

Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud,
Ecole des Mines de Paris
& Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts



Réponse hydraulique d'un bras mort au signal hydrologique de la rivière

DEA Hydrologie, Hydrogéologie,
Géostatistique et Géochimie

*Filière Hydrologie et Hydrogéologie
Quantitatives*

Maître de stage : **Bernard CHASTAN**

Jérôme LE COZ

Ingénieur élève du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

Cemagref

Département Gestion des Milieux Aquatiques
Unité de Recherche Hydrologie – Hydraulique
Equipe « Hydraulique des rivières »

Groupement de Lyon
3 bis quai Chauveau CP 220
69336 Lyon Cedex 09

Tél : 04 72 20 87 87 – Fax : 04 78 47 78 75

Septembre 2003

REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude à :

- Ghislain de Marsily, directeur du DEA HHGG ;
- Bernard Chastan, maître de stage et grand lônolâtre ;
- Hervé Piégay, Gérard Degoutte, pour leurs avis éclairés ;
- Céline Boudard, Guillaume Dramais et Mickaël Lagouy, pour les indispensables données topographiques ;
- Alain Recking, Christine Poulard, lônologues distingués du Cemagref ;
- Philippe Ramez, Jean-Baptiste Faure, André Paquier, et toutes les autres personnes sollicitées dans l'unité pour leurs conseils pratiques ;
- Fred, Sandrine, Nicolas, éleveurs de cochons, pour l'animation du bureau ;
- et Flora.

RESUME

Les bras morts de l'Ain et du Rhône, appelés régionalement « lônes », sont des zones humides importantes pour le fonctionnement de l'hydrosystème fluvial. Depuis quelques années, ces écosystèmes très riches font l'objet d'études croisées de la part de géographes, biologistes, hydrologues et hydrauliciens. A partir d'un inventaire critique des réflexions antérieures, ce stage de DEA a pour objectif de relancer l'étude du fonctionnement hydraulique des lônes à la faveur de nouvelles données.

Une modélisation hydraulique de l'Ain entre Pont-de-Chazey et la confluence avec le Rhône, adaptée au secteur des lônes de St-Jean-de-Niost (Planet, Creux de Fouchoux, Ricotti, Gourdans, Sous-Bresse), a été utilisée en régime transitoire pour simuler des limnigrammes sur les années 2000 et 2001. Malgré des améliorations, l'utilisation de relevés topographiques anciens (1987) entraîne sur les hauteurs d'eau des incertitudes importantes et difficiles à quantifier.

Depuis 2000, des chroniques limnimétriques ont été enregistrées par le Cemagref dans plusieurs lônes de l'Ain. En outre, des relevés topographiques y ont été effectués en 2002. L'analyse des limnigrammes a permis d'identifier des modes de fonctionnement très différents correspondant vraisemblablement aux séquences de connexions/déconnexions de la lône avec la rivière, par-dessus ses bouchons amont et aval. Il est ainsi possible, grâce au modèle hydraulique de la rivière, d'évaluer les cotes de connexion de chaque lône.

Un modèle simple de fonctionnement hydrogéologique d'une nappe alluviale soutenue rend compte du fonctionnement « phréatique » de la lône, hors périodes de débordement. Le calage comme les données géologiques disponibles indiquent pour la nappe alluviale un rapport T/S proche de 0,4 [m²/s].

Enfin, une nouvelle méthode d'estimation des fréquences de connexion, fondée sur l'analyse des limnigrammes, est proposée et comparée à celle issue des relevés topographiques. Les résultats sont en général compatibles, sauf dans un cas où le mécanisme d'inondation de la lône a sans doute été mal décrit.

ABSTRACT

The abandoned channels of the French rivers Ain and Rhône constitute wetlands that come uppermost in the good working of the “hydrosystems”. For recent years, geographers, biologists, hydrologists have been studying together those highly rich ecosystems. From a critical survey of previous studies, the present work intends to reconsider abandoned channels’ hydraulic functioning, thanks to new data.

Hydraulic model of Ain river between Pont-de-Chazey and the confluence with Rhône river (area of Planet, Creux de Fouchoux, Ricotti, Gourdans, Sous-Bresse abandoned channels) was used with unsteady conditions to compute water levels in 2000 and 2001. Despite improvements, errors on water levels due to old topographic data (1987) remain difficult to estimate.

Since 2000, Cemagref services have been recording water levels in several abandoned channels of Ain river. Moreover, they collected topographic data in those channels in 2002. Limnographs show very different kinds of response. In all likelihood they are linked to hydraulic connection or disconnection phases between the river and the abandoned channel. So we can – thanks to the hydraulic model of the river – estimate connection levels for each abandoned channel, through its downstream and upstream tips.

Simple alluvial groundwater model can explain how the abandoned channel works when not flooded by the river. Both simulation and geologic data show that T/S is close to 0.4 [m²/s].

At last, we propose a new connection rate estimate based on water level analysis and compared with topographic data analysis. Conclusions usually are not significantly different, apart from one abandoned channel where flooding must be not properly understood.

RESUME	3
ABSTRACT	4
1. PRESENTATION DE LA THEMATIQUE	6
1.1 Redécouverte des zones humides.....	6
1.2 Les milieux humides périfluviaux.....	7
1.3 Les lônes et leur contexte local.....	7
2. OBJECTIFS DU STAGE DE DEA	10
2.1 Réflexions antérieures des hydrauliciens	10
2.2 Fonctionnement hydraulique d'une lône	11
2.3 Nouvelles données, nouveaux objectifs	12
3. EXPLOITATION DES LIMNIGRAMMES MESURES DANS LES LONES	13
3.1 Présentation du site expérimental	13
3.2 Données disponibles sur les lônes.....	15
3.3 Analyse qualitative des chroniques	17
3.4 Observation de seuils de débordement.....	19
4. MODELISATION HYDRAULIQUE DE LA RIVIERE	21
4.1 Etat des lieux.....	21
4.2 Recalage et critique du modèle	22
4.3 Estimation de la dérive de la ligne d'eau	25
5. MISE EN EVIDENCE DE COMPORTEMENTS « DE NAPPE »	29
5.1 Modélisation hydrogéologique d'une nappe alluviale soutenue.....	29
5.2 Estimation des paramètres hydrogéologiques de la nappe alluviale de l'Ain	31
5.3 Modélisation de la piézométrie au niveau de la lône	33
6. ESTIMATION DES FREQUENCES DE DEBORDEMENT AMONT	38
6.1 Méthode « topographique » (2002).....	38
6.2 Méthode « limnimétrique » (2003)	38
6.3 Comparaison des résultats	39
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	41
7.1 Avancées et points durs.....	41
7.2 Un pas vers le diagnostic morphologique	41
BIBLIOGRAPHIE	42
ANNEXES.....	43
8. Un peu de lexicographie.....	45
9. Glossaire.....	46
10. Inventaire des données réunies au Cemagref.....	48
11. L'Ain d'Oussiat à Anthon.....	49
12. L'Ain de Pont de Chazey à Port-Galland.....	50
13. Etablissement des fréquences de connexion.....	51
14. Etablissement du modèle de nappe soutenue.....	52
15. Récapitulatif des deux méthodes d'obtention de la cote de connexion.....	53
16. Résultats : lône de Planet 2001	54
17. Résultats : lône de Ricotti 2001.....	55
18. Connexions observées in-situ	56

1. PRESENTATION DE LA THEMATIQUE

1.1 *Redécouverte des zones humides*

Jusqu'il y a deux ou trois décennies, les zones humides n'étaient pas considérées comme un patrimoine à protéger ou à restaurer mais comme des milieux insalubres à assainir, des terres incultes à assécher, des obstacles à la navigation fluviale à supprimer. Aujourd'hui, les scientifiques mettent en avant leur intérêt écologique et socio-économique, tandis que la demande en terres agricoles s'est réduite. La récente création du Groupe d'Histoire des Zones Humides par des historiens, géographes, archéologues et écologues, est le reflet d'un durable regain d'intérêt au sein de la société.

Il n'existe pas de définition universelle des zones humides, et leur seul inventaire, préconisé par les SDAGE, n'est pas sans poser de grandes difficultés, tant la frontière entre domaine aquatique et domaine terrestre est fluctuante. La Loi sur l'Eau de 1992 les définit comme des « terrains exploités ou non, habituellement gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre, de façon permanente ou temporaire ; la végétation, si elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année ». Hydrologiquement parlant, ce sont des territoires dont le bilan hydrique est régulièrement excédentaire.

Les zones humides sont actuellement au centre des questions sur la restauration et la gestion durable des grands fleuves et cours d'eau. Dès 1986, la France a ratifié la Convention spécifique de Ramsar (Iran, 1971) pour la préservation et la bonne gestion des zones humides (www.ramsar.org). Les zones humides françaises ont en effet vu leur fonctionnement hydrologique et écologique fortement perturbé par l'activité humaine. Leur superficie a diminué de moitié en une trentaine d'années. Afin de mieux caractériser leurs fonctions hydrologiques, biogéochimiques, patrimoniales et paysagères, l'Etat a initié en 1997 un programme national de recherche sur les zones humides (PNRZH) doté d'un budget de 16,1 MF attribué par les Agences de l'Eau et les ministères chargés de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Equipement.

Cinq grandes interrogations ressortent des études publiées dans le cadre du PNRZH, achevées récemment :

- ❑ la définition des zones humides, notamment dans des milieux profondément modifiés par l'homme ;
- ❑ l'origine de l'eau alimentant ces zones humides ;
- ❑ leur action sur la qualité de l'eau, et en particulier leur capacité tampon vis-à-vis de l'azote ;
- ❑ leur contribution à la biodiversité, par la structuration de communautés animales et végétales spécifiques ;
- ❑ l'évaluation économique des services naturels que fournissent les zones humides, ce qui n'est pas sans poser des problèmes conceptuels, ne serait-ce que de conversion des potentiels hydrologiques, biogéochimiques et écologiques sur une échelle monétaire.

Dans le cadre précis des annexes fluviales (plans d'eau liés à l'existence du cours d'eau, à l'exclusion des chenaux actifs), il apparaît clairement que les réponses à ces questions passent en partie par une amélioration de la compréhension du fonctionnement hydraulique, hydrologique et sédimentaire de ce type de milieux.

1.2 Les milieux humides périfluviaux

Les milieux humides périfluviaux revêtent une importance écologique majeure, ne serait-ce qu'en termes de diversité de l'habitat et des populations [1]. Ces milieux constituent des zones favorables à la reproduction de certaines espèces (batraciens, insectes tels les moustiques, poissons comme le brochet). Les lônes offrent en effet de bonnes conditions de frai, de nidification et de nurserie, par la présence d'eaux calmes et riches en nourriture. Ce sont également des zones refuges en cas de crue violente, de fortes chaleurs ou de pollution.

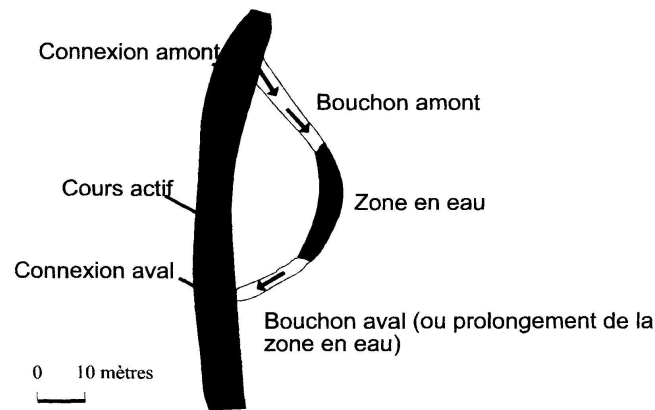
Dans les milieux aquatiques, le rôle fondamental de l'eau est de relier les différentes unités (« patches ») de l'écosystème. Le fonctionnement de l'écosystème dépend en grande part de cette « connectivité hydrologique » des annexes fluviales, notamment dans la dimension latérale (connexions avec le chenal principal), mais aussi verticale (connexions avec les nappes alluviale et de coteaux). La morphodynamique et le régime hydrologique d'une lône influencent les cycles biologiques sur les différentes échelles de temps considérées [2].

Le régime hydrologique du cours d'eau principal régit bon nombre de paramètres capitaux de l'habitat périfluvial. Or les fluctuations hydrologiques de l'hydrosystème fluvial n'ont cette influence sur les annexes qu'à travers des processus hydrauliques et sédimentaires complexes. L'évolution usuelle des lônes vers l'atterrissement et le comblement a permis d'établir une théorie des successions végétales dans ces milieux. Selon cette théorie et le Patch Dynamics Concept (connectivité), la biodiversité est en général stable dans les annexes fluviales fréquemment inondées (40 jours/an) et augmente dans celles rarement inondées (1 jour/an) [3].

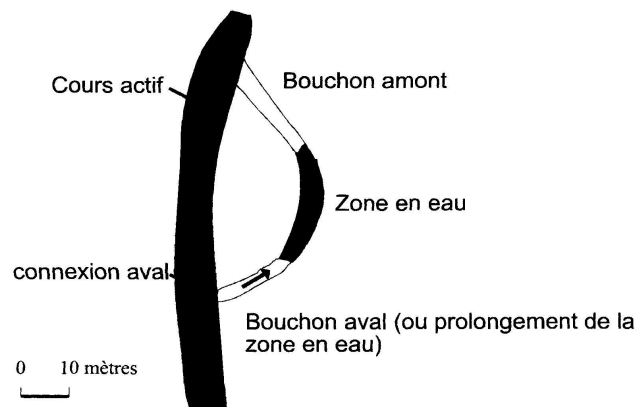
1.3 Les lônes et leur contexte local

Dans le bassin du Rhône, un bras abandonné par le cours d'eau principal du fait de sa dynamique latérale, voire de son changement de style fluvial (de tresses à méandres par exemple), est appelé une lône (sur ce mot, cf. annexe 1). Il peut s'agir d'un bras secondaire obturé à l'amont (soit naturellement, soit par une digue submersible), d'un bras mort, d'une basse de convexité, d'une tresse abandonnée, ou d'un ancien méandre coupé. En général, cette annexe fluviale se compose d'une zone centrale inondée de façon pérenne, et séparée du cours actif par deux bouchons alluviaux. Ces formations, souvent boisées et parfois difficile à repérer sur le terrain, subissent un débordement à l'occasion des crues de la rivière. Il arrive que la connexion par l'aval (usuellement plus fréquente que par l'amont) soit permanente, en l'absence de bouchon aval. La morphodynamique des lônes dépend à la fois du régime hydrologique et de l'équilibre sédimentaire du cours d'eau principal. En effet, une incision ou un exhaussement du lit de la rivière modifie la fréquence de débordement dans la lône.

On dénombre actuellement plus de 250 lônes d'importance variable dans la seule vallée du Rhône, représentant un linéaire de plus de 300 km (données CNR). Ces annexes fluviales présentent des comportements variés selon la dynamique de la rivière dont elles dépendent. Les bras morts du Rhône sont voués à l'atterrissement, car les fortes contraintes exercées sur le fleuve limitent fortement les possibilités de régénération ou de création. La question porte alors sur les bonnes conditions de la restauration de milieux concentrant l'essentiel de la biodiversité. Les lônes de l'Ain ont en revanche conservé l'essentiel de leur morphodynamique naturelle, la pression humaine étant moins forte sur cette rivière.



a) Connexions amont et aval pendant une forte crue



b) Connexion aval pendant une crue

Fonctionnement d'une lône en période de crue

Au niveau régional, les géomorphologues du Laboratoire de Géographie Rhodanienne (UMR 5600 CNRS-Université Lyon 3) s'attachent à étudier la morphodynamique contemporaine des grands cours d'eau. Les annexes fluviales constituent un axe fort de leurs recherches, comme en témoignera notamment la thèse d'Anne Citterio, portant sur *l'Evolution historique et diversité fonctionnelle des zones humides de trois systèmes fluviaux anthropisés : l'Ain, le Doubs et le Haut-Rhône*.

Dans ce cadre, des avancées significatives ont été réalisées. Les deux mémoires de géographie suivants sont représentatifs des outils, de la démarche et des applications d'une géomorphologie de terrain. Stéphane Brunel [4] a ainsi analysé et cartographié la topographie, les sédiments et la végétation des bouchons alluviaux (amont) de quatre lônes de la basse vallée de l'Ain. La topographie du toit de galets montre qu'en général, la morphologie actuelle est presque totalement héritée du bouchon alluvial primaire, formé après le recoupement du bras. Bertrand Moulin [5] a de son côté procédé à l'analyse morphologique et sédimentaire de la zone en eau de onze lônes de l'Ain. L'analyse statistique montre que l'angle par rapport au chenal actif ainsi que la largeur du bras mort sont deux paramètres déterminants pour l'alluvionnement formant le bouchon amont.

Ces travaux ont ainsi conclu à l'importance de la dynamique du cours d'eau principal dans la détermination des caractéristiques initiales des annexes fluviales et de leur évolution. La dynamique de comblement des annexes dépend fortement du degré de connexion hydraulique avec le chenal principal, la mobilité de celui-ci ayant des conséquences très différentes sur l'évolution des bouchons alluviaux.

L'aménagement des cours d'eau du bassin du Rhône a modifié, parfois profondément, le régime des crues et donc altéré le fonctionnement des annexes fluviales en accélérant généralement leur processus d'atterrissement. Du point de vue des gestionnaires, l'élaboration de bonnes règles de mise en valeur ou de restauration des lônes, reposant sur une capacité réelle à bien estimer leurs évolutions probables sous diverses contraintes d'aménagement, est un enjeu économique et écologique fort. Les réalisations, passées ou en cours, reposent sur une base encore largement empirique dans l'état de l'art actuel. Elles mettent en œuvre des techniques diverses allant de la revégétalisation des berges et du curage des débris organiques, au rétablissement de l'alimentation depuis le fleuve ou la nappe alluviale (exemples de Caderousse dans le Vaucluse, ou de Rossillon dans l'Ain).

Les acteurs locaux à l'œuvre sur cette thématique sont principalement la CNR (Compagnie Nationale du Rhône), les DiREn, les collectivités territoriales, les instances locales de concertation (Commissions Locales de l'Eau notamment). A titre d'exemple, les responsables du SAGE de la Basse Vallée de l'Ain [6] ont fait réaliser des études complémentaires, dont une en géomorphologie [7] avec diagnostic incision/exhaussement, et une autre en hydrogéologie [8]. Ces deux documents comportent nombre de données intéressantes à l'échelle du site d'étude.

2. OBJECTIFS DU STAGE DE DEA

2.1 *Réflexions antérieures des hydrauliciens*

L'importance des facteurs hydrauliques, hydrologiques et sédimentaires est, on l'a vu, largement reconnue pour la compréhension du fonctionnement de ces zones aquatiques périfluviales et de leur évolution. Pour autant, les travaux de recherche focalisés sur ces aspects sont encore peu nombreux, même à l'échelle de la communauté scientifique mondiale.

L'étude hydraulique des lônes de l'Ain et du Rhône a essentiellement été menée depuis huit ans lors de stages de quelques mois. Ainsi, la CNR ayant signé au début des années 90 une charte de l'environnement qui prévoit « une reconquête des milieux humides en général, et des lônes en particulier », Stéphane Quignard [9] y a effectué en 1995 son stage de fin d'études ENGREF. Il a estimé les fréquences de connexion par débordement selon la méthode résumée sur le schéma en annexe 6, et reprise par les études suivantes. Dans le cadre de la collaboration CNR-Laboratoire d'Ecologie des Eaux Douces de l'université Lyon I, il propose la modélisation hydraulique (avec le logiciel 1D maillé Crue-7) de neuf lônes du Rhône, ayant fait l'objet d'un suivi biologique à long terme.

Les descripteurs retenus (fréquence d'inondation amont, dernier mois d'inondation avant l'été, premier mois d'inondation après l'été, vitesse relative à un débit $T=2$ ans, profil en long des vitesses) ne font pas ressortir une typologie claire. La fréquence de connexion amont et les vitesses de l'eau dans la lône semblent être déterminantes pour expliquer les différentes vitesses de comblement observées sur le terrain. La vitesse de régénération morphologique (remobilisation des matériaux déposés dans la lône) est estimée à 0,8 m/s en moyenne sur la lône, à l'occasion de la crue biennale.

Au Cemagref, Christophe Statiotis [10] avait pour objectif en 1998 de déterminer la fréquence des différentes gammes de vitesses dans cinq lônes de l'Ain. La difficulté à établir des relevés topographiques fiables a restreint l'étude à l'établissement des fréquences de connexion par l'amont. Les lignes d'eau de l'Ain en 1977 et 1987 sont simulées grâce au logiciel Fluvia (modèle hydraulique 1D permanent à surface libre), à partir d'études SOGREAH (1980, 1988). En 1999, Christophe Poluzot [11] applique la même démarche à six lônes du Rhône. Il calcule ou observe pour chacun de ces bras morts la fréquence de connexion amont, les vitesses moyennes dans la lône correspondant à des débits donnés, le profil en long des vitesses, et l'épaisseur de sédiments. Les lônes les moins souvent connectées par l'amont semblent affectées d'une sédimentation plus rapide.

