

Université de Limoges
Ecole Doctorale 375 « Sciences de l'Homme et de la Société (S.H.S.) »
Faculté des Lettres et des Sciences Humaines
U.M.R.-C.N.R.S. 6042 Geolab

Thèse

Afin d'obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges
Discipline : Géographie

Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : Le cas des étangs-lacs en Limousin

Présentée et soutenue publiquement par :

Matthieu CARLINI

Le 13 juillet 2006

Devant un jury composé de :

- M. **Laurent TOUCHART**, Professeur à l'université d'Orléans – Directeur de recherches
Me **Jeannine CORBONNOIS**, Professeur à l'université du Maine – Rapporteur
M. **Olivier SCHLUMBERGER**, Chargé de Recherches HDR au CEMAGREF de Montpellier
– Rapporteur
M. **Damien BANAS**, Maître de Conférences à l'Université Paris XI – Examineur
M. **Marc DESMET**, Maître de Conférences à l'Université de Savoie – Examineur
Me **Véronique MALEVAL**, Maître de Conférences à l'Université de Limoges – Examinatrice

Avant – propos

NOTES LIMINAIRES

A propos du néologisme stagnustre

Cette thèse de géographie est un travail consacré aux étangs. Il est difficile de traiter d'objets pour lesquels aucun adjectif n'est disponible sans alourdir considérablement le propos. Au sein de notre équipe, il a été décidé d'adopter l'adjectif stagnustre, formé sur la base du latin *stagnum* signifiant étang et à l'origine du mot français.

Cet adjectif a déjà été utilisé à plusieurs reprises dans des communications orales ou des articles, néanmoins il semblait important de faire ce petit éclaircissement car stagnustre n'est, à ce jour, dans aucun dictionnaire.

A propos des encadrés

La géographie se prête tout particulièrement au travail en équipe, notamment pour ce qui concerne les relevés de terrain ou la construction de matériel. Cela est notamment vrai lorsqu'il s'agit d'acheminer et d'utiliser sur la surface de quelque plan d'eau un matériel encombrant. Cette « contrainte » amène à penser des campagnes de terrain prenant en compte simultanément plusieurs paramètres, plusieurs problématiques.

Le choix fut fait de mener cette logique jusqu'au bout, en construisant des figures collectivement. Ces figures comprennent à la fois des illustrations et du texte, de sorte qu'elles puissent être compréhensibles seules ; ce sont les encadrés α , β et γ .

A propos de mon changement de nom durant cette recherche

Pour des raisons personnelles, j'ai changé de nom fin 2005. Un certain nombre de confusions peuvent en résulter à la lecture de cette thèse et il est donc nécessaire que j'expose ici la solution adoptée.

L'ensemble des figures ou photographies inédites réalisées portent le nom de Carlini, quelle que soit l'année de leur réalisation. En revanche, toute reprise d'une figure publiée antérieurement, toute citation, article ou ouvrage porte le nom de Graffouillère.

Cinq ans se sont écoulés depuis le début de cette thèse qui n'aurait probablement jamais été achevée sans de nombreux soutiens d'ordre scientifique, matériel ou humain. J'exprime donc ici toute ma gratitude aux personnes m'ayant permis de mener à bien mes recherches.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Laurent TOUCHART, Professeur des Universités, pour son soutien, ses conseils avisés et sa grande disponibilité.

Je veux aussi témoigner toute ma reconnaissance aux membres du jury :

Me Jeannine CORBONNOIS, Professeur de géographie à l'université du Maine, pour avoir accepté d'être rapporteur de ce travail.

M. Olivier SCHLUMBERGER, Chargé de Recherches HDR au CEMAGREF de Montpellier, pour sa disponibilité et ses remarques constructives et pour avoir accepté d'être rapporteur de ce travail.

M. Damien BANAS, Maître de Conférences à l'Université Paris XI,

M. Marc DESMET, Maître de Conférences à l'Université de Savoie,

Me Véronique MALEVAL, Maître de Conférences à l'Université de Limoges, pour leurs conseils et l'examen critique de cette thèse.

Le cheminement scientifique de ce travail et les nombreuses campagnes de terrain n'auraient pu être menées à bien sans le soutien des autres géographes limnologues de l'Université de Limoges. J'ai découvert grâce à Pierre PAPON, doctorant, et Benoît SAVY, docteur, ce qu'apporte le travail en équipe. Nous avons surmonté à trois nombre de problèmes méthodologiques et scientifiques et, qui plus est, dans la bonne humeur.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du département de géographie de l'Université de Limoges pour lequel j'ai pu être chargé de cours lors de mon D.E.A., puis allocataire-moniteur et enfin A.T.E.R., deux années durant. Mon intégration à la vie du département s'est faite sans heurts et j'ai appris beaucoup, à la fois de la pratique de l'enseignement supérieur, mais aussi du fonctionnement d'un département.

Un remerciement particulier à Patrick AUGER de la Chambre d'Agriculture de Corrèze, mais aussi doctorant pour de nombreuses discussions sur la géographie, les S.I.G. ou tout autre chose.

Véronique MALEVAL, pour son aide et ses conseils depuis le début de mes recherches.

Rémi CROUZEVIALLE, Cartographe, Ingénieur assistant au département de géographie de l'Université de Limoges pour ses conseils cartographies et historiques.

Gheoghe SERBAN, Maître-Assistant et Mircea ALEXE, Assistant à la faculté de géographie de l'université Babeş Bolyai de Cluj-Napoca, pour leur vision de la géographie et leur participation à la bathymétrie de l'étang de Cieux.

J'exprime ici une très respectueuse pensée à Me Bernadette BARRIERE, Professeur d'histoire émérite de l'Université de Limoges, pour l'intérêt qu'elle portait à nos recherches, et l'incalculable apport de la découverte de la superficie de l'étang de Cieux lors de sa mise en eau.

Les discussions avec les autres doctorants de l'université de Limoges, Pascal BARTOUT, Ludovic BOUSSIN, Delphine BRUNAUD, Julien DELLIER, Hussein EL HAGE HASSAN, Angélique MAURIAT, Myriam GUILLABOT, Nicolas LHERITHIER et Marie LION ont permis de travailler dans une atmosphère détendue.

Farid BOUMEDIENE, pour m'avoir fait découvrir les S.I.G. durant ma maîtrise et mon D.E.A.

Cette étude n'aurait pu être menée à bien sans l'obligeance des propriétaires et gérants des plans d'eau étudiés, publics ou privés :

L'école supérieure GEONAT,

Le Conseil Général de la Haute-Vienne,

Le Conseil Général de la Creuse

Les mairies de Cieux, Lussat, Rochechouart et Vicq-sur Breuilh.

Le lycée agricole d'Ahun (particulièrement Arnaud LEFEVRE)

MM.BEAUFORT, CHAPELOT, LASCAUX, RIBOULET

J'ai eu l'occasion de rencontrer de nombreux acteurs de l'eau lors de travail sur le terrain ou en collaborant à divers projets. Leurs commentaires et leur vision de l'aménagement ont toujours été précieux.

Sophie MORENO et Jean-François NARDOT, directeurs de GEONAT,

Bruno SCHIRMER, Animateur du contrat de Restauration-Entretien des rivières de la Graine et de la Gorre,

Yoann BRIZARD, Chargé de Mission au Syndicat d'Aménagement de la Vallée de la Vienne,
Claire-Lise HERAULT, Animatrice du S.A.G.E. de la Vienne Moyenne,
Marie ADALBERT, Chargée de Mission au S.I.V.O.M. Vienne-Gorre.

Enfin, les apports scientifiques et techniques ne seraient rien sans le soutien permanent de tous les gens qui m'entourent et qui m'ont permis de garder le cap et de ne jamais lâcher prise.

Nathalie, pour ton aide, tes relectures et ton ouverture d'esprit

Mes parents, pour leurs relectures attentives, leur disponibilité et leur compréhension

Renaud, pour m'avoir ponctuellement aidé sur le terrain mais surtout pour tout le reste.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le concours de l'U.M.R. 6042 CNRS, de l'équipe d'accueil 1086 T.S.P. et de l'Association à Intérêt Géographique, Limnologique et Environnemental.

A Nathalie et Nathan

Introduction générale

La ressource en eau et sa gestion, tant au niveau de la qualité que de la quantité furent une préoccupation prioritaire de la fin du XXème siècle et sont assurément un des enjeux majeurs du XXIème siècle.

A l'échelle planétaire, les réserves d'eau douce liquide sont majoritairement contenues dans les lacs, dont le volume est deux cent fois supérieur à celui des cours d'eau. L'étude de ces lacs et de leur fonctionnement est donc primordiale pour l'humanité et depuis la fin du XIXème siècle une science, la limnologie, a fait des milieux lenticulaires continentaux ses objets de recherche. Dans les faits, la limnologie a surtout privilégié l'étude des lacs et les études biologiques se sont imposées majoritairement au sein de cette science.

Le Limousin est souvent appelé « pays de l'arbre et de l'eau », terminologie reprise par tous, des instances régionales jusqu'aux syndicats d'initiatives. Cette région se situe sur un massif ancien rajeuni au tertiaire. La pluviométrie moyenne de mille millimètres par an entraîne sur ce socle cristallin la présence d'un réseau hydrographique très dense. Les très nombreux rus, ruisseaux et rivières morcellent le paysage disséquant les versants, creusant des vallons et vallées plus ou moins encaissés.

Le paysage du Limousin est constellé de milliers de plans d'eau pourtant, point de lac naturel en Limousin, toutes les masses d'eau retenues le sont artificiellement, derrière une digue de terre, de pierre ou de béton. Quelques grands lacs de barrage existent, comme Vassivière à la limite entre la Haute-Vienne et la Creuse, Saint Pardoux sur le piémont des mont d'Ambazac ou les barrages de retenue de Bort-les-Orgues et de l'Aigle, au sud, sur la Dordogne ; néanmoins pour leur grande majorité les plans d'eau limousins sont des étangs.

Si nombre de petits plans d'eau sont récents, datant du milieu du siècle dernier, l'implantation d'étangs en Limousin remonte à la période médiévale. Ainsi même s'ils ne sont pas majoritaires, on trouve sur le territoire régional nombre d'étangs séculaires souvent liés aux ordres monastiques. L'ancienneté de la présence d'étangs et le grand nombre de plans d'eau actuels font assurément du Limousin une région d'étangs devant être traitée comme telle. En effet, la présence d'un plan d'eau induit un certain nombre d'impacts sur le réseau hydrographique qu'il convient de connaître afin d'accéder à une gestion durable des milieux.

La gestion des étangs en Limousin ne peut pas être simplement calquée sur celle des autres régions d'étangs que sont par exemple la Brenne, la Dombes ou la Sologne, même si certaines pratiques sont à prendre en considération. Malgré l'omniprésence de l'étang en Limousin, il n'en reste pas moins peu connu car trop peu souvent objet d'études. L'étang en général est peu abordé par les limnologues, s'attachant préférentiellement à l'étude des lacs. Certes, le volume contenu dans les lacs est immense et le fonctionnement de ces derniers, par sa complexité fut et reste une source importante de recherches. Néanmoins, les étangs sont beaucoup plus nombreux dans le monde et beaucoup plus denses localement. Le manque d'études est assurément préjudiciable à leur nécessaire gestion.

Le Limousin réunit plusieurs problématiques rendant cruciale l'étude des plans d'eau émaillant sa surface. Les étangs sont très nombreux, disséminés sur l'ensemble du territoire sans que se dégage une réelle région géographique d'étangs. Les impacts induits sont évoqués régulièrement, mais peu d'études existent dans les faits suffisamment fondées sur le terrain pour être valides, tout en gardant une représentativité tenant compte des spécificités stagnustres régionales. Le statut privé

de nombre de tous petits plans d'eau, parfois non déclarés à l'administration, rend le problème plus compliqué encore lorsqu'il est nécessaire d'aborder les aménagements possibles ou l'éventualité d'une vidange.

Les étangs ont fait l'objet d'études orientées sur leurs aspects biologiques ou environnementaux. L'étude de leurs particularités morphologiques et hydromorphologiques peut fournir des clés pour mieux comprendre les phénomènes hydrauliques et physico-chimiques auxquels doivent faire face les organismes aquatiques vivant dans ces plans d'eau. Une telle approche contribue donc à une connaissance plus complète d'un écosystème « étang ».

Loin d'apporter des solutions toutes faites, la géographie peut aider à la compréhension des étangs et à leur gestion. Ce travail se concentrera plus particulièrement sur ces plans d'eau considérés comme « petits » par rapport aux lacs, mais relativement « grands » par rapport à l'ensemble des étangs de la région. Outre leurs caractéristiques surfaciques, la spécificité de ces plans d'eau tient dans l'importance de leur profondeur relative. A superficie égale, leur volume est beaucoup plus important que celui des étangs des autres régions françaises, ce qui laisse augurer de différences réelles de fonctionnement.

La morphologie de ces « étangs-lacs » est-elle uniquement héritée ou modelée par le plan d'eau lui-même ? Comment le stockage sédimentaire se répercute-t-il lors des vidanges ? Quel peut-être l'impact réel du marnage sur la ressource en eau ? La courantologie stagnustre peut-elle exister ?

Les spécificités autant descriptives que fonctionnelles de ces plans d'eau que nous avons nommés étangs-lacs s'égrèneront au fil des pages pour constituer un ensemble cohérent.

Dans une première partie, nous avons réalisé un travail épistémologique destiné à comprendre l'évolution de la limnologie, et particulièrement des problématiques méthodologiques touchant à la morphologie et à la courantologie afin d'éclairer ce travail de géographie limnologique sur les étangs à la lumière des connaissances accumulées durant plus d'un siècle sur les lacs. Les étangs-lacs représentent une étape hybride entre les connaissances actuelles des lacs et celles des étangs. La nécessité de se référer à la fois aux connaissances fondamentales et méthodologiques des lacs et des étangs est une des raisons probables de la méconnaissance de ces milieux. Après avoir recentré le propos sur le terrain d'étude, en mettant nécessairement en avant le problème de la définition de l'étang, nous nous sommes penchés sur les méthodologies utilisables, adaptables ou nouvelles nécessaires à l'étude de nos plans d'eau. Cette recherche méthodologique s'exerce pour le terrain, comme pour le travail géomatique.

La deuxième partie fait la part belle à la cartographie, arme privilégiée du géographe. La première lacune concernant les étangs est la méconnaissance de leur morphologie. Cette lacune, nous tenterons de la combler par un travail analytique puis synthétique résolument fondé sur le travail de terrain. Un propos liminaire sur la morphologie lacustre et les évolutions de son étude est néanmoins nécessaire, il permettra de comprendre les différences morphologiques entre lacs et étangs.

Les étangs-lacs de notre étude sont ici aussi différents dans leur fonctionnement à la fois des lacs et des étangs. Plus profonds que les seconds, sont-ils susceptibles de développer des processus et formes originellement propres aux lacs ? La grande ancienneté de certains d'entre eux au regard des lacs de barrage de nos régions peut

encore complexifier l'analyse : il s'agira de montrer si les étangs-lacs sont différents à la fois de lacs et des étangs.

L'ancienneté de certains étangs étudiés, et un goût pour la chose historique, nous ont poussés à alimenter plusieurs années durant une réflexion sur la reconstitution de l'aspect d'un étang à l'époque médiévale qui trouve ici son aboutissement.

La morphologie des étangs, héritée ou construite, est ensuite détaillée et quantifiée depuis les deltas jusqu'au plafond débouchant sur une typologie morphologique des étangs limousins, prenant en compte toutes les échelles et mettant en relief la spécificité de ces plans d'eau.

Le corollaire de la question morphologique est évidemment le stockage sédimentaire qui, pour les étangs est à rapprocher de la problématique des vidanges. Une fois le contexte limousin replacé par rapport aux autres régions, nous avons choisi de nous appuyer sur un exemple étudié en profondeur ainsi que sur certains aménagements destinés à réduire le flux sédimentaire.

La troisième partie se focalise sur l'eau des étangs. Les aspects abordés touchent aux particularités hydrologiques du fonctionnement des étangs-lacs. L'importance du marnage, l'étude de ses rythmes de son impact sur le plan d'eau représente un prélude à la présentation d'un bilan hydrologique complet d'un étang. La courantologie stagnustre est une problématique bien peu abordée, surtout depuis l'angle du terrain, quoiqu'elle puisse avoir de nombreuses répercussions. Nous avons donc cherché à mettre en évidence la présence de réels courants dans les étangs. Cet aspect de l'étude a nécessité plus que tout autre l'adaptation voire la construction de matériel permettant une cartographie inédite pour d'aussi petits plans d'eau.

Enfin nous avons synthétisé les interrelations liant morphologie, hydrodynamique et hydrophysique des étangs dans une perspective concrète d'aménagement des étangs limousins et de leurs spécificités.

L'objectif de cette étude est une appréhension plus rigoureuse des étangs limousins et particulièrement une observation analytique de la complexité des processus prenant place dans les étangs-lacs, toujours à la lumière des connaissances lacustres.

L'étude, la caractérisation, la typologie de ces étangs-lacs ne doit en aucun cas rester dans le seul domaine de la recherche fondamentale. Les nombreuses problématiques soulevées par la présence des étangs doivent pouvoir s'enrichir de nouvelles données, de nouvelles pistes de travail, d'aménagement. Ce travail a aussi été réalisé en ce sens : la connaissance de ces étangs-lacs relativement profonds spécifiques au Limousin représente un support supplémentaire à de futures études comme à leur nécessaire gestion.

L'étude et la compréhension des milieux, qu'ils soient aquatiques ou non, devraient, doivent être les préalables nécessaires à toute forme de gestion. En cela, ce travail se veut une contribution à la mise en place d'une politique de gestion des plans d'eau en Limousin dans l'intérêt du plus grand nombre.

PARTIE I :
D'UNE LIMNOLOGIE LACUSTRE A LA MISE EN
PLACE D'UNE METHODOLOGIE DE GEOGRAPHIE
LIMNOLOGIQUE POUR L'ETUDE
DES ETANGS LIMOUSINS

1 – De l'océanographie à la géographie limnologique

2 – Quel cadre géographique pour l'étude des étangs ?

3 – Des méthodologies dictées par les échelles

4 – Apports de l'informatique et de la géomatique à la géographie limnologique

Les étangs limousins sont tous des créations de l'Homme et cet état de fait entraîne une responsabilité vis-à-vis de leur fonctionnement et donc une nécessité de gestion. Il est indéniable qu'une gestion durable doit s'appuyer sur des fondements solides, à savoir une bonne connaissance de l'objet de gestion, en l'occurrence l'étang. Malgré cela, bien peu d'études ont pour objet l'étang limousin et son fonctionnement. Avant de pouvoir aborder l'étude proprement dite, nous allons essayer de cerner quelle place la limnologie, par son histoire et son développement, peut occuper dans la compréhension des étangs limousins. Le choix de mettre en avant dès le titre de cette première partie une limnologie lacustre, que d'aucuns trouveront assurément pléonastique, est parfaitement volontaire. Si la limnologie concerne la totalité des eaux continentales dans sa définition même – les définitions sont discutées plus loin – dans la réalité, elle a surtout fréquenté les rivages lacustres. Nous entamons donc cette étude par un panorama des thématiques et techniques de la limnologie adaptées ou adaptables à la compréhension morphologique et hydrodynamique des étangs. Le cadre géographique et le choix des étangs étudiés tient une place importante dans cette première partie et tente de répondre à la difficile question de la définition de l'étang, au regard des spécificités régionales. Si la géographie travaille au cœur de différentes échelles, les différentes méthodologies décrites ensuite pour l'étude des étangs ont été choisies ou conçues pour s'adapter au mieux aux différentes échelles de ce travail. Enfin une partie est réservée à l'apport important que représente la géomatique pour ce travail, comme pour l'ensemble de la géographie actuelle.

I.1. De l'océanographie à la géographie limnologique

Mener un travail sur les étangs amène à se demander quelle science est la plus adéquate pour leur étude. Il est important d'avoir à l'esprit que l'étang est une masse

d'eau et donc se rapprocher des sciences étudiant ces masses d'eau. C'est le cas de l'océanographie pour les mers et océans et de la limnologie pour les eaux continentales¹. L'étude des lacs et celle des océans se sont mutuellement enrichies, par les problématiques et les méthodologies, au cours de leur histoire. La limnologie aurait dû procéder à l'étude des étangs comme elle le fit pour les lacs, mais la quasi absence de travaux complets nous prouve le contraire. Il semble naturel de débiter sur l'évolution de la limnologie et de ses problématiques afin de cerner les orientations et les absences de cette science vieille seulement d'un siècle. Il sera alors possible d'aborder l'étude des méthodes utilisées dans les lacs faisant le plus défaut à la connaissance des étangs, la bathymétrie et l'étude des courants. Ces deux grandes lacunes sont à l'origine des plus importantes ignorances sur lesquelles se construit l'étude actuelle des étangs. La géographie limnologique doit permettre de se jouer des échelles spatiales et temporelles pour transférer et adapter l'étude des grands lacs sur les rives des plus petits étangs.

I.1.1. Epistémologie : évolution des problématiques de la limnologie

En 1892, lorsqu'il publie sa monographie du Léman, le suisse François-Alphonse Forel ne se contente pas de jeter les bases de la limnologie. Certes, l'étude des lacs et notamment celle du Léman a commencé véritablement dès le XVIII^{ème} Siècle², mais l'œuvre de Forel garde une valeur exceptionnelle autant pour l'étude du Léman que pour la limnologie. Dès la préface, Forel explicite le titre de son ouvrage dans lequel le mot limnologie est encore un néologisme : il construit alors le nouveau

¹ Qui par définition englobent les étangs mais nous verrons que la limnologie a surtout étudié les lacs.

² Avec J.-C. Fatio de Duillier et H.B. de Saussure, qui avaient déjà abordé la forme et la nature de la cuvette lacustre ainsi que les variations de niveau du lac. Saussure poussa même très loin l'étude des températures et de la densité de l'eau. (Touchart, 1994, p 17 à 23)

terme en s'appuyant sur l'océanographie, après avoir hésité avec limnographie, terme plus logique mais abandonné de par sa ressemblance avec le limnographe, « appareil marégraphique des lacs » (Forel, 1892. pVI)³. Quelle que soit la terminologie et l'abandon discutable du suffixe « -graphie », Forel situe très clairement son étude : à la lumière de sa célèbre définition de la limnologie « l'océanographie des lacs », et de celle de l'océanographie en « géographie des eaux » (Forel, 1892. pVI), il vient de créer une géographie des lacs⁴. Un simple aperçu de la structure des trois tomes de cet ouvrage embrasse déjà un éventail thématique considérable ; certains thèmes sont évidemment privilégiés, et l'auteur appelle à l'indulgence car il a du « faire de la géographie [...] de la géologie, de la climatologie, de l'hydrographie, de l'hydrologie » sans pouvoir être spécialiste dans ces domaines (Forel, 1892. pX) ; le deuxième tome aborde, lui, physique, chimie, biologie, histoire, navigation, pêche. L'ampleur des thèmes abordés laisse la porte ouverte pour une limnologie globale (Touchart, 1994. p35) et en même temps le gigantisme de ce travail pèse sur la future limnologie.

L'omniprésence du Léman dans la limnologie va se propager en France car le premier limnologue français André Delebecque, contemporain de Forel traitera lui aussi beaucoup de ce lac franco-suisse. Si son ouvrage majeur publié en 1898 aborde un contexte plus large puisqu'il s'intitule « Les lacs français », la première évocation du Lac de Genève apparaît dès la page 2.

L'ouvrage de Delebecque couvre lui aussi de nombreux aspects de l'étude des lacs avec une large partie accordée à la morphologie au sens large : d'une part une description méthodologique minutieuse du procédé de sondage des lacs suivie de 44

³ Nous n'irons ici pas plus loin dans ces considérations terminologiques de l'aube de la limnologie, non par intérêt, mais du fait d'un précédent déjà complet à ce sujet. (cf. Touchart, 2002. p 337 à 344)

⁴ A de nombreuses reprises, Forel fait une apologie de la science géographique dans ses vertus de description, d'explication et de vision globale des phénomènes, et réclame sa monographie de la géographie. (Touchart, 1994. p36)

cartes bathymétriques⁵ en 22 planches hors-texte ; d'autre part un chapitre sur les caractères généraux de la topographie des lacs. N'ayant pu cartographier tous les lacs, Delebecque a réuni dans des tableaux la profondeur et la superficie de 165 lacs français, assortis d'observations portant sur la morphologie de la cuvette. Si cette préoccupation pour la morphologie domine – préoccupation parfaitement légitime car, à mon sens, la forme de la cuvette doit être connue avant d'étudier les phénomènes qui y prennent place – d'autres aspects importants sont traités comme la nature du sol des lacs, l'hydrologie, les températures, la couleur et la transparence, les matières dissoutes, l'origine des lacs et les phases de leur vie. Le seul thème majeur que Delebecque n'aborde pas est la biologie. En 1925 Léon W. Collet, professeur de géologie de l'Université de Genève publie « les lacs » ouvrage faisant la part belle à l'hydrogéologie.

Le caractère forélien des études de limnologie intégrant un nombre considérable de thématiques n'aura pas essaimé très longtemps : dès 1925, August Thienemann, professeur de biologie, réduit la limnologie à la seule hydrobiologie estimant les autres domaines déjà fort bien connus (Touchart, 2002. p337). L'étude des seuls manuels de limnologie depuis lors est extrêmement explicite et montre l'évolution des préoccupations limnologiques. Paul S. Welch, professeur de zoologie à l'Université du Michigan, publie deux ouvrages : l'un intitulé « Limnological methods » en 1948 suivi de « Limnology » en 1952. Si le traité méthodologique traite de nombreux aspects, détaillant en quatre parties la morphologie, la physique, la chimie et la biologie, cela met encore plus en exergue le rétrécissement thématique du manuel de 1952. Dès l'introduction, la limnologie est définie comme « cette branche de la science qui traite de la productivité biologique des eaux continentales et de toutes les influences causales qui la déterminent »(Welch, 1952. p33, en

⁵ Qui étaient alors appelées « cartes hydrographiques » (Delebecque, 1898. p15)

anglais). La suite du manuel est fidèle à cette définition. Une centaine de pages soit un cinquième du manuel suffit à englober tous les aspects géologiques, morphologiques, physiques et chimiques, la chimie représentant près de la moitié de ce cinquième. L'auteur consacre généreusement neuf lignes à la morphométrie pour expliquer qu'il ne s'agit que de procédures de terrain ou de laboratoire : « (la morphométrie) ne sera pas traitée ici » (Welch, 1952. p33, en anglais). Les quatre cents pages restantes sont consacrées à la biologie.

En 1957, un des manuels les plus connus de la limnologie voit le jour, il s'agit du volume premier du « Treatise on limnology » de G. E. Hutchinson, professeur de zoologie à l'Université de Yale. Deux autres volumes verront le jour, l'un dix ans plus tard, l'autre en 1975. Les deux premiers volumes dépassent chacun les mille pages, le troisième en fait près de sept cents ; pour l'auteur « le présent travail est plus long que n'importe lequel de ces prédécesseurs » (Hutchinson, 1957. en anglais). Le premier volume est sous titré « geography, physics and chemistry », présentant largement l'origine des bassins lacustres, une classification thermique des lacs ainsi qu'une large partie concernant la chimie des eaux. Le volume second traite de l'hydrobiologie, le troisième de botanique. Le gigantisme de ces trois volumes permet de voir réapparaître une certaine diversité dans les thèmes étudiés mais le futur ne confirmera pas cette tendance. Dans sa troisième édition de « Fundamentals of limnology » de 1963 F. Ruttner, directeur de la station biologique de Lunz, considère que « la discussion des processus vivants dans les eaux continentales doit être précédée par une considération sur l'environnement » (Ruttner, 1963. p7, en anglais).

Il faut attendre 1966 pour voir apparaître un manuel de limnologie en langue française, ou l'emprise du Léman se fait sentir, de l'aveu même de son auteur Bernard Dussard : « Par inclination personnelle et peut être aussi en hommage à

l'inventeur de la limnologie, F.A.Forel, j'ai cherché dans le Léman un modèle... »(1966. pXXIII) Si la biologie occupe une place importante dans ce manuel, Dussart revient à la définition de Forel, considérant « (qu')on ne peut que très imparfaitement séparer le monde physique et le monde vivant [...] nous garderons à la limnologie son rôle de science des eaux intérieures... » (Dussart,1966. p3). Ainsi Dussart va diviser son manuel en sept parties : l'eau, la chimie des eaux naturelles, le milieu⁶, les organismes, groupements et associations, le biome et l'évolution des masses d'eau.

La limnologie est ainsi devenue synonyme d'hydrobiologie pour nombre d'auteurs et les manuels sont largement dominés par l'aspect biologique comme le « Limnology » de Wetzel (1983), la raison semble apparemment simple puisque ces auteurs étaient pour la plupart biologistes ou zoologistes. Forel avait pourtant imaginé la limnologie comme dominée par une vision géographique, mais force est de constater que bien peu de géographes se sont lancés dans cette voie : ces deux raisons expliquent une modification du sens originel de cette science, à tel point que les ouvrages ne contenant pas ou peu de biologie ne se réclament pas de la limnologie⁷ alors que la réciproque ne s'applique pas. Notons ici quelques exceptions récentes comme l'ouvrage de Horne et Goldman (1983) faisant une large place à la physique des eaux ainsi qu'un recadrage épistémologique, et celui de Pourriot et Meybeck (1995).

Clore cette histoire de l'évolution des problématiques limnologiques va être bien difficile car il me faut aborder les évolutions les plus récentes pour lesquelles le recul historique et le détachement nécessaire à une parfaite objectivité vont me manquer. Si la géographie a manqué à la limnologie autant que la limnologie a

⁶ C'est dans ce chapitre que l'on retrouve les thèmes de « limnologie physique » rappelant le premier tome du Léman de Forel.

⁷ A. Lerman et al., Lakes : chemistry, geology, physics ; Håkanson, Lake morphometry ; Håkanson et Jansson, lake sedimentology ; Timms, lake geomorphology.

manqué aux géographes, un siècle après sa création la limnologie a retrouvé la géographie⁸. « Les lacs, origines et morphologie »(Touchart, 2000), puis « Limnologie Physique et Dynamique »(Touchart, 2002) voient la création – ou la renaissance - d'une géographie limnologique entre recherche fondamentale et appliquée, entre terrain et modélisation, résolument inscrite dans une tradition forélienne par « le premier géographe limnologue français »⁹ Laurent Touchart.

Cette naissante géographie limnologique autorise des études sur les plans d'eau avec une vision nouvelle où la spatialisation – géographie oblige – tient un rôle prépondérant dans la compréhension des phénomènes. Le premier impératif à l'étude d'un plan d'eau est la cartographie de son relief immergé. Nous n'aurons de cesse de répéter ce point si longtemps occulté dans l'étude des étangs. La limnologie avait pourtant construit les débuts de son histoire sur de longues réflexions sur la mesure des profondeurs lacustres.

I.1.2. Le socle de l'étude limnologique : histoires et techniques de la bathymétrie

Le mot bathymétrie apparaît en France en 1863 ; il provient du grec bathus (profond), et signifie stricto sensu : « technique de mesure des profondeurs », et la plupart du temps, par extension « technique de mesure des profondeurs marines ». Sans ce travail, lacs et océans sont des miroirs impénétrables et malgré un intérêt porté depuis l'antiquité, les abysses resteront longtemps insondables se soustrayant ainsi à l'humanité.

Il faut attendre un passé plus récent pour voir un essor de la bathymétrie. Si des mesures de profondeur valides sont prises lors des expéditions du Capitaine

⁸ à moins que ce ne soit l'inverse.

⁹ Vanney, Com. pers., 28 novembre 2001

James C. Ross à bord de l'Erebus et du Terror de 1839 à 1843 dans les eaux de l'Antarctique¹⁰, l'utilisation de longueurs énormes de fils de chanvre lestés ont occasionné de lourdes erreurs. Le même James C. Ross fut le découvreur d'une fosse éponyme imaginaire dans la mer de Weddell, ses 7 kilomètres de câble n'ayant pas permis d'atteindre le fond (Vanney, 1993, p152). Le passage au fil métallique ne changea pas vraiment la donne, et une course aux plus grandes profondeurs fut menée par les américains et les britanniques¹¹.

L'expédition qui va marquer l'océanographie toute entière est celle du H.M.S. Challenger, de 1872 à 1876 (Arx, 1962) qui traversa les trois océans, effectuant de nombreux sondages et prélèvements. Commandée par Sir Wiville Thomson, cette campagne « reste encore aujourd'hui la plus considérable expédition océanographique jamais organisée¹² » (Dietrich, 1963. p5, en anglais).

Constatons que la bathymétrie n'était alors pas une science réservée à l'océanographie : les deux grands naturalistes du Léman, J.-C. Fatio de Duillier et H.B. de Saussure, eurent au XVIIIème siècle la préoccupation de sonder les profondeurs du lac. Les évolutions techniques et les découvertes de l'océanographie et de la limnologie vont alors s'influencer mutuellement. La pratique de la bathymétrie a considérablement évolué en se fondant sur les progrès scientifiques et techniques. Toutefois elle se résume toujours à deux opérations, la mesure de la profondeur à un point donné et la localisation de ce point dans l'espace : la bathymétrie est une affaire tridimensionnelle.

¹⁰ réalisant le premier sondage profond à 4435 mètres, confirmé par la suite (Dietrich, 1963. p5)

¹¹ 1849 : Walsh (lieutenant américain) dépasse les 10 000 mètres dans l'atlantique ; 1852 : Denham (capitaine de la Royal Navy) annonce 14 020 mètres ; Houghton (révérend anglais) poussera le chiffre à 17 700 mètre. (Vanney, 1993, p153)

¹² Si l'expédition du Challenger est celle qui est entrée dans la légende, il faut noter ici que l'expédition du H.M.S. Porcupine avait préparé le terrain et que celle du S.M.S. Gazelle (1874-1876) fut complémentaire. (Vanney, 1993, pp 222-227)

Deux méthodes de mesure de la profondeur existent : la mesure ponctuelle et la mesure en continu ; cette dernière peut être détaillée en continu linéaire et continu surfacique. La méthode de localisation du point sondé est la plupart du temps indépendante de la technique de mesure de la profondeur et des « assemblages » divers sont possibles.

I.1.2.1. La mesure ponctuelle de la profondeur

Des méthodes millénaires constituent les prémices de la bathymétrie, les itinéraires fluviaux étaient sondés par les égyptiens, déjà 3000 ans avant notre ère. Il est très difficile d'estimer le savoir réel sur les profondeurs tant peu de textes sont parvenus jusqu'à nous. Les méthodes de sondage ponctuel vont être les seules possibles jusqu'à une période très récente. La mesure peut être effectuée soit à l'aide d'une perche pour les profondeurs les plus faibles, ou d'un câble lesté plus couramment appelée ligne de sonde pour des sondages plus profonds.

L'utilisation de ligne de sonde pour le sondage des lacs est décrite dans quelques ouvrages et certains points méthodologiques méritent d'être mis en lumière. La première question est celle de la nature même du câble : l'utilisation de corde ou celle de fils d'acier. Le père de la limnologie, François-Alphonse Forel, avait une nette inclination pour une ligne de chanvre ou de lin de 3 à 5 mm de diamètre « bien tordue » (1892. p4) qu'il utilisait pour certains de ses travaux, mais lorsqu'il s'agit de sondage bathymétrique proprement dit, son aversion pour l'inconfort d'utilisation des fils métalliques s'efface devant la précision apportée.

Le principe des appareils de sondages utilisés alors est le même pour la plupart des modèles, les différences portent sur la taille et l'encombrement du matériel et non sur son fonctionnement. Le fil de sondage supporte à son extrémité

un plomb de sonde que Delebecque préconise sphérique. Le câble est enroulé sur un tambour puis passe dans un système de poulies dont l'une est reliée à un compteur permettant de lire l'enfoncement du plomb dans les profondeurs a condition que « comme cela doit se passer dans les appareils bien construits, le mouvement relatif de la poulie (soit) un roulement sans glissement » (Delebecque, 1898. p15).

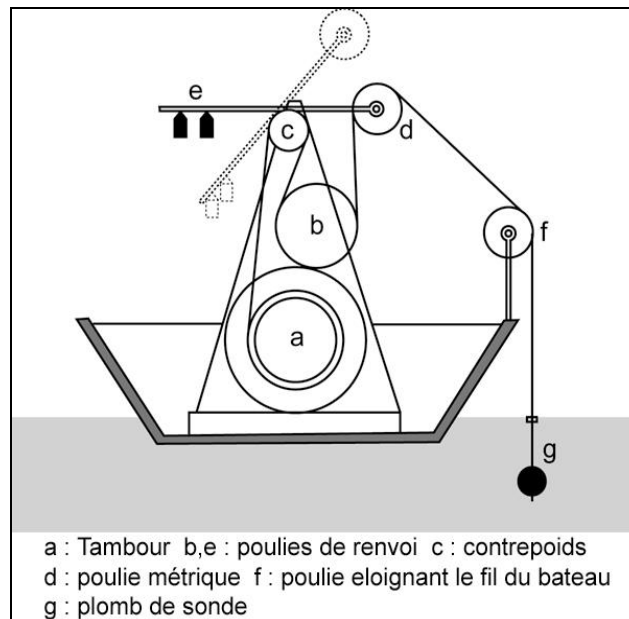


Figure 1 : Coupe schématique d'un appareil de sondage. d'après Delebecque, modifié

Le contact du plomb avec le fond entraîne le déclenchement d'un frein sur le tambour matérialisé sur la figure 1 par le système de levier e-d. A partir de ce principe de base il existe de nombreux sondeurs. Delebecque fit réaliser un exemplaire du sondeur portatif à fil d'acier mis au point par Belloc en 1891 dont le poids total ne dépassait pas 20 kg¹³ ce qui présentait un avantage certain par rapport

¹³ « Ceux qui se livrent à des travaux scientifiques dans les montagnes savent combien il est urgent de réduire au strict nécessaire le poids et le volume des appareils » (Belloc, 1891)

au sondeur du bureau topographique de Lausanne utilisé par Hörnlmann qui devait, lui, être manipulé par quatre hommes¹⁴ (fig. 2).

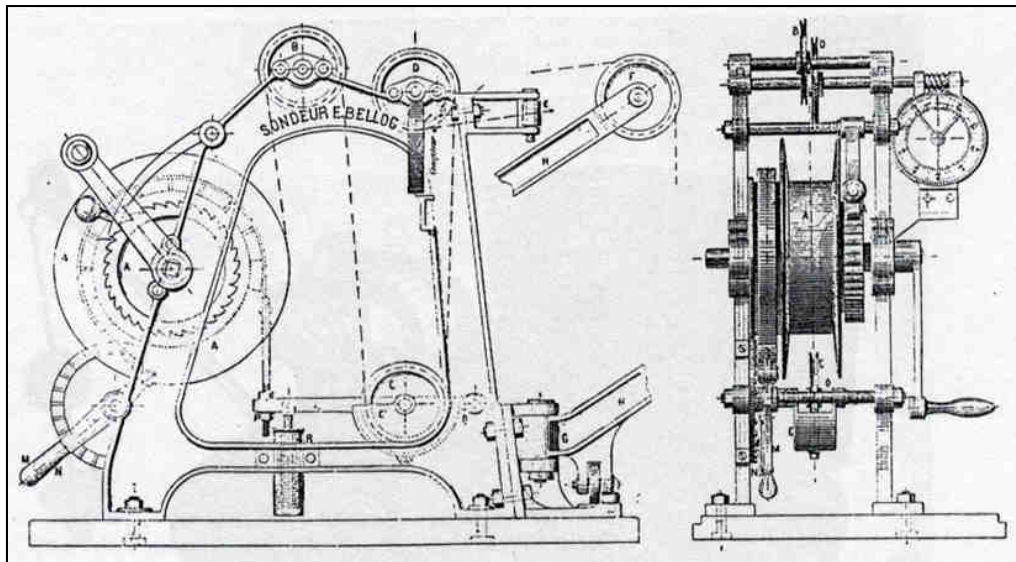


Figure 2 : Sondeur Belloc. d'après Delebecque

Pour les lacs plus difficilement accessibles, Delebecque utilise un sondeur ne pesant que 4 à 5 kilos qu'il aurait réalisé en simplifiant le sondeur Belloc¹⁵.

Si l'ouvrage de Sir John Murray et Laurence Pullar paraît en 1910, dès 1895 le matériel leur est nécessaire pour la réalisation des sondages. L'acquisition peu satisfaisante d'un sondeur au sixième congrès géographique de Londres en 1895 et le manque de matériel de ce type¹⁶, pousse Fred. P. Pullar à réaliser un sondeur appelé dès lors « F. P. Pullar sounding-machine ».

¹⁴ Le sondeur dessiné par l'ingénieur Haller de Berne est manipulable en lui-même par un seul homme, mais le poids de cette machine en fonte oblige la barque qui la porte à être mue par quatre rameurs.

¹⁵ A moins qu'il n'ait repris le sondeur léger de 4 kilos que Belloc utilisait dans les Pyrénées et qui existait déjà avant le sondeur décrit figure 2 puisque c'est ce dernier qui sert de base : « Cette petite machine, pesant moins de 4 kg ,..., m'a servi de modèle pour combiner un nouvel appareil [...] plus robuste et approprié aux recherches sous-marines »

¹⁶ Il est à noter que Murray et Pullar connaissent particulièrement bien les travaux de leurs contemporains comme en atteste une bibliographie de limnologie générale de plus de 2300 titres en principalement trois langues (anglais, français et allemand), réunie par J. Chumley, membre de l'Institut International de Bibliographie.

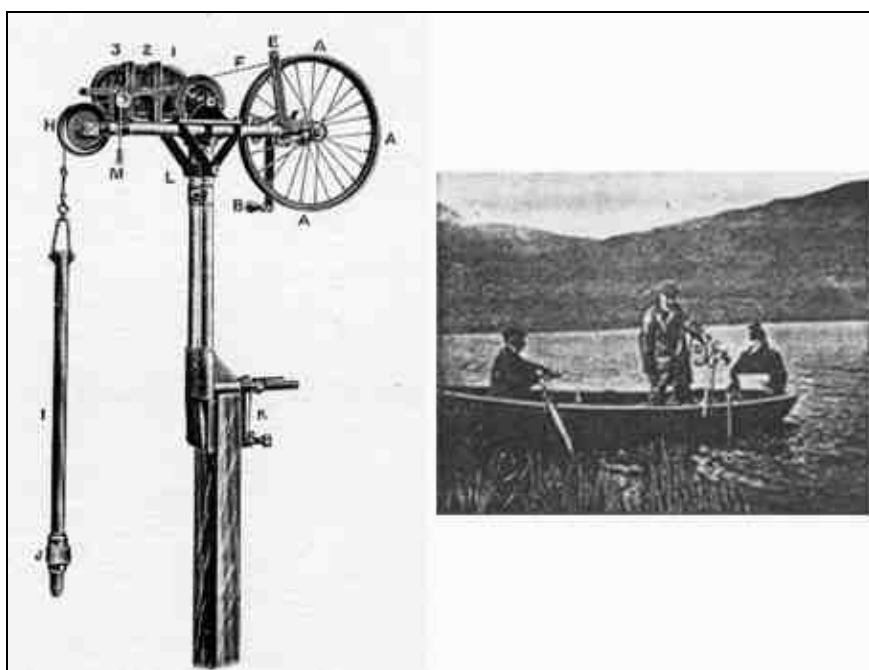


Figure 3/Photo 1 : Le sondeur Pullar et son utilisation. d'après Murray et Pullar – Photo Lady Murray.

Ce sondeur est composé de tubes en acier (fig. 3), et comprend les mêmes principes de fonctionnement que les autres sondeurs, mais on peut remarquer sur la photo 1 « que cet appareil est particulièrement réduit, ce qui en faisait un outil facile à transporter et à utiliser depuis une petite embarcation. La présence d'un plomb de sonde tubulaire et non sphérique est à observer ; cela lui permet d'être équipé d'un système de prélèvement de sédiment équipé d'une valve. » (Murray et Pullar, 1910, p12, traduction)

Tous ces appareils de sondage effectuent automatiquement un graissage du fil de sonde pour que celui-ci ne rouille pas. Les dimensions de ce dernier varient : les plus gros sondeurs emportent des longueurs de câble « océanographiques » qui ne sont pas forcément adaptées à l'étude limnologique. Le sondeur simplifié par Delebecque « peut porter plusieurs centaines de mètres de fil » (Delebecque, 1898, p17) et la « Pullar sounding machine » embarque « 1000 pieds de fil d'acier galvanisé trois brins »(Murray & Pullar, 1910. p 12, traduction).

Après la mesure de la profondeur se pose la question de la localisation du point sondé, sans laquelle il serait impossible de dresser la carte bathymétrique. Cette manœuvre est la plus délicate pour les résultats des sondages dans cette vaste période des relevés bathymétriques à la ligne de sonde. Les méthodes conventionnelles comme l'utilisation d'un sextant, la localisation de chaque point depuis la rive ou la pose de lignes d'eau engendrent une perte de temps considérable. La méthode se fonde sur la réalisation de transects les plus rectilignes possibles en intercalant des coups de sondes à intervalles réguliers déterminés par le nombre de coups de rame¹⁷. Dans le cas des bathymétries réalisées par les équipes d'Hörnlimann et Delebecque, un ingénieur resté à terre contrôle en permanence à l'aide d'une alidade la rectitude du transect et peut à tout moment le faire rectifier à l'aide d'un jeu de signaux convenus.

I.1.2.2. La mesure « continue linéaire » de la profondeur

Le sondage par ligne de sonde va céder la place à celui par écho avec comme premier émetteur l'impact d'une balle de fusil sur la surface de l'eau, ou le bruit d'un marteau contre la coque d'un navire. L'onde sonore était captée après réverbération par un hydrophone (microphone sous-marin) pour être amplifiée et enregistrée¹⁸. La connaissance de la vitesse de propagation du son dans l'eau¹⁹ permet de la transcrire en valeur de profondeur.

L'essor du sondage par écho avec l'apparition du sondage continu par ultrasons découle des travaux de Pierre et Jacques Curie sur la piézoélectricité du

¹⁷ Murray & Pullar, 1910, p14.

¹⁸ Capart, 1955, p1076

¹⁹ Environ 1500 mètres par seconde

quartz et ceux de Langevin sur la magnétostriction²⁰. Ces phénomènes physiques, tous deux réversibles, assurent la traduction d'énergie acoustique en énergie électrique et vice versa. L'émetteur de l'onde, appelé transducteur, émet une onde brève et puissante dans une direction précise.

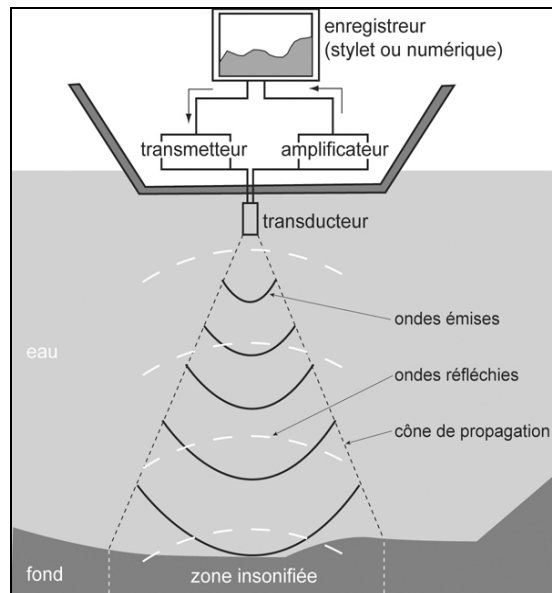


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un échosondeur

Le principe de base de tout échosondeur est présenté par la figure 4 ; la réflexion des ondes émises se produit à chaque changement de densité entre les différents milieux traversés²¹. Les échos seront différents et plus ou moins nets en fonction de ces différences de densité : l'impact des ondes sur la roche sera beaucoup plus nette que sur de la vase. L'observation de cet état de fait a très rapidement étendu la compétence de l'échosondeur de la simple mesure de la profondeur à l'identification de la nature du fond, voire même actuellement jusqu'à l'identification de différentes strates de sédiments du fond.

²⁰ l'excitation par un champ magnétique d'une pile de lames de nickel provoque une vibration mécanique de fréquence proportionnelle au diamètre du cylindre mécanique (Capart, 1955)

²¹ Capart, 1955, p1079.

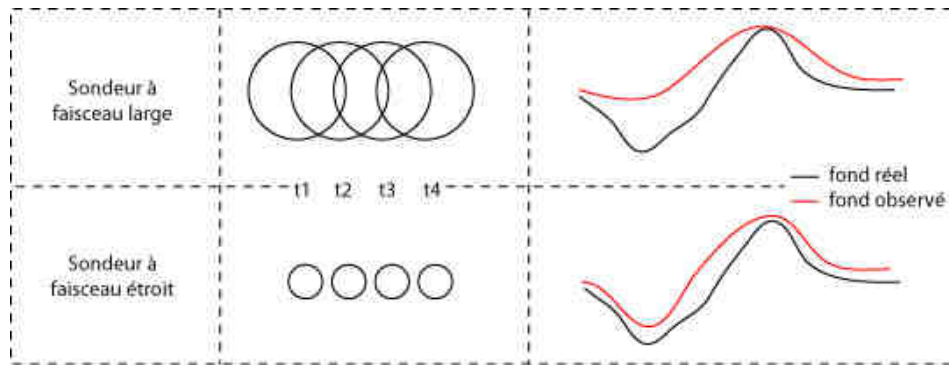


Figure 5 : Impact de la largeur du faisceau sur l'observation du fond (d'après Berquez 2000, modifié)

Les ondes se propageant sous la forme d'un cône, la largeur de la zone insonifiée est proportionnelle à l'angle d'ouverture du faisceau et à la profondeur. Il existe des échosondeurs à pinceau large et à pinceau étroit : la largeur du cône émis par le transducteur a des répercussions sur la précision de la mesure. Les sondeurs à faisceau large (10-15° d'ouverture) obtiennent moins de détails que ceux à pinceau étroit (3-7° d'ouverture). Du fait de la propagation de l'onde sous forme de cône, donc à l'insonification d'une zone circulaire, la marge d'erreur des échosondeurs augmente avec la profondeur et la pente²² : on voit ici l'avantage du pinceau étroit.

L'enregistrement du profil se fait dans un premier temps sur des bandes de papier passées au noir de fumée, puis par la brûlure d'une étincelle ou le passage d'un courant sur papier électrolytique. Etant données les différences de vitesse de déplacement du son dans l'eau dues à la salinité ou à la température de l'eau, l'échosondeur est un instrument qui doit être étalonné régulièrement.

Si l'emploi d'échosondeurs a révolutionné la mesure de la profondeur en rendant la mesure plus rapide et continue, le problème de la localisation du sondage n'en était pas résolu pour autant, du moins pas encore. L'échosondeur fonctionnant en continu, il réclame un cap constant et une vitesse régulière pour que l'échogramme résultant du sondage soit valide. Avec ces impératifs, la méthode du « flying start » est la plus

²² Berquez, 2000, p14 ; Berthois et Froidefond, 1983, p11.

couramment utilisée : le pilote du navire suit des transects préétablis dont les extrémités sont communes et vire d'un transect à l'autre sans s'arrêter. Un opérateur note sur l'échogramme les débuts et fins de transects rectilignes pour déduire les virages lors de la construction de la carte bathymétrique²³. Les extrémités des transects sont replacées à l'aide de mesures faites au théodolite.

La problématique de la localisation du point sondé va rester plus présente en océanographie et de multiples méthodes géométriques vont être utilisées²⁴. L'apparition du positionnement par satellite par le biais des satellites transit tout d'abord puis l'apparition des systèmes de navigation par satellite (G.N.S.S.²⁵) va permettre une localisation plus rapide et plus précise.

Le système G.P.S.²⁶ lance son premier satellite en 1978 puis neuf autres le suivront, portant à dix la constellation en 1985. Entre 1989 et 1994 le deuxième bloc est lancé portant le nombre à 24 et rendant le système totalement opérationnel. En 2002, on dénombre 28 satellites mais les premiers étant limités dans leurs fonctions, le programme 2002-2006 prévoit l'envoi de 16 satellites supplémentaires. Le principal inconvénient du système G.P.S. s'appelle « validité sélective »²⁷ à savoir la dégradation du système par le Département de la Défense des Etats Unis. Cette dégradation fut levée le 2 mai 2000 mais elle peut être réactivée à tout moment par le Département de la Défense des Etats Unis²⁸. Basée au départ sur une technologie à

²³ Hakanson, 1981, p 6-8.

²⁴ Comme la méthode des cercles hydrographiques, ou celle des pilotes (Betand et Perrenoud, 1983, pp 7-10). Notons aussi la localisation par radiogoniométrie et le radio-guidage hyperbolique. L'association internationale de signalisation maritime fait adopter en 1980 un système normalisé.

²⁵ Global Navigation Satellite System

²⁶ Global Positioning System

²⁷ Selective Availability (S.A.) Tiberius & Jong (2002)

²⁸ La guerre en Irak en 2003 a occasionné une dégradation du signal pendant le travail de terrain de cette thèse. Les nouveaux systèmes régionaux de perturbation du signal évitent un brouillage complet

simple fréquence, le système s'est perfectionné pour donner l'accès de la double fréquence aux applications civiles, permettant des précisions d'ordre centimétrique.

En 1982, le premier satellite du projet GLONASS²⁹ ouvre le programme soviétique concurrent du système G.P.S. Le programme souffrit de la situation politique, et les envois de satellites subirent des décalages temporels parfois importants. En 1999, un décret place le système GLONASS sous la direction du ministère de la Défense de la Fédération de Russie (MORF) et de l'agence russe de l'espace (Miller, 2000). Depuis 1982, 76 satellites ont été placés en orbite avec une durée de vie moyenne de trois ans en 2000 ; une agence indépendante d'observation allemande ne donnait plus que 10 satellites fonctionnels en 2000 (Miller, 2000).

Actuellement l'Europe est soumise au système G.P.S. ce qui représente deux inconvénients : tout d'abord la dégradation possible précitée du signal, mais aussi le nombre d'applications économiques dérivées du positionnement par satellite. Ces deux raisons sont à l'origine du projet de l'Union Européenne appelé Galileo, théoriquement opérationnel en 2010.

I.1.2.3. La mesure « continue surfacique » acoustique de la profondeur

Inventé en 1958 par Chesterman, Clynick et Stride, le sonar latéral permet une visualisation plus étendue du fond que le simple échosondeur. Il s'agit d'un transducteur remorqué dans un fuselage appelé poisson. Le faisceau d'ultrasons émis latéralement au poisson percute le fond obliquement ; l'opération est répétée sur des bandes de terrain plus éloignées. Ce système permet de balayer une surface

mais la résolution au niveau mondial en est tout de même altérée (doublement de la marge d'erreur pour la période en question).

²⁹ GLObalnaïa NAVigatsionnaïa Spoutnikovaïa Sistema (Système global de navigation satellitaire) Le premier satellite était Kosmos 1413.

sans orienter le poisson, l'avancée régulière du navire va permettre de reconstituer la surface du fond à partir des mesures.

Les sondeurs multifaisceaux sont capables d'effectuer des mesures simultanées de la profondeur suivant une direction perpendiculaire à l'axe du navire grâce à la formation d'une série de faisceaux étroits. En effet, à l'émission, un volume très étroit dans l'axe du navire, mais très ouvert transversalement est insonifié. A la réception, au contraire, une forte directivité en site est assurée par une série d'hydrophones juxtaposés. La composition des figures d'émission, et de réception fournit des sondes élémentaires s'appuyant sur des parcelles du fond de faible surface. Le bateau se déplaçant, l'ensemble de ces parcelles couvre complètement une bande du fond dont la largeur est fonction de l'inclinaison des faisceaux extrêmes et de la profondeur.

Ainsi, ils réalisent une synthèse des avantages des sondeurs à faisceau large d'une part, qui assurent une couverture importante au détriment de la précision et des sondeurs à faisceau étroit d'autre part, dont la finesse et la précision sont obtenues en limitant la zone insonifiée. A titre d'illustration, les instruments les plus récents permettent d'acquérir simultanément plus de cent sondes couvrant en un seul profil jusqu'à sept fois la profondeur. Il est alors possible de parler de sondage continu surfacique et d'envisager des levers exhaustifs.

I.1.2.4. La mesure « continue surfacique » optique de la profondeur

Les méthodes optiques de mesure de la profondeur sont plus récentes ; on peut différencier des méthodes passives ou actives.

Le système LIDAR (light detection and ranging) fonctionne à l'identique d'un système acoustique mais avec la radiation électromagnétique comme messenger. Une

courte impulsion laser est envoyée depuis une plate forme aéroportée : une partie de l'énergie est reflétée par la surface de l'eau, l'autre par le fond. La différence entre les deux signaux permet de déduire la profondeur. Les résultats de cette méthode sont comparables avec des sondages acoustiques (Cassidy in Stuffle, 1996), l'intérêt réside dans la vitesse d'exécution de la bathymétrie ainsi que dans l'accès à des zones difficiles pour des embarcations, que ce soit en milieu lacustre ou marin.

La télédétection satellitale offre la possibilité de cartographier les littoraux ou les zones à forte transparence. Les satellites fournissant des données adaptées sont principalement LANDSAT, CZCS (Coastal Color Zone Scanner) et Spot. Dès 1978, Lyzenga met en évidence les paramètres permettant d'utiliser des images LANDSAT³⁰ pour la mesure, la profondeur et l'identification de la nature du fond. L'application d'un modèle aux longueurs d'ondes, prenant en compte la radiation solaire, la diffusion atmosphérique et la réflexion de l'eau comme constantes est nécessaire.

La bathymétrie est la discipline majeure sur laquelle repose l'étude d'un lac, ou d'un étang. Cette première étape, souvent négligée, permet pourtant la cartographie de la morphologie du plan d'eau. Nous allons montrer plus loin à quel point la morphologie d'un plan d'eau est riche d'enseignements sur sa genèse mais aussi sur son fonctionnement et son devenir. Etudier l'évolution de la bathymétrie était donc nécessaire avant d'aller plus loin. En outre la morphologie est un des aspects souvent peu pris en compte lors de l'étude des mouvements de l'eau. La morphologie influence pourtant directement l'hydrodynamique au sens large, hydrodynamique qui n'est même jamais évoquée au sujet des étangs, considérés comme des masses d'eau homogènes. Un des enjeux de notre troisième partie est la

³⁰ Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, 1978

vérification ou l'infirmité de cette hypothèse, et pour cette raison nous allons maintenant aborder la place que la limnologie a accordée à l'étude des courants.

I.1.3. Des filets dérivants aux modélisations

Quel que soit le domaine étudié – morphologie, thermique, sédimentologie, biologie – le limnologue s'intéresse nécessairement aux courants dont l'étude semble être le point de convergence de bon nombre de questions. Forel, en jetant les bases de la limnologie, aborde déjà les courants dans le sens horizontal et vertical, lorsqu'il qualifie la bataillière, à l'embouchure du Rhône dans le Léman : « [...] comment les eaux du fleuve d'été, entraînées par l'impétuosité du courant, s'avancent dans le domaine du lac à quelques cents mètres de distance, puis, sous l'influence de la pesanteur, par le fait de leur densité plus lourde, plongent tout à coup sous les eaux bleues du lac. » (1892. p386)

Les premières observations des courants ont été effectuées d'après des débris flottants ou des filets de pêche. Bétand et Perrenoud, dans un article paru en 1932, mettent en place une typologie des courants sur le lac Léman basée sur l'observation de filets dérivants. Bien avant eux, en 1905, Vagn Walfrid EKMAN physicien et océanographe suédois, publiait un article « on the influence of the earth's rotation on ocean currents ». Basé sur une observation effectuée par l'explorateur Nansen, cet article va donner naissance à la théorie de la « spirale d'Ekman » rapportée par Dussart : « Un vent soufflant sur une masse d'eau homogène et de profondeur infinie produit à sa surface un courant qui, selon la théorie d'Ekman est déviée par la force de Coriolis vers la droite dans l'hémisphère nord d'un angle de 45°. Cette déviation s'accroît avec la profondeur en même temps que la vitesse du courant selon une loi exponentielle. » (1953. p50)

Ces deux exemples montrent l'importance des méthodes dites « Lagrangiennes » c'est-à-dire suivant le courant depuis un objet dérivant en son sein. Ces techniques de suivi dynamique des courants sont nombreuses et beaucoup utilisées du fait de la simplicité de leur mise en œuvre. Le travail effectué lors des campagnes menées conjointement par l'Université du Michigan et le Département des terres et forêts de l'Ontario sur le lac Huron sont à ce titre exemplaires (Ayers et al., 1956). Lors de trois campagnes furent lancées 1641 bouteilles dérivantes. Ce type de mesures entraîne toutefois de forts taux de pertes puisque seulement 168 furent retrouvées, et ne se base que sur les points de départ et d'arrivée pour déterminer les courants. En outre, ce procédé ne détermine que les courants de surface. Pour des courants plus profonds ont rapidement été mis en place des procédés ou une dérive en profondeur entraînait le flotteur de surface. Bétand et Perrenoud (1932) utilisaient une planchette reliée par un câble à une bombonne descendue à la profondeur choisie. Une bouteille placée sur la planchette répandait un mélange d'huile et de fluoréscéine afin de suivre la trace du déplacement. (photo 2)



Photo 2 : Flotteur de fond laissant une trace d'huile sur le Léman –
Bétand et Perrenoud, 1932

Ces méthodes ont progressé par des travaux sur la forme de l'objet immergé. Sur le Baïkal fut utilisée une voile sous lacustre permettant la mesure des courants jusqu'à 50 mètres³¹.

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux programmes internationaux d'étude des courants océaniques ont adopté une bouée dérivante particulière. Le programme WOCE/TOGA³² a vu la mise en place d'un système appelé Global Lagrangian Drifter³³. Ce système est constitué d'une bouée de surface contenant une antenne Argos et des capteurs, une sphère de subsurface et enfin une dérive appelée « holey-sock drogue³⁴ ». Ce système s'est largement répandu depuis sa création.

En parallèle à ces méthodes dynamiques se sont développées des méthodes dites statiques ou « eulériennes ». La plus simple de ces méthodes est décrite par Welch, en 1948 : il s'agit du tube de pitot. Ce tube est recourbé à 90° et un petit côté est positionné à l'horizontale dans l'eau : en présence de courant le niveau monte dans le tube au-dessus de la surface du lac. Une formule permet alors de calculer la vitesse du courant. Les méthodes statiques les plus employées sont les courantomètres. Il existe de nombreux principes qui se sont perfectionnés avec le temps. Les premiers moulinets mécaniques (photo 3), à l'image de celui d'Ekman,

³¹ Touchart, 2002, p 73-74.

³² World Ocean Circulation Experiment / Tropical Oceans and Global Atmosphere

³³ Sybrandy & Niiler, 1991.

