méthodologie de diagnostic des digues à sec ; applications aux levées de la Loire ; synthèse ISL/CEMAGREF, 1998.

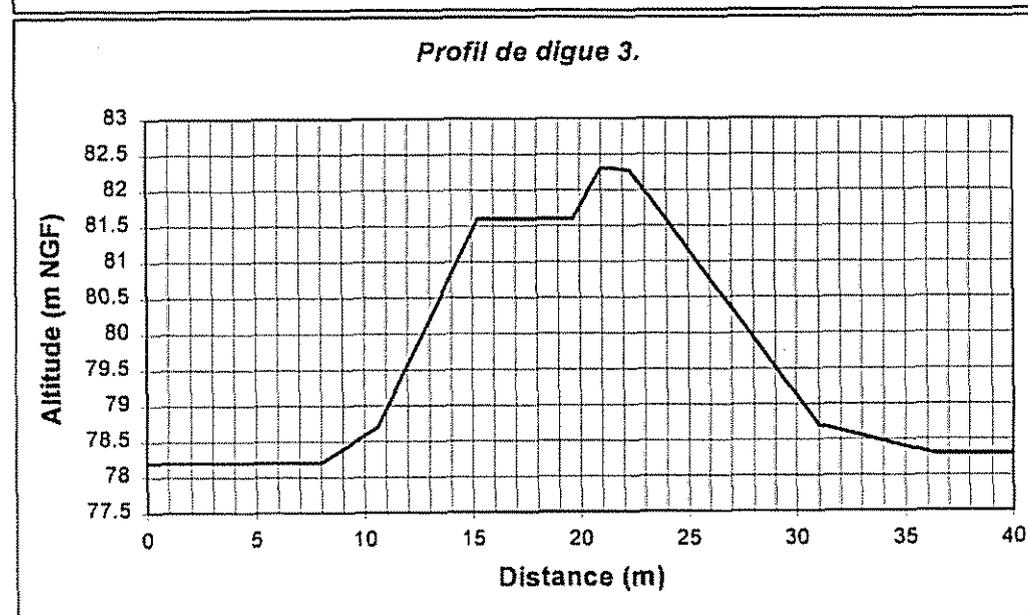
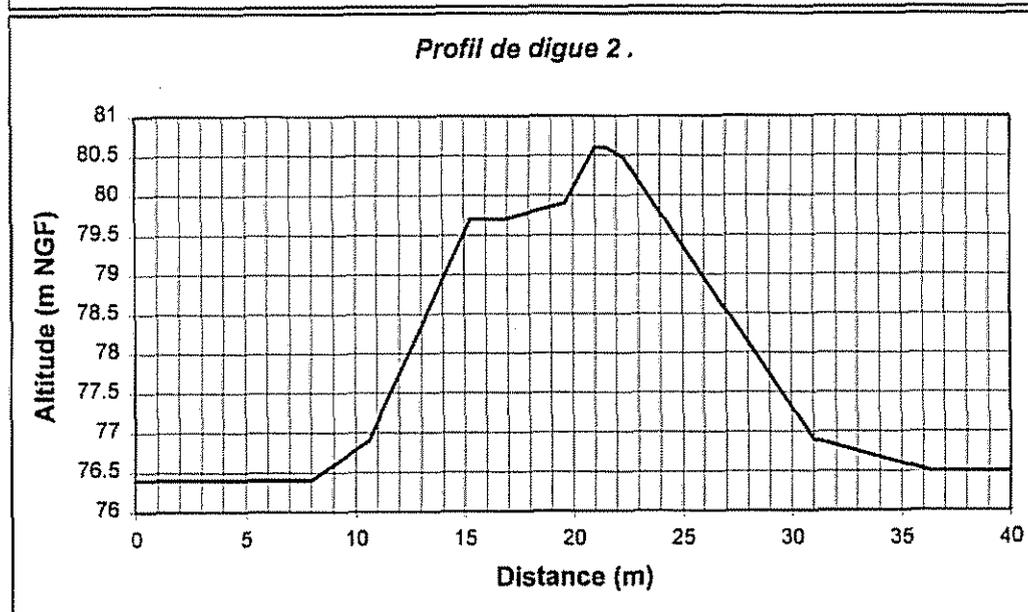
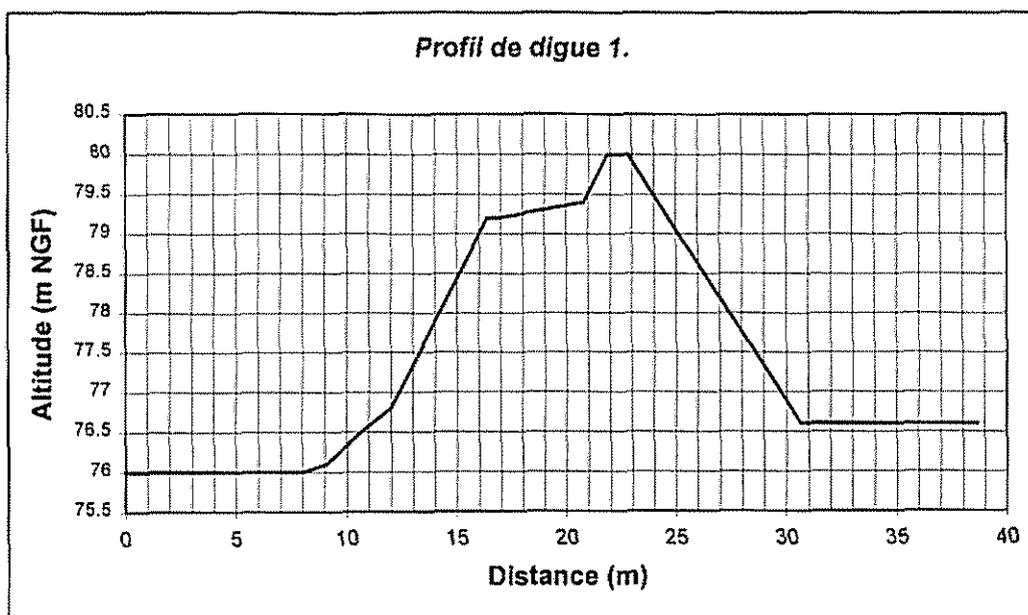
Étude du schéma d'aménagement de la levée de Luynes-Fondettes en rive droite de la Loire, Ministère ETT, DDE Indre et Loire, HYDRATEC, Paris, mai 95, 12188CV.

Étude des sols – étude systématique des levées de la Loire, Ponts et Chaussées du Loiret (45), dossier N°1.017/1964.

Annexe 5 : débits de débordement dans le val.

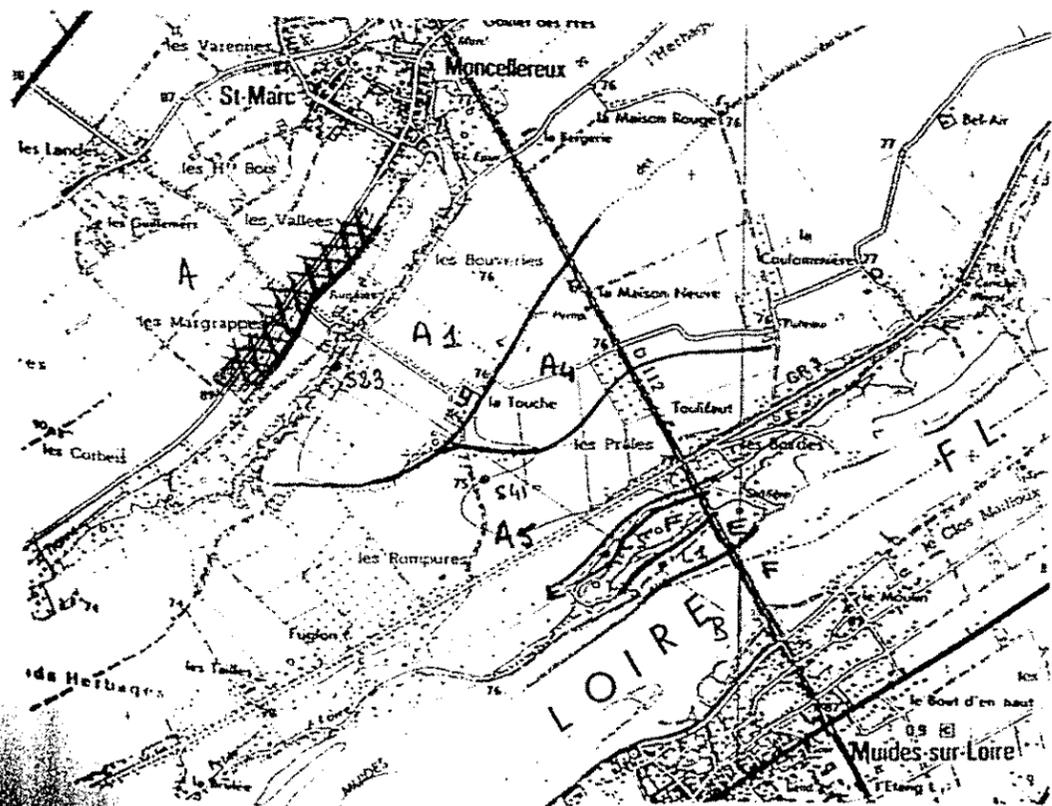
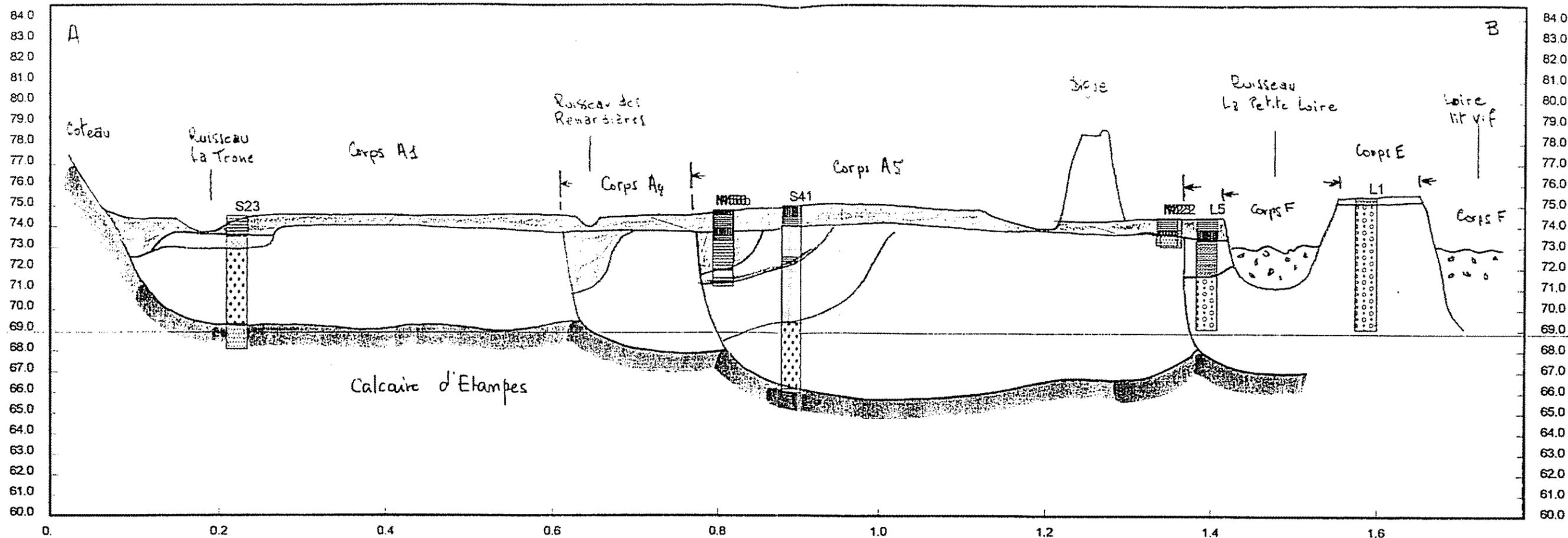
- Tableau des valeurs de débits de débordements dans le val pour les simulations P1S1, P1S3, P2S1, P2S2, et P3S1.
- Tableau des valeurs de débits de débordements dans le val pour les simulations P1S4 et P1S5.
- A5.1 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P1S1.
- A5.2 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P1S3.
- A5.3 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P1S4.
- A5.4 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P1S5.
- A5.5 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P1S6.
- A5.6 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P1S7.
- A5.7 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P2S1.
- A5.8 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P2S2.
- A5.9 – Évolution des débits de débordement dans le val – Simulation P3S1.

Annexe 1 - Profils des trois digues



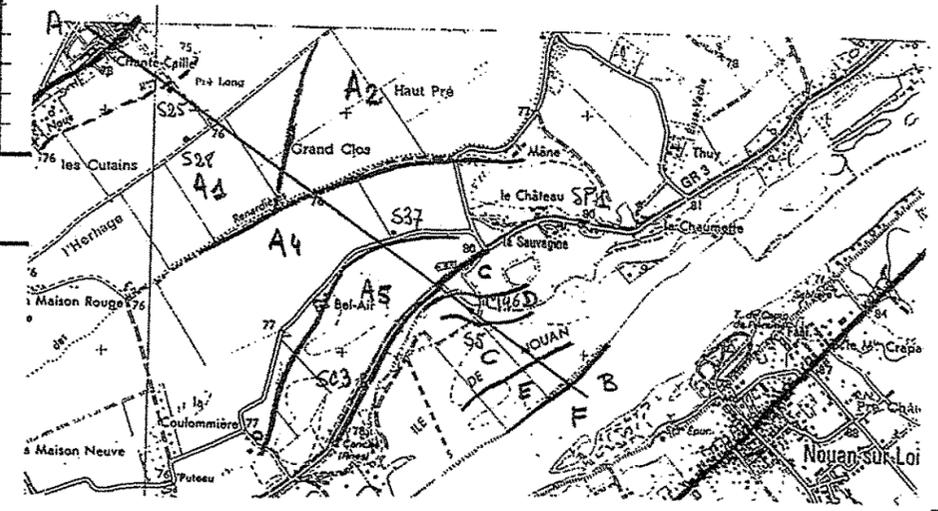
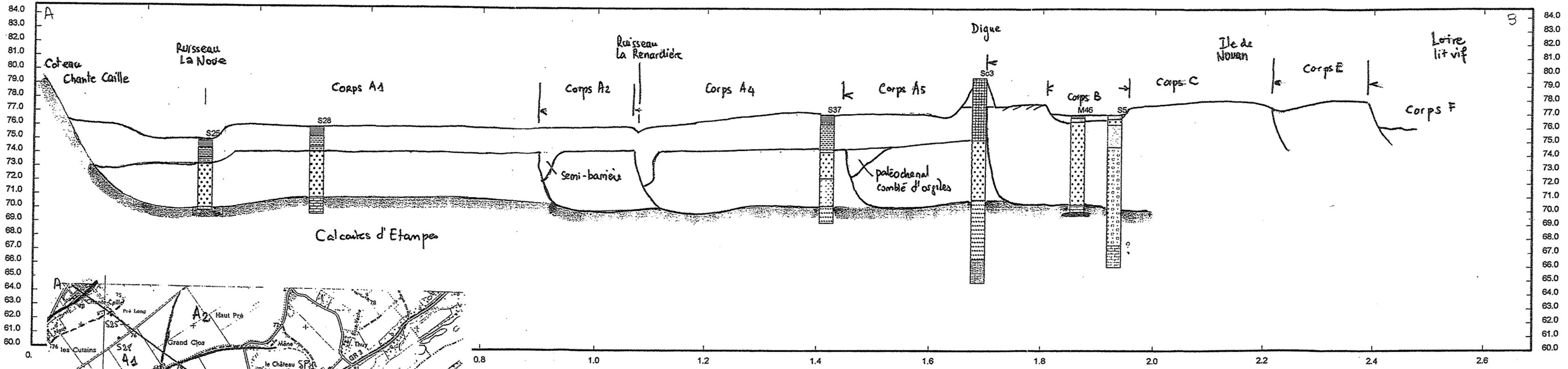
Annexe 2 - Profils géologiques des trois sections

VAL D'AVARAY coupe 1a (ech : 1/5000, 1/200)