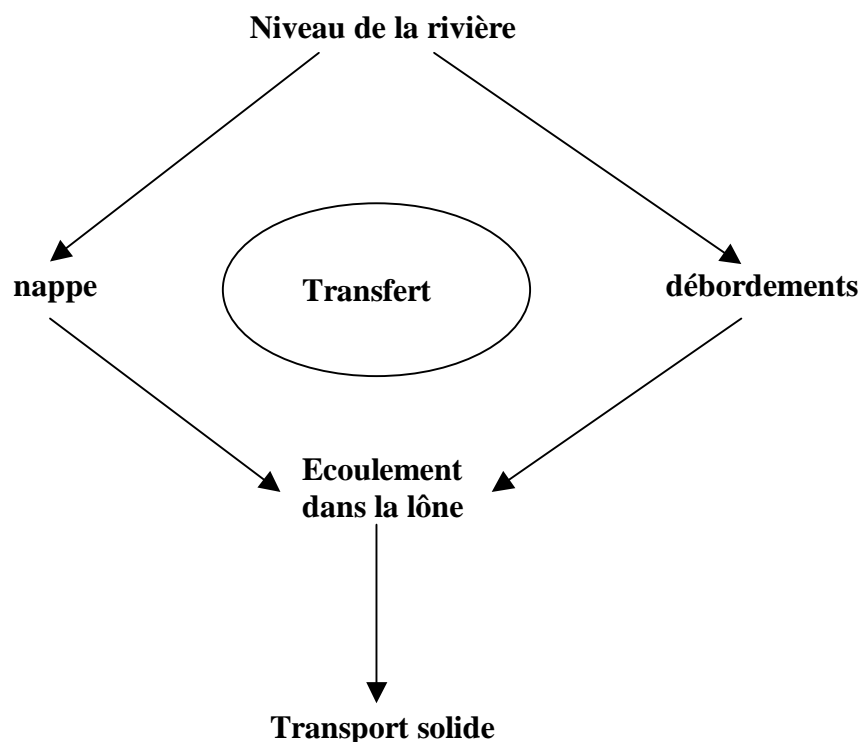
En 2002, Enric Roche Campo [12] a étudié cinq lônes de l'Ain. Pour les lignes d'eau du chenal principal, il reprend les deux modèles calés par Statiotis et les adapte à Mage5 (modèle hydraulique développé au Cemagref, 1D maillé transitoire à surface libre) tout en affinant l'évaluation de la rugosité (écoulement en milieu végétalisé). Pour modéliser les lônes, il se sert de HEC-RAS, logiciel américain 1D, permanent/transitoire, torrentiel/fluvial. Pour obtenir les fréquences de connexion, il part de la courbe des débits classés, sauf pour les périodes de retour de 1 ou 2 ans (logiciel XSD5, méthode de renouvellement différente de la loi de Gumbel).

Ces courtes études ont le mérite d'avoir mis en place une méthode d'analyse hydrologique et une modélisation hydraulique 1D du chenal principal relativement satisfaisantes pour pouvoir estimer les fréquences de débordement par l'amont dans les lônes. En revanche, il en ressort que :

- ❑ Une topographie précise et surtout récente est nécessaire pour que la modélisation hydraulique donne des résultats fiables ;
- ❑ Les données de terrain permettant le calage et la validation sont une ressource précieuse à développer ;
- ❑ Si un modèle unidimensionnel rend suffisamment compte des variations de niveau de la rivière, une modélisation 2D permettrait d'affiner la compréhension des écoulements complexes au niveau de l'annexe fluviale, en particulier dans le cas de connexions par l'aval fréquentes ;
- ❑ Cette approche « modélisation des écoulements » n'a pas permis, dans le cadre de ces stages, de construire une typologie des bras morts, mais plutôt un diagnostic individualisé, fondé sur une meilleure compréhension des mécanismes physiques.

2.2 *Fonctionnement hydraulique d'une lône*

L'évolution géomorphologique d'une annexe fluviale est déterminée par des phénomènes de transport solide dans la lône, en fonction des apports de sédiments et du matériel stocké sur place. Le moteur de ces phénomènes est l'écoulement d'eau dans le milieu, lui-même fonction du régime du cours d'eau principal. Même si, à chaque niveau, des paramètres propres (granulométrie, rugosité, perméabilité, etc.) entrent en jeu, la partie dynamique des processus peut être schématiquement compartimentée selon la chaîne :



Selon les observations, le transfert hydraulique prend trois aspects :

- ❑ hors période de crue, apports phréatiques à la lône liés à la piézométrie de la nappe alluviale, soutenue par la rivière et par le drainage des coteaux ;
- ❑ débordement plus ou moins fréquent du bouchon aval et retour d'eau (effet « backwater ») ;
- ❑ par fortes crues, écoulement superficiel par débordement du bouchon amont voire par inondation de la plaine alluviale (écoulements complexes à modéliser en 2D).

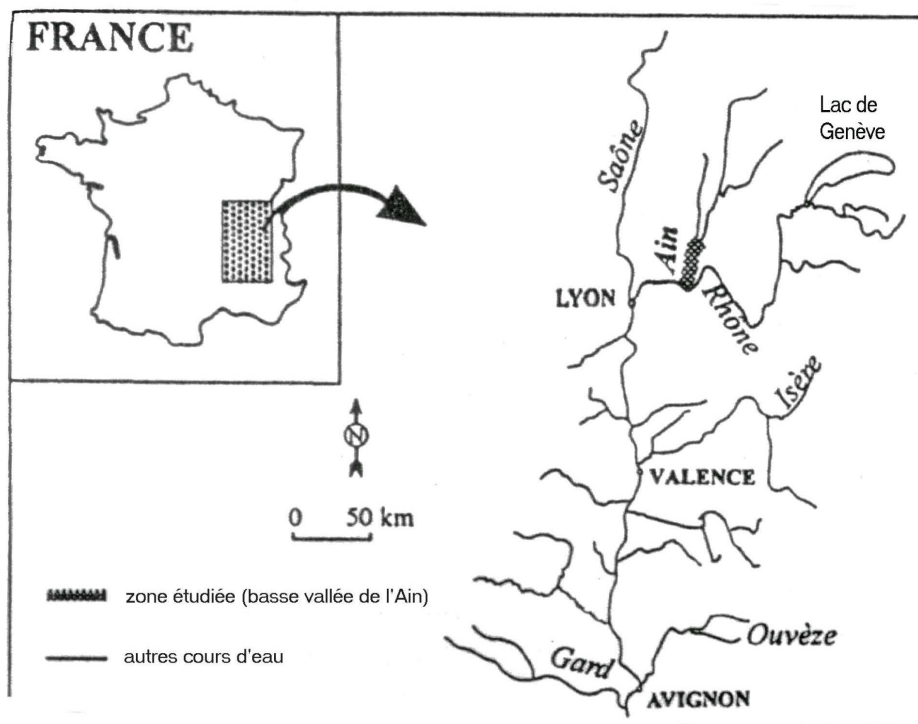
2.3 Nouvelles données, nouveaux objectifs

Les hydrauliciens se sont principalement intéressés aux écoulements de surface, les débordements par crue étant les principaux agents morphogènes dans les lônes. Mais des analyses de conductivité électrique [13] (stage de maîtrise de Rémi Loire) ont montré une grande complexité des échanges entre les bras morts et la nappe alluviale, voire des nappes de coteaux. Or dans certains cas, cette alimentation phréatique semble susceptible d'engendrer des écoulements capables d'entraîner des sédiments fins, et donc d'autocurer le fond en empêchant le colmatage et la déconnexion d'avec la nappe sous-jacente. Par ailleurs, le Cemagref a instrumenté en 2000 plusieurs lônes de l'Ain, et dispose depuis peu de chroniques limnimétriques dans les zones aquatiques périfluviales. Ces nouvelles données et ces nouvelles interrogations ont débouché sur les objectifs suivants pour le stage de DEA :

- ❑ se recentrer sur quelques lônes de l'Ain (secteur instrumenté de St-Jean de Niois) ;
- ❑ faire l'état des lieux des travaux antérieurs du Cemagref sur les lônes de l'Ain (le principal hydraulicien s'en occupant a quitté l'unité de recherche et un tel inventaire était nécessaire pour préparer la reprise du programme de recherche par la thèse) ;
- ❑ maîtriser et améliorer le modèle hydraulique de l'Ain élaboré par les études précédentes ;
- ❑ interpréter les chroniques limnimétriques obtenues dans les lônes de l'Ain ;
- ❑ mettre en évidence l'influence de la nappe alluviale sur le fonctionnement d'une lône, hors période de débordement ;
- ❑ revenir sur l'estimation des fréquences de connexion des lônes par submersion du bouchon amont.

3. EXPLOITATION DES LIMNIGRAMMES MESURES DANS LES LONES

3.1 Présentation du site expérimental



Localisation de la basse vallée de l'Ain

Les lônes étudiées font partie de celles qui sont ou ont été équipées en station de mesure automatique dans le secteur de St-Jean de Niois / Blyes (basse vallée de l'Ain).

Gourdans

Cette lône résultant des divagations de l'Ain a été isolée au milieu des années 1940. La zone en eau, plutôt large en amont et resserrée à l'aval, est divisible en deux parties.

Creux de Fouchoux

Isolée du lit mineur dans les années 1940 par recouplement en tresse, cette lône sera régénérée deux fois (1950 et 1960) avant de redevenir un bras mort lors de la migration du chenal. En périodes de hautes eaux, la longueur de la zone aquatique est d'environ 300 mètres pour une largeur d'une dizaine de mètres.

Ricotti

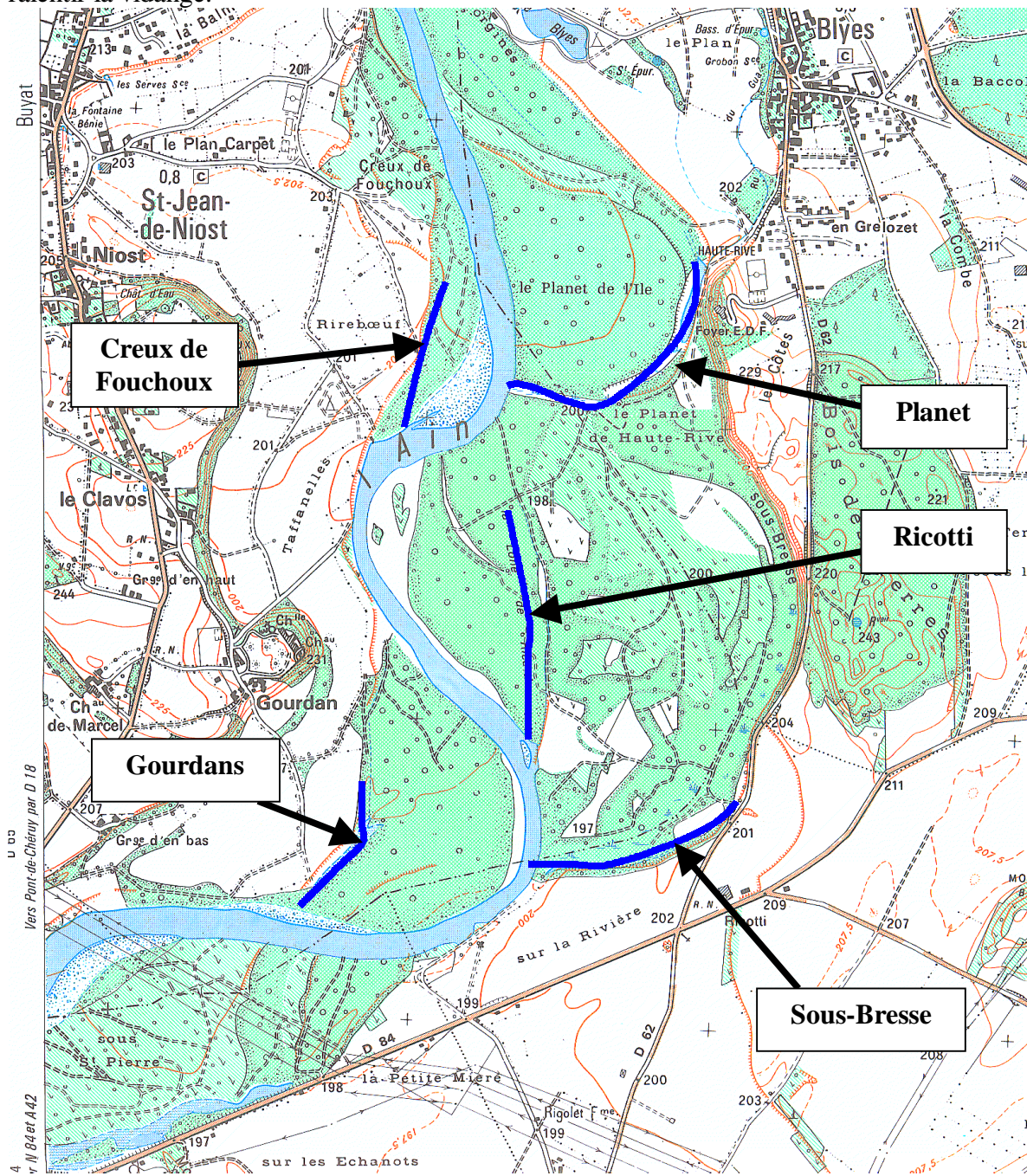
Cette lône située en rive gauche de l'Ain doit avoir environ 80 ans. C'est un ancien bras de tressage de l'Ain qui semble être un bras de recouplement de la lône de Sous Bresse. La zone en eau d'une longueur de 360 mètres en période de crues mesure quelques mètres de largeur et est divisée en deux parties par un petit chenal à environ 210 mètres du bouchon amont sur une vingtaine de mètres. Le niveau de l'eau est peu élevé excepté dans quelques mouilles.

Planet Amont

Datant du milieu du XX^{ème} siècle, cette lône présente une zone en eau très étroite et très végétalisée. D'une longueur de 330 mètres en hautes eaux, elle est peu profonde toute l'année et peut même être asséchée par endroits lors de la période estivale. Une petite levée en terre a été établie artificiellement en travers du bouchon aval.

Sous-Bresse

Formée il y a une centaine d'années, cette lône est la plus longue de l'étude, 630 m et aussi la moins large sur 480 m (3-4 m) avant de s'élargir pour arriver au bouchon aval. Cette lône est aussi la plus profonde car elle est fréquemment curée pour y permettre le pompage à des fins agricoles. Le bouchon aval a été maintenu artificiellement, des buses surélevées permettant de ralentir la vidange.



Situation (grossoière) des principales lônes du secteur d'étude

Remarquer les collines morainiques qui enserrant la vallée alluviale en grande partie boisée.

3.2 Données disponibles sur les lônes

A) Topographie

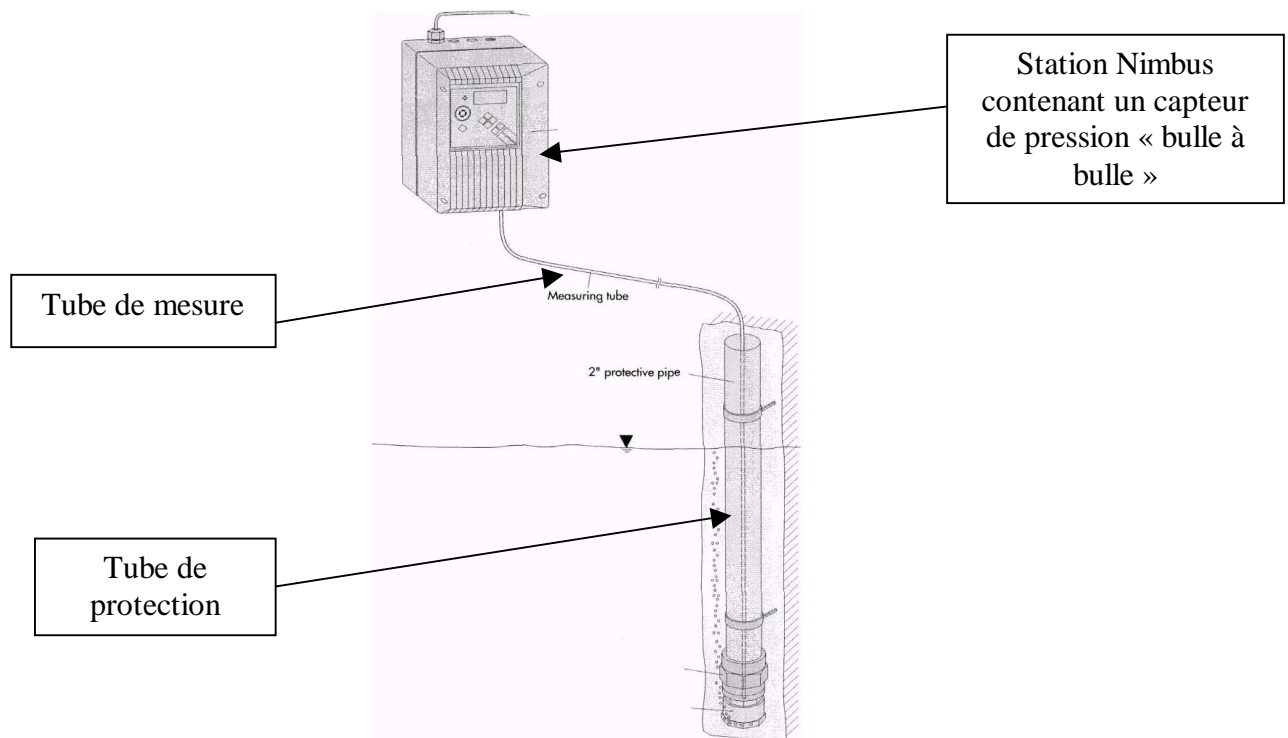
L'équipe Météologie du Cemagref a procédé en 2002 au relevé topographique par transects de 10 lônes de l'Ain et du Rhône, dont celles de Planet, Ricotti et Creux de Fouchoux. Malheureusement, ces relevés effectués par visée à la lunette ne sont pas reliés au Nivellement Général de la France (NGF), contrairement au modèle hydraulique de l'Ain. Au cours du DEA, les topographies de Planet et de Ricotti ont pu être reliées à un repère NGF.

B) Limnimétrie

L'équipement de lônes de la basse vallée de l'Ain en stations de mesure automatiques de hauteur d'eau (H), température (T°C) et conductivité électrique (cond.) a débuté fin 1999. Dans un second temps, en automne 2001, le suivi météorologique a été recentré sur les seules lônes présentant des comportements suffisamment déconnectés de l'Ain. En contrepartie de l'abandon de certains sites, le recentrage a permis un suivi plus fin des hauteurs d'eau. L'implantation de plusieurs capteurs de hauteur d'eau sur une même lône est envisagé pour l'avenir : la connaissance de la ligne d'eau et des vitesses d'écoulement est utile pour la modélisation hydraulique.

Deux types de station ont été retenus, toutes les deux provenant de OTT Hydrométrie :

- station NIMBUS (mesure de hauteur d'eau seulement) ;
- station HYDROSENS (mesure H, T°C et cond.).



Vue d'artiste d'une station de mesure

Chroniques validées sur le secteur de St-Jean-de-Niost :

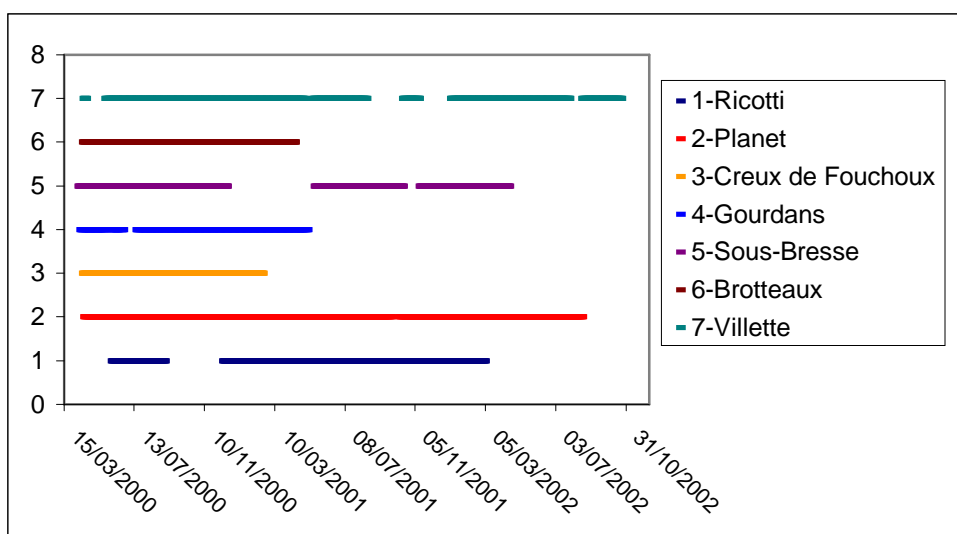
Creux de Fouchoux : H (hauteur d'eau) d'avril 2000 à février 2001 (déséquipée) ;

Gourdans : H d'avril 2000 à mars 2001 (déséquipée) ;

Ricotti : H de décembre 2000 à janvier 2002 ;

Planet : H d'avril 2000 à août 2002 ;

Sous-Bresse : H, T°C, cond. d'avril 2000 à avril 2002 (avec lacunes importantes).