³⁴ Littéralement « dérive en forme de chaussette percée »

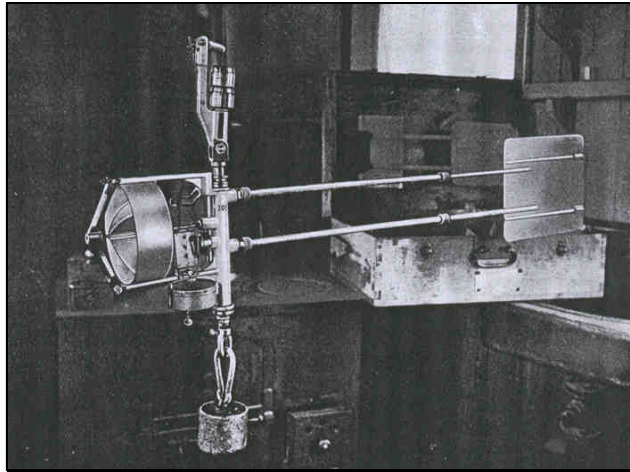


Photo 3 : Courantomètre mécanique (*Strommesser*) –
Bétand et Perrenoud, 1932

devaient être immergés à la profondeur de la mesure puis remonté. En effet la mesure de la vitesse du courant comme celle de sa direction sont enregistrées par un compteur mécanique à billes³⁵. Plus récemment, les modes de fonctionnement des courantomètres sont devenus plus nombreux et plus précis. On a recours à des courantomètres profileurs Doppler³⁶ susceptibles, en étant placés au fond de l'eau, de mesurer les courants dans un nombre déterminé de couches d'eau.

La grande majorité des manuels de limnologie parus depuis les années 50 consacrent un large chapitre nommé le plus souvent « water movement » traitant des vagues et courants, (Lerman, 1978 ; Goldman & Horne, 1983 ; Wetzel, 1983 ; Hutchinson, 1957 ; Ruttner, 1963) mais en dépit des avancées techniques majeures dans le matériel de terrain, il faut remarquer leur aspect souvent très théorique. L'étude des courant devient majoritairement une affaire de mathématiciens et de modélisateurs. Il n'est pas rare de rencontrer des modèles courantologiques s'appuyant uniquement sur des mesures climatiques, sans la moindre mesure in situ, ni avant, ni destinée à valider le modèle³⁷. Etant donné la complexité de mesurer tous

³⁵ Touchart, 2002, p68-69

³⁶ Anderaa Recording Doppler current profiler

³⁷ Thunus et al., 1994

les courants d'un lac à un instant t , le recours à la modélisation permet de simuler les manques des mesures ; il serait par contre regrettable que la simulation se substitue à la mesure. Comment dans ce cas travailler sur les courants en étang à une échelle radicalement différente des grands lacs, et où aucune donnée n'a encore été mesurée ?

I.1.4. Du concept de limnosystème au Plan d'Eau de Recherche Expérimental. : le souci de placer le plan d'eau au centre de la démarche

I.1.4.1. Du terme système...

Les mots composés avec le suffixe *-système*, bien qu'ils soient à l'heure actuelle couramment usités, sont à manier avec prudence. Le mot de géosystème, par exemple, peut revêtir différentes définitions selon à quelle école de pensée l'on se réfère. En outre, ces mots n'existent pas dans un dictionnaire de la langue française ce qui rend leur définition plus aléatoire encore. Ils recouvrent pourtant des concepts fondamentaux et le français étant une langue vivante il serait absurde de se priver de leur utilisation. Dès lors que l'on choisit leur emploi, il faut savoir définir avec précision chacun de ces termes et ne pas partir du principe que le lecteur les entendra dans les acceptions qui sont les nôtres.

Signifiant étymologiquement « assemblage, composition » (du grec *sustêma*) le terme système décrit un « ensemble conçu par l'esprit, à titre d'hypothèse, de croyance, d'objets de pensée unis par une loi³⁸ ». La signification employée en géographie correspond à un ensemble organisé d'éléments et d'interactions entre les

³⁸ Définition du Grand Robert de la langue française, 2001.

éléments³⁹. Le concept a été développé par les géographes russes et introduit en France par Georges Bertrand en 1968. Quelle que soit sa définition, il ne faut en outre jamais perdre de vue que le système reste une construction intellectuelle.

I.1.4.2. ...au limnosystème...

Le concept de limnosystème renvoie le plus souvent au lac et à son bassin d'alimentation (Giannini, 1986) mais cette vision, sans pour autant être fausse, peut être considérée comme restrictive ou à l'inverse trop large. La conceptualisation du limnosystème doit se fonder sur une connaissance approfondie du terrain afin de cerner correctement les interrelations entre le plan d'eau et son environnement. Il faut donc envisager l'amont, le plan d'eau mais aussi son aval, souvent négligé alors qu'il subit l'influence de l'étang ou du lac. Il est là aussi nécessaire de se pencher sur l'étymologie afin de ne pas commettre d'erreur : *limnê* en grec désigne une eau stagnante, l'étang, le lac ; le limnosystème va donc être centré sur le plan d'eau lui-même et son environnement direct. « Le limnosystème est un espace d'interrelations entre le volume d'eau, la biomasse, le sédiment et la couche-limite atmosphérique » (Touchart et al., 2002). La géographie limnologique place le plan d'eau au centre de la démarche, mais sans jamais exclure ni son amont, ni son aval. Autour du limnosystème se situe son espace géographique d'échanges, qui intègre des paramètres fluviaux, atmosphériques, hydrogéologiques et biogéographiques délimitant des zones d'influences réciproques amont et aval. L'ensemble d'interrelations entre le limnosystème et son espace géographique d'échanges est le géolimnosystème (Touchart et al., 2002).

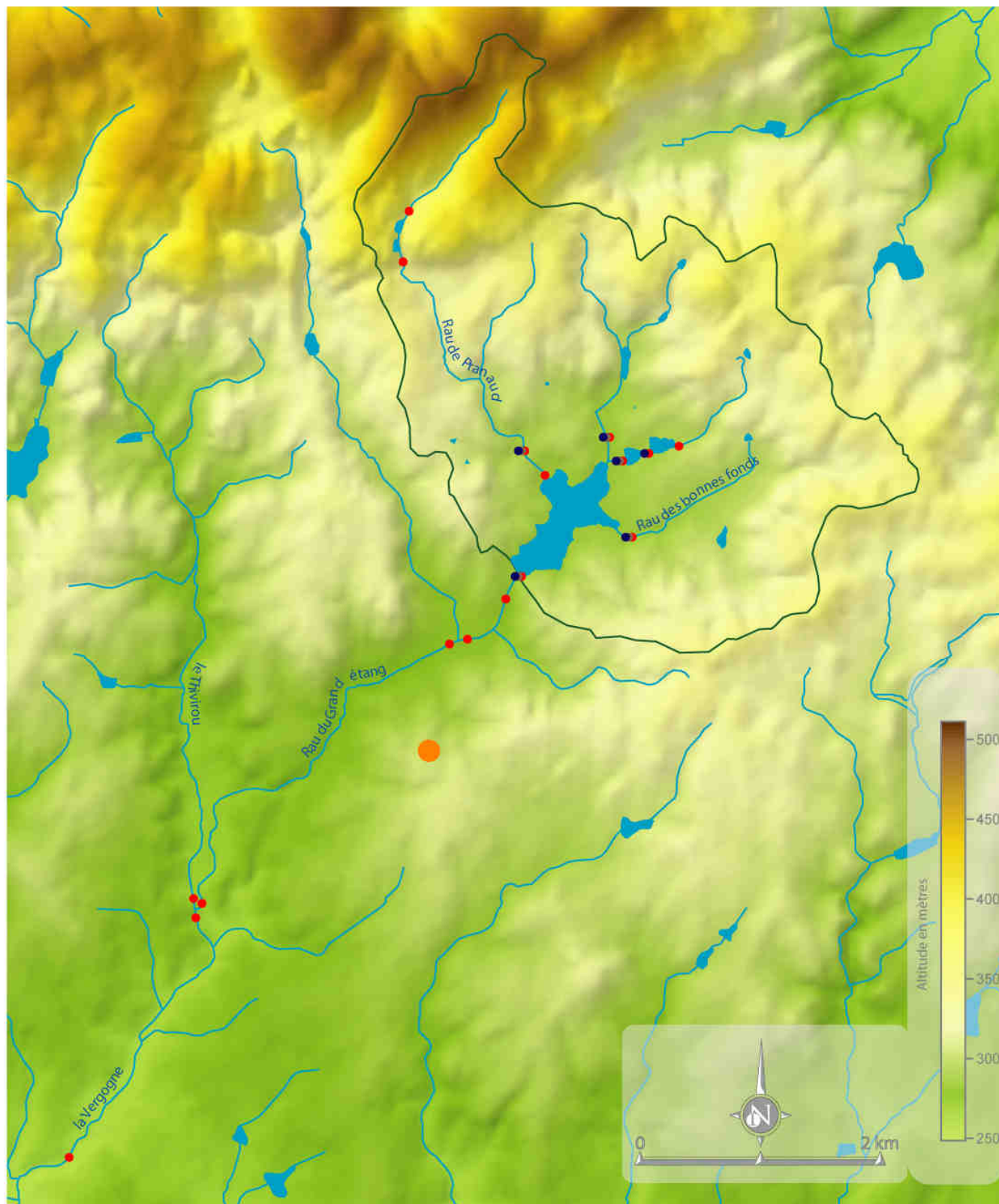
³⁹ Brunet (1993) les mots de la géographie

I.1.4.3. ...et à la réalité du terrain.








Les concepts précités n'ont de réel intérêt que lorsqu'ils permettent une avancée dans la compréhension des processus. La géographie limnologique veut ne jamais être statique : les concepts sont issus de la pratique du terrain et leur formalisation en système est orientée dans le but d'optimiser l'étude de terrain ou de passer à l'étape de la gestion. Grâce à un travail d'équipe, il a été possible de mettre en place un Plan d'Eau de Recherche Expérimental⁴⁰, instrumentation multi-paramètres du géolimnosystème de l'étang de Cieux (Fig. 6). Certains paramètres sont étudiés en continu (température de l'eau, paramètres météorologiques), alors que d'autres font l'objet de campagnes ponctuelles (mesure des débits, des matières en suspension). Cette organisation permet une étude aussi complète que possible de l'étang de Cieux, comprenant des paramètres hydrologiques (débits des affluents et de l'émissaire, contrôle du niveau de l'étang), physico-chimiques (température des affluents, de l'émissaire et de l'étang à diverses profondeurs, transparence, oxygène, pH, nitrates, phosphates), géomorphologiques (bathymétrie, étude des volumes sédimentaires), hydrodynamiques (courants de dérive, de densité, seiches internes) biogéographiques (chlorophylle *a*, phytoplancton, zooplancton, macrophytes, végétation rivulaire) et climatologiques (station météorologique, bac évaporatoire). Il a été possible de dresser deux bilans inédits à partir de ces travaux : un bilan hydrologique et un bilan thermique de l'étang de Cieux. Il faut noter que ce type de bilan est rarissime, à l'exception de travaux sur de très grands lacs. Si la présente étude ne traite pas de la totalité de ces paramètres, il était opportun de mentionner ici l'impérieuse nécessité du travail en équipe et l'imbrication de cette thèse dans une

⁴⁰ Il sera nommé P.E.R.E. par la suite dans ce travail.

Figure 6 :
Équipement du Plan d'Eau de Recherche Expérimental de Cieux



Conception & Réalisation : M. Carlini - 2005
Université de Limoges

-  Cours d'eau
-  Etang
-  Limite du bassin d'alimentation de l'étang de Cieux
-  Thermomètre subaquatique
-  Echelle limnimétrique
-  Mesure M.E.S.
-  Station météorologique

problématique limnologique plus large de compréhension globale et de gestion intégrée des milieux aquatiques.

I.1.5. La nécessité actuelle de résultats appliqués

L'eau est indéniablement un des enjeux majeur de ce XXIème siècle naissant ; des conflits d'usage, des questions de qualité se posent à toutes les échelles sur la planète. Le Limousin est le pays de l'arbre et de l'eau et cette appellation n'est en rien usurpée si l'on considère les quelques 22000 étangs⁴¹ qui émaillent le paysage lorsque l'on survole cette région. De la bonne gestion de tous ces plans d'eau dépend la préservation des ressources en eau du Limousin contenues majoritairement dans les lacs et étangs et non dans les rivières. Ce constat a pu être établi pour le P.E.R.E. de Cieux ou il a été possible d'estimer la quantité totale d'eau contenue dans tous les étangs et tous les cours d'eau du bassin. Ce calcul a pu être mis en place à partir des bathymétries des étangs du bassin ainsi que les moyennes annuelles des débits des 16 kilomètres de cours d'eau⁴². Cet exercice nous montre que le volume de tous les cours d'eau correspond à 15 000 m³ alors que le volume contenu dans l'ensemble des étangs représente 750 000 m³ soit 50 fois plus. Il serait abusif d'étendre ce chiffre à l'ensemble du Limousin, néanmoins il reste inférieur à la moyenne terrestre, soit un volume d'eau contenu dans les lacs 200 fois supérieur à celui contenu dans les fleuves et rivières⁴³. Aujourd'hui en Limousin, plus aucun bassin n'est exempt de la présence de plan d'eau et même les plus petits stockent plusieurs milliers de mètres cubes. Les questions concernant les étangs constituent une grande partie de la

⁴¹ Touchart & Graffouillère 2004

⁴² Les bathymétrie et les débits sont présentés plus loin

⁴³ Touchart, 2002.

demande sociale concernant la problématique eau dans notre région : l'étude des plans d'eau seuls serait une erreur mais le constat fait précédemment et l'utilisation du P.E.R.E. donnent aux géographes limnologues une position privilégiée pour répondre aux attentes d'analyse et de gestion de ces milieux.

I.2. Quel cadre géographique pour une étude des étangs ?

Tenter de cerner les fonctionnements morphologiques et hydrodynamiques des plans d'eau s'avère être une tâche complexe. Les nombreux paramètres à prendre en compte et les particularismes des différents organismes obligent à pousser loin les expérimentations avant d'espérer généraliser les résultats. Pour cette raison la compréhension des processus habitant les plans d'eau et leurs interactions permanentes nécessitent une approche géographique, toujours en relation étroite avec le terrain. Certaines minuscules pièces d'eau peuvent être étudiées par dizaines, tandis que certains lacs ne se suffisent pas de monographies qui ont occupé des vies entières. Le géographe se doit d'étudier les processus dans le détail, mais aussi de garder le recul nécessaire pour ne pas se fourvoyer en généralisant des phénomènes trop particuliers. Cette saine contradiction doit amener le géographe dépourvu du don d'ubiquité à la seule alternative possible, celle de travailler en équipe.

I.2.1. L'objet géographique étang

I.2.1.1. De la définition du mot étang

Avant d'entamer notre réflexion, posons nous simplement la question : qu'est-ce qu'un étang ? Une formule simple et globale mais sans simplification outrancière caractérisant précisément l'objet étudié est une bonne définition. Abordons donc la

définition la plus basique de l'étang, celle d'un dictionnaire de la langue française : « étendue d'eau reposant dans une cuvette à fond imperméable et généralement moins vaste, moins profonde que le lac.⁴⁴ » Cette définition est la plus courante dans nombre de dictionnaires. Elle présente un inconvénient majeur : comment la comprendre si la notion de lac nous est inconnue ? Notre quête linguistique nous pousse vers le lac, « grande nappe naturelle d'eau douce ou salée, à l'intérieur des terres⁴⁴... Evidemment, ce type de définition ne peut par essence répondre à des impératifs scientifiques spécifiques néanmoins en se fondant sur ces deux phrases il apparaît que l'étang est plus petit que le lac qui lui-même est « grand », il est à l'intérieur des terres et probablement naturel puisque rien dans la définition d'étang ne mentionne le contraire. Cette accumulation d'imprécisions, voire d'erreurs provient de l'écueil qui consiste à bâtir la définition d'un terme en l'opposant à un autre. Il est parfois fait mention de la naturalité du lac s'opposant à l'artificialité de l'étang, cela se révélant faux dans les deux cas.

Les définitions spécialisées s'avèrent plus précises mais sont le plus souvent monodisciplinaires avec une forte dominante biologique. « L'étang est une étendue d'eau fermée, moins importante que le lac, dont la profondeur moyenne est inférieure à 5 mètres, et qui peut être colonisée sur toute son étendue par la flore littorale⁴⁵ ». Certaines peuvent se révéler minimalistes, « plans d'eau vidangeables munis d'une bonde, à usage piscicole⁴⁶ », dénotant parfois un mépris de la part de limnologues plus préoccupés par l'étude de « grands » lacs.

Bernard Dussart, déjà évoqué dans notre modeste épistémologie de la limnologie, adopte une position plus globale dans sa définition de l'étang, et n'exclut aucune possibilité a priori. « Un étang est un réservoir d'eau vidangeable et fait de

⁴⁴ Grand Robert de la langue française

⁴⁵ Arrignon, 1998.

⁴⁶ Pourriot & Meybeck, 1995, p1.

main d'homme. Quand il n'est plus exploité, ni vidangé, il évolue vers un état d'équilibre qui l'apparente à un lac. Par suite de ses caractères propres et notamment de sa faible profondeur (en général 1 à 2 m), des facteurs y jouent un rôle moins important que dans un lac et d'autres voient leur action grossie. Ainsi, la stratification thermique y est moins nette, moins durable par suite d'une prise aux vents différents, et d'une profondeur moyenne moindre. La faible profondeur rend actifs jusqu'à la surface les phénomènes qui modèlent le fond. »(1999). Cette prise en compte des étangs ouvre pour lui la perspective d'une meilleure compréhension des plans d'eau, en jouant sur la modélisation qu'ils offrent. « Les étangs représentent en limnologie un stade intermédiaire entre l'expérience de laboratoire qui ne fait et ne veut faire intervenir que quelques facteurs essentiels et le lac dont la lenteur relative d'évolution ne permet pas toujours d'avoir le recul nécessaire pour une bonne interprétation des phénomènes. Il est évident qu'une meilleure connaissance de ce milieu très particulier et artificiel ouvrira des horizons nouveaux au chercheur soucieux de comprendre la complexité du monde aquatique. » (1966, p 240)

Nous nous devons de doter la géographie limnologique d'une définition de l'étang, pouvant répondre à nos besoins de chercheurs, mais toujours dans une vision globale, simple mais en évitant les écueils de la simplification outrancière et de la monodisciplinarité. Ce but n'aurait pas pu être atteint seul, ou dans le simple cadre d'une thèse ; en confrontant différents points de vue, après des expériences significatives sur le terrain ou en laboratoire et un effort de synthèse une définition a pu voir le jour.

L'étang est un plan d'eau continental, dont les dimensions et les usages (vidange, assec, etc.) ne permettent pas d'établir la zonation (répartition spatiale

horizontale) ni l'étagement (répartition spatiale verticale) des différents processus stagnustres de façon durable.⁴⁷

Pour aller plus loin, il est nécessaire de prendre en compte la dimension sociale de l'étang. Selon les régions, les mots étang ou lac sont utilisés pour qualifier des plans d'eau dont les caractéristiques physiques sont semblables.

Pour dissiper toute confusion, nous considérons comme un lac un plan d'eau continental dont la profondeur, la superficie ou le volume sont suffisant pour provoquer un étagement et une régionalisation au moins saisonnière des processus limniques⁴⁸. Concernant les mares, nous retiendrons la définition du Pôle relais mares et mouillères de France⁴⁹.

I.2.1.2. De la spécificité de l'étang limousin

Lorsque les mots « région d'étang » sont prononcés viennent à l'esprit l'image de la Dombes, de la Brenne ou encore de la Sologne, mais point du Limousin. Or le Limousin est sans conteste une région d'étangs puisque l'on dénombrait en 2004 entre 20 500 et 22 000 plans d'eau de toutes tailles constellant son sol⁵⁰. Un des problèmes provient, à mon sens, de la non définition d'une région géographique

⁴⁷ Graffouillère & Savy, 2004 Site Aquadoc Inter (<http://aquadoc.oieau.fr/france/index.html>)

⁴⁸ Touchart, 2002 ; Touchart, 2003 Site Aquadoc Inter

⁴⁹ "La mare est une étendue d'eau à renouvellement généralement limité, de taille variable pouvant atteindre un maximum de 5000 mètres-carré. Sa faible profondeur qui peut atteindre environ deux mètres, permet à toutes les couches d'eau d'être sous l'action du rayonnement solaire et aux plantes de s'enraciner sur tout le fond. De formation naturelle ou anthropique, elle se trouve dans des dépressions imperméables, en contextes rural, périurbain voire urbain. Alimentée par les eaux pluviales et parfois phréatiques, elle peut être associée à un système de fossés qui y pénètrent et en ressortent ; elle exerce alors un rôle tampon au ruissellement. Elle peut être sensible aux variations météorologiques et climatiques, et ainsi être temporaire. La mare constitue un écosystème au fonctionnement complexe, ouvert sur les écosystèmes voisins, qui présente à la fois une forte variabilité biologique et hydrologique interannuelle. Elle possède un fort potentiel biologique et une forte productivité potentielle". (<http://www.polerelaismares-iedd.org/>) Notons toutefois que l'appréciation concernant le rayonnement solaire à 2 mètres de profondeur est très contestable.

⁵⁰ Touchart & Graffouillère, 2004.

d'étang en Limousin, car de nombreuses disparités existent. Le Limousin comme entité administrative ne peut servir de limite pour une notion géographique. En étudiant la densité des plans d'eau en 1980⁵¹, une grande zone comprenant l'ouest de la Haute-Vienne, le nord-ouest de la Corrèze ainsi que l'est de la Charente constitue une entité où les densités d'étang sont fortes et homogènes. Le nord-ouest de la Creuse présente lui aussi des densités fortes alors que le plateau de Millevaches présente peu d'étangs à l'instar du bassin de Brive. Le sujet de ce travail n'est pas de qualifier la ou les régions d'étangs d'un Limousin plus géographique qu'administratif mais ce point méritait une clarification.

Une réelle spécificité se dégage de l'étang limousin. Cette identité particulière provient de la géomorphologie de la région. En effet, le Limousin se situe sur un massif ancien rajeuni au tertiaire et présente de nombreux plateaux. Ce socle cristallin bombé a favorisé la présence d'un chevelu de petits ruisseaux prenant place dans de petits vallons relativement encaissés. De ces caractéristiques découlent une certaine facilité à ennoyer de nombreuses petites parcelles. Ainsi de nombreux petits étangs se côtoient formant souvent des chaînes, et présentant la plupart du temps des encaissements relativement forts.

I.2.2. Un jeu d'échelles horizontales et verticales réclamant une typologie pour l'étude

Morphologie, sédimentation, hydrologie, hydrodynamique, les processus à étudier sont nombreux et requerraient sur un seul plan d'eau plusieurs études mais ce serait une erreur pour un géographe de ne pas s'élever au-delà de ces processus pour changer de limnosystème. Les fonctionnements sont aussi dictés par les échelles

⁵¹ Touchart & Graffouillère, 2004, p31.

et leur compréhension réclame une certaine diversité des terrains d'étude. Si l'étude prend place dans un large Limousin, il ne s'agit pas de piocher arbitrairement des plans d'eau dans ce territoire riche, mais bien de cerner des types qui serviront la compréhension des plans d'eau en général. Le Limousin est une région de nombreux plans d'eau, particulièrement d'étangs dont la morphologie immergée particulière est empreinte de la morphologie émergée comme nous l'avons évoqué précédemment. Nombre de ces plans d'eau sont grands, et par là il faut entendre une appréciation autant verticale qu'horizontale. La profondeur plus importante que dans d'autres régions comme la Brenne ou la Sologne va permettre une complexité de phénomène qui nous intéresse particulièrement. L'identité du plan d'eau, étang ou lac, sa « personnalité » en quelque sorte, réside dans sa surface et dans le volume de son contenu. Le volume et sa disposition spatiale vont être déterminants pour tous les processus prenant place dans cette masse d'eau bien loin d'être homogène et inerte.

Le changement d'échelle est une des armes de prédilection du géographe car il permet d'envisager des phénomènes dans le détail mais aussi de prendre de l'altitude pour généraliser leur fonctionnement. Partant de ce principe, une typologie méthodologique fut mise en place : cela signifie que les catégories ne s'appuient pas sur une simple détermination par la superficie, bien insuffisante, mais par une tentative d'approche globale du plan d'eau dans la complexité de son volume.

Le cœur de l'étude s'articule autour de ce que nous nommerons les étangs-lacs : ce terme recouvre une complexité de structure s'appuyant sur des dimensions horizontales et verticales suffisamment importantes pour donner lieu à des zonations ou des étagements au moins temporaires. Cette complexité est renforcée par l'ancienneté de ces plans d'eau parfois d'époque médiévale. L'intérêt de ces plans

d'eau réside dans la plus faible soumission à leur bassin permettant la mise en place de processus souvent attribués aux seuls lacs.

Toutefois, à côté de l'étude de ces étangs-lacs aux processus complexes, il est nécessaire de travailler à différentes échelles. Comment fonctionnent les petits étangs ? Sans aller jusqu'à étudier des mares, certains étangs de dimensions réduites sont riches d'enseignements. Nous appellerons cette catégorie les étangs-laboratoires. A cette échelle, les phénomènes sont spatialement et temporellement réduits, et certains disparaissent ; néanmoins d'autres perdurent et on peut mesurer des comportements insoupçonnés sur de si petits plans d'eau.

Figure 7 :
Localisation des plans d'eau étudiés

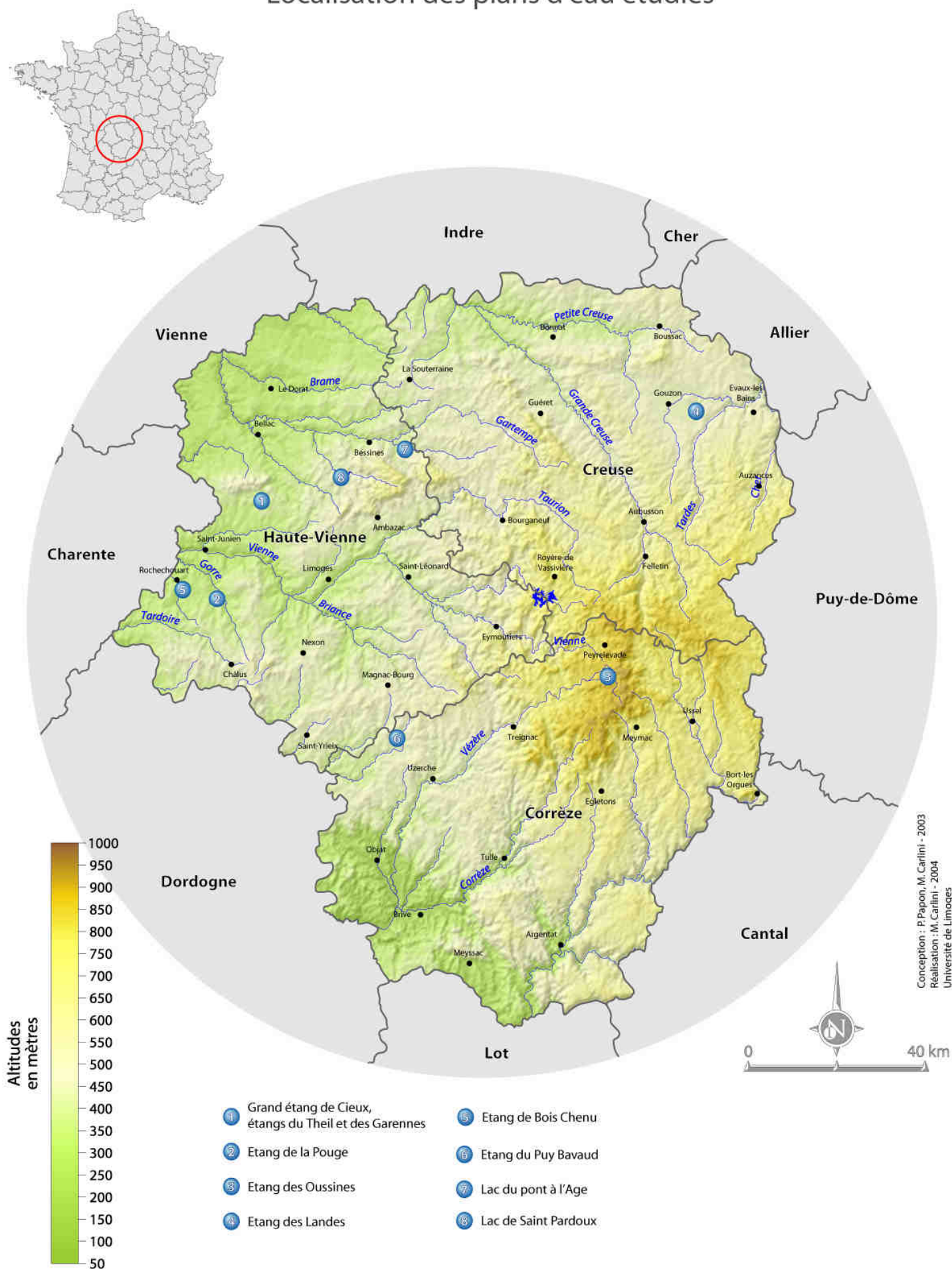


Figure 8 :
Présentation des plans d'eau étudiés à la même échelle

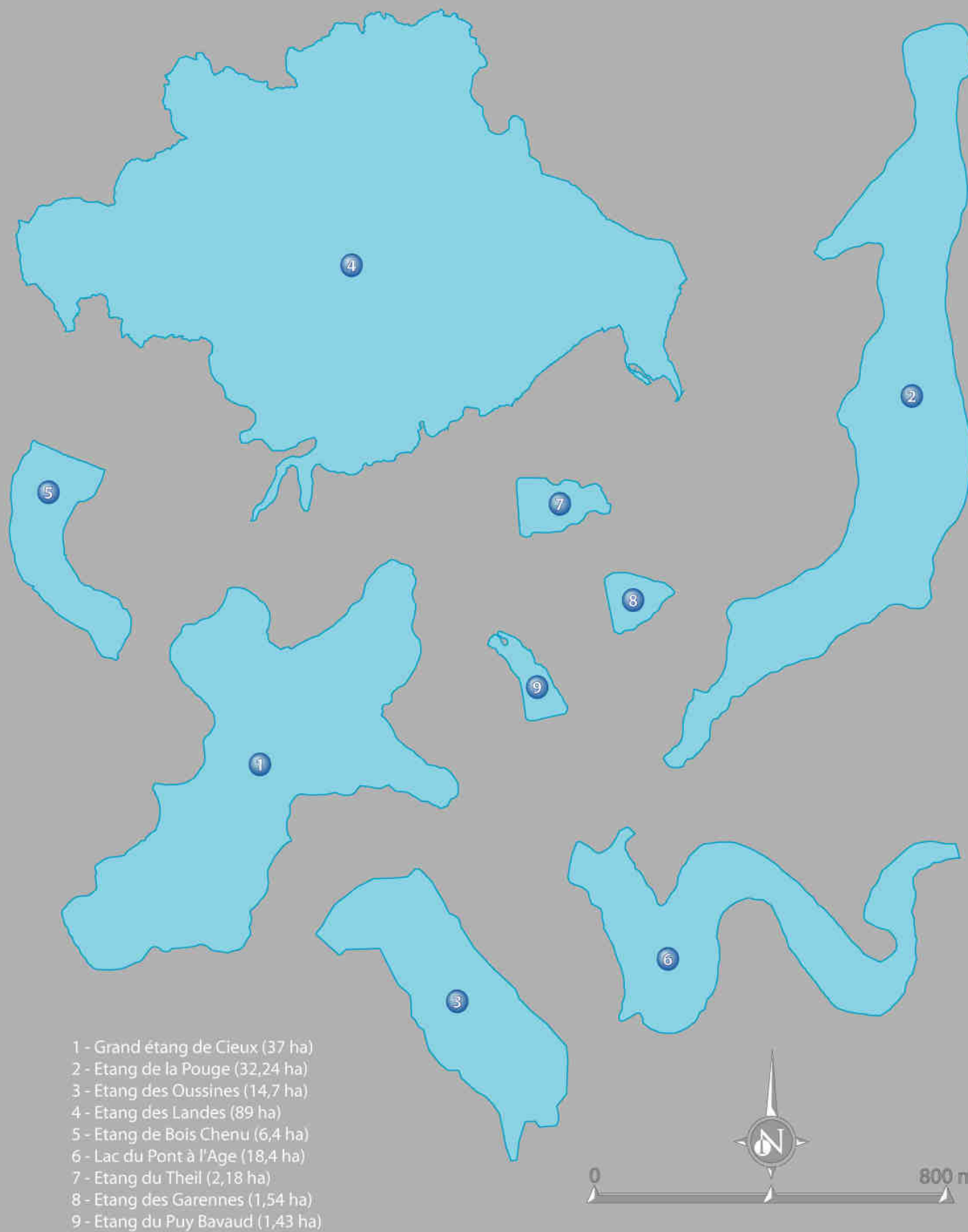
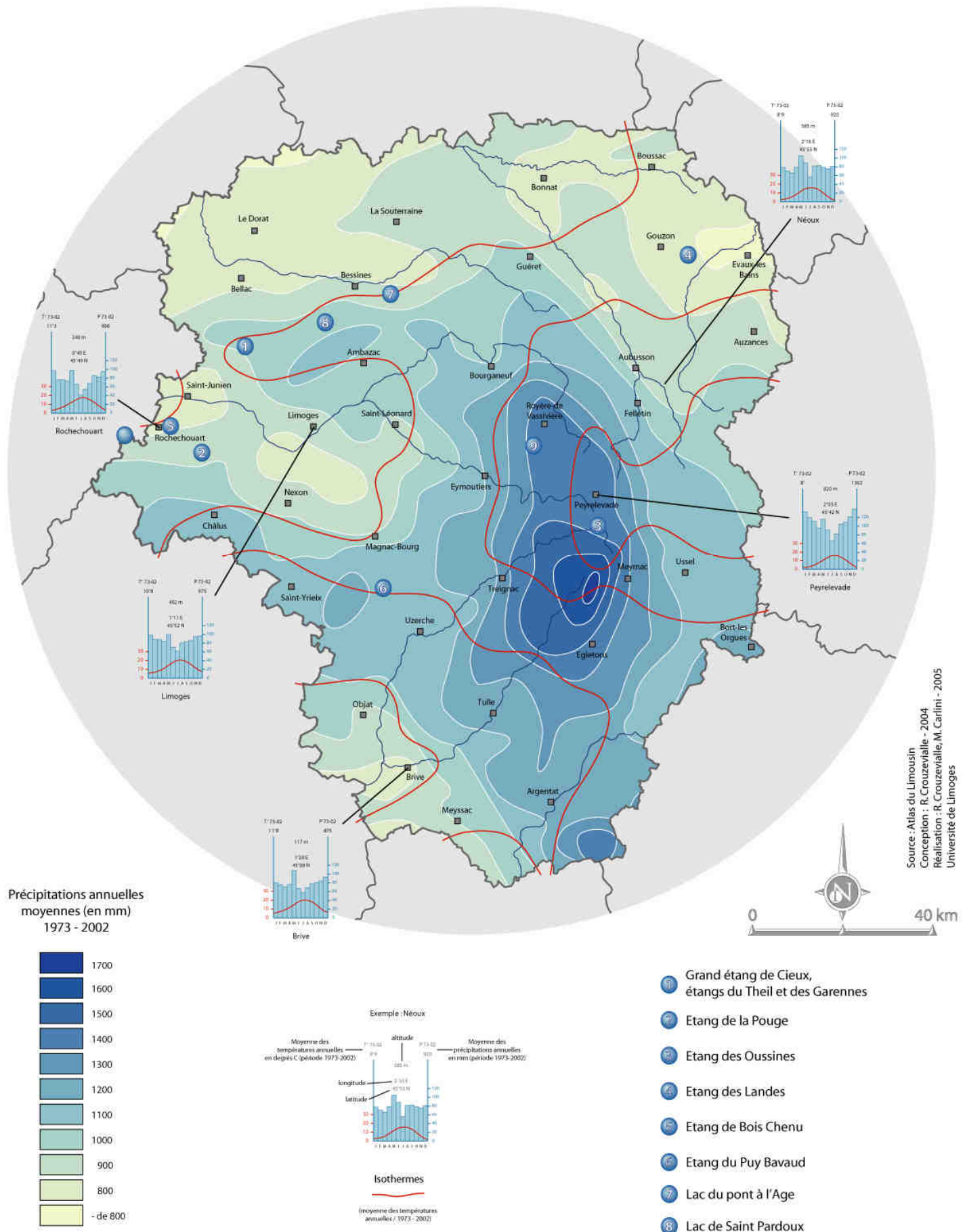


Figure 9 :

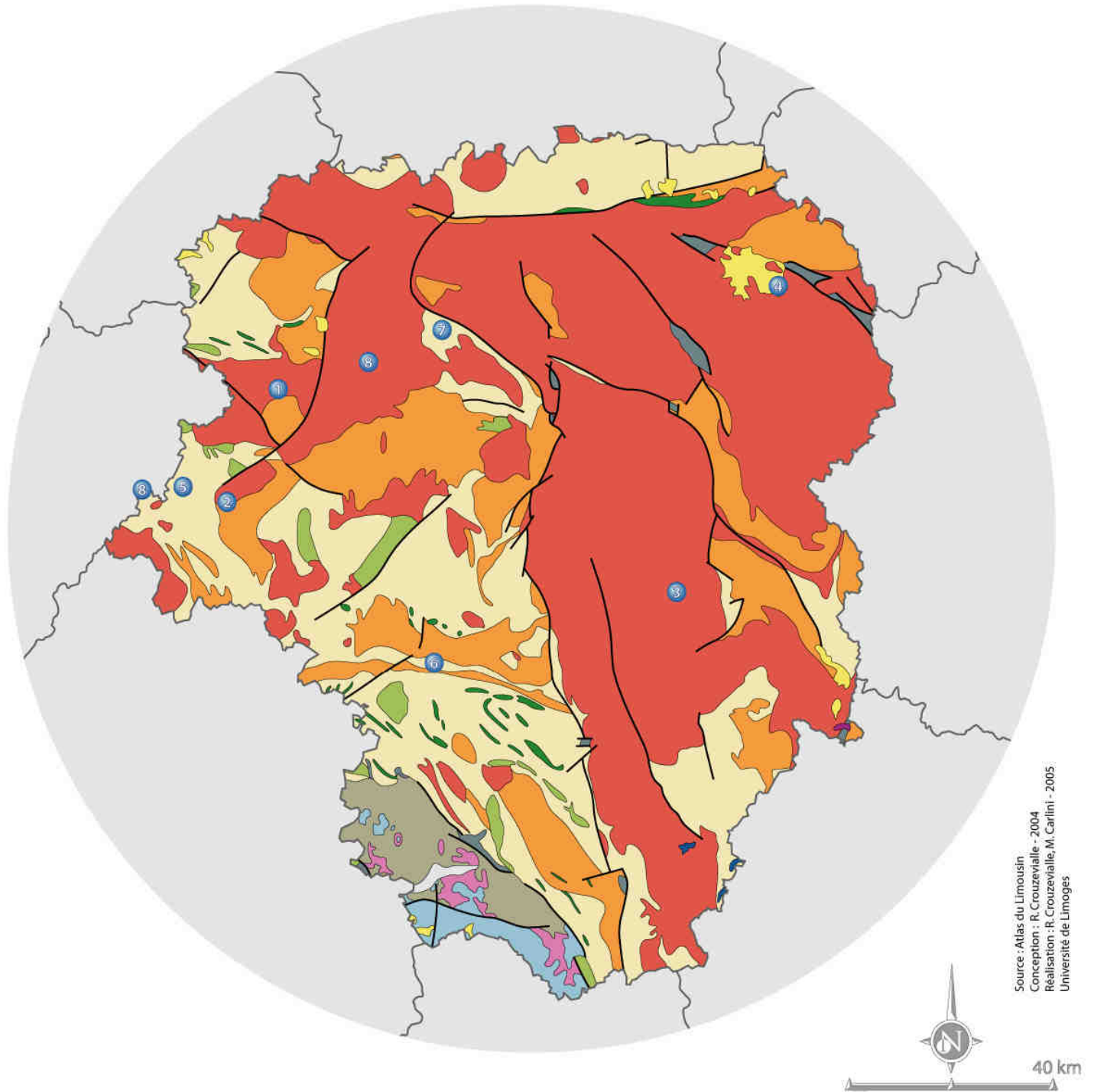
Localisation des plans d'eau étudiés dans le cadre climatologique limousin



Source : Atlas du Limousin
Conception : R. Crouzevialle - 2004
Réalisation : R. Crouzevialle, M. Carlini - 2005
Université de Limoges

Figure 10 :

Localisation des plans d'eau étudiés dans le cadre géologique limousin



Source : Atlas du Limousin
 Conception : R. Crouzeville - 2004
 Réalisation : R. Crouzeville, M. Carlini - 2005
 Université de Limoges

Formations sédimentaires

- Quaternaire
- Tertiaire
- Jurassique
- Trias
- Permien
- Carbonifère

Roches métamorphiques

- Micaschistes et Gneiss
- Amphibolites
- Migmatites

Roches cristallines

- Granites
- Diorites, Gabbros, Serpentes

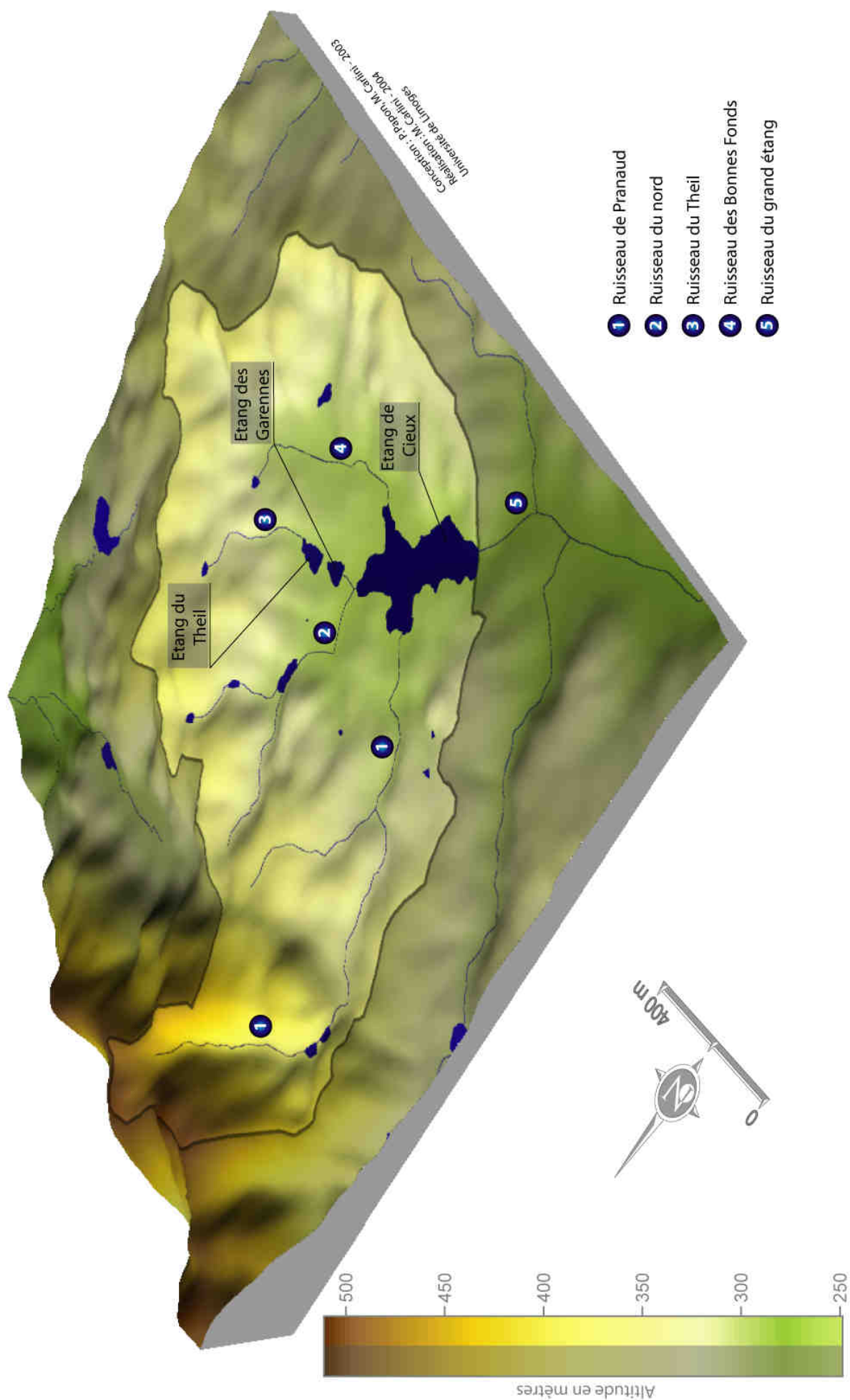
Roches volcaniques

- Phonolites
- Basaltes

— Principales failles

- Grand étang de Cieux, étangs du Theil et des Garennes
- Etang de la Pouge
- Etang des Oussines
- Etang des Landes
- Etang de Bois Chenu
- Etang du Puy Bavaud
- Lac du pont à l'Age
- Lac de Saint Pardoux

Figure 11 :
Bassin d'alimentation du Grand étang de Cieux



I.2.3. Les plans d'eau étudiés au cœur de leurs bassins d'alimentation

Cette étude prenant le Limousin pour cadre géographique (Fig. 7, 9 & 10), les différents terrains cités précédemment se devaient d'être choisis suivant une répartition cohérente. Il est intéressant d'observer ces plans d'eau les uns par rapport aux autres avant de les présenter individuellement, ce que permet la figure 8.



Photo 4 : Le grand étang de Cieux depuis le nord de la digue (cliché Carlini 2004)

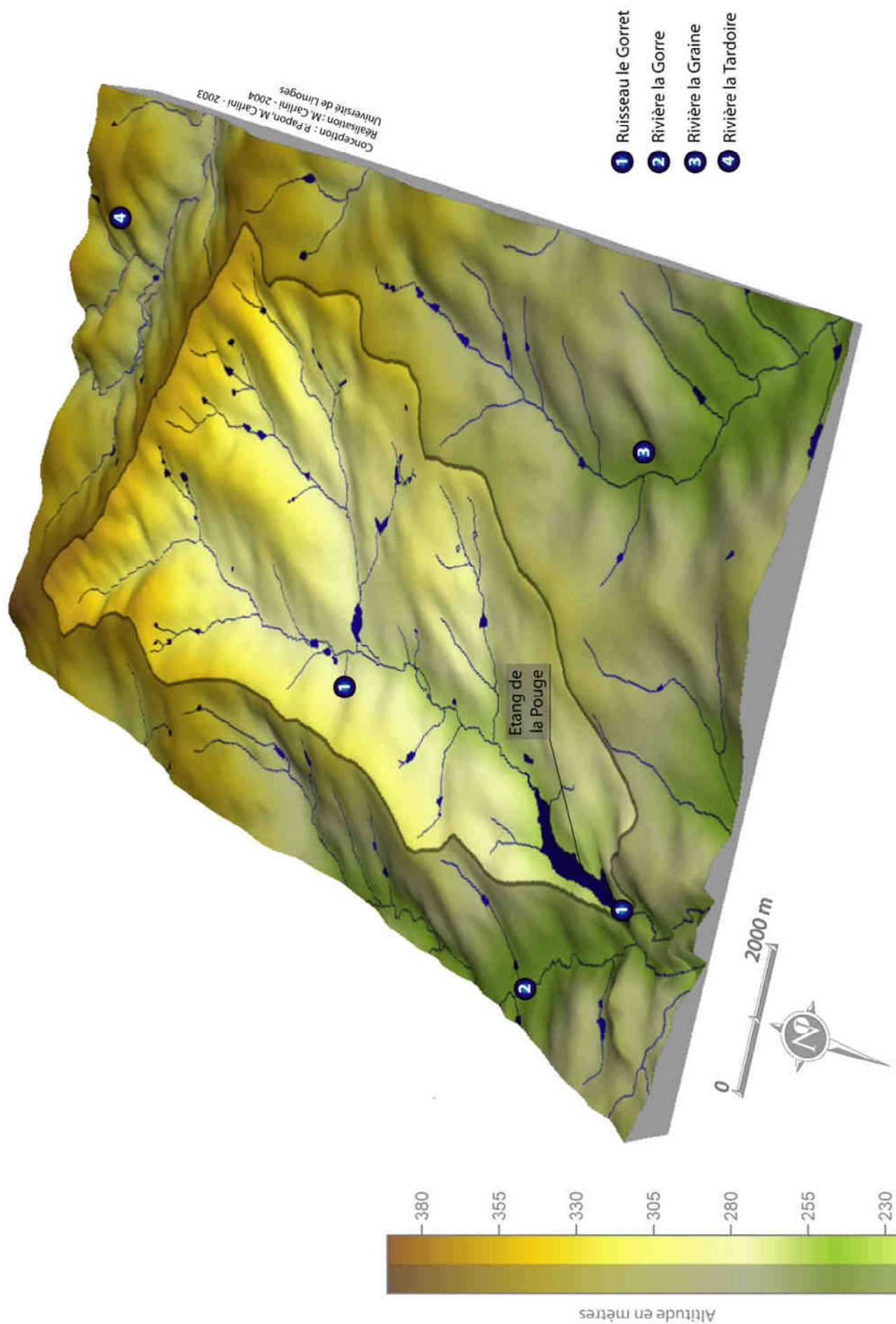
Le Grand Etang de Cieux⁵², situé sur le piémont méridional des monts de Blond (Fig. 7), possède parfaitement ces caractéristiques d'étang-lac. Ce terrain privilégié représente le point de convergence des travaux de géographie limnologique permettant une étude collective approfondie. Ce plan d'eau (photo 4) s'étend sur 37 hectares⁵³ et le déversoir se situe à une altitude de 290 mètres. Son bassin d'alimentation de 12,22 km² culmine lui à 514 mètres⁵⁴ (Fig. 11). Alimenté par quatre affluents, son exutoire le ruisseau du grand étang prend plus en aval le nom de Vergogne, affluent de la Glane. Sa situation à la confluence de trois vallons lui confère sa forme de croix caractéristique et un encaissement limité se traduisant par une profondeur maximale de 3,69 mètres. L'exutoire est alimenté par un déversoir de surface. Cet étang se situe dans une zone représentative des bas plateaux limousins,

⁵² 45°59m23s de latitude nord, 1°3m22s de longitude est

⁵³ superficies aux eaux moyennes soit 289,4 mètres NGF, ce point sera discuté plus loin.

⁵⁴ Graffouillère, 2000.

Figure 12 :
Bassin d'alimentation de l'étang de la Pouge



dans un climat hyper océanique : les normales de précipitations sont de 1000 mm et la moyenne annuelle thermique est de 10 degrés (Fig. 9). Comme bon nombre d'étangs de notre région, il prend place sur un substrat granitique (Fig. 10).



Photo 5 : L'étang de la Pouge depuis la digue (cliché Carlini 2005)

L'étang de la Pouge⁵⁵ (Photo 5) prend place sur les bas plateaux occidentaux du haut Limousin (Fig. 7). Il se situe également sur un substrat granitique, mais avec un total de précipitations plus faible, 900mm (Fig. 9). Sa superficie, moins sujette aux variations de niveau que dans le cas précédent, est de 32,2 hectares et le niveau d'eau moyen s'établit à 251,8 mètres. Le bassin d'alimentation, de forme triangulaire encadré par la Tardoire, la Gorre et la Graine, couvre 31,53 km² et atteint 373,3 mètres (Fig 12). L'étang compte trois affluents, mais la domination du ruisseau le Gorret est très nette. Il en découle une morphologie allongée d'étang de vallée encaissée, avec une profondeur maximale importante de 5,98 mètres à la verticale de la prise d'eau profonde du moine⁵⁶ par laquelle les eaux retournent au Gorret.

⁵⁵ 45°47m21s de latitude nord, 0°56m10s de longitude est

⁵⁶ Le fonctionnement de cet aménagement est expliqué en III.3.1.3.

Figure 13 :
Bassin d'alimentation de l'étang des Landes

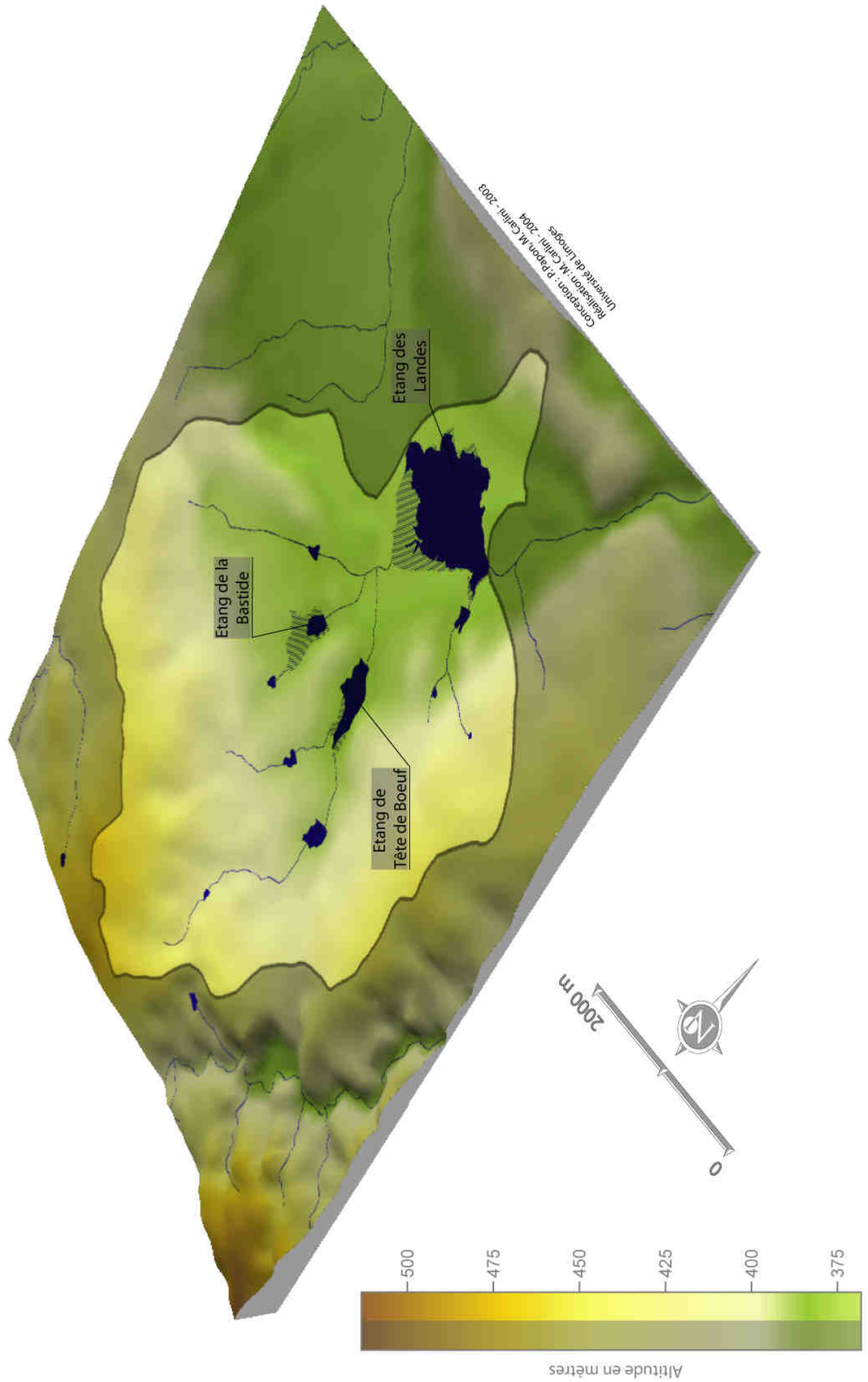




Photo 6 : L'étang des Landes (cliché Carlini 2002)

Situé dans le bassin de Gouzon, à l'est de la Creuse (Fig. 7), l'étang des Landes⁵⁷ s'étale sur 102 hectares à sa cote maximale et pas moins de 89 hectares aux eaux moyennes ; la différence énorme de superficie due au marnage tient à la morphologie très plane de la région. Plus grand étang abordé dans cette étude (Photo 6), il ne s'agit en effet que d'une mince pellicule d'eau, posée à 378 mètres d'altitude, ne dépassant pas 1,93 mètres de profondeur aux eaux moyennes. Le bassin d'alimentation, particulièrement complexe à définir sans se rendre sur place couvre 28,4 km² et culmine à 480 mètres (Fig 13). L'étang des Landes est alimenté par deux affluents : le ruisseau de l'Ermitte et celui de la Grande Chaume. Cet étang est différent des autres cas de l'étude, car il est le seul à prendre place sur un terrain sédimentaire composé de formations tertiaires mises en place à partir de la subsidence du bassin de Gouzon au début de l'éocène⁵⁸ (Fig. 10). Les précipitations sont ici parmi les plus faibles du Limousin, avec 815 mm à Gouzon (Fig. 9) ou une influence semi continentale due à un climat d'abri se fait sentir.

⁵⁷ 46°10m48s de latitude nord, 2°18m53s de longitude est

⁵⁸ Brunaud, 2004.

Figure 14:
Bassin d'alimentation de l'étang des Oussines

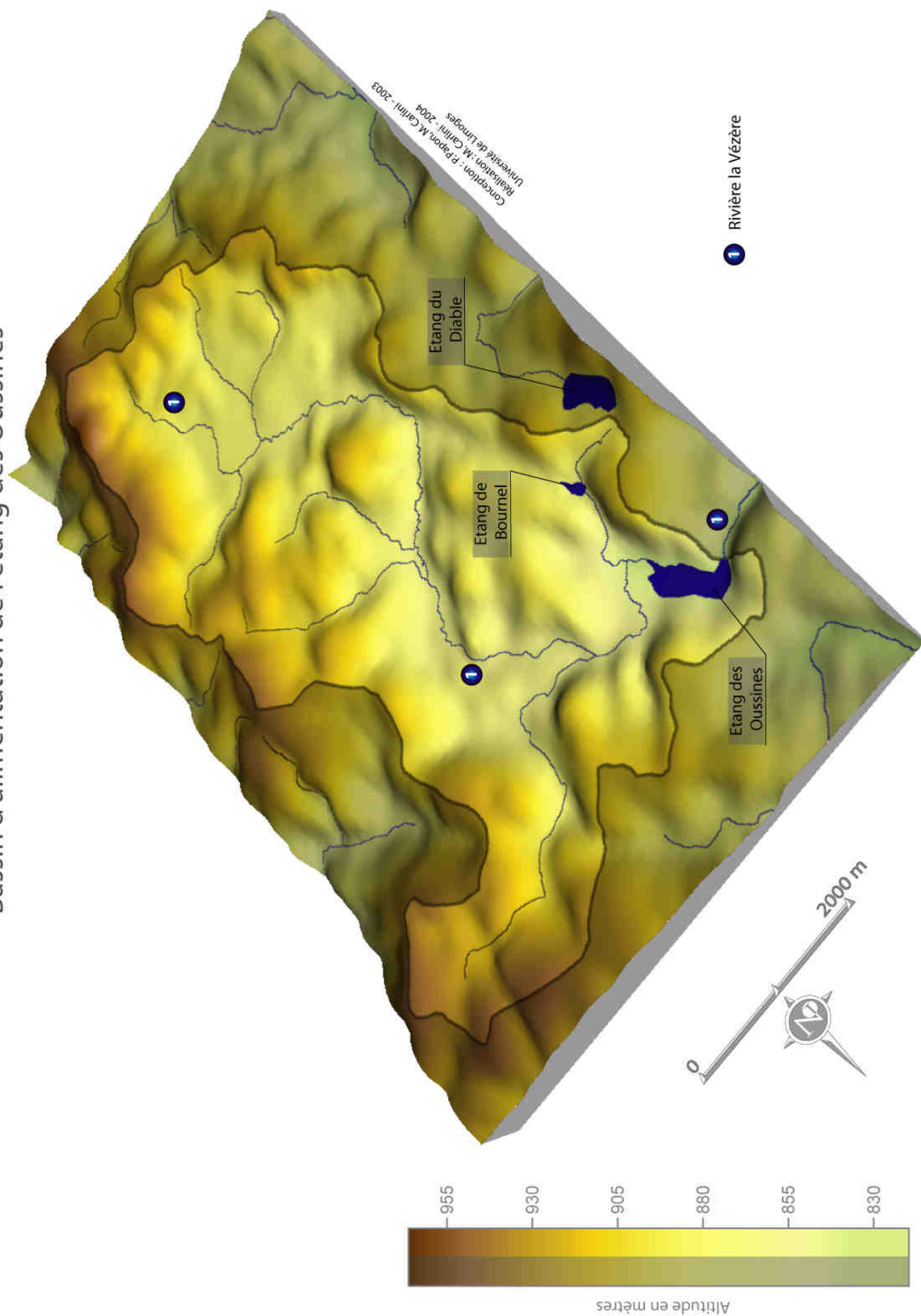


Figure 15 :
Bassin d'alimentation de l'étang de Rochechouart

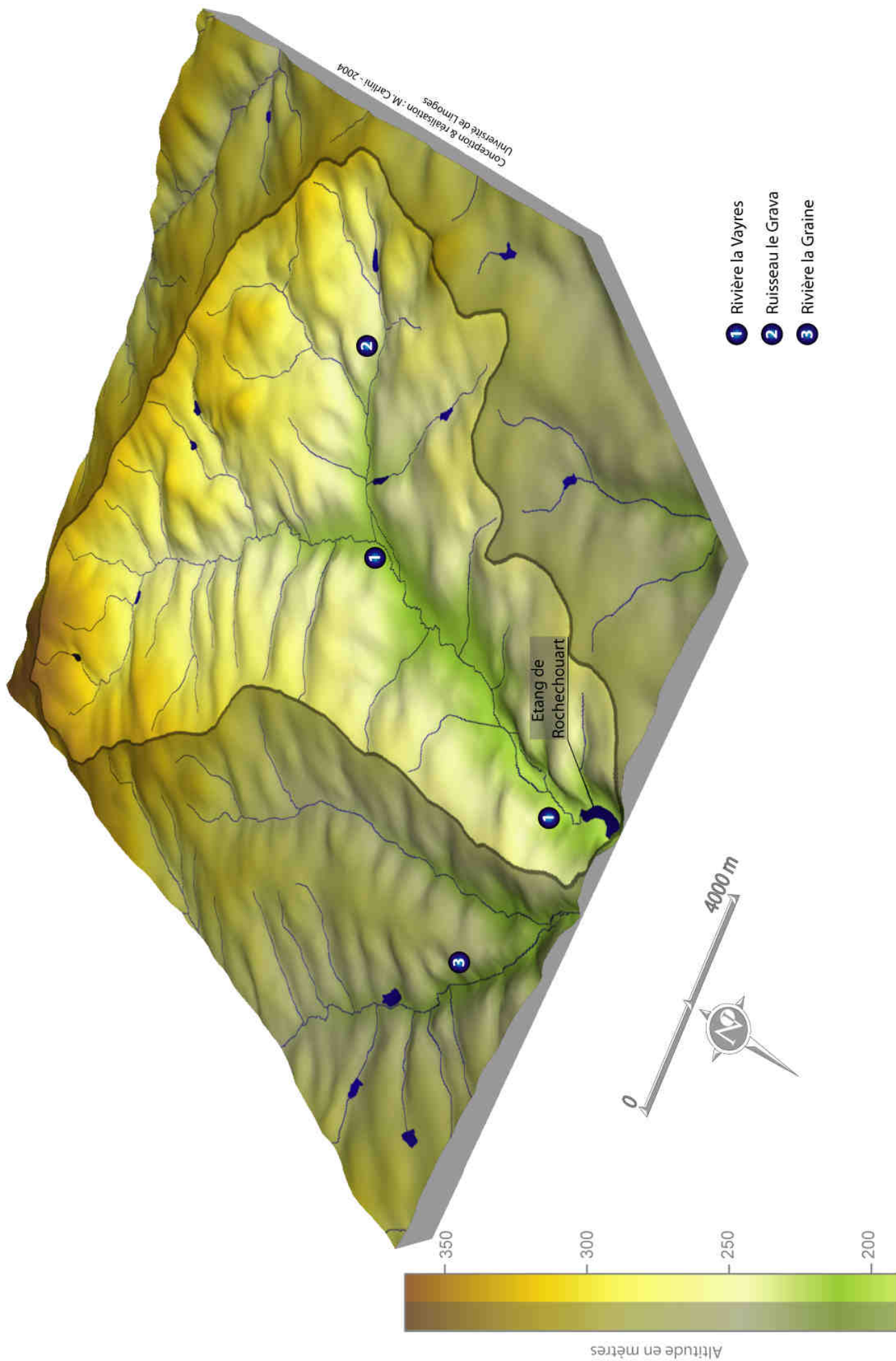


Figure 16 :
Bassin d'alimentation du lac du Pont à l'Age

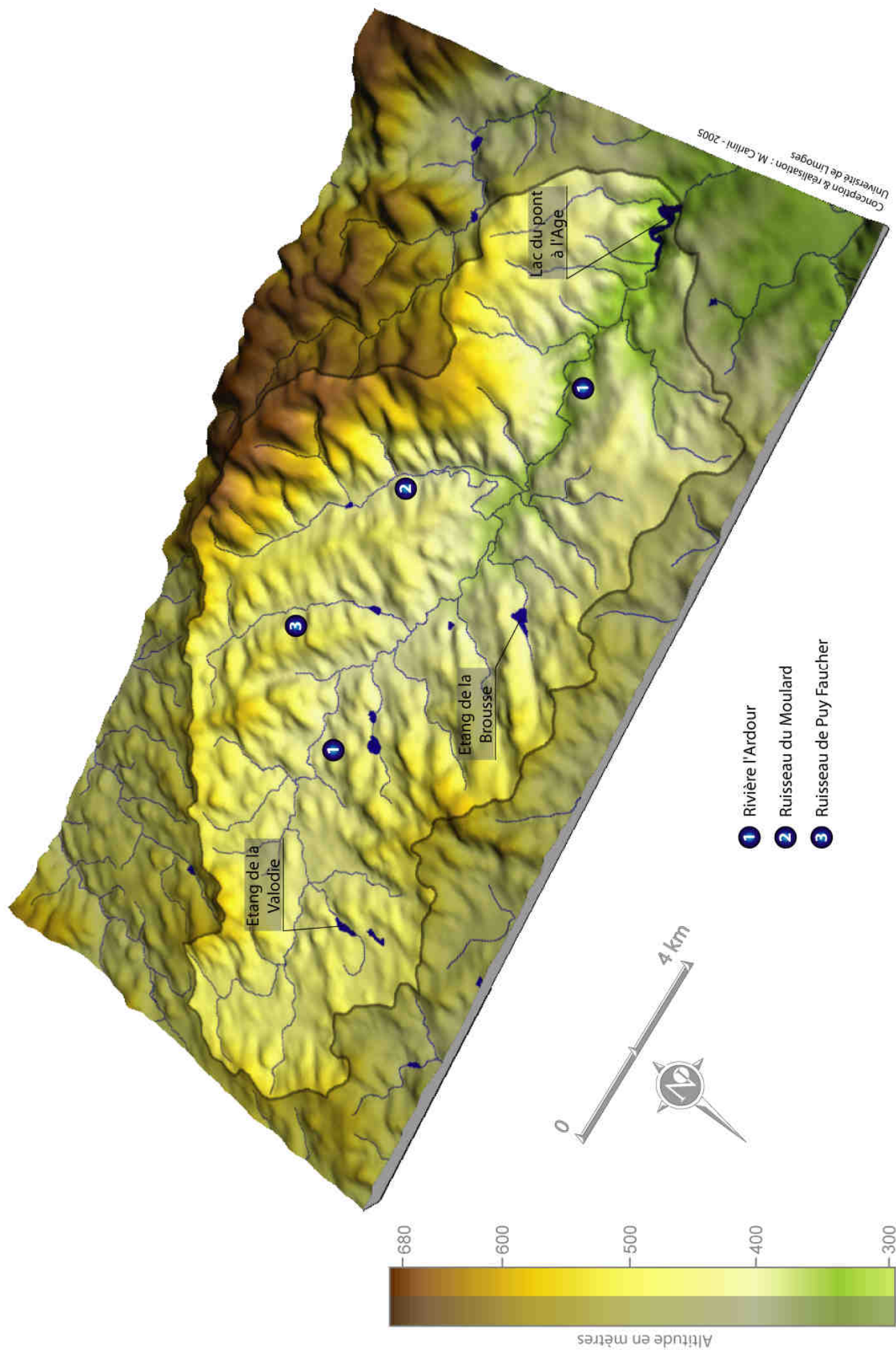




Photo 7 : L'étang des Oussines (cliché Touchart, 1999)

Sur le plateau de Millevaches, au cœur de la montagne limousine sur un substrat évidemment granitique (Fig. 7 & 10), l'étang des Oussines⁵⁹ déverse ses eaux à 836 mètres d'altitude et son bassin d'alimentation de 21,9 km² compte le deuxième sommet du Limousin comme point culminant, le Puy Pendu avec 973 mètres (Fig. 14). Cet étang (Photo 7) est le plus haut du Limousin sur cours d'eau, et quel cours d'eau puisqu'il s'agit de la Vézère, proche de sa source certes, mais qui marque fortement cet étang de 14,7 hectares en étant son seul affluent et en recevant une pluviométrie moyenne de 1400mm (Fig. 9). La profondeur maximale est de 2,4 mètres, ce qui peut sembler faible au regard du relief environnant, mais la sédimentation compte pour beaucoup dans ce chiffre. Deux déversoirs de surface restituent les eaux de la Vézère en aval.