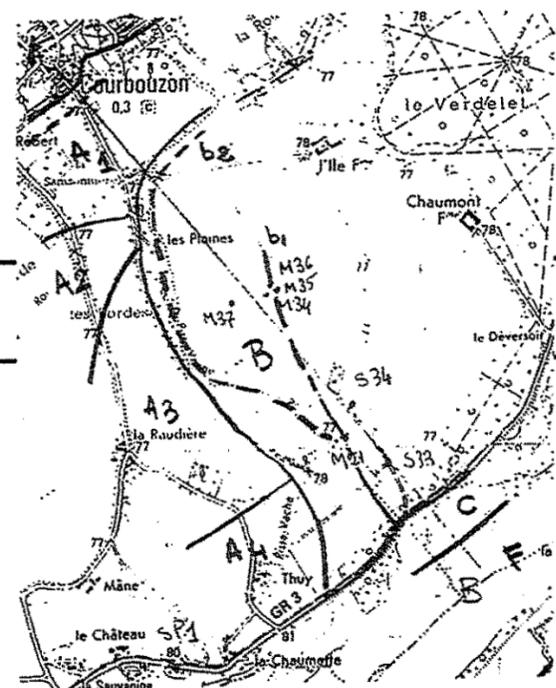
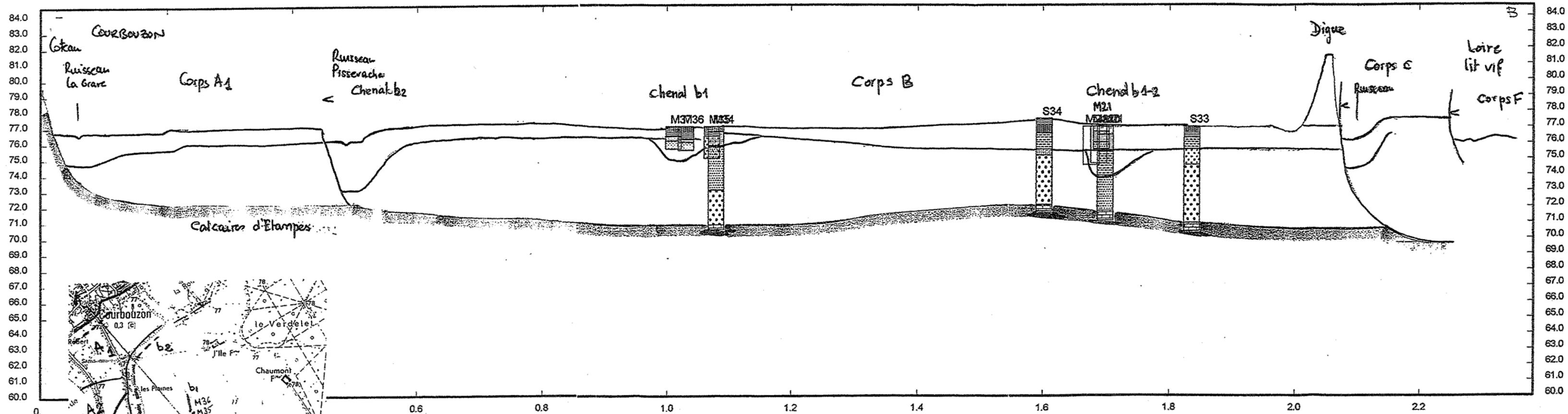
PROFIL N° 1

VAL D'AVARAY coupe 2 (ech : 1/5000, 1/200)
sgr-centre



Profil N° 2

VAL D'AVARAY coupe 3 (ech 1/5000, 1/200)
sgr-centre

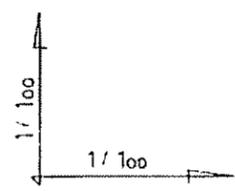
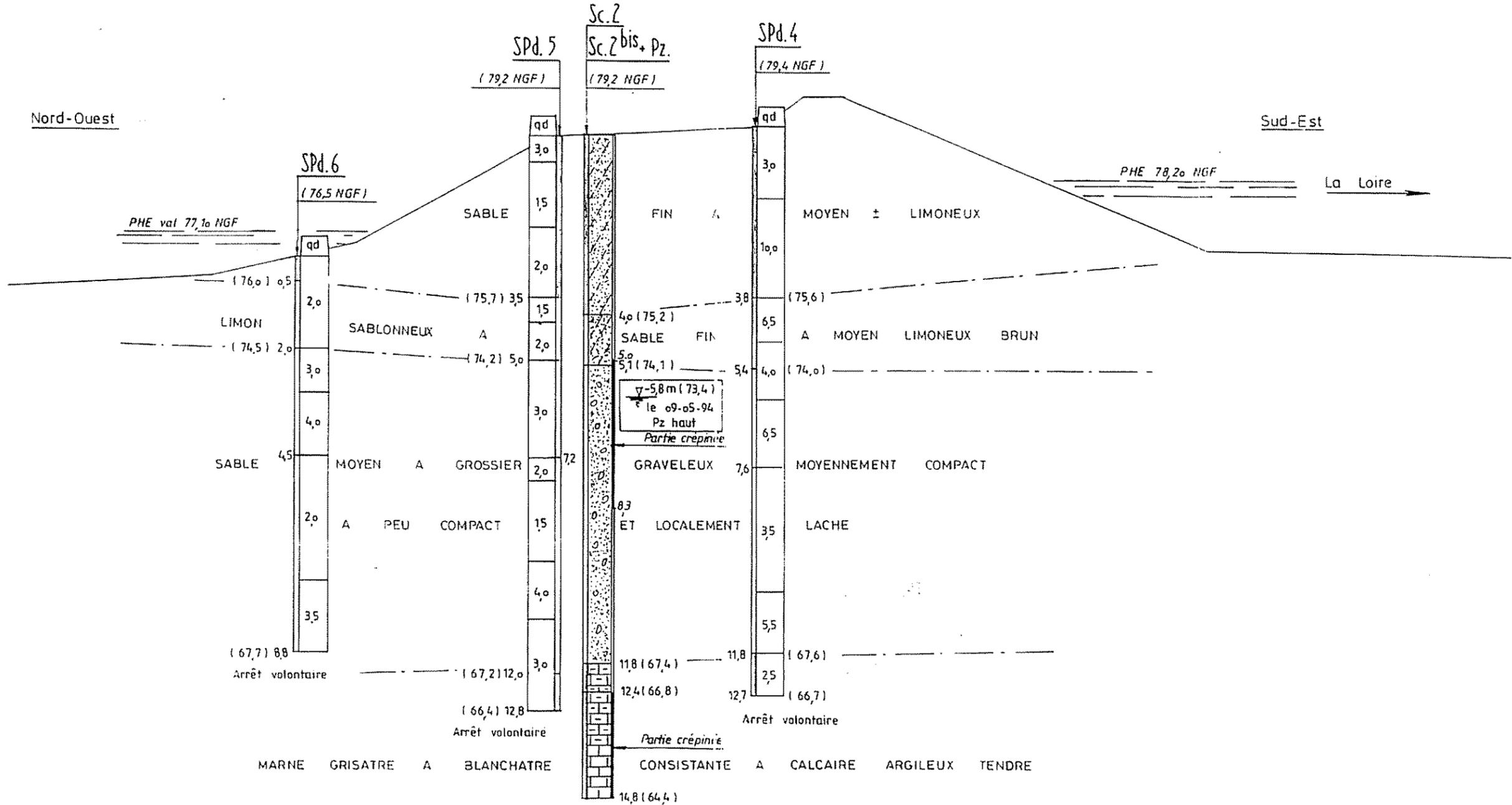


PROFIL N° 3

RENFORCEMENT DES LEVEES DE LA LOIRE

Digue du Val d'Avaray
PROFIL EN TRAVERS P.120 + 40 m

PROFIL 1



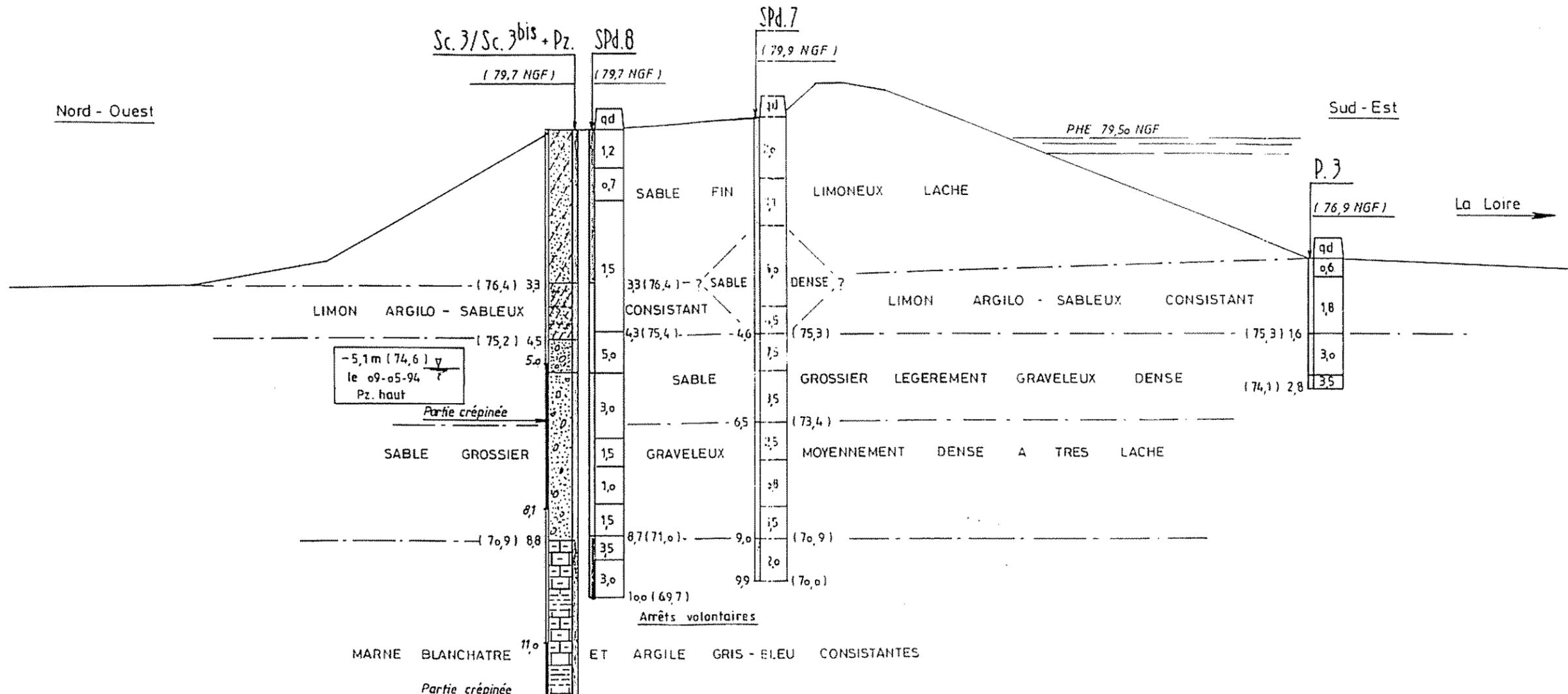
LEGENDE			
SPd.	Sondage au pénétromètre dynamique		Digue de la Loire
Sc+Pz	Sondage carotté équipé d'un piezomètre		Alluvions de la vallée de la Loire Age: QUATERNAIRE
qd (MPa)	Resistance dynamique de pointe		Calcaire et marne de Beauce Etage géologique: AQUITANIEN



RENFORCEMENT DES LEVEES DE LA LOIRE

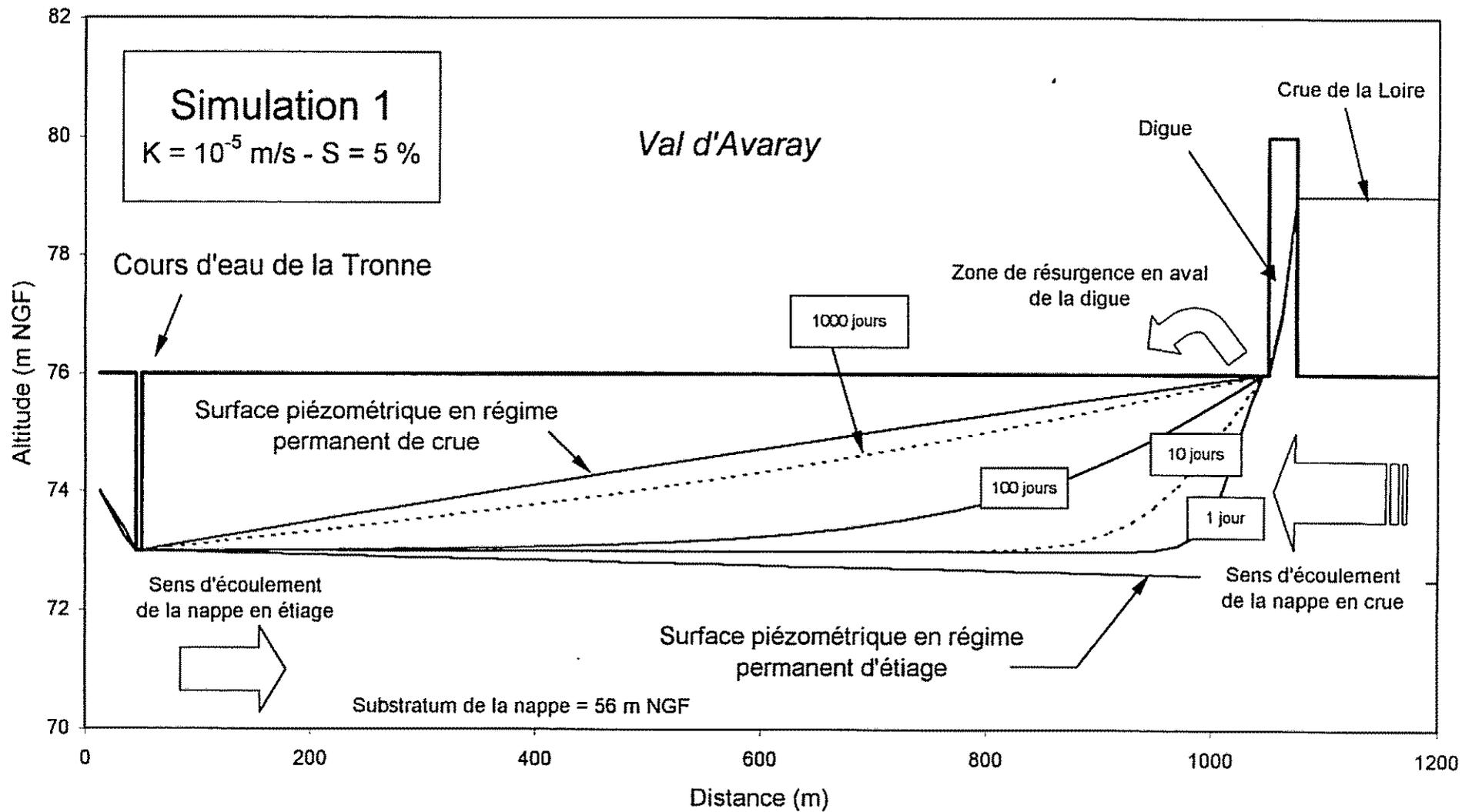
PROFIL 2

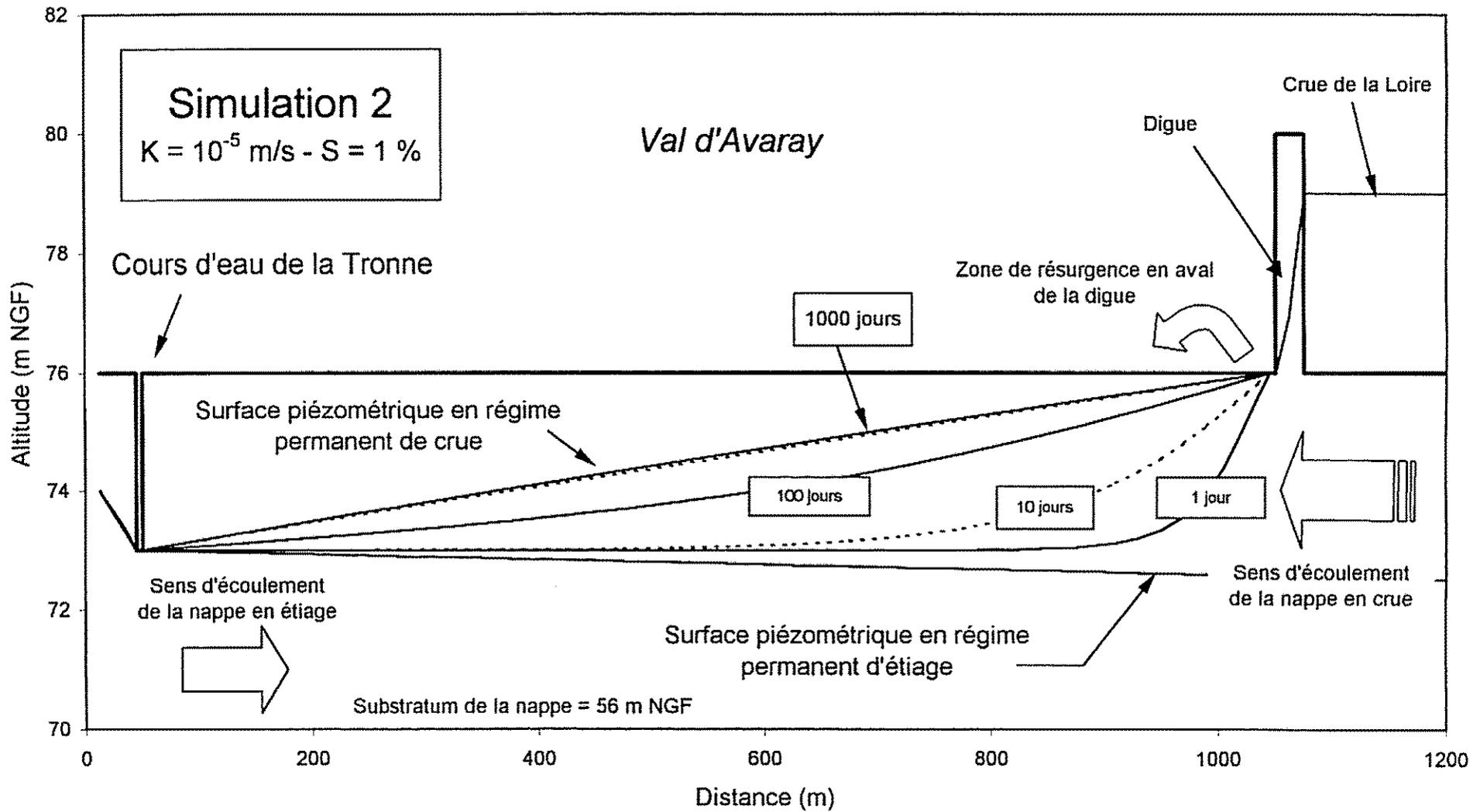
Digue du Val d'Avaray
 PROFIL EN TRAVERS P.162 + 35 m