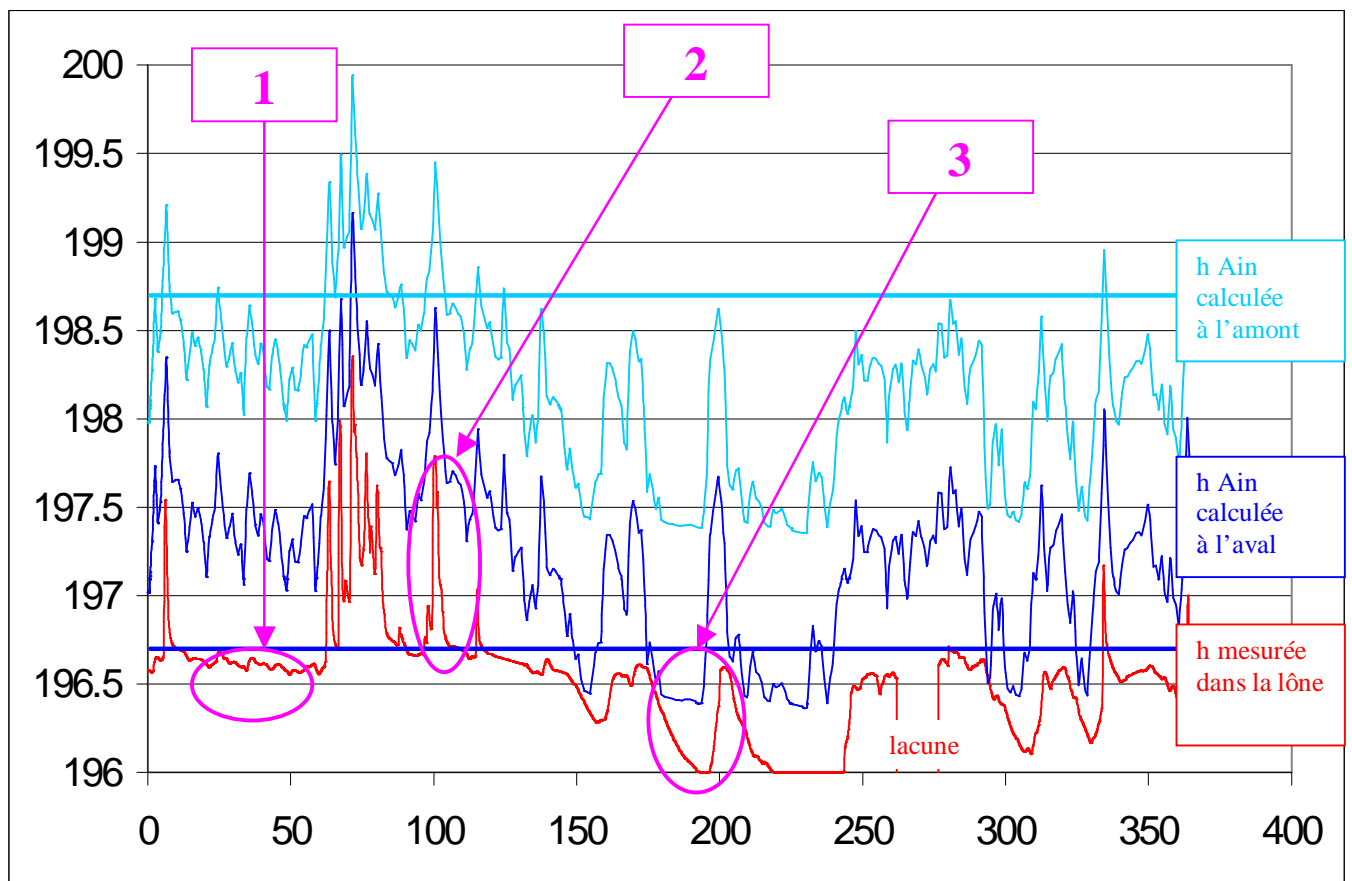
Chroniques de hauteur d'eau validées dans les lômes de l'Ain

Les lômes de Villette et de Brotteaux sont en dehors de la zone étudiée, respectivement à l'amont et à l'aval du tronçon modélisé. La deuxième a été déséquipée, tandis que la première est actuellement dotée de deux stations de mesure placées en des points distants le long de son chenal.

3.3 Analyse qualitative des chroniques

Un modèle hydraulique 1D (présenté au chapitre 4) a été utilisé pour obtenir les limnigrammes simulés de l'Ain à l'amont et à l'aval de la lône de Planet, sur l'année 2001 (respectivement en **bleu ciel** et en **bleu foncé** ci-dessous). Les remarques qualitatives faites pour cette lône sont largement valables pour les autres (sauf Sous-Bresse, au comportement très particulier).

Le limnigramme observé dans la lône est tracé en rouge. Il ne comporte qu'une petite période de lacune, et n'est présenté ici qu'en cote arbitraire (le zéro de la station limni a été raccordé au NGF à la fin du stage). Il s'agit ici de comparer les signaux entre eux, et non leurs positions respectives, ici différentes de la réalité.

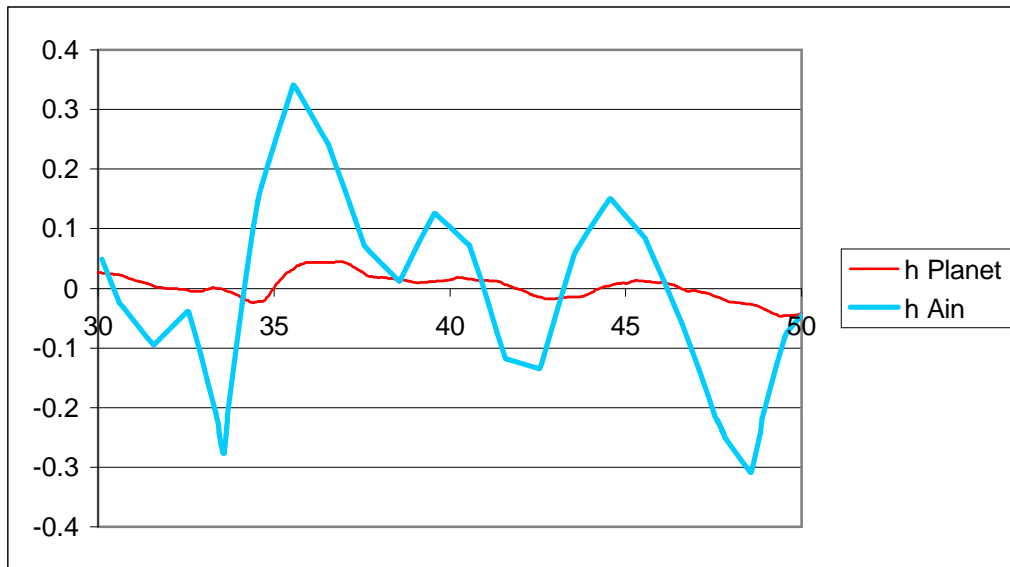


Lône de Planet – année 2001

On observe dès l'abord dans la lône trois modes de réponse limni au signal hydrologique de la rivière :

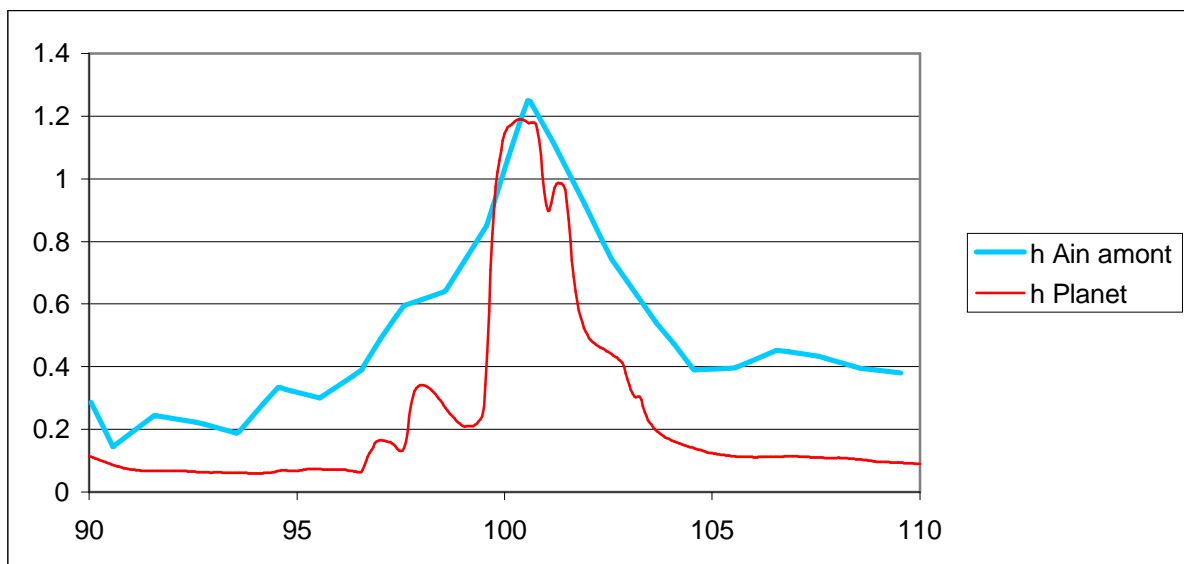
- 1) réponse différée et très amortie autour d'une valeur moyenne stable ;
- 2) réponse très rapide et d'amplitude proche de celle des pics de l'Ain ;
- 3) décrue progressive vers et au-delà du zéro de la station limnimétrique.

Les trois périodes témoins indiquées sur le graphique ont été zoomées ci-dessous. Les échelles verticales ont été ramenées à un zéro arbitraire pour pouvoir superposer les courbes et comparer leurs amplitudes. L'unité reste le mètre. En abscisse, le jour de l'année de 2001.



1) comportement « amorti »

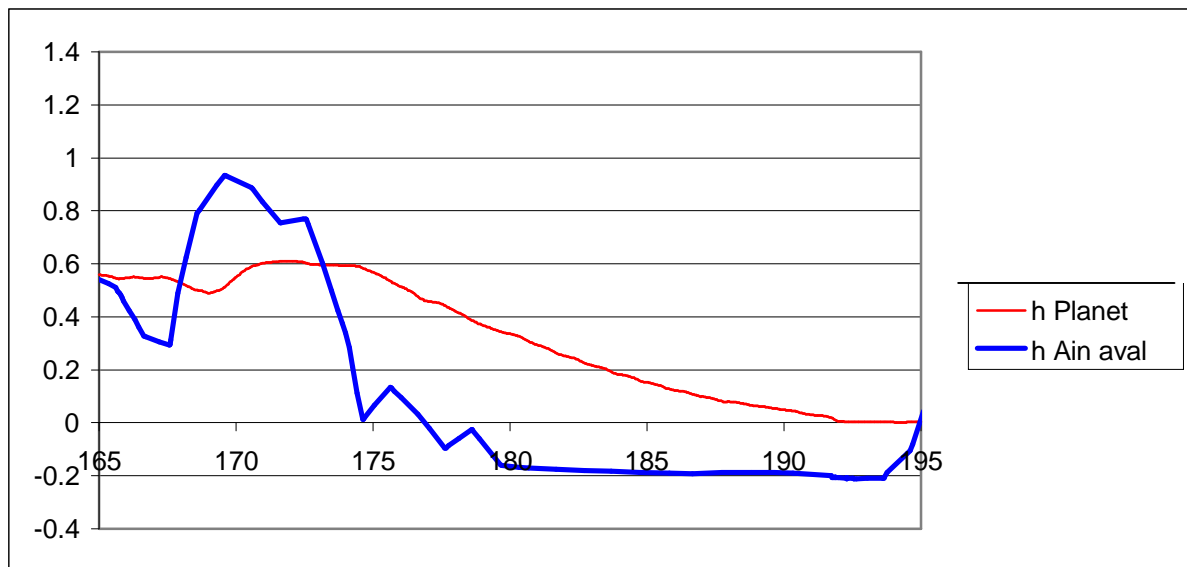
La hauteur d'eau dans la lône reste autour d'une valeur moyenne, presque indépendamment des fluctuations de l'Ain. Ces dernières n'entraînent en effet dans la lône que des variations très amorties et différées de 2-3 jours. L'amplitude des oscillations est ainsi environ dix fois moindre dans la lône. Cela évoque le comportement théorique et le temps de réponse d'une nappe alluviale soutenue par une rivière.



2) comportement « suiviste »

Autour du 100^{ème} jour au contraire, la montée des eaux de l'Ain entraîne un pic limni dans la lône, instantané et d'amplitude comparable. Ce pic est toutefois plus resserré dans le temps que celui de l'Ain, évoquant une cote de débordement à dépasser pour obtenir une mise en

charge. (Le limnigramme de l'Ain, évalué de façon plus grossière, est rendu de façon plus schématique et moins fiable que celui de la lône, d'où une allure plus triangulaire...)



3) comportement « drainé »

En basses eaux, lors des chutes du niveau de l'Ain vers un niveau plancher, on observe une décroissance régulière, plus lente du niveau dans la lône, bien souvent jusqu'au zéro de la station limni. Même si celle-ci n'est pas toujours située dans la mouille la plus basse, cela correspond à une situation très proche de l'assèchement de la zone humide. L'allure de la courbe fait penser à une drainance de l'eau de la lône, à travers la nappe alluviale vers la rivière.

3.4 Observation de seuils de débordement

Si l'on se reporte maintenant au graphique général représentant la chronique limnimétrique de la lône de Planet sur l'année 2001 (cf. paragraphe précédent), on s'aperçoit que les périodes correspondant à chacun des trois types de réponses sont faciles à corréler avec les limnigrammes de l'Ain calculés au niveau des bouchons amont et aval de la lône. On parvient en effet à déterminer assez précisément deux cotes Z_{amont} et Z_{aval} telles que :

- Si $h_{\text{Ain amont}} > Z_{\text{amont}}$, la lône est « suiviste » (réponse type 2) ;
- Si $h_{\text{Ain amont}} < Z_{\text{amont}}$ et $h_{\text{Ain aval}} < Z_{\text{aval}}$, la lône est « drainée » (réponse type 3) ;
- Si $h_{\text{Ain amont}} < Z_{\text{amont}}$ et $h_{\text{Ain aval}} > Z_{\text{aval}}$, la lône « amortit et diffère » le signal (réponse type 1).

Ces observations incitent à penser que les trois types de comportement sont liés à la connexion ou à la déconnexion hydraulique de l'annexe avec la rivière. Le comportement « suiviste » semble logiquement correspondre aux périodes de débordement de l'Ain par l'amont de la lône. De même la lône ne peut se drainer dans l'Ain que si elle est déconnectée à la fois à l'amont et à l'aval. Le dernier cas correspondrait alors à une déconnexion amont, un drainage de la nappe par la lône, et un écoulement avec contrôle aval par la rivière.

Ces hypothèses ont pu être confrontées à la réalité du terrain. En effet, lors des campagnes de mesure ponctuelle de conductivité électrique, des observations datées sur l'année 2001 ont été consignées sur les feuilles de terrain (cf. Annexe 11). La connexion/déconnexion amont/aval a été indiquée pour chaque lône de l'Ain, ainsi que le sens apparent d'écoulement des eaux (lône → Ain ou Ain → lône). Chaque fois que la confrontation a pu être menée (observation fiable correspondant à une période d'enregistrement), elle a confirmé nos hypothèses quant au fonctionnement de la lône.

Il semble en outre qu'une déconnexion totale de la lône puisse correspondre non seulement à un drainage, une vidange de la lône vers la rivière, mais aussi à une remontée assez rapide du niveau dans la lône. Une réalimentation rapide d'une lône asséchée via la nappe alluviale, sans apports de surface, semble donc possible. Ce point sera précisé au paragraphe 5.3.

On dispose au bout du compte d'une méthode d'évaluation des cotes de connexion effectives à l'amont et à l'aval de la lône, par une démarche différente des études précédentes (détaillées au chapitre 6). Grâce à la chronique des débits, on peut estimer un débit de connexion, tandis qu'une lecture graphique peut nous donner le nombre de jours de dépassement pour l'année 2001. On peut ainsi comparer pour chaque lône les deux évaluations des cotes, des débits et des fréquences de connexion (cf. chapitre 6).

4. MODELISATION HYDRAULIQUE DE LA RIVIERE

4.1 Etat des lieux

Voici tout d'abord des éléments de repère topographiques sur les profils en travers de l'Ain (l'abscisse « kilométrique » le long du lit mineur est donnée en mètres en gras) :

P10 (**PK=0**) OUSSIAT (amont Pont d'Ain)
...
P18 (**PK=10 850**) GEVRIEUX (confluence Albarine)
...
P24C (**PK=18 750**) PONT DE CHAZEY
...
P28D (**PK=27 550**)
Creux de Fouchoux / Planet
P29 (**PK=29 500**)
Ricotti
P29e (**PK=30 170**)
Sous-Bresse
P31 (**PK=32 100**)
P32 (**PK=33 200**)
PTGA (**PK=33 350**) PORT GALLAND
...
P35 (**PK=36 475**) ANTHON
(confluence avec le Rhône)

Pour une vision géographique simplifiée du tronçon étudié, voir Annexe 4 (d'Oussiat à Anthon) et Annexe 5 (de Pont de Chazey à Port-Galland). Un inventaire synthétique des données réunies au Cemagref est donné en Annexe 3.

Topographie disponible :

- ❑ Profils en travers 1974-76 (SOGREAH), de l'aval de Pont d'Ain (P10) au Rhône (P35)
- ❑ Profils en travers 1987 (CNR), du pont de Gévrieux (P18) au Rhône (P35)
- ❑ Lit majeur défini par des plans au 1/5000 (mêmes études)
- ❑ Profils des ponts (SNCF, Société Autoroute Paris-Rhin-Rhône, DDE)

Données de calage :

- ❑ Crue de février 1977 (laisses de crue du profil 14B à Anthon, SOGREAH) 1340 m³/s à Pont d'Ain, 1420 m³/s à Pont de Chazey (soit ~80 m³/s apportés par l'Albarine)
- ❑ Evaluation de la ligne d'eau d'une crue décennale (SOGREAH 1980)
- ❑ 7 lignes d'eau (12 points sur 30 km) entre le 1/4/86 et le 2/3/87, de 30 à 820 m³/s
- ❑ Courbe de tarage sur l'Ain à Port Galland, fournie par la CNR en mai 2002 (période du 23/02/99 au 01/01/00)

Stations limnimétriques

- ❑ Pont d'Ain (base Hydro, DIREN) : chroniques de débits (1981-2001), courbe de tarage (1994)
- ❑ Pont de Chazey (base Hydro, DIREN) : chroniques de débits (1981-2001), courbe de tarage (1995)
- ❑ Port Galland (CNR) : courbe de tarage (02/1999 à 01/2000)
- ❑ L'Albarine à St-Denis (base Hydro) : 1988-2001

Avec ces données, plusieurs modèles hydrauliques de l'Ain ont pu être proposés :

Modèle Statiois « 1977 » :

- ❑ Fluvia
- ❑ Lit mineur : topo 1976 (P10 à P35)
- ❑ Amont : 1340 m³/s (+ 80 m³/s à l'aval de l'Albarine), débit environ décennal
- ❑ Aval : cote de la crue 1977 au profil P35
- ❑ Calage sur la crue 1977 (P14A à Anthon) et sur la crue décennale en amont
- ❑ Erreur maximale : 27 cm (tirant d'eau entre 4 et 10 m)

Modèle Statiois « 1987 » :

- ❑ Fluvia
- ❑ Lit mineur : topo 1987 (P18 à P35)
- ❑ Amont : 30, 90, 220, 290, 440, 540, 820 m³/s
- ❑ Aval : 187 m à P35
- ❑ Calage 1986-87

Modèle Roche « Ain88 » :

- ❑ Mage 5
- ❑ Lit mineur : topo 1987 (P18 à P35) + topo 1976 (P10 à P18)
- ❑ Stricklers : Statiois « 1987 » (P18 à P35) + Statiois « 1977 » (P10 à P18)
- ❑ Vérification : simulation 20 à 50 cm au-dessus des courbes de tarage récentes à Port Galland et Pont de Chazey

Modèle Le Coz « Ain7 » :

- ❑ Mage 5
- ❑ Lit mineur : topo 1987 entre Pont de Chazey (P24C) et Anthon (P35)
- ❑ Aval : cote fixe 187 m à P35
- ❑ Amont : chronique de débits à Chazey sur Ain (V2942010), banque Hydro

4.2 Recalage et critique du modèle

Calage des coefficients de rugosité

La capacité de Mage5 à calculer des écoulements transitoires permet de simuler des chroniques limnimétriques correspondant aux périodes pour lesquelles la hauteur dans les lônes a été enregistrée. Les simulations antérieures s'étaient en effet bornées à des calculs en régime permanent (d'ailleurs Fluvia ne permet pas le calcul en transitoire). Or le calage des coefficients de rugosité avait été opéré pour chaque débit de référence correspondant à une

ligne d'eau observée en 1986. Pour un calcul en régime permanent, le jeu de coefficients de rugosité était donc choisi en fonction de la valeur du débit imposé à l'amont. Pour simuler un épisode de crue ou une année hydrologique, il nous faut un unique jeu de coefficients de Strickler, indépendant du débit de la rivière.