⁵⁹ 45°38m5s de latitude nord, 2°3m58s de longitude est



Photo 8 : L'étang de Bois Chenu vu du sud (cliché Carlini 2005)

L'étang de Bois Chenu⁶⁰, à Rochechouart, est le plan d'eau le plus occidental que nous étudierons (Photo 8). C'est aussi le plus bas, avec un déversoir situé à 190 mètres d'altitude sur un substrat métamorphique (Fig. 10). Cet étang est d'une superficie moyenne pour le Limousin, 6,4 hectares, mais il est positionné au débouché d'un bassin d'alimentation important couvrant 45,5 km² qui ne l'alimente que par un seul affluent, la Vayres (Fig 15). Il se situe dans une région où la pluviométrie est plus faible par rapport aux plateaux plus orientaux (< 900 mm) et où la température moyenne annuelle s'élève (11°3 à Rochechouart)(Fig. 9).



Photo 9 : Le lac du Pont à l'Age (cliché Carlini 2005)

⁶⁰ 45°48m49s de latitude nord, 0°49m12s de longitude est

Seul « lac » de cette étude, le lac du pont à l'Age⁶¹ est selon notre définition un étang. Le terme lac lui est attribué par sa mise en eau récente (1969), sa vocation hydroélectrique et touristique. Sa situation dans une vallée encaissée, celle de l'Ardour, nous intéresse pour la morphologie qui en résulte (Fig. 16).



Photo 10 & 11 : Etangs du Theil et des Garennes (cliché Carlini 2001)

L'étang du Theil⁶² (Photo 10) est l'illustration parfaite d'une « modélisation naturelle » des processus. Situé dans le bassin d'alimentation de l'étang de Cieux (Fig. 11), cet étang de 2,18 hectares atteint la profondeur respectable de 2,34 mètres à la bonde. Son bassin d'alimentation, excessivement réduit, ne mesure que 0,66 km² autour du seul affluent de l'étang, le ruisseau du Theil. Ce plan d'eau fonctionne donc sur un ruisseau non temporaire, en tête de bassin ce qui permet d'isoler plus facilement certains phénomènes. En outre, cet étang est très récent puisque sa mise en eau date de 1970. L'émissaire est alimenté par un déversoir de surface.

En aval, 200 mètres plus loin (Fig. 11), l'étang des Garennes (Photo 11) présente des dimensions encore plus réduites. Seulement 1,54 hectare pour 1,53 mètres de profondeur maximale, l'étang des Garennes est semblable à un grand

⁶¹ 46°5m45s de latitude nord, 1°28m31s de longitude est

⁶² 45°59m43s de latitude nord, 1°3m59s de longitude est

nombre d'étangs privés limousins. Le bassin d'alimentation est en grand partie similaire à celui du Theil, et à peine plus étendu avec 0,75 km². Son seul affluent provient de l'étang amont et sa mise en eau fut la même. L'étude de ce plan d'eau offre l'avantage de pouvoir être comparée directement avec celle du Theil.



Photo 12 : L'étang du Puy bavaud (cliché Mathelin – 2002)

Etang de création récente, géré de façon précise par son propriétaire, l'étang du Puy Bavaud⁶³ (Photo 12) présente sur une superficie inférieure à celle du Theil, un contre-exemple de ce dernier.

Le lac de Saint-Pardoux n'est pas étudié ici, mais il présente de nombreux avantages : il se situe dans un milieu géographique proche. En outre ce lac est l'objet de travaux limnologiques notamment une thèse soutenue en 2002. Situé sur le piémont des monts d'Ambazac, il couvre une superficie de 324,21 hectares pour 16,7 mètres de profondeur au barrage et s'inscrit dans un bassin d'alimentation de 78,82 km²⁶⁴. Les résultats de cette thèse permettent la mise en perspective des étangs au

⁶³ 45°30m33s de latitude nord, 1°27m11s de longitude est

⁶⁴ Maleval, 2002

Tableau 1 : Présentation des étangs étudiés et de leur bassin d'alimentation

	Cieux	La Pougé	Landes	Oussines	Bois Chenu	Age	Theil	Garennès	Puy Bavaud
localisation	45°59m23s N 1°3m22s E	45°47m21s N 0°56m10s E	46°10m48s N 2°18m53s E	45°38m5s N 2°3m58s E	45°48m49s N 0°49m12s E	46°05m45s N 1°28m31s E	45°59m43s N 1°3m59s E	45°59m43s N 1°3m59s E	45°30m33s N 1°27m11s E
commune	Cieux (87)	St Auvent (87)	Lussat (23)	St Merd les Oussines (19)	Rochechouart (87)	Laurrière/ Folles (87)	Cieux (87)	Cieux (87)	Montgibaud (19)
date de création	1250	avant 1779	éocène/1684	avant 1783	1971	1969	1970	1970	1989
altitude	289,4	251,8	378	836	190	313	290	292	370
superficie	32,5/45,6	28,6/34,2	89/102	14,7	6,4	18,4	2,18	1,54	1,43
débit moyen annuel	154	*365	250	*628	*527	*1956	0,1	0,1	0,1
surface du BA¹	12,22	31,53	28,4	21,9	45,5	136,8	0,66	0,75	1,2
altitude max du BA¹	514	373,3	480	973	362	680	377	377	440
OCS²Forêt	27,1 %	8,6 %	16 %	71 %	14,1 %	25,5 %	12,1 %	10,7 %	4,2 %
OCS²Agricole	68,4 %	90 %	79,5 %	28,3 %	83,6 %	73,2 %	87,9 %	89,3 %	95,8 %
OCS²Urbanisé	1,1 %				2 %	0,9 %			
OCS²Eau	3,4 %	1,4 %	4,5 %	0,7 %	0,3 %	0,4 %			

Les altitudes sont exprimées en mètres, NGF.

Les superficies de plan d'eau sont exprimées en hectares. Lorsque deux superficies sont présentes il s'agit des plus basses et plus hautes eaux.

Les débits moyens annuels sont en litres / seconde ; les débits précédés d'une astérisque sont calculés depuis les débits spécifiques des stations de mesure de la Banque HYDRO.

les surfaces de bassin d'alimentation sont en kilomètres carrés.

¹ : bassin d'alimentation

² : occupation du sol

regard d'un plan d'eau plus grand, mais tout aussi anthropique et de mise en eau récente.

I.2.4. L'importance de l'échelle temporelle : la date de mise en eau

De nombreux étangs limousins sont anciens, mis en eau par divers ordres monastiques et ce dès le Moyen-Âge (tableau 1). Si les étangs se différencient des lacs par des dimensions spatiales réduites, de nombreux étangs limousins sont plus anciens que les nombreux lacs de barrage vieux généralement d'une cinquantaine d'années au maximum. Cette ancienneté confère à certains étangs un aboutissement des processus plus important et renforce l'intérêt de leur étude. Les processus de sédimentation et de modelage de la cuvette sont par exemple plus flagrants que dans les lacs de barrage, notamment au niveau de la plaine centrale et des deltas, pour peu que les vidanges ne soient pas trop fréquentes.

La connaissance de la date de mise en eau s'avère donc particulièrement intéressante pour l'étude des rythmes de processus s'inscrivant dans la durée. Malheureusement, isoler la date de mise en eau d'un étang médiéval se révèle souvent problématique, notamment du fait du manque de sources documentaires. Une estimation de la mise en eau à quelques décennies près est souvent le meilleur résultat, ce qui peut sembler en décalage avec des mesures centimétriques ou des relevés hebdomadaires. Néanmoins, pour beaucoup de plans d'eau anciens, la date de mise en eau précise reste inconnue et la présence sur la carte de Cassini est l'indication la plus ancienne.

I.3. Des méthodologies dictées par les échelles

Etudier la morphologie et l'hydrodynamique des étangs nécessite de se pencher sur les méthodologies employées pour l'étude des lacs. Le problème de la

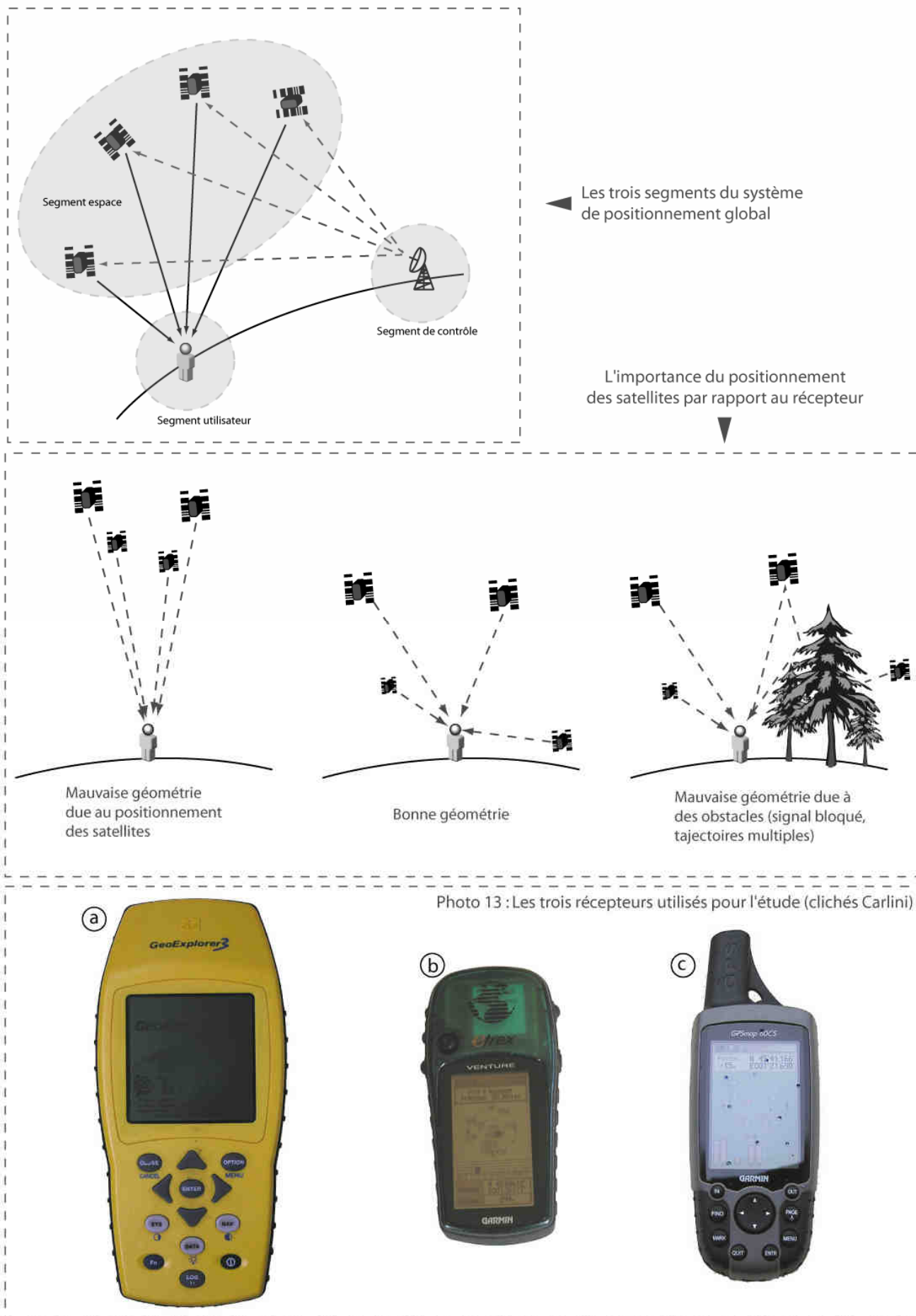
précision se pose alors immédiatement : l'étude sur de petits plans d'eau oblige à accroître cette précision. Une erreur de cinq centimètres sur un relevé bathymétrique se révèle beaucoup plus préjudiciable sur trois mètres que sur cent cinquante mètres de profondeur. Ce constat amène le choix de la précision des méthodologies souvent au détriment de leur rapidité d'action.

I.3.1.L'étude de la morphologie

La connaissance de la morphologie immergée doit toujours précéder les autres travaux du limnologue. La réalisation de la bathymétrie des plans d'eau est un travail long et exigeant dont le géographe doit s'acquitter pour réaliser une carte correcte. En ce début de XXIème siècle la plus grande partie de la planète est cartographiée, du plus haut sommet jusque aux fonds désormais plus insondables des océans. Pourtant, tout autour de nous, des milliers de miroirs bleutés nous occultent des portions de notre région. Cette question pourrait sembler dérisoire s'agissant de quelques ares creusés mécaniquement et depuis peu, mais il s'agit aussi de cartographier des étangs de plusieurs dizaines d'hectares parfois mis en eau depuis presque mille ans. Au-delà de la quête de cartographie, bien légitime, du géographe, il serait impensable de procéder à quelque étude que ce soit sur un plan d'eau sans savoir à quel endroit s'effectue la mesure. Jamais une étude sérieuse d'un objet géographique ne s'est mise en place sans connaître les caractéristiques morphologiques et la cartographie de cet objet. Ce principe fit mettre en branle de grandes campagnes bathymétriques lors de l'essor de la limnologie sur les plus vastes plans d'eau mais il existe semble-t-il un frein à l'étude des plus petits amenant une très mauvaise connaissance du fonctionnement de ces derniers voire parfois des travaux isolés et ponctuels entraînant des conclusions erronées.

Figure 17 :

Fonctionnement théorique du système G.P.S. et récepteurs utilisés



I.3.1.1. La question de la localisation

La bathymétrie nécessite de recourir à des méthodes de localisation, d'une part pour placer précisément les points sondés, d'autre part pour cartographier avec précision les berges, les affluents et l'émissaire. Nous avons vu les différentes méthodes employées lors de notre parcours épistémologique, il va maintenant falloir désigner les méthodes adaptées à l'étude des étangs.

I.3.1.1.1. Localisation à l'aide du G.P.S.

La méthode de localisation à l'aide d'un G.P.S.⁶⁵ est à l'heure actuelle le meilleur compromis entre précision et facilité d'utilisation. La triangulation devient possible à partir de trois satellites et la précision augmente au-delà. La précision de la triangulation dépend du signal satellite, néanmoins l'utilisation de corrections différentielles permet d'atteindre une précision de l'ordre du mètre, voire du centimètre, selon le matériel utilisé. Nous allons voir tout d'abord le principe de fonctionnement de tout G.P.S. avant de décrire les trois récepteurs utilisés dans cette étude.

Principe de fonctionnement

Le système G.P.S. comprend trois segments (Fig. 17). Le segment espace composé d'un minimum de 24 satellites en orbite haute (plus de 19 000 km) de sorte qu'un récepteur reçoit, où qu'il se trouve, le signal d'au moins quatre satellites. Le segment de contrôle est composé de stations situées autour de la terre suivant les trajectoires des satellites afin de leur fournir des corrections d'orbite. Enfin, le segment utilisateur est celui du récepteur G.P.S.

⁶⁵ Le principe du système G.P.S. et ses concurrents sont abordés en première partie.

Pour pouvoir se localiser en permanence, le récepteur reçoit des satellites des données d'almanach comprenant la position approximative et l'orbite des satellites et des données d'éphéméride comprenant la position exacte, corrigée par les stations de contrôle. A partir de ces données, tout récepteur G.P.S. connaît la position exacte de chaque satellite. Pour en déduire la position au sol, le récepteur doit déterminer la distance à laquelle ces satellites se trouvent, ce calcul étant basé sur le temps d'arrivée du signal⁶⁶. Chaque mesure de distance doit être corrigée pour prendre en compte l'erreur d'horloge du récepteur (moins précises que les horloges satellites, qui sont atomiques). La plupart des récepteurs GPS sont à l'heure actuelle « multicanaux parallèles », chaque canal étant « accroché » à un satellite défini. Cette conception permet un repérage rapide des satellites dès la mise sous tension, ainsi que de bonnes performances dans les milieux difficiles.

La localisation par G.P.S. peut être perturbée par différents types d'erreurs (Fig 17). La vitesse théorique du signal des satellites est en fait ralentie en traversant l'atmosphère ; le signal peut effectuer des « trajets multiples » en étant réfléchi par des objets, ce qui allonge le temps d'arrivée et provoque des erreurs de calcul. Le nombre de satellites en vue peut être réduit par des bâtiments, du feuillage dense ou tout objet suffisamment important entre le satellite et son récepteur. Enfin, une mauvaise géométrie peut découler de satellites groupés ou en ligne. Depuis la disparition de la « validité sélective » du Département de la Défense américain, la précision moyenne des G.P.S. se situe entre 6 et 12 mètres en planimétrie horizontale.

Le système différentiel ou D.G.P.S. permet d'augmenter sensiblement cette précision. Des stations de référence placées à des positions connues permettent de déterminer les erreurs des satellites ; les données peuvent alors être corrigées en

⁶⁶ La vitesse d'une onde radio étant de 300 000 km/s

temps réel ou a posteriori par le téléchargement de fichiers de corrections différentielles. La précision D.G.P.S. est de l'ordre de 1 à 3 mètres.

La précision centimétrique peut être atteinte avec des G.P.S. équipés d'une base fonctionnant comme une station de référence. Ce point ne sera pas développé car nous n'avons pas eu recours à cette technologie pour cette étude.

Récepteurs utilisés

Le récepteur le plus couramment utilisé pour cette étude est le Geoexplorer 3 de la marque Trimble⁶⁷ (Photo 13a). Ce matériel permet une bonne intégration avec les applications de S.I.G. puisqu'il permet la saisie sur le terrain de points, de lignes et de polygones ainsi que leurs attributs, avec visualisation de la carte en temps réel. Au niveau technique, il s'agit d'un récepteur 12 canaux dont la précision après correction différentielle se situe entre 1 et 5 mètres. Le boîtier est de norme IP 55 ce qui permet de résister aux chocs mais surtout au ruissellement et à 99% d'humidité, propriété se révélant non négligeable lorsque l'on étudie le milieu aquatique. Il peut être utilisé entre -10 et +50°C, si la deuxième valeur peut sembler extrême, la première se révèle utile sous nos latitudes pour les campagnes en hiver, surtout sur le plateau de Millevaches. Ses faibles poids et encombrements sont un atout lorsque l'on utilise une barque de faibles dimensions avec beaucoup de matériel. En outre, après toutes les campagnes, des fichiers de corrections différentielles furent récupérées, et la proximité de la station de correction de Meymac permet d'afficher des marges d'erreur proches en grande majorité de 1,5 mètres.

Pour des utilisations spécifiques comme le besoin de 2 G.P.S. ou le suivi des courants, il est nécessaire de recourir à d'autres modèles de récepteurs.

⁶⁷ Récepteur du département de géographie de l'Université de Limoges.

Le e-trex de la marque Garmin⁶⁷ est extrêmement compact (Photo 13b). Le boîtier présente l'avantage d'être étanche jusqu'à 1 mètre de profondeur ; nous ne pouvons malheureusement pas disposer des corrections différentielles pour ce matériel, ce qui place sa précision à 6 mètres la plupart du temps. Les mesures prises au-delà de cette marge ont été éliminées.

Le GPSMAP 60CS de la marque Garmin⁶⁸ présente la même compacité que le précédent mais reçoit des corrections par le système WAAS/EGNOS⁶⁹ lui permettant de descendre à 1 mètre de précision (Photo 13c). Le boîtier est étanche norme IPX 7.

I.3.1.1.2. La triangulation « artisanale »

Sur de très petits plans d'eau, lorsque le couvert végétal s'avère très dense sur les berges ou lorsque l'échelle de travail nécessite une précision centimétrique, le recours à une triangulation manuelle peut être nécessaire. Si ce travail est long et fastidieux, il permet d'annoncer des marges d'erreurs de quelques centimètres seulement. Ces procédés de triangulation nécessitent l'utilisation de décamètres et d'au moins deux points correctement repérés sur le terrain, par photo-interprétation ou à partir du cadastre. Lorsque l'on veut cartographier à très grande échelle, ce type de procédé peut s'avérer indispensable, mais le temps nécessaire oblige à des interventions ponctuelles.

Pour la bathymétrie proprement dite, la méthode consiste à tendre une drisse graduée équipée de flotteurs entre deux points triangulés. Cette méthode comporte deux limites : la distance, car il est difficile de tendre correctement la drisse sur plus de 300 mètres, et le vent qui fausse les mesures en courbant la drisse. En outre, elle se

⁶⁸ Récepteur de l'A.I.G.L.E.

⁶⁹ Les systèmes WAAS (Wide Area Augmentation System) et EGNOS (European geostationary navigation overlay system) sont des systèmes différentiels. Le premier couvre l'Amérique du Nord tandis que le second concerne l'Europe.

révèle très longue à mettre en œuvre. Si la mise en place est correctement menée, cette méthode affiche une précision de l'ordre de 10 centimètres, par temps calme.

I.3.1.2. Le choix des méthodes de sondage

Dans notre épistémologie de la bathymétrie, nous avons pu constater une évolution dans le matériel : perche puis ligne de sonde, puis échosondeur. Pour l'étude des étangs, la question est différente car la problématique n'est pas celle de grandes profondeurs à atteindre mais plutôt d'une bonne disposition des points sondés et d'une grande précision dans la mesure. Quelle que soit la méthode de sondage mise en œuvre, le niveau de l'étang au déversoir doit faire l'objet d'une surveillance durant la campagne bathymétrique, afin de mettre toutes les mesures à la même référence.

I.3.1.2.1. Le sondage à la perche graduée

Pour la mesure de profondeurs inférieures à 5 mètres, l'utilisation d'une perche graduée présente de très nombreux avantages. Le premier est l'atout majeur de ce dispositif : la perche permet une excellente précision dans la mesure (précision d'ordre centimétrique).



Photo 14 : Perche bathymétrique (cliché Carlini - 2002)

La perche (Photo 14) se compose de cinq éléments d'un mètre chacun, de deux centimètres de diamètre en plastique creux et rigide. Sur ces éléments est collé un ruban de dérouleur en fibre de verre. L'ensemble est plastifié pour être totalement étanche. Les éléments s'assemblent par un pas de vis muni d'une sécurité ; la taille de la perche est adaptée selon les étangs, évitant de manier en permanence un outil de 5 mètres. La tête de sondage est composée d'un ensemble de lamelles métalliques souples disposées en étoile et constituant un disque d'environ 30 centimètres de diamètre. Cette tête est étudiée pour une estimation la plus précise du fond constitué le plus souvent d'une épaisse couche de vase. Une perche dépourvue de ce dispositif est susceptible de s'enfoncer jusqu'au substrat.

Le sondage à la perche, pour être efficace, doit mobiliser trois personnes dans une barque équipée d'un moteur électrique. Le barreur maintient le cap et une vitesse peu élevée la plus constante possible. Le sondeur mesure à la perche à intervalles réguliers en prenant soin de toujours lire la mesure lorsque la perche est parfaitement verticale⁷⁰ ; lorsqu'il annonce la mesure le troisième équipier muni d'un récepteur G.P.S. place le point puis en saisit la profondeur. Des tests ont été effectués afin de cerner la marge d'erreur de la méthode, si la perche ne reste pas parfaitement verticale. Une inclinaison de 5° de la perche par rapport à la verticale se traduit par une marge de 0,4% d'erreur soit 2 centimètres à cinq mètres de profondeur. Plus la profondeur est grande et plus la vitesse de déplacement doit être réduite, pour que la perche soit parfaitement verticale à chaque mesure. Au-delà de 3 mètres ou lorsque le temps n'est pas parfaitement calme, le bateau est immobilisé à chaque mesure. Ce fonctionnement demande une grande coordination entre les trois équipiers pour qu'un rythme constant soit maintenu. Le travail du perchiste est particulièrement délicat puisqu'il s'agit de contrôler la verticalité parfaite de la perche (à l'aide d'un

⁷⁰ Un niveau à bulle est utilisé pour plus de précision : les erreurs dues à l'inclinaison de la perche peuvent être conséquentes.

niveau à bulle), l'enfoncement dans la vase tout en lisant la mesure sans être induit en erreur par les vaguelettes éventuelles ou les mouvements de l'embarcation. Cette méthode de sondage permet la construction de bathymétries très précises et relativement rapides lorsque les opérateurs sont bien entraînés. L'utilisation du G.P.S. évite d'avoir à respecter des transects rectilignes, et des points peuvent être ponctuellement évités ou rajoutés au moment de la campagne. La préparation de transects devient donc inutile, l'observation de la morphologie émergée et les résultats des premiers transects permettent de déterminer les besoins en densité et localisation des coups de sonde. Le sondage à la perche présente néanmoins un inconvénient qui tient dans sa nature même : il s'agit de mesures ponctuelles.

I.3.1.2.2. Le sondage à la ligne de sonde

Les profondeurs supérieures à 5 mètres représentent une contrainte mécanique pour le système de perche décrit précédemment. Cette limite peut être dépassée dans les étangs limousins, néanmoins rares sont ceux dont une grande partie de la superficie excède ces valeurs. Pour des mesures ponctuelles sur des zones restreintes, une ligne de sonde peut être utilisée. Ce sondage doit se faire par un temps calme et en prenant soin de stabiliser systématiquement l'embarcation, généralement avec deux ancres. Nous avons choisi un fil de fer souple recouvert d'une gaine plastique graduée tous les centimètres et, comme le préconisait Delebecque, un plomb sphérique⁷¹. Cette méthode reste très précise⁷² car il est possible de jauger l'enfoncement du plomb dans la vase pour ces relativement faibles profondeurs ; la forme sphérique de ce dernier limite au maximum cet enfoncement.

⁷¹ L'objet utilisé est une sphère métallique de 70mm et de 680 grammes percée et équipée d'une tige filetée.

⁷² Savy, 2006, pp108-109.

Le sondage à la ligne de sonde s'effectue à l'identique de celui à la perche, néanmoins la nécessité de stabiliser la barque à chaque coup de sonde rend la manœuvre plus longue et plus délicate. Pour ces raisons, nous la réservons à des mesures très ponctuelles, près de la bonde des étangs les plus profonds.

I.3.1.2.3. L'utilisation d'un échosondeur

Nul besoin de revenir ici au principe de fonctionnement déjà décrit lors de l'épistémologie de la bathymétrie. A l'heure actuelle, l'utilisation d'échosondeur s'est très largement répandue, du fait de son utilisation en acte de pêche. De nombreux modèles sont proposés et le multifaisceaux est devenu accessible au grand public. Certains modèles sont équipés du G.P.S. et peuvent donner une estimation de la nature du fond. Néanmoins, la fonction première de ces appareils étant le repérage de poissons, la précision qu'ils offrent dans la mesure de la profondeur n'est pas optimale. Nous avons eu l'occasion de tester un échosondeur de ce type dans l'étang de Cieux pour pouvoir la comparer à notre bathymétrie effectuée à la perche. La marge d'erreur théorique de l'appareil était de 10 centimètres. La première constatation fut pour notre test que les erreurs pouvaient excéder cette marge théorique jusqu'à 17 centimètres. Mais l'inconvénient majeur est que cette marge n'est pas constante, de sorte qu'aucune correction ne peut être appliquée. Tantôt la profondeur est juste, tantôt elle est majorée ou parfois minorée. Or 17 centimètres sur une profondeur de 1,5 mètre, représente 11,3 % d'erreur, et conduit à des interprétations morphologiques erronées. Le nœud du problème se situe dans cette erreur relative ; si les étangs limousins sont profonds pour des étangs, leur profondeur maximale reste modeste au regard des lacs. Un échosondeur précis à 10 centimètres est un appareillage convenable, mais trop imprécis, du fait de la variabilité de cette imprécision, pour le travail que nous effectuons. Nous n'avons pu

tester ici, faute de temps et de moyens, de nombreux modèles d'échosondeur, car si l'étude de la bathymétrie est passionnante, elle n'est pas l'objet central de cette étude.

I.3.1.2.4. Les bathymétries réalisées

L'utilisation de l'échosondeur n'ayant pu être validée, la totalité des bathymétries présentées sont réalisées à la perche, avec parfois utilisation de ligne de sonde. Tous les étangs traités dans cette étude ont fait l'objet d'une bathymétrie précise, soit huit campagnes. Les lacs de barrage illustrant parfois le propos étant tous récents, leur carte est dérivée de l'hypsométrie avant mise en eau.

Le grand étang de Cieux, terrain commun de la géographie limnologique limougeaude, fut l'objet de campagnes bathymétriques importantes, auxquelles des collègues limnologues roumains⁷³ eurent l'obligeance de participer. La méthode employée fut l'association perche-G.P.S., à l'exception de la baie de Prnaud pour laquelle la présence d'un delta complexe nécessitait une forte densité et régularité de points, fournie par un travail à la ligne d'eau. La bathymétrie s'appuie ainsi sur un total de 626 coups de sonde, soit une densité de 18 points à l'hectare, nécessaire du fait de la complexité morphologique de cet étang.

L'étang de la Pouge, dont la morphologie allongée suit l'ancienne vallée du Gorret, fut l'objet de 161 coups de sonde, dont certains effectués au fil à plomb à l'approche de la digue. Des points furent rajoutés par la suite, portant le total à 231. La densité est ici de 8 points à l'hectare.

Le plus grand étang de cette étude, celui des Landes, a nécessité 1001 coups de sonde pour cerner une morphologie peu profonde mais complexe, donnés lors de deux jours d'une campagne intensive. La densité atteinte est ici de 11,3 points à l'hectare.

⁷³ Gheoghe Serban, Mircea Alexe & Fodorean Ioan de la faculté de géographie de l'Université de Cluj

Un total de 134 coups de sonde permet une densité de 9,1 points à l'hectare pour la bathymétrie de l'étang des Oussines.

L'étang de Bois Chenu, à Rochechouart, a demandé 184 coups de sonde soit 29 coups/ha.

Le lac du pont à l'Age, vu ses profondeurs a demandé un grand nombre de coups de fil a plomb, ce qui a occasionné un travail plus long. 148 profondeurs ont été mesurées représentant environ 8 coups/ha.

Les étangs-laboratoires de cette étude représentent des densités de sondage plus importantes, du fait de leurs plus faibles superficies et profondeurs : l'étang de Meuzac 52 sondages soit 36coups/ha ; enfin les étangs du Theil et des Garennes ou une ligne d'eau fut utilisée, atteignent respectivement les chiffres records de 92 et 104 points/ha.

Cette répartition des densités de sondage ne doit rien au hasard. Dans les grands lacs, les processus morphologiques sont de grande ampleur dans le temps et l'espace ; dans les étangs, certains de ces processus et des formes qui les attestent sont réduits et la bathymétrie doit se densifier afin de les repérer si ils existent.

I.3.1.3. Les méthodes d'étude du sédiment

La question du stockage sédimentaire et de son corollaire la vidange, est très présente dans la gestion des étangs. Le fond des étangs est majoritairement couvert de vase⁷⁴, appellation recouvrant un dépôt gris brun à noirâtre (dégageant une odeur putride si la matière organique est en décomposition anaérobie). Cette vase est constituée de matériel très fin, avec une fraction organique plus ou moins

⁷⁴ « Le sol des étangs est constitué d'un substrat imperméable recouvert d'un terrain plus ou moins sableux ou argileux, lui-même surmonté d'une certaine épaisseur de vase » (Dussart, 1966, p235).

importante. Le problème de stockage de la vase en étang nécessite de répondre à des questions de quantité et de qualité de ce matériel.

I.3.1.3.1. L'estimation de l'épaisseur du sédiment

A l'instar des autres étangs limousins, les objets de notre étude sont d'origine anthropique. La mise en eau, même ancienne, doit se réaliser dans une cuvette dont le fond est suffisamment étanche. Il s'agit le plus souvent d'une arène granitique et de zones argileuses. Ce substrat permet la mise en place d'un procédé permettant la mesure précise de l'épaisseur de vase. Les faibles échelles autant temporelles que spatiales qui régissent le fonctionnement des étangs ne permettent pas d'induration du sédiment ; l'absence de mise en assec en Limousin laisse la vase dans son état de sédiment meuble et fortement hydromorphe. Ainsi, si la limite eau-sédiment reste toujours difficile à définir, la limite vase-substratum est beaucoup plus nette. Nous avons donc conçu un système de perche susceptible de s'enfoncer aisément dans le sédiment, mais très difficilement dans l'argile ou l'arène granitique (Fig. 18).

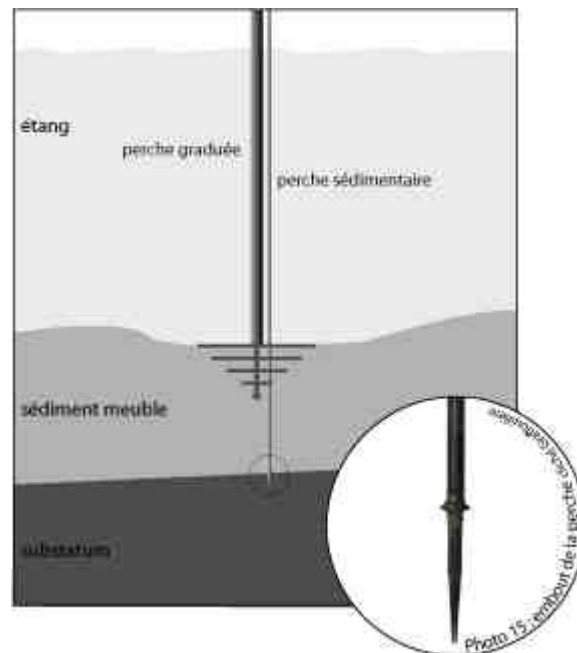


Figure 18 : Principe de la perche sédimentaire

Cette perche est composée de 3 tubes métalliques creux de 2 mètres, d'une section de 9 millimètres. Cette fine perche est terminée par une section conique pointue de 10 centimètres munie d'un arrêtoir de 2 centimètres de diamètre (Photo 15). L'efficacité de ce mécanisme⁷⁵ a été éprouvée dans un étang vidangé afin de juger de l'enfoncement dans la vase, et a contrario du blocage occasionné par le substratum⁷⁶. Les différents tests s'avérant concluants, il fallait régler le problème de la mesure. La perche étant trop fine pour être graduée correctement, il fut décidé de la fixer par un système de collier à la perche bathymétrique. Une fois la perche bathymétrique enfoncée, il suffit de faire coulisser la perche sédimentaire jusqu'au substratum : l'épaisseur du sédiment découle de la différence entre les deux valeurs. Notons ici que chaque mesure nécessite la stabilisation complète de l'embarcation avec deux ancres et la perche est manipulée par deux opérateurs : l'un s'occupe de la verticalité de la perche bathymétrique tandis que le second manie la perche sédimentaire. Ce système est limité par les matériaux qui le constituent : nous avons vu que la perche bathymétrique ne pouvait excéder cinq mètres, la perche sédimentaire ne peut en dépasser six. Il devient donc difficile d'utiliser le système avec plus de quatre mètres d'eau, ou plus de trois mètres de sédiments. Néanmoins, pour des profondeurs de trois mètres avec des épaisseurs de vase allant jusqu'à deux mètres, le dispositif s'avère un peu encombrant mais très efficace et précis.

⁷⁵ Le système a déjà été éprouvé par Banas (2001) : « La mesure de l'épaisseur de sédiment est réalisée à l'aide d'une perche graduée, munie à son extrémité inférieure d'un cône d'élargissement. L'élargissement située à la base joue alors un rôle de butée. »

⁷⁶ Le dispositif a été testé dans l'étang de Cieux à divers endroits durant la vidange ; une fois la mesure effectuée une coupe était réalisée pour vérifier que le système s'arrêtait bien à la limite vase-substratum. Les positions des tests de ce type ont été relevés : lors de la mesure des épaisseurs en pleine eau, les valeurs étaient identiques.

I.3.1.3.2. Prélèvement de sédiment à l'aide de la benne de Lenz

L'utilisation d'une benne de Lenz, tout comme celle d'une benne d'Ekman, permet de prélever une certaine quantité de sédiment sur le fond du plan d'eau. Les deux mâchoires de la benne sont armées, c'est-à-dire maintenues ouvertes par des filins métalliques. La benne est ensuite lâchée et s'enfonce dans le sédiment. Un messenger plombé coulissant le long du câble reliant la benne au bateau permet la fermeture des mâchoires. La benne peut alors être remontée pour récupérer l'échantillon. Ce type de dispositif est particulièrement efficace dans du sédiment meuble et effectue un prélèvement facilement quelle que soit la profondeur. La différence entre la benne de Lenz et la traditionnelle dite d'Ekman réside dans la possibilité de faire des tranches de sédiment à l'aide de plaques s'insérant par le côté de l'appareil. Sur des fonds d'étangs où le substrat est constitué d'une vase meuble et épaisse, ce dispositif ne fut pas utile.

Les prélèvements effectués dans le Grand étang de Cieux ont été réalisés pour connaître la teneur en matière organique du sédiment recouvrant le fond de l'étang. Pour cela la méthode par perte au feu à 550°C a été employée.

Etudier la morphologie consiste à étudier la cuvette dans laquelle l'étang se love, et qu'il modifie au cours du temps. Comprendre cette morphologie, sa genèse et son évolution est essentielle. L'étang, à l'instar du lac, est un volume d'eau issu du bassin d'alimentation retenu en arrière d'une contrepenne, souvent une digue. Le volume d'eau est directement conditionné par la forme de la cuvette et son volume est une des clés de son fonctionnement. La compréhension de ces milieux passe donc par une étude de ce volume d'eau, de ses apports et de ses pertes, de ses mouvements horizontaux et verticaux, tout cela étant envisageable dès lors que la cuvette est cartographiée.

I.3.2. L'étude de l'hydrologie

La masse d'eau constituant l'étang n'est ni inerte, ni isolée. Les différents processus sont propres au milieu stagnastre, tout en subissant une influence des affluents du bassin d'alimentation. L'étang lui-même conditionne le fonctionnement de son émissaire. Il est primordial de connaître précisément les volumes d'eau entrant et sortant d'un plan d'eau ainsi que leur rythme, afin de pouvoir quantifier le fonctionnement hydrologique de l'étang, son inertie et ses impacts sur le milieu.

I.3.2.1. La surveillance des cours d'eau

Les deux facteurs nous emmenant à surveiller les cours d'eau sont le débit liquide de ces derniers, ainsi que la quantité de Matières En Suspension transportées.

I.3.2.1.1. La mesure des débits

Mesurer le débit d'un cours d'eau suit une méthodologie précise, déjà fort bien établie. En premier lieu, il est nécessaire de choisir une section transversale dans un endroit du cours d'eau relativement rectiligne et où la morphologie de la section restera relativement stable durant la période de mesure. L'estimation de la vitesse dans cette section transversale peut être réalisée par différentes méthodes. L'utilisation d'un micro-moulinet C2 de la marque OTT a été privilégiée (Photo 16).

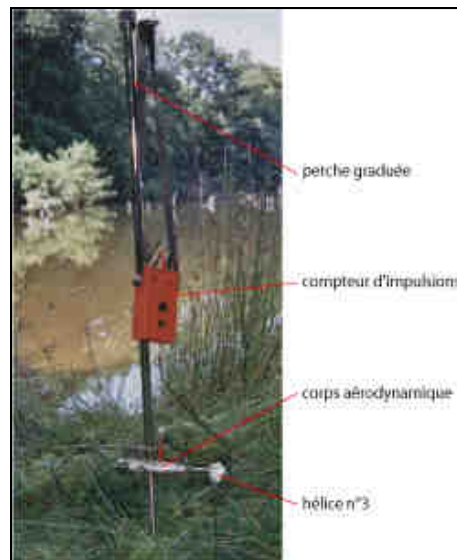


Photo 16 : Le micro-moulinet C2 (cliché Carlini)

Son fonctionnement repose sur le nombre de tours d'une hélice en un temps donné. Le moulinet est composé d'une perche graduée sur laquelle coulisse un corps aérodynamique en laiton nickelé supportant l'hélice. Chaque tour de l'axe supportant l'hélice émet une impulsion comptabilisée par un compteur d'impulsion OTT Z30 branché sur le corps du moulinet. L'hélice revêt une importance capitale dans ce dispositif de mesure ; différents modèles existent selon la plage de vitesse mesurée. Le galbe d'une hélice est unique, chacune est donc étalonnée individuellement. Il existe une formule permettant de convertir le nombre de tours en vitesse pour chaque hélice. Nous utilisons une hélice n°3 de diamètre 50 mm permettant de travailler dans des vitesses comprises entre 0,034 et 4 mètres par seconde.

$$v = k * n + a$$

v = vitesse en m/s ; k = pas hydraulique de l'hélice en m ; n = nombre de tours de l'hélice par seconde ; a = constante en m/s

$$n \leq 0,65 \quad v = 0,2322 * n + 0,022$$

$$0,65 \leq n \leq 9,64 \quad v = 0,2568 * n - 0,006$$

Les débits ont été mesurés durant une année pour cerner le comportement hydrologique du Grand étang de Cieux. Sur ses quatre affluents, trois stations ont été mises en place, au plus près de l'étang. La station du ruisseau de Pranaud, celle du ruisseau de Polisserie et enfin celle des Bonnes Fonds. Le débit du ruisseau provenant de l'étang des Garennes est estimé au déversoir de ce dernier. Enfin, une station disposée en aval de l'étang permet de traduire les hauteurs d'eau de ce dernier en débit dans l'émissaire. Durant la période du 5 juin 2002 au 30 juillet 2003, les débits ont ainsi été mesurés à une cadence hebdomadaire.

Chaque station a été choisie pour sa stabilité, néanmoins cette dernière peut être artificiellement consolidée, comme en aval de l'étang de Cieux. Un décimètre est placé transversalement à la section, et des verticales sont choisies, le long desquelles un certain nombre de points sont mesurés. A partir de la vitesse d'écoulement pour chaque point et de la connaissance de la surface mouillée totale, il devient possible de calculer le débit. A chaque station est placée une échelle limnimétrique qui permet d'établir une correspondance entre hauteur d'eau et débit. Lorsque la courbe de tarage qui traduit cette relation est réalisée, le débit peut être estimé à partir de la seule hauteur d'eau.

L'estimation des écoulements les plus faibles a pu être réalisée grâce à la méthode dite par empotement, soit le temps de remplissage d'un contenant d'un volume connu. Cette méthode a permis de quantifier les pertes par infiltration au travers de la pelle de l'étang, qui s'évacuent dans la pêcherie avant de rejoindre le ruisseau de l'étang.

Les déversoirs des étangs représentent un cas particulier ; il est possible de trouver dans la littérature potamologique des formules dites de déversoir. Leur utilisation amène à des erreurs conséquentes pour les étangs, car il s'agit de formules

adaptées pour des seuils situés en cours d'eau. La constante correspondant à la vitesse est trop élevée et amène à des surestimations de débit. Grâce à des mesures au moulinet et au flotteur en déversoir, nous avons pu mesurer une vitesse moyenne qui, couplée à la largeur du déversoir et à la hauteur de l'eau permet une estimation convenable de ces débits. Le recours à cette méthode est nécessaire pour l'étang des Garennes, pour lequel la morphologie aval de l'exutoire interdit un jaugeage au moulinet ou par empotement.

I.3.2.1.2. La mesure des MES

Les étangs sont souvent qualifiés de bacs de décantation piégeant les sédiments, cause des relargages constatés au moment des vidanges. Toute cuvette, qu'elle soit lacustre ou stagnustre, a pour dessein la disparition par comblement sédimentaire. Nous savons en outre qu'une grande partie de la sédimentation lacustre est autochtone et pour une grande partie, du moins en milieu tempéré océanique, biogène⁷⁷.

Le Grand étang de Cieux a fait l'objet d'une surveillance de ses entrées et sorties en matières en suspension. Les points de prélèvements se situent au niveau des échelles limnimétriques, afin de pouvoir ramener les taux de matières en suspension au débit des cours d'eau.

Sur les quatre stations, des prélèvements d'eau dans des flacons d'un litre ont été effectués à une cadence hebdomadaire. L'eau est toujours prélevée sous la surface, à l'endroit où le courant est le plus rapide afin que l'échantillon soit le plus représentatif possible du flux réel de particules⁷⁸.

⁷⁷ Maleval, 2002

⁷⁸ Maleval, 2002, p46

L'obtention des concentrations en MES doit se faire selon un protocole précis défini par l'AFNOR⁷⁹. Nous avons choisi de travailler par filtration sur filtres en microfibres de verre.

Le procédé de filtration consiste en un dispositif permettant de recueillir les MES d'un certain volume d'eau au travers d'un filtre de 47mm de diamètre. Le processus est accéléré par la présence d'une pompe à vide.

Les filtres sont tout d'abord lavés à l'eau distillée puis séchés 2 heures à l'étuve. A leur sortie, ils sont pesés sur une balance précise à 2 millièmes de grammes puis sont placés dans le dispositif de filtration. Les échantillons sont homogénéisés puis filtrés ; les filtres sont de nouveau placés 2 heures à l'étuve puis pesés.

Le poids calculé en milligrammes par litre doit ensuite être rapporté au débit des cours d'eau.

I.3.2.2. La surveillance des niveaux stagnustres

La mesure des débits entrants et sortants des étangs ne doit pas être le seul facteur utilisé pour comprendre leur comportement hydrologique. Le système de déversement du plan d'eau, que ce soit un moine ou un déversoir de surface amène des modifications du niveau d'eau ne suivant pas forcément le débit aval. Ce fonctionnement est particulièrement remarquable avec un déversoir de surface. Trois types de relations peuvent être mises en évidence entre déversoir et débit aval : montée du niveau - augmentation du débit, baisse du niveau - augmentation du débit, montée du niveau - baisse du débit. A cela s'ajoutent des décalages entre le comportement du niveau d'eau et les comportements des émissaires et tributaires. Ces divergences de fonctionnement permettent d'isoler l'inertie du plan d'eau et il est ainsi nécessaire de surveiller son niveau avec la même périodicité que les débits.

⁷⁹ AFNOR, 1997.

La connaissance du niveau revêt aussi une importance primordiale dans l'étude de la morphologie car la superficie et par là même le volume, sont étroitement dépendants de ce niveau. Pour certains étangs, comme le Grand étang de Cieux, cette variation saisonnière du niveau peut être relativement considérable.

La méthodologie de mesure est simple, puisqu'il s'agit uniquement de relever à intervalles réguliers le niveau du plan d'eau à un point fixe. Cette mesure a été effectuée pour le grand étang de Cieux entre août 1999 et juillet 2003.

I.3.2.3. La surveillance des facteurs climatiques

Caractériser le fonctionnement hydrologique d'un étang nécessite de replacer ce dernier dans son contexte climatique. Le régime des cours d'eau limousins est en effet de type tempéré océanique.

De nombreux facteurs climatiques influent sur le fonctionnement hydrologique d'un étang. Il est nécessaire de connaître un certain nombre de paramètres à proximité du plan d'eau étudié. Les précipitations, le vent, l'évaporation et évidemment les températures de l'air sont des facteurs primordiaux dans l'étude du bilan hydrologique. La station complète de Météo France la plus proche est celle de Limoges Bellegarde, ou celle de Nantiat qui ne mesure que les températures et les précipitations. Il fut choisi dans le cadre du P.E.R.E. et de recherche sur l'influence de l'évaporation⁸⁰ de mettre en place une station autonome au plus près de l'étang de Cieux⁸¹. La station utilisée est une *Weather Monitor II* totalement automatisée autoalimentée par capteur solaire (Photo 17).

⁸⁰ Nion, 2002, 2003.

⁸¹ La seule possibilité fut deux kilomètres en aval, dans une propriété privée ; la placer au bord de l'étang aurait représenté trop de risques de vol ou de dégradations.

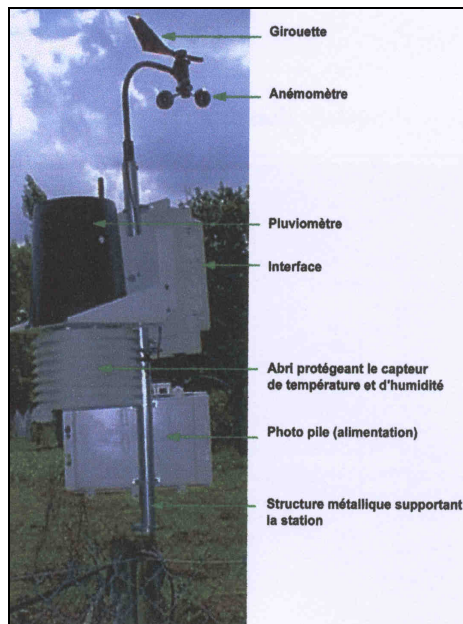


Photo 17 : Station météo Weather Monitor II (cliché Nion, 2002)

Cette station est équipée d'un anémomètre-girouette, d'un pluviomètre à augets basculants, d'un thermo hygromètre et d'un baromètre. La station dispense divers types de mesures, directes ou recalculées : température, température du point de rosée, température ressentie au vent (*windchill*) degré d'hygrométrie, précipitations journalières ou cumulées, vitesse et direction du vent et pression atmosphérique. Ces données sont consultables en temps réel sur une console ou téléchargeables sur un PC par liaison filaire. Durant la période nous concernant, les données ont été échantillonnées toutes les heures, ce qui représentait 60 jours de stockage. En outre, l'évaporation fut mesurée à l'aide d'un bac évaporatoire de classe A, afin de vérifier de l'efficacité de la formule de Penman sur le terrain d'étude⁸².

⁸² Nion, 2002, Touchart & Graffouillère, 2004.

I.3.3. L'étude des courants

Etudier les courants en étang nécessite une réflexion méthodologique : aucun travail similaire n'existe en effet dans la bibliographie. Le repérage et le suivi des courants s'opère par un mélange entre méthodes statiques et méthodes dynamiques. Le premier défi est de mettre en évidence un courant avant même de chercher à le cartographier. La nature fugace et instable de ces derniers, ainsi que leur faible puissance a conduit à leur « inexistence » scientifique. Nous allons pourtant démontrer que de tels courants existent et qu'ils sont par essence le lien entre les autres processus au cœur des étangs.

Enfin, il faut noter l'importance du vent dans la création et la modification des courants : ce dernier devra donc être mesuré avec autant de soin que les courants eux-mêmes.

I.3.3.1. Méthodes eulériennes (suivi statique)

Les méthodes eulériennes regroupent les procédés permettant d'étudier le courant à partir d'un ou plusieurs dispositifs fixes. Ces méthodes permettent d'avoir de nombreuses données pour les points équipés. Les dispositifs permettent donc d'effectuer une surveillance de l'évolution des courants. L'inconvénient majeur de ces méthodes est la nécessité de multiplier les points pour pouvoir réaliser une cartographie des courants. L'étude se heurte alors rapidement à des problèmes matériels : multiplication des dispositifs d'enregistrement, perturbation du courant par l'omniprésence de ces dispositifs.

Trois types de matériels de suivi statique ont été utilisés dans cette étude. Un micro-moulinet, un courantomètre et des thermomètres enregistreurs.

I.3.3.1.1. Le micro moulinet

Le micro moulinet utilisé pour tenter de quantifier les courants stagnants est celui décrit plus avant, utilisé pour la mesure des débits. L'hélice employée balayant une plage de vitesses allant de 3,5 cm/s à 4 m/s, il était possible d'envisager son utilisation pour des courants. L'autre avantage du micro moulinet est la possibilité de l'utiliser avec une profondeur très faible, environ 10 cm. Cette méthode fut donc la première employée pour tenter de déterminer la présence ou non de courants en eau peu profondes. Cette méthode est adaptée à la mesure de courants à l'interface entre milieux lotiques et lentiques. Toutefois, la présence de la personne prenant les mesures ou celle d'une barque en eau peu profonde est susceptible de perturber les mesures. En outre, ce type de matériel n'enregistre pas les données.

Le micro moulinet ainsi employé doit amener à de nombreuses précautions notamment concernant son hélice. En effet, cette dernière peut être entraînée par un courant venant de biais : chaque point doit donc faire l'objet de plusieurs mesures en éventail afin de déterminer l'angle où la vitesse est maximale.

Malgré un certain nombre d'inconvénients dus au détournement du micro moulinet en instrument de mesure des courants en milieu « stagnant », le procédé a permis d'obtenir des résultats probants. L'utilisation d'un réseau de points de mesure permet de palier les inconvénients d'orientation de l'hélice.

Mesurer les courants en pleine eau devient évidemment impossible avec ce type d'instrumentation. Il faut alors recourir à un matériel spécifiquement étudié pour la mesure des courants.

I.3.3.1.2. Le courantomètre

L'étude des courants étant particulièrement développée en océanographie, le matériel adéquat existe. Le matériel choisi est un courantomètre Doppler⁸³ capable de déterminer la vitesse et la direction d'un courant.



Photo 18 : Courantomètre Doppler, console de lecture et sonde (cliché Carlini)

Le dispositif consiste en une sonde de 800 grammes en titane et durotong⁸⁴ (Photo 18). Cette sonde est reliée par un câble de 25 mètres à une console⁸⁵ affichant à intervalles réguliers vitesse du courant, direction de celui-ci et température de l'eau (Photo 18). La plage de mesure de vitesse s'étale de 0 à 300 cm/s avec une précision absolue de $\pm 0,15$ cm/s. La direction est rapportée en degrés de 0 à 360, par rapport au nord magnétique, avec une précision de $\pm 5^\circ$. Enfin, la température peut être mesurée entre -10°C et 43°C avec une précision de $\pm 0,08^\circ\text{C}$.

Le courantomètre est opérationnel entre -10°C et 50°C , et jusqu'à 500 mètres de profondeur, ce qui permet raisonnablement d'augurer de son bon fonctionnement dans les étangs limousins. L'inconvénient majeur est l'obligation de l'utiliser à 75

⁸³ Doppler Current Sensor 3900, Andraaa Instruments

⁸⁴ Type de polyuréthane

⁸⁵ Display Unit 3315, Andraaa Instruments

centimètres minimum sous la surface et 50 centimètres au moins du fond de l'eau. Son utilisation est donc à exclure dans de trop faibles profondeurs.

Le principe du courantomètre Doppler repose sur l'émission d'ondes par quatre transducteurs placés dans le corps de la sonde. Ces transducteurs émettent des impulsions acoustiques d'une milliseconde, d'un degré d'angle, de 25 watts de puissance et de 2 MHz de fréquence. Les transducteurs reçoivent ensuite l'énergie réfléchiée par les particules dans une zone située entre 40 centimètres et 2,2 mètres. Les mesures sont combinées à un compas interne à effet de Hall afin de donner vitesse et direction du courant.

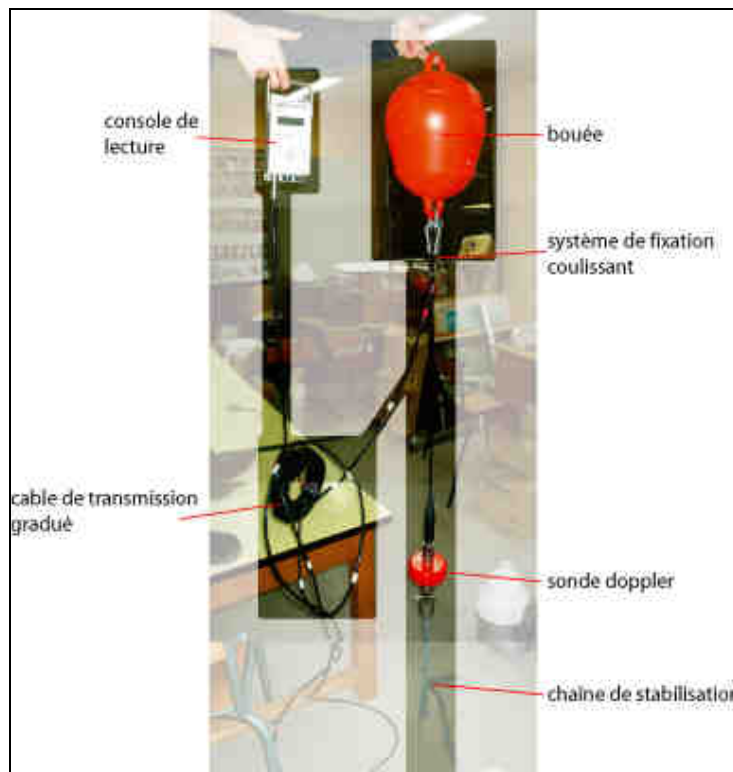


Photo 19 : Courantomètre Doppler et sa bouée stabilisatrice présentées au laboratoire (cliché Carlini)

Ce matériel de précision permet d'effectuer des mesures de courant dès que la profondeur dépasse 1,25 mètres, et doit être éloigné de la barque au maximum. Pour cela, nous avons choisi de la fixer sur une bouée stabilisatrice pour que la sonde ne soit pas perturbée par les mouvements de notre embarcation (Photo 19).

I.3.3.1.3. Les thermomètres

Dans certains cas bien précis, le suivi d'un courant peut être effectué à l'aide de seuls thermomètres. Le courant doit dans ce cas de figure avoir une température différente de l'eau l'entourant. Les courants de densité⁸⁶ connaissent de telles caractéristiques. Un maillage précis de thermomètres enregistreurs peut alors permettre de déceler la présence et l'évolution d'un tel type de courant.