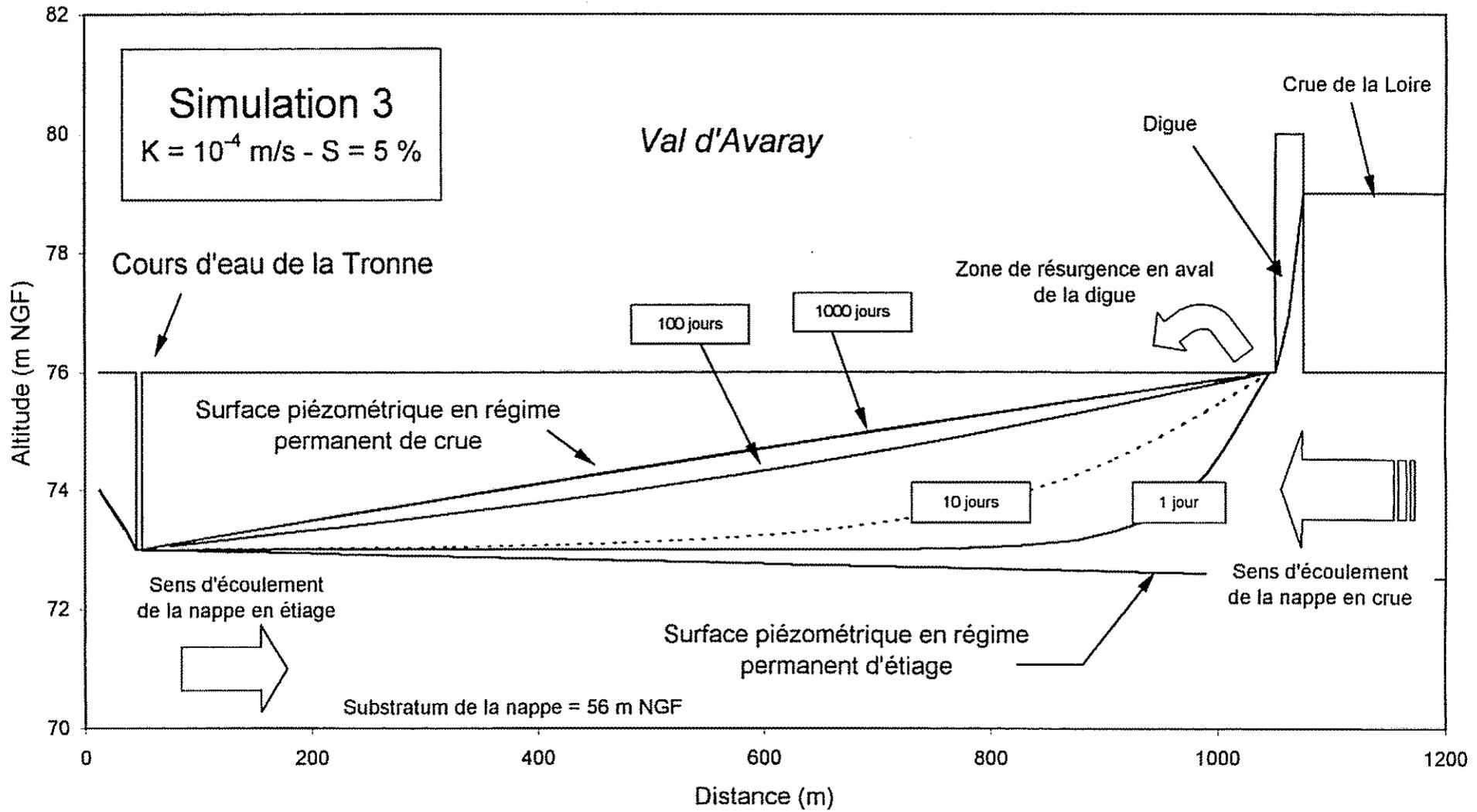


LEGENDE			
SPd.	Sondage au pénétromètre dynamique lourd		Digue de la Loire
P.	Sondage au pénétromètre dynamique léger		Alluvions de la vallée de la Loire Age: QUATERNAIRE
Sc+Pz	Sondage carotté équipé d'un piézomètre		Calcaire et marne de Beauce Etage géologique: AQUITANIEN
qd (MPa)	Résistance dynamique de pointe		

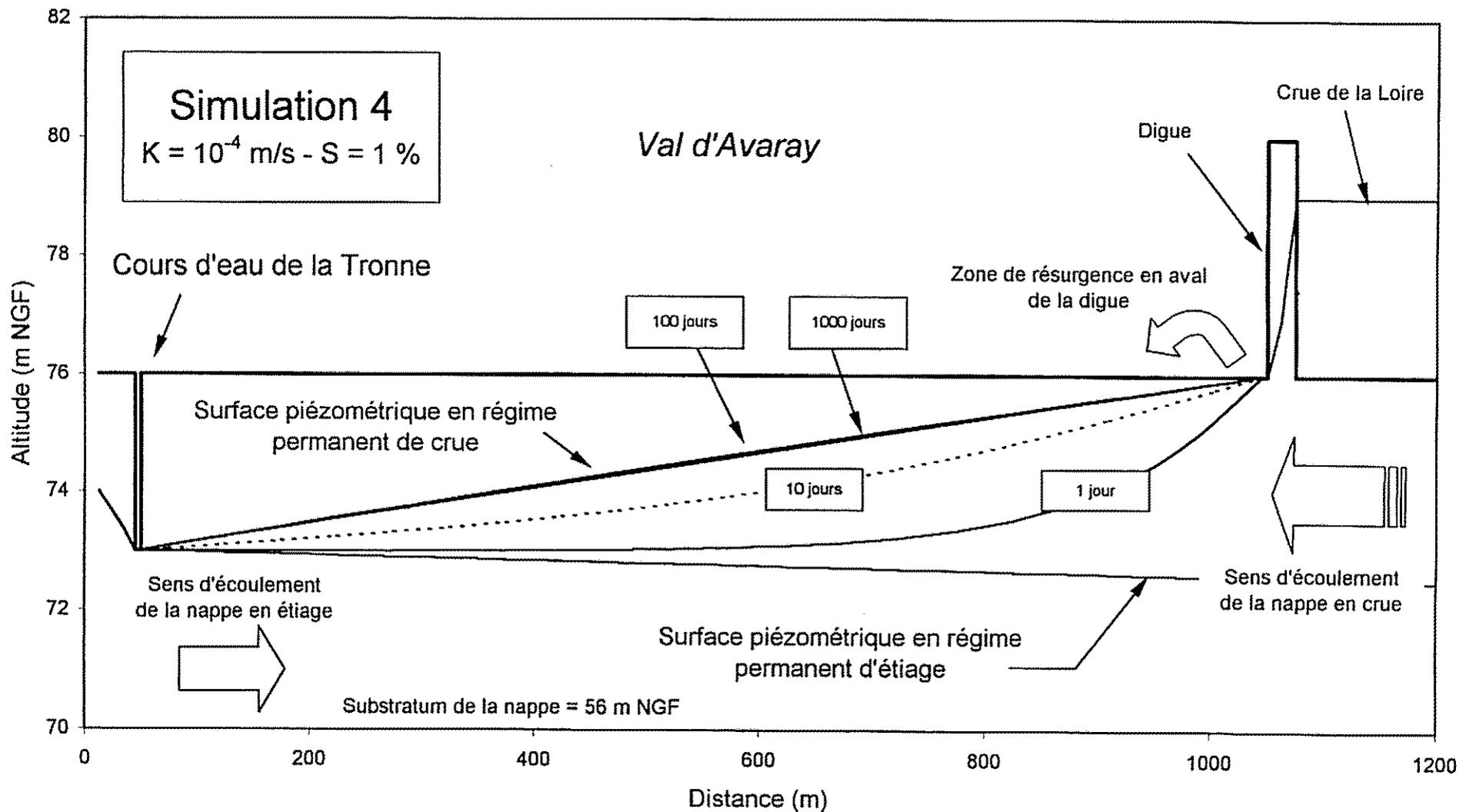
**Annexe 3 - Simulations préliminaires, profils piézométriques
de la nappe**



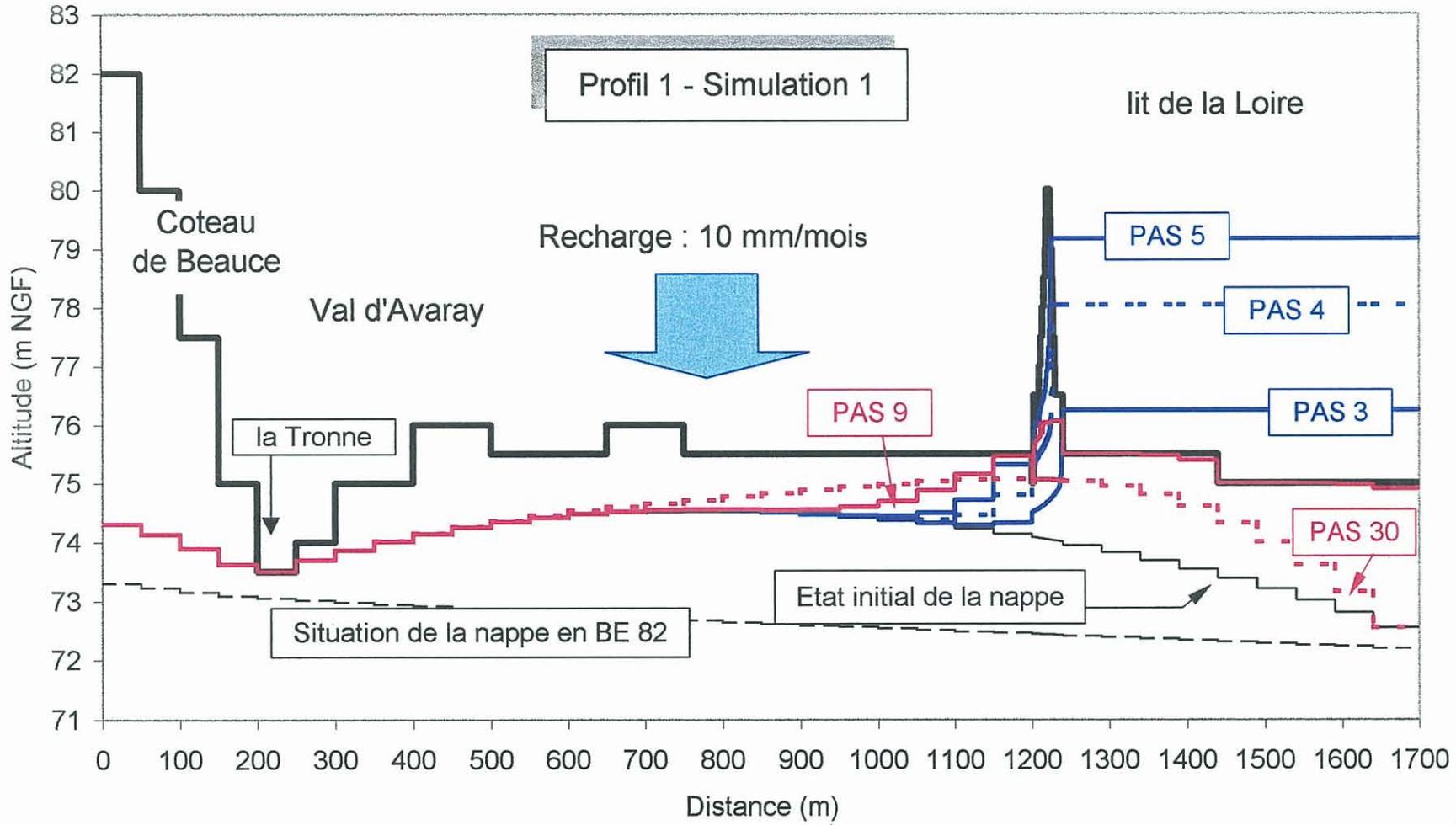




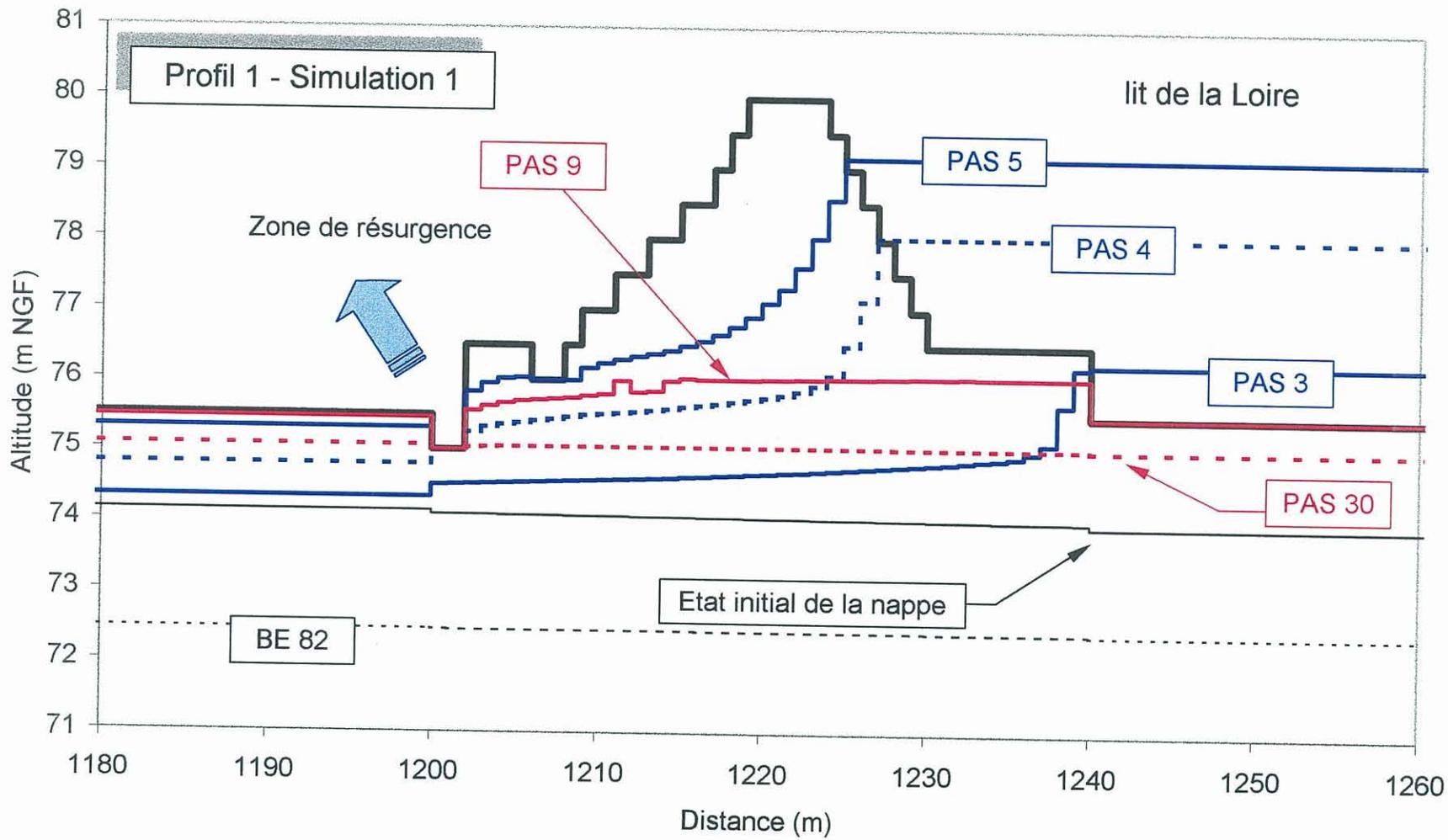
A3.3 - Surface piézométrique calculée - Simulation 3