Dans le cadre de cette étude, les coefficients de rugosité du lit mineur ont été repris du calage de Statiotis, avec ceux du lit moyen calés par Roche, pour le débit moyen de 200 m³/s. Ensuite, peu d'améliorations ont pu être apportées, sauf pour mieux rendre compte des effets de débordement pour les débits élevés. Le tableau ci-dessous indique la différence entre chaque niveau observé en 1987 et le niveau simulé par notre modèle « Ain7 ». On remarque que l'écart peut être très important (jusqu'à 50 cm) surtout pour les débits élevés (sûrement à cause d'une mauvaise maîtrise de l'écoulement en lit moyen). Toutefois, pour la zone de l'étude et pour les débits considérés (en gras dans le tableau), l'écart reste raisonnable, même s'il peut atteindre jusqu'à 18 cm.

PK	30 m ³ /s	90 m ³ /s	220 m ³ /s	290 m ³ /s	440 m ³ /s	540 m ³ /s	820 m ³ /s
18750	0.08	0.01	-0.09	-0.06	0.09	0.14	0.31
23225	0.18	0.10	-0.07	-0.23	-0.35	-0.51	-0.45
24025	0.51	0.22	-0.02	-0.25	-0.25	-0.33	-0.27
27050	-0.05	0.04	0.07	0.03	-0.01	0.04	-0.05
28050	-0.14	-0.07	0.12	0.18	0.33	0.36	0.58
29912.3	0.16	0.11	0.01	0.08	0.04	0.13	0.11
32550	-0.02	-0.16	-0.13	-0.05	-0.18	-0.12	-0.02
33350	0.28	0.38	0.37	0.32	0.31	0.26	0.19

Ecart (en m) commises sur le calcul des lignes d'eau

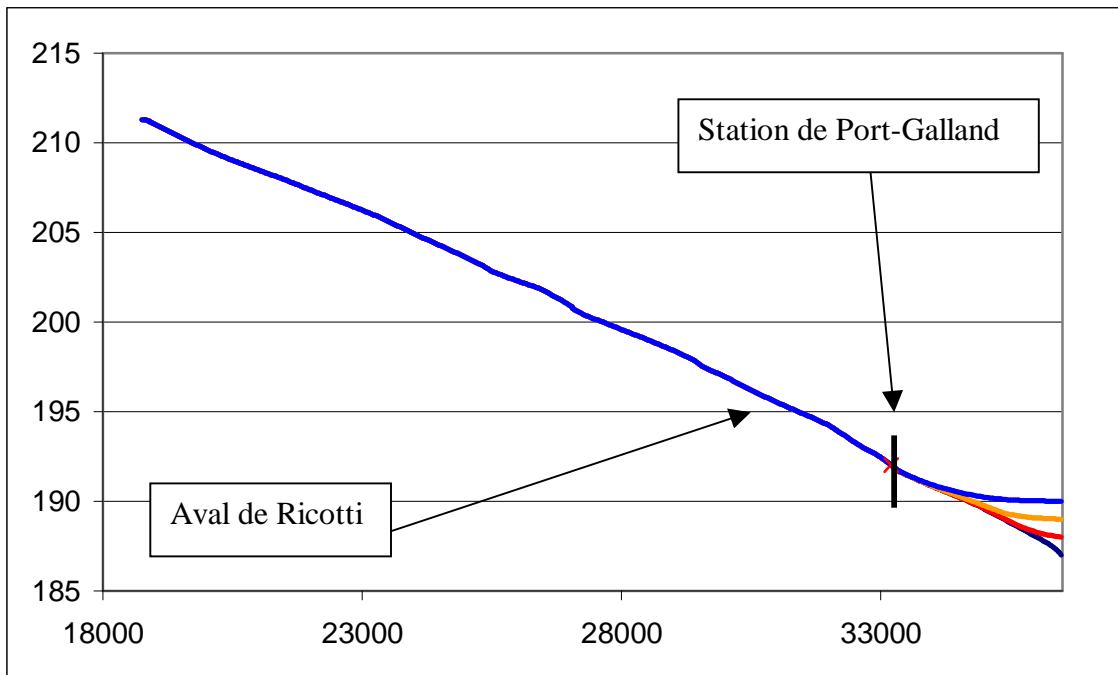
Conditions limites amont

Les chroniques de débits enregistrées à la station hydrologique de Pont de Chazey fournissent au pas de temps journaliers les conditions à l'amont du tronçon permettant de simuler l'écoulement, notamment sur les périodes de mesure dans les lômes.

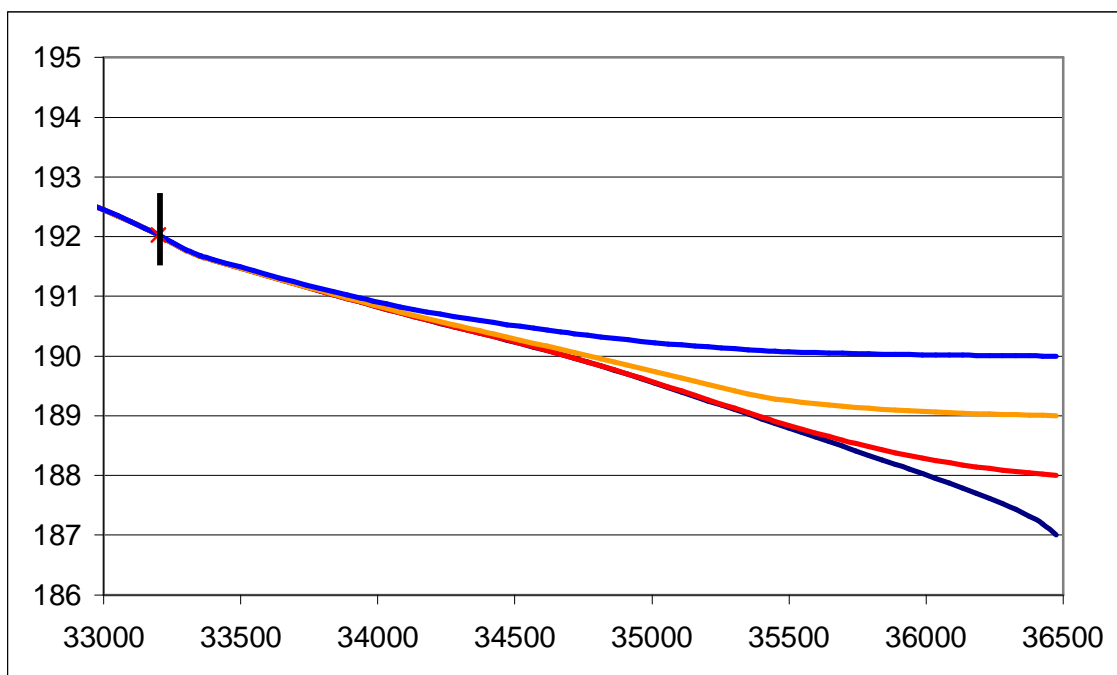
Test de sensibilité : cote fixe à l'aval (Anthon)

Dans les études précédentes, la condition aval consistait en une cote fixe réaliste imposée arbitrairement, dont on supposait l'absence d'effet au niveau des lômes sans le justifier de façon convaincante. Nous avons préféré effectuer des tests de sensibilité pour s'en assurer.

Pour les différents débits observés, la cote de l'eau au niveau d'Anthon (profil P35) ne peut sortir de l'intervalle [187 ; 190] (pour 186 m, on assèche le bief ; pour 190 mètres, la ligne d'eau est fortement déformée). On a donc comparé les lignes d'eau obtenues pour un débit donné (30, 90, 220, 290, 440, 540 et 820 m³/s) et pour différentes cotes imposées (187, 188, 189 et 190 m NGF). La figure ci-dessous indique le résultat obtenu pour 220 m³/s. Pour chacun des débits, on n'observe au niveau de Port-Galland (PK=33200 indiqué par un trait vertical) que des fluctuations de niveau inférieures au centimètre. On peut donc considérer qu'une cote arbitraire fixée à 187 m n'affecte que de façon négligeable les lignes d'eau simulées au niveau des lômes de Planet et Ricotti, situées plusieurs kilomètres en amont de Port-Galland.



*Ensemble du tronçon modélisé (de Pont-de-Chazey à Anthon)
Lignes d'eau simulées pour $Q=220 \text{ m}^3/\text{s}$ et cotes fixes à l'aval
ordonnées : cote NGF ; abscisses : Point Kilométrique*



Détail du graphique précédent (extrémité aval)

4.3 Estimation de la dérivation de la ligne d'eau

A ce stade, malgré un calage en rugosité insatisfaisant (car trop peu associé à des observations in-situ), on espère disposer d'un modèle hydraulique rendant correctement compte du comportement de l'Ain vers 1987. Reste à évaluer l'impact de son évolution morphologique sur les lignes d'eau en 2000-2003.

Evolution du lit de l'Ain entre 1987 et 2001

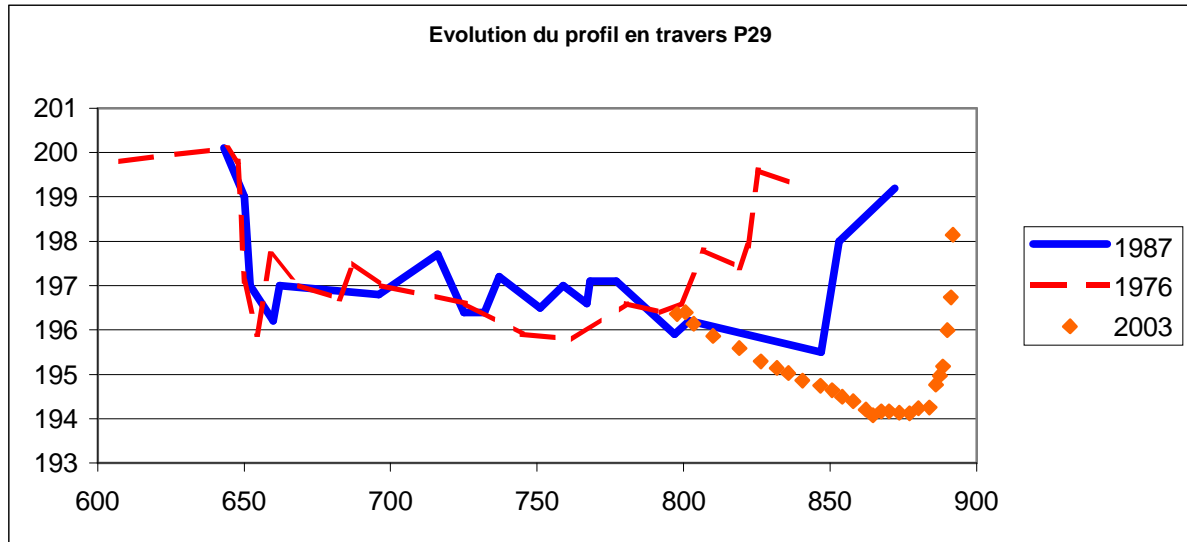
L'adaptation du modèle hydraulique a permis de le recentrer sur le secteur d'étude topographié en 1987, contenant les lômes proches de St-Jean de Nioist (Planet, Creux de Fouchoux, Ricotti, Sous-Bresse, Gourdans). Exclusion de l'étude des lômes d'autres secteurs (Villette et Brotteaux) permet ainsi de s'affranchir de la topographie ancienne datant de 1977. Celle de 1987 est vraisemblablement encore assez éloignée de la situation réelle des années 2000-2002, mais il s'agit malheureusement des relevés de sections en travers les plus récents sur l'Ain. L'évolution altitudinale du lit doit se répercuter assez directement sur les hauteurs d'eau simulées. Qu'en est-il au niveau de nos lômes ? Selon une étude géomorphologique menée par le CNRS [7], le lit de l'Ain a connu entre 1986 et 1999 :

- un exhaussement de 0,25 à 1,25 m à l'amont de Planet (amont de Creux de Fouchoux) ;
- peu d'évolution (amplitude < 0,25 m) au niveau de l'aval de Planet (amont de Ricotti, aval de Creux de Fouchoux) ;
- une incision de 0,75 à 1 m à l'aval de Ricotti.

Il est difficile de quantifier exactement l'impact de ces évolutions sur la différence entre les hauteurs d'eau simulées et la réalité. Mais les variations altitudinales estimées donnent une appréciable idée de l'amplitude et du signe de l'erreur que l'on risque de commettre en simulant des hauteurs d'eau avec une topographie un peu ancienne. Par endroits, une estimation de la dérivation de la ligne d'eau a été tentée.

Estimation de la dérive de la ligne d'eau au profil 29 (aval Planet, amont Ricotti)

Les relevés de 1976, 1987 et 2003 témoignent de la forte incision qui a affecté le lit de l'Ain à ce niveau, non seulement par creusement du fond mais aussi érosion des berges. On assiste en effet à la formation d'un méandre, induisant un déplacement en plan de l'ordre de 7 m/an. A ce rythme, l'évolution en plan du cours d'eau devient difficilement négligeable dans la modélisation hydraulique.



Les deux premiers profils ont été relevés par la CNR, le dernier par le Cemagref, tous en cotes NGF

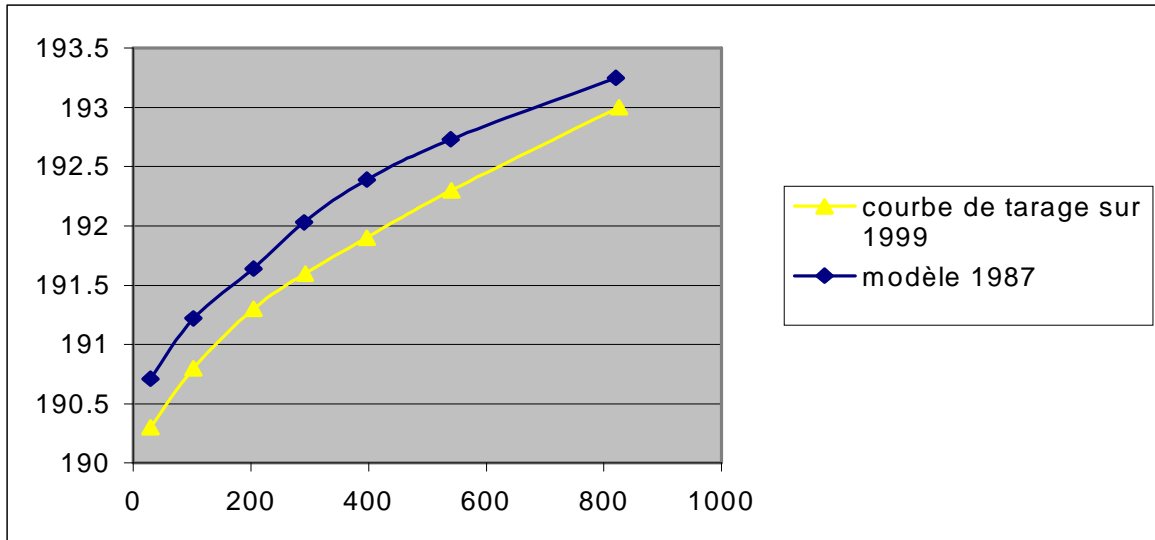
Ils sont calés en latéral, pour comparaison

L'abaissement de la ligne d'eau qui doit résulter d'une telle évolution morphologique est difficile à quantifier, d'autant plus qu'il dépend aussi de la modification de la pente locale, du tracé en plan, etc. Le seul moyen de lever l'incertitude sera de se procurer des profils en travers récents pour toute la zone modélisée. On peut cependant comparer les niveaux de l'Ain mesurés en 2002 et raccordés au NGF durant ce stage avec ceux simulés par notre modèle hydraulique de 1987, pour les débits d'entrée correspondants.

Débit	Modèle Ain 1987	Mesure topo 2002	Evolution ligne d'eau
39,1 m ³ /s	196,52 m NGF	195,51 m NGF	- 0,99 m
180 m ³ /s	197,30 mNGF	196,36 m NGF	- 0,94 m

Nous ne disposons malheureusement que de deux couples (Q , Z) au niveau du profil 29 alors qu'il faudrait évaluer l'impact sur l'ensemble de la courbe de tarage. Toutefois, les deux différences de niveau sont proches, et compatibles avec l'incision observée sur le profil. En attendant des données topographiques récentes complètes, on choisit donc d'appliquer au niveau de ce profil une correction de **-1 m**, sauf pour des débits très supérieurs à 200 m³/s.

Estimation de la dérive de la ligne d'eau à Port-Galland



ordonnées : niveau de l'eau (m NGF) ; abscisses : débit (m^3/s)

Au niveau de la station hydrométrique de Port-Galland (profil 32), nous disposons d'une courbe de tarage établie à partir de mesures du 23/02/99 au 01/01/00. L'établissement d'une courbe de tarage par simulation en régime permanent à l'aide du modèle hydraulique 1987 permet de conclure à un abaissement généralisé (i.e. pour tout débit) de la ligne d'eau d'environ 40 cm en moyenne. Les relevés topographiques du profil 32 (150 mètres en amont du pont de Port-Galland) en 1976 et 1987 indiquent bien une forte érosion de la zone qui a dû se poursuivre entre 1987 et 1999, conformément aux indications des géographes [7].

Ce qu'il faudra faire pour modéliser correctement le comportement hydraulique de l'Ain sur la période 2000-2003, entre le Pont de Chazey et Anthon

- **topographie** : vue la forte dynamique du lit de l'Ain, il faut absolument des relevés de sections en travers représentatifs de la situation à la période considérée ;

- **condition aval** : les tests de sensibilité effectués sous Mage5 (cf. supra) montrent que le choix arbitraire d'une cote constante réaliste ($z = 187$ ou 188 mètres) à Anthon (confluence avec le Rhône) n'a pas d'influence sur la ligne d'eau calculée au niveau de nos lônes (différence de niveau inférieure au centimètre à Port-Galland)

- **condition amont** : les hydrogrammes mesurés à la station du Pont de Chazey (DIREN Rhône-Alpes) sont normalement accessibles via la banque Hydro ;

- **estimation des rugosités** : au lieu de caler directement les coefficients de Strickler en fonction des sections retenues pour la modélisation et en vue d'approcher au mieux les lignes d'eau observées, il convient de commencer d'abord par les estimer par une observation in-situ (ou à partir de photos ou autres) des différents types d'occupations des lits mineurs et moyens ; une prise en compte des cycles végétatifs permettrait en outre d'introduire d'éventuels effets de saisonnalité dans le modèle (au terme d'une analyse hydraulique qui reste à faire) ;

- **calage en régime permanent** : pour ce faire, il faudrait récupérer ou mesurer des lignes d'eau de calage, c'est-à-dire les niveaux atteints par la rivière en différents points de son cours pour différents débits, sur la période courte considérée ; il serait alors possible d'affiner l'évaluation des coefficients de Strickler, sur les portions homogènes définies par l'observation du terrain ;

- **validation en transitoire** : possible par simulation d'épisodes de crues réels observés au Pont de Chazey et à la station limnimétrique de Port-Galland ; de même, une courbe de tarage récente établie à Port-Galland permettrait aussi ce type de validation.

5. MISE EN EVIDENCE DE COMPORTEMENTS « DE NAPPE »

5.1 Modélisation hydrogéologique d'une nappe alluviale soutenue

Le comportement de la nappe alluviale de l'Ain peut être modélisé en première approximation sous les hypothèses suivantes :

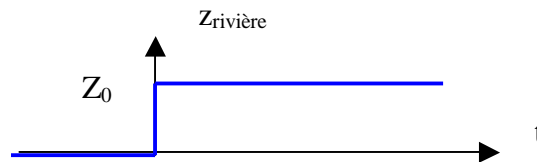
- nappe captive (en fait : nappe libre à faible battement relatif, l'épaisseur mouillée et donc la transmissivité variant peu (<10%)) ;
- nappe semi-infinie (les alluvions modernes sont en continuité hydrogéologique avec les alluvions fluvio-glaciaires qui les prolongent) ;
- problème unidimensionnel (selon l'axe horizontal perpendiculaire à la rivière) ;
- bon contact hydraulique (colmatage négligeable) entre la nappe et la rivière.

Le niveau de l'Ain (donnée d'entrée « forçant » la piézométrie de la nappe alluviale) est issu de simulations grâce au modèle hydraulique transitoire de l'Ain en 1987 (cf. chapitre 3 supra).