Photo 20 : Thermomètre enregistreur (cliché Carlini)

Les thermomètres enregistreurs employés sont ceux déjà utilisés par Laurent Touchart depuis 1995 dans les cours et plans d'eau limousins. Il s'agit de *Tinytag Data Loggers* dont la plage de mesure s'étend de -40 à 85°C (Photo 20). La sonde est interne, et le temps de réponse pour une prise de données est de 8 secondes. Leur résolution est de un dixième de degré et leur précision annoncée par le fabricant est de deux dixièmes, ce qui permet une approche thermique convenable. Leur boîtier de petites dimensions (un pavé dont la base mesure 78mm de large et 50mm de long, sa hauteur étant de 38mm) est classé « IP-68 » et étanche jusqu'à 15m de profondeur. Leur poids est de l'ordre de 140 grammes. Le *Tinytag Data Logger* peut enregistrer jusqu'à 7 900 données et même 16 000 données pour les plus récents. Leur autonomie

⁸⁶ Les différents types de courants sont abordés dans la partie III

énergétique est assurée par des piles au lithium. La compacité de ce matériel va être déterminante dans le dispositif décrit en troisième partie.

I.3.3.2. Méthodes lagrangiennes (suivi dynamique)

Les méthodes lagrangiennes regroupent les procédés permettant d'étudier le courant à partir d'un ou plusieurs dispositifs mobiles. Tout objet pouvant dériver dans le courant peut être utilisé. Le travail en étang nécessite de pouvoir suivre le matériel afin de connaître son trajet : les surfaces couvertes ne sont pas suffisamment grandes pour extrapoler un trajet à partir des seuls points de départ et d'arrivée.

Les dispositifs employés doivent donc être repérables depuis la berge ou une embarcation, ou un dispositif d'enregistrement de leur parcours.

I.3.3.2.1. Les bouées dérivantes simples

La méthode la plus élémentaire pour attester de la présence d'un courant consiste à laisser dériver un corps entraîné par ledit courant. Cette méthode d'abord excessivement simple, voire simpliste nécessite un certain nombre de précautions pour être scientifiquement valide. Ce type de système à l'avantage d'être petit et peu onéreux à fabriquer, donc multipliable autant que nécessaire. En outre, ces bouées étant de faible taille, elles se révèlent particulièrement sensibles, même aux courants les plus faibles.

Le premier problème provient de la difficulté à repérer de petites bouées avec précision sur une grande étendue d'eau. La cartographie des courants suivis peut donc s'avérer difficile. Le second écueil possible est de bâtir un dispositif plus sensible au vent qu'au courant de l'étang. Concilier une faible prise au vent et une bonne visibilité du dispositif relève de l'impossible. Dans les dispositifs présentés ici,

il a été choisi de privilégier la faible prise au vent et les mesures ont été réalisées dans des zones réduites, où les bouées étaient visibles.



Photo 21 & 22 : Les bouées dérivantes type I et II

La bouée dérivante type I est construite à partir d'un flotteur en plastique rouge (Photo 21). Ce dernier est traversé par une tige filetée permettant la mise en place de lests. Cette opération réalisée, le flotteur est maintenu verticalement dans l'eau par le poids et flotte en subsurface pour être le moins possible sensible au vent. La bouée type I permet d'estimer la direction d'un courant de surface.

La bouée dérivante type II est construite à partir d'un flotteur oblong sculpté dans du stirodur (Photo 22). Ce flotteur est relié par une drisse en polypropylène à un assemblage de flotteurs laissant pénétrer l'eau, réglables à une profondeur désirée. Cette bouée type II permet de suivre des courants situés entre la surface et 40 centimètres de profondeur.

Comme nous l'avons évoqué, les bouées I et II présentent l'inconvénient d'une grande difficulté de cartographie des courants observés. Il a donc été nécessaire de mettre en place un dispositif plus complet.

Figure 19 :
Présentation de la bouée dérivante avec dérive profonde et G.P.S.



Photo 24 : Face supérieure avec G.P.S.
(cliché Carlini)

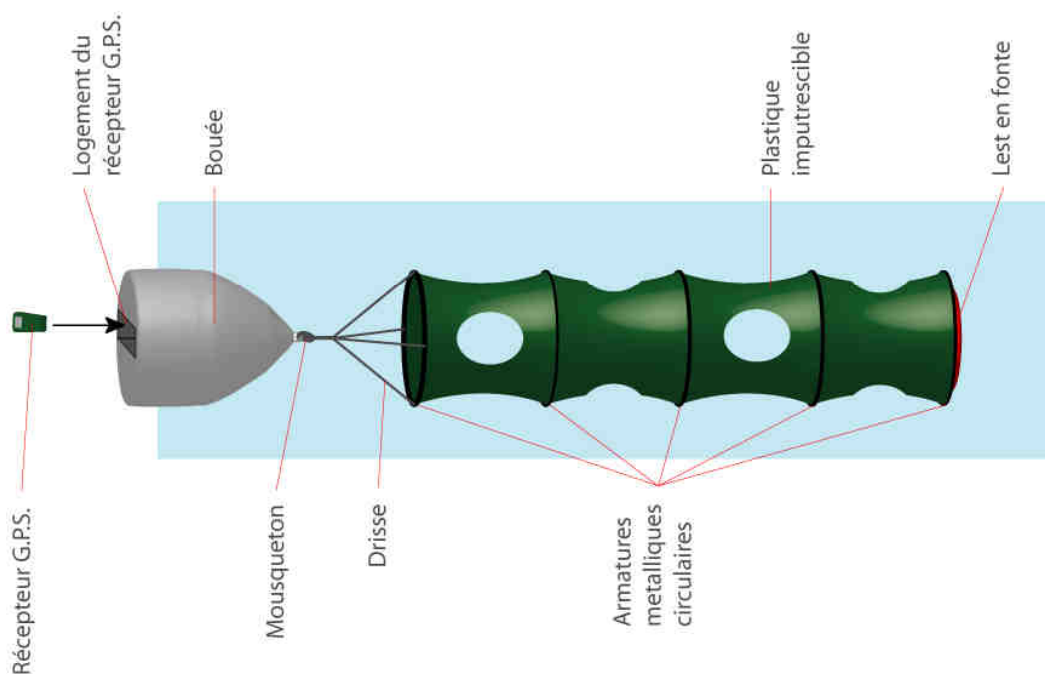


Photo 23 : bouée dérivante hors d'eau
(cliché Carlini)

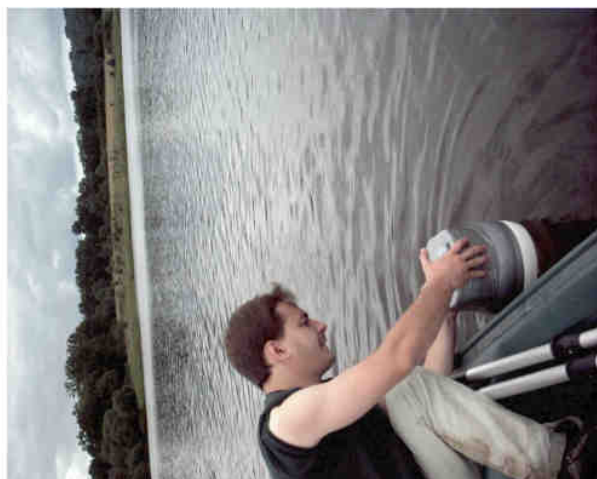


Photo 25 : Mise à l'eau sur l'étang de Cieux - Juillet 2003
(cliché Papon)



Photo 26 : Bouée dérivante et bouée test
(cliché Carlini)

Conception de la Bouée : M. Carlini - 2003
Réalisation de la bouée : M. Carlini, B. Savy, P. Papon - 2003
Conception et réalisation M. Carlini - Univ. Limoges - 2005

I.3.3.2.2. La conception d'une bouée équipée d'une dérive profonde et d'un GPS

Lors de l'étude des courants à l'aide de bouées dérivantes, la question de la prise au vent est toujours posée, quelle que soit la forme et l'enfoncement de la bouée. Il était donc nécessaire de réfléchir à un système dérivant dont la partie immergée prendrait l'ascendant sur la prise au vent et permettrait une cartographie précise des courants.

Le principe d'une bouée dérivante équipée d'une « holey-sock drogue » était le plus séduisant. Néanmoins, la taille imposante de ces bouées interdisait leur utilisation pour nos recherches, il fallut donc construire un prototype adapté aux problématiques stagnustres (Figure 19 & Photo 23). La partie supérieure est constituée d'une bouée coiffée d'un support d'un matériau léger (stirodur) destiné à héberger un récepteur GPS (Photo 24). La dérive mesurant 80 centimètres de long pour 20 centimètres de diamètre est constituée d'un plastique imputrescible et très résistant maintenu autour d'une armature constituée de cercles métalliques, le tout lesté par un disque en fonte.

Une fois le récepteur GPS calé sur les satellites, la bouée peut être lâchée (Photo 25) ; à sa récupération, le tracé GPS permet de visualiser le déplacement du courant. Le récepteur GPS est programmé pour enregistrer un jeu de coordonnées longitude-latitude suivant un intervalle de temps régulier. La distance entre chaque point étant connue, la vitesse de dérive de la bouée peut être calculée.

La fiabilité de ce dispositif devait être éprouvée sur le terrain, sa conception artisanale et son inhabituelle utilisation en plan d'eau, de petite taille de surcroît, levant un certain nombre de questions. Une fois les problèmes d'équilibre, de flottaison et d'enfoncement calibrés par de nombreux tests, se posa le problème de l'efficacité réelle par rapports aux courants stagnustres. Deux dispositifs ont été mis en œuvre : tout d'abord, une simple bouée, en tous point identiques à celle de notre

dispositif dérivant, lestée à l'identique, mais privée de la dérive profonde. Libérée en même temps, elle permet de se rendre compte de la dérive d'un corps soumis à l'influence du vent lorsque ce dernier est important (Photo 26). Secondairement, un lest de poids identique à la dérive est prévu pour la bouée GPS pour une estimation des courants de surface par vent très faible ou nul.

I.3.3.3. La surveillance du vent

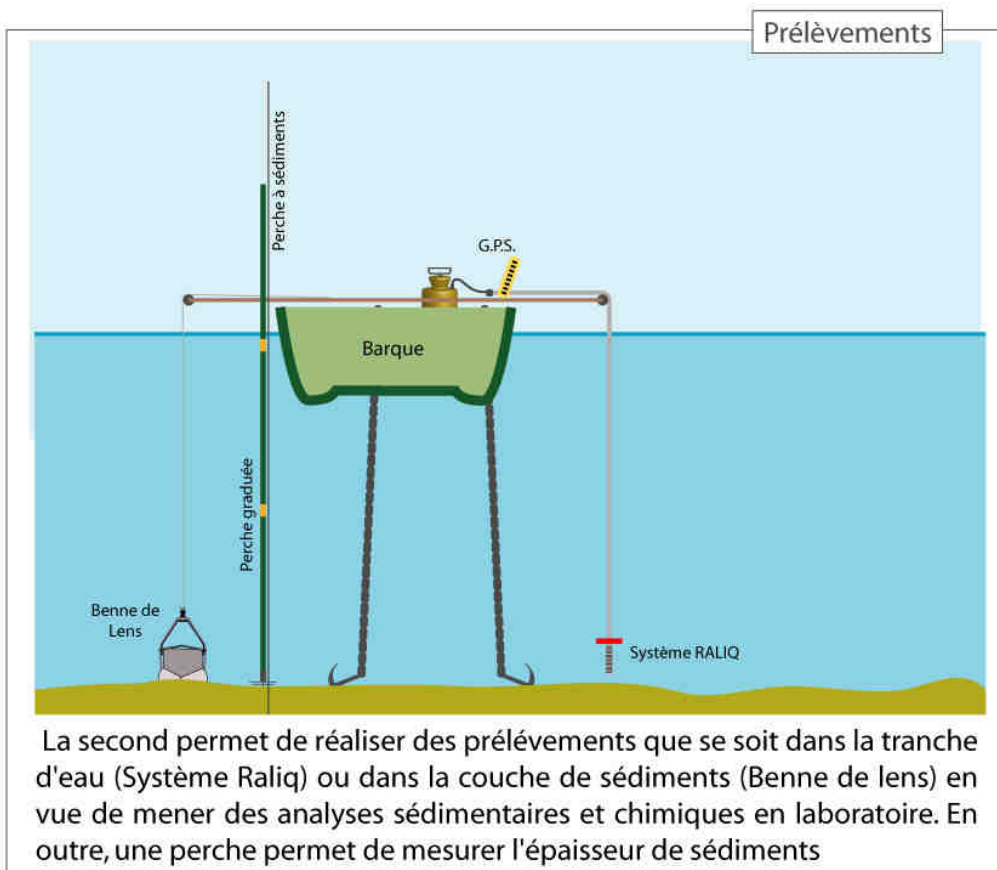
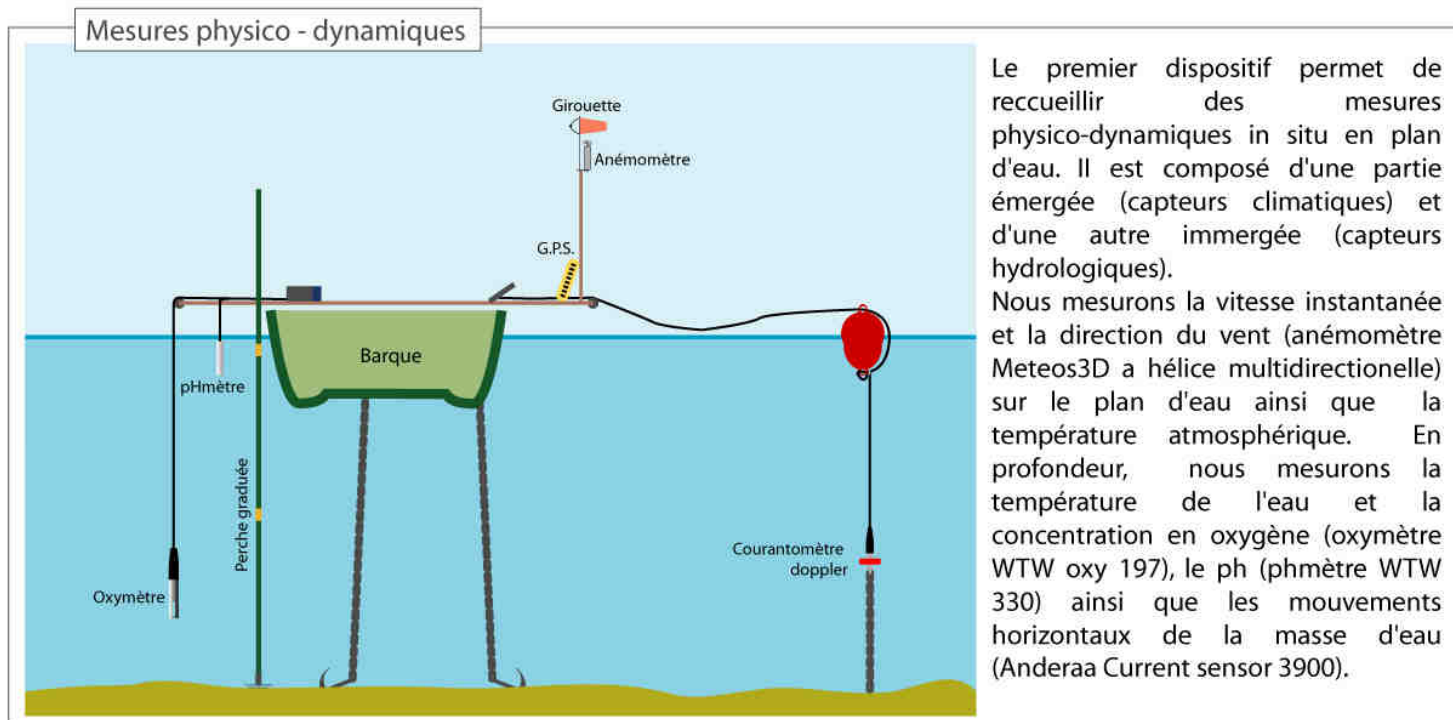
Les types de courants lacustres et leur origine seront abordés lors de la troisième partie de ce travail, néanmoins avançons ici l'influence primordiale du vent.

Les mesures de courants présentées ont été effectuées sur des étangs ou des retenues de barrage avec des méthodes adaptées à une grande échelle de travail. Il semblait donc inenvisageable d'utiliser, pour recadrer ces mesures, des estimations de vent fournies par les stations Météo-France où ce dernier est mesuré à sept mètres au-dessus du sol, et qui sont à la station de Limoges Bellegarde. Dans le cas des mesures de courant sur le Grand étang de Cieux, les relevés de notre station automatique située à deux kilomètres ne suffisaient pas non plus. Un protocole précis a donc été établi afin de rendre la précision de la mesure de vent en adéquation avec celle des courants.

Présentation du laboratoire de terrain

Modifications de l'embarcation : Carlini, Papon, Savy - Conception et réalisation : Carlini, Savy 2005

Les campagnes de mesure sur plan d'eau de petite et moyenne taille nécessite un dispositif de terrain adapté. L'embarcation est munie d'un moteur électrique permettant un bonne maniabilité dans les déplacements et une grande autonomie. Nous avons adapté cette embarcation de manière à la transformer en véritable laboratoire de terrain. La mise en place d'un support transversal en bois muni de poulies aux extrémités permet d'embarquer les instruments de mesure selon deux dispositifs.



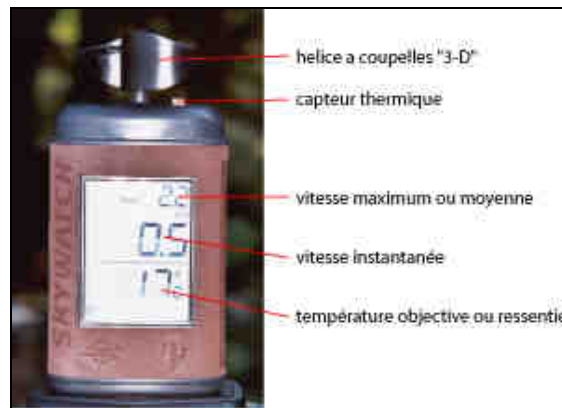


Photo 27 : Anémomètre portable Skywatch 3-D (cliché Carlini)

L'armature fixée sur la barque possède un mat escamotable dont l'extrémité accueille une girouette précise et robuste ainsi qu'un anémomètre mesurant la vitesse du vent instantanée et la température de l'air (photo 27). Ces deux dispositifs se situent à 1,5 mètres au dessus de la surface de l'eau (encadré α).

Lorsque les bouées dérivantes sont libérées, la barque est immobilisée par deux ancres, et sa position est déterminée au GPS. Un des chercheurs présents dans la barque a pour rôle de consigner la vitesse du vent et sa direction, déterminée grâce à une boussole de précision. La périodicité des relevés est similaire à celle programmée sur le GPS de la bouée dérivante (5 à 30 secondes selon les campagnes). Des mesures de vent exhaustives et précises peuvent donc par la suite être comparées avec les mesures de courant.

I.4. Apports de l'informatique et de la géomatique à la géographie limnologique

L'apparition de l'informatique et des technologies de l'information et de la communication ont révolutionné de nombreuses disciplines. Ainsi, la cartographie est devenue ces dernières années indissociable du mot informatique. La

transformation s'est opérée sur trois plans : les techniques, les méthodes et les concepts⁸⁷. Les innovations sont de natures différentes : répéter, améliorer et accélérer des procédés déjà connus, réaliser de nouveaux documents à partir de méthodes connues mais non réalisables manuellement et enfin permettre la conception de nouveautés que seule l'informatique peut produire. Cette révolution de la cartographie se lit au travers de techniques de traitement de l'information, gravitant autour des désormais courants systèmes d'information géographique. Il n'est pas lieu ici de débattre sur nombre de définition des systèmes d'information géographique mais de cerner quels sont les apports de la géomatique dans son ensemble à la géographie limnologique.

1.4.1. L'apport des Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.) et des Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.)

La géographie limnologique a, comme les autres branches de la géographie, bénéficié des fonctionnalités « standard » des SIG, la numérisation d'un grand nombre de données, le géoréférencement, la possibilité de croisement d'un grand nombre de couches d'information. La limnologie croise de nombreuses approches, morphologiques, sédimentaires, physiques, chimiques, historiques, biologiques, requérant ainsi les compétences techniques des S.I.G. Pourtant, cette science jeune a dominante biologique produit peu de documents cartographiques si déterminants dans la prise de décision. C'est en cela que l'apport de la géographie limnologique joue un rôle fondamental dans l'étude et la gestion des eaux continentales.

⁸⁷ Cauvin, 1998

La représentation tridimensionnelle est un atout majeur lorsque l'objet cartographié est invisible sur le terrain. Si l'accès à cette technologie a pu entraîner une abondance de M.N.T. parfois peu justifiée, leur utilisation dans la bathymétrie est primordiale.

I.4.2. Interpolation et réalisation de bathymétrie

I.4.2.1. Principe de l'interpolation

La génération d'isolignes ou de modèles numériques peuvent se concevoir au travers de fichiers grille ou autrement dit de matrices de points. A partir d'un panel de données $(x ; y ; z)$ ⁸⁸ réparties de façon irrégulière dans l'espace l'utilisation d'une méthode d'interpolation⁸⁹ va permettre l'obtention d'une matrice régulière constituée de lignes et de colonnes ou pour chaque intersection est calculée une valeur de z (Fig. 20).

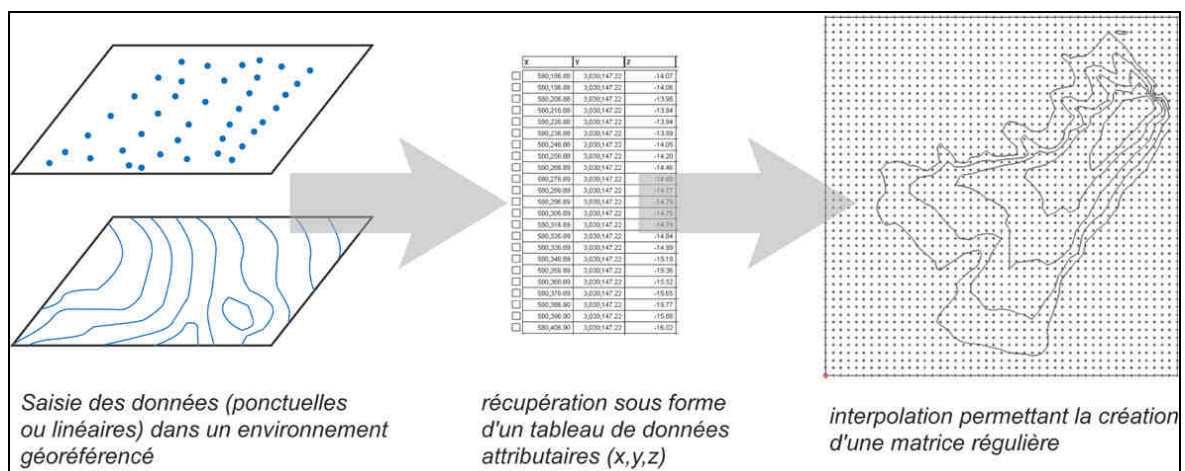


Figure 20 : Création d'une matrice de points

⁸⁸ Le jeu de coordonnées $(x ; y ; z)$ ne désigne pas exclusivement un espace réel et ces lettres peuvent s'appliquer à d'autres variables que la longitude, la latitude et l'altitude.

⁸⁹ Il n'y a pas d'équivalent français pour Gridding qui recouvre aussi bien des méthodes d'interpolation comme d'extrapolation.

A partir de ce système de fonctionnement théorique, on constate rapidement de sensibles différences selon l'interpolation employée pour produire la grille. De nombreuses interpolations existent et, au-delà du simple aspect esthétique des résultats, le choix d'une méthode adaptée peut s'avérer primordial dans le cas précis de la bathymétrie où la vérification terrain des erreurs d'interpolation est difficile voire impossible.

La demande par rapport aux résultats d'une interpolation étant variée, il n'est pas nécessaire de décrire ici toutes les interpolations mais plutôt de se concentrer dans le détail autour de celles qui remplissent les qualités permettant une fiabilité des résultats et un traitement ultérieur de morphométrie. Le logiciel matriciel utilisé nous propose deux grandes familles d'interpolation : les interpolations exactes et les interpolations lissées. Le travail de bathymétrie, effectué à grande échelle, exclut de fait les interpolations lissées qui masqueraient la morphologie de détail aussi bien en lac qu'en étang.

Une des méthodes utilisée pour l'interpolation de données altimétriques est le krigeage, une méthode géostatistique⁹⁰ donnant des résultats satisfaisants dans de nombreuses situations. Il est particulièrement bien adapté à des données irrégulières et fournit des résultats visuellement corrects, même utilisé en tant qu'interpolateur exact.

Nous allons comparer cette méthode avec la triangulation avec interpolation linéaire, une méthode basée sur la triangulation de Delaunay. Cette interpolation exacte fonctionne de façon optimale avec des données réparties équitablement sur la grille.

⁹⁰ Modélisation statistique de données spatiales (Gratton, 2002)

I.4.2.2. Choix d'une interpolation

Cerner le fonctionnement de base des deux méthodes testées peut permettre de commencer à entrevoir leurs différences et leurs avantages respectifs.

Le krigeage, méthode éponyme de l'ingénieur sud-africain D.G. Krige, est considérée comme la méthode optimale d'interpolation-extrapolation spatiale au vu de la précision statistique obtenue. Elle fut établie à partir de méthodes statistiques empiriques par Krige, puis formalisée par le français Matheron qui introduit le principe d'auto corrélation entre les points de données et la variance en fonction de la distance entre les points⁹¹. En pratique, les performances sont liées au choix de divers paramètres.

Pour comprendre la triangulation avec interpolation linéaire, il faut se pencher sur la triangulation de Delaunay⁹². Cet algorithme géométrique se définit à partir du diagramme de Voronoï. Considérons un ensemble de points de l'espace (E) : le diagramme de Voronoï est une division de l'espace en cellules convexes, où chaque cellule est constituée de points de l'espace plus proches d'un point que des autres points. On obtient la triangulation de Delaunay en joignant les points dont les cellules de Voronoï sont voisines (Fig. 21).

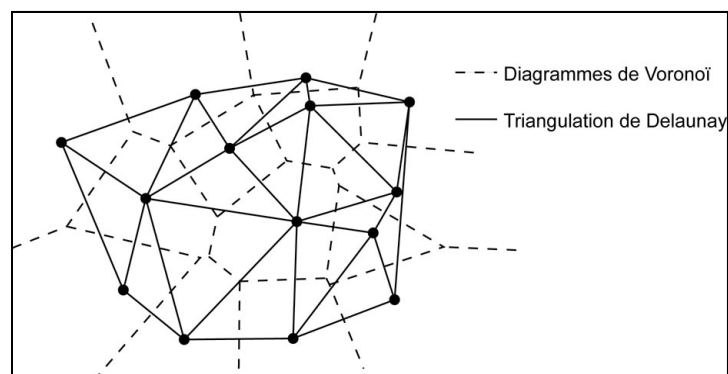


Figure 21 : Architecture de la triangulation de Delaunay

⁹¹ Gratton, 2002

⁹² nommée d'après Boris Delone, mathématicien russe dont le nom a été francisé

Ce système de triangulation maximise le plus petit angle des triangles, ce qui évite des triangles trop allongés qui seraient un problème pour le résultat final. La vérification est qu'un triangle n'appartient à la triangulation de Delaunay que si et seulement si son cercle circonscrit ne contient aucun point de E .

La triangulation étant réalisée, l'altitude du nœud est calculée à l'aide de l'équation du plan portant la facette triangulaire.

I.4.2.3. Application à la bathymétrie

Le sujet n'est pas ici une comparaison des deux méthodes précitées dans l'absolu mais dans leur application au cas particulier de la bathymétrie. Le caractère particulier commun aux lacs et étangs est l'alternance de pentes moyennes ou fortes (sur les talus naturels ou les barrages) avec des reliefs particulièrement plats (dans le cas de plaine centrale). Ce changement rapide de la pente au pied du talus est un élément important dans la caractérisation de la morphologie immergée. De même, l'espace découvert par le marnage façonné par le plan d'eau au pied de la falaise d'érosion montre des ruptures de pente importantes à identifier ; enfin, la morphologie émergée autour du plan d'eau ne bénéficie pas de la même densité de points ce qui peut se révéler être une source d'erreurs.

Le site choisi pour la comparaison est la partie aval de l'étang de Cieux, pour l'illustration des raisons citées plus haut. Les données s'échelonnent le long de transects ; l'intervalle entre les données est plus restreint dans le sens des transects et plus lâche entre deux transects. La ligne de berge a été saisie régulièrement et une ligne factice de même altitude a été placée en aval de la digue. Les deux interpolations ont été paramétrées pour la même précision de résultat, c'est à dire une grille orthonormée d'intervalle 3 mètres.

Les premières informations viennent du rapport généré à l'interpolation : les grilles résultat font 102 lignes x 128 colonnes soit un total de 13056 points. La première différence montre que le krigeage calcule 13056 valeurs alors que la triangulation n'en calcule que 7275.

Le krigeage extrapole les valeurs pour pouvoir calculer l'ensemble de la matrice, quelle que soit la distribution des données de départ ; la triangulation, elle affecte la valeur 0 à tout point extérieur au réseau de triangles.

Ces deux interpolations créant une grille régulière de points, les valeurs initiales ne sont réintroduites dans la matrice que si un point de la grille résultat coïncide avec un point initial. Dans notre cas, les relevés de terrain ne coïncident jamais. Dans quelle mesure l'interpolation va-t-elle donc trahir les données terrain ? Pour répondre, nous allons nous intéresser à la profondeur maximale relevée sur le terrain à 3,88 mètres. Le krigeage annonce une valeur de 3,919 mètres et la triangulation de 3,850 mètres. Ces deux réponses sont fausses, mais pour des raisons différentes : pour mieux comprendre il faut augmenter la précision de la grille résultat à 50 cm soit six fois plus de points que la précédente. Le krigeage donne alors 3,923 mètres et la triangulation 3,875 mètres. Si le point exact n'a pas été retrouvé, le fonctionnement est très clair : dans le cas du krigeage, le système d'interpolation a exagéré la profondeur maximale donc quelle que soit la résolution de la grille, la valeur va tendre non pas vers la valeur réelle mais vers la valeur interpolée par excès. Dans le cas de la triangulation, la valeur est minorée car le système par triangulation ne peut excéder les valeurs de départ et l'accroissement de la précision de la grille fait tendre les valeurs interpolées vers les valeurs mesurées.

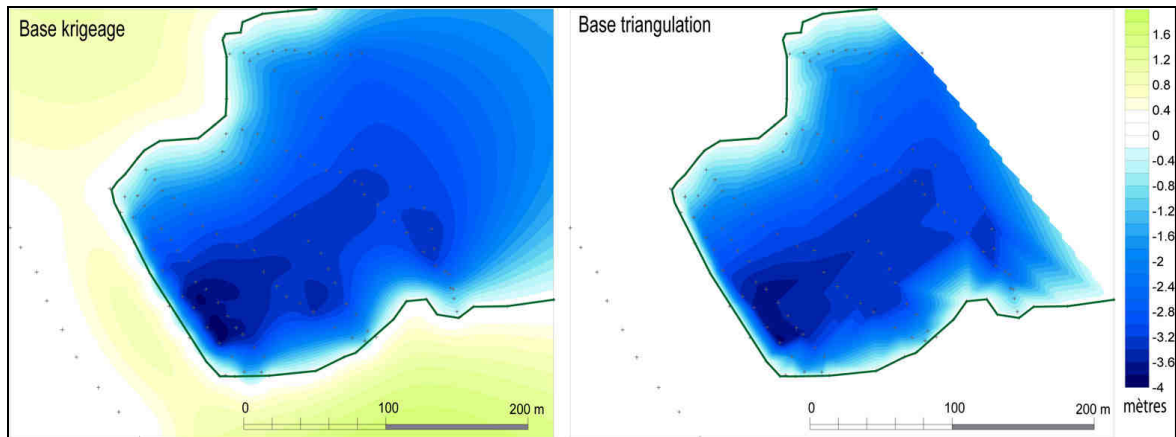


Figure 22 : Comparaison des isobathes interpolées

Si on réalise les cartes bathymétriques à partir des grilles (Fig. 22), le premier constat est l'extrapolation produite par le krigeage : l'altitude s'élève jusqu'à 1,8 mètres alors que les données de terrain s'arrêtent à 0. Cette augmentation est proportionnelle aux zones où les valeurs sont présentes : au sud où les pentes sont fortes l'augmentation est importante, en aval de la digue, la ligne de points factices a rétabli la valeur 0 et a empêché une augmentation démesurée de l'altitude. La triangulation a parfaitement respecté la zone des données de terrain (Fig. 22). Si on observe le tracé des isobathes dans la zone des relevés, le krigeage offre un aspect lissé des isobathes tout en restant proche des valeurs de départ, là réside le secret de la popularité de cette interpolation. La triangulation offre, de par son principe même, un aspect plus anguleux et moins esthétique.

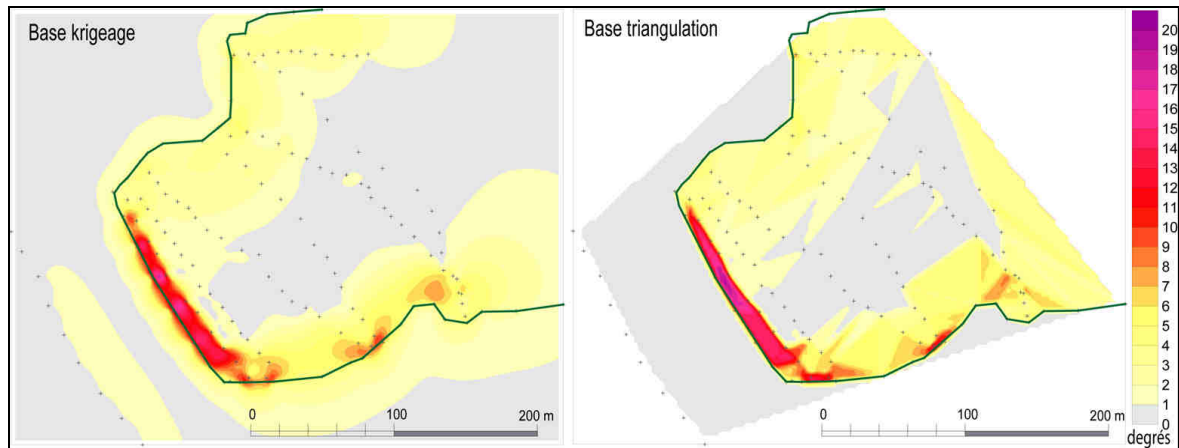


Figure 23 : Comparaison des calculs de pente

Les cartes des pentes, calculées à partir de la grille résultat, nous donnent elles aussi des informations intéressantes : le maximum de pente est différent (seulement 1°) néanmoins le krigeage sous-estime la pente réelle alors que la triangulation offre une valeur conforme au terrain (Fig. 23). Le problème majeur vient de la zone des plus fortes pentes où l'impact spatial de ces dernières est largement réduit par le krigeage et représenté ponctuellement. Si des options d'interpolation peuvent permettre une orientation de recherche plus favorable⁹³, elles ne peuvent en aucun cas s'appliquer à la totalité d'un plan d'eau.

⁹³ Cela signifie aussi qu'il faudrait savoir quoi trouver afin d'orienter l'ellipsoïde de recherche de l'interpolation.

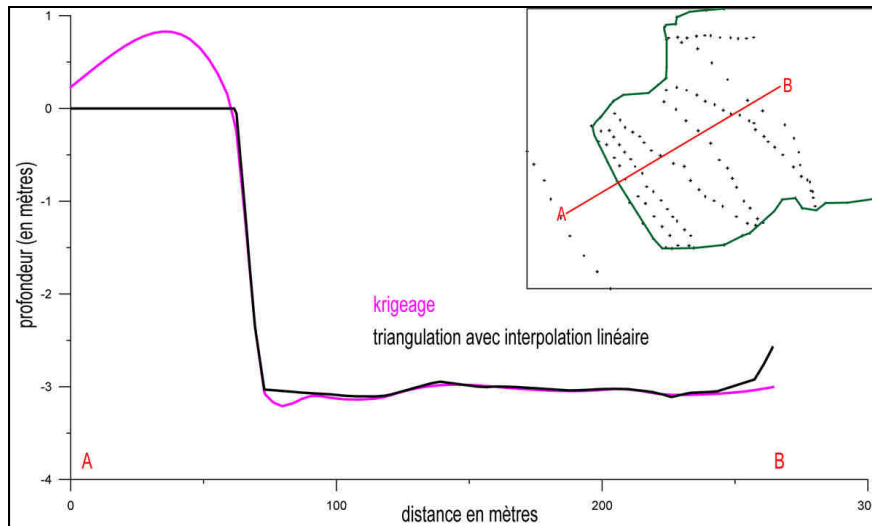


Figure 24 : Rendu en coupe des interpolations

La figure 24 vient appuyer les constatations formulées précédemment : le transect met en évidence le plus gros défaut du krigeage, cet effet d'ondulation qu'il produit lors d'une brisure de pente importante. Si ce problème est particulièrement visible en aval de la digue, au début du transect, c'est au pied de la digue que l'erreur va fausser les mesures en exagérant les maxima et en augmentant les pentes par la création de rides inexistantes.

Dans de nombreuses situations d'interpolation, le krigeage présente de nombreux avantages, néanmoins certains paramètres morphologiques comme des changements de pente brusques le rendent approximatif, engendrant des erreurs non négligeables. Comme les problèmes rencontrés font partie des caractères morphologiques des plans d'eau étudiés, la préférence est donnée à la triangulation avec interpolation linéaire dont les résultats visuels sont quelque peu anguleux mais respectent parfaitement les données de terrain.

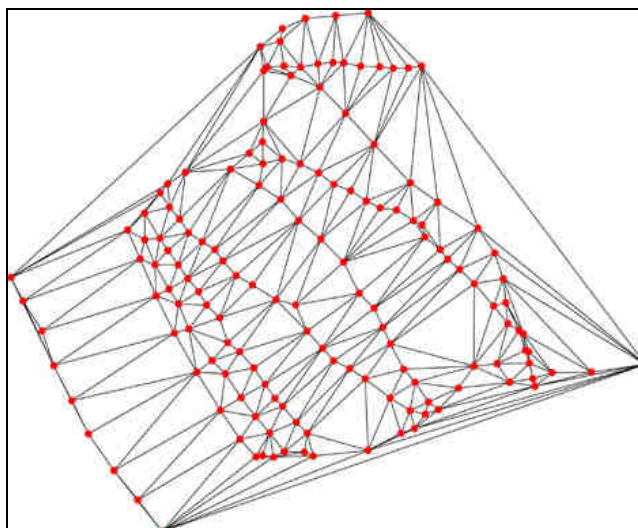


Figure 25 : Triangulation de Delaunay sur la zone étudiée

La production du réseau de triangle simultanément à la grille permet une vision parfaite des possibles zones d'approximation dues à la projection (Fig. 25). Cela permet de contrôler la marge d'erreur et d'envisager une nouvelle campagne terrain si nécessaire.

Conclusion partielle

Comprendre le fonctionnement des milieux stagnustres est un enjeu majeur dans les questions de gestion de l'eau qui seront au cœur des problématiques du XXIème siècle. De nombreux colloques, réunions, forums consacrés à l'eau à l'échelle internationale⁹⁴, nationale⁹⁵ et régionale⁹⁶ voient le jour. La limnologie, dont l'objet est pourtant l'étude des eaux continentales, s'est largement désintéressée de l'étude des étangs. Dans des régions comme le Limousin, où le socle granitique limite la présence de nappes profondes, les étangs constituent une réserve d'eau non négligeable. Si les étangs sont globalement méconnus dans leurs formes et leur fonctionnement, les plans d'eau limousins et leurs spécificités sont des inconnus malgré leur omniprésence.

Les étangs limousins comportent des particularités suffisamment fortes pour être l'objet de nombreuses recherches. Plusieurs étangs doivent être étudiés afin de croiser les échelles spatiales – emboîtement des formes dans l'étang, différences spatiales entre les étangs – et temporelles ; l'étude embrasse ainsi depuis de vastes étangs-lacs jusqu'à de minuscules étangs laboratoires. Une généralisation des savoirs acquis devient alors possible.

Les connaissances de base étant absentes, l'étude de géographie limnologique doit s'appuyer tout d'abord sur la cartographie bathymétrique, socle de l'étude limnologique souvent délaissée. Mais, mises au point sur de grands plans d'eau, l'application des méthodes de la limnologie nécessite des adaptations. Il fut

⁹⁴ Congrès trisannuel de la SIL (Societas Internationalis Limnologiae – destinée à promouvoir la connaissance des eaux continentales et leur gestion) qui connaît une augmentation croissante des ses participants : Melbourne, 2001, 700 participants ; Lathi, 2003, 1000 participants. 7th Cannes Water Symposium 2005, destiné au professionnels de l'eau, 1000 participants.

⁹⁵ Journées nationales du PNRZH (Programme national de recherche sur les zones humides intérieures) 2001 au Lac du Der, 2003 à l'étang de Lindre.

⁹⁶ 1^{er} Forum régional sur l'eau en Limousin les 1^{er} et 2 décembre 2003.

nécessaire de procéder à un changement d'échelle méthodologique pour mettre en œuvre ces pratiques sur des plans d'eau de plus petite dimensions, comme le sont la majorité des étangs.

La cartographie se fonde sur des méthodes de terrain précises et désormais adaptées à l'échelle stagnustre, tenant compte des enseignements de la recherche lacustre mais aussi tirant le meilleur profit de l'utilisation de la géomatique, par les systèmes d'information géographiques et les modèles numériques de terrain. Seule cette étude de la morphologie permet d'envisager l'étang comme un volume d'eau interagissant avec sa cuvette, son amont et son aval.

Le volume d'eau de l'étang, ses variations et ses mouvements en corrélation permanente avec la morphologie de la cuvette, représente la deuxième clé de la compréhension du fonctionnement des plans d'eau souvent occultée. Des méthodes là aussi adaptées par la géographie limnologique permettent d'envisager l'étude d'une hydrodynamique proprement stagnustre.

Par sa vocation géographique, mais aussi par la réelle demande sociale autour d'une recherche-intervention sur la question des étangs, la géographie limnologique doit se situer au cœur d'une réelle transdisciplinarité. L'étude de la morphologie stagnustre devra ainsi s'appuyer sur la géomorphologie, sur l'histoire pour les étangs anciens, l'étude du bilan hydro-limnologique s'aidera de l'hydrologie et la climatologie tandis que des perspectives plus globales de gestion devront recourir ponctuellement à la chimie ou la biologie. La géographie limnologique, dans son étude des étangs, doit revenir à une conception forélienne ouverte, éclectique, mais en y apportant des spécificités géographiques pour ne pas tomber dans le caractère monographique et pouvoir établir des typologies afin de généraliser.

PARTIE II :
DE LA MORPHOLOGIE DES ETANGS ET DE SES
CONSEQUENCES SUR LEUR GESTION

1 – La morphologie limnologique et ses représentations

2 – Les héritages morphologiques

3 – Des modèles stagnustres étagés à l'image du fonctionnement lacustre

4 – Synthèse morphologique

5 – Le stockage sédimentaire et les vidanges d'étang

La morphologie des étangs a peu fait l'objet de recherches⁹⁷ et la connaissance de leur modelé est la plupart du temps empirique, issue d'observation lors des vidanges. A l'instar de la masse d'eau elle-même, la morphologie de la cuvette est considérée comme homogène et peu susceptible de fonctionnements complexes. Contrairement à certaines idées reçues particulièrement tenaces⁹⁸, la complexité du fonctionnement thermique de ces petits plans d'eau n'est pourtant plus à prouver⁹⁹, et d'autres aspects de leurs formes et de leur fonctionnement nécessitent d'être étudiés dans le détail. Au premier rang doit se trouver une étude précise de la morphologie¹⁰⁰ : la cuvette ennoyée n'est pas figée et nombre d'enseignements sont à tirer de sa cartographie. Etudier la morphologie des étangs ne se résume pas à cartographier un instantané, mais les formes présentes permettent de mettre en évidence les processus de leur genèse. L'étude de la morphologie est donc la cheville ouvrière de la compréhension des étangs. Rappelons aussi que l'étude géographique d'un processus ne peut s'appuyer que sur une carte précise ; or beaucoup d'études d'étangs se basent sur des mesures en un point¹⁰¹, jamais spatialisées. Pour le géographe limnologue, la carte bathymétrique permet donc de repérer, de spatialiser mais aussi de comprendre nombre de phénomènes lacustres ou stagnustres.

⁹⁷ Les étangs sur lesquels des travaux morphologiques sont disponibles sont la plupart du temps les étangs littoraux (Caverivière, 1950, à propos des étangs de Sigean ; Rosello-Tournoud, 1991, à propos de l'étang de Thau). Ces plans d'eau sont néanmoins bien loin des objets de notre étude au niveau morphologique.

⁹⁸ « la température de l'eau d'un étang décroît régulièrement de la surface vers le fond. Il n'y a pas de palier, pas de zonation thermique comme dans un lac » (Combrouze, 2000)

⁹⁹ Citons ici les nombreux travaux limousins s'appuyant sur plusieurs milliers de mesures thermiques depuis 1997 ayant démontré la présence d'une stratification thermique au moins temporaire dans les étangs (Touchart, 2001 a et b, 2002 ; Touchart & Graffouillère, 2004).

¹⁰⁰ « Clues to its (*la cuvette lacustre*) morphometry may be gained from examining the topography of the surrounding area, but morphometric details must be gained by soundings. » (Goldman & Horne, 1983. p12)

¹⁰¹ Il s'agit souvent de mesures chimiques ou biologiques assorties d'une prise de profondeur. Ce type de travail est fréquent dans des études d'impacts ou autres rapports de bureaux d'études.

La morphologie des étangs est à mettre en perspective avec celle des lacs : pour ce faire une description de la morphologie lacustre et de sa représentation par les limnologues ouvre cette partie. Nous détaillerons ensuite les outils à la disposition du géographe limnologue pour quantifier la morphologie lacustre ou stagnustre.

Le cœur de cette partie est constitué par l'étude morphologique des étangs présentés précédemment, morphologie héritée tout d'abord puis morphologie réellement « construite ». Cette partie est l'occasion de présenter un développement original liant géographie limnologique et histoire ayant permis la reconstitution d'un étang à sa mise en eau, un bond de presque huit siècles dans le passé.

Une synthèse reprend les principaux enseignements morphologiques afin d'aboutir à une typologie des étangs.

L'évolution morphologique des étangs est à mettre en relation avec la gestion des plans d'eau, puisqu'elle découle en partie du stockage des sédiments. Cette question prégnante en Limousin nous amène à réfléchir sur la pratique de la vidange et les aménagements qui peuvent y être apportés à la lumière de nos résultats sur la morphologie. Dans cette dernière partie, les impacts de la vidange sur l'émissaire sont aussi abordés au travers d'exemples précis.

II.1. La morphologie limnologique et ses représentations

La problématique morphologique pose la question d'étangs aux fonctionnements complexes dont les formes seraient similaires à celles des lacs. Pour cela il est nécessaire de présenter succinctement les connaissances actuelles sur la morphologie lacustre. La limnologie est une science jeune d'un siècle et l'étude de la

morphologie des plans d'eau aurait du s'étoffer sur les bases solides¹⁰² jetées à la fin du XIX^{ème} siècle. Pourtant, la morphologie n'a que peu soulevé les passions des limnologues et les schémas mis en place pour le seul Léman vont être adoptés – surtout dans la limnologie francophone – jusqu'à nos jours.

Deux grandes critiques peuvent actuellement être apportées à la connaissance morphologique en limnologie. Premièrement, l'utilisation de théories énoncées depuis plus d'un siècle, établies sur la base d'une monographie du Léman. Cet aspect est très important : aussi visionnaire que Forel fût, les lois qu'il édicta se fondent sur un seul lac. La deuxième critique est par là même une interrogation : les plans d'eau du monde sont-ils exclusivement des lacs ? Lorsqu'on parcourt la bibliographie limnologique, ce sont surtout les grands lacs de la planète qui sont étudiés, quelques centaines de plans d'eau¹⁰³. Les plans d'eau les plus nombreux au monde sont les étangs, même si leur emprise spatiale est très inférieure à celle des grands lacs. Pourtant, à ce jour, aucune réelle géomorphologie des étangs n'existe. Les étangs font pourtant l'objet d'études régulières car ils sont au cœur de nombreuses préoccupations humaines : la pêche, l'alimentation en eau, la biodiversité, le loisir... Mais ces études sont la plupart du temps disparates et monospécifiques, avec une domination forte de la biologie.

Les étangs constituent un milieu complexe, et de nombreux processus modèlent la cuvette comme dans tout plan d'eau, et comme dans les grands lacs¹⁰⁴. La connaissance de la morphologie lacustre est une base nécessaire à la compréhension de la morphologie stagnustre. Il est nécessaire de bien connaître les

¹⁰² Non exemptes pour autant de critiques, comme nous le verrons.

¹⁰³ « Seuls les plus grands lacs (superficie>500km²) ont fait jusqu'ici l'objet d'un recensement exhaustif au niveau de la planète » (Meybeck, 1995. p16)

¹⁰⁴ « Les processus sédimentaires modifient de façon continue la forme des cuvettes lacustres par des apports internes et externes de matériaux particuliers et par leur redistribution sur le fond du lac. » (Meybeck, 1995.p15)

phénomènes lacustres afin de savoir dans quelle mesure ils se retrouvent dans les étangs.

II.1.1. L'étagement de la morphologie lacustre

Les premières bathymétries exhaustives – en 1892, Forel considère que l'exactitude de la carte du Léman levée par Hörnlimann et Delebecque « est presque parfaite » - permettent de qualifier une morphologie précise dont l'interprétation n'a que peu varié depuis. Dès les premières lignes de son commentaire morphologique du Léman, Forel distingue une région littorale modelée par une alternance érosion - alluvion et une région profonde. Au sein de chacune de ces deux « régions » s'opèrent de nouvelles distinctions dues à un étagement des processus.

II.1.1.1. Les modelés lacustres littoraux

Le littoral est la région où la terre et le lac se rencontrent ; de leurs actions conjuguées naissent des formes particulières, tantôt dominées par les accumulations, tantôt par l'érosion. Nous avons à plusieurs reprises observé la domination exercée par les travaux de Forel sur l'ensemble de la limnologie. Le schéma mis en place concernant la côte lacustre est à ce titre remarquable et a largement perduré dans la limnologie francophone¹⁰⁵. Ainsi de puis Forel en 1892¹⁰⁶, on le retrouve chez Delebecque en 1898¹⁰⁷, Collet en 1925¹⁰⁸, jusqu'au traité de limnologie de Dussart en 1966 et à sa réédition en 1992. Cette vision de la côte

¹⁰⁵ On retrouve aussi ce schéma chez Halbfaß, limnologue allemand, en 1923 (p75).

¹⁰⁶ Page 89 et suivantes ; on peut aussi signaler un article de H. Schardt de la même date présentant la même configuration de la côte d'érosion.

¹⁰⁷ Pages 36 à 60

¹⁰⁸ Pages 185 à 197

lacustre a l'inconvénient majeur de présenter la côte d'érosion comme seule évolution morphologique possible en dehors des alluvions fluviales des deltas. Forel et les auteurs reprenant un tel schéma pour toute la côte lacustre ne prennent pas suffisamment en compte l'imbrication entre morphologie et hydrodynamique. Cette conception a amené une généralisation de la présence de la beine d'accumulation. Il est donc nécessaire de présenter le schéma traditionnel de la côte lacustre comme étant celui de la côte d'érosion. Nous verrons ensuite quelle part est faite aux modelés d'accumulation lacustres littoraux¹⁰⁹, puis aux deltas. La prise en compte des ravins sous-lacustre et de leur origine permettra d'éclairer le complexe fonctionnement cours d'eau – plan d'eau.

II.1.1.1.1. Les représentations de la côte lacustre d'érosion

Si l'on étudie le profil de la côte lacustre d'érosion, ce dernier est divisé : l'action d'érosion produite par les vagues en terrain meuble dégage une falaise au pied de laquelle s'étend une grève où est redistribué le matériel arraché à la terre ferme (Fig. 26). Cette grève peut être divisée en trois parties : exondée, inondable et inondée selon un rythme imposé par le marnage.

¹⁰⁹ Les modelés d'accumulation littoraux les plus communément étudiés sont les deltas, néanmoins les modelés issus de la redistribution à l'intérieur même du plan d'eau (donc modelés d'accumulation lacustres littoraux) ne sont pas à négliger.

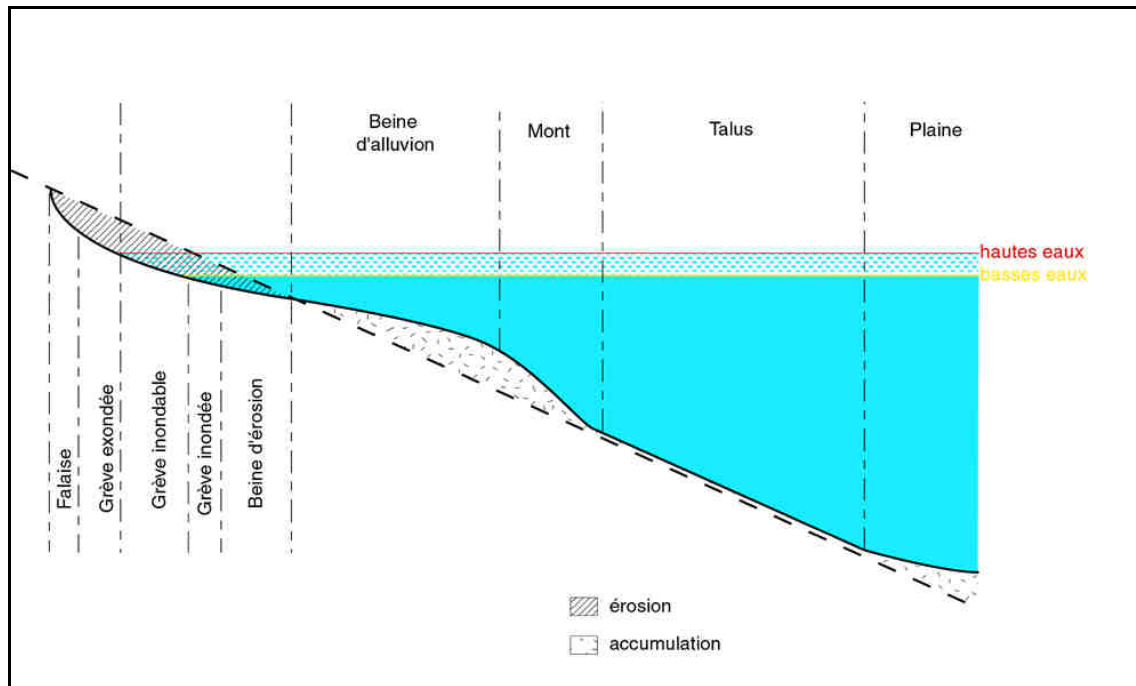


Figure 26 : Schéma classique de formation de la côte lacustre d'érosion (d'après Dussart, 1966. modifié)

Suit une « beine », d'abord d'érosion puis d'alluvion, modelée par les vagues, peu inclinée qui se termine par un mont à pente plus forte qui rejoint le talus et les grands fonds (fig. 26). Cette interprétation existe aussi dans la littérature anglo-saxonne. Hutchinson décrit une terrasse au pied de la falaise (*wave-cut cliff*) ; cette terrasse est pour lui constituée d'une partie émergée (*beach*¹¹⁰) et d'une immergée (*littoral shelf*)¹¹¹. D'autres auteurs comme Timms réservent le terme de plage à l'accumulation et qualifient la grève toute entière par *littoral shelf*¹¹².

Quoi qu'il en soit, le schéma classique, s'il a longtemps fait référence, comprend une inconnue, celle de l'existence de la beine d'accumulation. L'édification de ces accumulations issues du matériel arraché aux berges sont assez rarement présentes dans la pratique. Les manuels de limnologie anglo-saxons n'évoquent pas cette beine d'accumulation, mais lui préfèrent une redistribution du matériel par la gravité, le

¹¹⁰ Pour certains auteurs, il n'y a pas de différence terminologique entre la grève issue de l'érosion et la plage d'accumulation nommées toutes deux *beach*. C'est le cas de Welch.

¹¹¹ Hutchinson, 1957.p 178.

¹¹² Timms, 1992. p23.

courant de retour ou latéralement par la dérive littorale¹¹³. Cette prise en compte du déplacement du matériel par le plan d'eau amène naturellement à l'étude des formes édifiées par le dépôt des particules ; la limnologie francophone a très longtemps négligé cet aspect. En 1885 pourtant, avant la création de la limnologie sur les rives du Léman, G.K. Guilbert décrivait des modelés construits par les vagues (*wave-built terrace*) en les différenciant des modelés d'érosion (*wave-cut terrace*)¹¹⁴.

II.1.1.1.2. Les modelés d'accumulation lacustre littoraux

L'hydrodynamique lacustre construit donc des modelés en transportant des matériaux et en les déposant à une plus ou moins grande distance de leur point d'arrivée par les affluents ou d'arrachage aux berges. Deux types de formes peuvent apparaître selon que le matériel déposé est grossier (sables et graviers) ou qu'il s'agisse de matériel beaucoup plus fin (de type vase).

Le modelé le plus courant est la plage¹¹⁵ ; c'est une accumulation de sables et de graviers (parfois des blocs) transportés par roulage ou saltation par les vagues. Les plages se forment lorsque la pente est faible, les vagues poussant en avant une partie du sable finissant par constituer un modelé hors d'eau¹¹⁶. Les plages peuvent prendre trois types : adossées (Touchart, 2000 p147 ; *beach* pour Welch, 1952 p21 ainsi que Timms, 1992 p23), fixées en un point et formant des queues de comète (Touchart,

¹¹³ « ... it carries and rolls a certain amount of loosened material into the lake whence it may be transported to other locations by gravity, by undertows, or by alongshore currents. » (Welch, 1952. p20)

« (the wind drift) produce longshore currents, so that material stirred by waves may be expected to travel along the shore of the lakes » (Hutchinson, 1957. p180)

¹¹⁴ « The wave-built terrace is distinct from the wave-cut terrace in that it is a work of construction, being composed entirely of shore drift, while the wave-cutting terrace is the result of excavation, and consists of the pre-existent terrane of the locality. » (Gilbert, 1885. p97)

¹¹⁵ « *Beach* », largement décrite par les limnologues anglo-saxons traitant la morphologie : Welch (1952, p21-22), Timms (1992, p23). En langue française, il faut attendre l'avènement de la géographie limnologique : Touchart (2000, p145-149), et Maleval (2002, p256-266).

¹¹⁶ « ...waves coming on to the gently sloping shoal whose water depth is less than the depth of wave influence strike the inclined bottom, pushing and carrying ahead some of the sand. » (Welch, 1952. p21)

2000 p147 ; *spits and bars* pour Hutchinson, 1957 p180 et Timms, 1992 p24), ou en avant de la côte (Touchart, 2000 p148 ; *barrier beaches* pour Welch, 1952 p21, Timms, 1992 p23). Il n'est pas nécessaire de décrire plus précisément ces formes complexes, déjà réduites à des microformes dans des lacs de barrage de plus de 300 hectares¹¹⁷.

Certains fonds de baie lacustres sont la place de dépôts très fins, surtout lorsqu'une protection végétale oblitère l'action érosive. La faible profondeur ainsi que la présence de phragmitaies ou de roselières font de ces baies calmes des pièges pour les sédiments les plus fins¹¹⁸.

II.1.1.1.3. Les deltas lacustres

Les deltas lacustres ont beaucoup été étudiés pour les archives sédimentaires qu'ils renferment, parfois même après la disparition du lac. En 1967, le travail de Valter Axelsson sur le delta du lac Laitaure (Suède), en milieu polaire, présente la morphologie et les processus deltaïques.

Un modelé de première importance apparaît lorsqu'un apport alluvionnaire dû à un affluent est à l'origine de la création d'un delta¹¹⁹ : les formes d'accumulation deviennent alors dominantes dans cette zone¹²⁰. La sédimentation entraînée par la rapide décroissance de la vitesse du courant au débouché des cours d'eau est à l'origine de la formation des deltas (Axelsson, 1967. p10 – traduction). La vitesse de sédimentation décroît avec la taille des particules, ce qui entraîne un granoclassement d'amont en aval du delta déjà noté par Delebecque (Fig. 27).

¹¹⁷ Sur le lac de Saint Pardoux (Haute-Vienne), par exemple : Maleval, 2002 p256-259

¹¹⁸ Touchart, 2000 p145.

¹¹⁹ « Les deltas peuvent être définis comme des constructions sédimentaires élaborées au débouché des cours d'eau dans des étendues d'eau permanentes. » (Bellaïche, 2004)

¹²⁰ « ...il se forme tout d'abord un cône immergé qui ne tarde pas à émerger et à former un delta. A mesure que ce dernier s'allonge dans le lac, la pente de la rivière diminue ainsi que son pouvoir de transport. Il se forme ainsi sur ce qui était autrefois le domaine du lac un cône émergé à couches peu inclinées reposant sur des couches fortement inclinées qui marquent l'accroissement successif du talus du cône immergé. » (Collet, 1925, p187)

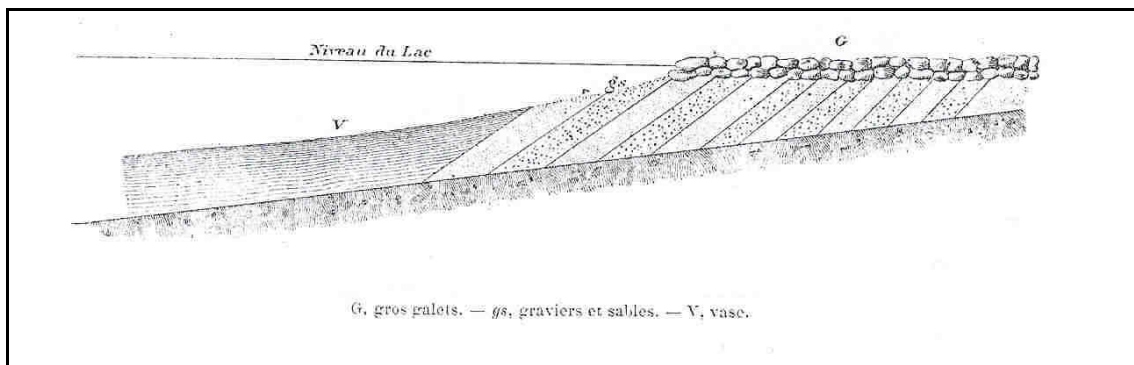


Figure 27 : Coupe schématique d'un delta torrentiel (Delebecque, 1898. p66)

L'étude des deltas marins discerne quatre grands ensembles morphologiques aux caractéristiques précises. Si ces ensembles existent, le delta est appelé composite. Nous retiendrons la caractérisation de ces zones par Paskoff, conçue pour les littoraux marins :

« Un delta est constitué de deux parties, l'une émergée, l'autre immergée. A son tour, la partie émergée se divise en une plaine deltaïque où les actions fluviales sont prépondérantes et une marge deltaïque où ces actions se combinent avec celles de la houle et, éventuellement, de la marée. L'intervention de forces [...] vagues et marées caractérise la marge deltaïque dont l'étendue dépend essentiellement du marnage. [...] Le front deltaïque, par définition, peut être « plus ou moins étendu et plus ou moins pentu selon les cas. [...] Le front se termine sur un talus progradant de pente variable, généralement comprise entre 1 et 10°. » (Paskoff, 1998. p183 à 194)

Les deltas connaissent à la fois un étagement et une zonation ; pour la partie émergée différentes formes apparaissent selon le rapport de force entre dynamique fluviale et lacustre. Le delta peut notamment être digité¹²¹ ou lobé selon que l'action lacustre est relativement faible ou au contraire dominante.