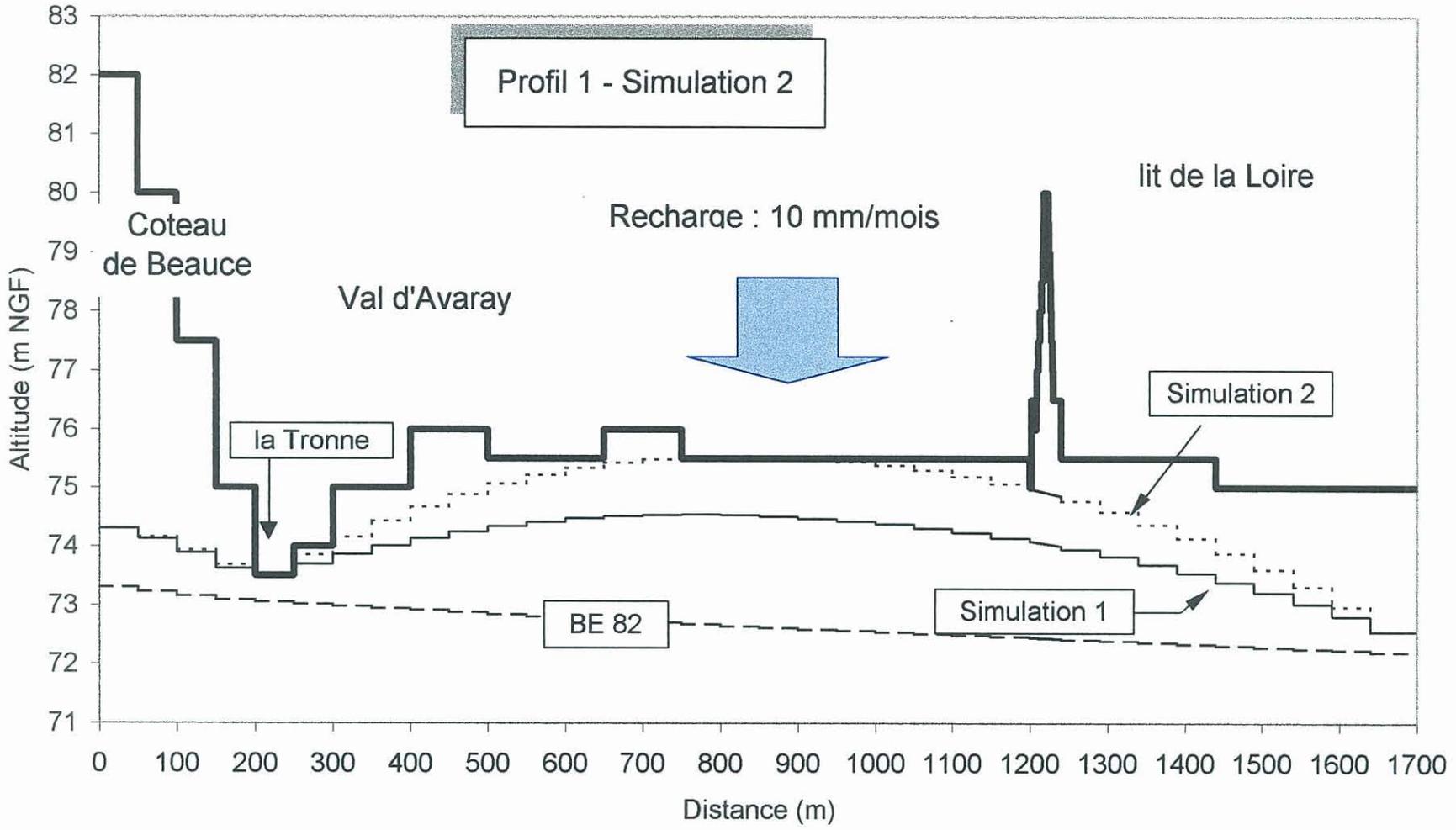
Annexe 4 - Profils piézométriques de la nappe



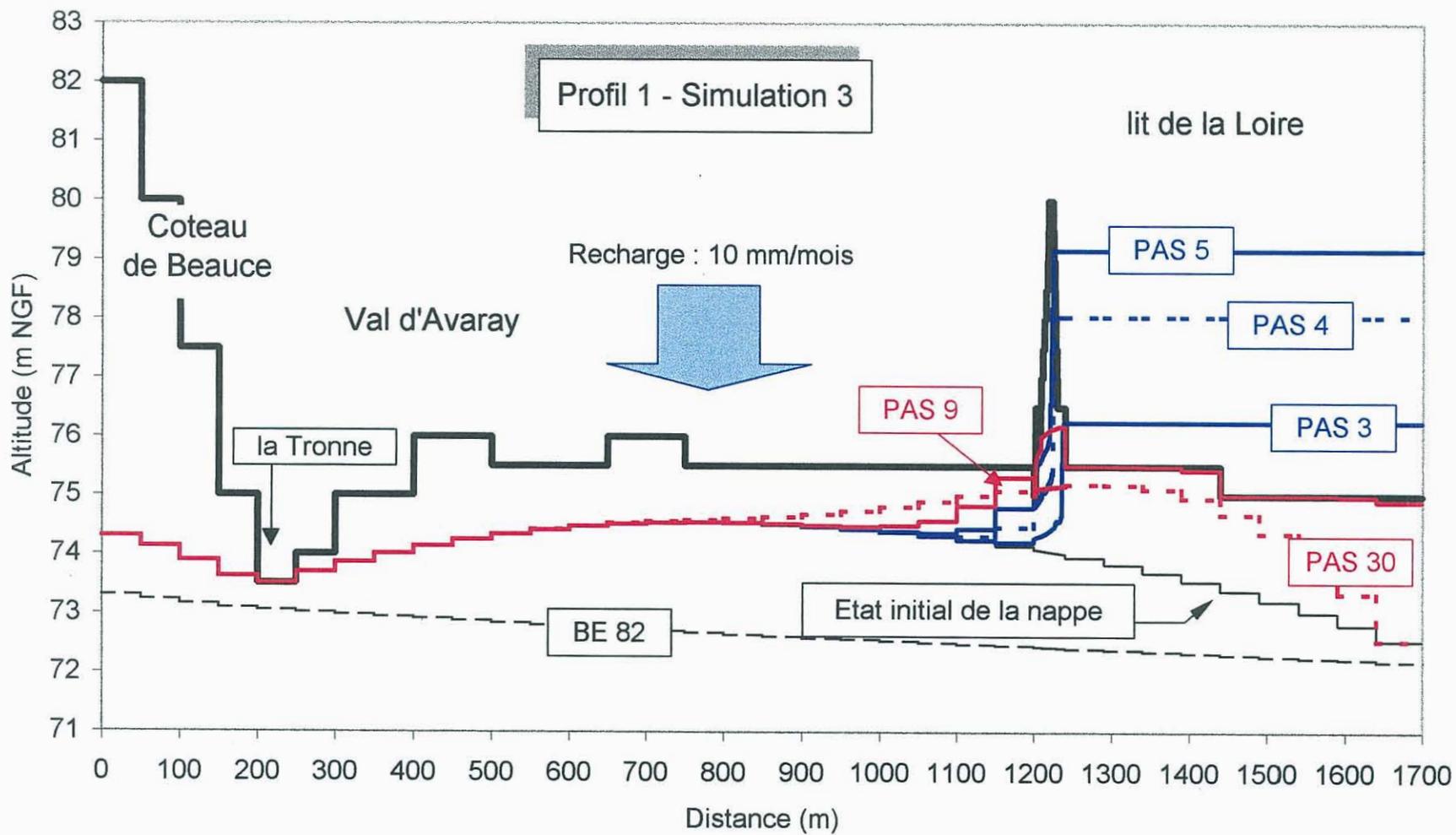
A4.1 - Surface piézométrique calculée - Simulation P1S1



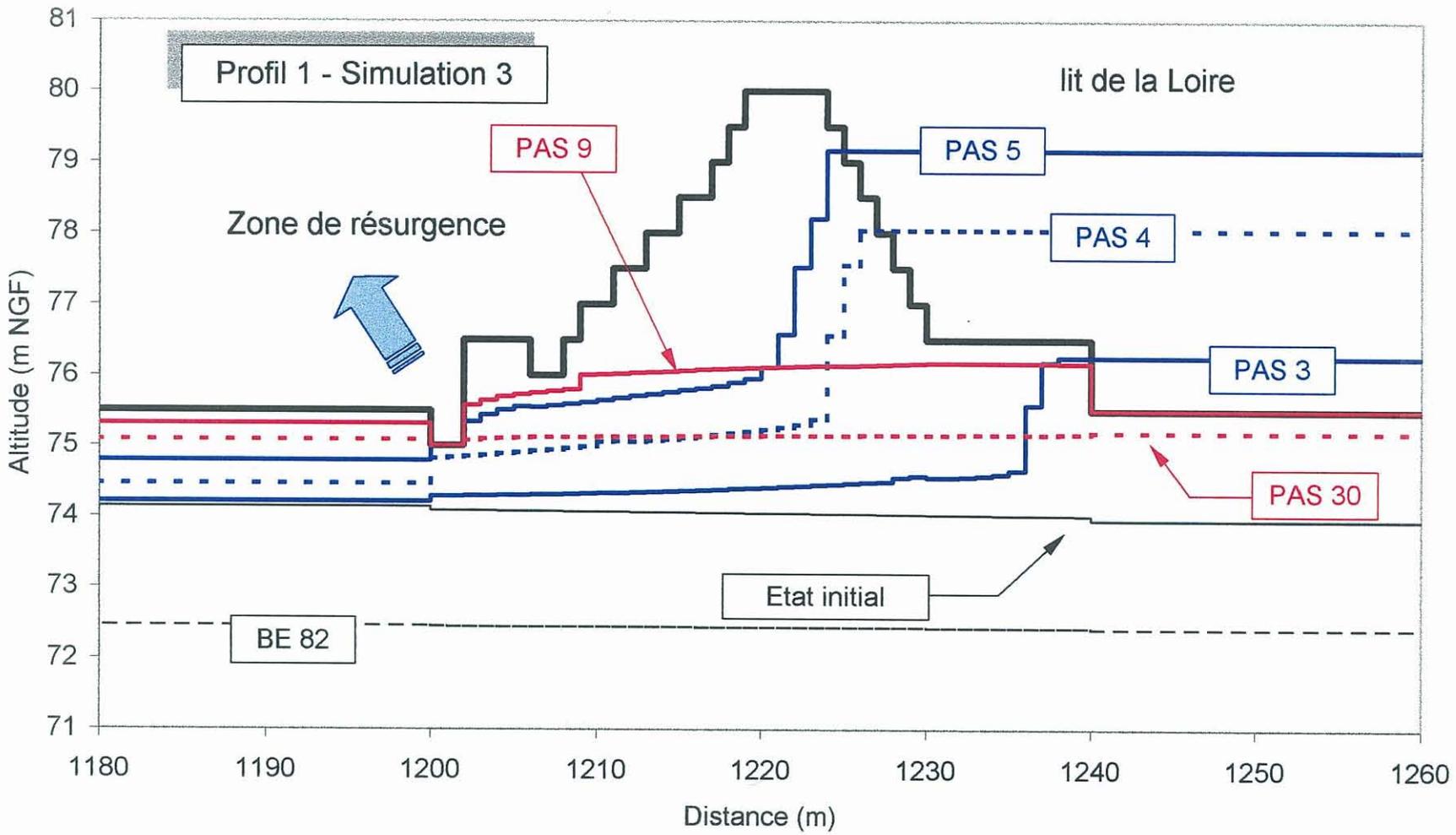
A4.2 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P1S1



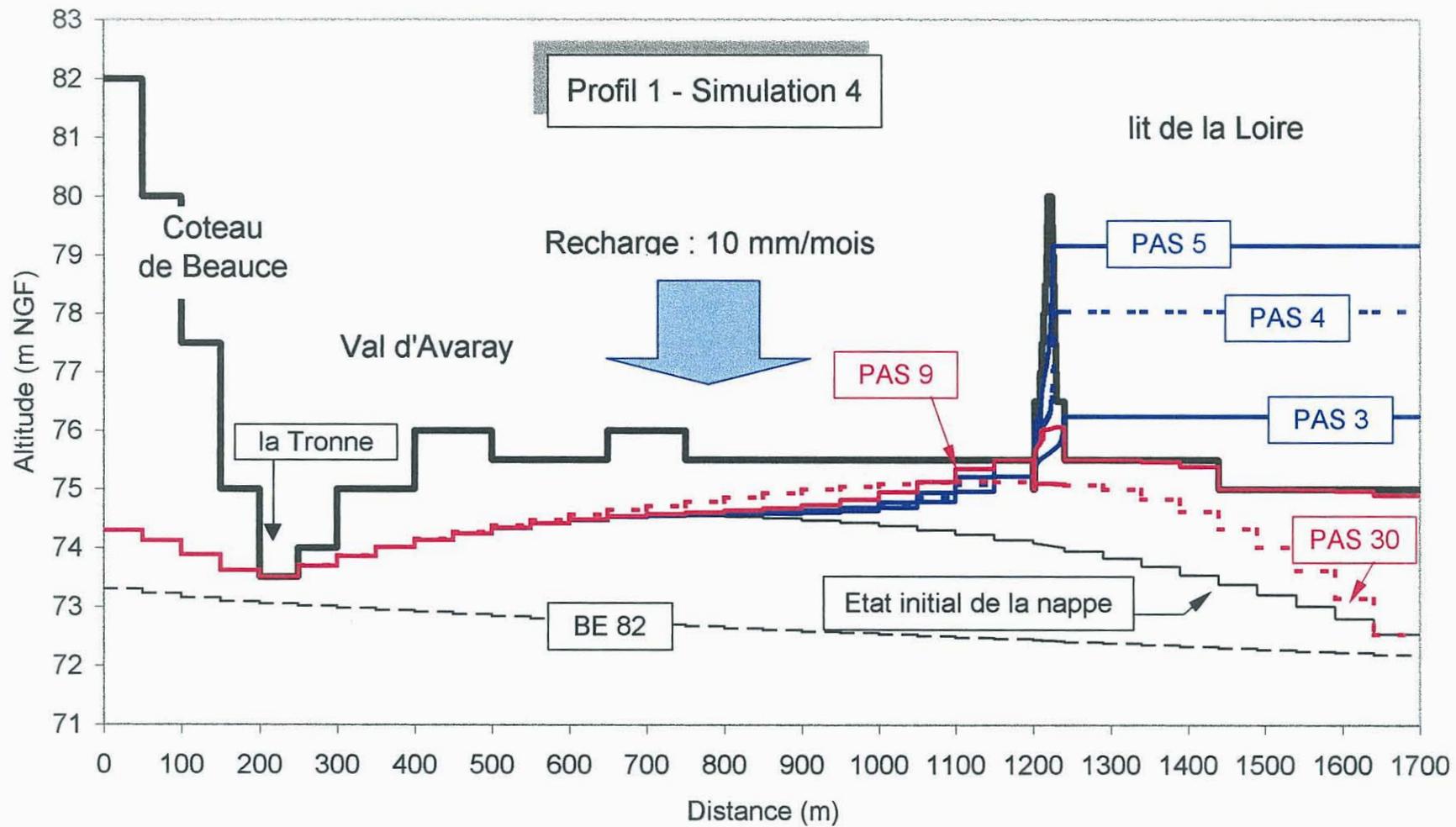
A4.3 - Surface piézométrique calculée - Simulation P1S2



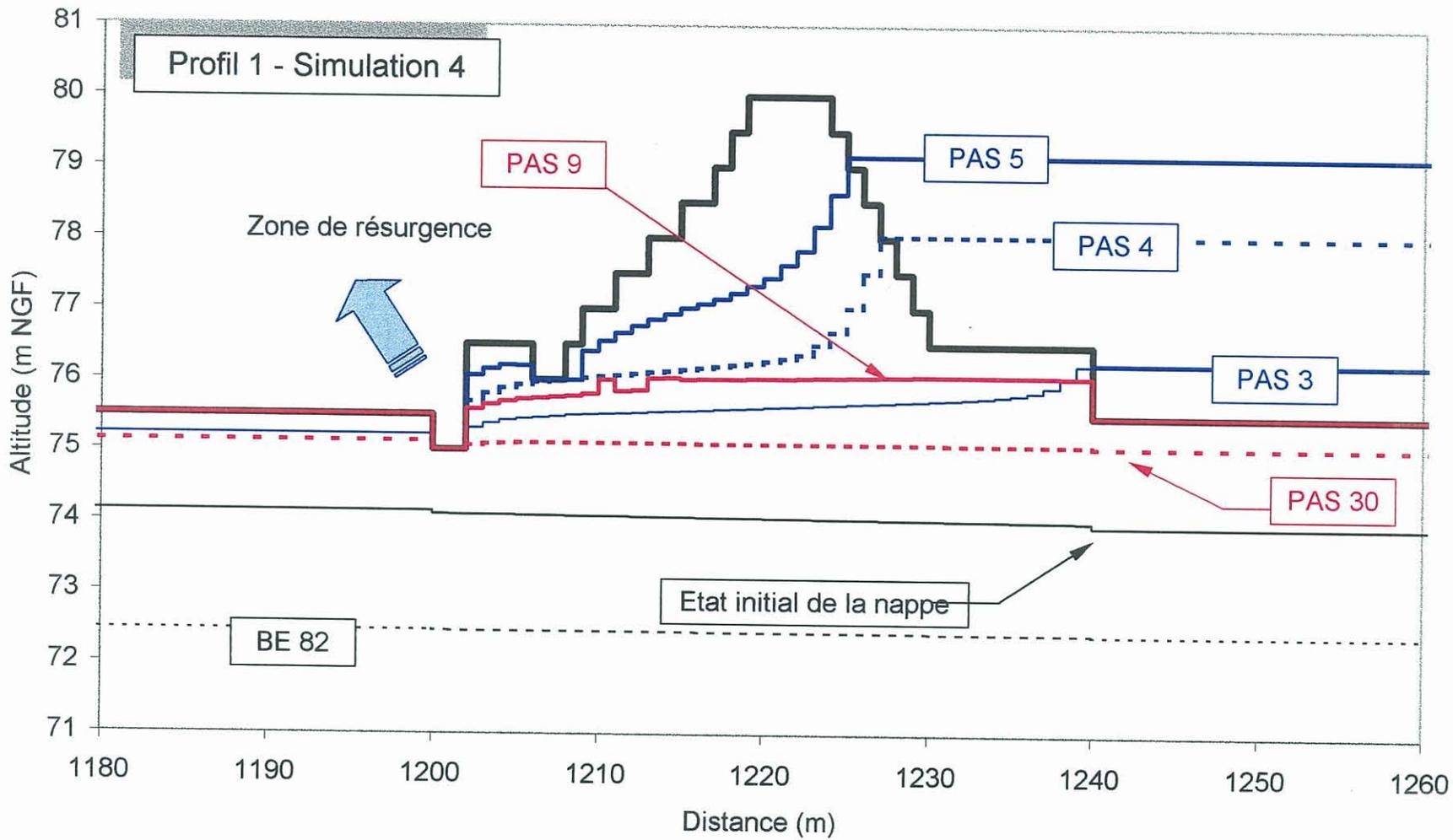
A4.4 - Surface piézométrique calculée - Simulation P1S3