Equation de diffusivité :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad x \text{ et } t \geq 0$$

Réponse à un échelon :



Si la nappe est initialement à l'équilibre avec le niveau **0** de la rivière, et si ce niveau passe brutalement à $t=0$ à la valeur z_0 , alors

Conditions :

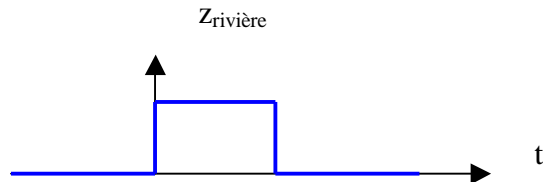
$$\left\{ \begin{array}{ll} h(x,0) = 0 & \forall x > 0 \quad (\text{initiales}) \\ h(0,t) = z_0 & \forall t > 0 \quad (\text{à la limite}) \end{array} \right.$$

Solution [14]:

$$h(x,t) = z_0 \operatorname{erfc} \left(x \sqrt{\frac{S}{4Tt}} \right)$$

$$\text{où } \operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-v^2} dv$$

Réponse à un créneau :



Si la nappe est initialement à l'équilibre avec le niveau $z=0$ de la rivière, et si ce niveau monte brutalement à $t=0$ à la valeur z_0 et retombe à 0 à t_1 , alors

Conditions :

$$\left\{ \begin{array}{lll} h(x,0) = 0 & \forall x > 0 & \text{(initiales)} \\ h(0,t) = z_0 & \forall 0 < t < t_1 & \text{(à la limite)} \\ h(0,t) = 0 & \forall t > t_1 & \text{(à la limite)} \end{array} \right.$$

Solution :

$$h(x,t) = z_0 \left[\operatorname{erf} \left(x \sqrt{\frac{S}{4T(t-t_1)}} \right) - \operatorname{erf} \left(x \sqrt{\frac{S}{4Tt}} \right) \right]$$

Cette solution – obtenue par principe de superposition linéaire – permet de calculer aisément la réponse de la nappe à des variations du niveau de la rivière, discrétisées à un pas de temps donné (journalier ici) : on détermine le niveau moyen de la nappe qu'on fixe à 0, puis à chaque pas de temps on obtient le niveau piézométrique de la nappe en additionnant les impacts de tous les créneaux antérieurs (principe de superposition grâce à la linéarité de l'équation de diffusivité). Le niveau de la nappe au $n^{\text{ème}}$ jour est donc donné par le produit de convolution discrète suivant :

$$h(0) = 0$$
$$\text{pour } n > 0, h(n) = \sum_{k=0}^{n-1} z(k) \times e(n-k)$$

où :

$$\left\{ \begin{array}{l} z(k) \text{ niveau de la rivière au } k^{\text{ème}} \text{ jour} \\ \Delta t = 86\,400 \text{ s} \\ e(1) = \operatorname{erfc} \left(x \sqrt{\frac{S}{4T\Delta t}} \right) \text{ où } \operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) \\ e(i) = \operatorname{erf} \left(x \sqrt{\frac{S}{4T(i-1)\Delta t}} \right) - \operatorname{erf} \left(x \sqrt{\frac{S}{4Ti\Delta t}} \right) \quad \forall i > 1 \end{array} \right.$$

N.B.

- 1) Les détails de l'établissement de cette formule sont donnés en **annexe 7** (choix des indices et des coefficients $e(i)$ notamment).
- 2) En pratique, l'implémentation de cette formule devient extrêmement fastidieuse sur un tableur (type Excel®) : elle est plus aisée sous le logiciel de calcul scientifique Matlab® (fonction conv).

5.2 Estimation des paramètres hydrogéologiques de la nappe alluviale de l'Ain

Notre modèle de nappe soutenue comporte trois paramètres (x , S , T) qui interviennent dans la formule sous la forme $x\sqrt{\frac{S}{T}}$. La distance x du point de mesure piézométrique à la rivière peut facilement être évaluée à l'aide d'une carte géographique. En revanche, en l'absence de données géologiques, il sera difficile de connaître précisément S et T séparément par calage. On privilégie donc l'estimation du paramètre « de nervosité » T/S .

A) Etude hydrogéologique sur le périmètre du SAGE de la basse vallée de l'Ain (HORIZONS, 1999)

Les informations suivantes ont été extraites de ce rapport commandité par la Commission Locale de l'Eau du SAGE Basse Vallée de l'Ain.

La basse plaine de l'Ain (350 km²) est délimitée à l'est par les monts du Jura, à l'ouest par le plateau des Dombes et au sud par le Rhône. Sa morphologie est essentiellement déterminée par les actions fluvio-glaciaires de l'ère quaternaire (terrasses alluviales) et des dépôts morainiques plus anciens (collines boisées qui dominent le paysage).

Au niveau de la plaine alluviale proche de la confluence avec le Rhône, on distingue :

- des dépôts marneux du Miocène qui forment le substratum quasi-imperméable ;
- des dépôts glaciaires morainiques : formations hétérogènes, souvent très argileuses et peu perméables (collines de Chazey, Blyes...) ;
- des alluvions fluvio-glaciaires : terrasses de nature et épaisseur variables (de 2 à 30 m), matériaux bien lavés (galets, graviers, sables) ;
- des alluvions modernes : bandes étroites autour de l'Ain, de l'Albarine, du Rhône, matériaux sablo-graveleux d'épaisseur moyenne 5 m (de 2 à 20 m).

Alluvions fluvio-glaciaires et modernes sont, malgré leur hétérogénéité, en continuité hydrogéologique avec une **perméabilité moyenne K proche de 10⁻² m/s**.

Ces estimations sont en conformité avec les données de la carte géologique (1/50 000°, Montluel, feuille XXXI-31), ainsi qu'avec celles de la carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (feuille XXXI-31). Dans cette dernière, une coupe à hauteur de Blyes fait état d'un horizon d'argiles lacustres entre les alluvions (puissance évaluée à 5-10 m) et les marnes du Miocène, au niveau de la plaine alluviale de l'Ain.

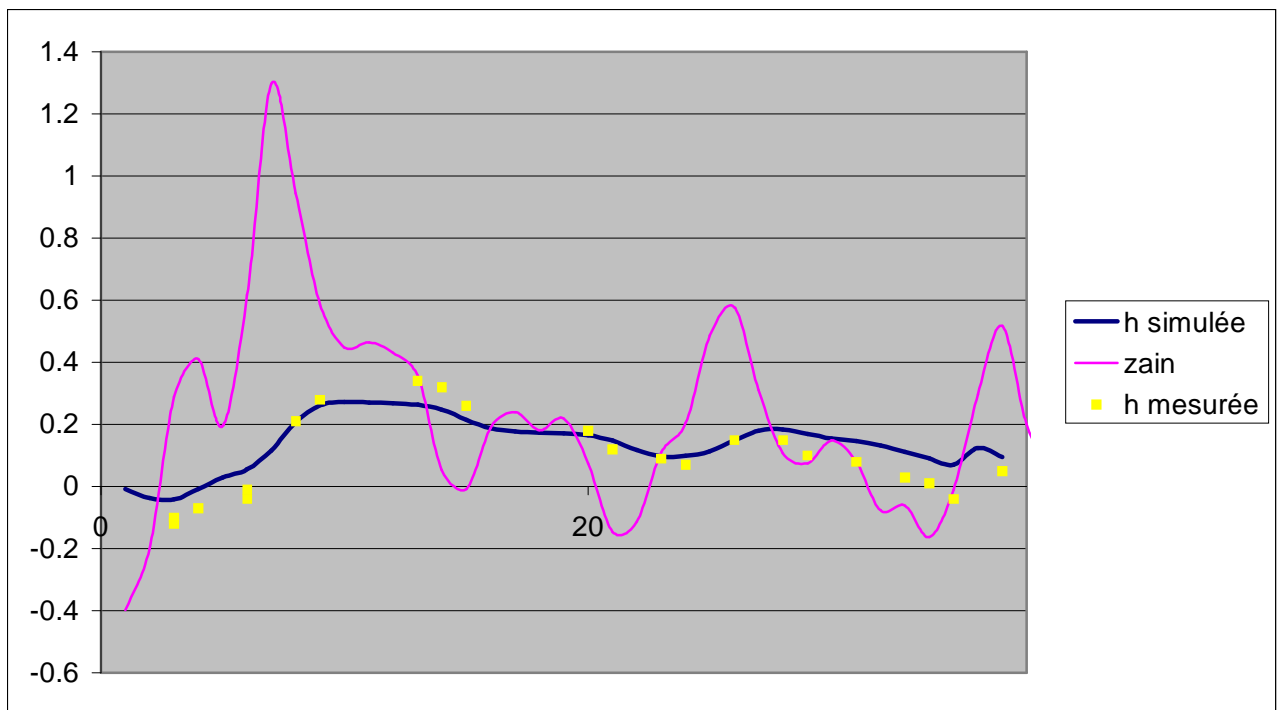
B) Calage sur les chroniques piézo du forage de Meximieux

Le forage de Meximieux est situé à une dizaine de kilomètres en amont de notre site d'étude, dans les alluvions fluvio-glaciaires de l'Ain, au niveau de Chazey. Le suivi piézométrique de l'ouvrage, profond de 30 m, est assuré par le SEMA de la DIREN Rhône-Alpes. L'Agence de l'Eau RMC fournit en ligne les chroniques de septembre 1983 à août 2001. La piézométrie est dès l'origine modifiée par des prélèvements pour la culture irriguée, fortement augmentés en 1989. La nappe est sous l'influence du niveau de l'Ain et du ruisseau Longevent, « dont la

totalité du débit alimente la nappe par infiltration à l'aval de l'ouvrage ». Le calage a été opéré sur les premiers jours de 2001, à une période où l'on suppose l'influence des prélèvements agricoles limités. L'influence du ruisseau n'est sans doute pas déterminante non plus. L'idée est simplement de confirmer l'estimation des paramètres hydrogéologiques de la nappe, avant un calage direct sur les chroniques limnimétriques des lônes.

D'après les cartes géologiques et l'étude « Horizons », on s'attend à trouver à Meximieux à peu près la même épaisseur mouillée (entre 10 et 20 m) et la même perméabilité ($\sim 10^{-2}$ m/s) qu'au niveau des lônes. Soit une transmissivité équivalente de l'ordre de $0,1$ m²/s. Des matériaux graveleux « bien lavés » devraient avoir une porosité de l'ordre de 20% environ. On s'attend donc à un rapport (« de nervosité ») **T/S proche de 0,5** USI.

Une simulation du comportement piézométrique sur les premiers jours de 2001 (cf. graphique ci-dessous) a donné lieu à un calage manuel du rapport **T/S=0,4** (m²/s). Cette valeur est confirmée par d'autres calages sur des périodes hivernales.



En abscisses : les premiers jours de 2001

En ordonnées : piézométries mesurée et simulée, cote de l'Ain

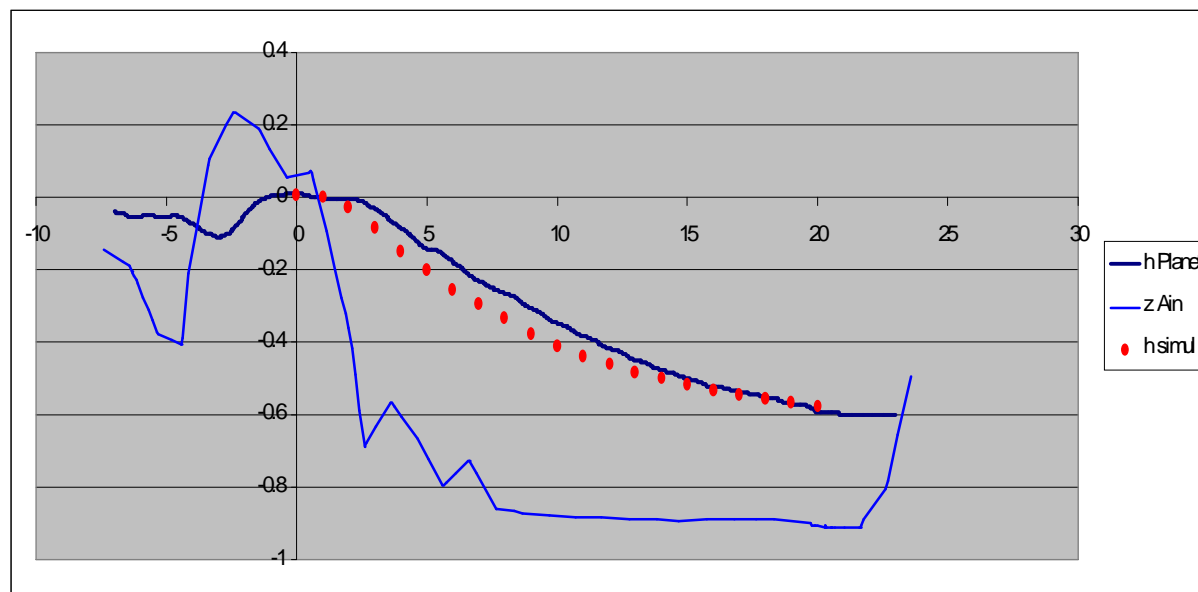
Tous niveaux NGF (en m) rapportés au niveau d'équilibre de la nappe (moyenné sur 6 mois)

5.3 Modélisation de la piézométrie au niveau de la lône

Modélisation de la piézométrie au niveau de Planet

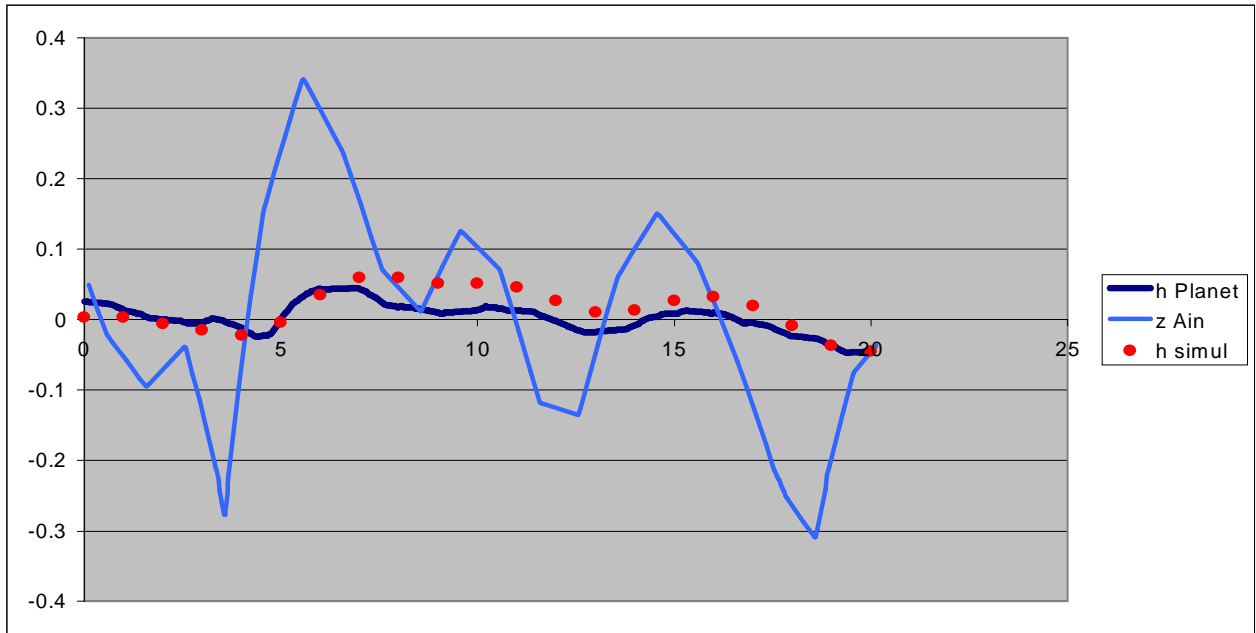
La même modélisation a été appliquée pour essayer de rendre compte des comportements de la limnimétrie dans la lône de Planet, sur trois périodes de 20 jours en 2001, respectivement caractéristiques d'un mode de réponse particulier aux fluctuations du niveau de l'Ain (périodes témoins du § 4.3). Le pas de temps retenu pour le niveau de l'Ain comme pour celui simulée dans la lône est toujours de 24h, bien que cela ne cadre pas toujours avec les données fournies en sortie du modèle hydraulique de la rivière (pas de temps variable). Il est bien entendu possible de faire le même type de calcul pour un pas de temps Δt variable, mais la simulation obtenue n'est pas meilleure en pratique (de toute manière, les débits entrés en tête de tronçon sont connus au pas de temps journalier...).

La séquence « drainage » (mode 3) correspondait à une chute brutale du niveau de la rivière vers un plancher stabilisé. Le comportement limnimétrique de la lône se laisse bien approcher par une modélisation de nappe, pour le jeu de paramètres ($T=0,1 \text{ m}^2/\text{s}$; $S=25\%$), assez cohérent avec les estimations globales déjà vues ($T/S=0,4 \text{ USI}$). (Le niveau d'équilibre dans la lône au début de la séquence a été ramené à 0, tandis que le limnigramme de l'Ain a été superposé à une hauteur arbitraire pour la comparaison). On a donc vraisemblablement affaire ici à une lône déconnectée de la rivière par son aval (et donc par son amont) et dont la limnimétrie est régie par le niveau de la nappe alluviale sous-jacente. La décrue dans la lône correspondrait alors au drainage de l'ensemble de cette nappe vers la rivière à l'étiage.



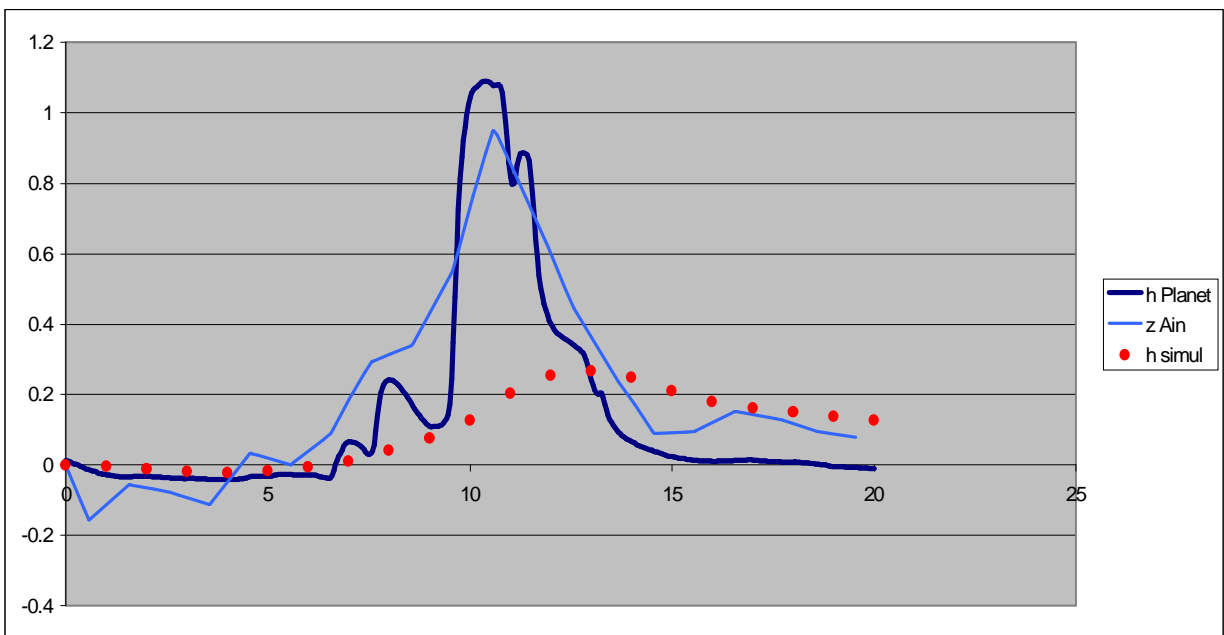
séquence « drainage » - mode 3 – Planet 2001

La séquence « mode 1 » traduisait quant à elle un fort amortissement des fluctuations de l'Ain dans la lône. Le même modèle, avec le même rapport $T/S = 0,4 \text{ USI}$ (même jeu de paramètres S et T), offre une simulation convenable de la séquence. Comme nous le pressentions, la limnimétrie de la zone humide est, hors périodes de débordement de la rivière par l'amont, essentiellement déterminée par l'évolution du niveau piézométrique de la nappe alluviale.



séquence « lissage » - mode 1 – Planet 2001

Enfin, à titre d'expérience témoin, l'application de ce modèle d'hydraulique souterraine à la troisième séquence caractéristique montre clairement qu'un comportement de nappe ne saurait expliquer les pics brutaux et rapides observés sur la chronique limni dans la lône (« mode 2 »). En effet, la simulation accuse un retard de 3 jours environ sur l'observation, au niveau du pic. En outre, l'erreur d'environ 80 cm entre les amplitudes des deux pics n'est pas acceptable (noter la différence d'échelle verticale par rapport aux deux graphes précédents). Ce n'est pas une surprise : les pics élevés et rapides observés dans la lône sont clairement la conséquence d'écoulements forcés par le débordement de la rivière en crue par-dessus le bouchon amont de la lône.