¹²¹ Hutchinson (1957) p185 sous l'appellation *unilobate delta* ; Touchart (2000) p 151 : « le delta digité [...] résulte d'un apport massif de sédiments et d'une agitation lacustre assez faible. Les deltas digités

II.1.1.1.4. Le ravin sous lacustre

Le premier ravin sous lacustre découvert fut celui du Rhin dans le Lac de Constance, en 1883 par Hörnlimann. Les ravins peuvent être de différentes origines : structurale, sub-aérienne, ou à levées construites. (Touchart, 2000. p154)

Quel que soit le type génétique du ravin, il subit l'influence de courants de turbidité allant du simple remodelage à la création du ravin proprement dite. Ces courants sont dus à une plus grande densité d'eaux froides et/ou chargées d'alluvions « qui tombent au-dessous des eaux plus légères [...] » (Forel, 1892. p386)

Le ravin sous lacustre témoigne de plusieurs imbrications : celle du modelé littoral avec les grands fonds, celle des eaux fluviales avec les eaux lacustres, celle de la morphologie lacustre avec l'influence des courants. Le ravin sous lacustre est une des marques les plus notables de l'influence directe des courants lacustres sur la morphologie.

II.1.1.2. les modelés lacustres profonds

Au-delà du littoral s'étend la zone profonde, tout d'abord il s'agit d'un talus s'enfonçant dans les grands fonds jusqu'au domaine de la plaine centrale, où la sédimentation fine s'accumule et nivelle le relief de la cuvette originelle de façon si parfaite que Forel l'a fort justement comparée à une table de billard tant « son horizontalité est remarquable » (1892.p 49). On retrouve cet aspect morphologique comme « la particularité principale bien connue (des lacs)»¹²². Les auteurs francophones comme anglo-saxons ont adopté cette forme présente dans la plupart

avançant rapidement. » On retrouve ce type de morphologie dans les deltas marins : Johnson (1919) ; Paskoff (1998) p194.

¹²² Meybeck, 1995 p15

des lacs (*central plain*, *central deep area* ou *basin* en anglais, *schweb*¹²³ en allemand), depuis les débuts de la limnologie jusqu'aux interprétations actuelles.¹²⁴

Si la plaine centrale est couramment évoquée comme une caractéristique fondamentale du lac, sa détermination morphologique n'est jamais abordée. Ce point particulier de la détermination de la plaine centrale étant majeur, il sera amplement discuté dans le II.3.3 où nous nous permettrons de reprendre des points de morphologie lacustre afin d'éclairer au mieux notre connaissance des étangs.

II.1.1.3. La régularisation lacustre

Si la morphologie lacustre porte l'empreinte de la cuvette qui l'abrite, nombre de processus d'alluvionnement, d'érosion et de redistribution remodelent le lac dans sa dimension horizontale par l'érosion des caps¹²⁵ et le comblement des baies. Cette régularisation du littoral lacustre est bien connue en limnologie et fréquemment décrite. Cette élimination progressive des irrégularités du trait de côte se produit jusqu'à ce qu'un point d'équilibre soit atteint¹²⁶. Une régularisation s'opère aussi dans la dimension verticale. La sédimentation, grossière au niveau des deltas, très fine sur la plaine centrale, fait apparaître de nouvelles formes, étagées selon les processus de leur genèse. C'est cette capacité à remodeler sa cuvette qui témoigne de l'importance et de l'identité du plan d'eau.

¹²³ Habfaß, 1923.

¹²⁴ «...the presence of a large flat area where the water is deepest» (Lucas, 1904, p645) ; « the region of level deep-water sediments occupying the middle of the lake » (Ruttner, 1963, p178) ; «flattish sedimentary areas largely delimited by slopes. » (Timms, 1992, p26) ; « Une plaine horizontale vient buter contre le pied du talus » (Touchart, 2000. p152-153).

¹²⁵ « shore processes will tend to [...] destroy any projecting promontories » (Hutchinson, 1957. p193)

¹²⁶ « The progressive elimination of marginal irregularities goes on until [...] the climax of the process has essentially been reached. » (Welch, 1952. p23)

La morphologie lacustre est décrite dans de nombreux manuels, tandis que la morphologie des étangs n'a été l'objet d'aucune étude concrète. La similarité, avec des différences d'échelles, entre les étangs et les lacs permet de fonder la morphologie stagnustre à partir de la morphologie lacustre. L'étude des lacs met en lumière d'une part les processus d'érosion et d'accumulation, d'autre part la différenciation entre littoral et grands fonds dans la description de leur morphologie. Néanmoins, la comparaison lac – étang en les opposant a amené une conception de l'étang, et donc de sa morphologie, en réduction de celles des lacs. L'étang devient ainsi régulièrement un lac réduit à sa zone littorale¹²⁷. Ce raccourci très insatisfaisant demande une réelle étude morphologique de plusieurs plans d'eau utilisant toutes les ressources de terrain et de cartographie que la géographie limnologique tient à sa disposition. Il sera alors enfin possible d'exposer et de comprendre la morphologie stagnustre, qui emprunte des aspects à la morphologie lacustre mais développe aussi de nombreuses spécificités.

II.1.2. Les outils de quantification morphologique de la géographie limnologique

La bathymétrie a deux rôles fondamentaux : le premier est de permettre une visualisation du modelé immergé. Contrairement aux autres objets géographiques, le fond du plan d'eau est invisible la plupart du temps voire continuellement. Car si le plan d'eau est défini par son volume liquide, ce volume dépend de la morphologie le supportant. Etudier un lac ou un étang consiste donc à étudier le volume d'eau, son fonctionnement ainsi que ce qui s'y trouve, mais aussi le fond, sa morphologie, son

¹²⁷ Arrignon (1998), Nous avons abordé ce point lors de la définition de l'étang.

évolution et son important rôle d'interface. Le plan d'eau a pris place sur un substrat préexistant mais sa présence l'influence et il le modèle à son tour.

Visualiser le modelé immergé est nécessaire, mais le géographe ne saurait s'en contenter. Pour comprendre le fonctionnement du plan d'eau, il est nécessaire de quantifier le modelé, d'effectuer un réel travail de morphométrie lacustre ou stagnustre. Différents outils vont permettre cette quantification morphologique.

II.1.2.1. La carte bathymétrique

La résultante naturelle de la réalisation d'une bathymétrie est la constitution d'une carte. Les premiers ouvrages de limnologie font mention de « cartes hydrographiques » (Forel, 1892. p27) ainsi que d'isohypses, qui devinrent rapidement des cartes bathymétriques et isobathes. La construction et le commentaire des cartes représentent des tâches fondamentales pour le géographe. Si à l'heure actuelle les cartes descriptives sont délaissées, pensant l'ensemble du globe cartographié, il faut rappeler avec force que de nombreux lacs et étangs ne sont encore que des taches bleues sur les cartes. De nombreuses morphologies immergées sont encore inconnues ou cartographiées trop imparfaitement, ces lacunes nuisant aux interprétations possibles des fonctionnements de ces plans d'eau.

II.1.2.2. Le modèle bathymétrique

L'essor des technologies informatiques aidant, les capacités de représentation de l'espace des logiciels permettent une visualisation de plus en plus réaliste des objets géographiques. Les modèles numériques de terrain permettent une représentation tridimensionnelle de l'espace. La visualisation du relief immergé se

fait alors selon un angle, une inclinaison et une perspective paramétrables. En outre, il est possible de jouer sur l'accentuation de l'échelle verticale grâce à laquelle une meilleure mise en valeur de certains aspects est possible. Au niveau descriptif, on retrouve les avantages d'une vidange laissant découvrir la totalité du modelé, sans avoir à retirer l'eau. Le modèle bathymétrique regroupe à la fois des qualités permettant de venir en aide au chercheur, mais il ne faut pas négliger son aspect pédagogique, puisqu'il représente la seule possibilité de visualiser avec exactitude le fond des plans d'eau.

L'utilisation de logiciels matriciels gérant les modèles bathymétriques présente un autre atout primordial dans la recherche en géographie limnologique. Un système de calcul rapide et fiable du volume représente un gain de temps certain et une précision accrue par rapport aux méthodes traditionnelles de calcul. Ce calcul de volume est effectué sur des objets solides, définis par une surface supérieure et une surface inférieure : chaque surface peut être une grille interpolée ou un plan. Dans le cas de plans d'eau la surface inférieure est définie par la matrice de points issue de la bathymétrie et la surface supérieure un plan figurant le niveau de l'eau. Il est de plus possible de choisir l'altitude (ou la profondeur) de ce plan par rapport à la matrice, et ainsi déterminer le volume pour plusieurs niveaux de l'eau dans le lac. Le calcul étant effectué à partir de chaque cellule du réseau, la finesse du pas de la matrice conditionne la précision du résultat.

II.1.2.3. Les cartes de pente et de concavité

A partir des matrices de profondeur, il est possible de calculer la pente pour chaque point de la surface de la grille, puis d'obtenir le résultat en degrés, de 0

(horizontal) à 90 (vertical). La valeur de pente de chaque nœud est calculée par rapport aux nœuds adjacents, orientés grâce à un système de boussole.

Les fichiers grille résultant permettent de réaliser des cartes où figurent des isolignes de pente constante. Il est alors possible de quantifier plus finement le modelé. L'autre avantage est d'éviter de commettre des erreurs d'interprétations dues à l'exagération de l'échelle verticale présente sur le modèle bathymétrique.

Un autre calcul important est la détermination du taux de changement de la pente dans la direction de gradient pour chaque nœud de la grille. Il se traduit par des cartes présentant les concavités et convexités du modelé. Les lignes d'inflexion entre convexité et concavité permettent d'identifier formellement et de limiter certains modelés. Ce type d'information est particulièrement intéressant dans l'étude de la sédimentation, la présence de la plaine centrale rendant le profil du lac concave à sa base. Le couplage des pentes et de ces inflexions à très grande échelle sert de base à une cartographie géomorphologique précise du modelé immergé des plans d'eau.

II.1.2.4. Les courbes bathygraphique et profondeur-volume

La courbe bathygraphique¹²⁸ croise la donnée de superficie (en abscisses) avec la donnée de profondeur (en ordonnées) et reflète ainsi par sa forme la nature concave ou convexe de la cuvette lacustre. Pour Håkanson, qui a particulièrement développé l'utilisation de cette courbe, il s'agit de cerner « la forme du lac et rien d'autre que la forme du lac » (1981, p65. traduction). L'utilisation de cette courbe en valeur relative, aussi bien pour la profondeur que pour la superficie, permet la

¹²⁸ Le terme courbe hypsographique est peu adapté à la limnologie. Tout comme les cartes hypsographiques sont devenues rapidement bathymétriques pour les lacs. De même le terme courbe bathygraphique est plus adapté. (Graffouillère, 2002)

comparaison de plans d'eau en faisant abstraction des problèmes d'échelle spatiale. Il est aussi particulièrement utile de s'en servir dans une perspective plus temporelle : la courbe relative permet de comparer la forme du bassin à différents moments du cycle annuel (donc avec différents niveaux d'eau (Graffouillère, 2001, p 35)), mais aussi dans un pas de temps beaucoup plus large afin d'apprécier les dynamiques érosion-sédimentation sur le modelé.

- la courbe profondeur-volume met en relation le volume (en abscisses) avec la profondeur (en ordonnées). Cette courbe met en évidence la situation de la masse d'eau et donc ses possibilités d'inertie ou sa soumission aux forçages externes.

II.1.2.5. Les indices

Ces paramètres, issus de mesures et de calculs parfois longs sont destinés à aider à cerner la morphologie lacustre. Ils sont pour la plupart décrits dans les manuels de limnologie, mais celui qui les a le plus développés est Håkanson dans son manuel de morphométrie lacustre ; certaines formules ont été simplifiées par Wetzel.

Longueur maximum (L_{\max} en m) : « définie par la ligne joignant les deux points les plus éloignés du rivage » (Håkanson, 1981. p26.traduction).

Longueur maximum effective (L_e) « ligne droite joignant les deux points les plus éloignés du rivage, et où le vent et les vagues peuvent agir sans interruption par la terre ou des îles » (Håkanson, 1981. p26.traduction).

Largeur maximum (B_{\max} en m) : « définie par la ligne droite formant un angle droit avec L_{\max} , qui joint les deux points les plus éloignés du rivage » (Håkanson, 1981. p30.traduction).

Largeur maximum effective (B_e en m) : ligne droite formant un angle droit avec L_e joignant les deux points les plus éloignés du rivage, sans interruption par la terre ou des îles » (Håkanson, 1981. p31.traduction).

Superficie (A en m^2) : c'est la superficie à la surface de l'eau. Cette valeur peut connaître de très fortes variations selon le marnage du plan d'eau.

Largeur moyenne (B en m) : il s'agit d'un paramètre descriptif pouvant servir dans des analyses hydromécaniques, comme l'impact des vagues. $B = A/L_{max}$.

Longueur du trait de côte (L en m) : si le plan d'eau a été correctement cartographié dans un S.I.G. cette mesure s'effectue automatiquement.

Développement de la côte (D_L) : rapport de la longueur du trait de côte à la circonférence d'un cercle d'une superficie égale à celle du lac. (Wetzel, 1983. p32.traduction)

$$D_L = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

Le résultat varie de 1 qui représente un cercle parfait, à des valeurs plus élevées lorsque le périmètre devient très sinueux.

Profondeur maximum (Z_{max} en m) : la plus grande profondeur du plan d'eau. Dans un étang elle se situe généralement au niveau de la prise de fond située dans l'ancien thalweg, près de la digue.

Profondeur moyenne (Z en m) : volume divisé par la superficie $Z = V/A$ (WETZEL, 1983. p32.traduction)

Profondeur relative (Z_r) : exprime la proportion de la profondeur maximum comme un pourcentage du diamètre moyen du lac à sa surface.

$$Z_r = \frac{50 \cdot Z_{max} \sqrt{\pi}}{\sqrt{A}}$$

La plupart des lacs se situent en dessous de 2 %, seuls certains plans d'eau très profonds et de faible superficie dépassent les 4 %. (Wetzel, 1983. p32.traduction). Il est à noter que cette formule est dérivée de « l'indice de creux » de Delebecque.

II.1.2.6. La carte géomorphologique

La mise en perspective des différentes cartes, l'étude précise des courbes et des indices permettent d'accéder à une compréhension globale du modelé immergé. Des informations sur la nature du fond¹²⁹ relevées lors des bathymétries complètent les informations morphologiques. Le croisement des couches d'information amène naturellement la création d'une carte synthétisant toutes les données, véritable carte géomorphologique du plan d'eau. Les cartes géomorphologiques lacustres ont été inventées par les soviétiques¹³⁰. Cette carte permet de « résumer l'ensemble des données et des interprétations sur le relief de la cuvette lacustre » (Touchart, 1994, p119) : cela comprend les héritages morphoclimatiques, les processus morphodynamiques actuels et les formes d'origine anthropique (Touchart, 2000, p162). Les cartes de synthèses présentées ici s'appuyant sur une étude morphologique inédite dans les étangs, elles apportent une vision entièrement nouvelle de ces derniers. Ainsi seront cartographiés les formes d'accumulations littorales du delta immergé (front deltaïque, talus prodeltaïque), le modelé littoral préexistant et d'érosion (talus et digue), et enfin le plafond (glacis, plaine centrale et fosse de vidange). La comparaison de ces formes, jusqu'à aujourd'hui négligées, entre les différents plans d'eau de l'étude va nous conduire à une généralisation sur le fonctionnement morphologique des étangs et les différents types qui se dégagent.

¹²⁹ Il est important de différencier les fonds grossiers (sables, graviers) des fonds vaseux pour intégrer cette information au moment de la délimitation des zones morphologiques.

¹³⁰ Geografičeskij Fakultet, 1962 ; Akademiâ Nauk SSSR, 1967 ; Zolotarev et al, 1989, cités par Touchart, 2000, p162.

II.2. Les héritages morphologiques

Millénaire ou trentenaire, lac ou étang, naturel ou anthropique, la plupart des plans d'eau correspondent à une cuvette anciennement émergée. De cet état de fait découle un certain nombre de formes en l'état, poudrées ou noyées sous les sédiments, érodées par les vagues. La géomorphologie régionale conditionne la forme du plan d'eau au jour de la submersion mais aussi par la suite¹³¹. Certaines formes vont ainsi totalement disparaître, érodées ou recouvertes par les sédiments, d'autres vont perdurer intactes ou atténuées. Lors de l'interprétation de la morphologie, la prise en compte de cet héritage morphologique évite de commettre des erreurs d'interprétation. Le conditionnement morphologique de l'étang – s'il est présent – pourra se lire à deux niveaux : dans sa morphométrie plane c'est-à-dire la forme de ses berges et dans le modelé subaérien. Il est néanmoins complexe de mettre en perspective l'évolution morphologique d'étangs anciens : nous avons vu que la morphologie était peu l'objet d'études et bien peu de connaissances anciennes sur des étangs existant encore actuellement nous sont parvenues.

II.2.1 Tentative de modélisation de l'étang de Cieux lors de sa mise en eau

La recherche en géographie limnologique concernant les étangs se heurte souvent à la question de la date de la mise en eau de ces derniers. Certains étangs limousins sont d'origine médiévale et une datation précise demande un important travail de recherches aux archives ainsi que la chance qu'une trace écrite soit parvenue jusqu'à nous.

¹³¹ Un travail mené en Suède sur 2000 lacs prenant en compte superficie, volume et profondeur maximale a permis une typologie en lacs de plaine, de colline, de colline très élevée, de montagne, de fjell. L'étude permet ainsi de déduire approximativement les paramètres pris en compte pour un lac dont on connaît la localisation en Suède et sa superficie. (Hakanson et Karlsson, 1984)

II.2.1.1. De l'utilité d'une modélisation historique

Le premier intérêt de ce type de travail est la reconstitution de la forme de l'étang lors de sa mise en eau. La portée historique de ce type de modélisation est en soi très précieuse lorsqu'elle peut être réalisée. En outre la démarche va permettre d'éclairer certains facteurs dont le rapport au temps est important. L'étude de la sédimentation pour des étangs récents ou des lacs de barrage peut s'appuyer sur une date précise de mise en eau ; il n'en va pas de même pour les étangs anciens et dans cette situation la datation est aussi rare qu'utile. Les processus étudiés ont dans cette situation plusieurs siècles d'activité.

II.2.1.2. Mise en place d'un protocole méthodologique

Après plusieurs recherches axées sur la date de mise en eau du Grand étang de Cieux ayant abouti à une estimation à 200 ans près¹³², la réponse attendue fut donnée par d'autres recherches. Des travaux menés en histoire médiévale sur l'occupation du sol dans le piémont des monts de Blond permirent de retrouver la mention de l'étang de Cieux sur un document daté de la deuxième partie du XIIIème siècle¹³³. Nous avons donc choisi de placer la mise en eau à 1250. Cette date de mise

¹³² Les deux bornes étaient données par l'arrivée des augustins à Mortemart en 1326 et le premier droit de pêche de 1569, les textes étudiés donnant les augustins comme propriétaires de l'étang. Néanmoins, les augustins n'étaient pas connus pour être des bâtisseurs d'étangs (graffouillère, 2002, p31-33)

¹³³ J'exprime ici mon très respectueux souvenir à Mlle Bernadette Barrière, professeur d'histoire médiévale à l'université de Limoges, qui dirigeait ces recherches et a immédiatement pensé à nous. Sans ses travaux, cette modélisation de l'étang de Cieux serait restée un projet.

en eau était accompagnée d'un renseignement inespéré, la superficie de l'étang annoncée légèrement supérieure à 10 hectares¹³⁴.

Pour faire revivre l'étang médiéval, le premier travail devait être la suppression pure et simple du grand étang de Cieux, ainsi que ses huit siècles de morphogénèse. Le travail de terrain sur le stockage sédimentaire a vu la mise en œuvre d'une carte des épaisseurs de sédiment dans ce plan d'eau¹³⁵. Les données recueillies permettent de reconstituer les anciens thalwegs. L'encaissement des cours d'eau dans les deltas émergés autorise un travail quasiment similaire pour les fonds de baie émergés. Enfin un filtrage de la grille¹³⁶ permet de « gommer » l'érosion des berges. Ainsi la confluence des trois vallons et la tête de la vallée du futur ruisseau du Grand étang furent remis à leur état pré immersion (Fig. 28a). Ce travail est très différent de la simple utilisation d'un niveau d'eau inférieur par rapport à la morphologie actuelle.

Le travail a ensuite consisté en la recherche du positionnement idéal de la digue pour atteindre les 10 hectares indiqués par le document médiéval. Cette digue se situait probablement quelques mètres en amont de l'actuelle. La figure 28b présente l'hypothèse actuellement la plus vraisemblable de la morphologie de l'étang de Cieux vers 1250. La date du réhaussement de la digue n'est pas connue. Néanmoins, cette configuration de l'étang disparaît au plus tard en 1765¹³⁷ car même si la carte de Cassini n'est pas une référence en matière de morphologie des étangs, la représentation de l'étang de Cieux figure un plan d'eau nettement supérieur à 10 hectares (Fig. 29a).

¹³⁴ A cette époque, de nombreuses unités locales existaient, d'où un léger manque de précision dans la conversion. La superficie définitive sera déterminée par la simulation morphologique.

¹³⁵ Ce point précis est traité plus loin.

¹³⁶ Filtre low-pass 3x3 réalisé sur la grille altitudinale réalisée à un pas de 5 mètres.

¹³⁷ Date des levés de la carte de Cassini, feuille du Dorat.

Figure 28 :
De l'apparition de l'étang de Cieux à sa morphologie actuelle

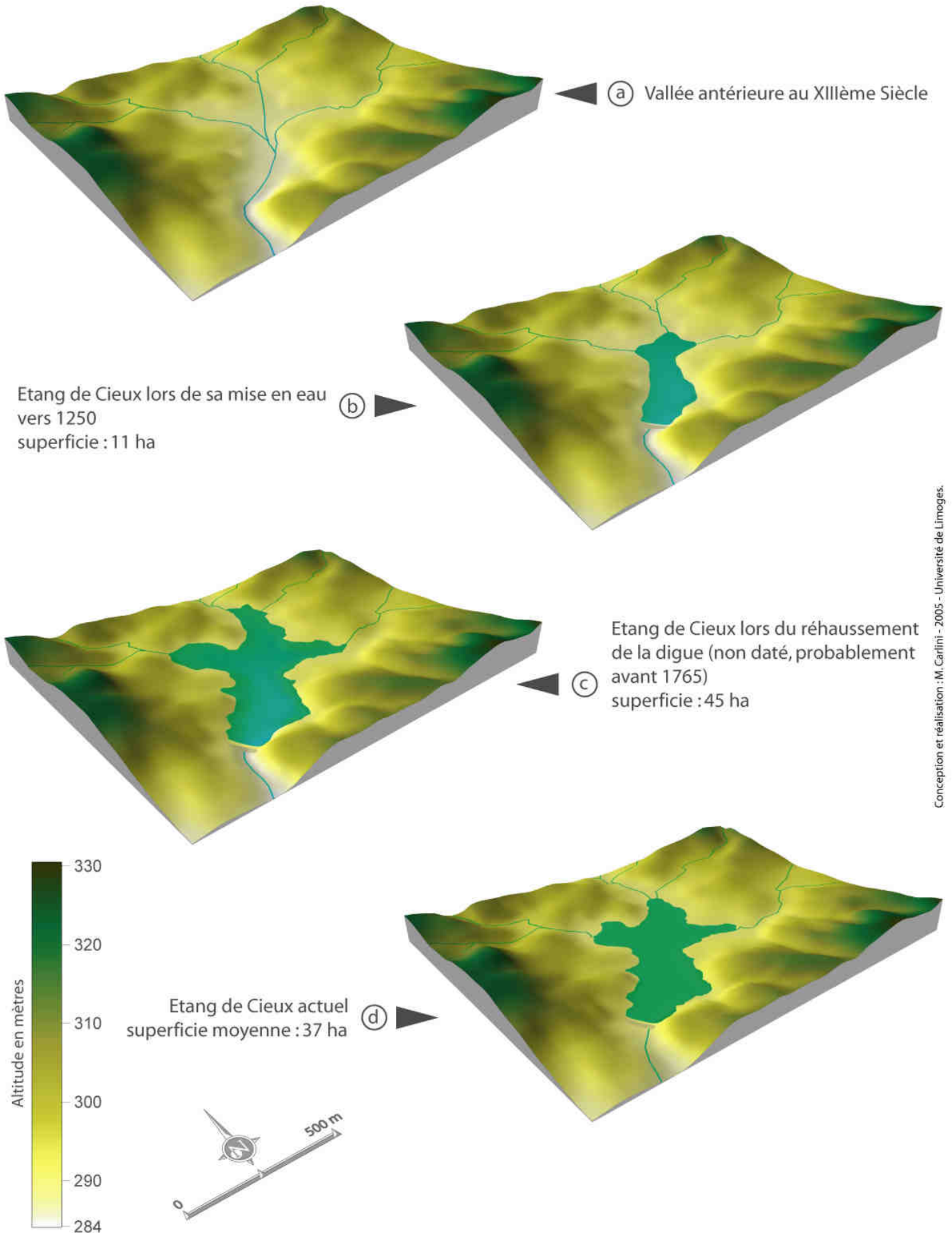




Figure 29 : Cartographies anciennes de l'étang de Cieux : la carte de Cassini et le cadastre napoléonien

Un croisement entre les berges du cadastre napoléonien de 1809 (Fig. 29b) et la morphologie de la vallée à la mise en eau a permis de reconstituer l'étang lors du réhaussement de sa digue, avec une superficie maximum de 45 hectares¹³⁸ (Fig. 28c).

II.2.1.3. Résultats et perspectives

Outre la représentation historique de l'étang de Cieux, ce travail a permis de réaliser une « photographie » de la vallée sans la présence de l'étang, au plus près de ce qu'elle pouvait être avant l'intervention humaine. Cette technique peut être reproduite pour des études visant la remise à l'état initial de vallons. En outre les

¹³⁸ Hypothèse corroborée par des travaux antérieurs sur la morphologie de la baie de Pranaud avant le développement du delta (Graffouillère, 2001)

quantités de sédiment accumulées dans le plan d'eau peuvent être cubées précisément.

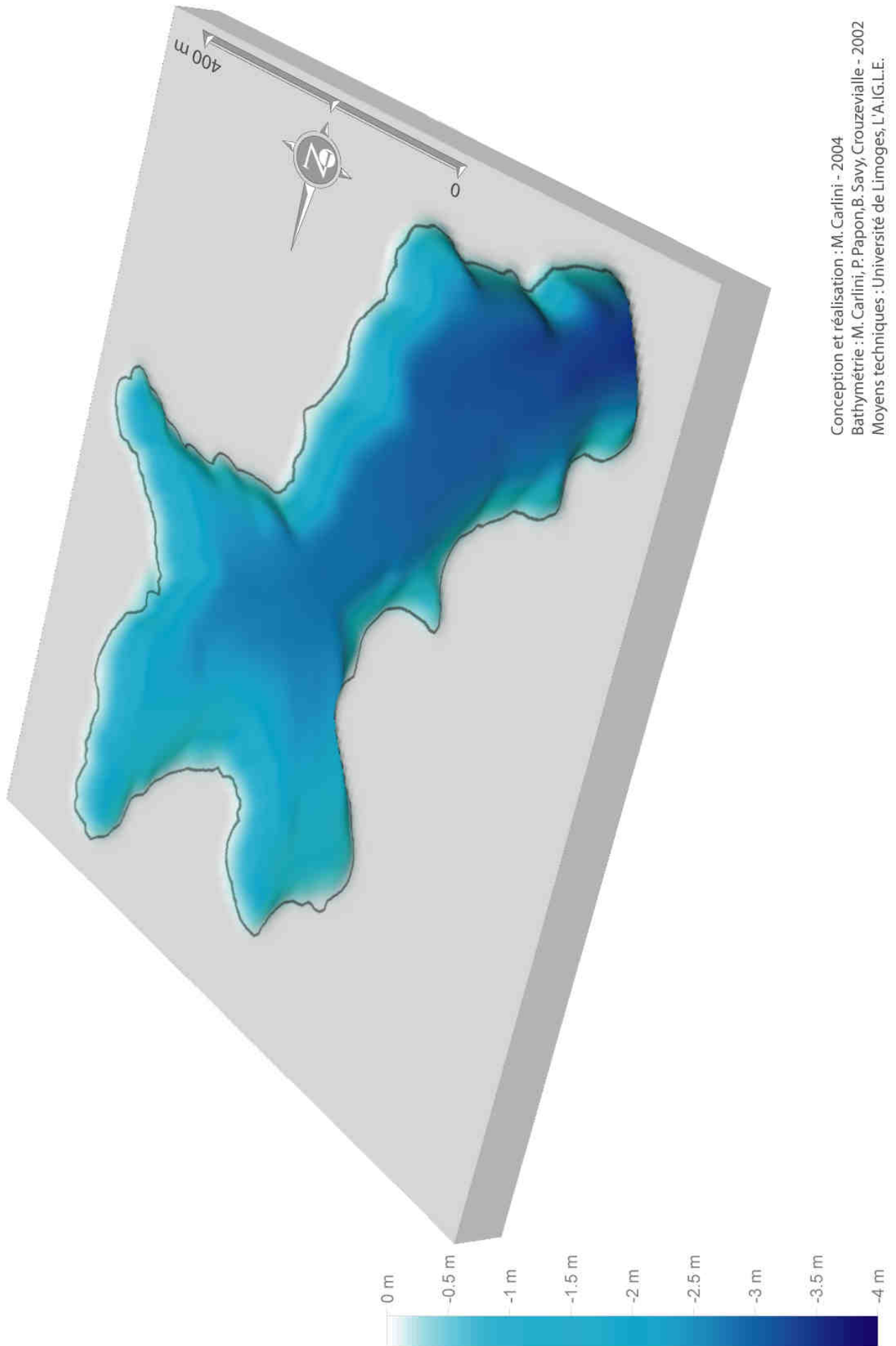
Cette tentative d'incursion dans une limnologie historique a aussi des répercussions sur les problématiques actuelles. Sur la feuille du cadastre Napoléonien de 1809 (fig 29b), l'étang a acquis sa superficie actuelle voire légèrement supérieure ; en outre on peut constater que la sédimentation est bien entamée au niveau du delta de Pranaud, à l'ouest. La comparaison avec la modélisation au moment du réhaussement de la digue permet de constater l'avancée des deltas au nord mais surtout dans la baie de Pranaud. En comparant le tracé de 1809 à la morphologie actuelle, on constate le prolongement du comblement des trois baies. Les modélisations nous fournissent donc de précieuses informations sur la régularisation des berges stagnustres : les processus deltaïques de comblement dominant. L'échelle de travail ne permet pas d'évaluer de manière satisfaisante l'érosion, le recul des berges étant moins important que l'avancée deltaïque.

Ce type de modélisation historique présente plusieurs intérêts dans l'étude des milieux stagnustres. Pour le géographe limnologue, reconstituer l'histoire du plan d'eau autorise à fonder l'étude actuelle sur des bases plus solides. La date de mise en eau est fondamentale pour estimer de la vitesse des processus, en particulier les taux de sédimentations. De nombreux travaux sur les taux de sédimentation, lacustre ou dans des étangs existent¹³⁹ et ce type de travail n'est pas notre sujet. Néanmoins la modélisation réalisée ici est un atout certain pour caler des travaux de vitesse de sédimentation. Pour l'aménageur, la connaissance de la vallée avant la première mise en eau ainsi que la vitesse de réduction du pourtour du plan d'eau

¹³⁹ Il est possible de citer ici des manuels limnologiques (Hakanson & Jansson, 1983), des études appliquées (Jigorel, 1992, 1998, 1999 ; Andrieu et Jigorel. 1997), ou des travaux universitaires (Maleval, 2002).

sont des informations très rares. Enfin cette modélisation est un atout pédagogique pour la connaissance de l'évolution des milieux aquatiques. Il faut néanmoins garder à l'esprit la rareté d'une information comme la superficie d'un plan d'eau en 1250.

Figure 30 :
Modèle bathymétrique du Grand étang de Cieux



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy, Crouzevialle - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 31 :
Bathymétrie du Grand étang de Cieux

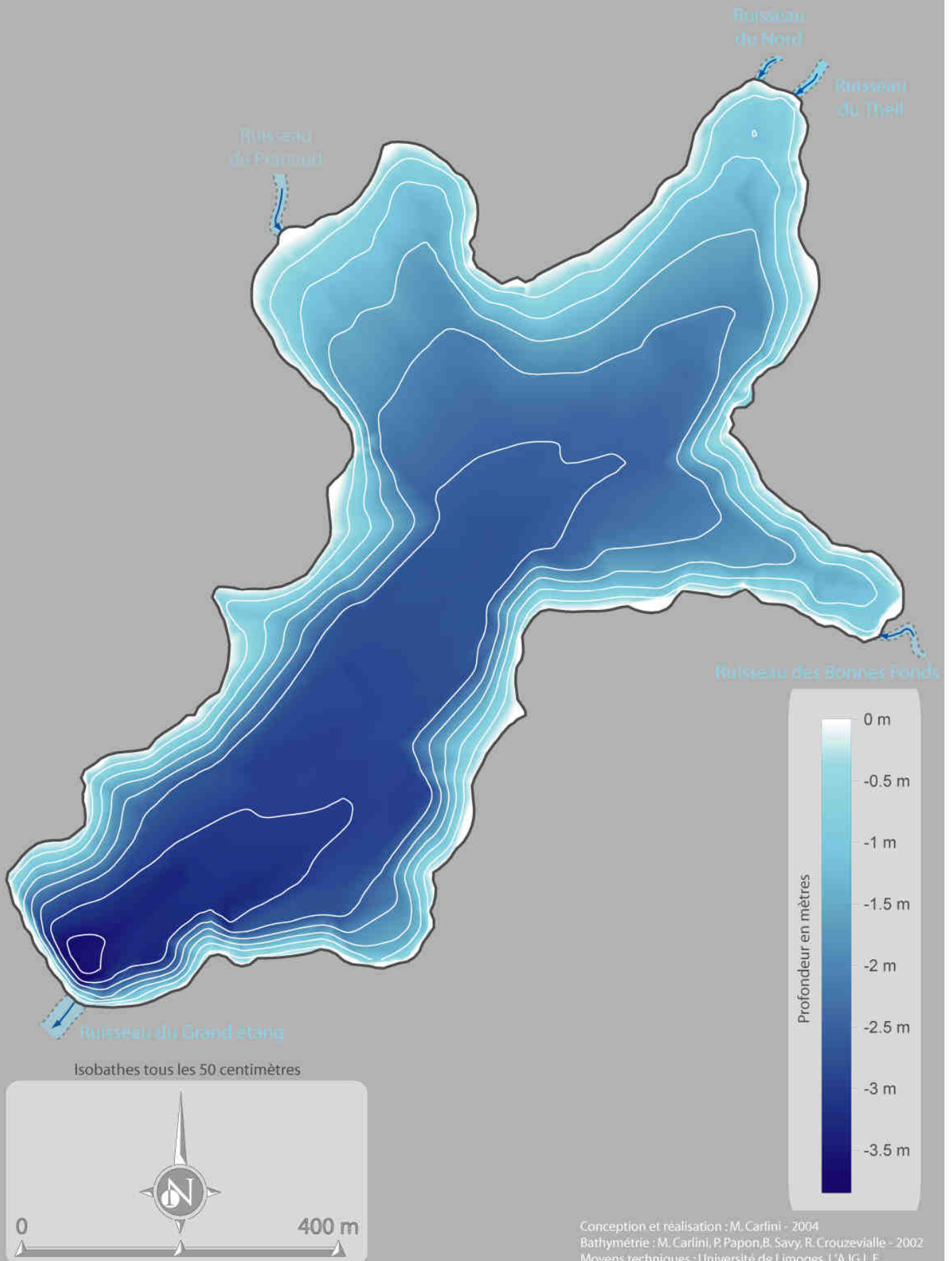


Figure 32 :
Carte des pentes du Grand étang de Cieux

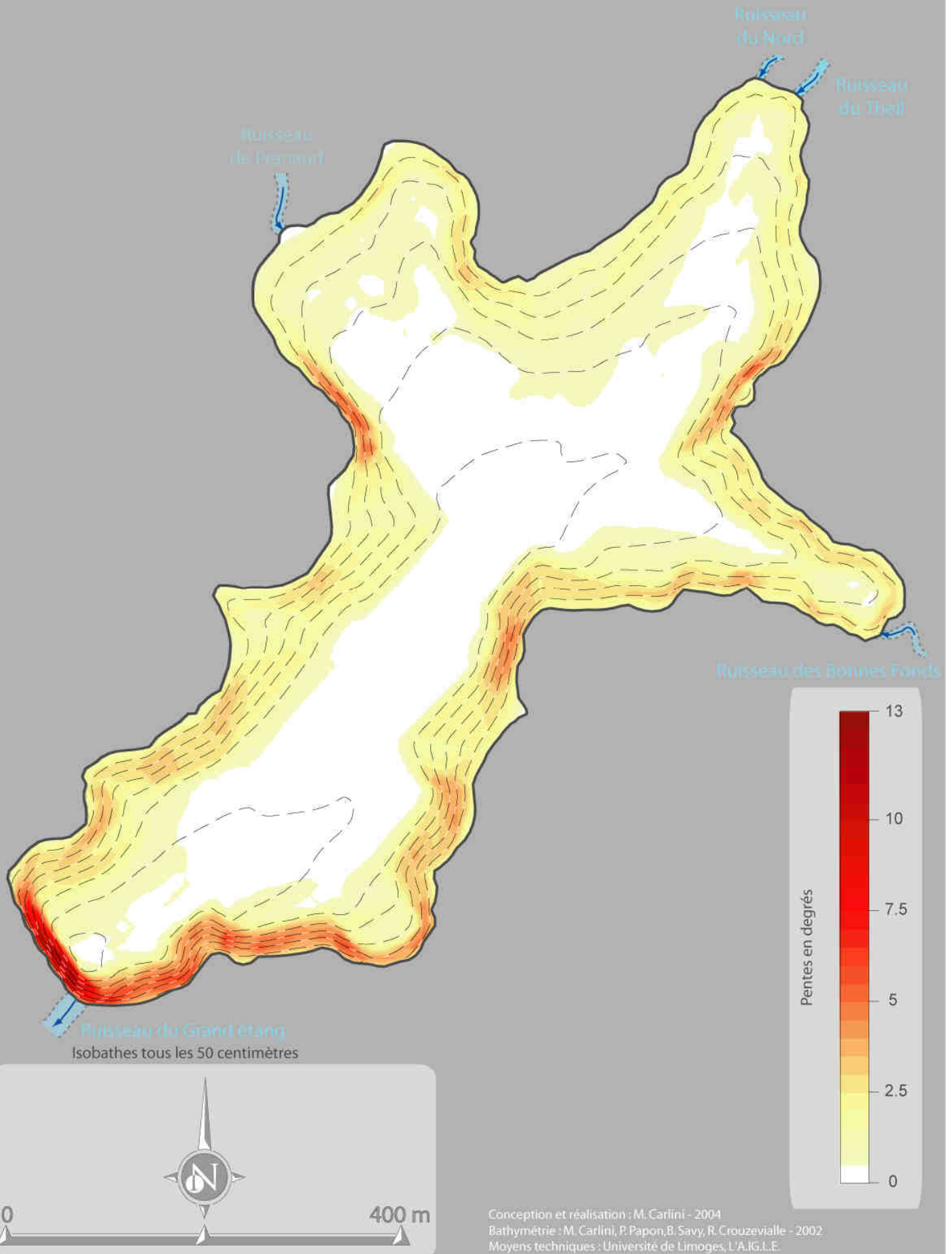
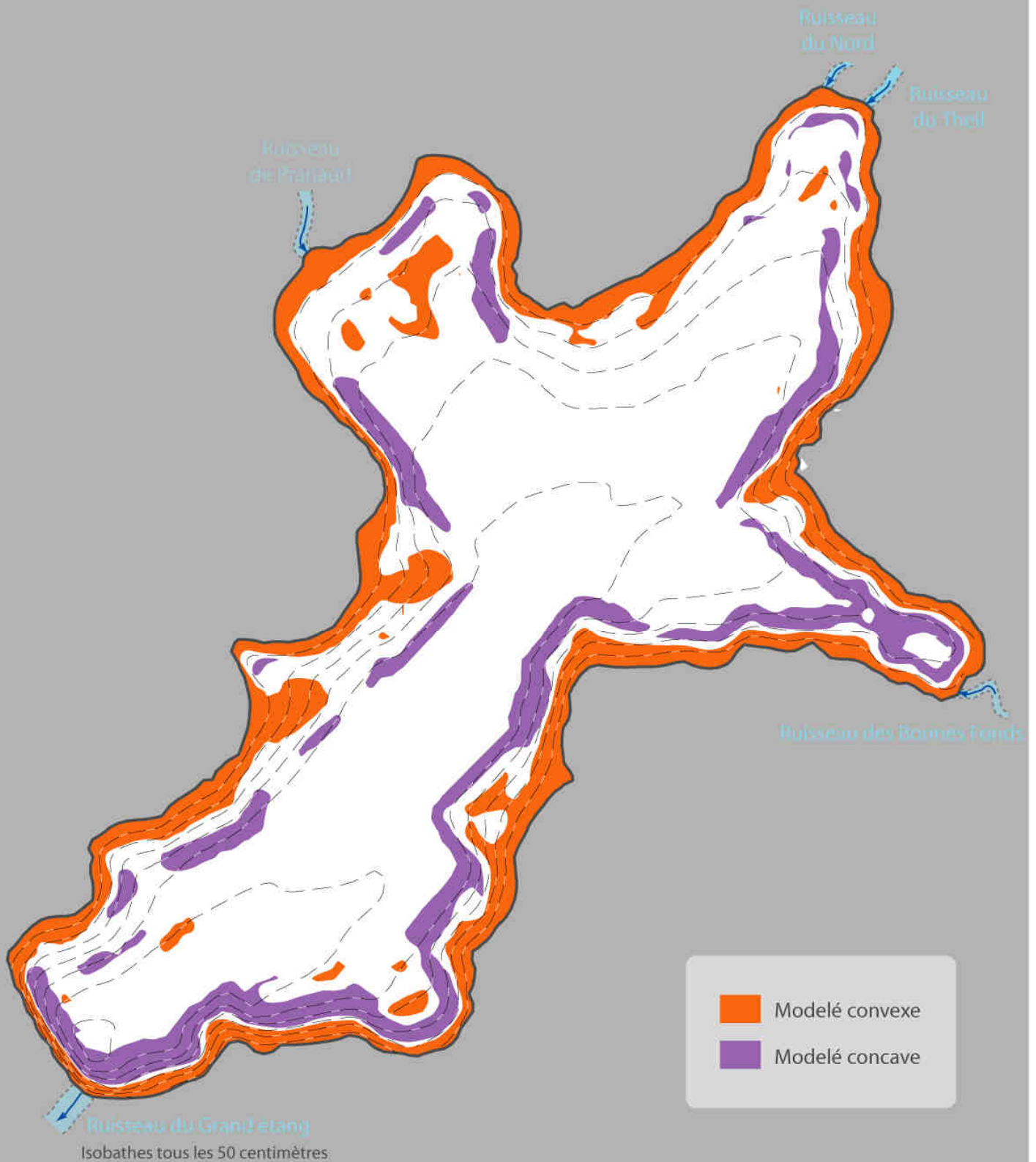
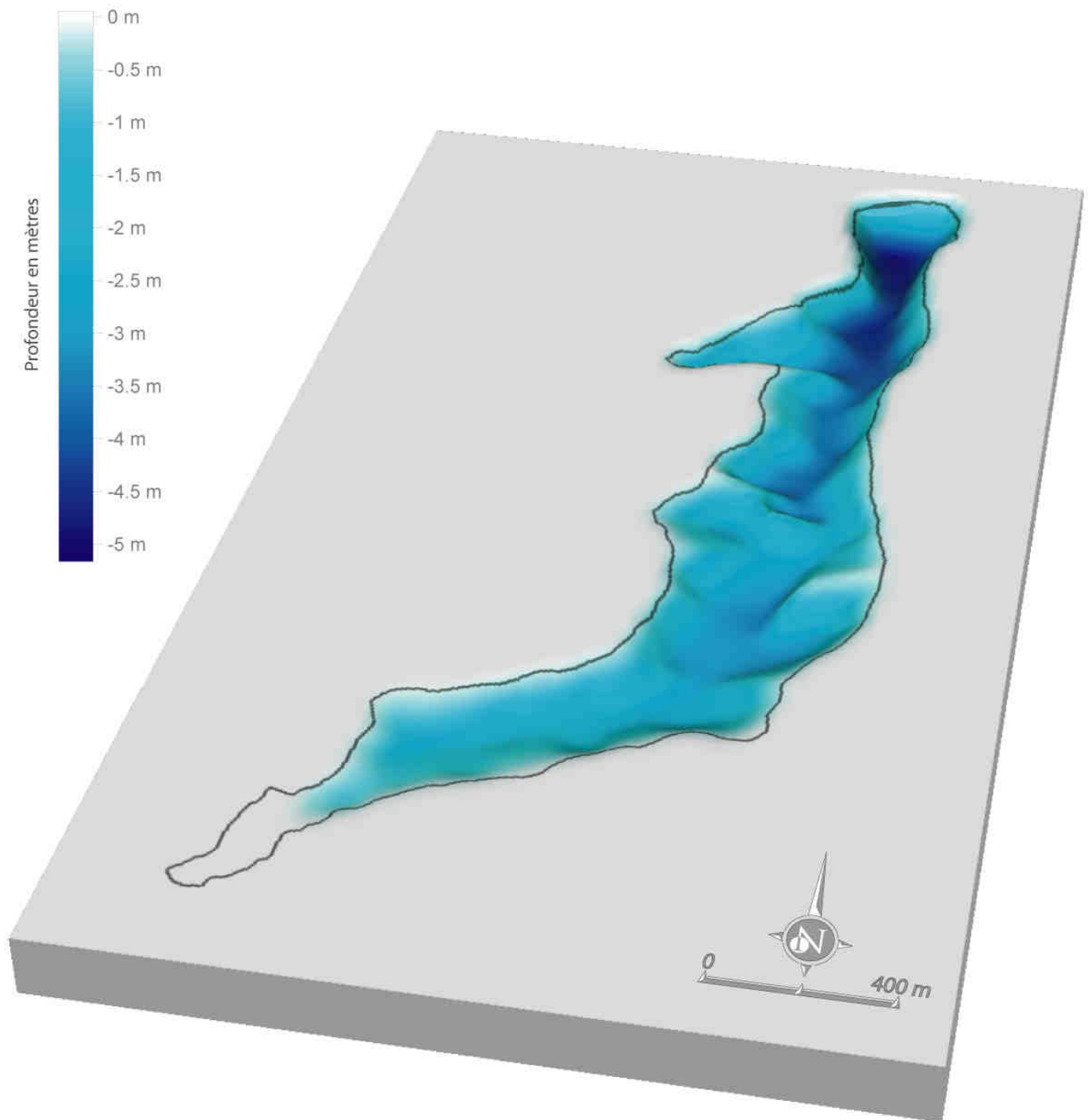


Figure 33 :
Carte des convexités et concavités du Grand étang de Cieux



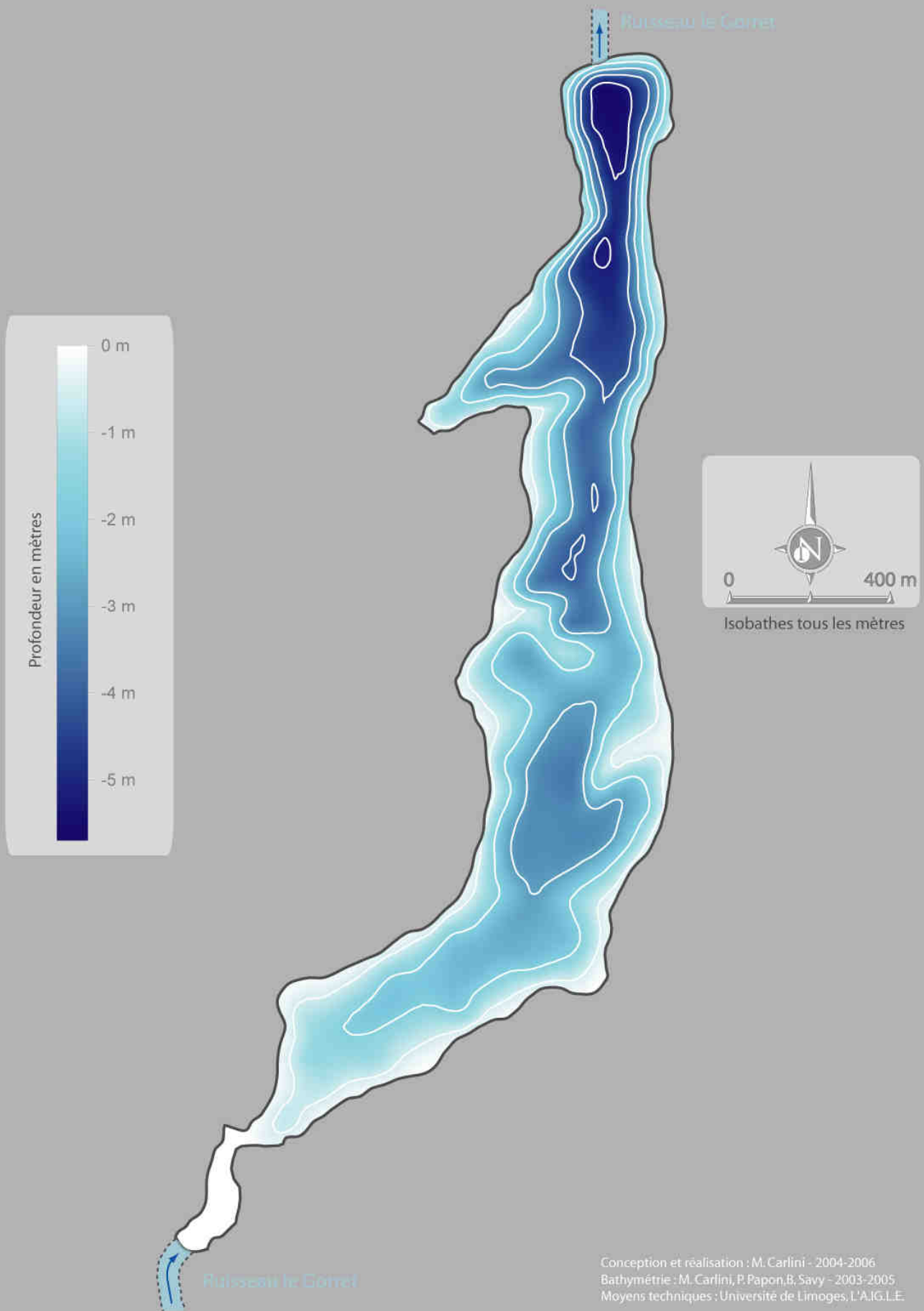
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy, R. Crouzevialle - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 34 :
Modèle bathymétrique de l'étang de la Pouge



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004-2006
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2003-2005
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.J.G.L.E.

Figure 35 :
Bathymétrie de l'étang de la Pouge



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004-2006
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2003-2005
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 36 :
Carte des pentes de l'étang de la Pouge

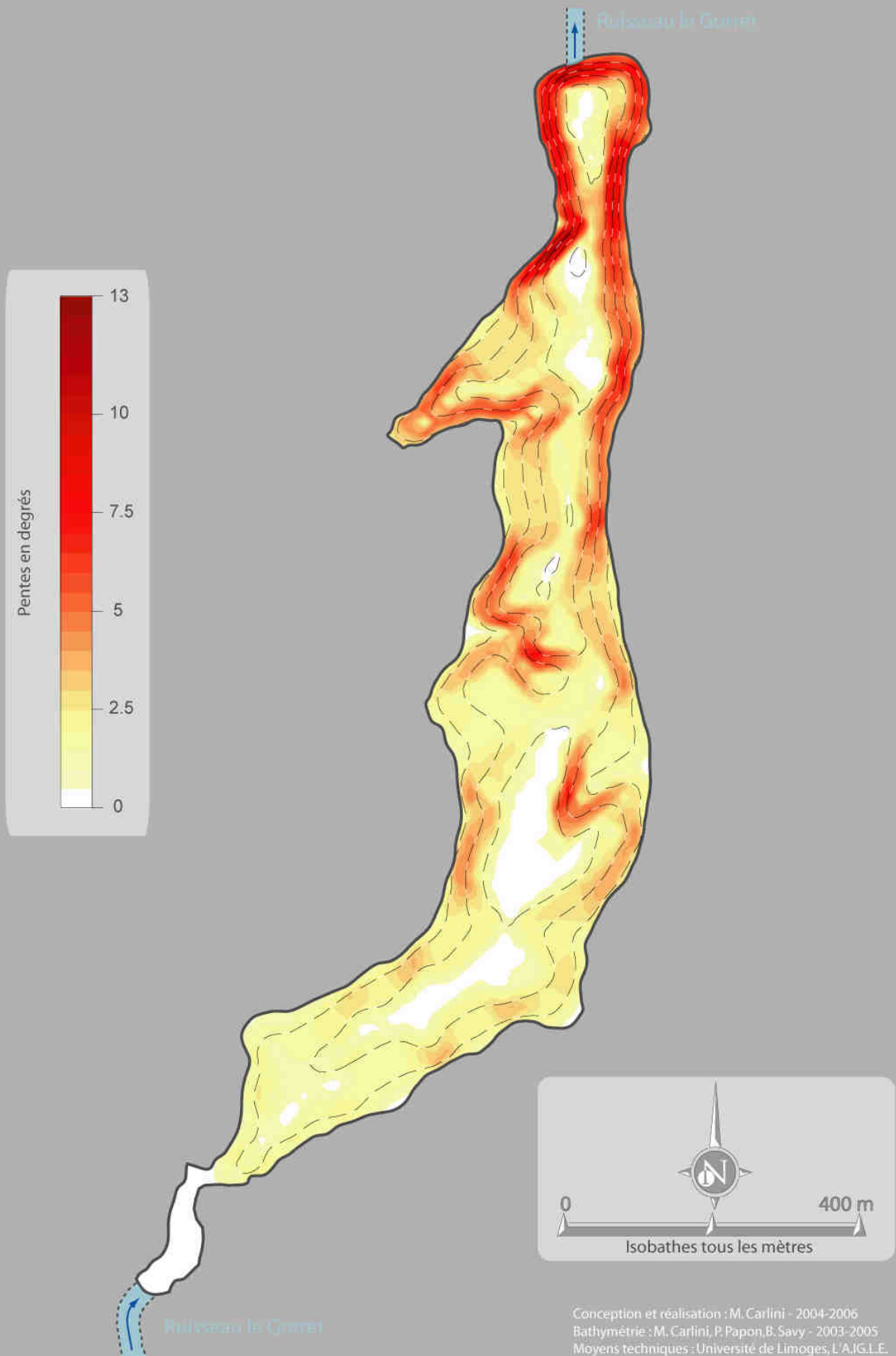


Figure 37 :
Carte des convexités et concavités de l'étang de la Pouge

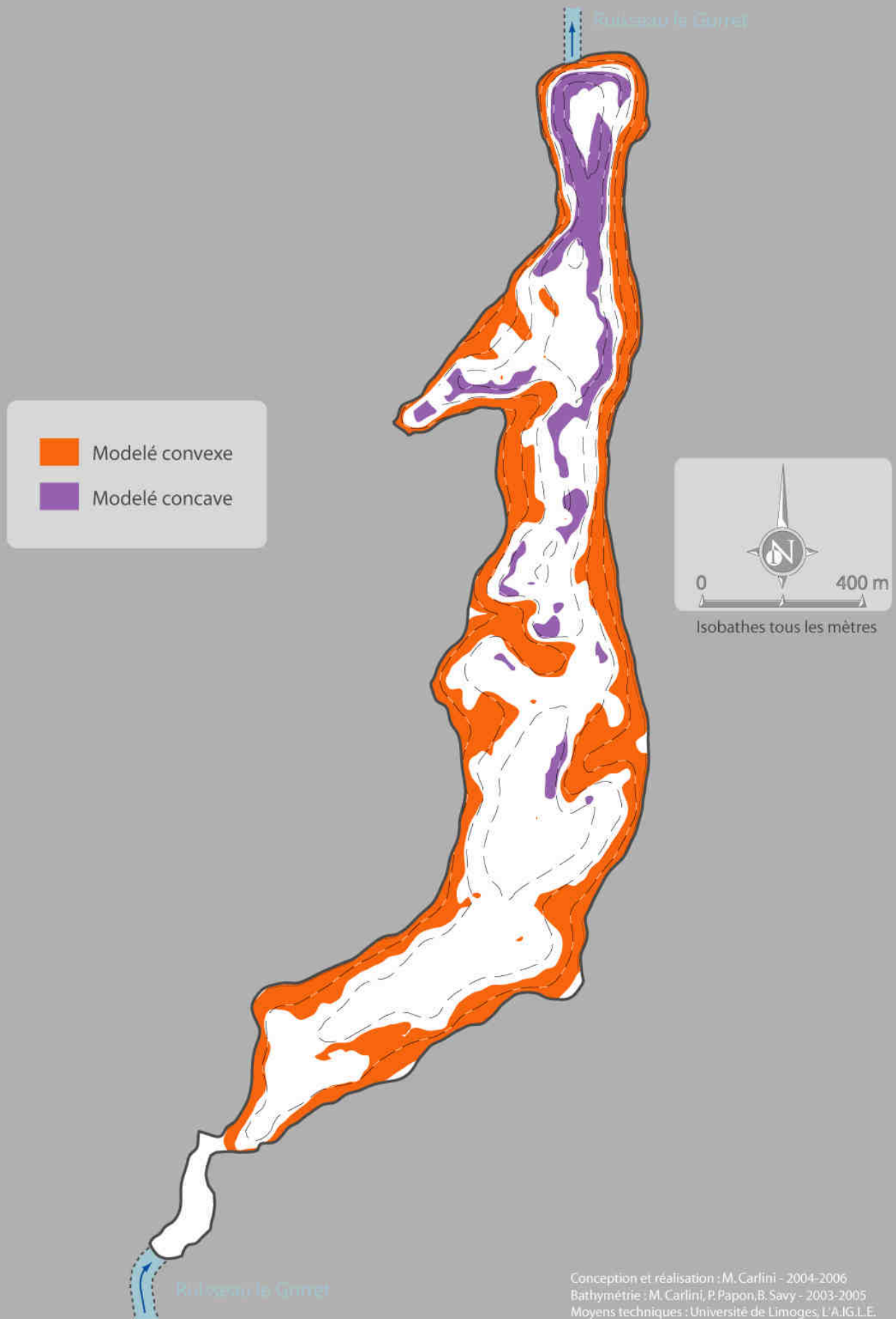
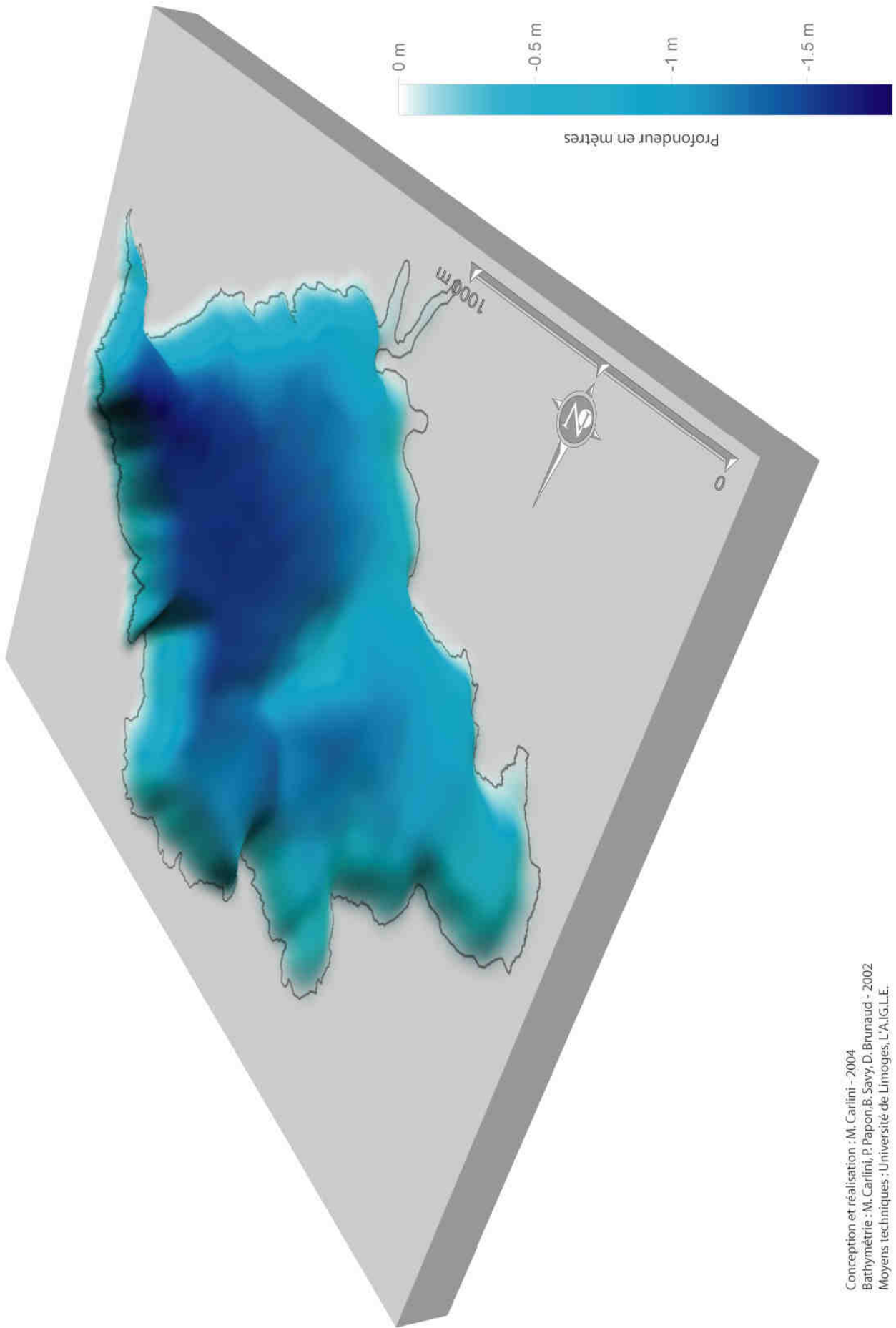