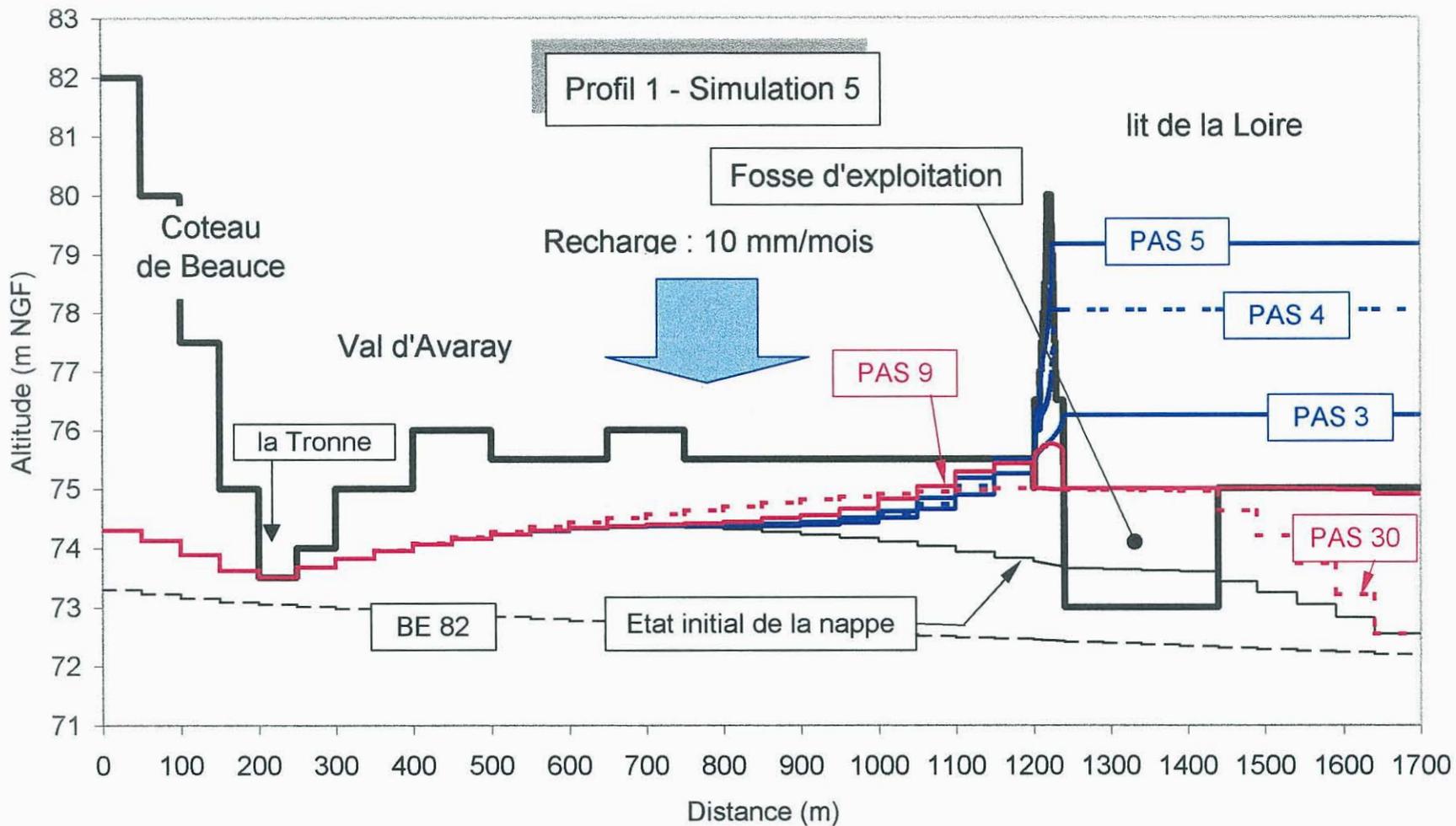
A4.5 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P1S3



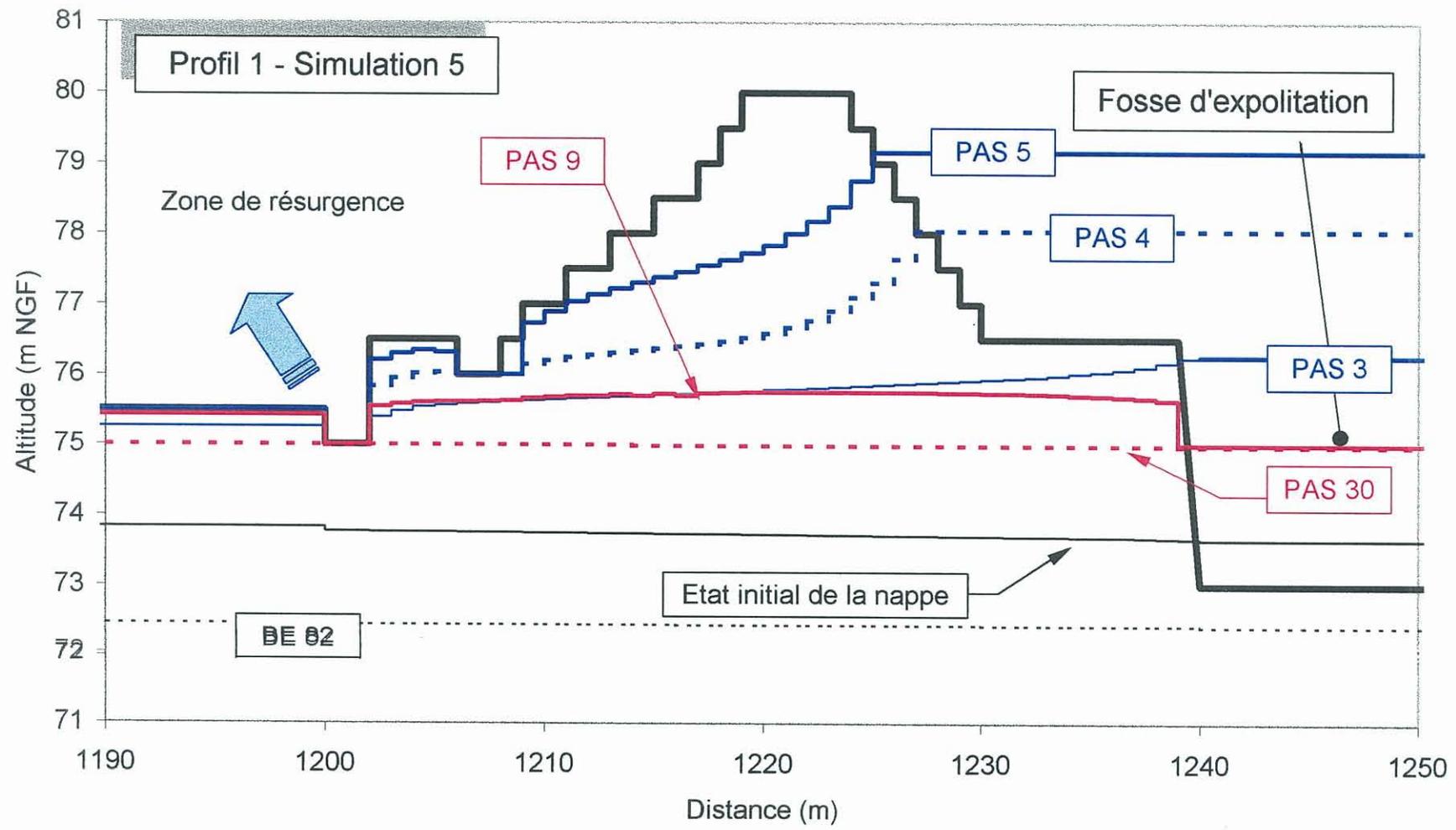
A4.6 - Surface piézométrique calculée - Simulation P1S4



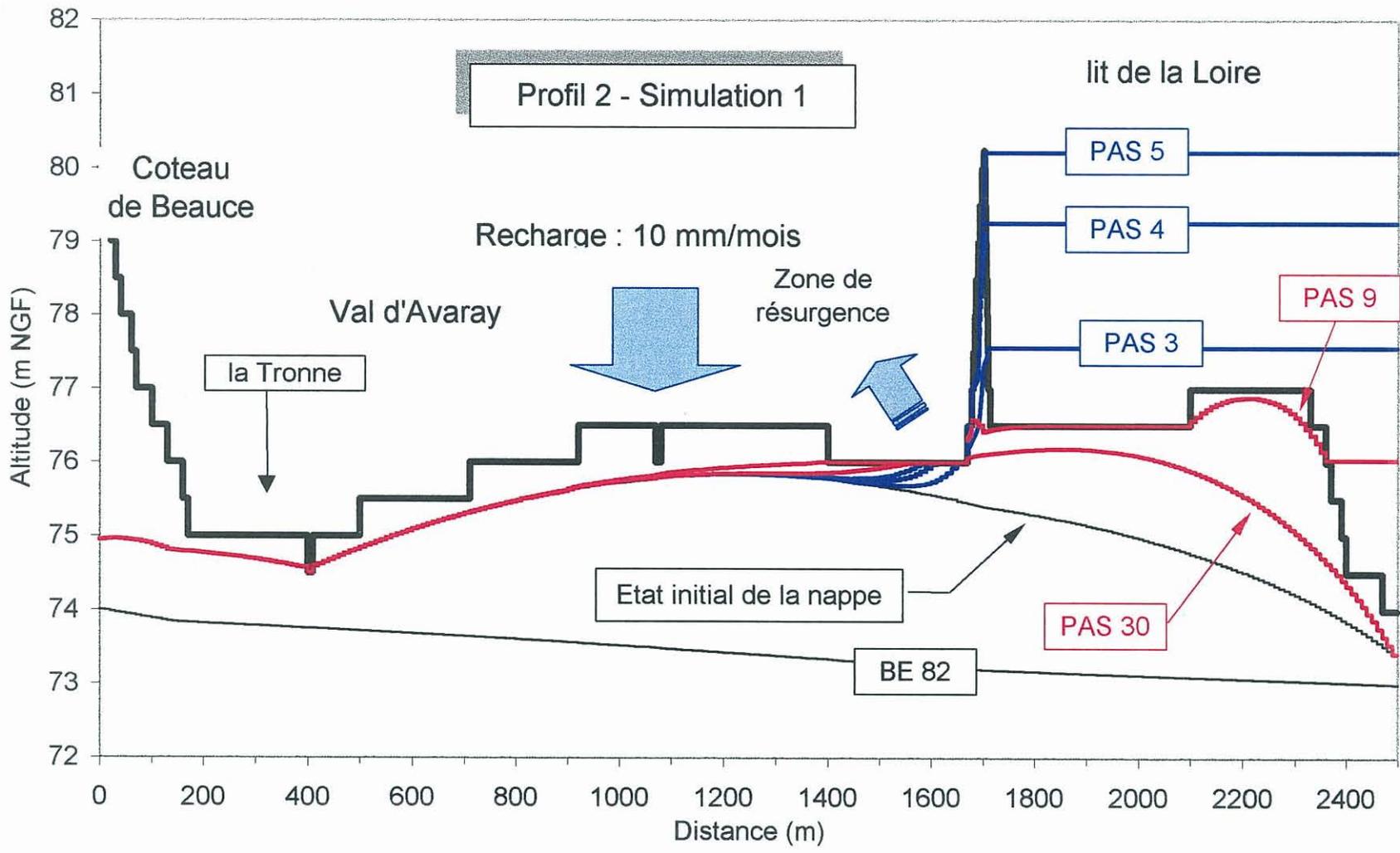
A4.7 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P1S4