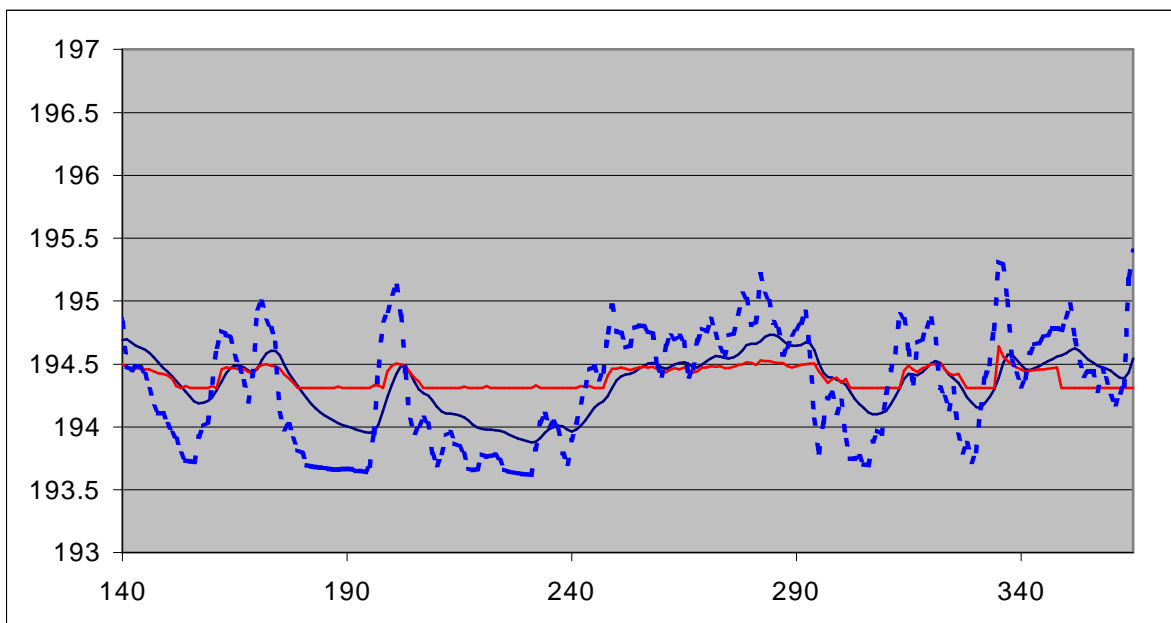
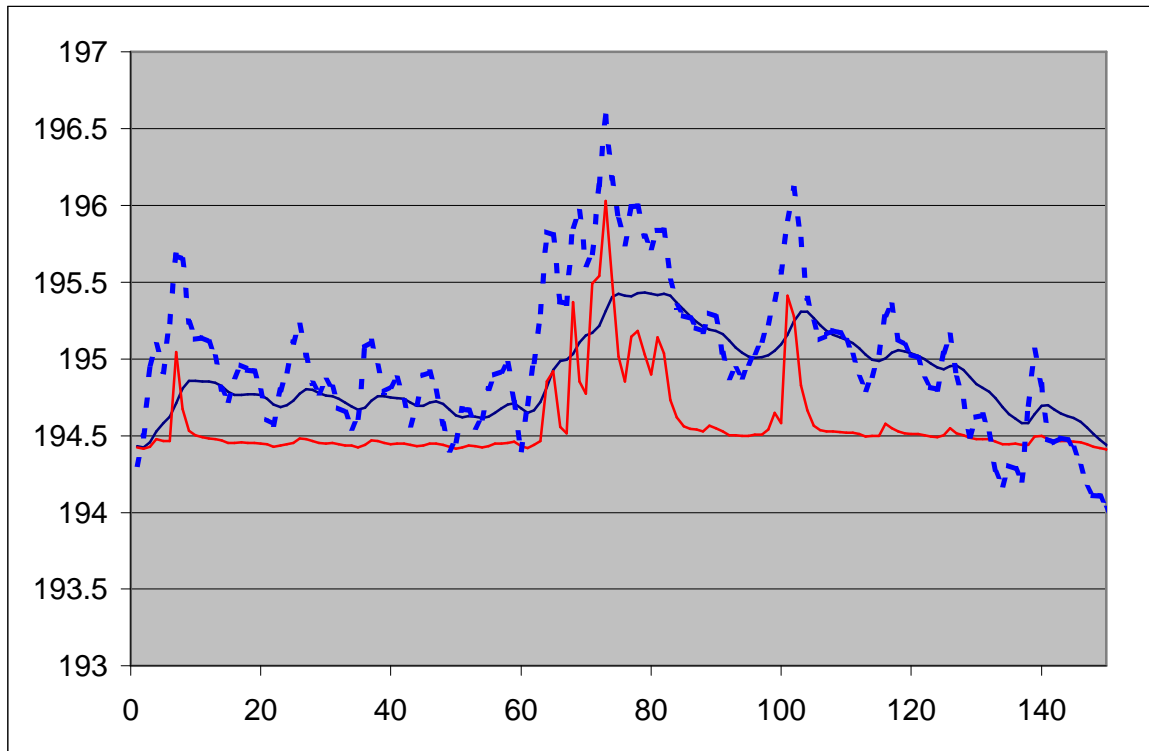


séquence « débordement » - mode 2 – Planet 2001

Modélisation de la piézométrie au niveau de Ricotti, sur 2001

La figure ci-dessous présente :

- ❑ Le limnigramme 2001 mesuré dans la lône en cote NGF (en rouge) ;
- ❑ Le limnigramme de l'Ain simulé au droit de la station de mesure dans la lône (PK=29 900), en niveau relatif recalé puisque la correction à apporter au modèle 1987 est mal connue à cet endroit (en pointillés) ;
- ❑ Le niveau piézométrique de la nappe alluviale soutenue par l'Ain, simulé selon le modèle simplifié décrit plus haut (en bleu) : $T/S = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}$; $x = 500 \text{ m}$.



Lône de Ricotti – année 2001

On constate comme prévu que la piézométrie simulée a la même forme (même amplitude des fluctuations, au même moment) que le limnigramme de la lône, sur les périodes sans débordement par l'amont (moyennes et basses eaux). En revanche, il est impossible de caler en niveau à la fois la longue période amortie du début de l'année et les périodes estivales très sèches de drainage et de recharge par la nappe. Un niveau réaliste fixé pour l'Ain implique des niveaux piézométriques très proches de ceux de la lône en étiage mais plus élevés d'une cinquantaine de centimètres en période de régime « amorti ». Et surtout, après les périodes d'intenses débordements, le niveau d'eau dans la lône redescend très rapidement vers une sorte de niveau de base (194.5 m), alors que le niveau de la nappe ne décroît que lentement, restant environ 1 m au-dessus du niveau de la lône.

On peut expliquer ceci par une perturbation de la piézométrie réelle par rapport à celle simulée ici, sans validation par des données de terrain. Cependant, la principale perturbation consisterait vraisemblablement en un rabattement de la nappe par les pompes agricoles pendant l'été, ce qui aggrave le décalage observé sans l'expliquer.

En fait, une observation de terrain (cf. annexe 11) montre que Ricotti coulait à son aval au 53^{ème} jour de 2001, et c'est sans doute plutôt cet écoulement qui explique le respect d'un niveau de base dans la lône, en dépit d'une nappe plus élevée : à part en étiage quand elle ne coule plus, la lône se comporte comme un fossé de drainage qui rabat localement la nappe. Le niveau de l'eau suit les mêmes fluctuations que la nappe, mais « rabattues » sur un niveau de base imposé par l'écoulement.

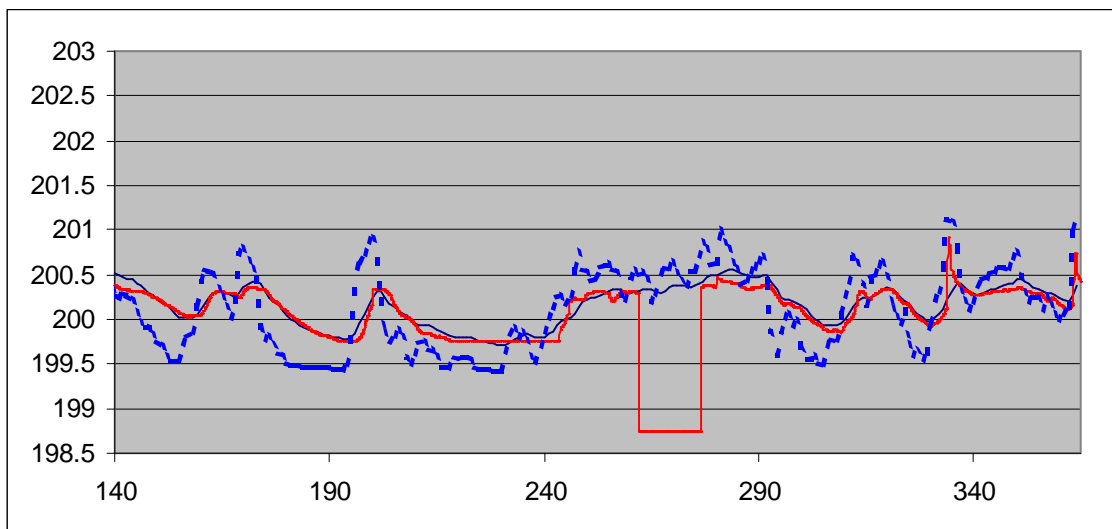
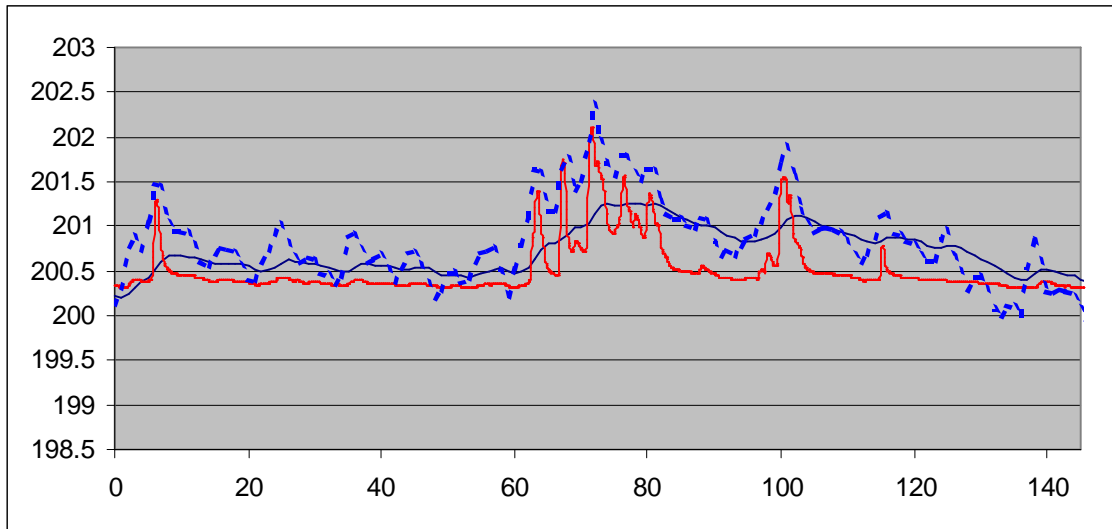
Il n'y a qu'en été qu'elle peut être assimilée à un grand piézomètre à ciel ouvert : le niveau de l'eau dans la lône est alors superposable à celui de la nappe alluviale.

Remarques annexes :

- ❑ Les dix premiers jours sont affectés par un artefact dû à la stabilisation du niveau piézométrique modélisé (on lui impose arbitrairement de commencer au niveau moyen dans la lône) ;
- ❑ Autour du jour 240, des micro-pics affectent le limnigramme plat dans la lône asséchée, alors que la nappe simulée est très basse ; ce phénomène s'explique par des orages (dont on note les effets sur le niveau de l'Ain), qui créent des flaques temporaires par refus d'infiltration au niveau de la station de mesure.

Modélisation de la piézométrie au niveau de Planet, sur 2001

La même opération a été appliquée au niveau de la lône de Planet, avec des résultats similaires (mêmes remarques).



Lône de Planet – année 2001

H(lône) mesurée

H(Ain) simulée (traits discontinus)

H(nappe) simulée

Abscisses : jours de l'année 2001

Ordonnées : cote NGF

6. ESTIMATION DES FREQUENCES DE DEBORDEMENT AMONT

6.1 Méthode « topographique » (2002)

Cette approche développée par les stagiaires précédents est basée sur les relevés topographiques des cotes de connexion dans les lônes et sur le modèle hydraulique de l'Ain. Comme ce modèle a été modifié et comme tous les détails concrets de mise en œuvre n'ont pu être retrouvés dans des rapports souvent elliptiques, il s'est trouvé préférable de refaire les calculs avec les nouveaux éléments, plutôt que de reprendre directement les résultats antérieurs.

Principe de la méthode :

Pour connaître la cote de connexion d'une lône par l'amont, il suffit de la mesurer sur le terrain. Malheureusement, les relevés topographiques n'étaient pas reliés au NGF (ceux de Planet et de Ricotti le sont désormais). La solution proposée consiste à calculer via le modèle hydraulique le niveau de l'Ain au jour et à l'heure où ce niveau a été mesuré : en effet, la cote de la rivière à l'amont et à l'aval de la lône a été reliée à la topo flottante de la lône. Il suffit donc de se procurer le débit à Pont de Chazey pour calculer (en régime permanent) la hauteur d'eau au niveau de la lône. En identifiant les altitudes NGF de ces points, on peut en déduire celles de tous les autres points, en particulier le point le plus bas du transect amont de la lône. Ainsi, on connaît $z_{\text{connex amont}}$ en NGF. (On peut de même évaluer $z_{\text{connex aval}}$ en NGF).

Toujours grâce à la simulation hydraulique, on estime le débit (toujours à Pont de Chazey) Q_{connex} permettant un débordement amont ($z_{\text{Ain}} = z_{\text{connex}}$). Enfin, grâce à la courbe des débits classés à Pont de Chazey, on obtient la fréquence de ces débordements (F_{connex}).

Pour les lônes de Planet et Ricotti, dont la topo a été récemment raccordée au NGF, on dispose d'une mesure topo de 2002 des cotes de connexion amont et aval. En outre, les cotes amont de Ricotti et aval de Planet ont été remesurées en 2003, toujours en NGF.

6.2 Méthode « limnimétrique » (2003)

Cette nouvelle approche a été rendue possible par l'acquisition de chroniques limnimétriques dans plusieurs lônes de l'Ain. Le principe en a été exposé au chapitre 4.

Principe de la méthode :

L'identification de trois types de séquences où la lône présente des comportements radicalement différents permet d'évaluer deux cotes que les observations de terrain autorisent à assimiler aux cotes de connexion amont et aval de la lône. On obtient donc cette fois directement une estimation de z_{connex} en NGF, mais toujours via le modèle hydraulique de la rivière, fournissant les limnigrammes de l'Ain au niveau des bouchons.

Une fois connue z_{connex} , il faut repérer un ou plusieurs pics de l'Ain atteignant précisément cette cote. En se référant à la chronique hydrologique, on obtient les débits de pointe

correspondants à Pont de Chazey, puis via la courbe des débits classés les fréquences théoriques attachées. On dispose ainsi d'une estimation de Q_{connex} et F_{connex} .

En outre, les chroniques permettent de connaître le nombre de jours effectif pendant lesquels il y a réellement eu débordement (et ce indépendamment de tout modèle hydraulique). Plus la période de mesure est longue, plus cet estimateur devrait être proche de la fréquence théorique de débordement.

L'ensemble des résultats obtenus cette année pour les lômes de Planet et Ricotti sur 2001 est présenté en Annexes 9 et 10.

6.3 Comparaison des résultats

Quelques remarques générales avant de comparer les résultats issus des différentes méthodes :

- ❑ L'évolution de la topographie (et donc des lignes d'eau de l'Ain) entre 1987 et 2001 n'a a priori d'impact que sur l'estimation de la cote de connexion, et non sur celle des débits et fréquences de connexion ;
- ❑ La lecture directe du nombre de jours de débordement sur une période assez longue donne une estimation assez fiable de la fréquence « empirique » de débordement ; cela peut donc constituer un test significatif de la cohérence des résultats théoriques, par confrontation avec la réalité du terrain.

<i>Cote de connexion Profil P29</i>	Planet aval	Ricotti amont
« Méthode topo »	195.7 m	196.6 m
« Méthode limni »	196.0 m	196.6 m
Mesure topo 2002	195.3 m	196.4 m
Mesure topo 2003	196.1 m	196.4 m

La comparaison des estimations des cotes de connexion n'a de sens que là où le recalage du modèle hydraulique de l'Ain est possible, c'est-à-dire au profil 29. Le tableau ci-dessus montre que les résultats concordent pour Ricotti amont (erreur max : 20 cm). En revanche, les résultats pour Planet aval sont assez disparates. Cela provient sans doute d'une mauvaise définition topographique du seuil à cause de la construction d'une levée artificielle en terre à l'exutoire de cette lôme.

Il est plus intéressant de comparer les débits et fréquences de connexion par l'amont, qui n'utilisent pas le modèle hydraulique de l'Ain.

Lôme	Q_{connex} Méthode topo	Q_{connex} Méthode limni	F_{connex} théorique Méthode topo	F_{connex} théorique Méth. limni	F_{connex} observée 2001 Méthode limni
Planet	900 m ³ /s	270 m ³ /s	T = 2 ans	28 j/an	30 jours
Ricotti	217 m ³ /s	200 m ³ /s	53 j/an	64 j/an	34 jours
Gourdans	<i>Pas de topo</i>	320 m ³ /s	<i>Pas de topo</i>	16 j/an	15 jours
C.de Fx	170 m ³ /s	300 m ³ /s	90 j/an	20 j/an	25 jours

Rappels : les fréquences théoriques sont calculées à partir de la courbe des débits classés à la station hydrométrique de Pont-de-Chazey (E. Roche avait utilisée celle de Port-Galland) ; le nombre de jours de débordement observé n'est qu'un estimateur de la fréquence théorique.

Commentaires

Ricotti :

Les deux méthodes présentent des résultats compatibles entre eux, et avec l'observation des limnigrammes. Ainsi, le débit de connexion évalué cette année est remarquablement proche de celui donné par E. Roche l'an dernier, ce qui est cohérent avec la proximité des cotes de connexion estimée (une fois corrigée la dérive de la ligne d'eau). En conséquence les fréquences de connexion sont proches (on voit qu'une simple différence de 17 m³/s entraîne un écart de 11j/an), et compatible avec le nombre de jours de débordement observés sur le limnigramme (quoique plus faible).

Planet :

En revanche, le débit de connexion et donc la fréquence obtenus pour Planet par la méthode topographique l'an dernier sont démentis par l'observation du limnigramme. La fréquence théorique obtenue cette année est très proche du nombre de jours de débordement observés sur l'année 2001. L'identification de la cote de débordement à l'amont de Planet s'est avérée délicate lors de la campagne topo de 2002 : la zone que peuvent emprunter les eaux de l'Ain en crue pour inonder cette lône couvre une large portion de la plaine alluviale boisée, remontant jusqu'au profil P28D (au niveau de Port-Neuf). Dans ces conditions, il est hasardeux de déterminer le point d'entrée le plus bas et le plus en amont, à moins de disposer d'une topographie complète de la zone et d'avoir observé les mécanismes d'inondation. L'observation du limnigramme permet de lever cette indétermination pour le débit de connexion. Toutefois, la cote exacte de connexion demeure mal connue du moment qu'on ne sait pas calculer précisément la hauteur de l'Ain au niveau de l'entrée de la lône.

Gourdans :

L'analyse du limnigramme donne des résultats très cohérents avec l'observation sur la période avril 2000 – avril 2001. Malheureusement, cette lône n'ayant pas été topographiée en 2002, on ne peut comparer ces résultats avec ceux de l'analyse topographique.

Creux de Fouchoux :

L'analyse du limnigramme indique un débordement amont moins fréquent que ce qu'indiquait l'étude de l'an passé. L'observation des jours de débordement le confirme. Toutefois, la chronique limnimétrique ne couvre pas une année hydrologique entière : elle ne court que du 12 avril 2000 au 12 février 2001, et il a fallu extrapoler le nombre de jours de débordement sur les deux mois suivants, au vu du niveau de l'Ain et de la cote de connexion relevée. Dans ces conditions, l'estimation 25j/an est quand même assez précise.

La superposition des quatre chroniques limnimétriques sur 2000-2001 (importantes lacunes) a permis de déceler la plus ou moins grande sensibilité au débordement amont de nos quatre lônes. En effet, certains pics de l'Ain n'entraînent pas de pic dans toutes les lônes. Il apparaît ainsi que Creux-de-Fouchoux est plus souvent inondée que Gourdans, et que Ricotti l'est plus souvent que Planet et Gourdans. Ces observations sont en cohérence avec les estimations de fréquence de débordement ci-dessus. La courte durée d'observation et les importantes lacunes ne permettent pas pour l'instant de faire plus de comparaisons.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1 *Avancées et points durs*

Même s'il ne débouche pas sur des résultats définitifs et souffre notamment d'une modélisation imparfaite de la rivière d'Ain, ce travail de recherche aura permis certaines avancées importantes pour la poursuite d'une modélisation hydraulique et sédimentaire des annexes fluviales du secteur de Saint-Jean-de-Niost.

□ Modélisation hydraulique de la rivière :

Un modèle unidimensionnel s'avère suffisant pour connaître l'impact du niveau de l'Ain tant sur la nappe alluviale que sur les écoulements de surface dans la lône. La dynamique du lit de l'Ain (notamment par érosion de berge) est extrêmement forte, et rend nécessaire l'emploi d'une topographie et de données de calage relatives à la période considérée.