Figure 38 :
Modèle bathymétrique de l'étang des Landes



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy, D. Brunaud - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 39 :
Bathymétrie de l'étang des Landes

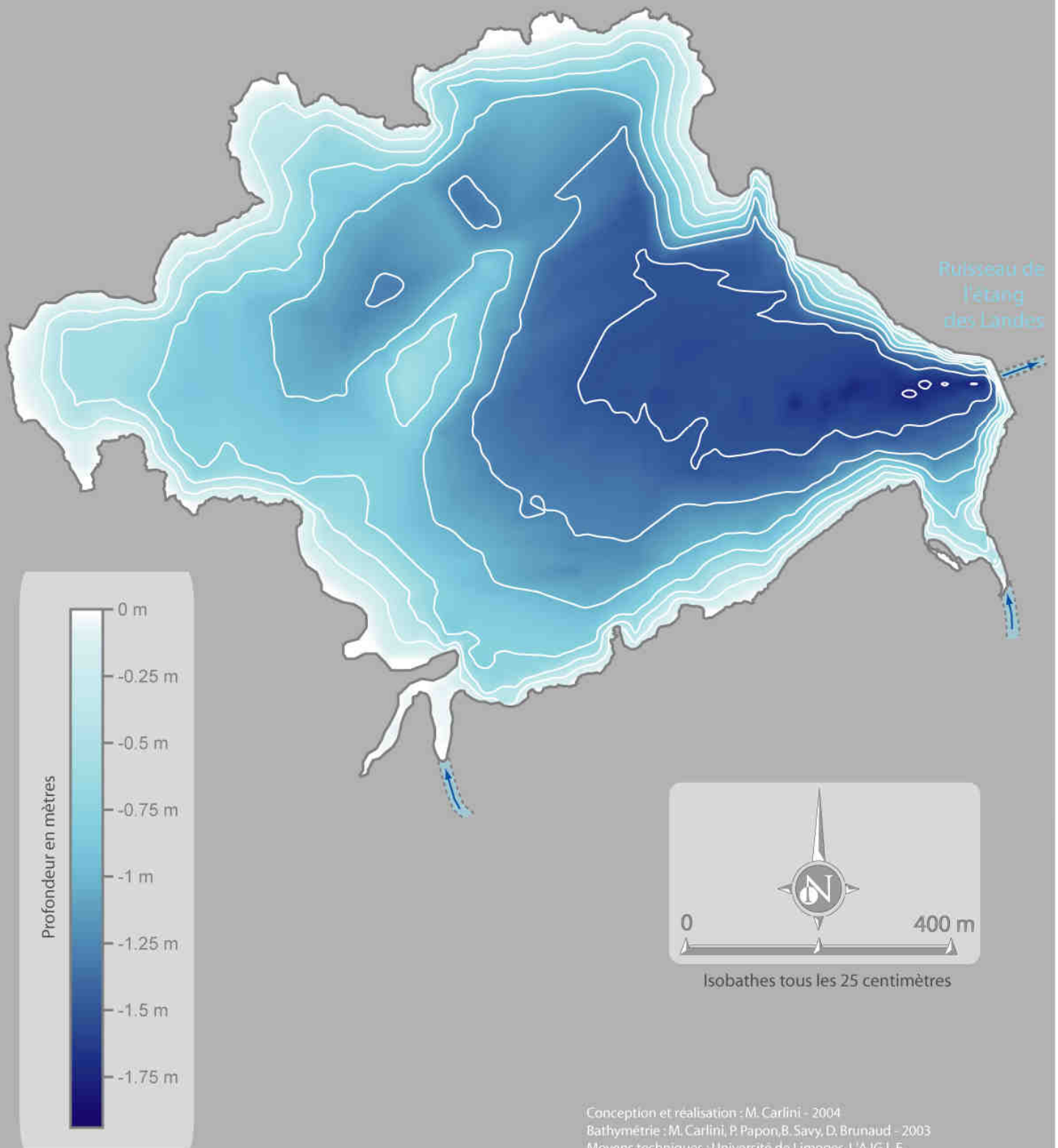


Figure 40 :
Carte des pentes de l'étang des Landes

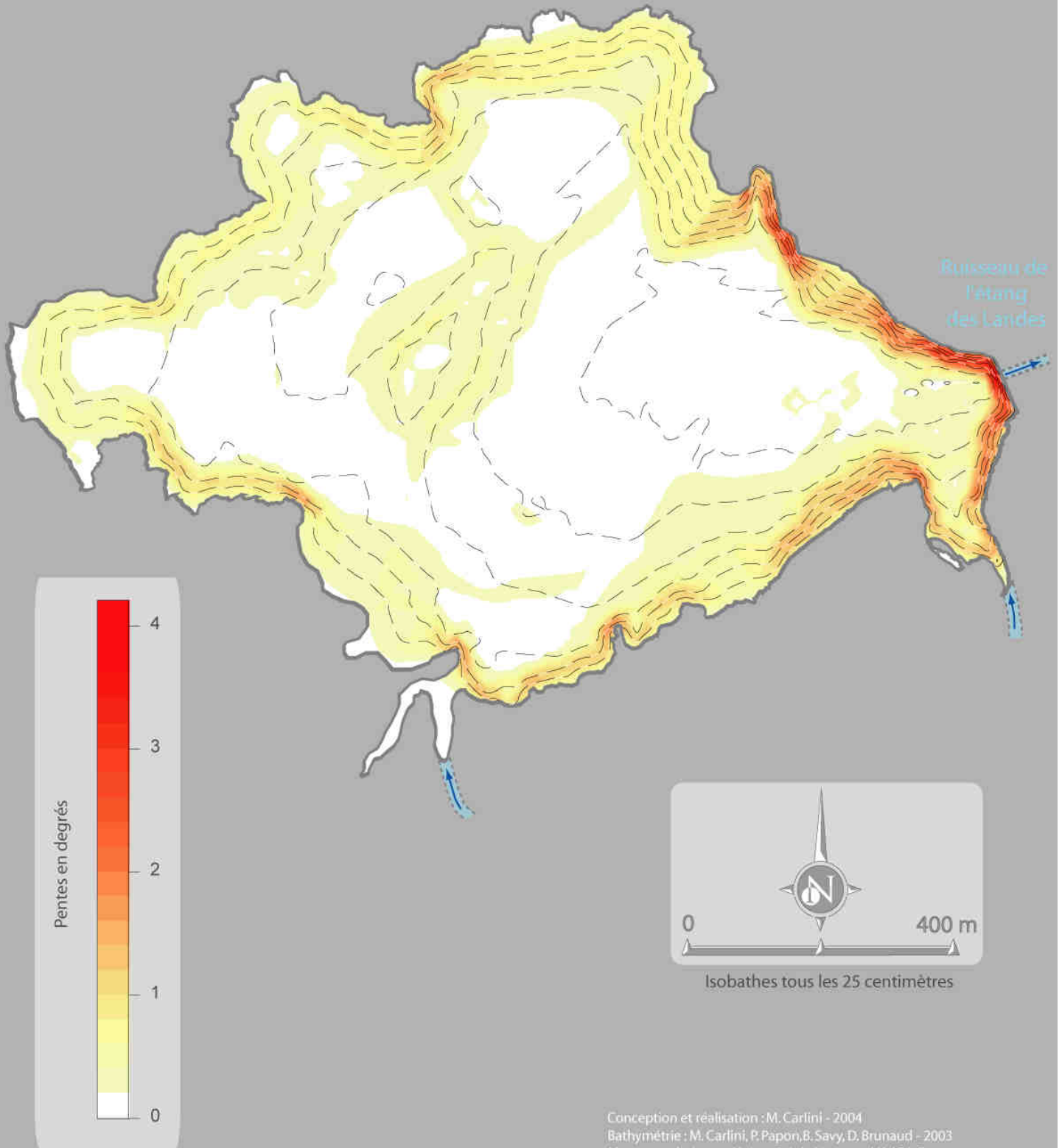
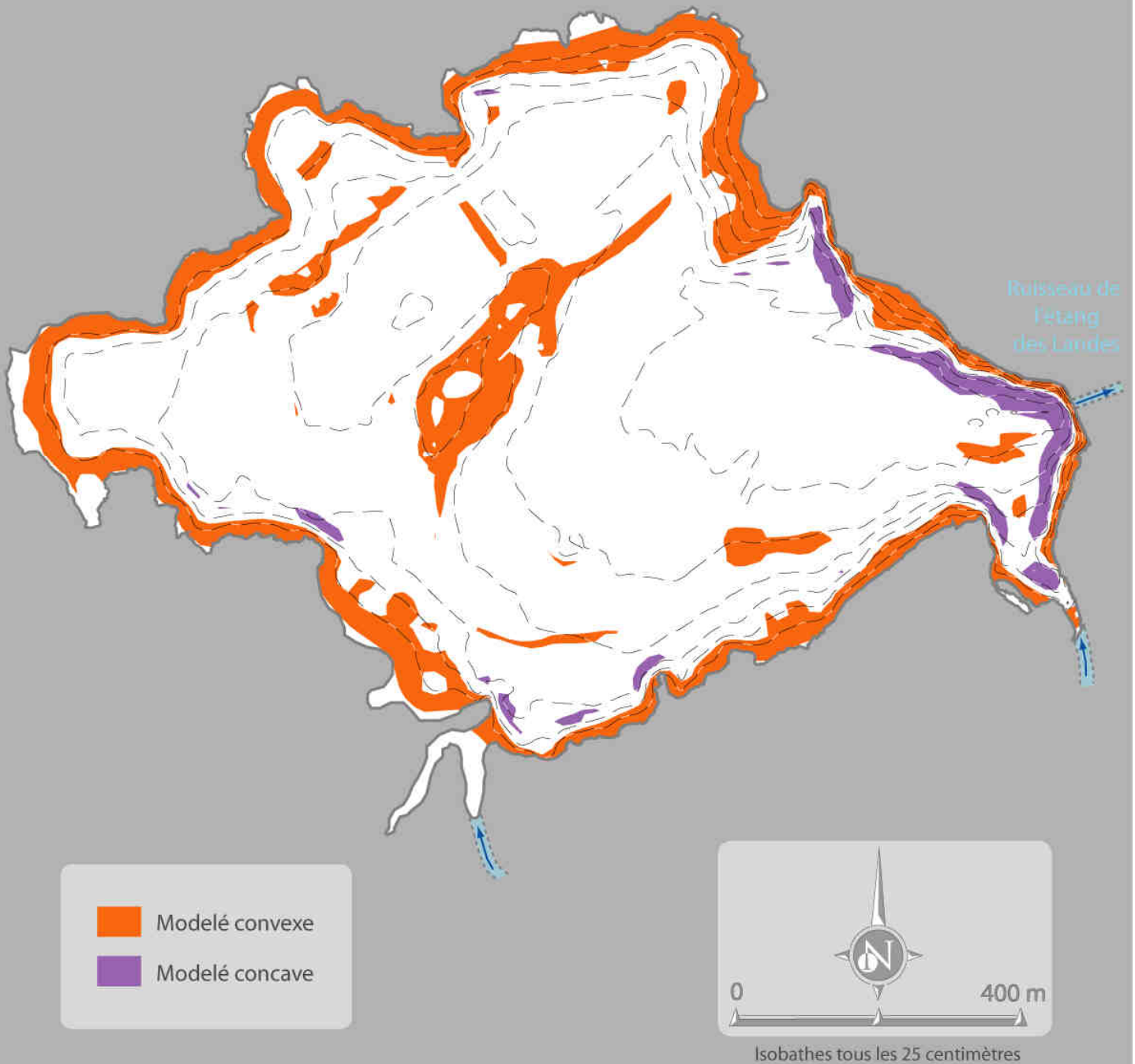
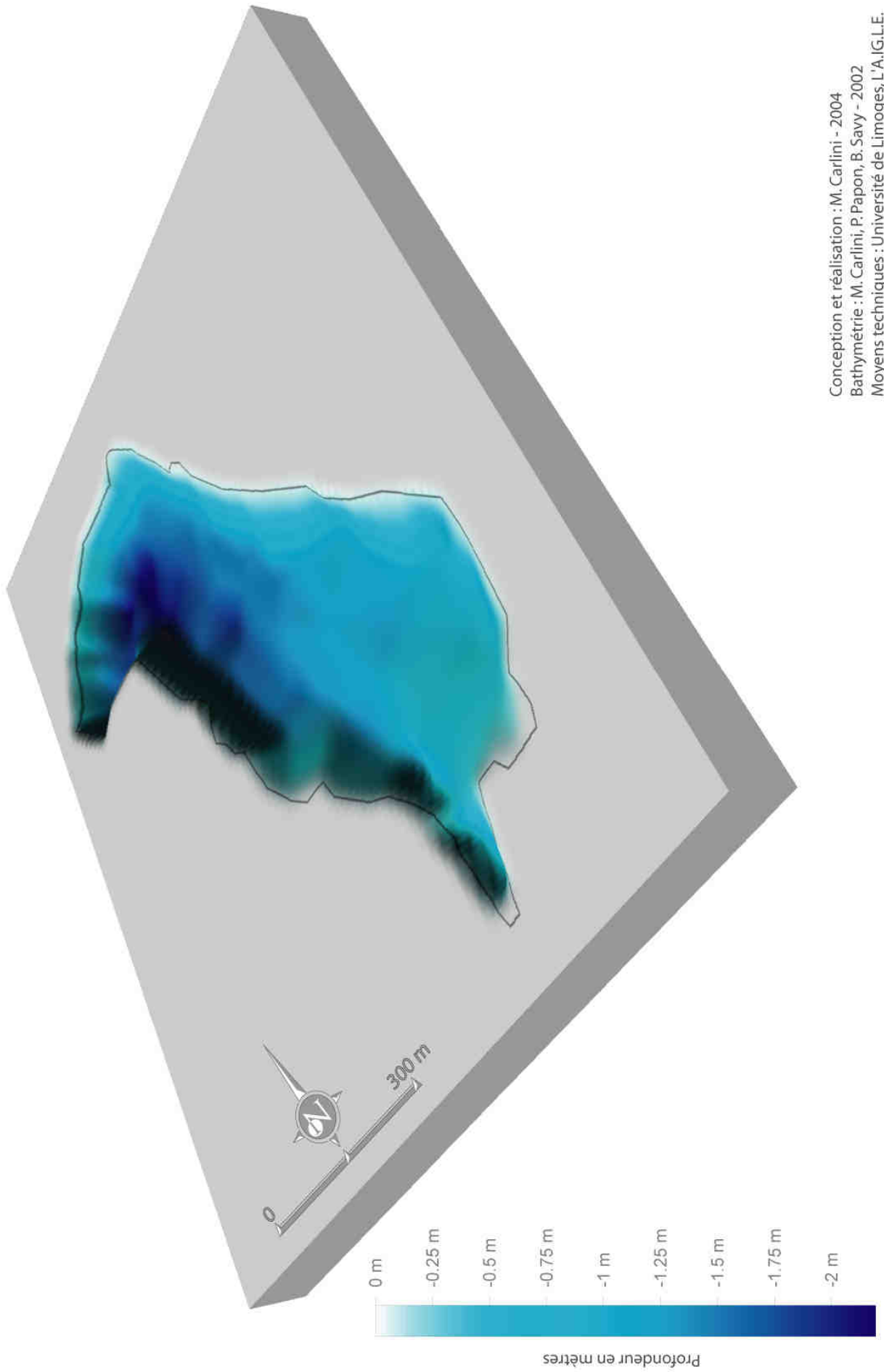


Figure 41 :
Carte des convexités et concavités de l'étang des Landes



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy, D. Brunaud - 2003
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 42 :
Modèle bathymétrique de l'étang des Oussines



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 43 :
Bathymétrie de l'étang des Oussines

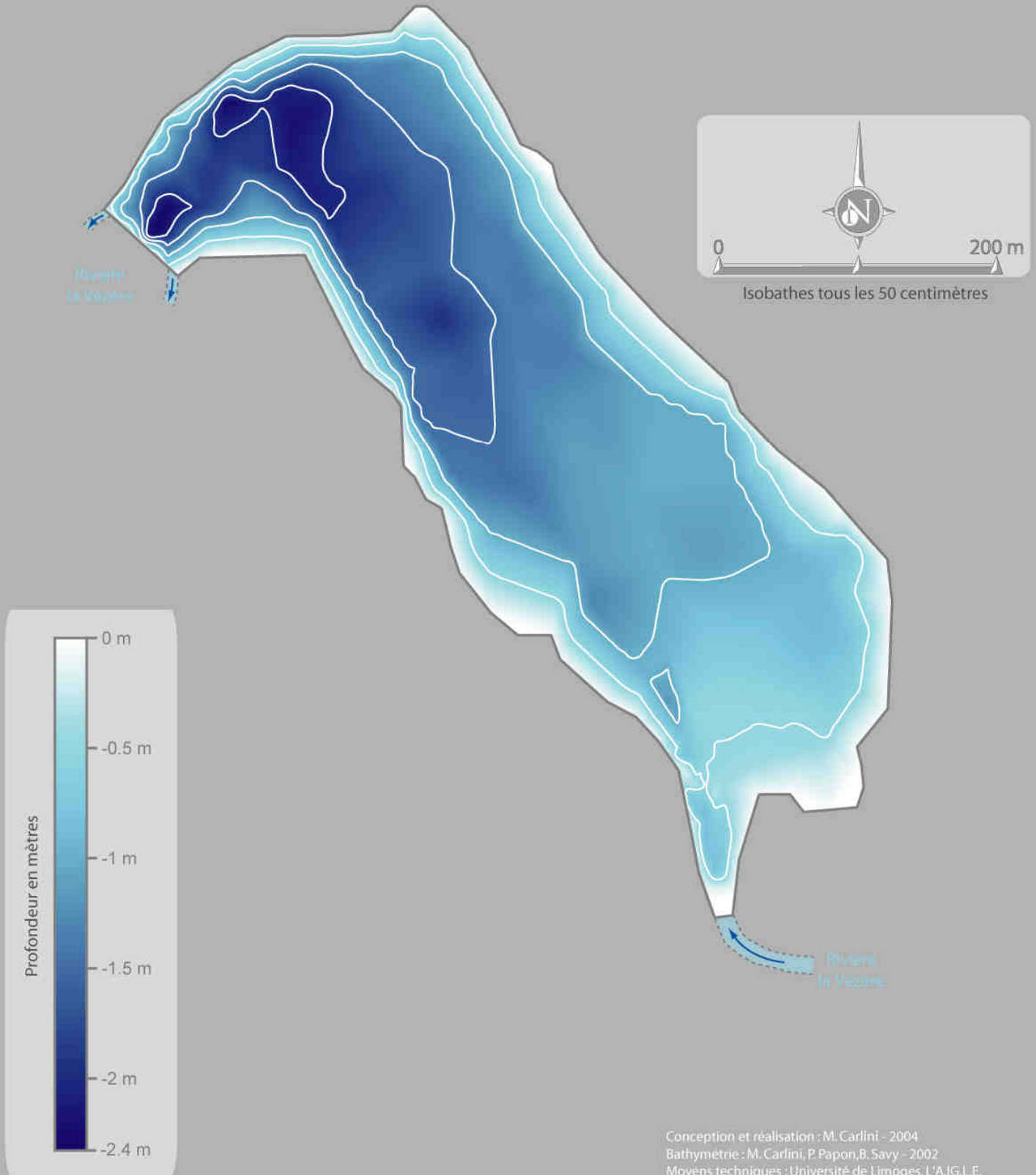
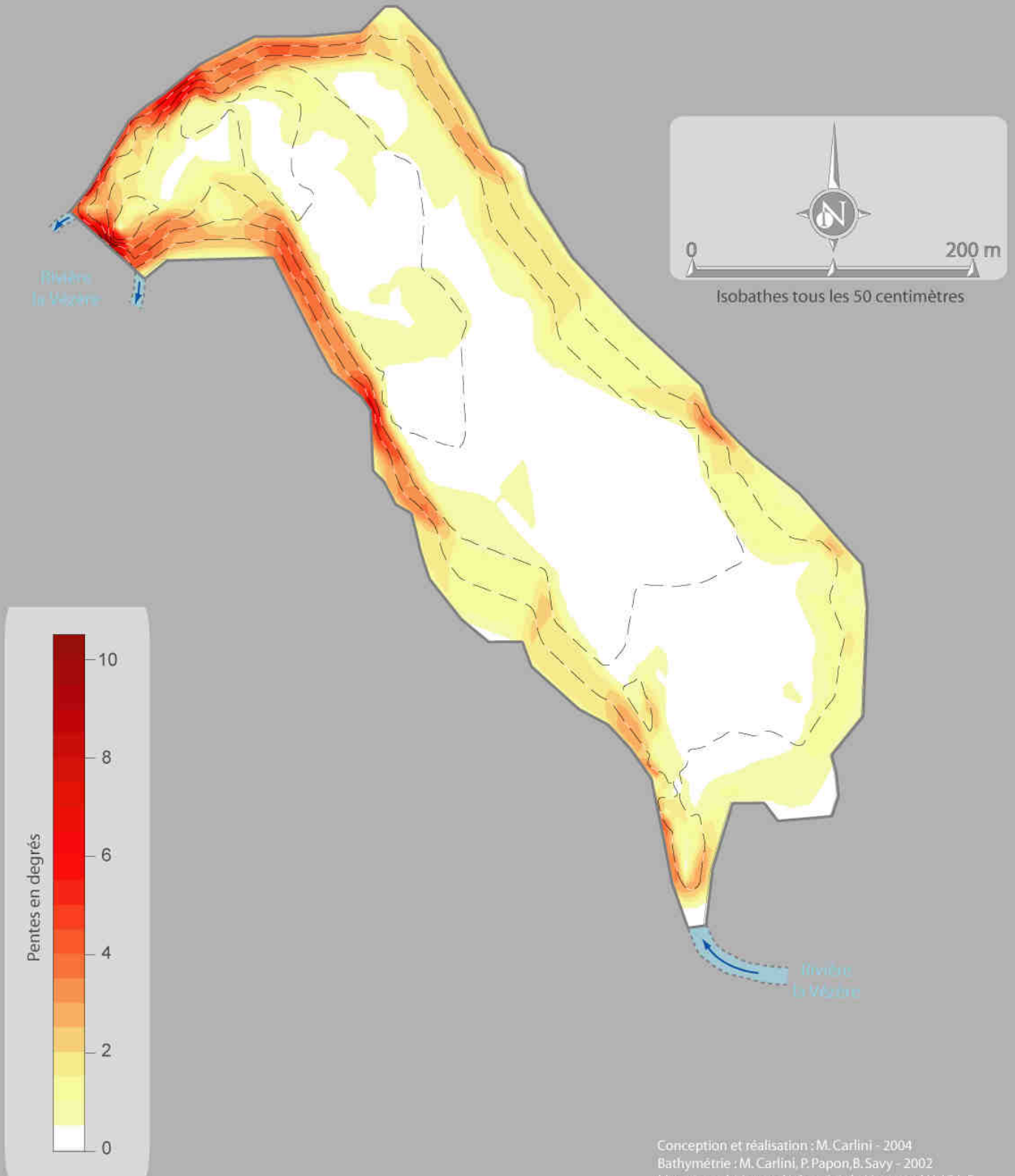


Figure 44 :
Carte des pentes de l'étang des Oussines



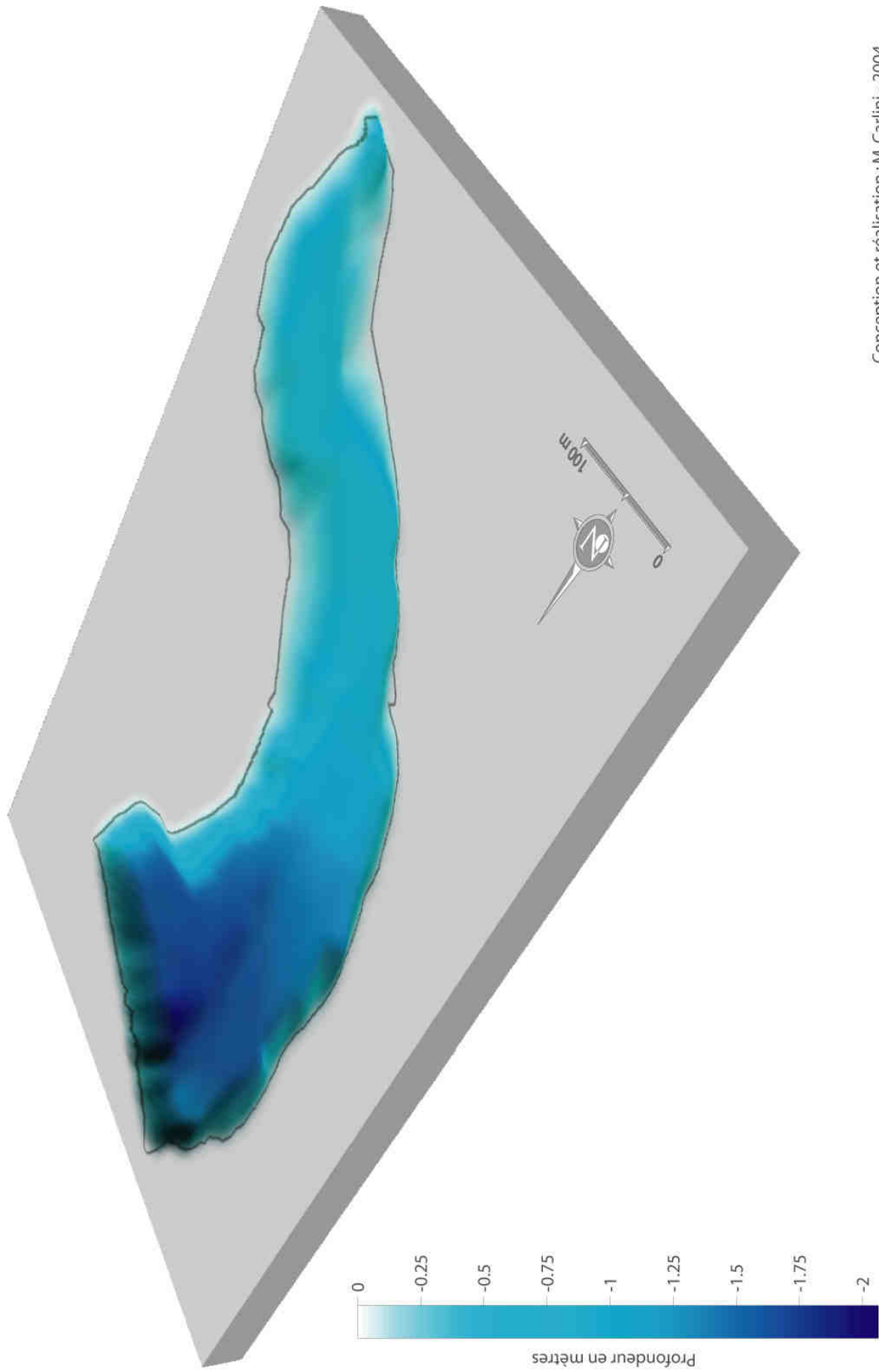
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 45 :
Carte des convexités et concavités de l'étang des Oussines



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 46 :
Modèle bathymétrique de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)



Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini P, Papon, B. Savy - 2003
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 47 :
Bathymétrie de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)

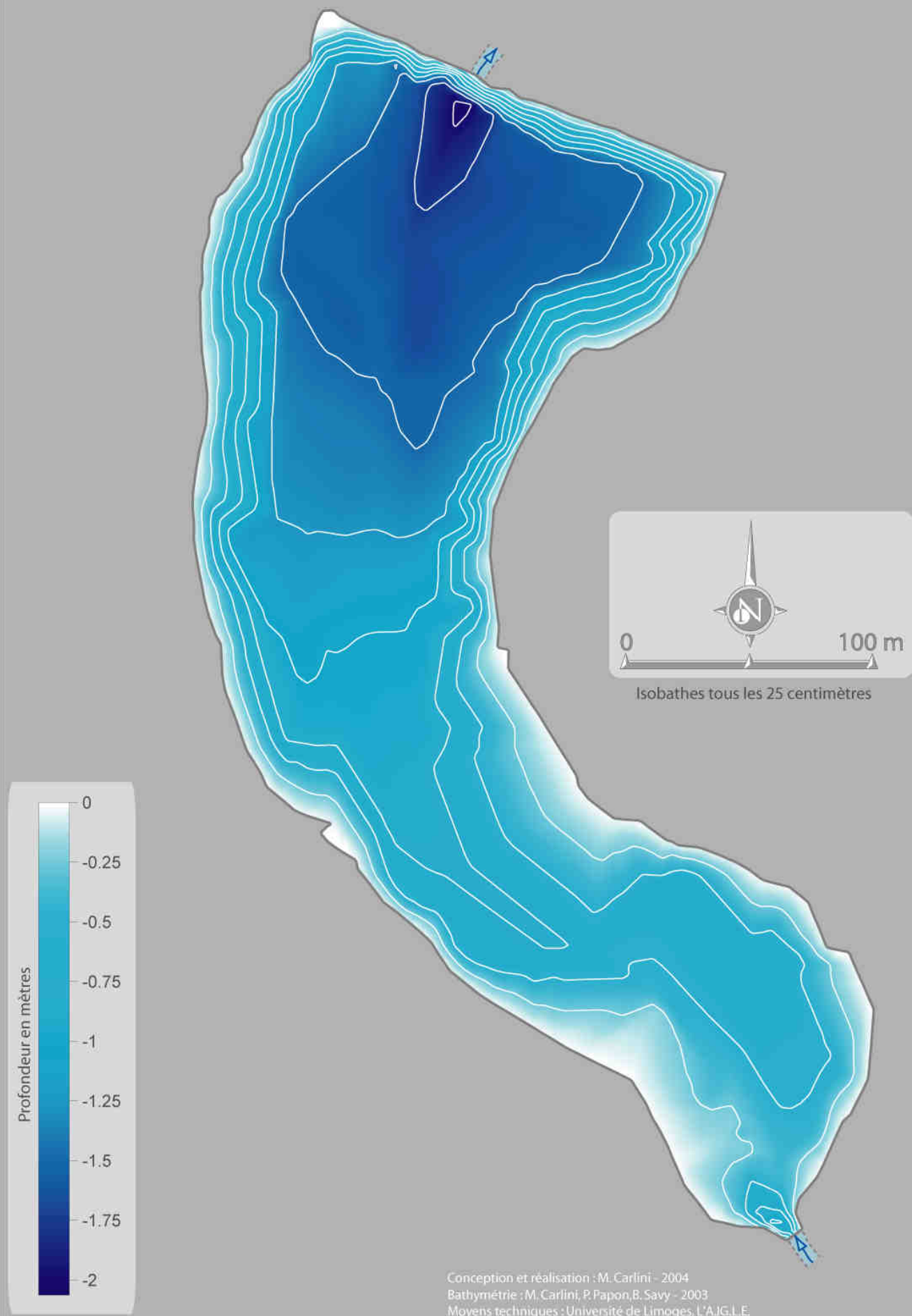


Figure 48 :
Carte des pentes de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)

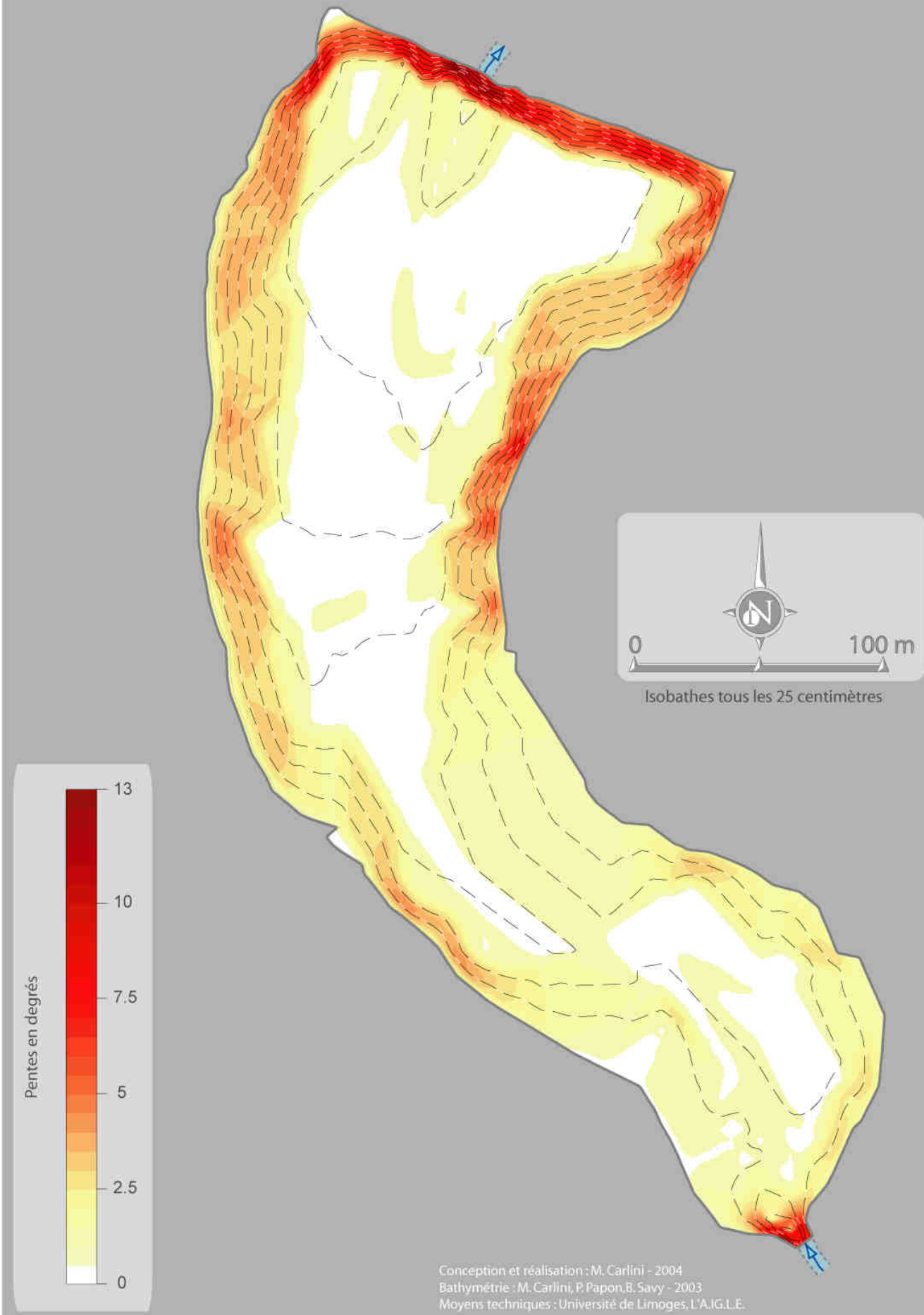
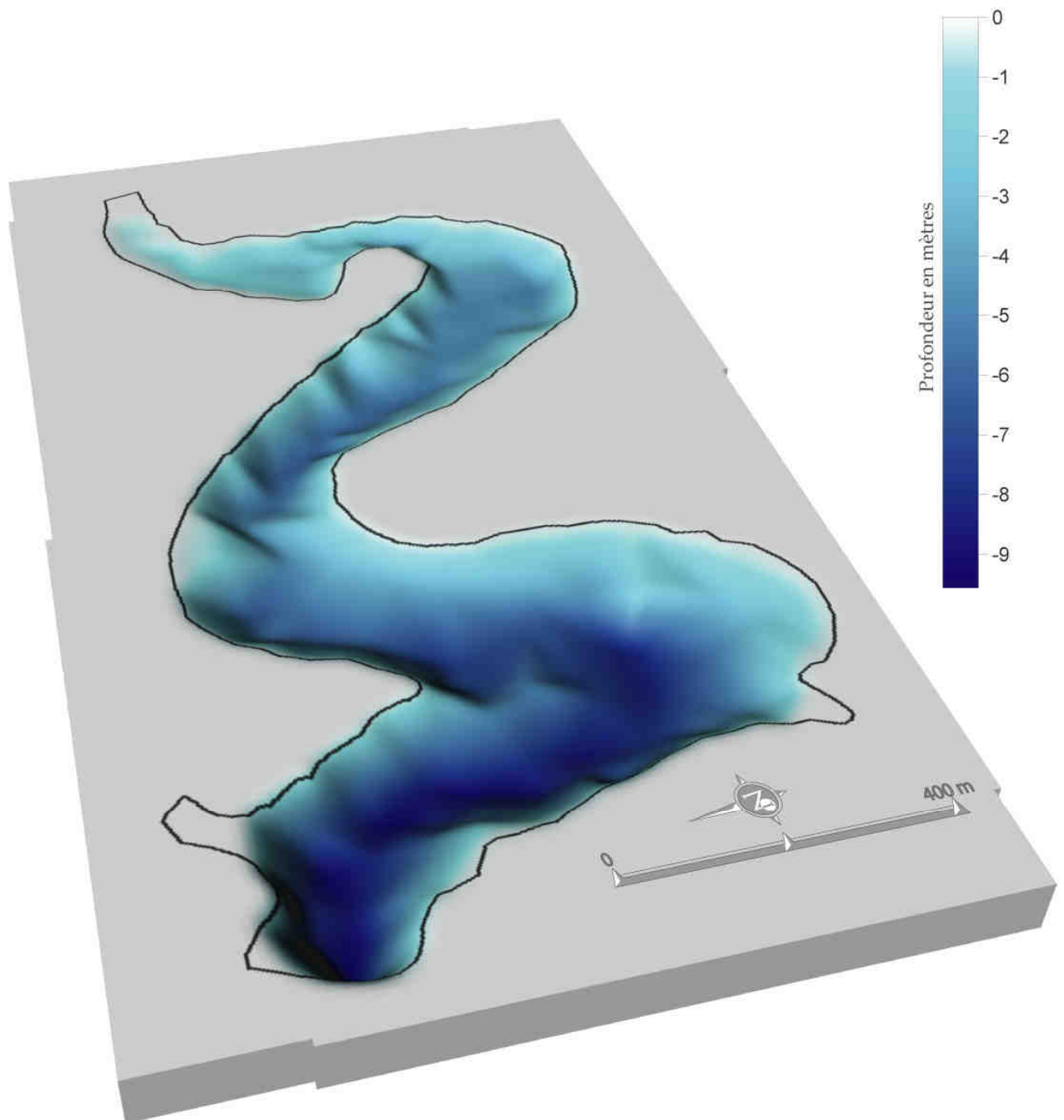


Figure 49 :
Carte des concavités et convexités de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)



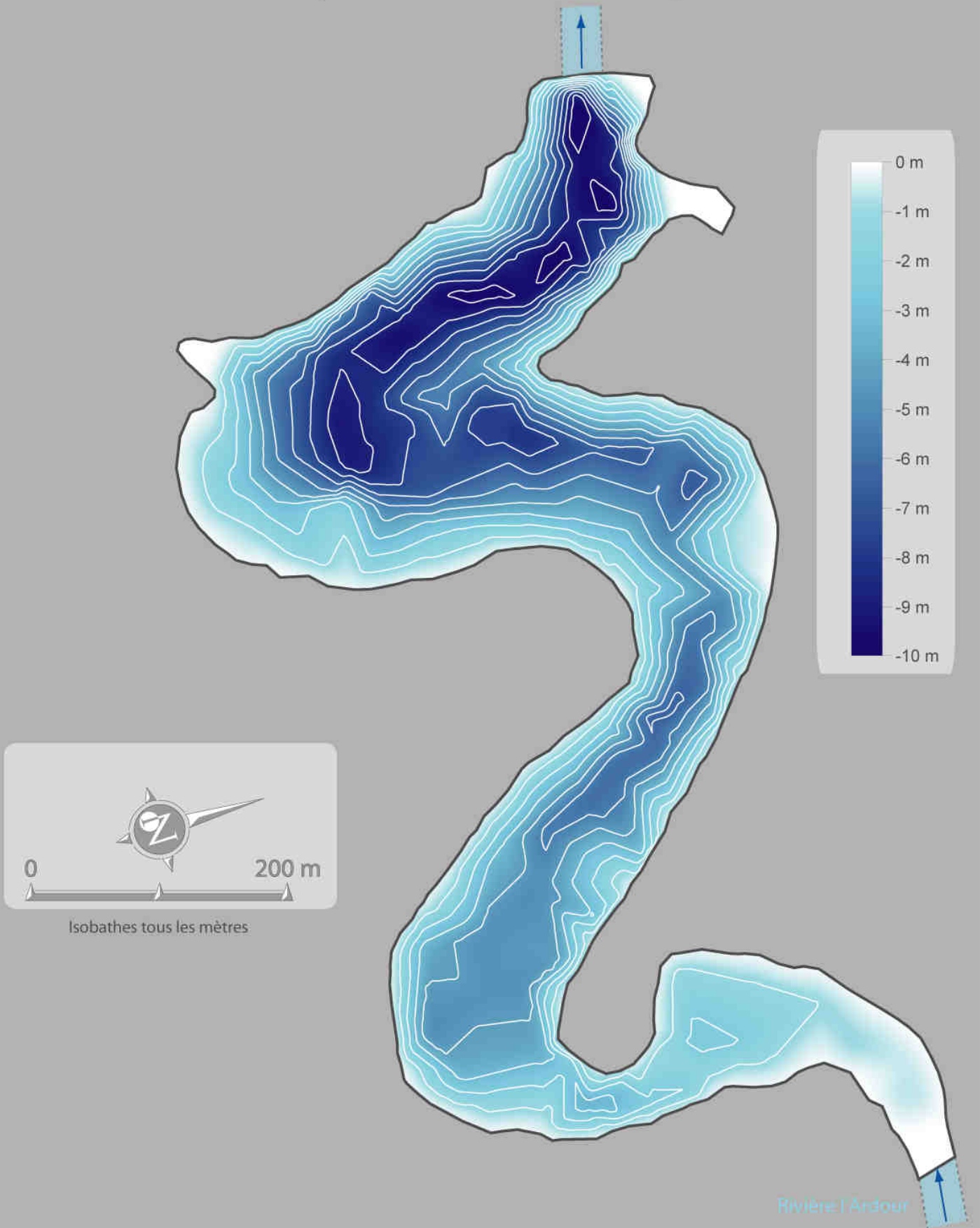
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2003
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.J.G.L.E.

Figure 50 :
Modèle bathymétrique du lac du Pont à l'Age



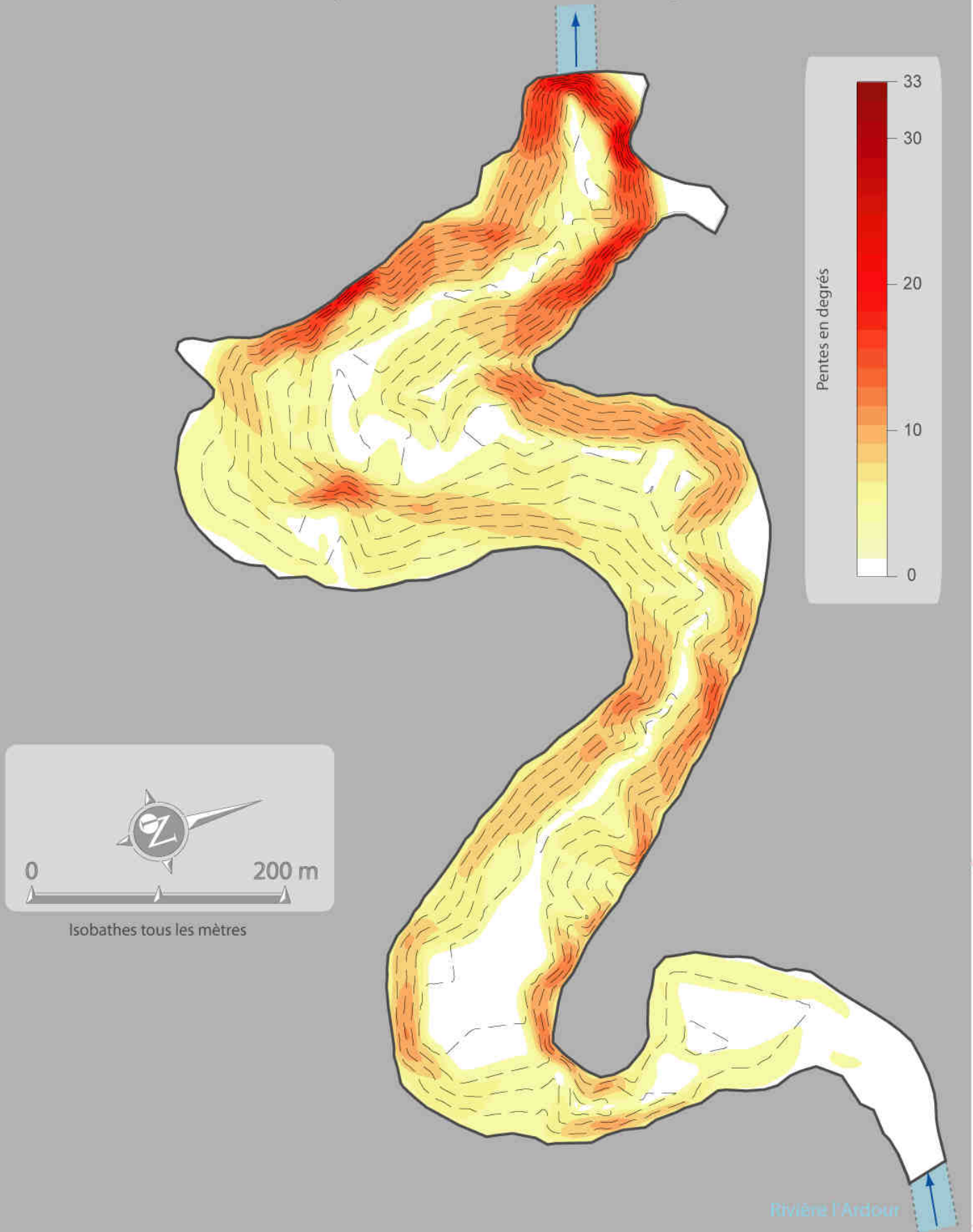
Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : A. Domingo, J. Ledonge, M. Carlini- 2004
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 51 :
Bathymétrie du lac du Pont à l'Age



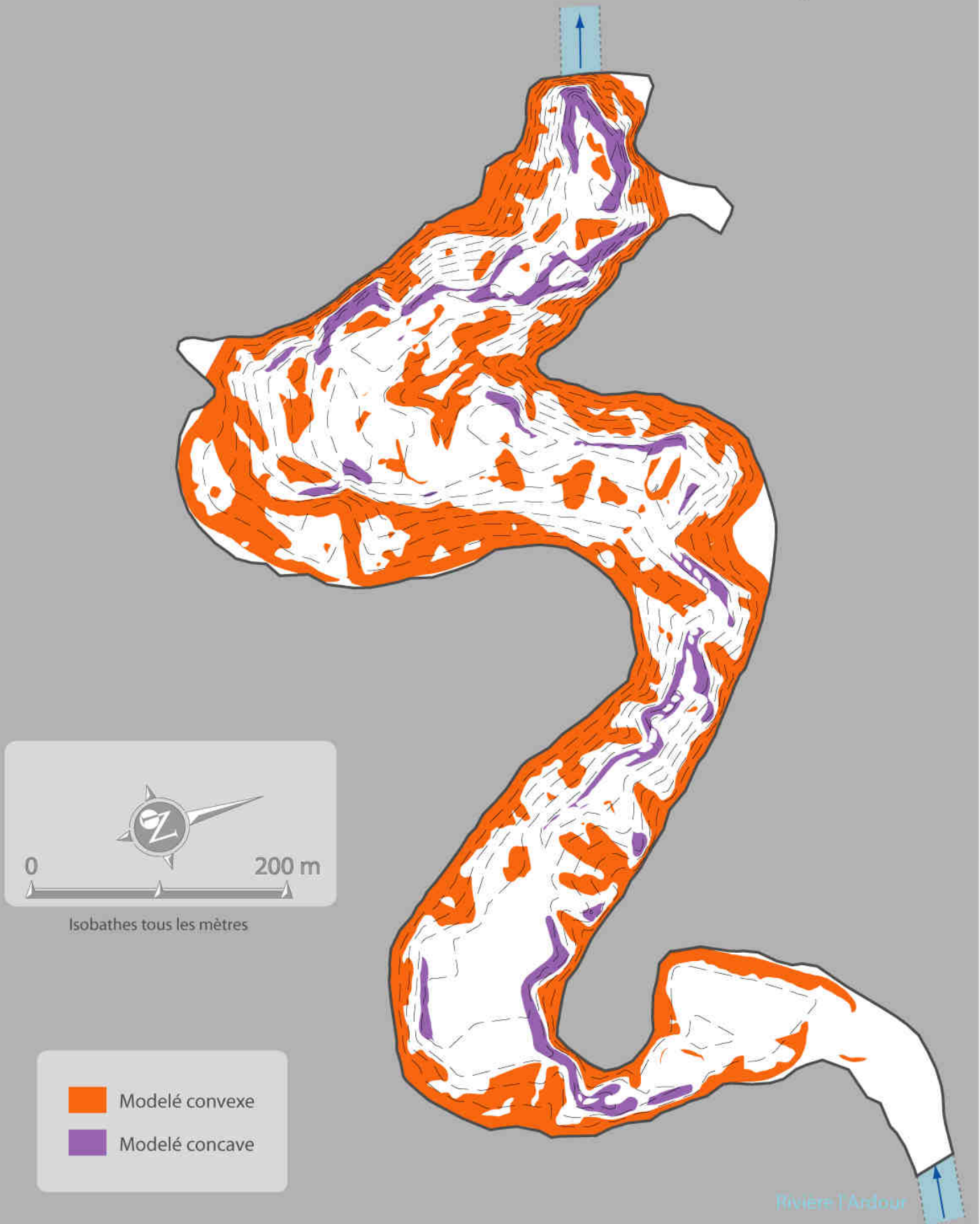
Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : A. Domingo, J. Ledonge, M. Carlini - 2004
Moyens techniques : Université de Limoges, L'AIG.L.E.

Figure 52 :
Carte des pentes du lac du Pont à l'Age



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : A. Domingo, J. Ledonge, M. Carlini - 2004
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

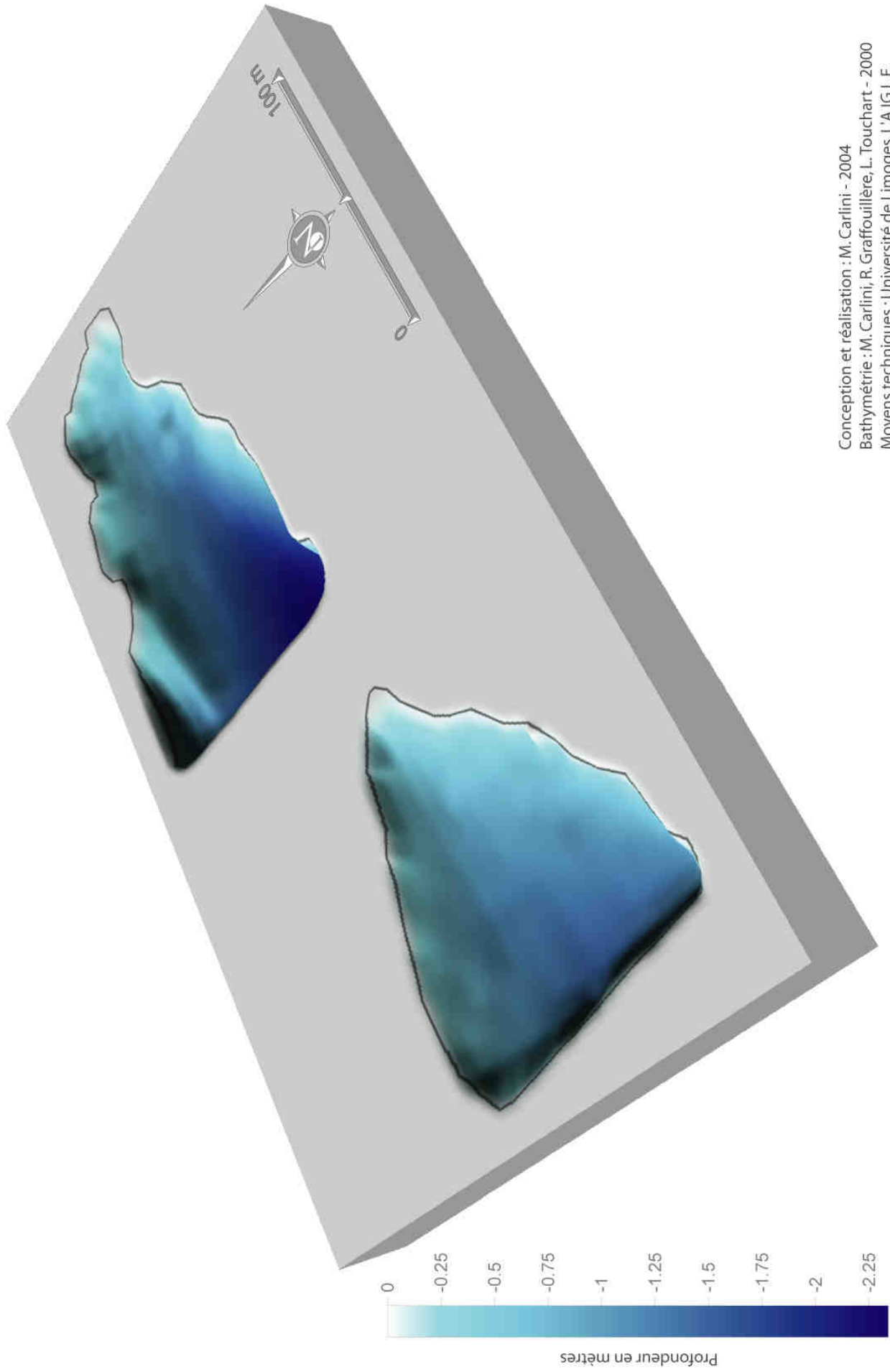
Figure 53 :
Carte des convexités et concavités du lac du Pont à l'Age



Rivières d'Ardeur

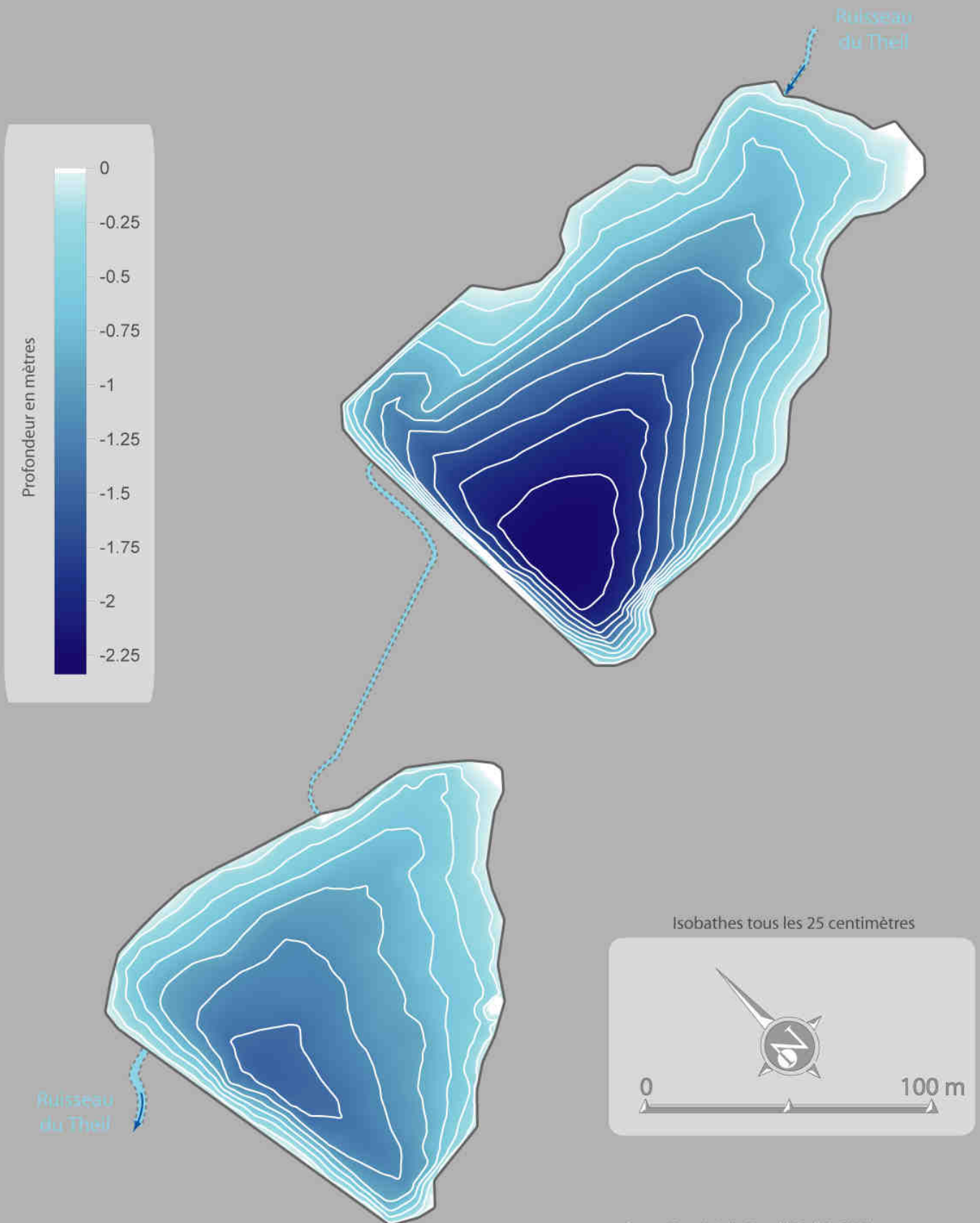
Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : A. Domingo, J. Ledongne, M. Carlini - 2004
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 54 :
Modèles bathymétriques des étangs du Theil et des Garennes



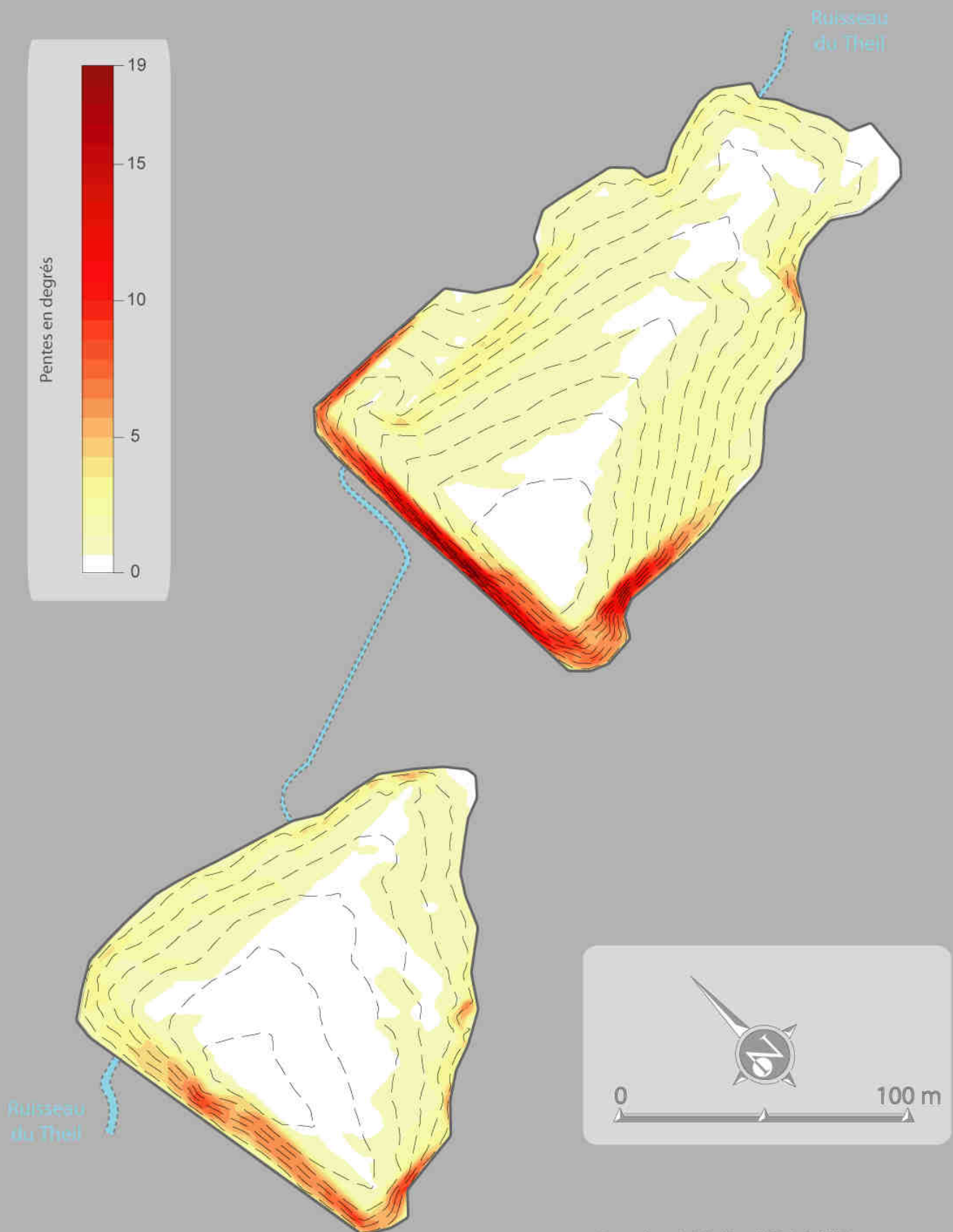
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, R. Graffouillère, L. Touchart - 2000
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 55 :
Bathymétrie des étangs du Theil et des Garennes