A4.8 - Surface piézométrique calculée - Simulation P1S5

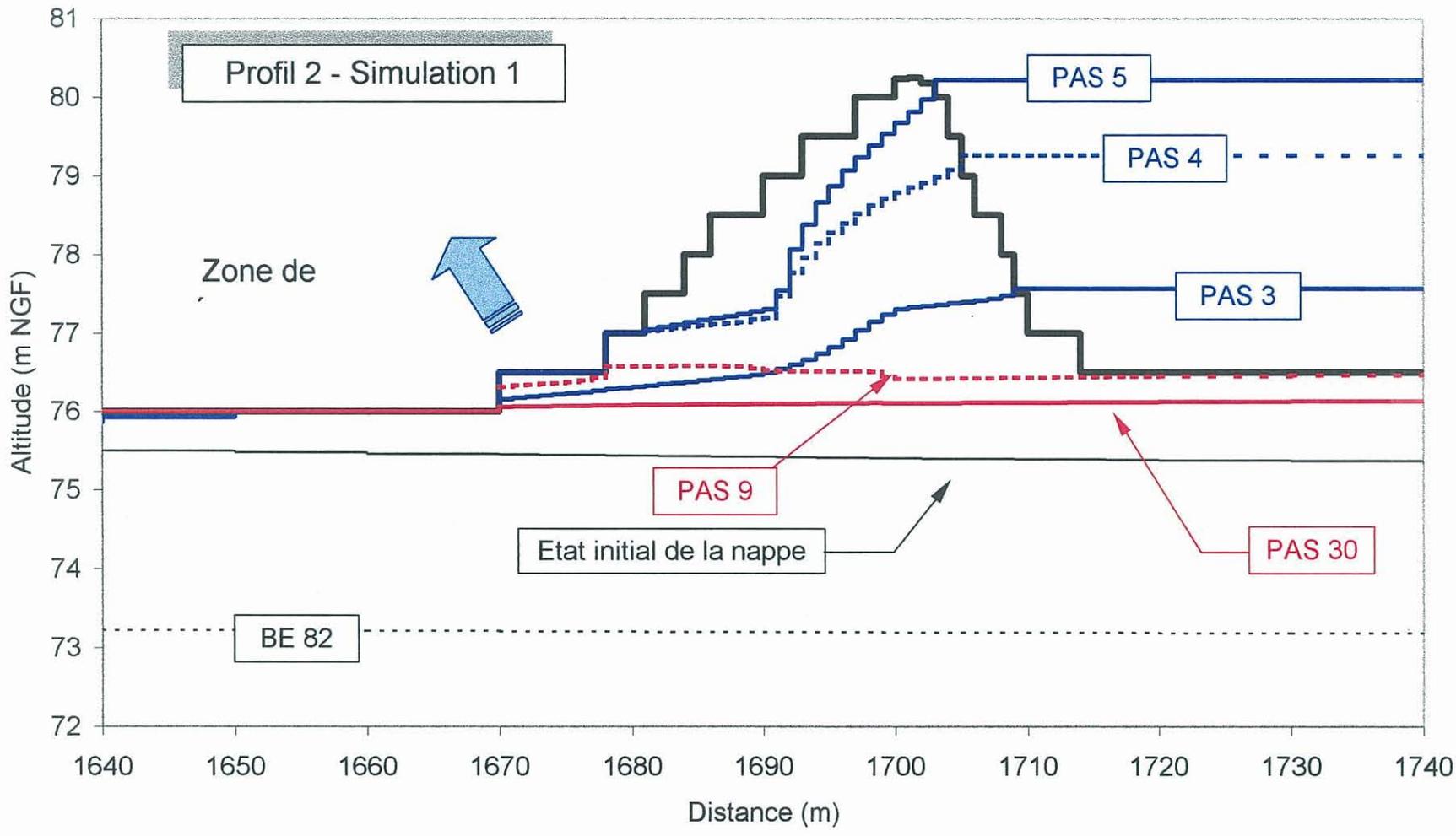


A4.9 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P1S5

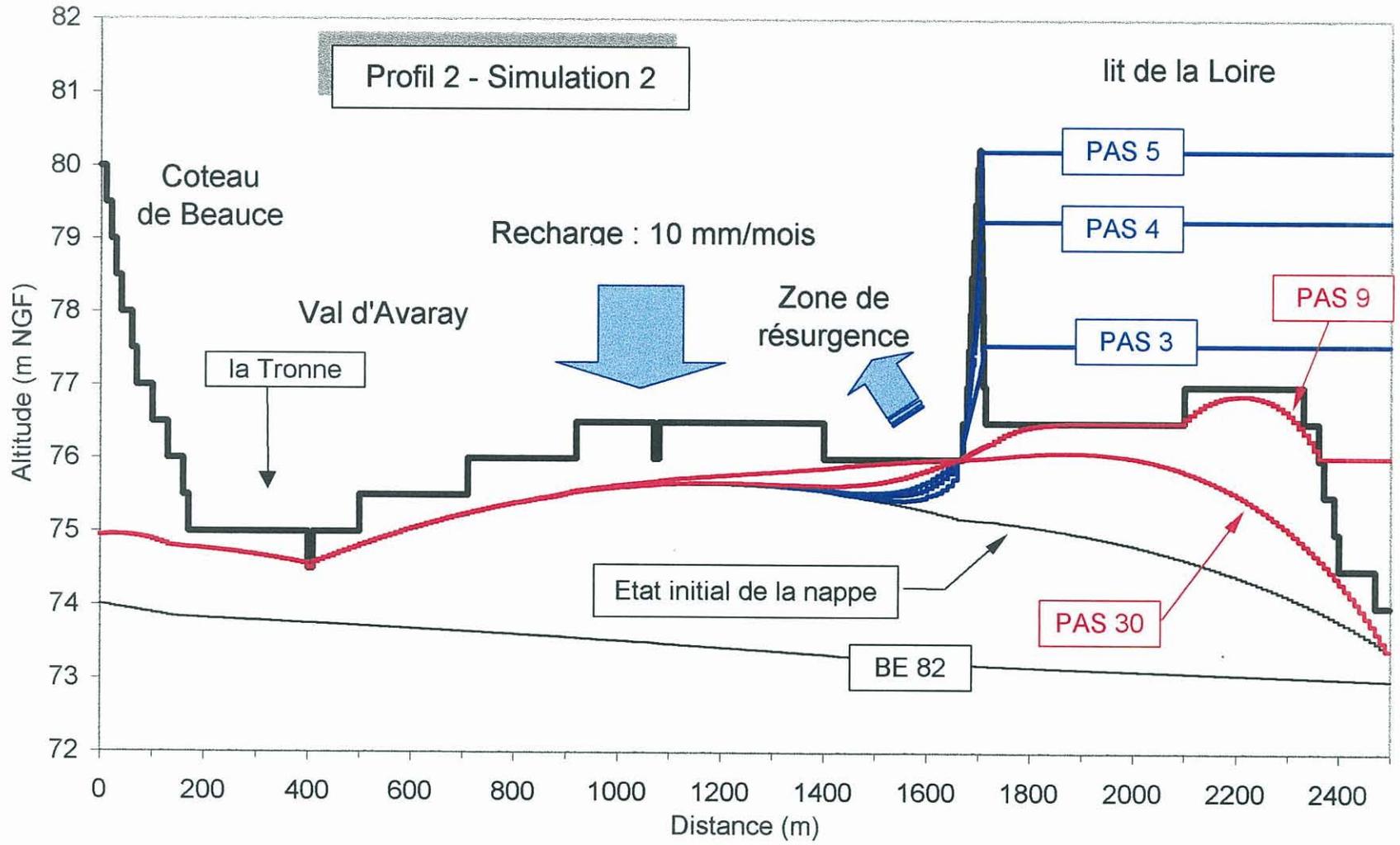


A4.10 - Surface piézométrique calculée - Simulation P2S1

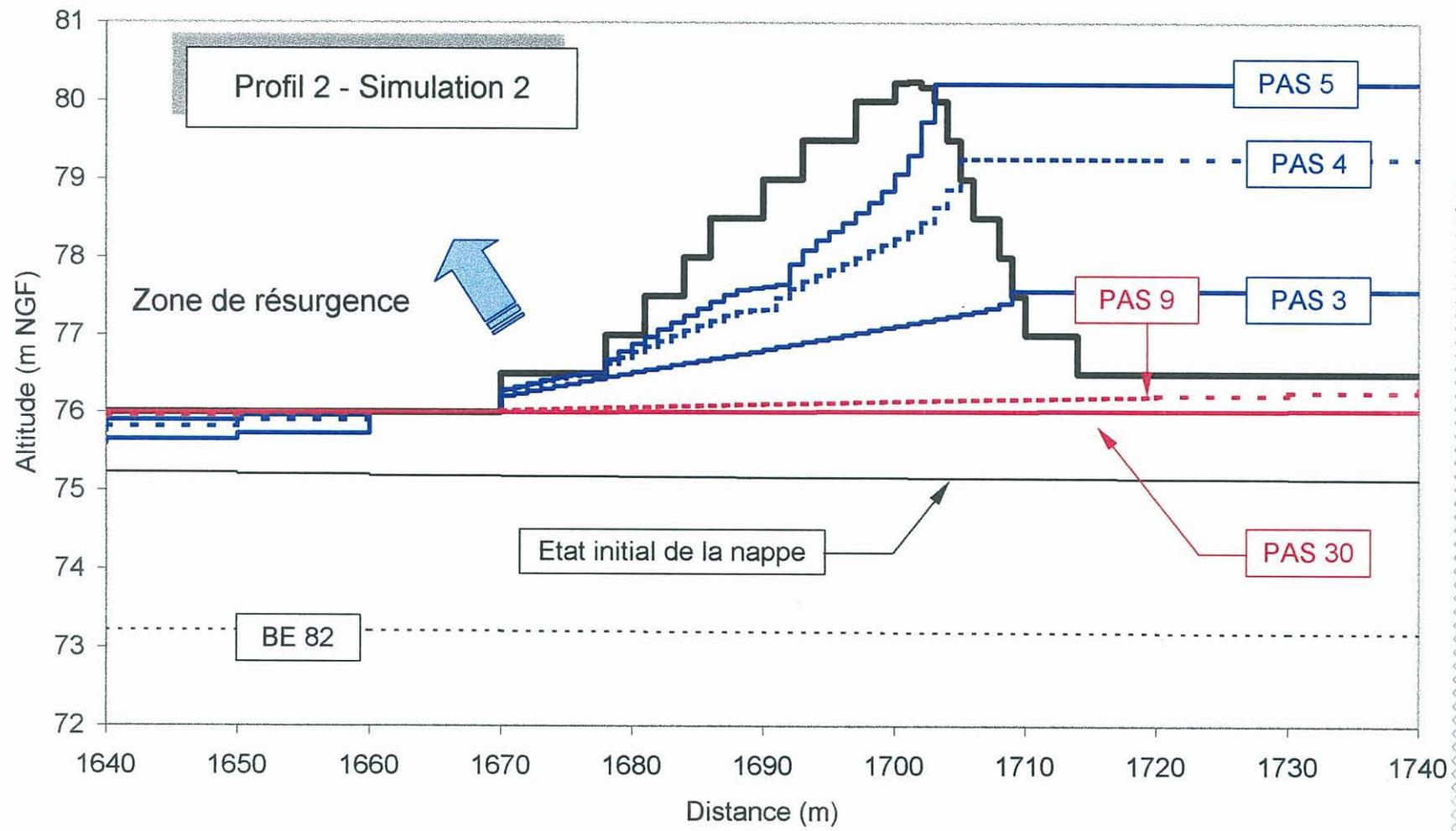
Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe



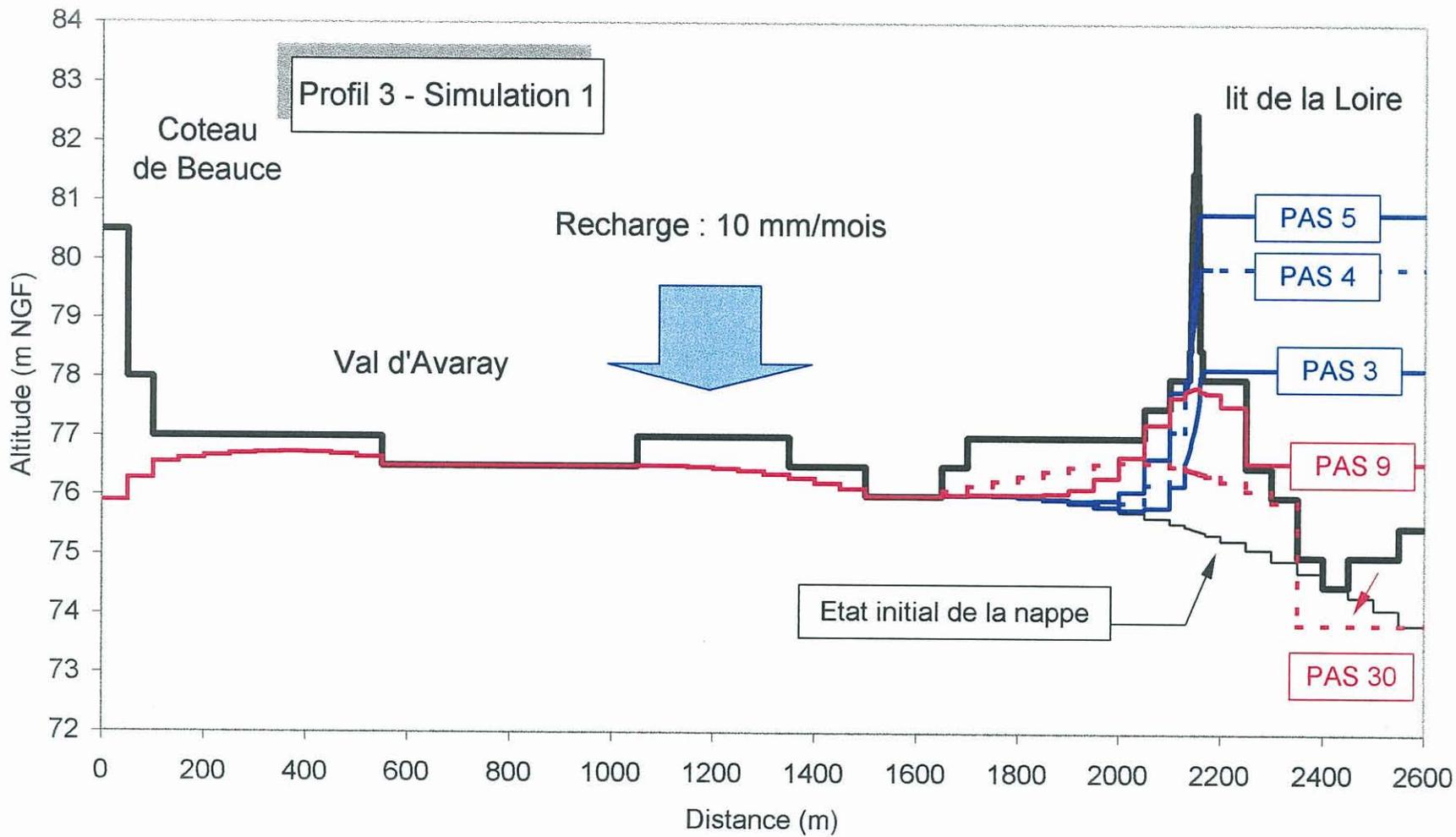
A4.11 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P2S1



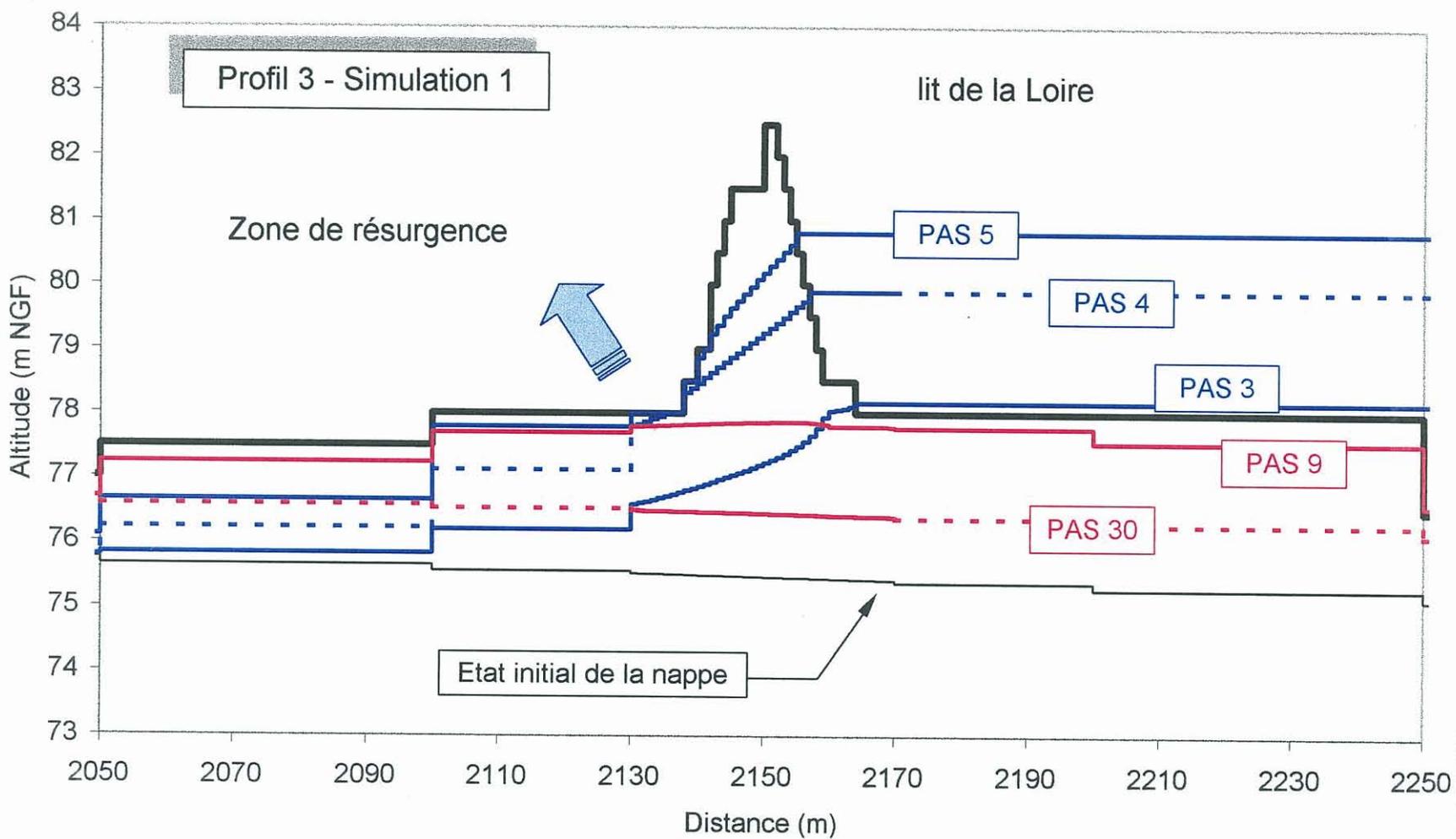
A4.12 - Surface piézométrique calculée - Simulation P2S2



A4.13 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P2S2



A4.14 - Surface piézométrique calculée - Simulation P3S1



A4.15 - Surface piézométrique calculée (détail à proximité de la digue) - Simulation P3S1

Annexe 5 - Débits de débordement dans le val

Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe

Tableau 1 – Valeurs des débits de débordements dans le Val pour les simulations P1S1, P1S3, P2S1, P2S2 et P3S1.

Simulations	P1S1	P1S3	P2S1		P2S2	P3S1	
PAS (jour)	Total	Total	Total	Drain	Total	Total	Digue aval
0							
1							
2							
3			0.28		9.42		
4	0.22		4.48	0.99	25.32	0.13	
5	0.65	0.31	6.69	1.74	34.82	1.95	0.71
6	2.06	0.46	6.85	1.75	34.91	2.61	0.71
7	1.67	0.54	5.40	1.16	27.48	1.73	0.29
8	0.56	0.27	2.43	0.11	12.01	0.07	
9	0.20	0.18	0.64		1.16		
10	0.16	0.16	0.51		0.57		
11	0.14	0.14	0.43		0.41		
12	0.12	0.12	0.38		0.34		
13	0.11	0.11	0.35		0.30		
14	0.10	0.10	0.34		0.28		
15	0.09	0.10	0.32		0.26		
16	0.08	0.09	0.31		0.25		
17	0.08	0.08	0.30		0.24		
18	0.07	0.08	0.29		0.23		
19	0.06	0.07	0.29		0.22		
20	0.06	0.07	0.29		0.22		
21	0.06	0.06	0.29		0.22		
22	0.05	0.06	0.28		0.21		
23	0.05	0.05	0.27		0.19		
24	0.04	0.05	0.27		0.18		
25	0.04	0.05	0.26		0.17		
26	0.03	0.04	0.26		0.16		
27	0.03	0.04	0.25		0.16		
28	0.03	0.04	0.24		0.15		
29	0.02	0.04	0.23		0.14		
30	0.02	0.03	0.23		0.12		
Volume total (m³)	6.8	3.4	33.2	5.8	150	6.5	1.7