□ Exploitation des limnigrammes dans les lônes :

On repère très nettement des épisodes de débordement par l'amont et des phases régies par le fonctionnement de la nappe alluviale. Dans tous les cas, c'est le régime hydrologique de la rivière qui impose les écoulements dans l'annexe fluviale. Ces limnigrammes permettent l'estimation de la cote, du débit et de la fréquence de débordement.

7.2 *Un pas vers le diagnostic morphologique*

Ni la question de l'écoulement dans la lône ni celle du transport solide n'ont pu être examinées dans le cadre de cette étude. Ce sont les deux aspects qui permettront à terme d'évaluer l'évolution morphologique du milieu et de tenter d'établir des diagnostics, soit au moyen de la simulation, soit par corrélation avec des descripteurs bien choisis.

□ Modélisation hydraulique de la lône :

Bien que ce type de milieu se présente comme un chenal d'écoulement préférentiel, plusieurs éléments laissent penser qu'une modélisation bidimensionnelle des écoulements sur toute la portion de plaine alluviale sera nécessaire. D'abord, on a vu dans le cas de Planet que l'inondation par les eaux de l'Ain n'est pas forcément facile à localiser. Ensuite, pour des grosses crues, des débordements latéraux (par-dessus le bourrelet de berge) vont intervenir, et c'est alors l'ensemble du lit moyen qui est inondé (rendant délicate une modélisation 1D en réseau maillé). Enfin, avant ou après le pic de crue, voire sur de longues périodes, la lône reçoit visiblement d'importants apports d'eau claire depuis la nappe alluviale. Une modélisation (simplifiée) de cette dernière permettrait d'introduire ces apports comme données d'entrée dans les mailles correspondantes du modèle bidimensionnel. Quelle que soit l'approche retenue, une quantification des apports de nappe nécessitera vraisemblablement des mesures piézométriques.

□ Transport solide :

Son évaluation pourrait être couplée au modèle hydraulique 2D. Cependant, il conviendra de distinguer le transport de la charge de fond (mobilisée par les événements rares) et le transport en suspension de fines (plus importantes dans la morphologie d'une lône que dans celle d'une rivière à galets comme l'Ain). C'est sans doute la partie du problème la plus ouverte à l'heure actuelle, tant au niveau de la modélisation que de l'acquisition de données.

BIBLIOGRAPHIE

1. BORNETTE, G. et C. AMOROS, *Ecological complexity of wetlands within a river landscape*. Biological conservation, 1997(85): p. 35-45.
2. AMOROS, C. et G. BORNETTE, *Connectivity and biocomplexity in waterbodies of riverine floodplains*. Freshwater Biology, 2002. **47**(4): p. 761-776.
3. BORNETTE, G. et C. AMOROS, *Disturbance regimes and vegetation dynamics: Role of floods in riverine wetlands*. Journal of Vegetation Science, 1996. **7**(5): p. 615-622.
4. BRUNEL, S., *Analyse et cartographie morphologiques des bouchons alluviaux de quatre bras morts de la basse vallée de l'Ain*. 1998, Université Lyon 3: Lyon.
5. MOULIN, B., *Analyses morphologiques et sédimentaires des zones humides de la basse vallée de l'Ain*. 1998, Cemagref: Lyon.
6. *SAGE de la Basse Vallée de l'Ain (Projet)*. 2000.
7. PIEGAY, H., N. LANDON, et D. SAULNIER, *Etude géomorphologique de la basse rivière de l'Ain*. 2000, UMR 5600 CNRS.
8. LENCLUD, F. et N. DARONNAT, *Etude hydrogéologique sur le périmètre du SAGE de la basse vallée de l'Ain*. 1999, HORIZONS.
9. QUIGNARD, S., *Modélisation du fonctionnement hydraulique d'un ancien bras du Rhône*. 1995, CNR: Lyon.
10. STATIOTIS, C., *Etude des annexes hydrauliques de la rivière d'Ain*. 1998, Cemagref: Lyon.
11. POLUZOT, C., *Détermination du fonctionnement hydraulique et typologie hydrologique des lônes du Rhône*. 1999, Cemagref: Lyon.
12. ROCHE CAMPO, E., *Modélisation hydraulique en milieux complexes : les bras morts de l'Ain, Projet de fin d'études*. 2002, Cemagref: Lyon.
13. LOIRE, R., *Variabilité spatiale et saisonnière de la conductivité électrique et de la hauteur d'eau dans plusieurs zones aquatiques périfluviales de l'Ain*. 2000, Cemagref: Lyon.
14. MARSILY, G., *Hydrogéologie quantitative*. 1981, Paris: Masson.
15. SOUCHON, Y. et al., *Vers de nouveaux outils pour l'aide à la gestion des hydrosystèmes : couplage des recherches physiques et biologiques sur les cours d'eau*. Natures Sciences Sociétés, 2002. **10**(1): p. 26-41.
16. DEGOUTTE, G., *Hydraulique, dynamique et morphologie fluviales appliquées au diagnostic, à l'aménagement et à la gestion des rivières*. 2002: ENGREF.

ANNEXES

8.	Un peu de lexicographie...	45
9.	Glossaire	46
10.	Inventaire des données réunies au Cemagref	48
11.	L'Ain d'Oussiat à Anthon	49
12.	L'Ain de Pont de Chazey à Port-Galland	50
13.	Etablissement des fréquences de connexion	51
14.	Etablissement du modèle de nappe soutenue	52
15.	Récapitulatif des deux méthodes d'obtention de la cote de connexion :	53
16.	Résultats : lône de Planet 2001	54
17.	Résultats : lône de Ricotti 2001	55
18.	Connexions observées in-situ	56

8. Un peu de lexicographie...

Si le terme régional « lône » est absent du Petit Robert, il fait en revanche l'objet d'un article dans le Trésor de la Langue Française Informatisé (INALF, Nancy 2, www.atilf.inalf.fr) :

LÔNE, LONE, subst. fém.

« Eau stagnante de peu d'étendue et sans profondeur en communication périodique ou permanente avec une rivière » (HUSSON 1970).

— *En partic., région.* , « Nom donné dans le Lyonnais aux bras du Rhône que l'on colmate pour en exhausser les rives » (*Nouv. Lar. ill.*). *En face, vers la rive gauche, au nord de Sablons, verdoient les îles que séparent des lônes et des bras morts* (ARNOUX, *Rhône*, 1944, p. 183). *Ils connaissent parfaitement le pays et peuvent en recevoir de fréquents courriers (...) au cours de leur lente promenade, quand ils vont visiter les nouveaux bâtiments de l'Hôtel-Dieu ou les chantiers du sculpteur Antoine-Michel Perrache, qui se propose de gagner tout un quartier sur les marécages ou « lones », au sud de la ville* (E. SCHNEIDER, *Charbon*, 1945, p. 143).

Prononc. : [lo:n].

Étymol. et Hist.

1766 *laune* (CARPENTIER, add. à DU CANGE, s.v. *launa*); 1829-31 *lône* (BREGHOT DU LUT, *Nouv. mél. biogr. et littér. pour servir à l'hist. de Lyon* d'apr. FEW t. 16, p. 488b).

Mot fr.-prov. et prov. (1160, Avignon ds *DAO* 237, 7-1), également attesté en lat. médiév. (979 *launa* ds *Nov. Gloss.* et NIERM.), empr. au germ. occ. **luhnô* « fossé rempli d'eau », cf. l'a. nord. *lôn* « eau stagnante », norv. « eau qui s'écoule lentement », dialectalement « mare » (FALK-TORP).

Dans le Périgord, un bras mort est appelé une couasne.

La recherche bibliographique par mots-clés rend nécessaire l'emploi de synonymes plus ou moins substituables, ainsi que des équivalents anglais. Un premier défrichage linguistique permet de donner quelques éléments utiles (« < » indique la relation d'hypéronymie) :

- lône < bras mort < annexe fluviale < zone humide périfluviale < zone humide ;
- Un « oxbow-lake » désigne en anglais une lône issue du recouplement d'un méandre par tangence. Plus généralement, un méandre recoupé est un « cutoff meander/bend ». Une ancienne tresse est un « former braided channel ». Indépendamment du processus géomorphologique, on parlera de « former channels » ou « abandoned channels » ;
- « annexe fluviale » est souvent traduit en anglais par « riverine waterbody », « zone humide » par « wetland ».

La notion – universelle ! – de « Méandre mort » peut être rendue par :

Flußbogen, Altarm, Altwasser (allemand) ; ox-bow (anglais) ;
meandro antiguo (espagnol) ; meandro abandonado (portugais) ; старица (russe) ;
meandru mort (roumain) ; atnalı şeklinde kıvrım (turc) ;
(arabe) عوطقم رهن فطعنم وأيلاله ين حزم

9. Glossaire

Ces définitions n'ont pas de prétention normative : elles ne visent qu'à s'accorder sur le sens de certains termes employés dans le cadre de cette étude.

Annexe fluviale : plan d'eau (voire zone humide) dont l'existence est directement liée à la proximité d'un cours d'eau (à l'exclusion des chenaux actifs)

Basse de convexité : dépression se formant à l'aval de la boucle d'un méandre, par le jeu des réflexions de courant

Bouchon : formation alluvionnaire qui isole progressivement de la rivière l'amont et l'aval d'un bras mort

Bras mort : ancien tronçon d'un chenal actif qui ne participe plus à l'écoulement des eaux de la rivière que lors d'épisodes de crue

Chenal actif : par opposition au bras mort, chenal principal (voire secondaire dans le cas de tresses) permettant en permanence l'écoulement des eaux de la rivière

Connectivité hydrologique : capacité de l'eau à assurer aux organismes vivants l'accès aux différentes parties de l'écosystème aquatique, selon des rythmes hydrologiques

Connexion (hydraulique) : mise en communication des eaux de la lône avec celles de la rivière par-dessus un bouchon alluvial (généralement amont) ; à cause de la confusion possible avec *connectivité hydraulique* et *connexion* (hydrogéologique avec la nappe sous-jacente), il vaut mieux parler de *débordement*, de *submersion* ou de *lône passante*.

Débordement : submersion du bouchon amont (ou aval) par les eaux de la rivière en crue

Divagant : cf. *style fluvial*

Habitat : structure physique de l'écosystème – et sa dynamique – perçues et utilisées par les êtres vivants [15]

Lit mineur/moyen/majeur : le *lit majeur* couvre l'ensemble de la plaine inondable, délimitée par les plus hautes eaux ; le *lit mineur* est l'espace occupé par l'écoulement pour les crues courantes, constitué d'un ou plusieurs chenaux et de bancs non végétalisés ; parfois on distingue un *lit intermédiaire ou moyen* participant à l'écoulement pour des crues de type décennal (c'est le cas des lônes), le lit majeur ne jouant qu'un rôle de stockage [16]

Lône : terme régional désignant les bras morts en Rhône-Alpes (cf. annexe lexicographique) ; selon les emplois, la *lône* désigne soit le plan d'eau (*zone aquatique périfluviale*), soit le chenal d'écoulement superficiel, soit l'ensemble de la zone humide

Méandre : cf. *style fluvial*

Passant (bras mort) : une lône est dite « passante » quand lors d'une crue la rivière la remobilise pour assurer son écoulement (bouchons amont et aval sont alors submergés)

Rivière alluviale : cours d'eau qui coule dans des alluvions qu'elle a elle-même transportées.

SAGE/SDAGE : la loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 impose un recensement et un plan de gestion systématique et obligatoire de toutes les ressources en eau par la création des SDAGE et des SAGE ayant valeur réglementaire.

Les SDAGE (= Schémas d'Aménagement Directeur et de Gestion des Eaux) fixent "pour chaque bassin les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau" (art.3 de la loi sur l'eau).

Les SAGE (= Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) sont l'expression à l'échelle d'un cours d'eau d'un projet élaboré par une Commission Locale de l'Eau (procédure détaillée par le décret n° 92-1042 du 24 septembre 1992).

Style fluvial : formes en plan prises par une rivière sur une portion de son cours, principalement selon sa charge sédimentaire et la pente du terrain

Une rivière à tresses est caractérisée par un lit très large et plat, dans lequel plusieurs chenaux instables, sensiblement orientés selon l'axe de la vallée, sont séparés par de nombreux bancs latéraux ou îles ; plus à l'aval, le nombre de tresses diminue et un tracé principal sinueux s'organise : style divagant ; dans les zones de plaine, le cours d'eau adopte un tracé à lit unique de plus en plus sinueux : style à méandres [16]

Tresses : cf. *style fluvial*

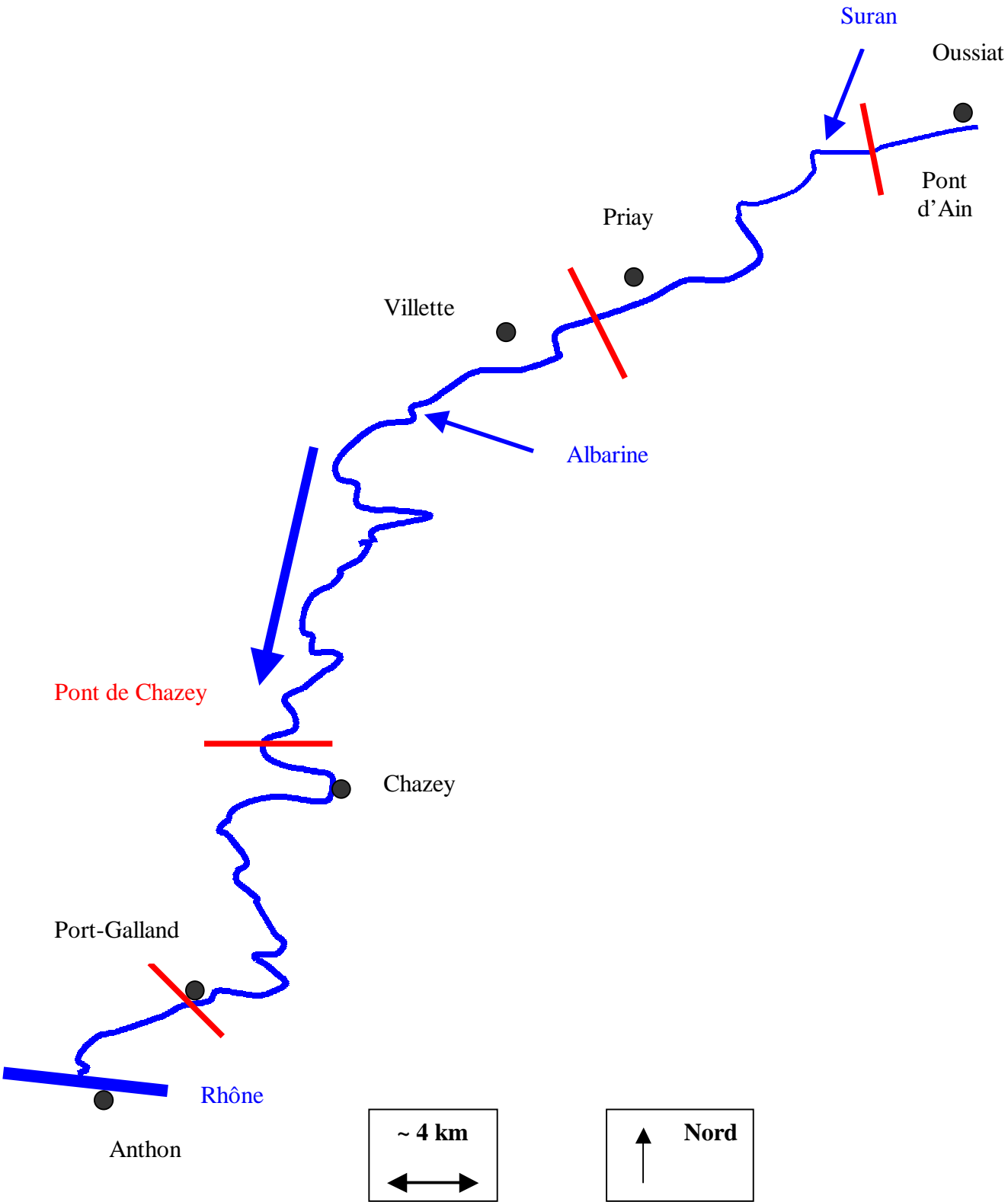
Zone aquatique périfluviale : Plan d'eau (ou succession de plans d'eau) relativement pérenne entre le bouchon amont et le bouchon aval de la lône

Zone humide : territoire dont le bilan hydrique est régulièrement excédentaire

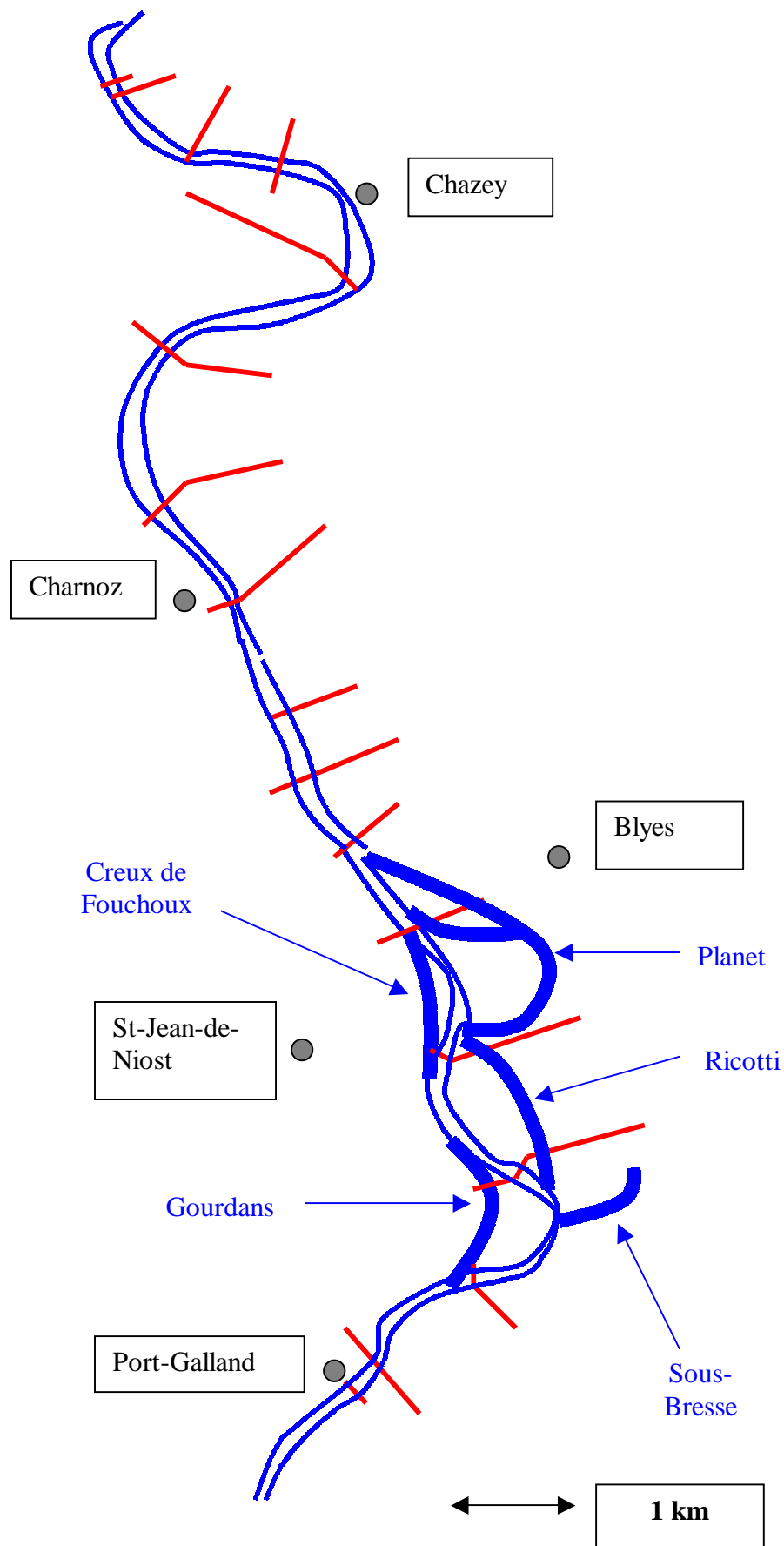
10. Inventaire des données réunies au Cemagref

descriptif	lieu	période	provenance
1 profil en travers	Ain à Pont-d'Ain	06/97	Diren
chronique hauteur d'eau	Brotteaux	2000-2002	HHmet
chronique hauteur d'eau	Creux de Fouchoux	2000-2002	HHmet
chronique hauteur d'eau	Gourdans	2000-2002	HHmet
chronique hauteur d'eau	Planet amont	2000-2002	HHmet
chronique hauteur d'eau	Ricotti	2000-2002	HHmet
chronique hauteur d'eau	Sous Bresse	2000-2002	HHmet
chronique hauteur d'eau	Villette Amont	2000-2002	HHmet
chronique température/conductivité	Brotteaux	2000-2002	HHmet
chronique température/conductivité	Sous Bresse	2000-2002	HHmet
courbe de tarage Q-H	Ain à Pont-d'Ain	1994	Diren
courbe de tarage Q-H	Ain à Pont-de-Chazey	1995	Diren
courbe de tarage Q-H	Ain à Port-Galland	02/99 à 01/00	CNR
courbe de tarage Q-H	Ain à Port-Galland	2000	CNR
courbe de tarage Q-H	Rhône à Anthon	1968	CNR
courbe de tarage Q-H	Rhône Sault-Brénaz Jons	12/92 à 05/96	CNR
débits classés	Ain Pont de Chazey	1990-2001	?
débits classés	Ain Port Galland	1990-2000	?
débits classés	Albarine	1990-2000	?
analyse par méthode de renouvellement	Ain Pont de Chazey	1961-1995	Roche
analyse par méthode de renouvellement	Ain Port Galland	1990-1999	Roche
profils en long de l'Ain		1999	CNRS
profils en travers de l'Ain	3 Planet + 1 Mollon	1999	CNRS
profils en travers de l'Ain		1977	SOGREAH
profils en travers de l'Ain		1987	CNR
profils en travers de lône	Bublanc	2002	HHmet
profils en travers de lône	Creux de Fouchoux	2002	HHmet
profils en travers de lône	Planet amont	2002	HHmet
profils en travers de lône	Port-Galland	2002	HHmet
profils en travers de lône	Ricotti	2002	HHmet
chronique débits	Ain Pont d'Ain	1981-2001	Hydro
chronique débits	Ain Pont de Chazey	1981-2001	Hydro
chronique débits	Albarine St Denis	1988-2001	Hydro
chronique débits	Rhône Bugey	1978-1999	Hydro
chronique débits	Rhône barrage Sault	1975-1992	Hydro