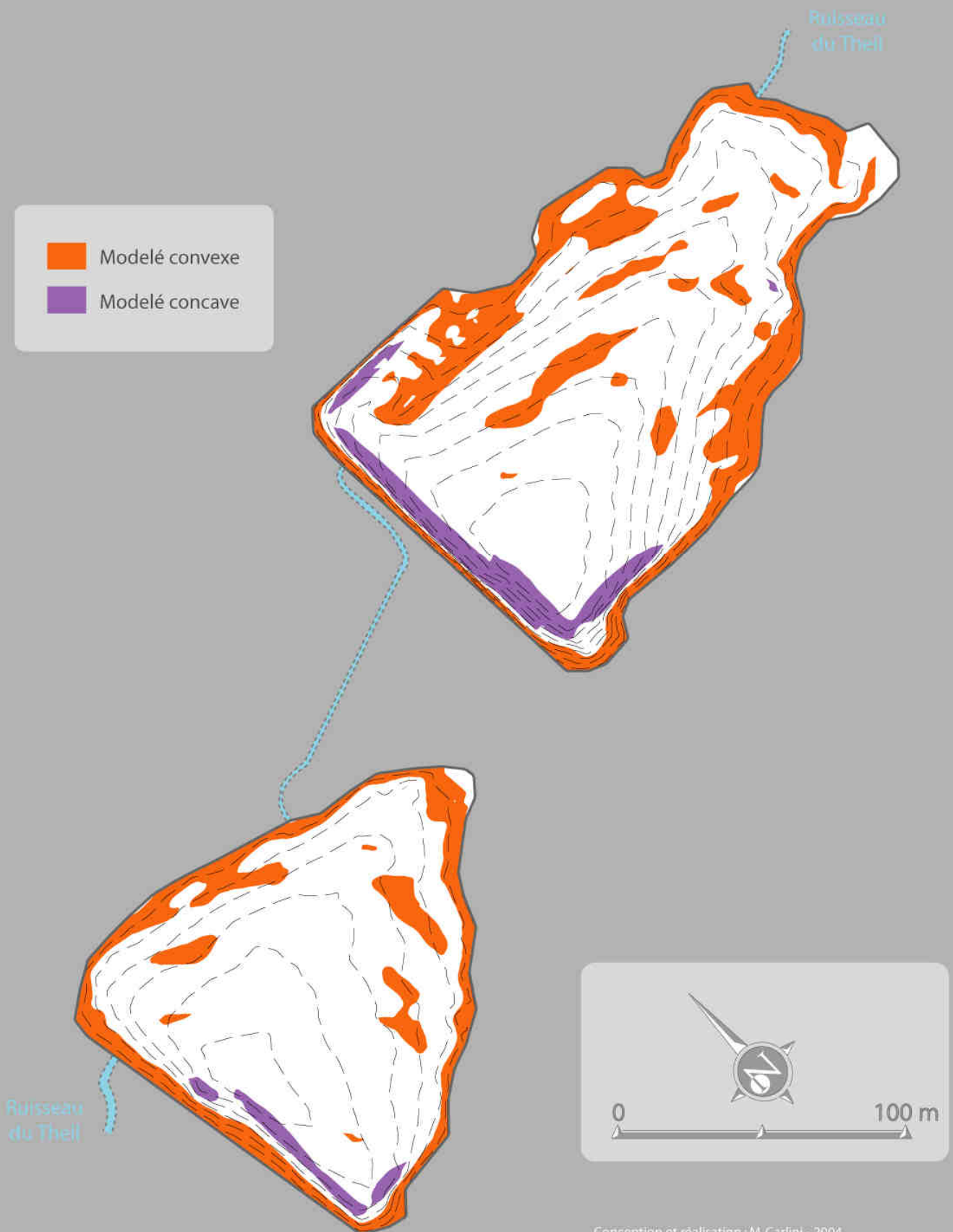
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, R. Graffouillere, L. Touchart - 2000
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 56 :
Carte des pentes des étangs du Theil et des Garennes



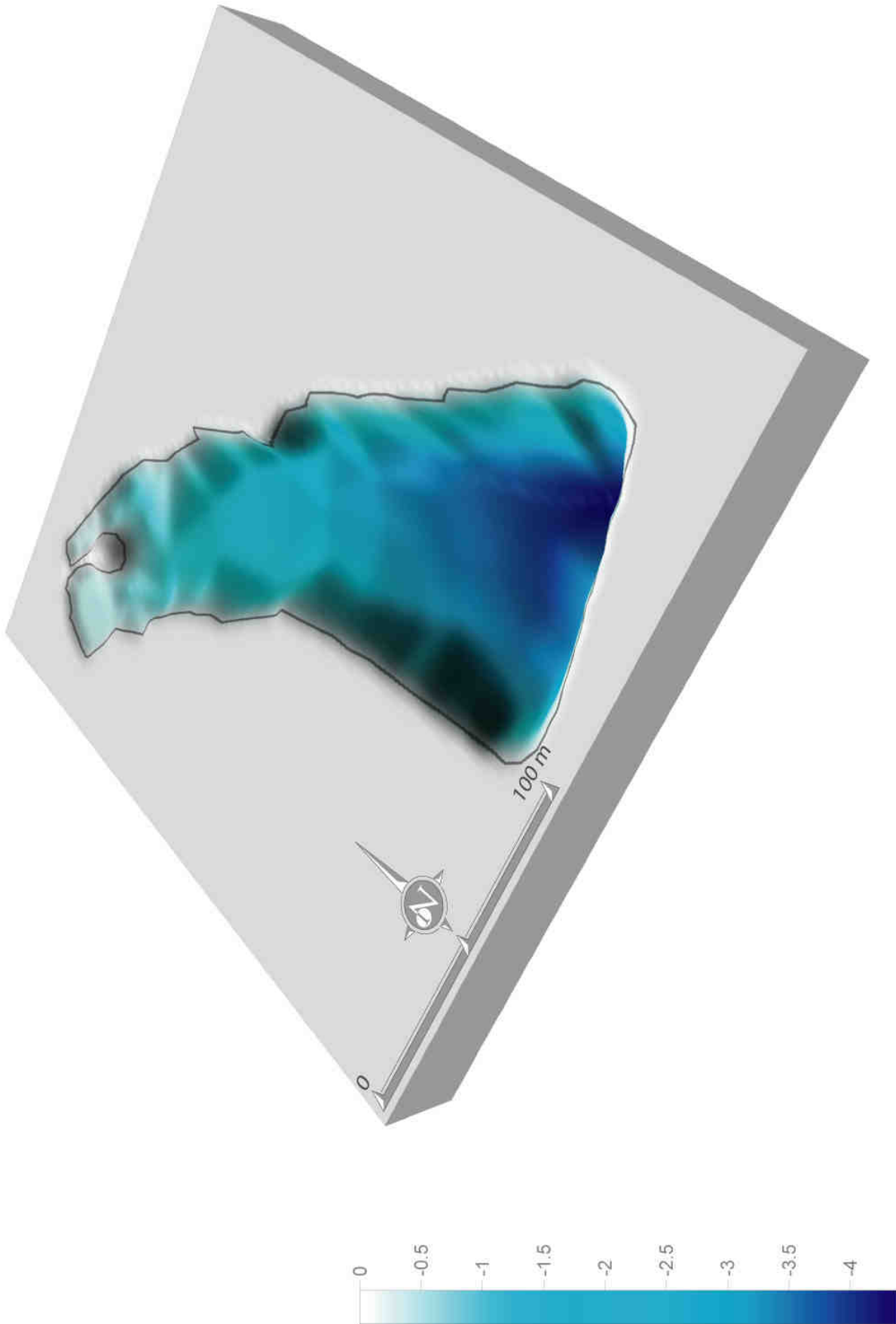
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, R. Graffouillère, L. Touchart - 2000
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 57 :
Carte des convexités et concavités des étangs du Theil et des Garennes



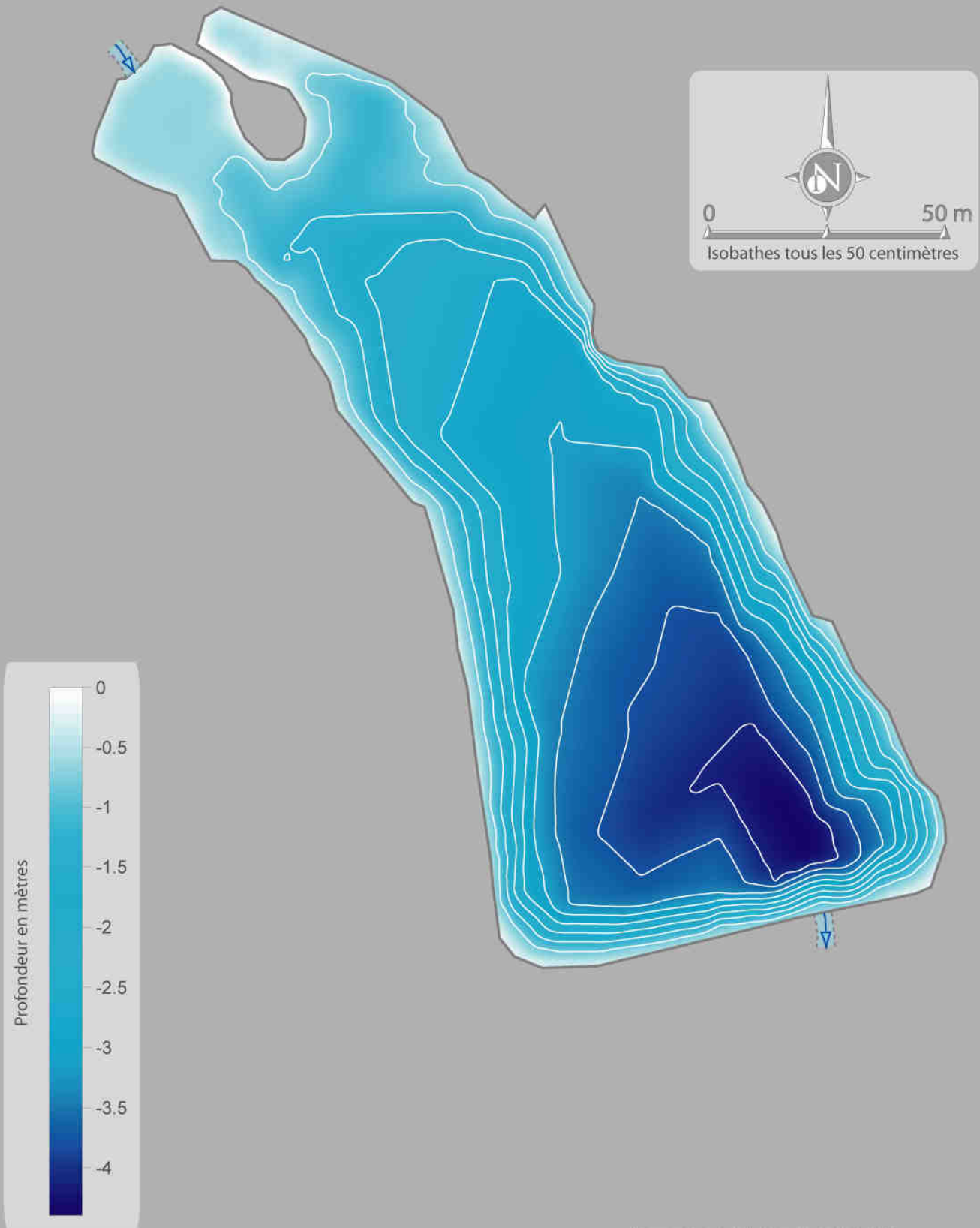
Conception et réalisation : M. Carlini - 2004
Bathymétrie : M. Carlini, R. Graffouillère, L. Touchart - 2000
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 58 :
Modèle bathymétrique de l'étang du Puy de Bavaud



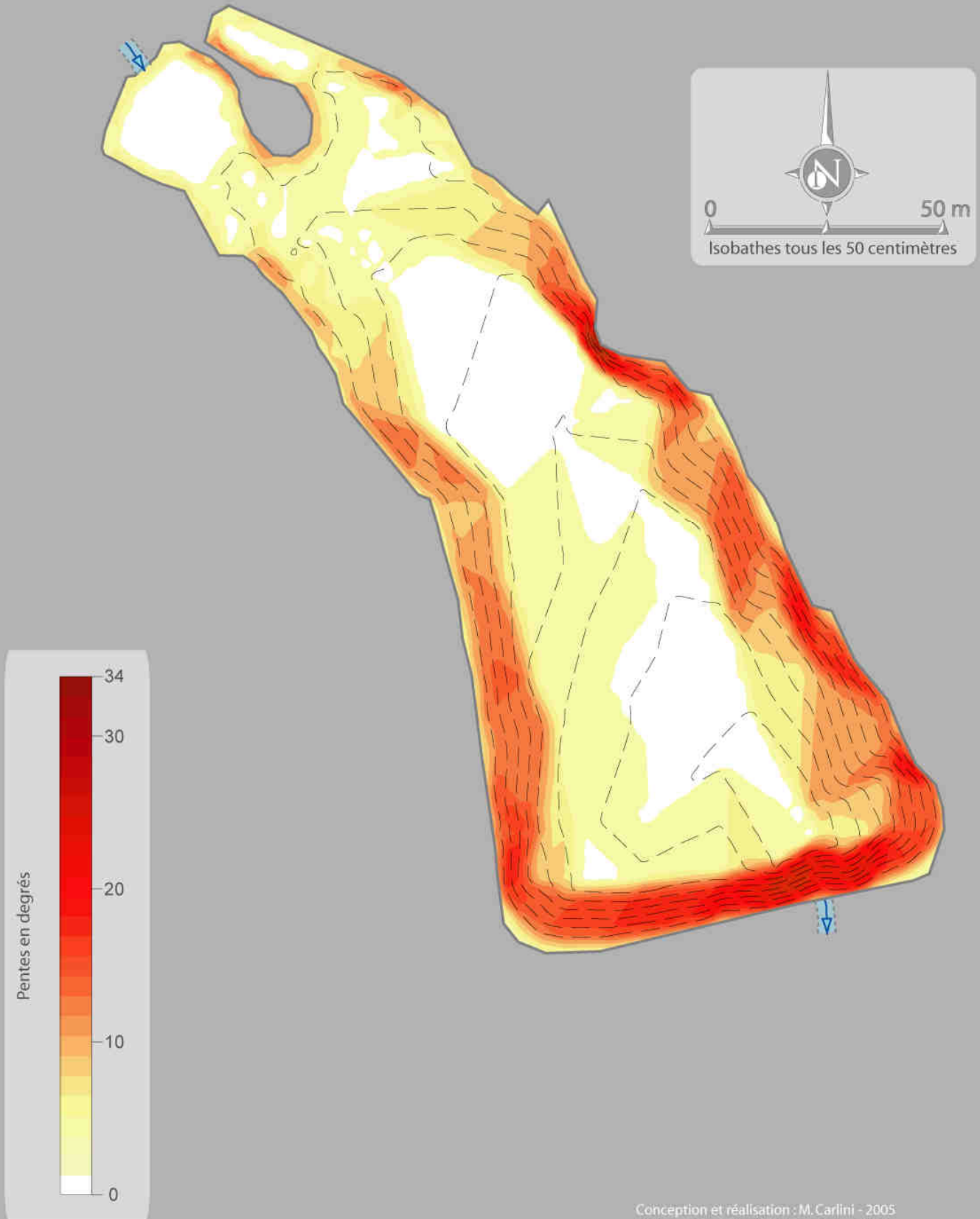
Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : M. Carlini, E. Mathelin - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 59 :
Bathymétrie de l'étang du Puy de Bavaud



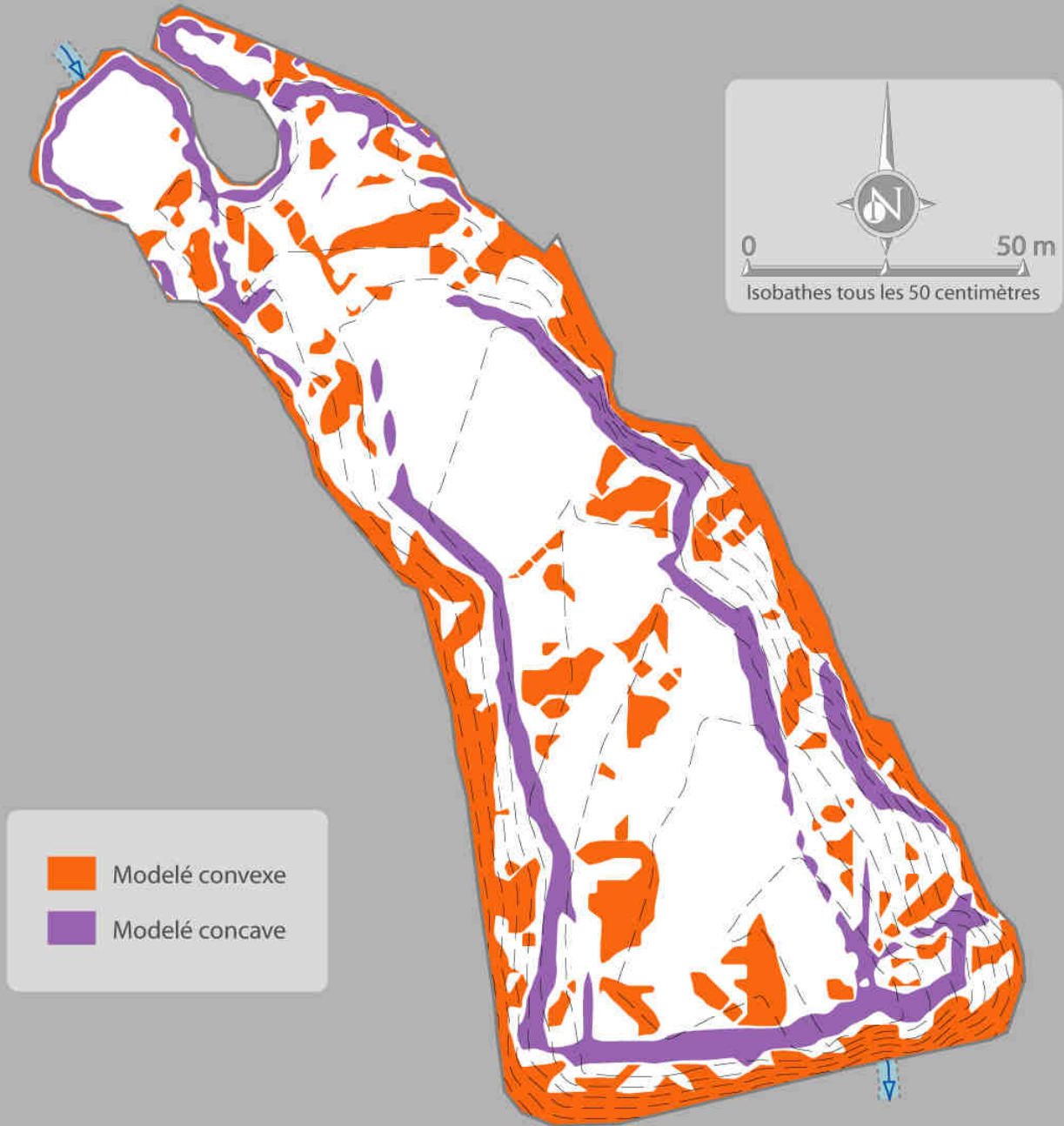
Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : M. Carlini, E. Mathelin - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 60 :
Modèle bathymétrique de l'étang du Puy de Bavaud



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : M. Carlini, E. Mathelin - 2002
Moyens techniques ; Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 61 :
Carte des concavités et convexités de l'étang du Puy de Bavaud



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005
Bathymétrie : M. Carlini, E. Mathelin - 2002
Moyens techniques : Université de Limoges, L'A.I.G.L.E.

Figure 62 :
Carte géomorphologique du Grand étang de Cieux

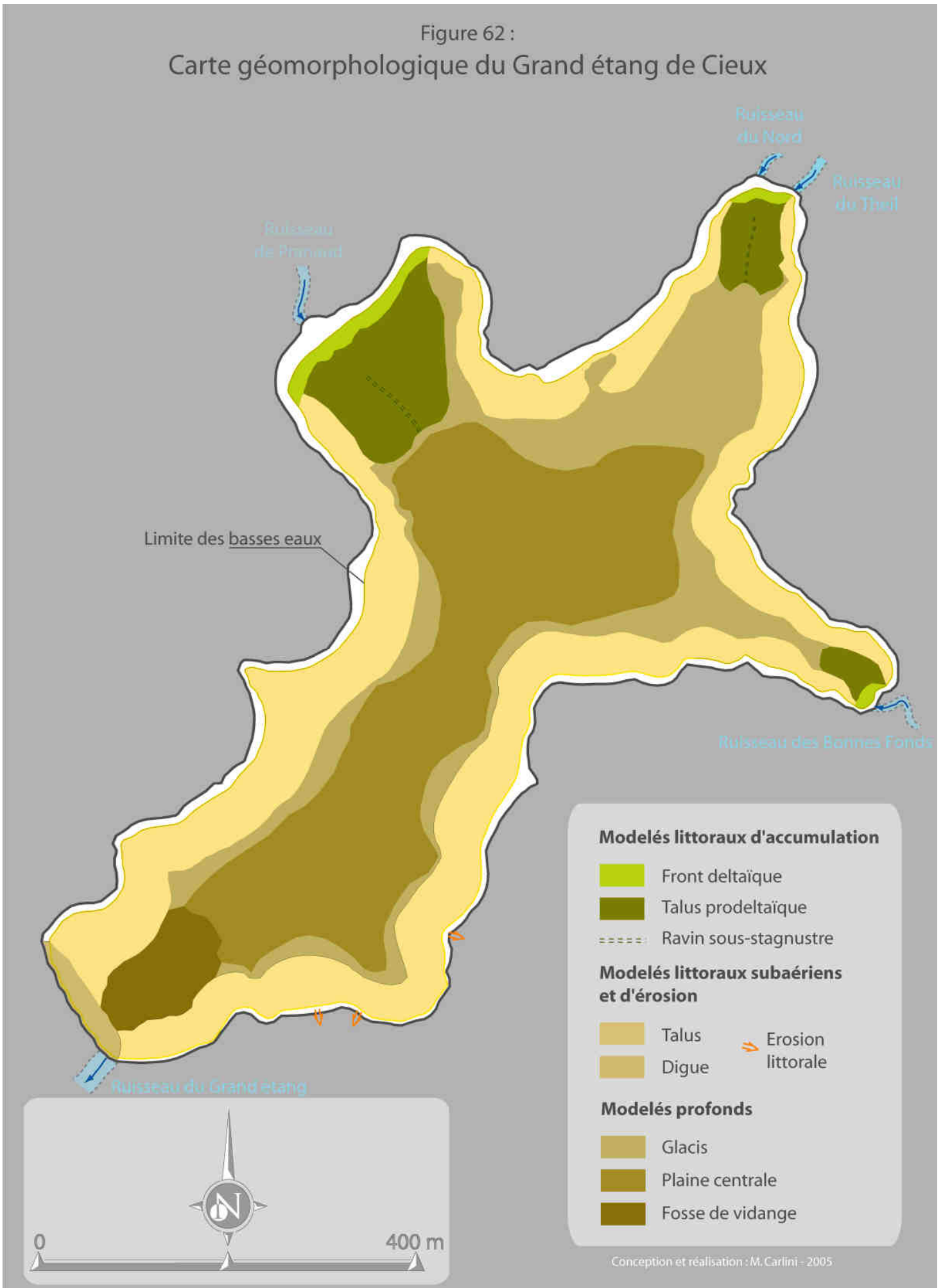


Figure 63 :
Carte géomorphologique de l'étang de la Pouge

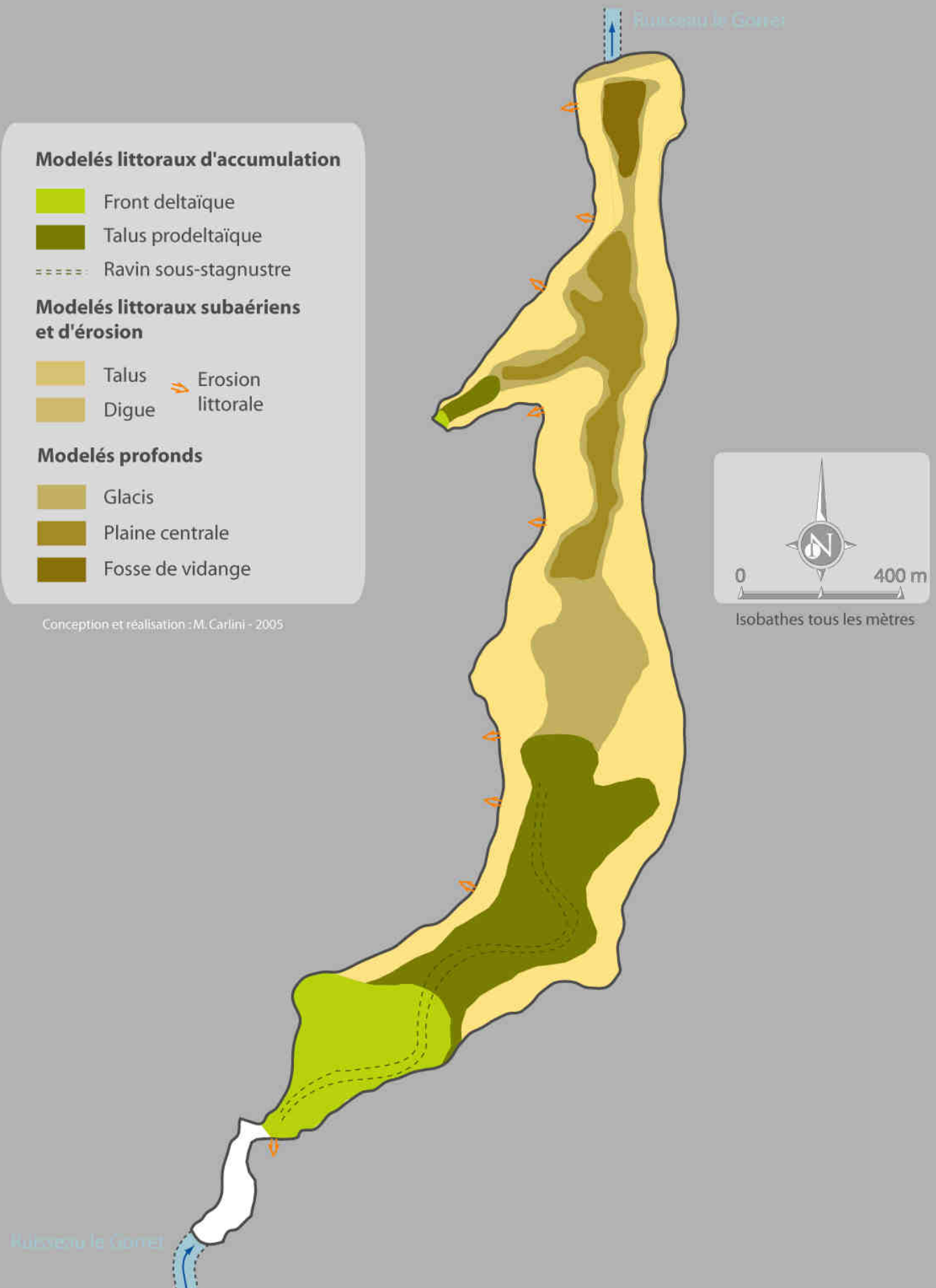
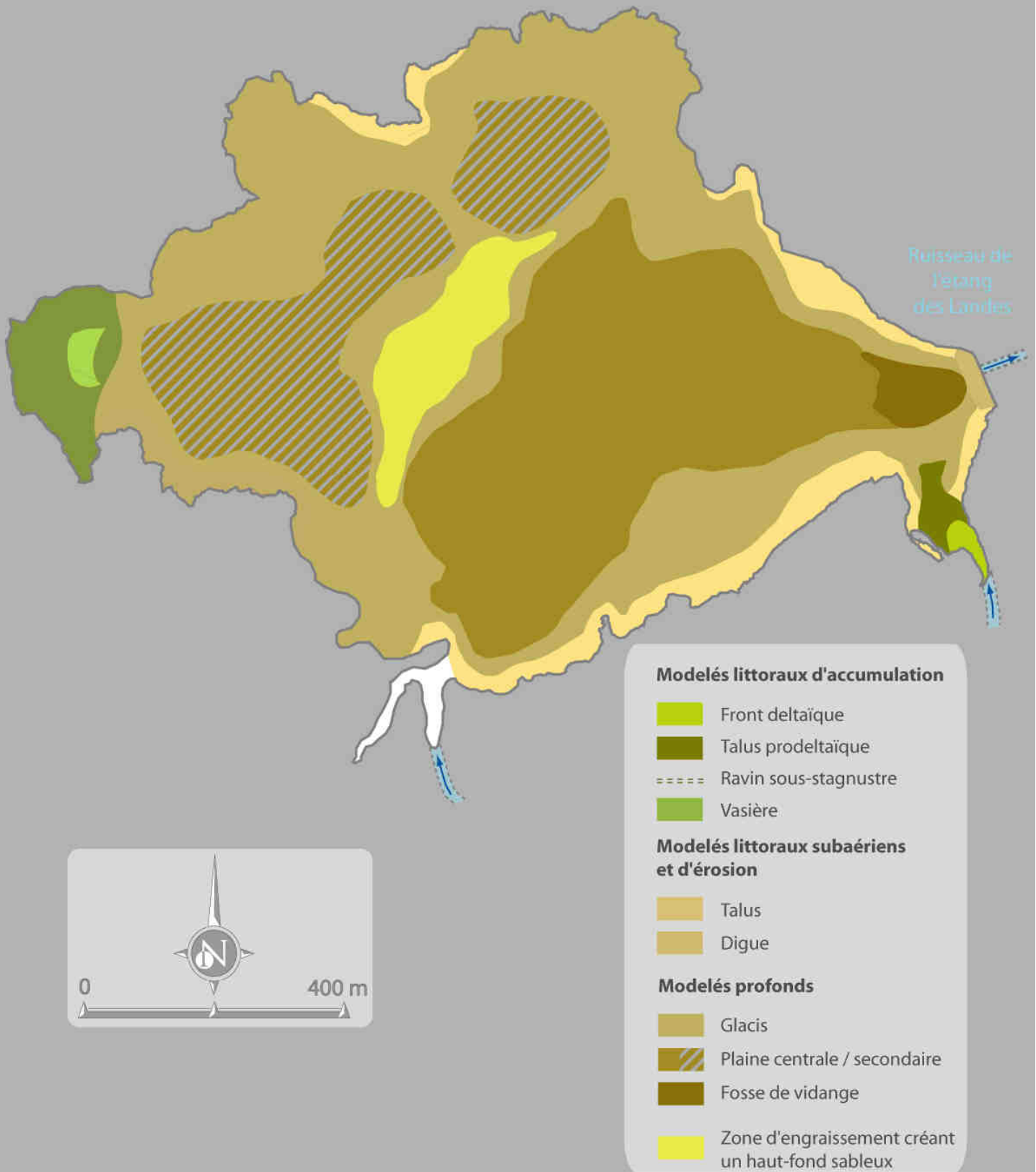
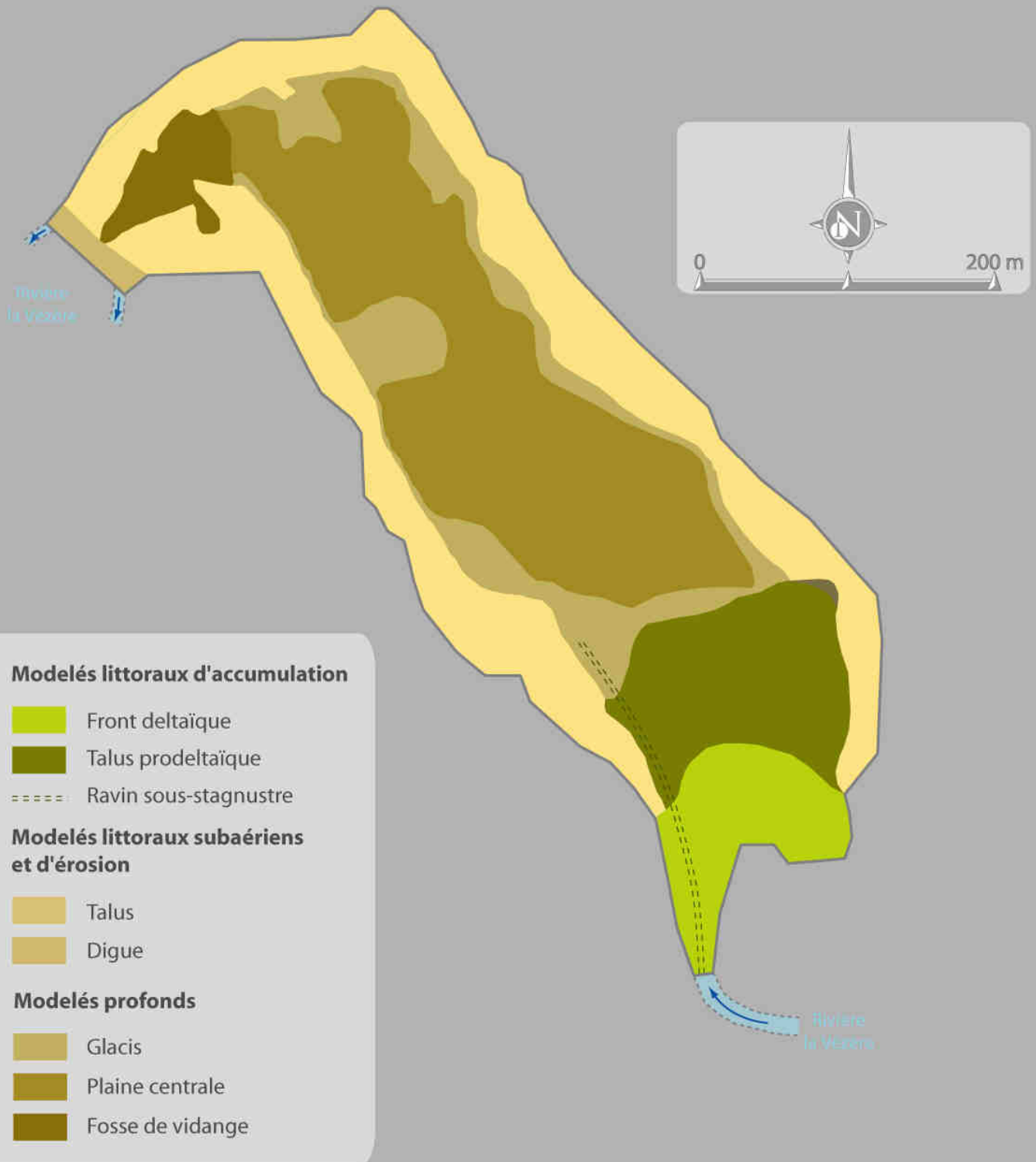


Figure 64 :
Carte géomorphologique de l'étang des Landes



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005

Figure 65 :
Carte géomorphologique de l'étang des Oussines



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005

Figure 66 :
Carte géomorphologique de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)

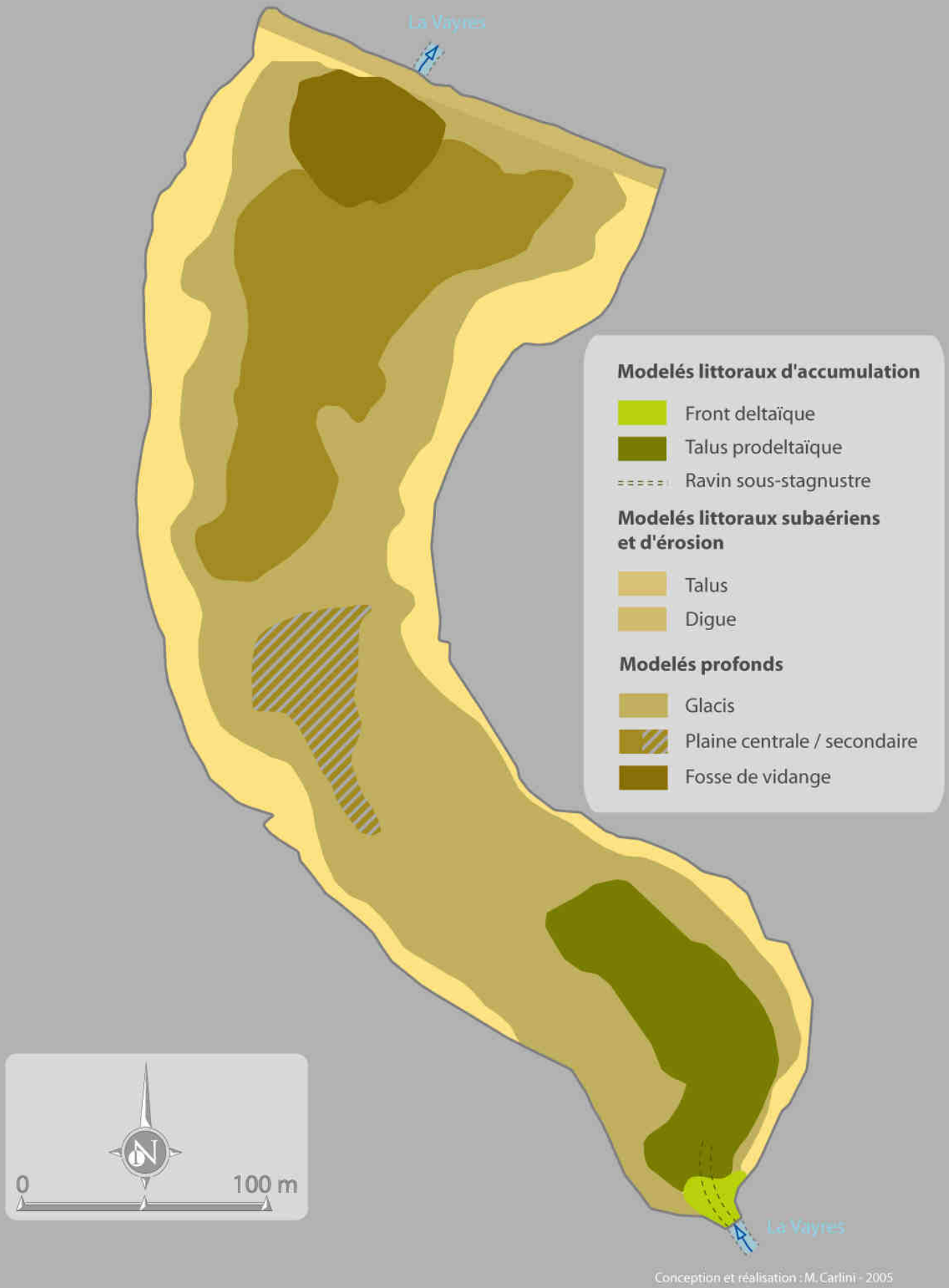
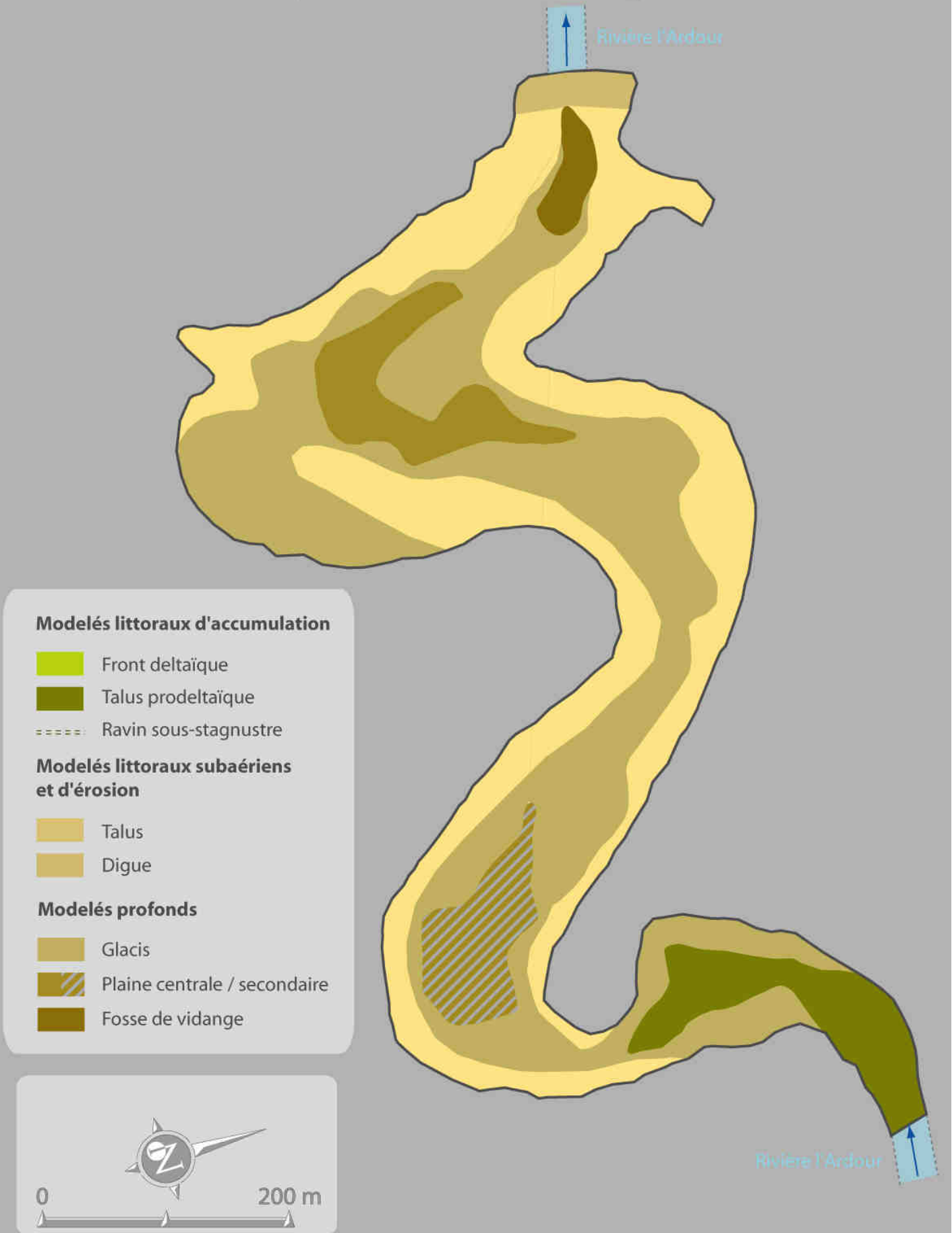
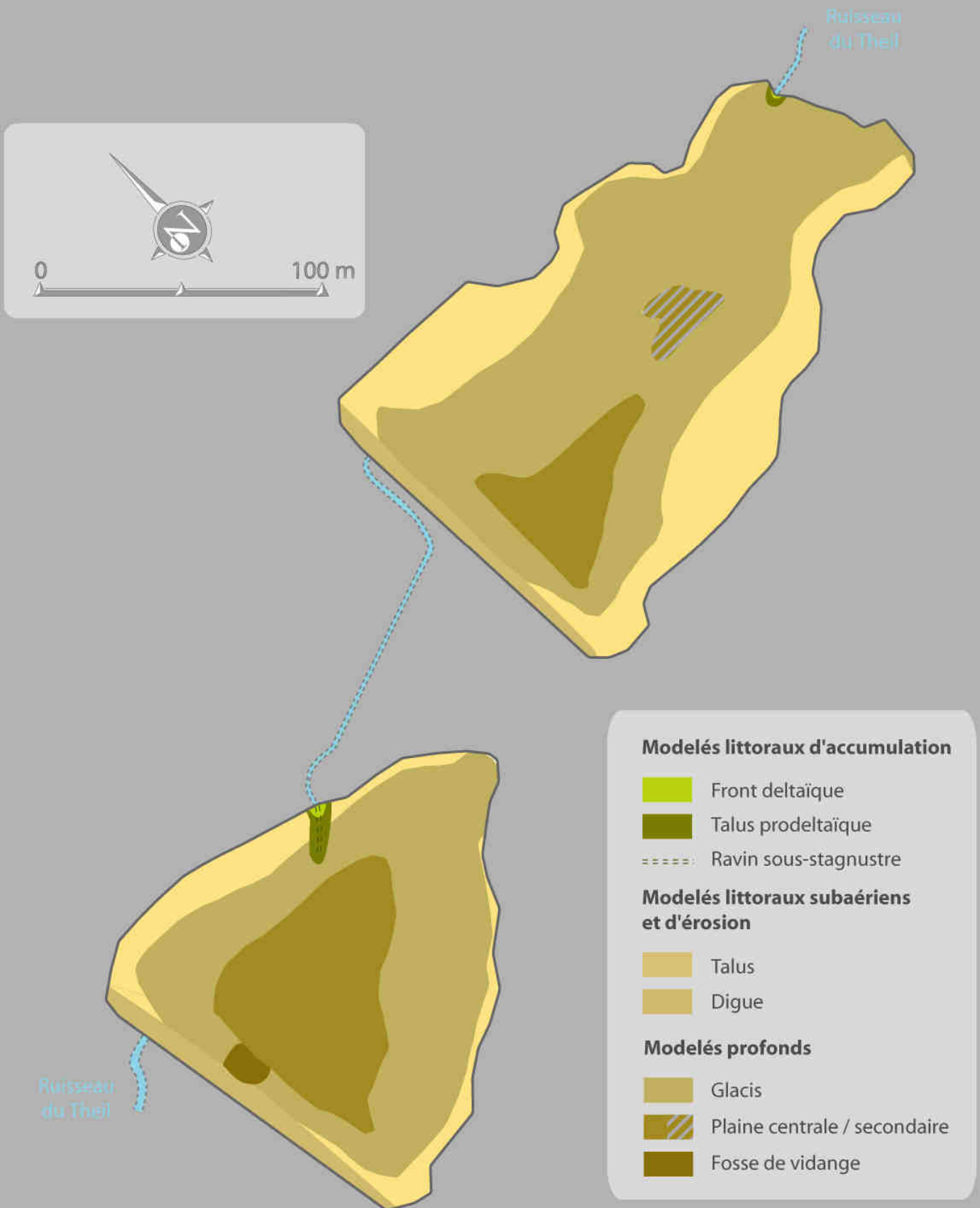


Figure 67 :
Bathymétrie du lac du Pont à l'Age



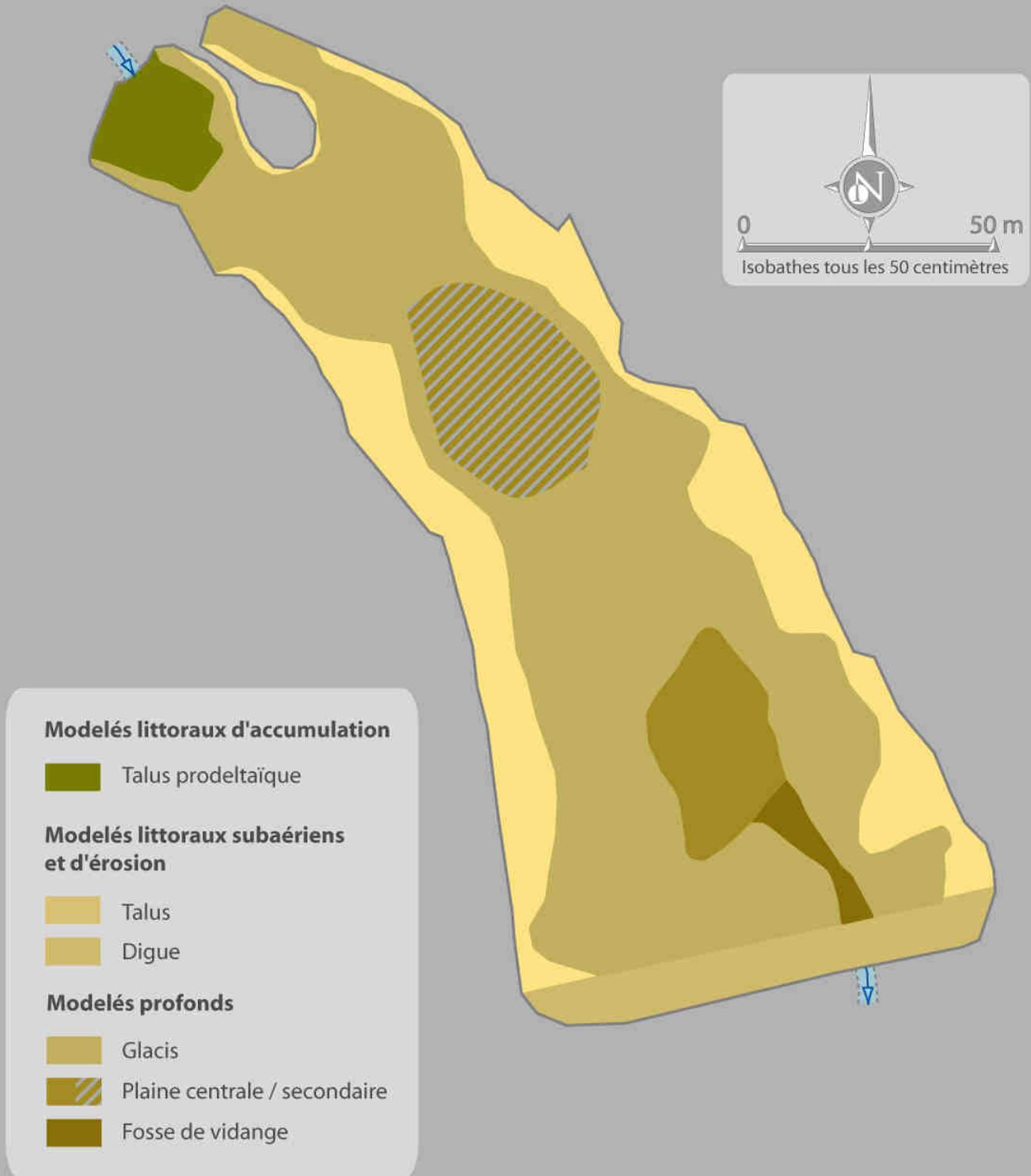
Conception et réalisation : M. Carlini - 2005

Figure 68 :
Carte géomorphologique des étangs du Theil et des Garennes



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005

Figure 69 :
Carte géomorphologique de l'étang du Puy de Bavaud



Conception et réalisation : M. Carlini - 2005

II.2.2. La morphométrie « plane »

	Cieux	La Pougé	Landes	Oussines	Bois Chenu	Age	Theil	Garennes	Meuzac
Lmax	1166	1894	1515	747	518	1560	232,8	168,8	240
Le	1166	1427	1515	717	492	576	232,8	168,8	240
Bmax	707,6	308	1049	245	251	494	148,2	144	91
Be	707,6	308	1049	245	251	494	148,2	144	91
B	297,0	170,2	587,9	196,8	123,1	117,8	93,9	91,8	59,7
L	3783	4626	6625	2029	1384	3515	665,3	500	675
DL	1,81	2,30	1,98	1,49	1,55	2,31	1,27	1,13	1,59
A	346300	322400	890600	147000	63740	183800	21870	15490	14320
Zmax	3,69	5,98	1,93	2,4	2,08	9,6	2,41	1,53	4,5
Z	1,65	2,08	0,94	1,07	0,87	3,47	1,06	0,78	1,93
Zr	0,56	0,93	0,18	0,55	0,73	1,98	1,44	1,09	3,33
V	572427	669753	836465	157137	55271	637131	23285	12007	27690

*Lmax : Longueur maximale en mètres | Le : Longueur effective en mètres | Bmax : largeur maximale en mètres
Be : largeur effective en mètres | B : largeur moyenne en mètres | L : longueur de la côte en mètres
Z : profondeur en mètres | A : superficie en mètres carrés | V : volume en mètres cubes*

Tableau 2 : caractéristiques morphométriques des plans d'eau de l'étude

Depuis le ciel, chaque étang a une forme unique. La forme du plan d'eau livre des indications importantes sur le plan d'eau étudié par l'étude de sa longueur, de sa largeur, de sa berge (Tableau 2). A partir de l'envoyage d'un modelé, le plan d'eau n'a de cesse par son action de régulariser le contour des berges, par érosion des caps et comblement des baies. La question de la régularisation des berges a été évoquée plus haut pour les lacs ; l'étude plus précise de l'érosion et du comblement des baies permettra de déterminer si ces processus sont identiques en étang. Néanmoins il faut garder à l'esprit que ces processus s'inscrivent dans le long terme, comme nous venons de le voir pour l'étang de Cieux. Au niveau global, la morphométrie plane des étangs semble rester fortement empreint de la morphologie locale.

Deux grandes catégories se distinguent : d'une part les étangs issus du simple envoyage d'une vallée ou d'un vallon, barré par une digue. Ces plans d'eau prennent alors la forme précise de l'isohypse correspondant à leur berge, au début de leur existence au moins ; d'autre part on trouve de nombreux étangs plus ou moins surcreusés par la main de l'homme. Ces plans d'eau sont très fréquents en Limousin :

la superficie étant réduite, la profondeur est volontairement accentuée, ou ce sont les berges qui sont rendues plus abruptes, le tout visant à augmenter le volume d'eau pour favoriser la pêche. Ces plans d'eau sont de superficie réduite, occupent un petit vallon et prennent une forme plus ou moins triangulaire, voire parfaitement aléatoire selon leur degré d'anthropisation.

Tenant une place très importante dans cette étude, le Grand étang de Cieux présente la forme caractéristique d'une croix allongée dans un sens sud-ouest nord-est (Fig. 30, 31). La partie amont se découpe en trois baies retraçant la confluence des trois anciens vallons. La plus septentrionale, la baie des Garennes orientée dans le sens de la plus grande longueur, reçoit deux affluents : le ruisseau de Polisserie au nord et celui du Theil au nord-est. Les deux autres baies se font face, perpendiculairement à l'allongement du plan d'eau. Au nord-ouest se trouve la baie de Pranaud, qui reçoit les eaux du ruisseau éponyme, plus long affluent de l'étang. Au sud-est prend place la baie effilée des Bonnes fonds.

En les bornant de façon rectiligne la baie des Garennes est la plus étendue avec 5,26 hectares, la baie de Pranaud arrive en second avec 4,26 hectares puis celle des Bonnes fonds avec 3,35 hectares.

Au-delà l'étang s'allonge plus directement vers l'aval ; malgré la présence des deux baies transversales, il garde une certaine homogénéité spatiale et un tracé peu sinueux avec une longueur maximum de 1166 mètres et un développement de la côte de 1,81 (Tableau 1).

La majorité des autres plans d'eau étudiés offrent un découpage plus simple de leurs berges, occupant plutôt des vallées que des confluences. Ainsi l'étang de la Pouge et le lac du Pont à l'Age ont la morphologie de surface de barrages ennoyant une vallée encaissée (Fig 34,35,50,51). Leur largeur moyenne (B) est dix fois inférieure à leur longueur maximale (L_{\max}) ce qui traduit un allongement important de la

morphologie du plan d'eau. Il en résulte des développements du trait de côte (D_L) sensiblement élevés, non que les côtes soient découpées mais du fait de l'allongement. Les valeurs sont quasiment identiques avec 2,30 pour la Pouge et 2,31 pour le Pont à l'Age. Excepté le tiers le plus amont orienté sud-ouest nord-est, l'étang de la Pouge s'étend du sud au nord, presque rectiligne. Au contraire, la retenue du Pont à l'Age présente un tracé sinueux épousant la forme de la vallée de l'Ardour.

Les étangs de Bois Chenu et des Oussines s'inscrivent dans des topographies moins encaissées et présentent donc une largeur moyenne plus importante pour une hauteur de digue moins élevée. (le rapport L_{max}/B varie ici entre 2 et 2,5) Le développement du trait de côte est donc faible (autour de 1,5) (Tableau 1, Fig. 42,43,46,47).

Les étangs du Theil et des Garennes, similaires et proches géographiquement, sont nos deux principaux étangs-laboratoires. Leur morphologie plane évoque des ennoyages de très petits vallons (Fig. 54,55). Leurs dimensions sont réduites et leur forme trapézoïdale ou triangulaire, leur confère un développement de côte particulièrement faible, 1,27 pour le Theil et 1,13 pour les Garennes dont la berge se rapproche de plus en plus d'un cercle. Ces étangs, au contraire de celui du Puy Bavaud (Fig. 58), ne sont pas surcreusés et le Theil ne connut qu'une vidange en trente ans (après réalisation de la bathymétrie).

Cette étude vise à comprendre la morphologie et le fonctionnement propre de plans d'eau dont les dimensions, donc le volume, conditionnent un comportement proche de celui des lacs : un seul étang étudié est donc d'origine très récente, avec une cuvette entièrement surcreusée, l'étang du Puy de Bavaud.

II.2.3. Le modelé subaérien

Le travail de géographie limnologique sur des étangs et des lacs de barrage comporte un rapport au temps court plus important que lorsque l'on étudie des lacs millénaires. La présence du modelé anciennement émergé est parfois prégnante. Lors de l'ennoyage d'une vallée, le modelé ne devient pas « lacustre » ou « stagnustre » en étant simplement recouvert d'une épaisseur d'eau. Le plan d'eau érode, sédimente, modèle ses rivages et ses tréfonds pour créer un nouveau paysage immergé. La bathymétrie révèle ce paysage dans lequel se mêlent formes créées par le plan d'eau et modelé rémanent inaltéré ou peu altéré par la présence de l'eau. Le géographe doit alors distinguer les formes subaériennes des formes lacustres. Pour des plans d'eau très récents, comme par exemple des lacs de barrage, ou de petits étangs il est parfois possible d'obtenir les levés topographiques avant mise en eau. La carte qui en résulte peut s'avérer précieuse dans une étude d'évolution de la cuvette ; en revanche il faut prendre garde de ne jamais l'interpréter telle quelle comme s'il s'agissait d'une bathymétrie car les modelés présents sont exclusivement subaériens.

II.2.3.1. Le talus

La présence de modelés subaériens va être plus visible lorsque les étangs sont mis en eau depuis peu et lorsque la morphologie locale est très marquée. La forme gardant le plus son aspect dans nombre de plans d'eau est le talus. La notion de talus est lacustre, mais l'inclinaison de ce dernier est directement conditionnée par le modelé préexistant. Il s'agit en fait d'une forme subaérienne, peu modifiée, mais encadrée par la morphogenèse littorale et le modelé profond. La largeur et l'inclinaison des talus sont étroitement liées : un talus très pentu sera moins large

mais se poudrera moins de sédiments que celui en pente douce. A l'occasion d'une vidange, on constate que le matériel découvert sur cette forme est sableux, grossier.

La digue constitue une sorte de talus artificiel dont la pente interdit la sédimentation. Les matériaux employés vont de la terre au béton, en passant par les enrochements ou la pierre maçonnée. Les digues les plus meubles peuvent être fragilisées par la présence de terriers, les processus de météorisation et l'érosion stagnante si elle est présente. Cette digue représente toujours les pentes les plus fortes du plan d'eau, mais son caractère totalement artificiel pouvant aller jusqu'au béton la rend peut intéressante à étudier. Outre la digue, les talus vont présenter les pentes majeures du plan d'eau.

Les étangs de barrage de vallée encaissée présentent des talus abrupts occupant une part importante de la superficie totale de leur cuvette. Les pentes du lac du Pont à l'Age dépassent localement 20° au Nord, près de la digue (Fig. 52) ; l'étang de la Pouge atteint 13° sur une bonne partie de ses berges dans le tiers aval (Fig. 36). Les talus représentent 43% de la morphologie immergée de ce plan d'eau et 37% pour le lac de l'Age (Fig. 63, 67). Des pentes similaires ne se retrouvent que sur des étangs surcreusés comme celui du Puy Bavaud atteignant 34° sur sa digue et plus de 20° sur ses talus. (Fig. 60)

Pour des plans d'eau n'étant pas enchâssés dans des vallées allongées et profondes, la morphologie des talus est différente. Pour l'étang des Oussines, ou celui de Rochechouart les talus sont plus effilés, à l'exception de l'extrême aval des Oussines, près de la digue qui profite d'un coude resserrant de la vallée de la Vézère. Leur proportion relative est moins importante avec 32% pour les Oussines et seulement 20% pour l'étang de Bois Chenu, très peu encaissé (Fig. 44, 48). Les pentes sont plus faibles et n'atteignent qu'une dizaine de degrés sur ces talus.

Prenant place dans une topographie collinaire peu abrupte, l'étang de Cieux se rapproche de cette catégorie. Les talus dépassent rarement 10° de pente, à l'exception de la digue ; néanmoins, son aspect multilobé entraîne une légère augmentation de la surface relative de ces derniers (34% de talus) (Fig. 32, 62).

Pour les étangs-laboratoires, la situation est plus hétérogène. L'étang des Garennes répond bien à la catégorie précitée, avec des pentes très faibles et des talus occupant seulement 15% de la superficie. Le Theil, au contraire, quoique proche est plus encaissé sans être surcreusé ; ses talus sont plus pentus (jusqu'à 16°) mais aussi plus importants (35% de la superficie)(Fig. 56, 68). Quant au Puy Bavaud, ses talus creusés mécaniquement ne permettent pas une interprétation morphologique raisonnable.

L'étang des Landes constitue un cas particulier : prenant place dans un bassin sédimentaire, sa platitude est remarquable. Néanmoins de vrais talus sont discernables : si les pentes restent faibles (autour de 4°), l'alternance convexité-concavité ne laisse pas de doute (au nord-est près de la digue ainsi qu'au sud – Fig. 40, 41). Vu le caractère pelliculaire du plan d'eau et l'absence de relief environnant, ces talus n'occupent qu'une fraction du pourtour stagnustre et seulement 6% de la superficie totale.

II.2.3.2. Le thalweg

Un plan d'eau prenant place dans une ancienne vallée, le thalweg de cette dernière reste parfois visible, s'il est suffisamment marqué ou si la sédimentation est peu importante. Les plans d'eau de vallée encaissée pourraient apparaître comme les plus susceptibles, de par leur morphologie, de présenter ce type d'héritage, néanmoins ils sont le plus souvent alimentés par des cours d'eau importants et apportant une quantité conséquente de sédiment. Les anciens thalwegs sont donc

totallement absents de l'étang de la Pouge et du lac du Pont à l'Age. L'ancienneté du plan d'eau accentue la possibilité de sédimentation et des plans d'eau comme le Grand étang de Cieux ou l'étang des Oussines ont totalement recouvert ce modelé subaérien. Ces conclusions poussent à rechercher cette morphologie dans des plans d'eau récents alimentés par des cours d'eau peu importants. Effectivement à l'étude de la bathymétrie des étangs du Theil et des Garennes (Fig. 55) on constate la présence de l'ancien thalweg dans les deux plans d'eau notamment dans leur partie amont¹⁴⁰. Pour l'étang du Theil, il est bien visible jusqu'à 1,5 mètres de profondeur, selon un axe est-nord-est ouest-sud-ouest. Le thalweg hérité dans l'étang des Garennes est visible au nord-est, en amont de l'entrée du cours d'eau, ce dernier ayant été déplacé du fond du vallon à la création des deux étangs.

La périodicité des vidanges joue un rôle dans la présence de l'ancien thalweg en supprimant une partie des sédiments et en s'encaissant préférentiellement dans ce dernier. En Limousin, la rareté des vidanges est un facteur influant beaucoup sur la sédimentation. Il n'est pas rare de vidanger un étang seulement tous les dix ans voire plus. La présence de modelés encaissés créés lors des vidanges est donc plus fréquente que celle de thalwegs réels.

II.2.4. Un certain conditionnement morphologique

A l'image des lacs naturels, la morphologie de présubmersion est un élément déterminant de la morphologie future du plan d'eau. Les lacs naturels sont souvent classés par leur origine génétique qui influe directement sur leur morphologie. Cet

¹⁴⁰ Graffouillère, 2000.

aspect occupe une place importante dans les manuels de limnologie¹⁴¹. Les étangs étudiés sont tous des plans d'eau de barrage artificiels. Le type de vallée ennoyée constitue l'héritage morphologique sur lequel la morphogenèse stagnustre va s'appuyer.

L'étude des héritages morphologiques des plans d'eau de cette recherche fait apparaître des différences fondamentales entre les plans d'eau étudiés. Les plans d'eau de barrage de vallée encaissée présentent des caractéristiques communes fortes, les étangs laboratoires, réduits spatialement et récents ont aussi de nombreux points communs.

Le temps laissé à l'érosion et à la sédimentation est un facteur déterminant dans la disparition de nombre d'héritages morphologiques et dans la mise en place d'une identité lacustre ou stagnustre à part entière. A ce stade de la réflexion, deux enseignements peuvent être tirés : d'une part les étangs ont un fonctionnement propre susceptible de remodeler la cuvette où ils prennent place –cette conclusion avait déjà été évoquée dans des études antérieures sur les étangs limousins¹⁴²- d'autre part, il semble que la topographie précédant la mise en eau conditionne des types d'étang dont la morphogenèse va par la suite connaître des évolutions similaires.