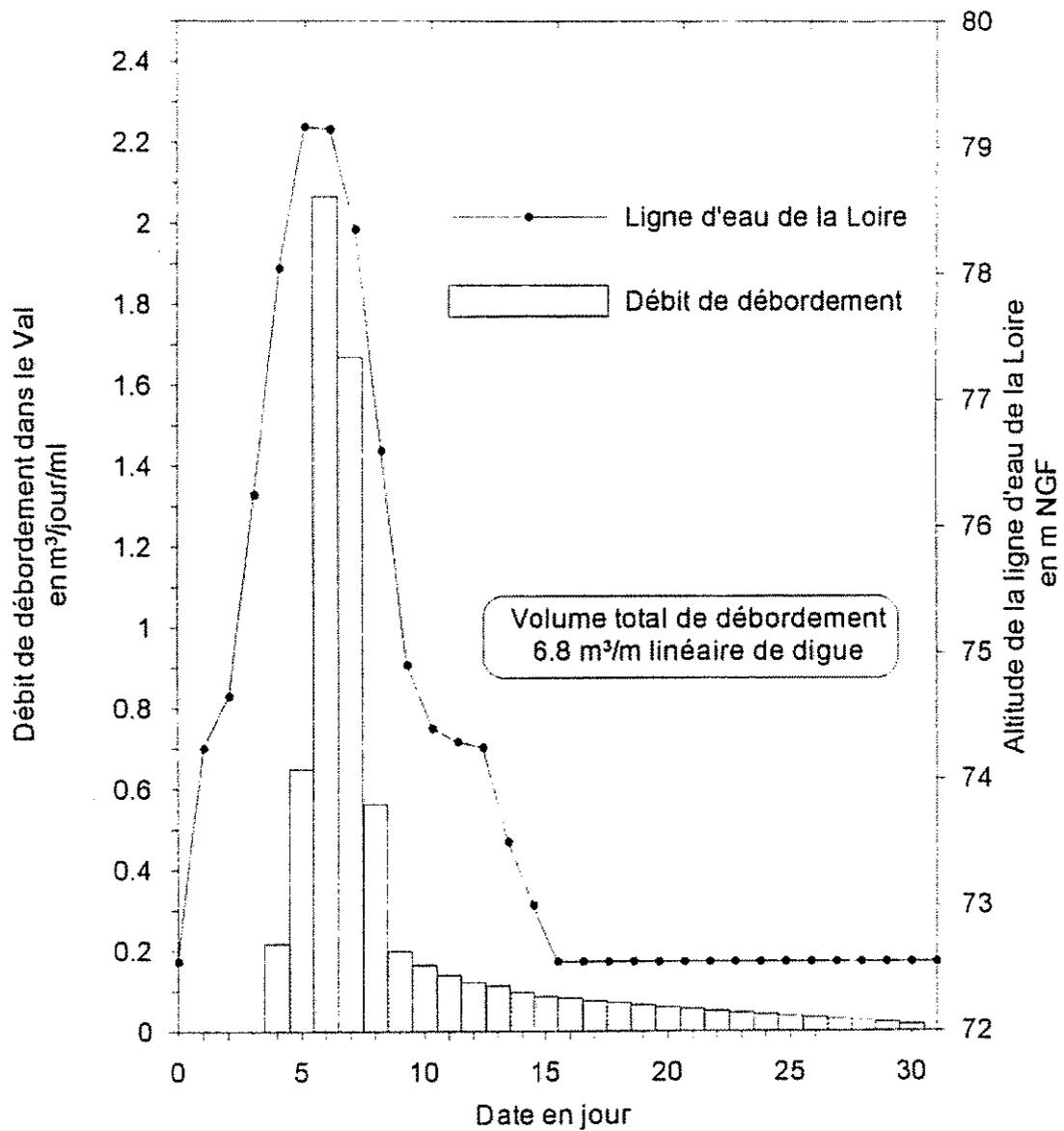
Risques d'inondation des vals de la Loire moyenne par remontée de nappe

Tableau 2 – Valeurs des débits de débordements dans le Val pour les simulations P1S4 et P1S5.

<i>Simulations</i>	P1S4	P1S5
PAS (jour)	Total	Total
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21	0.16	0.20
22	0.16	0.20
23	0.16	0.20
24	0.16	0.20
25	0.16	0.20
26	0.16	0.20
27	0.16	0.20
28	0.16	0.20
29	0.16	0.20
30	0.16	0.20
31	0.46	1.12
32	2.26	2.74
33	2.43	2.86
34	1.91	2.25
35	0.75	0.85
36	0.21	0.14
37	0.18	0.09
38	0.16	0.06
39	0.14	0.04
40	0.13	0.03
41	0.12	0.02
42	0.11	0.02
43	0.10	0.01
44	0.10	0.01
45	0.10	0.01
46	0.09	0.01
47	0.08	
48	0.08	
49	0.07	
50	0.07	
51	0.06	
52	0.06	
53	0.05	
54	0.05	
55	0.04	
56	0.04	
57	0.03	
58	0.03	
Volume total (m³)	11.6	12.2

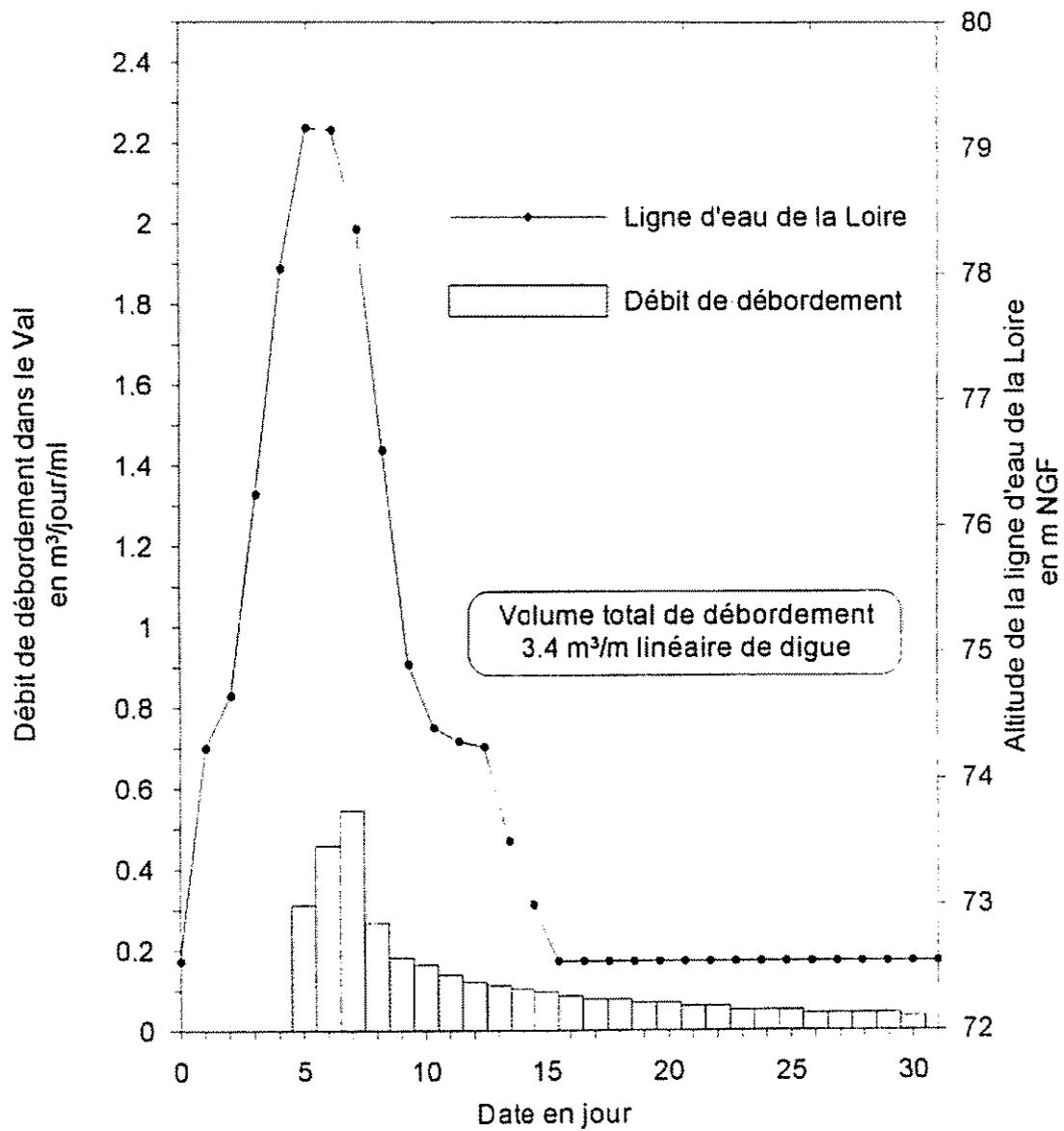
A5.1 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P1S1

Profil 1 - Simulation 1



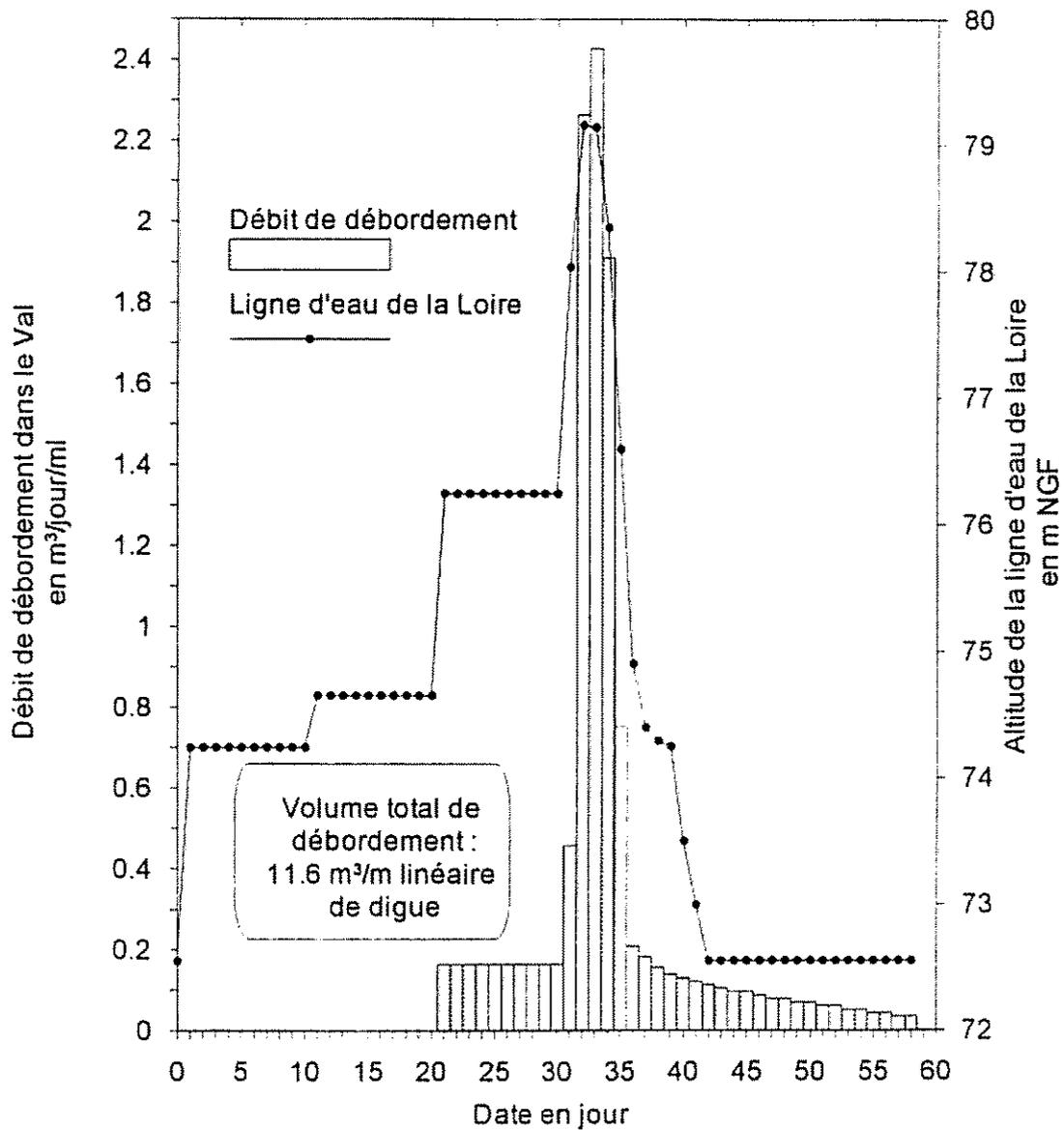
A5.2 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P1S3

Profil 1 - Simulation 3



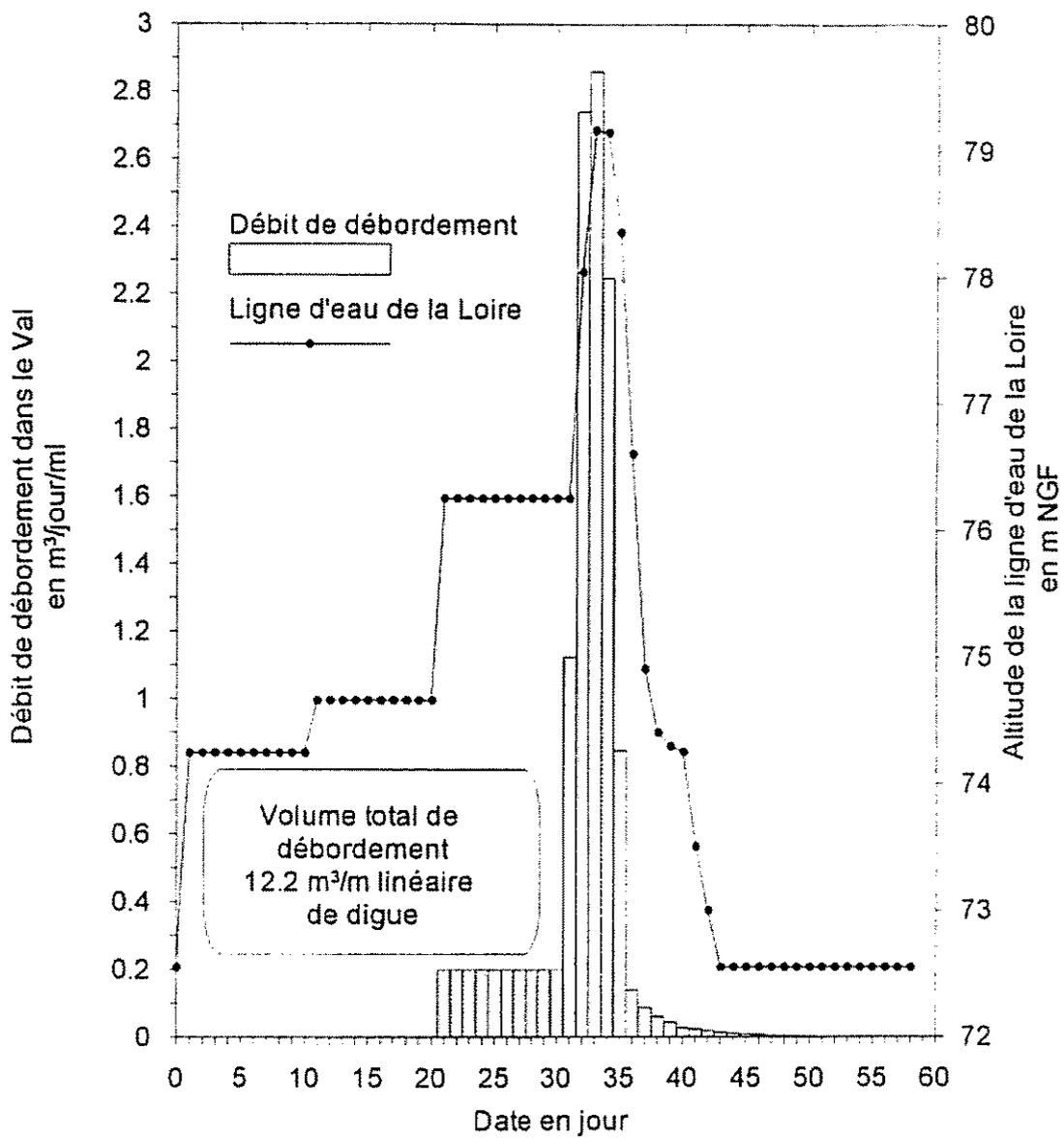
A5.3 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P1S4

Profil 1 - Simulation 4



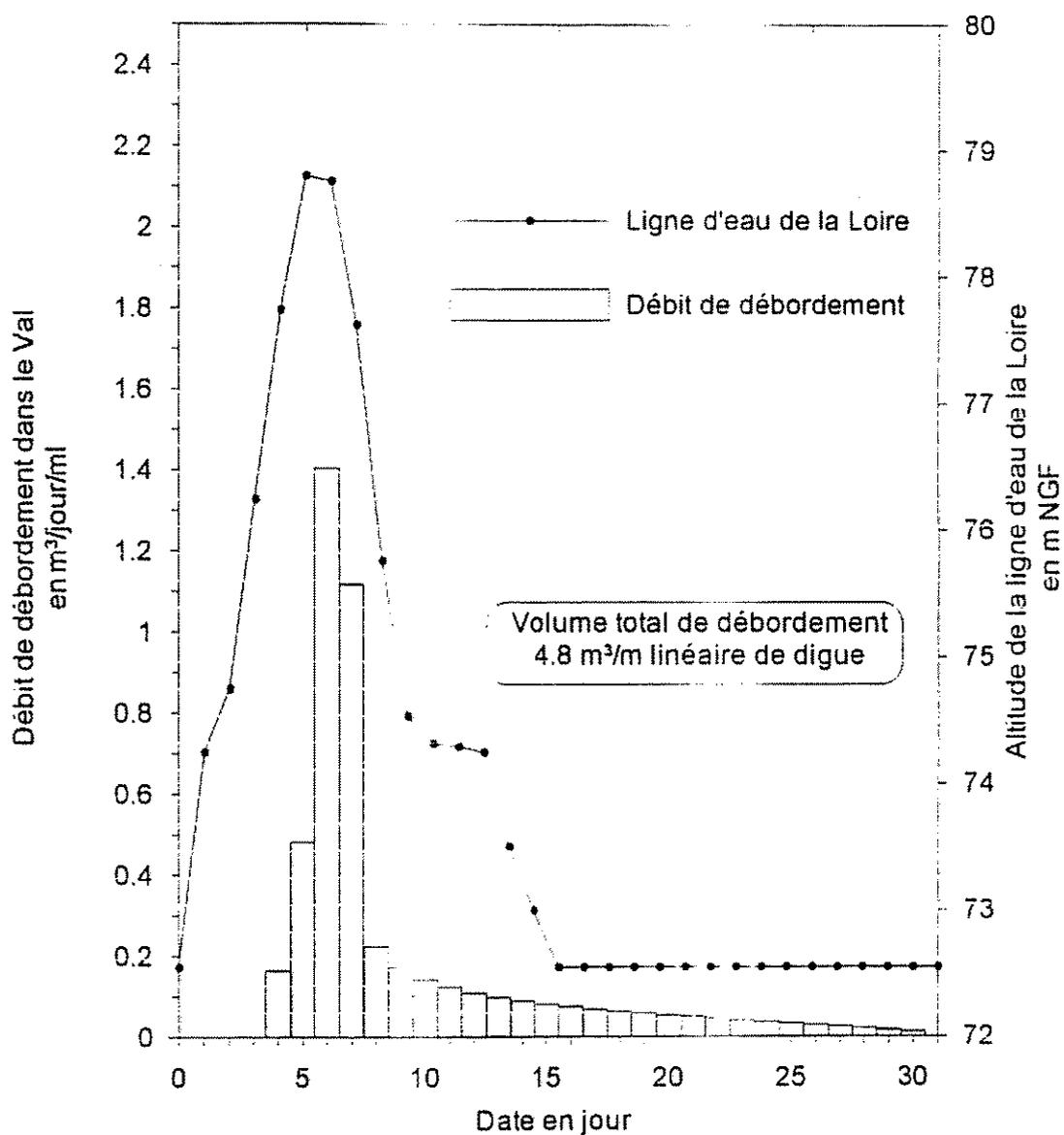
A5.4 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P1S5