11. L'Ain d'Oussiat à Anthon

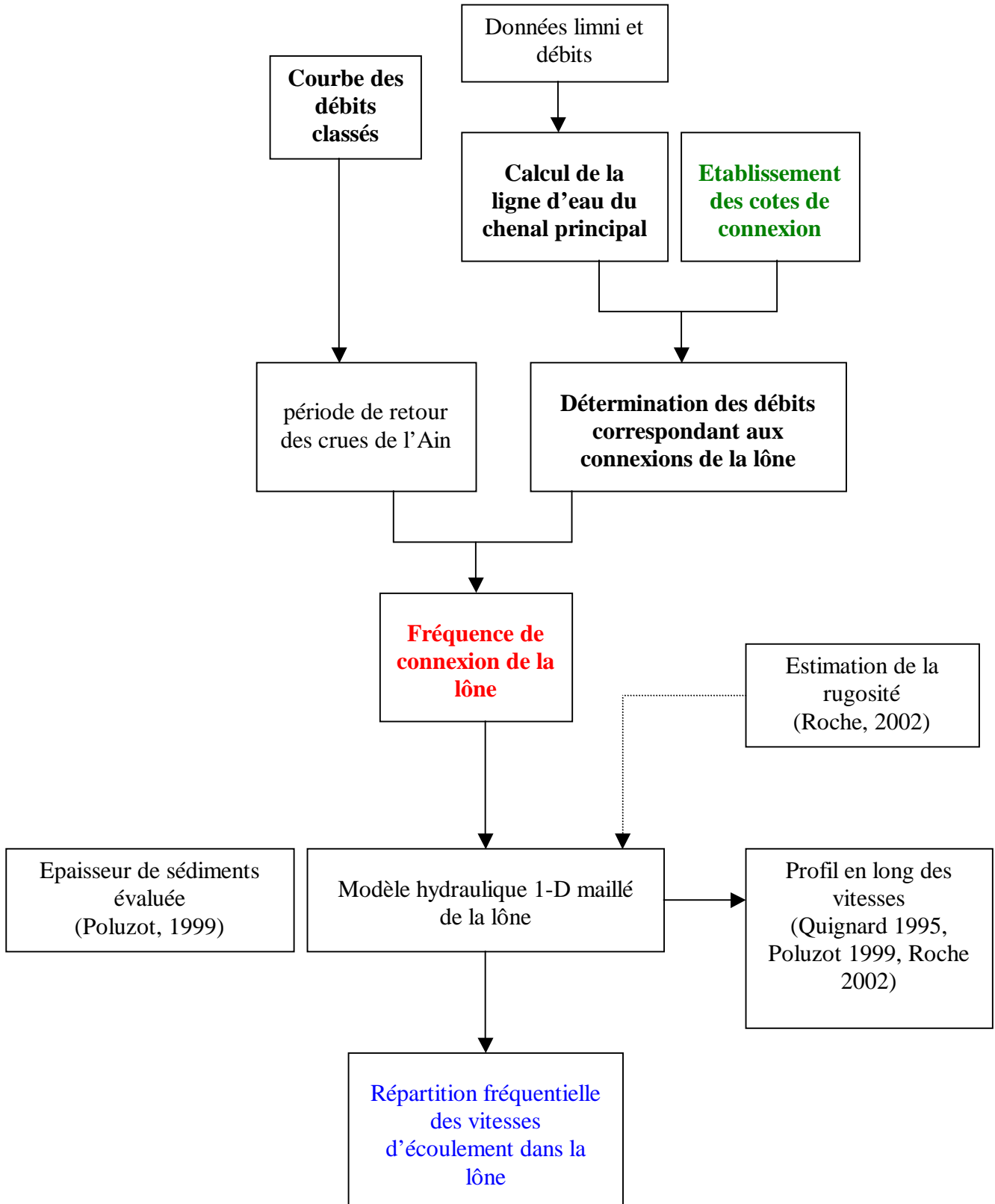


12. L'Ain de Pont de Chazey à Port-Galland



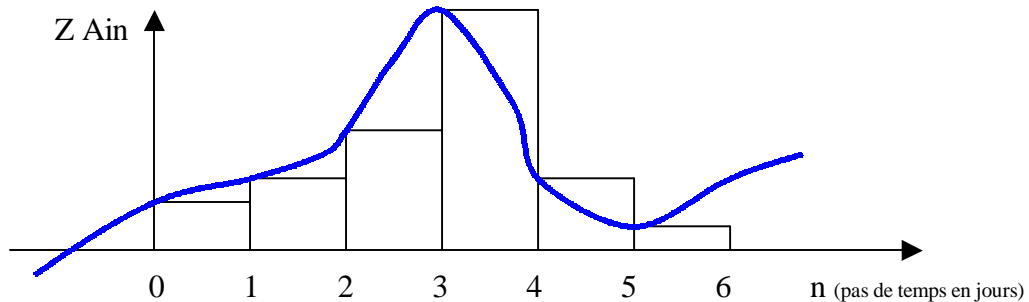
13. Etablissement des fréquences de connexion

Schéma de la méthode adoptée par les études précédentes



14. Etablissement du modèle de nappe soutenue

Dans un souci de clarté, on a préféré aboutir à la formule en considérant la variation de niveau de l'Ain comme une succession de créneaux (et non d'échelons) sur 24 heures ; mais il faut alors donner à $e(1)$ une forme particulière, car on a adopté la démarche suivante :



Le niveau de l'Ain est rapporté au zéro de l'altitude d'équilibre de la nappe (en pratique, la moyenne du niveau de l'Ain sur une longue période est très proche de celle du niveau piézo de la nappe). On discrétise le signal limni de l'Ain au pas de temps journalier, avec la valeur au début de chaque jour (à 0 h). De même, le niveau piézo simulé sera discrétisé au pas de temps journalier, en gardant sur une journée la valeur calculée au début de la journée (à 0 h).

A chaque pas de temps, le niveau piézo théorique est la somme des effets de toutes les variations qui ont affecté auparavant le niveau de la rivière.

A $n = 0$, la nappe n'a « vu » aucune variation du niveau de la rivière :

$$h(0)=0$$

A $n = 1$, elle n'a « vu » qu'un échelon (de 0 à $z(0)$) $\Delta t = 24$ h auparavant :

$$h(1) = z(0) * e(1) \text{ avec } e(1) = \text{erfc} \left(x \sqrt{\frac{S}{4T\Delta t}} \right)$$

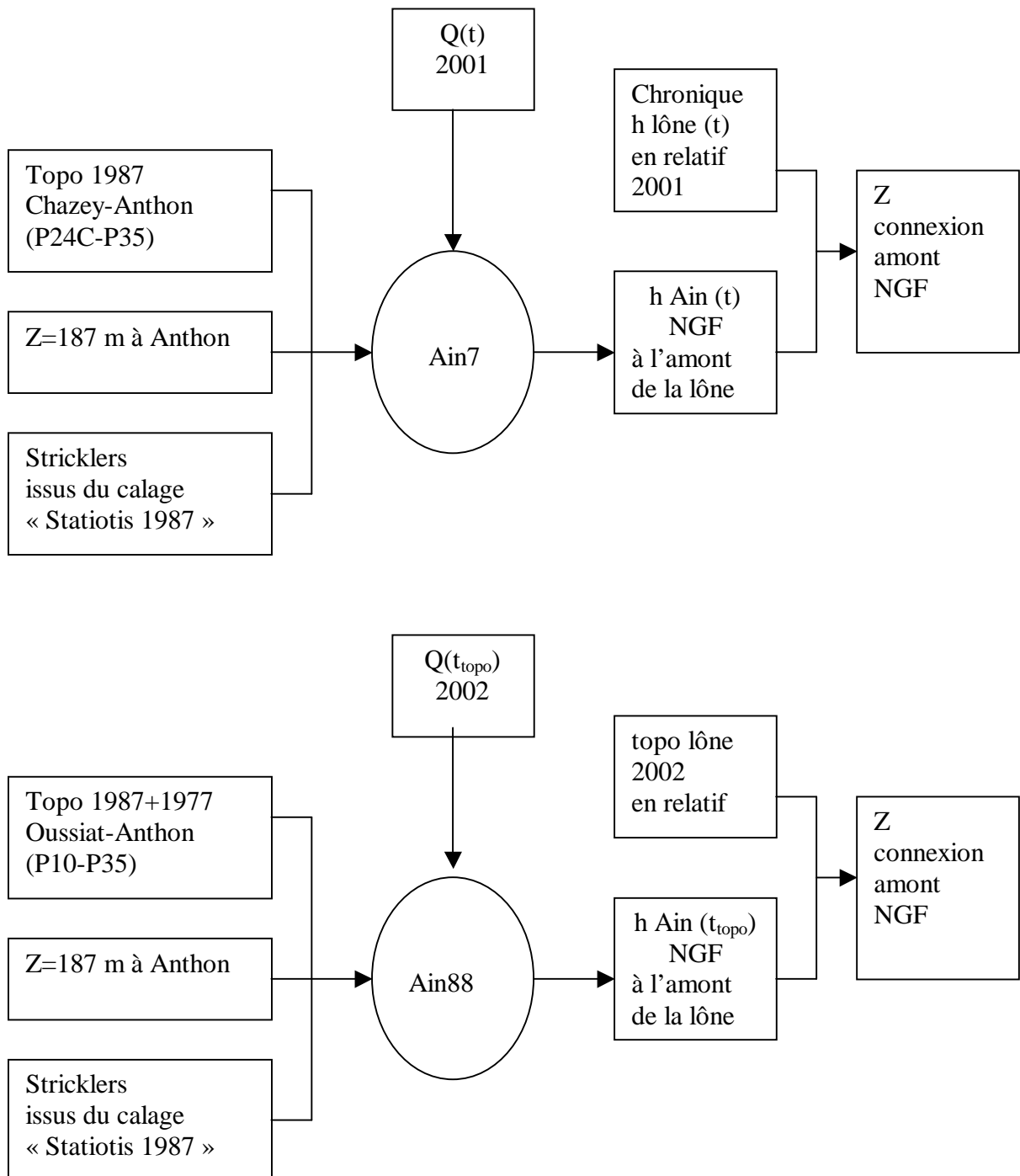
A $n = 2$, elle a « vu » le premier créneau (de 0 à $z(0)$) puis de $z(0)$ à 0) puis un échelon (de 0 à $z(1)$) 24 h auparavant :

$$h(2) = z(1) * e(1) + z(0) * e(2) \text{ avec } e(2) = \text{erf} \left(x \sqrt{\frac{S}{4T\Delta t}} \right) - \text{erf} \left(x \sqrt{\frac{S}{4T*2\Delta t}} \right)$$

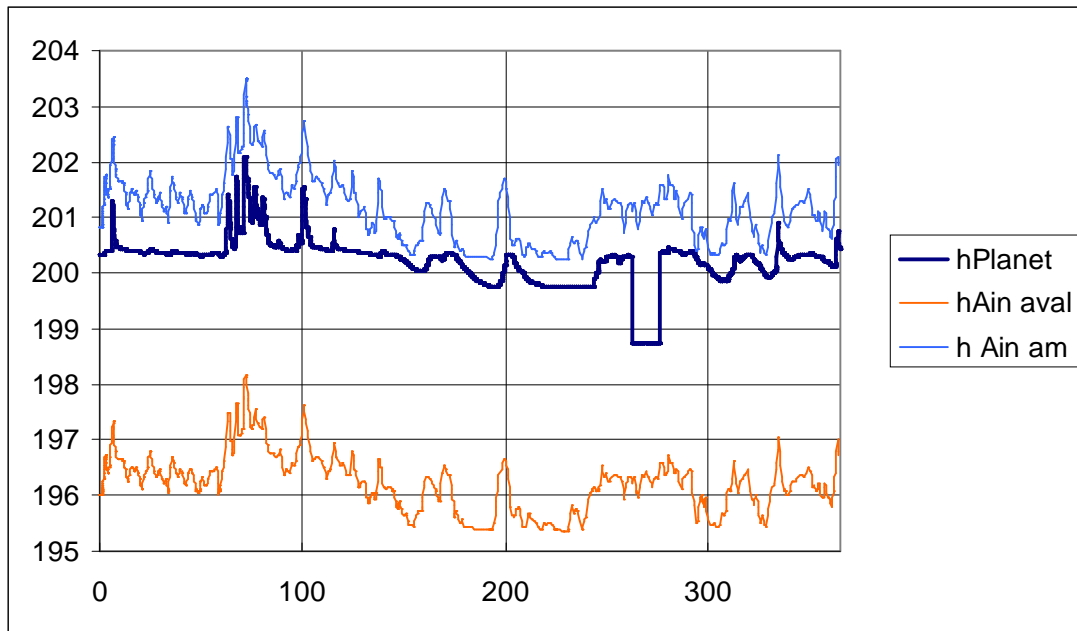
Par récurrence immédiate, on établit ainsi la formule de convolution discrète indiquée chapitre 5. On voit qu'avec les conventions de découpage temporel choisies, il faut distinguer $e(1)$ des autres $e(i)$: au pas de temps n , la nappe subit l'influence de $n-1$ créneaux et de l'échelon qui s'est produit 24 h plus tôt (coefficient $e(1)$).

15. Récapitulatif des deux méthodes d'obtention de la cote de connexion

- a) méthode « limnimétrique » 2003
- b) méthode « topographique » 2002



16. Résultats : îône de Planet 2001



Zconnex amont = 201,6 m NGF (199,9 + 1,7 exhaussement) ;
mesure topo 2002 : 200,6 m NGF

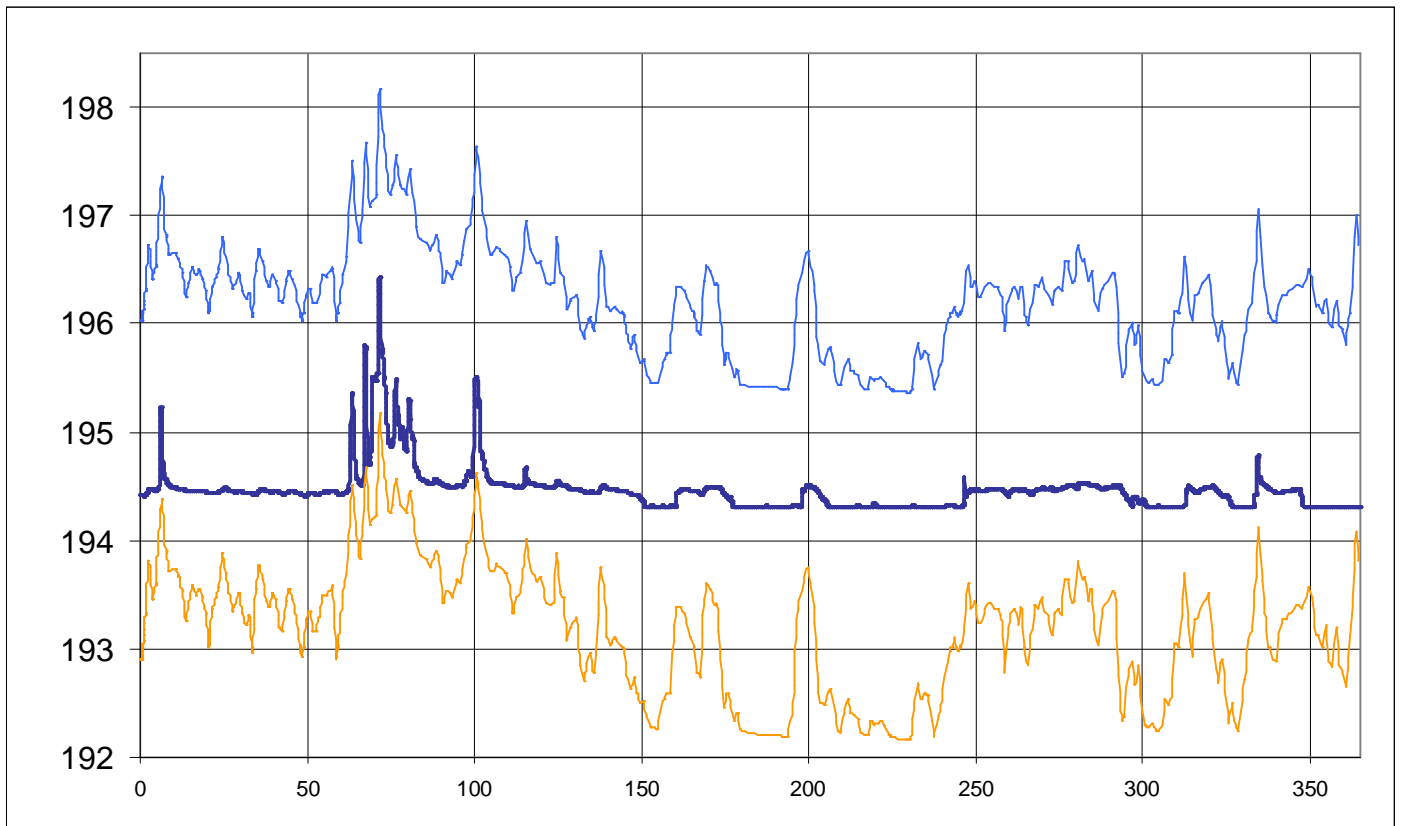
N.B. Résultat très douteux à l'amont, car dérive de ligne d'eau mal connue (mesurée pour un seul débit) et débordement mal localisé...

Qconnex amont = 270 m³/s (mesure : de 262 à 276 m³/s) : débit de l'Ain à Pont de Chazey
Fconnex amont = 28 jours/an (mesure : de 27,5 à 29 jours/an)

Nombre de jours de débordement amont observés sur la chronique 2000-2001 : 30 jours

Zconnex aval = 196,0 m NGF (197,0 -1,0)
mesure topo 2003 : 196,1 m NGF

17. Résultats : îône de Ricotti 2001



Zconnex amont = 196,6 m NGF (197,6 -1,0 incision) ;
mesure topo 2002 : 196,4 m NGF
mesure topo 2003 : 196,4 m NGF

Qconnex amont = 200 m³/s (mesure : de 198 à 205 m³/s) : débit de l'Ain à Pont de Chazey
Fconnex amont = 64 j/an (mesure : de 61 j/an à 66 j/an)

Nombre de jours de débordement amont observés sur la chronique 2000-2001 : 34 jours

Zconnex aval = 192,9 m NGF (195,6 – 2,7 incision)
mesure topo 2002 : 192.2 m NGF

N.B. Résultat très douteux à l'aval, car dérive de ligne d'eau mal connue (mesurée pour un seul débit, faible : 39 m³/s) ...

18. Connexions observées in-situ

date	Ricotti		Planet		jour n°
	connexion amont	connexion aval	connexion amont	connexion aval	
03/10/2000	oui	oui			
01/02/2000	non	oui	infiltration sous bouchon amont	oui	32
16/02/2000	oui	oui	oui	oui	47
01/03/2000		oui	non	oui (ain-->lône)	61
06/03/2000		oui (lône-->Ain)	suintement	oui (lône-->Ain)	66
24/03/2000			suintement	non	84
13/04/2000	oui	oui (lône-->Ain)	oui (nappe)	non	104
04/05/2000	oui (lône-->Ain)			non	125
18/05/2000		non		non	139
08/06/2000		non		non	160
24/10/2000		oui (lône-->Ain)		oui (lône-->Ain)	298
09/11/2000	oui	oui (lône-->Ain)		oui (lône-->Ain)	314
27/11/2000	oui	oui (lône-->Ain)	non	oui (lône-->Ain)	332
14/12/2000		oui (lône-->Ain)		oui (lône-->Ain)	349
17/01/2001				oui (lône-->Ain)	383
23/01/2001					
22/02/2001		oui (lône-->Ain)		oui (lône-->Ain)	419
19/03/2001	oui	oui (lône-->Ain)			