Profil 1 - Simulation 5



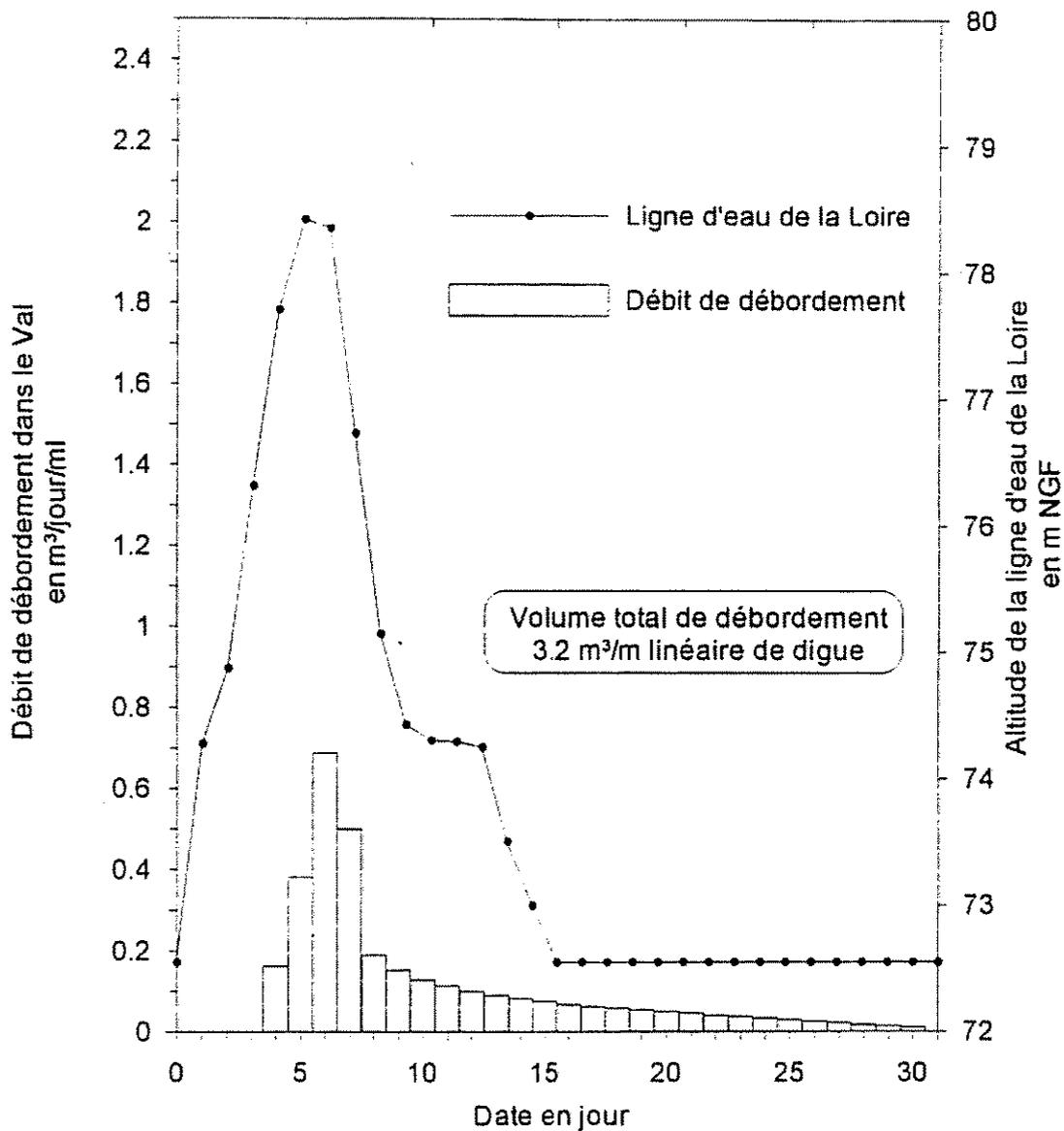
A5.5 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P1S6

Profil 1 - Simulation 6



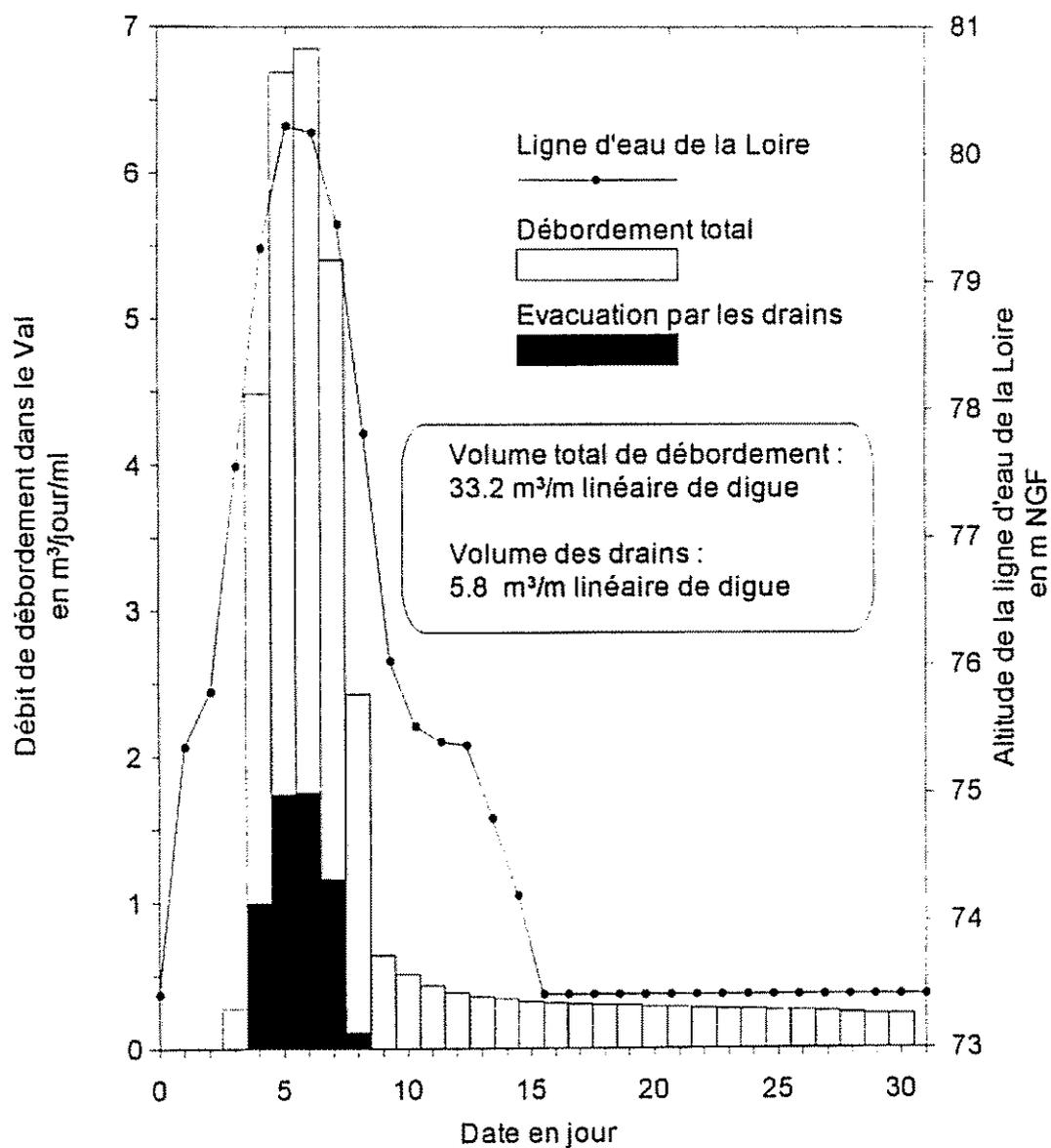
A5.6 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P1S7

Profil 1 - Simulation 7



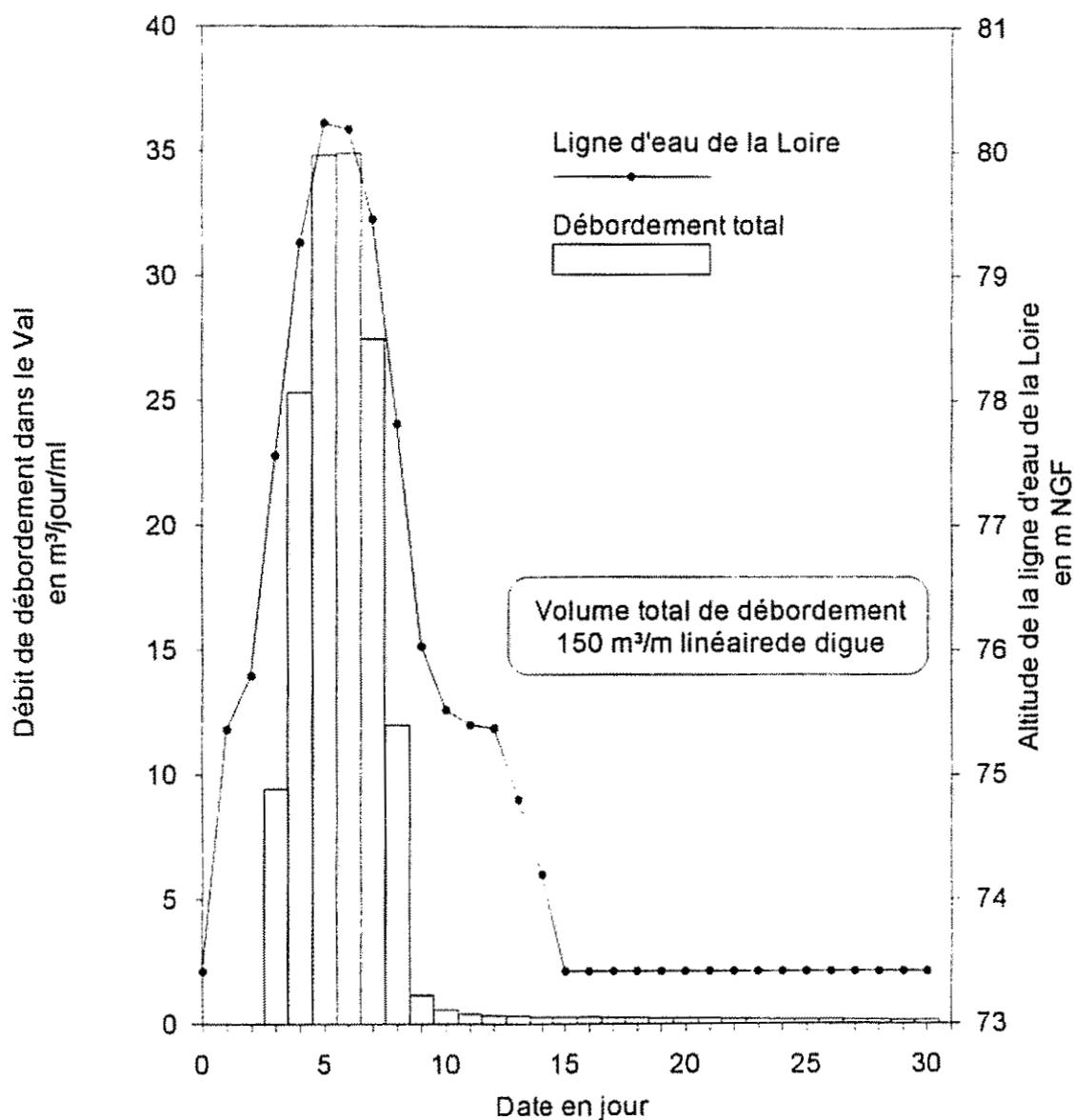
A5.7 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P2S1

Profil 2 - Simulation 1



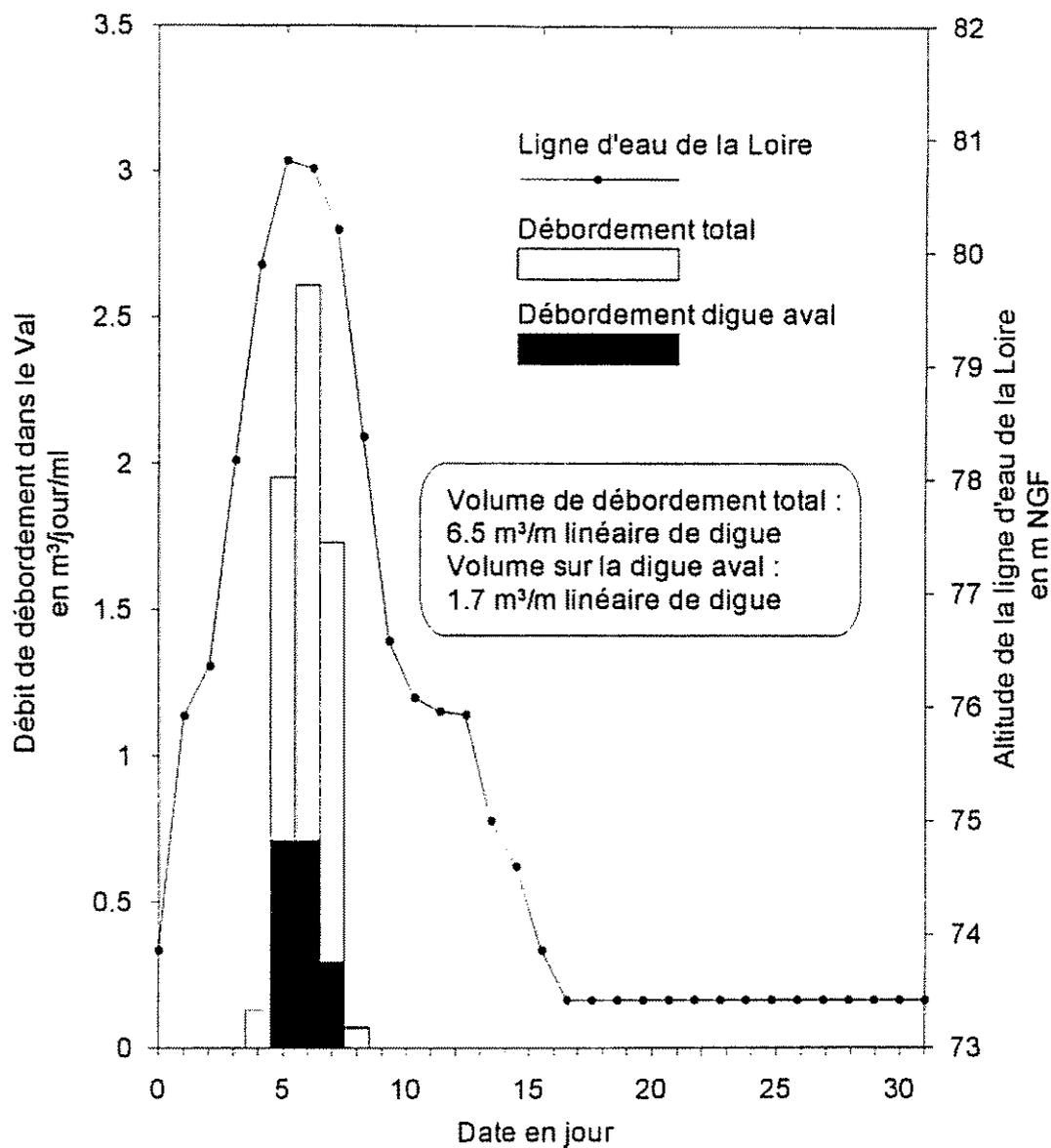
A5.8 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P2S2

Profil 2 - Simulation 2



A5.9 - Évolution des débits de débordement dans le Val - Simulation P3S1

Profil 3 - Simulation 1



**BRGM
SERVICE EAU**

BP 6009 - 45060 ORLEANS Cedex 2 - France - Tél. : (33) 02.38.64.34.34