Le relief influence la forme future des plans d'eau ; la problématique primordiale est maintenant de découvrir si des plans d'eau de faible emprise spatiale, comparé aux plus grands lacs, sont susceptibles de développer des modèles « lacustres » relativement aussi importants.

¹⁴¹ Par exemple Welch, 1952 pp15-32 ; Hutchinson, 1957 pp 1-163 ; Wetzel, 1983 pp 17-30 ; Timms, 1992 pp 2-8 ; Meybeck, 1993 pp 7-15, Collet, 1925 pp 1-99 ; Touchart, 2000 pp 13-33 : historique des classifications, pp 35-130 : classification proprement dite.

¹⁴² Graffouillère 2000, Graffouillère 2001, Touchart&Graffouillère 2004.

II.3. Des modelés stagnustres étagés à l'image du fonctionnement lacustre

Le « gommage » du modelé subaérien est une preuve d'un fonctionnement érosif et sédimentaire propre au plan d'eau. La présence de formes « lacustres » élaborées et cartographiables nécessite une étude approfondie mettant en œuvre tous les outils d'étude morphologique à disposition. La présence de vase au fond d'un étang ne constitue pas la preuve de l'existence d'une plaine centrale. Un réel étagement de formes « lacustres » complexes est un facteur déterminant dans la compréhension de tous les processus qui ont amené cet étagement. Comprendre le façonnage de la cuvette permet de comprendre les mouvements internes à la masse d'eau déterminants pour la morphologie mais aussi la physique et la chimie lacustre ou stagnustre.

II.3.1. Les modelés stagnustres littoraux

Les littoraux maritimes et lacustres sont caractérisés par des formes dues à l'érosion et à la sédimentation. Mécaniquement, ces actions conjuguées amènent irrémédiablement le tracé des berges à une régularisation, à plus ou moins longue échéance. Qu'en est-il de ces processus au cœur des étangs de notre étude ?

Les modelés deltaïques, formes particulières liées non pas au plan d'eau seul mais à son interface avec le milieu lotique, seront abordés individuellement, dans la partie II.3.2.

II.3.1.1. les modelés d'érosion

Les rivages lacustres sont façonnés par l'érosion creusant dans les berges de profondes entailles. Les surplombs finissent par s'écrouler et découvrir des falaises dominant la grève. Le premier constat est celui du promeneur : les berges de la plupart des étangs sont en pente douce et rien ne s'apparente à des falaises sur leur pourtour. Avant de se pencher plus attentivement sur ces berges, essayons de déterminer les causes de cette érosion.

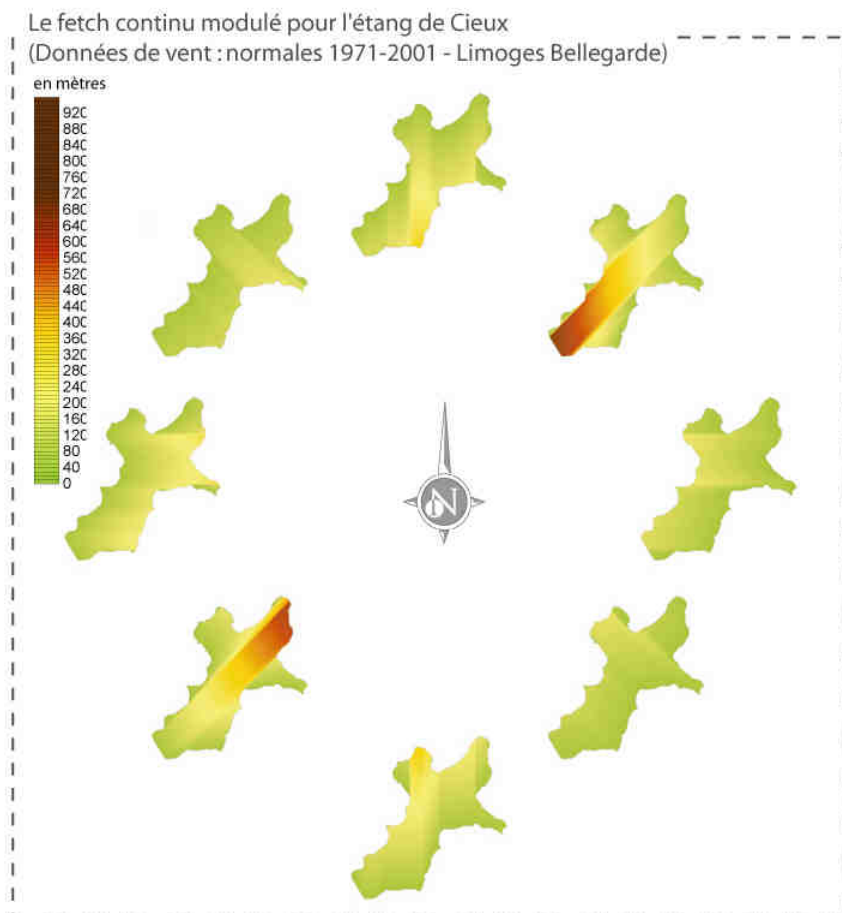
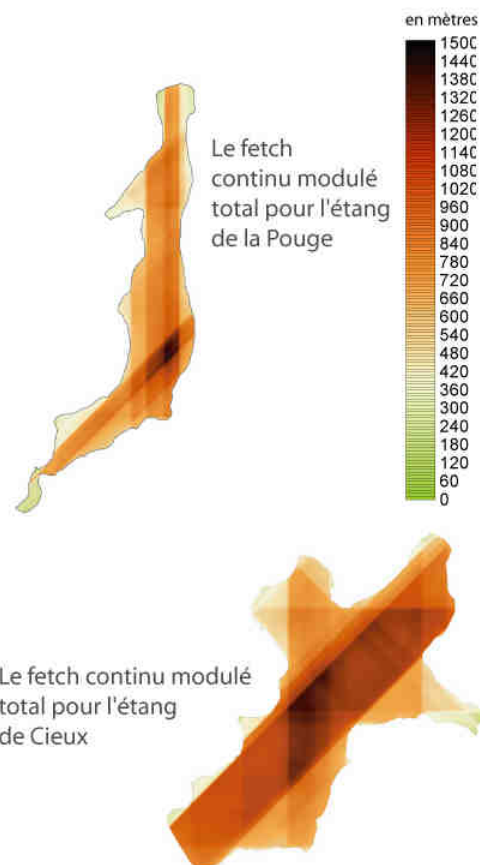
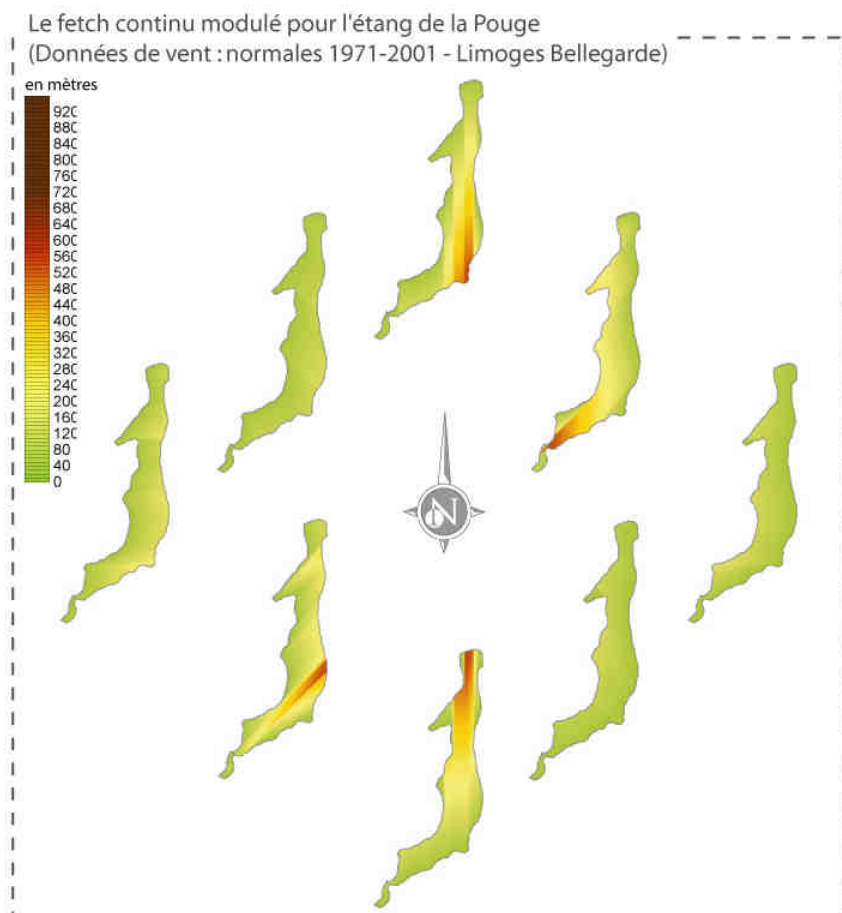
D'après Maleval (2002) cinq paramètres sont à retenir pour l'érosion naturelle des berges lacustres. Il s'agit du vent, des vagues, de la végétation, de l'inclinaison de la berge et de la nature de la roche. Un facteur peut être écarté de prime abord du fait de sa faible importance pour nos sujets d'étude : la nature de la roche. En effet, aucun de nos étangs n'est en contact direct avec autre chose que des formations meubles, n'offrant pas de résistance particulière à l'érosion.

Le vent et les vagues sont intimement liés ; le facteur à prendre en compte est la distance de la course du vent sur le plan d'eau ou fetch. Cette course du vent est évidemment plus courte sur les étangs. Les étangs-laboratoire et leurs dimensions réduites semblent offrir une course au vent trop peu importante pour générer des vagues susceptibles d'éroder le modelé rivulaire. La capacité d'érosion du plan d'eau est donc largement conditionnée par son allongement ; elle sera optimale si cette dernière est dans le sens du vent dominant. L'action érosive est contrebalancée par le rôle protecteur de la végétation aquatique.

L'inclinaison de la berge dépend du modelé envoyé pour créer le plan d'eau. Ce paramètre divise nos objets d'étude en trois catégories : les étangs-laboratoires sont de petits plans d'eau aménagés pour le loisir pêche. Les berges ont été aplanies pour pouvoir s'installer facilement ; ainsi ces dernières sont quelques centimètres au

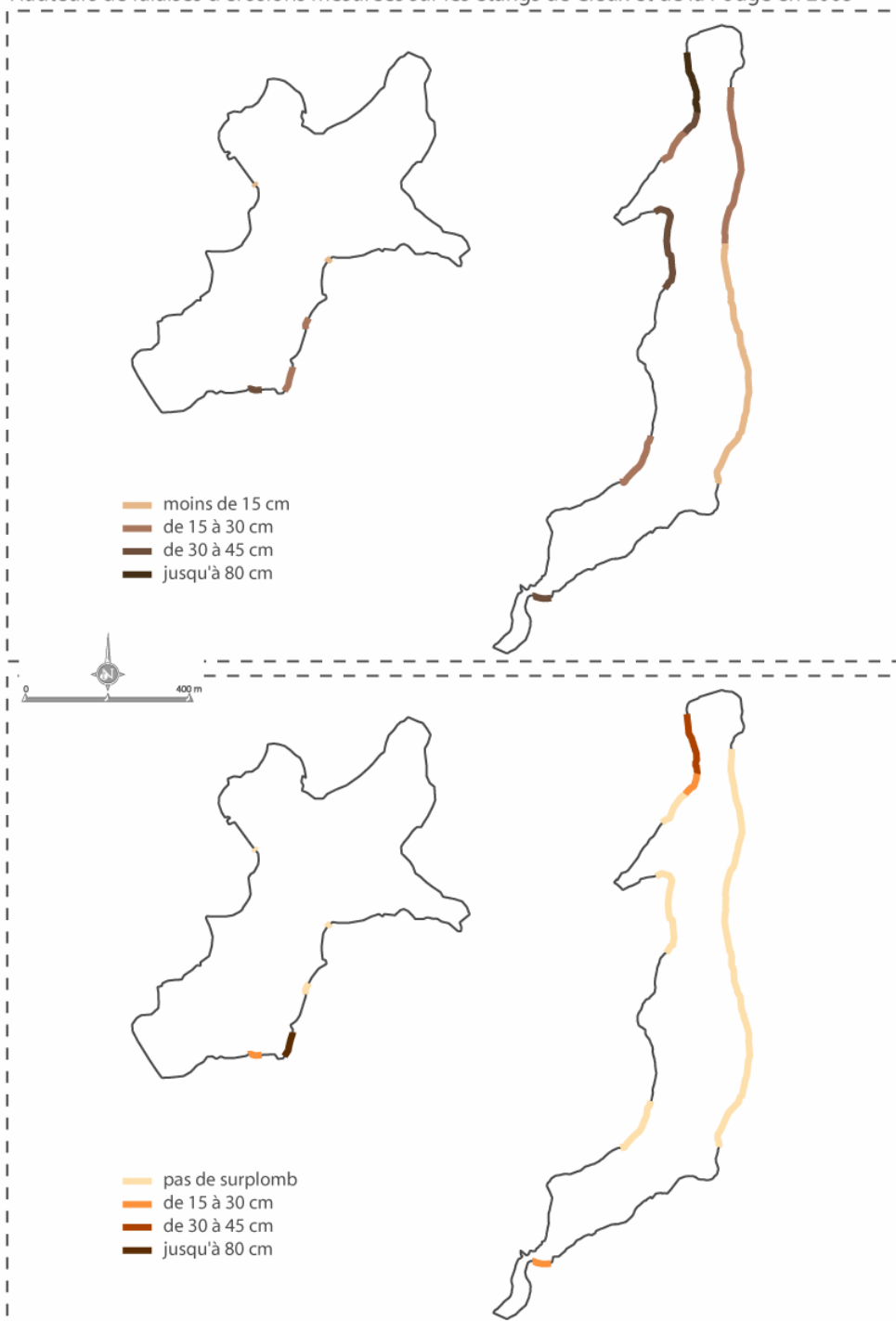
La prise en compte du fetch dans l'étude de l'érosion des berges

mesures terrain : Carlini, Papon - Conception et réalisation : Carlini, Papon - 2005



Le premier limnologue à cartographier le fetch est Hakanson (1981) mais ce dernier n'a utilisé que le fetch effectif, distance maximale à la berge pour chaque point du plan d'eau. Ce calcul n'envisage pas une direction homogène de vent pour l'intégralité du plan d'eau et reste donc très abstrait. Pour tenter d'étudier l'impact réel du vent sur le terrain la mise au point d'un fetch continu modulé fut nécessaire. Le fetch continu représente les distances parcourues par le vent sur le plan dans une direction donnée. Ces valeurs doivent ensuite être modulées en fonction de la fréquence des vents afin de tenir compte de l'irrégularité des épisodes venteux. Le principe est d'appliquer un coefficient à chaque direction en fonction de la rose des vents. On obtient alors la persistance du vent pour chaque direction qui permet de nuancer les distances parcourues par le vent en pondérant ou en exacerbant leur valeur. L'intérêt de la prise en compte des fréquences de vent réside dans la comparaison des fetch selon leur direction (Papon, 2002). L'observation des résultats peut se faire d'après les cartes obtenues pour chaque direction ou en additionnant ces dernières. Les cartes de fetch continu modulé figurent donc des zones cumulant une course de vent importante et balayées fréquemment par les vents.

Hauteurs de falaises d'érosions mesurées sur les étangs de Cieux et de la Pouge en 2005



Profondeurs des surplombs mesurés sur les étangs de Cieux et de la Pouge en 2005

L'étude de l'érosion des berges de l'étang de Cieux met en évidence la prééminence de la morphologie des berges et de leur végétalisation dans les processus d'érosion. Les berges les plus exposées aux épisodes venteux sont largement épargnées par l'érosion.

A contrario, l'érosion des berges de l'étang de la Pouge se corrént avec les valeurs de fetch modulé, notamment à l'ouest et au nord ouest, mais aussi en amont. toutes ces zones correspondent à des berges abruptes. les berges douces et végétalisées exposées au vent sont, ici aussi, épargnées par l'érosion.

La prise en compte du fetch continu modulé peut donc être intéressante dans l'étude et la protection des berges, mais le vent et les vagues restent des paramètres secondaires sur les étangs du fait de leur faible importance par rapport aux lacs.

dessus du niveau de l'eau. Parmi les étangs-lacs se distinguent deux catégories : ceux dont les berges sont abruptes car ils occupent des modelés encaissés et ceux ayant des berges peu pentues.

De l'étude des berges ressort un certain nombre de constatations (encadré β). Comparé aux lacs, l'effectivité du fetch est très réduite. Le pouvoir érosif des vagues est limité ; l'érosion va donc découler de la conjonction des autres facteurs énoncés précédemment. La présence de berges abruptes voire verticales permet la création de surplombs, même avec des vagues peu importantes, et surtout si le matériel est meuble. Ce fonctionnement est particulièrement flagrant dans les petits étangs récents dont les berges ont été surcreusées et sont parfaitement verticales.

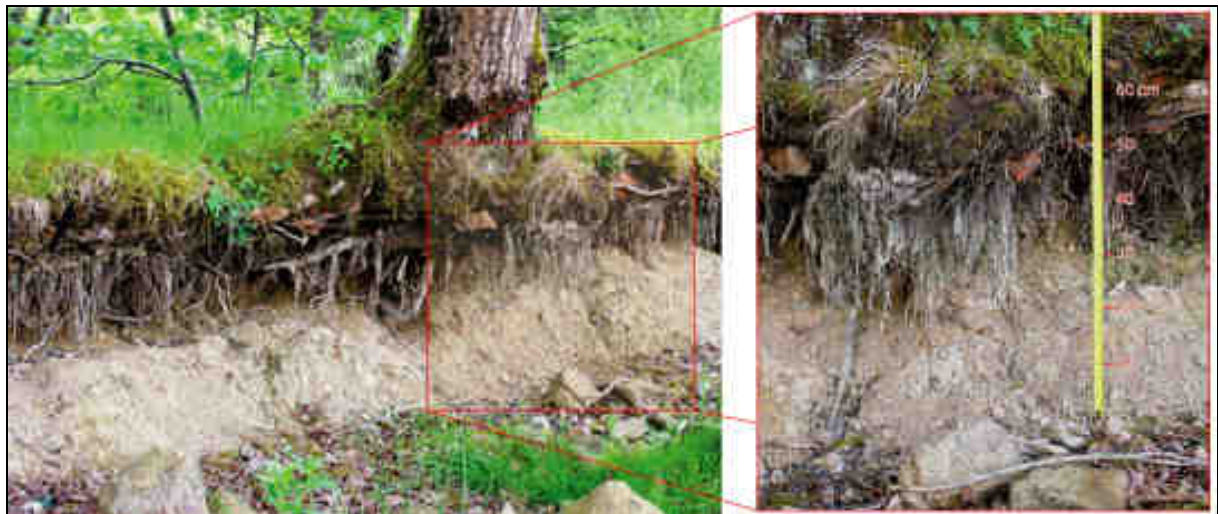


Photo 28 : La digue de l'étang du Theil depuis l'intérieur de l'étang (cliché Carlini 2005)

En outre, le marnage à lui seul permet une érosion par humidification et dessiccation d'un matériel meuble. Ces modelés sont bien visibles le long de la digue de l'étang du Theil, actuellement en assec (photo 28).

De réels modelés dus aux vagues apparaissent sur des berges abruptes naturelles, lorsqu'elles se trouvent dans un axe de course du vent important.



Photo 29 : Falaises surplombantes dans l'étang de la Pouge (cliché Carlini 2005)

A l'extrême amont du plan d'eau, la berge est érodée sur une petite zone en arrière de laquelle se trouve un minuscule étang (encadré hors texte érosion & photo 29b). L'impact de la course du vent à cet endroit va probablement faire entrer en coalescence les deux plans d'eau.

Lorsque les berges sont en pente douce comme en amont de la Pouge ou sur la plus grande partie du linéaire de Cieux, l'érosion est inexistante, d'autant plus que la végétation est importante. Le cas de Cieux est particulièrement représentatif : l'érosion apparaît aux endroits où la végétation est absente. Cette absence de végétation ponctuelle est anthropique : il s'agit de la plage artificielle où les falaises atteignent 45 cm et les surplombs 80 cm. Le terrain a été surcreusé pour offrir plus d'espace ; aux hautes eaux, l'érosion sape la berge aux pieds des arbres, ce qui explique la profondeur du surplomb. Ailleurs sur l'étang, l'absence de végétation est due à la présence régulière de pêcheurs à certains endroits précis. La berge y est faiblement érodée.

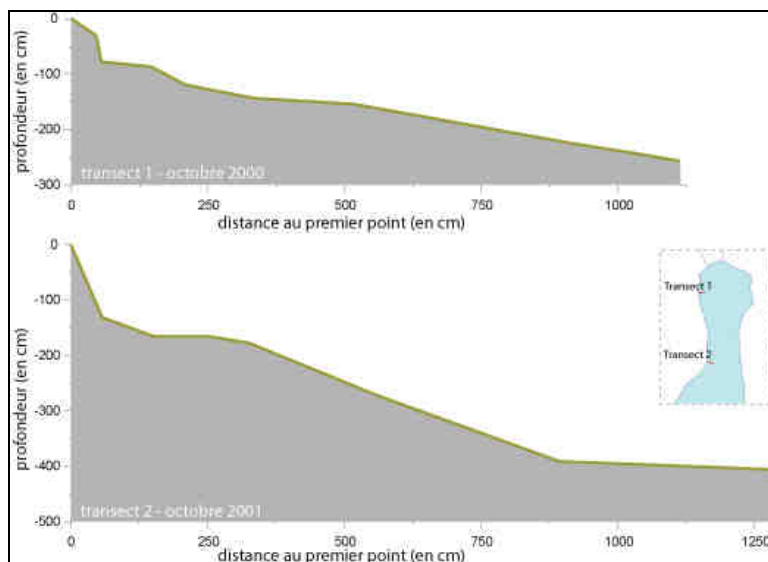


Figure 70 : Transects des talus en aval de l'étang de la Pouge réalisés lors de vidanges

L'étang de la Pouge présente dans sa partie aval, au sud ouest de la digue, un long modelé semblant répondre à la beine d'accumulation décrite par Forel. Des transects précis réalisés lors des vidanges de 2000 et 2001 ont permis d'appréhender le profil du talus à cet endroit (Fig. 70). Ce modelé représente en fait un reste d'érosion subaérienne, ayant été érodé lors d'un niveau antérieur de l'étang¹⁴³.

II.3.1.2. Les modelés d'accumulation

La forme des étangs, ainsi que leur origine, font qu'il s'agit de plans d'eau rarement multilobés, présentant la plupart du temps des formes simples. En outre la faiblesse de l'érosion ne met pas à disposition de grandes quantités de matériel. Peu de conditions sont réunies pour trouver d'importantes formes d'accumulation littorales, exception faite des deltas, que nous aborderons plus loin. Les deux types de modelés d'accumulation que l'on rencontre le plus fréquemment dans les lacs

¹⁴³ L'étang de la Pouge n'a été porté à son niveau actuel qu'en 1985, après son acquisition par le conseil général de Haute-Vienne.

sont les fonds de baies envasés et marécageux, et les plages¹⁴⁴. Les premiers sont constitués de matériaux très fins, les secondes de matériaux grossiers.

La morphologie stagnustre est telle qu'il est rare de trouver un fond de baie qui ne reçoive pas un affluent. Dès lors il est impossible de déterminer ce qui dépend de l'accumulation proprement lacustre du modelé d'accumulation deltaïque.

Reste la présence de plages, soulevant un écueil majeur à éviter, la confusion avec des plages artificielles conçues pour la baignade. Les plages lacustres sont composées de matériel provenant de l'érosion littorale et des apports grossiers fluviatiles, repris en charge par le plan d'eau. Dans les étangs, la mise en évidence d'accumulation de ce type n'a pu être démontrée. Des microformes sont existantes, mais la dynamique de transport n'est pas suffisante pour édifier de réelles plages.

Un cas particulier est visible dans l'étang des Landes. Le modèle bathymétrique met en évidence un éperon s'allongeant au centre du plan d'eau, orienté sud-ouest nord-est. Ce modelé convexe est en partie cerné par l'isobathe de un mètre, et remonte affleurer jusqu'à la surface (Fig. 39,41,64). Ce modelé probablement issu de l'érosion subaérienne, est actuellement engraisé par la redistribution de matériel sableux et répond maintenant à la définition de la flèche littorale lors des basses eaux où il émerge¹⁴⁵. Cette flèche est largement colonisée par la végétation.

II.3.2. Le cas particulier des deltas d'étangs, entre zonation et étagement

Le delta est une forme complexe à l'interface entre deux milieux, celui des eaux courantes et celui des eaux stagnantes. Si le cours d'eau et son bassin versant imposent leur marque par la présence de cette forme, traduisant la soumission du

¹⁴⁴ Touchart, 2000. p145

¹⁴⁵ Brunaud, 2003. p40

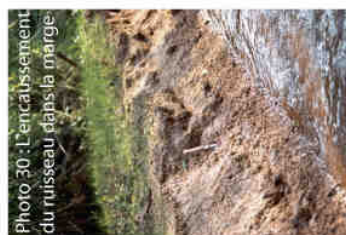
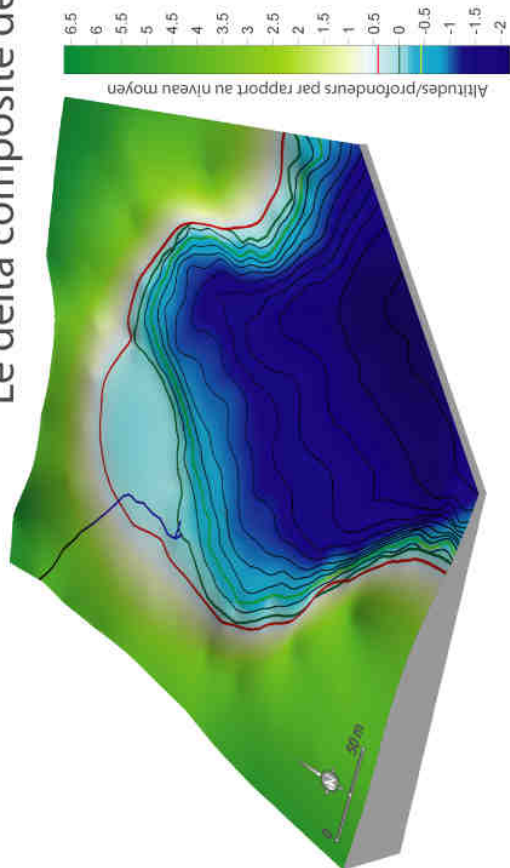
plan d'eau à l'affluent, la morphologie deltaïque traduit l'importance de l'hydrodynamique lacustre. Néanmoins il convient d'aborder préalablement l'impact de la variation du niveau d'eau sur le delta.

II .3.2.1. Marnage et marge deltaïque

Un des paramètres importants à prendre en compte pour juger de la complexité des deltas est le marnage du plan d'eau. Ce marnage définit la marge deltaïque. Le problème se posant alors est celui de la régulation ou non du niveau d'eau. Différentes situations sont possibles, en fonction du mécanisme d'évacuation de l'eau et des volontés humaines. En Limousin, la grande majorité des étangs est équipée de déversoirs de surface. Selon la facture de la grille équipant le déversoir, l'étang va mettre plus ou moins de temps à évacuer les augmentations de niveau, facteur auquel s'ajoute le décalage temporel lié à l'inertie du plan d'eau¹⁴⁶. Ainsi certains plans d'eau vont avoir un niveau peu changeant comme le Theil et les Garennes, Bois Chenu (équipé d'un moine et d'un déversoir), les Oussines. D'autres vont voir leur débit aval régulé à l'image de l'étang de La Pouge (équipé d'une prise de fond à vanne) et du lac du Pont à l'Age (système de barrage hydroélectrique).

¹⁴⁶ Ces aspects sont largement discutés en partie III

Figure 71 : Le delta composite de Pranaud dans l'étang de Cieux



Parmi les plans d'eau étudiés, le cas particulier est l'étang de Cieux. La configuration du déversoir et la présence d'embâcles temporaires dans ce dernier¹⁴⁷, couplés à une inertie importante -que nous aborderons en étudiant son bilan hydrologique- entraînent un marnage de 90 centimètres.

II.3.2.2. Le grand delta composite d'étang

Le grand étang de Cieux présente trois baies pour quatre affluents. Chacune de ces baies abrite des formes d'accumulations de type deltaïque. La baie de Pranaud au nord-ouest, reçoit les eaux du ruisseau éponyme ayant drainé 31,6% du bassin d'alimentation sur ses 4,28 km de cours. Sa dénivellation importante – 160 mètres – laisse penser que l'apport solide au plan d'eau peut être conséquent¹⁴⁸.

II.3.2.2.1. Le delta de Pranaud du Grand étang de Cieux

Dans cette baie a pris place un delta composite dont l'ampleur par rapport au plan d'eau est très importante. La largeur du vallon ennoyé ainsi que la douceur de ses pentes, couplées au fort marnage de l'étang de Cieux ont permis de cartographier les différentes parties d'un delta composite. Ce delta est remarquable à la fois par ses dimensions et par l'importance de ses formes émergées. Les fonds de baies ou queues d'étangs prennent rarement la forme convexe qu'adopte la ligne de berge sur la gauche de l'embouchure du ruisseau de Pranaud (Fig. 31).

Il faut tout d'abord remarquer une importante plaine deltaïque (Fig 71 & photo 31) s'arrêtant en aval aux plus hautes eaux, et dont la limite amont est

¹⁴⁷ Graffouillère 2001

¹⁴⁸ La moyenne calculée d'après les prélèvements de MES est de 5107 kg/mois. Les données d'apports en MES sont traitées en II.5

marquée par un talus mis en évidence lors de recherches antérieures¹⁴⁹. Cette plaine couvre une zone de 1,69 hectares avec des pentes ne dépassant pas 3°.

Plus en aval prend place la marge deltaïque définie par les plus hautes et les plus basses eaux. Le marnage saisonnier de l'étang de Cieux permet à cette marge de prendre une ampleur importante (un hectare et demi).

La frange la plus basse de cette marge, qui n'émerge que durant la période de basses eaux estivales, est colonisée par des joncs. (photo 32)

Seul le lit où le ruisseau divague n'est pas envahi par la végétation. Une avancée constituée de matériel grossier se consolide et s'allonge lorsque le niveau s'abaisse, l'encaissement progressif du cours d'eau dans la partie plus amont de la marge fournissant les sédiments. Les chenaux existants aux niveaux plus élevés de l'eau sont remarquablement visibles ; on en trouve de nombreux en remontant le cours du ruisseau.

Le chenal principal, fortement encaissé, dégage des coupes où l'alternance entre eaux courantes et eau stagnantes est particulièrement nette (photo 30), les dépôts foncés de sédiments fins s'établissant en fines couches lors de la submersion. Derrière les bourrelets de rive encadrant le chenal, des cuvettes surbaissées de décantation, visibles par endroits, adoptent cette même couleur foncée de sédiments fins à déposition lente qui caractérise une sédimentation « lacustre ».

Si on observe le tracé du cours d'eau au niveau moyen, on voit clairement que la défluviation vers la droite s'est produite à l'entrée de la marge. Un tracé plus rectiligne aboutit dans un lobe sous-deltaïque abandonné reculant sous l'action de l'érosion.

¹⁴⁹ Graffouillère, 2001, p26

Le front deltaïque est une plate forme de très faible gradient, ici $1,5^\circ$ en moyenne. Elle couvre une zone d'un demi hectare, progradante au débouché du cours d'eau et en recul, attaquée par l'érosion, au pied du lobe deltaïque abandonné.

La présence du talus est trahie par la forme convexe des isobathes dans la baie. Ce talus de progradation est large, il occupe 1,85 hectares et s'avance jusqu'au débouché de la baie.

Le talus est entaillé par un ravin sous stagnustre (Fig. 62) crée par la présence de courants de densités. La mise en évidence d'un de ces courants est traitée dans la troisième partie de ce travail. Le ravin fut décrit lors d'études antérieures à la vidange de l'étang de Cieux en Octobre 2001. L'origine de ce ravin est probablement mixte : il est possible que des courants de densité aient exploité un reste d'érosion sub-aérienne, stigmate de l'encaissement du cours d'eau lors d'une vidange passée. Quoiqu'il en soit, il a pu être établi que le ravin possédait des levées construites¹⁵⁰, signe du fonctionnement actif de courants de turbidité.

II.3.2.2.2. Les deltas du Nord et des Bonnes Fonds du Grand étang de Cieux

L'ampleur de ces deux deltas est plus réduite que celui évoqué précédemment. Les baies sont moins larges, particulièrement celle très étroite des Bonnes Fonds. Les plaines deltaïques sont plus difficiles à déterminer, mais existantes. Le marnage engendre ici aussi des marges deltaïques importantes, mais les parties actives des deltas sont plus réduites. Les fronts deltaïques occupent respectivement 0,06 hectares pour le nord et 0,04 pour les Bonnes Fonds (Fig. 62). Les talus prodeltaïques sont limités dans leur extension latérale par les talus, relativement proches du fait de la largeur des baies. Ces talus sont entaillés de ravins en partie hérités : contrairement à l'exemple précédent la présence de levées construites n'a pu être décelée.

¹⁵⁰ Graffouillère, 2001.

La présence de ces deltas et leur complexité remarquable traduit un équilibre entre l'apport sédimentaire du cours d'eau et la redistribution et le remodelage de ce matériel par la dynamique stagnustre. L'étagement et la zonation des formes deltaïques porte la marque d'une grande complexité des fonctionnements hydrodynamiques et sédimentaires.

II.3.2.3. Le grand delta immergé d'étang

La morphologie particulière des plans d'eau de vallée encaissée entraîne des morphologies deltaïques particulières. Dans le cas de l'étang de la Pouge et du lac du Pont à l'Age, l'encaissement ainsi que l'importance du cours d'eau relativement au volume et à la largeur moyenne du plan d'eau donnent des formes de delta immergé. La pente importante des berges et du modelé environnant empêche la détermination correcte d'une plaine deltaïque, et la marge est trop réduite pour être significative.

Lorsque le Gorret se jette dans l'étang de la Pouge, il a drainé l'important bassin d'alimentation sur 9,4 kilomètres. L'anthropisation de l'embouchure et l'encaissement du cours d'eau nous poussent à ne pas extrapoler une plaine deltaïque. En outre, la longueur de fetch a permis un important recul de la berge qui amènera à court terme la coalescence de la Pouge avec le petit étang creusé juste en amont, sur la droite de l'embouchure (photo 33a).

Les apports sédimentaires du Gorret étant importants, l'édification de formes d'accumulations est inévitable au niveau du modelé immergé. Le tiers amont de l'étang, orienté sud-ouest nord-est, présente des pentes faibles au regard du reste de la cuvette et de la morphologie émergée. Les anciens talus ont disparu sur les 200 premiers mètres du plan d'eau, comme l'atteste l'absence de concavité basale caractéristique de leur présence (Fig. 37).

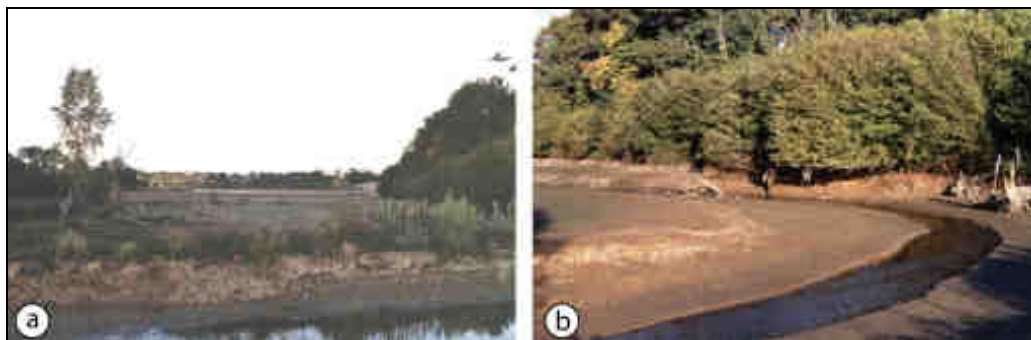


Photo 33 : L'encassement du Gorret dans le delta de la Pougé lors d'une vidange (cliché Carlini 2001)

Les pentes sont inférieures à un degré et cette plate forme qui se remblaie activement a les caractéristiques d'un front deltaïque actif (Fig. 63). La photo 33b permet de se rendre compte de l'épaisseur de sédiment grossier dans lequel s'encasse le Gorret durant la vidange. Ce front est particulièrement étendu, avec 3,6 hectares. Au-delà de deux mètres de profondeur, les pentes sont plus fortes (4 à 5°) près des berges et des talus réapparaissent, mais la zone centrale conserve des pentes très faibles.



Photo 34 : Le talus prodeltaïque lors de la vidange de la Pougé (cliché Carlini 2001)

Le talus prodeltaïque est très étendu et s'allonge du fait de la morphologie de l'étang (Fig. 63). Lors de la vidange la différence de matériel entre les talus (matériel grossier et clair) et le talus prodeltaïque (matériel plus fin et foncé) est particulièrement visible. Sa détermination en utilisant les paramètres couplés de profondeur, de pente et de convexité a permis de borner un talus très important - 5,7 hectares - témoin à la fois de l'importance de l'apport sédimentaire du Gorret et de l'organisation deltaïque de cette sédimentation vers l'aval du plan d'eau (photo 34).

Le front et le talus deltaïques sont largement entaillés par un ravin sous stagnustre (Fig. 63) dont la présence est due au débit du Gorret lors des vidanges. Ce ravin est discernable jusqu'à la limite du talus pro deltaïque (photo 34).

Le lac du Pont à l'Age présente les mêmes caractéristiques, mais la longue transition amont entre le milieu lotique et lentique due à l'importance de l'Ardour ne permet de déceler qu'un long talus d'accumulation isolé difficile à relier à d'autres formes proprement deltaïques (Fig. 67).

Cette configuration de delta « sous-marin » se retrouve dans les plans d'eau particulièrement allongés et encaissés. Ces plans d'eau profonds étant souvent conçus comme réservoirs ou pour la force motrice, leur marnage est très artificialisé ; la plaine deltaïque et la marge sont impossibles à déterminer. L'importance du front actif et du talus pro deltaïque allongé traduisent la domination de l'affluent sur le plan d'eau.

II.3.2.4. Le delta moyen d'étang

De nombreux étangs à faible emprise spatiale présentent des formes d'accumulations au débouché des affluents. L'emprise spatiale de ces accumulations est la plupart du temps réduite, ce qui n'exclut pas pour autant la présence de formes complexes.

Le petit delta existant au débouché du ruisseau dans l'étang du Theil présente toutes les caractéristiques d'une forme composite. Une étude antérieure¹⁵¹ a mis en évidence la présence d'une plaine, d'une marge, d'un front et d'un talus prodeltaïque. L'ensemble des formes ne dépasse pas 175 mètres carrés : l'emprise spatiale est réduite dans l'absolu, mais aussi par rapport au plan d'eau lui-même, d'où la terminologie de delta moyen d'étang. L'évolution de cette forme devait en

¹⁵¹ Graffouillère, 2001.

partie sa complexité à l'absence de vidange du plan d'eau durant ses trente premières années d'existence.



Photo 35 : Flèche sur la rive droite du delta du Theil (cliché Carlini 2001)

Le suivi régulier du delta a permis de se rendre compte de la rapidité d'évolution de la morphologie avec l'émergence de flèches se végétalisant rapidement (photo 35). Le delta a ainsi pris une forme lobée alternativement vers le nord et le sud au fur et à mesure des saisons et des dépôts sédimentaires. Ce « delta moyen » correspond en tous points à la description d'un delta digité décrit dans les lacs mais aussi, à une autre échelle à la description marine des deltas.

Toutefois, la périodicité des vidanges est souvent plus importante. L'impact d'une vidange dans un modelé aussi réduit est considérable et des deltas composites intacts de ce type sont rares. Le surcreusement occasionné par une vidange dans un delta va créer une forme nouvelle qui a pu elle aussi être étudiée.

Les actions conjointes du cours d'eau et de la baisse du niveau remodelèrent le delta dans l'étang des Garennes en 24 heures. Le matériel enlevé au front deltaïque était redéposé quelques mètres en aval sous formes de terrassettes de taille et de

granulométrie décroissantes (photo 36). Le processus a arraché et redistribué 5 m³ de sédiments avec une vitesse d'avancement moyenne de 83 centimètres par heure¹⁵².



Photo 36 : Delta lors de la vidange de l'étang des Garennes (cliché Carlini 2001)

Ce type de formations en terrassettes a pu être observé lors d'autres vidanges d'étangs ou de lacs¹⁵³.

L'étude de ce processus totalement anthropique, puisque issu de vidange, apporte deux enseignements. Il permet tout d'abord de mieux interpréter des formes deltaïques dans des étangs vidangés, et montre la prédisposition à la présence de ravins facilités par l'encaissement du cours d'eau particulièrement visible lors de la vidange (photo 36). D'autre part, toute baisse importante du niveau de l'eau entraîne ce type de morphogenèse, et il est fort probable de la rencontrer dans les plans d'eau à fort marnage, que ce soit naturel ou régulé.

L'étude des deltas d'étang aide à comprendre le rapport de force entre l'étang et son affluent. La morphologie du delta, sa complexité et l'importance du modelé immergé dans la cuvette stagnante sont des indicateurs de la domination réelle du cours d'eau sur l'étang et de la capacité de ce dernier à modeler les apports par sa

¹⁵² Graffouillère, 2001 p76.

¹⁵³ Maleval, 2001 p245-251

dynamique interne. Ainsi selon la capacité des affluents, la dynamique stagnustre et la morphologie de la baie, différents types de deltas vont pouvoir être trouvés.

Cette découverte n'a rien d'anecdotique : en effet, si les deltas d'étangs sont des zones bien connues de ceux qui pratiquent les plans d'eau, l'absence de description de leur complexité est significative de la méconnaissance scientifique des étangs. Deltas marins et lacustres ont largement été étudiés et leurs similarités sont importantes, conférant aux organismes lacustres une complexité de fonctionnement hydrodynamique suffisante pour modeler ces formes étagées. La présence de deltas complexes en étangs doit participer de cette même prise de conscience de la complexité des processus stagnustres. La vitesse de progression des formes deltaïques est un indicateur important pour les aménageurs, qui doivent prendre en compte la régularisation naturelle du littoral dans des plans d'eau anthropiques. Le delta atteste de la présence d'un étagement morphologique : il constitue en effet une transition entre formes littorales et formes profondes.

II.3.3. Les modelés stagnustres profonds

Les plaines centrales des plus grands lacs de la planète se situent à plusieurs centaines de mètres de profondeur¹⁵⁴ et l'on pourrait se demander comment parler de modelés profonds à propos de l'étang des Landes dont la profondeur maximale se situe à 1 mètre et 93 centimètres. La présence de modelés profonds à « faibles profondeurs » pose néanmoins la question du rôle de la profondeur absolue dans l'élaboration de certains aspects morphologiques. La majorité des manuels de limnologie ont été rédigés par des hydrobiologistes¹⁵⁵ considérant le plan d'eau sous le seul angle de la production végétale et animale. Les étagements mis en avant sont

¹⁵⁴ 265 mètres pour le Michigan, 309 mètres pour le Léman, 1637 mètres pour le Baïkal,...

¹⁵⁵ Hutchinson (zoologue), Ruttner (biologiste), Welch (zoologue), Wetzel (biologiste).

le plus souvent des étagements biologiques que ce soit pour la zone littorale avec l'implantation des macrophytes ou la limite entre zone euphotique et aphotique, la lumière jouant un rôle fondamental notamment pour la photosynthèse. D'un autre côté, les étangs sont envisagés comme des espaces artificiels de production piscicole. Rien d'étonnant alors que des hydrobiologistes travaillant sur des milieux naturels ne s'intéressent pas à la morphologie « profonde » des étangs.

L'utilisation de la terminologie employée ici est parfaitement légitime : il s'agit de morphologie, de formes édifiées par des sédiments provenant du bassin d'alimentation ou du plan d'eau lui-même, mais toujours modelées par la dynamique interne de ce plan d'eau. L'étude limnologique doit naviguer entre les échelles spatiales, ce que l'approche géographique lui permet. La remise en cause de l'étang comme une simplification du fonctionnement lacustre par la variable profondeur passe par l'identification de ces modelés profonds.

Etudier ces modelés nécessite de revenir à leur première identification dans un lac, afin de pouvoir discuter les méthodes à utiliser pour leur détermination.

II.3.3.1. L'invention du plafond et de la plaine centrale, un retour épistémologique nécessaire

Dans sa monographie limnologique sur le Léman, Forel a mis en place un certain nombre de termes nécessaires à la description de la cuvette lacustre. En 1892, son étude sur le Léman a d'ores et déjà isolé et nommé la plupart des formes de la morphologie lacustre. La plaine centrale et le plafond¹⁵⁶ sont ainsi nés sous sa plume, repris six ans plus tard par Delebecque. Si les œuvres de ces deux limnologues contemporains l'un de l'autre sont tout aussi remarquables, l'antériorité de Forel

¹⁵⁶ Le terme plafond doit être pris dans son sens étymologique auquel Forel s'est référé. Il s'agit de *platfons* (1546) signifiant « fond plat, surface plane et horizontale » (Grand Robert de la langue française). Aucune confusion avec le sens courant actuel de plafond n'est donc possible.

oblige à replacer ces termes selon sa vision des choses. En effet à partir de Delebecque, la plaine centrale et le plafond sont confondus dans une même description :

« En général le fond des lacs est constitué par un ou plusieurs plateaux, sensiblement horizontaux, dont la surface est une fraction très importante de la surface totale de la cuvette. [...] Souvent l'un de ces plateaux horizontaux est sensiblement plus développé que les autres, et alors il constitue l'un des traits les plus remarquables et les plus caractéristiques des grands lacs ; la vase ayant nivelé toutes les aspérités primitives qui pouvaient exister sur sa surface, celle-ci est absolument lisse et, de plus, presque plate. On l'appelle très justement le plafond, ou encore la plaine centrale du lac. » (Delebecque, 1898. p68).

Pourtant, lorsque Forel décrit le « relief en creux » du Léman, il individualise deux ensembles : le plafond et ses talus, plafond qu'il définit comme « la plaine plus ou moins égale qui constitue le fond du bassin » (1892. p43). Si à ce stade une confusion est possible, sa division du plafond en trois parties est sans équivoque : rampe descendante – plaine centrale – rampe ascendante (1892. p48). S'il décrit plus amplement cette plaine centrale à « l'horizontalité remarquable [...] (comparable) à une table de billard » (1892. p49) métaphore reprise par tous, il décrit aussi par la suite ces rampes ascendante et descendante qui font pour lui partie intégrante dudit plafond.

Afin de rendre justice à l'inventeur de la limnologie, qui a pris soin des termes dont il usait dans sa description morphologique du Léman, il semble important de distinguer plafond et plaine centrale. Cela est de surcroît plus logique, puisqu'au delà du talus, l'espace s'étendant n'est pas forcément uniformément plat et horizontal, mais comme Delebecque l'a lui même décrit, il peut être composé de

plusieurs plateaux. Seul le plus plat et le plus étendu constitue alors la plaine centrale, qui fait partie intégrante d'un plafond plus vaste¹⁵⁷.

II.3.3.2. Détermination morphologique des modelés profonds

Cette précision apportée, il faut penser que la géographie, qu'elle soit limnologique ou non, se base sur une cartographie des phénomènes : plafond et plaine centrale si longuement décrits ne sont que rarement cartographiés et le plus souvent définis spatialement par une isobathe donc une profondeur, alors qu'ils sont définis thématiquement par une morphologie.

Les « définitions » de plafond et plaine centrale évoquées par Forel sont basées sur des critères morphologiques et sédimentaires. L'aspect sédimentaire est purement qualitatif et évoque la sédimentation fine ou vase ayant gommé les aspérités du relief primitif. Les aspects morphologiques sont plus détaillés, sans toutefois être quantifiés : le plafond est la zone située à l'intérieur du talus ; au sein de ce plafond se distingue une plaine centrale, « admirablement plate » (Forel, 1892. p48) et située aux plus grandes profondeurs du lac.

L'apport de la géomatique à la morphométrie et la spatialisation permet de donner à ces caractéristiques décrites par Forel une existence quantifiable et cartographiable. Une carte des très faibles pentes permet de révéler le plafond et ses inégalités puis d'effectuer un zonage en s'appuyant sur les alternances de concavité et convexité du modelé.

Nous distinguerons donc quatre ensembles constituant le plafond lacustre ou stagnustre inscrit à l'intérieur des talus et constituant le fond de la cuvette. La plaine dite centrale est le relief le plus plat aux grandes profondeurs, mais des plaines secondaires peuvent exister, qui avec le temps entreront en coalescence pour

¹⁵⁷ Ce qui n'empêche pas la possibilité d'avoir une coïncidence parfaite entre les deux, si la sédimentation a pu être suffisamment importante.

agrandir la plaine centrale. Lorsque la sédimentation a pu faire son œuvre de comblement durant plusieurs siècles voire millénaires pour les plus grands lacs, cette plaine centrale peut venir buter au pied des talus. Néanmoins pour les plans d'eau de notre étude, la sédimentation est encore imparfaite ou perturbée par les vidanges et le raccordement entre les talus et les grands fonds prend la forme d'un glacis en pente douce. Enfin, tout plan d'eau muni d'une vanne de fond et vidangé régulièrement développe à l'amont direct de cette dernière une dépression entretenue par le départ de matériel que nous nommeront fosse de vidange.

II.3.3.3. Les « grands fonds » des étangs

Le fond des étangs est souvent relativement plat, nivelé par la sédimentation mais aussi parfois du fait de l'héritage subaérien. L'exemple de l'étang du Puy Bavaud permet de se rendre compte de la présence de deux plaines secondaires, dont une pourrait être qualifiée de plaine centrale par sa localisation, mais des prélèvements effectués lors de la bathymétrie attestent d'une sédimentation quasiment inexistante dans la partie aval (Fig. 69). La construction mécanisée récente de cet étang lui a conféré un fond plat qui ne doit pas être assimilé à un modelé d'accumulation¹⁵⁸. Les autres étangs laboratoires ont développé des modelés profonds, comme on peut le constater pour le Theil et les Garennes (en seulement 35 ans pour ces deux exemples). L'étang du Theil, plus allongé, présente une plaine secondaire et une petite plaine centrale triangulaire encore disjointes ; au contraire, dans l'étang des Garennes une seule plaine centrale démontre la reprise sédimentaire effectuée par l'affluent depuis sa sortie du Theil (Fig. 68). Lors de la réalisation de la bathymétrie, il n'existait pas à l'étang du Theil de fosse de vidange puisqu'aucune n'avait encore été réalisée.

¹⁵⁸ Pour cette même raison, il ne faut pas interpréter des cartes réalisées avant la mise en eau, ce qui produirait le même type d'écueil.

L'étang de Bois Chenu a des similitudes avec celui du Theil : sa forme allongée présente deux plaines. La plaine centrale est néanmoins beaucoup plus étendue avec un peu plus d'un hectare. Vers l'aval, au nord, les pentes s'accroissent au niveau de la fosse de vidange (Fig. 66).

L'étude des étangs lacs souligne une fois de plus la dichotomie entre les étangs comme Cieux ou les Oussines des plans d'eau de vallée encaissée que sont la Pouge et l'Age.

L'importance des talus et l'étirement des plans d'eau ne permettent pas, malgré une sédimentation importante, aux plaines de prendre de l'ampleur. En outre, les profils amont-aval de la Pouge et de l'Age s'enfonçant respectivement jusqu'à 5,98 et 9,6 mètres (Fig. 35,51) nécessitent un travail de comblement plus important. Les plaines centrales sont situées à l'aval et les fosses de vidange sont très marquées. Le lac du Pont à l'Age possède une plaine secondaire très en amont, vers 4 mètres de profondeur, alors que la plaine centrale se situe au-delà de 7 mètres (Fig. 67). Cela explique l'existence d'un glacis important, relativement plat mais non horizontal. Dans le cas de la Pouge, l'emprise des talus à l'aval du plan d'eau borne la plaine centrale qui tend à rejoindre le talus prodeltaïque dont elle est encore séparée par un glacis de 200 mètres dont les pentes atteignent encore 7° (Fig. 36,63).



Photo 37 : La plaine centrale de l'étang de la Pouge durant une vidange (cliché Carlini 2001)

La photo 37a nous montre la plaine centrale, raccordée directement au talus. La différence de granulométrie est flagrante. L'encaissement du Gorret lors de cette vidange donne la mesure de l'épaisseur de sédiment. Au niveau de la bonde, la fosse de vidange vient buter sur les enrochements de la digue (photo 37b).

Dans le cas de l'étang de Oussines et surtout celui de Cieux, la plaine centrale occupe une grande proportion du plan d'eau total (Fig. 62,65). La longue période de sédimentation de ces étangs anciens, couplée à un rythme lâche de vidanges a autorisé la mise en place de vastes plaines centrales, presque adossées aux talus.



Photo 38 : La plaine centrale de l'étang de Cieux durant une vidange (cliché Carlini 2001)

L'étang de Cieux présente ainsi des concavités caractéristiques à la base de ses talus montrant la disparition progressive du glaciaire (Fig. 33). La vaste plaine centrale est remarquablement plate (photo 38a) et atteint 10,3 hectares. Elle remonte très en amont à la confluence des trois baies où elle est la plus large ; en aval elle se termine par une fosse surcreusée lors des vidanges (photo 38b & Fig. 62). Cette fosse est caractéristique : les pentes sont plus fortes et le volume de sédiment beaucoup plus réduit qu'en amont.

L'étang des Oussines présente lui aussi une plaine centrale vaste – elle occupe le tiers de la superficie totale – faisant peu à peu disparaître le glaciaire. En amont, la plaine jouxte l'aval du talus prodeltaïque et elle se termine en aval par une fosse de vidange bornée entre de larges talus (Fig. 44,45,65)

Ces deux plaines centrales édifiées durant plusieurs siècles ont acquis une surface importante du fait de l'importance de l'accumulation de sédiment fin. Toutes les aspérités du modelé subaérien ont ainsi été gommées : cela traduit l'importance de la couche déposée. Pour vérifier cela, des mesures d'épaisseur de sédiment ont été réalisées sur ces deux étangs. Les résultats sont exposés dans la partie II.5.

Le cas de l'étang des Landes est particulier. Cet étang présente à la fois une grande ancienneté¹⁵⁹ et une grande platitude de la cuvette. Il en résulte l'existence de trois plaines, deux secondaires à l'ouest et au nord, et une vaste plaine centrale couvrant 25 hectares (Fig. 64). Ces trois plaines sont séparées par le haut-fond sableux présent au centre de l'étang et ne peuvent donc pas entrer en coalescence. Les plaines amont prennent place dans deux anciennes cuvettes bloquées derrière des contrepentes résiduelles (Fig. 40,41). De ce fait ces zones ne se vident que partiellement lors des vidanges¹⁶⁰. La forte platitude du modelé subaérien engendre de rares talus et l'importance du glacis et des plaines sur le fond de la cuvette.

Les modelés d'accumulation des étangs, notamment la plaine centrale, sont une marque de la maturité des plans d'eau. Le long processus de sédimentation, lorsqu'il n'est pas perturbé par un rythme de vidanges et d'assecs réguliers fait évoluer la cuvette en aplanissant le fond à mesure qu'il se rehausse. De par la faible périodicité de leurs vidanges, certains étangs limousins sont très sensibles à ce phénomène. L'échelle temporelle de mise en place de ce processus est très différente

¹⁵⁹ L'actuel étang des Landes occupe la place d'un ancien lac naturel mis en place à la fin du Crétacé, en partie vidangé au quaternaire lors du rajeunissement du massif central. (Brunaud, 2003) Jusqu'au XVIème Siècle, un lac d'une cinquantaine d'hectare subsiste, retenue par une contrepente. La première digue fut édifiée en 1684 et l'étang des Landes naquit.

¹⁶⁰ Brunaud, 2003, p38.

de celle des lacs, du fait d'une sédimentation relativement plus importante¹⁶¹, autant au niveau allochtone qu'autochtone.

La plaine centrale existe donc à moins de deux mètres de profondeur : sa détermination doit s'effectuer relativement à la profondeur globale du plan d'eau et non selon des critères inadaptés de fortes profondeurs absolues. La profondeur absolue importe finalement assez peu, chose que les limnologues auraient dû envisager en étudiant les grands fonds lacustres à l'aune des plaines abyssales des océans.

L'absence de dépôt sur les talus est due à la pente de ces derniers, mais comme elles restent relativement faibles par rapport à celles des lacs il est légitime de penser que ce facteur n'est pas exclusif. Des dynamiques de brassage et de courants de surface empêchent le dépôt de matériel fin aux faibles profondeurs. Cette présence éventuelle de courants stagnustres mise en évidence par la morphologie appelle un approfondissement et des mesures.

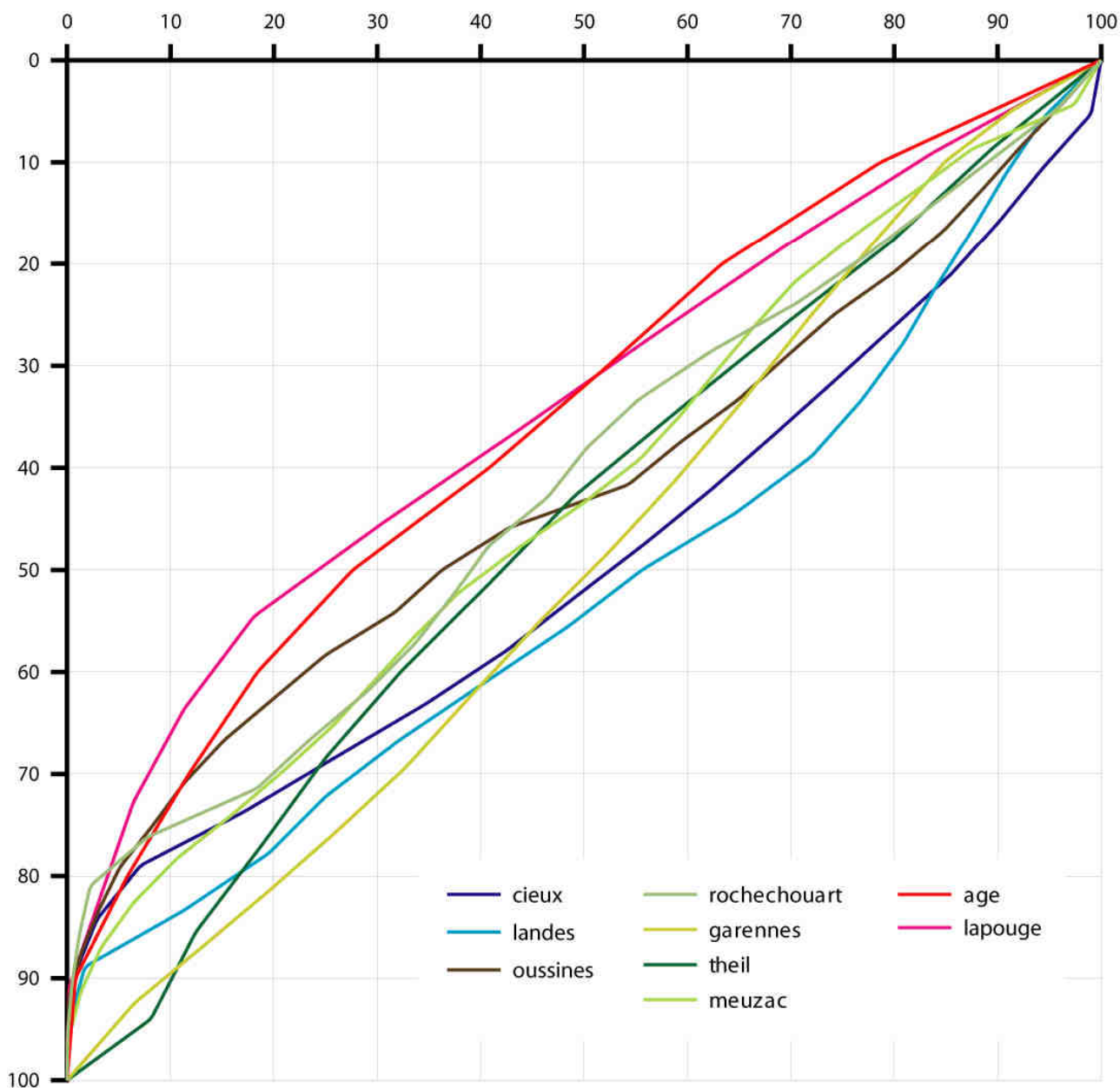
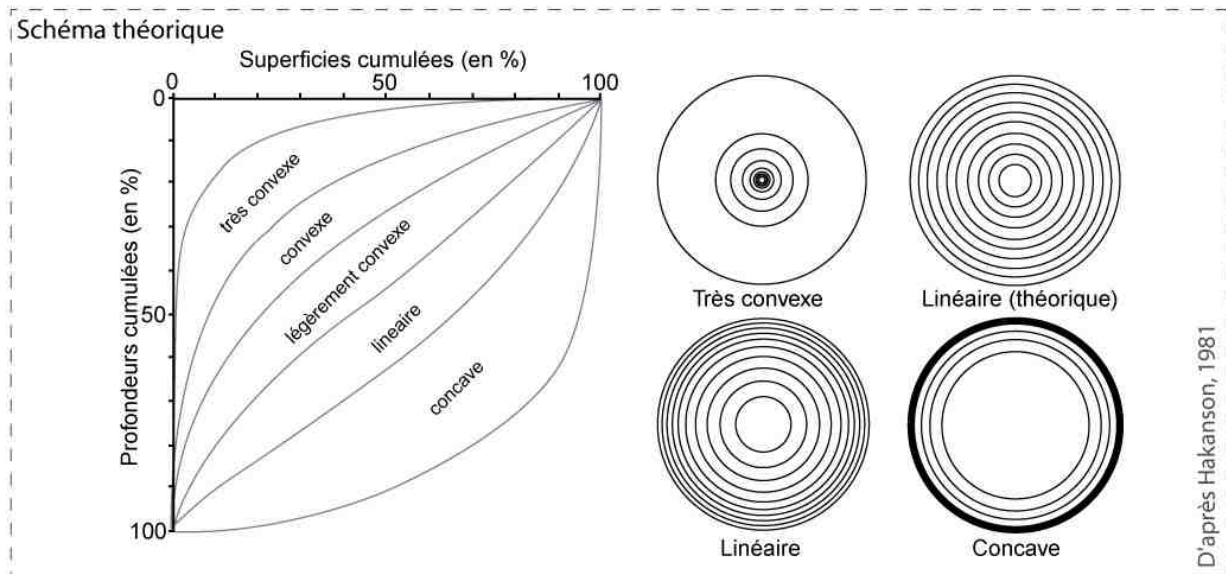
II.4. Synthèse morphologique

A de nombreuses reprises, l'étude des différentes formes stagnustres nous amène à regrouper certains étangs dont les morphologies et donc les fonctionnements sont communs. Le meilleur outil de comparaison de ces morphologies est la courbe bathygraphique relative.

¹⁶¹ Ce point est traité en partie II.5 avec l'exemple de Cieux.

Figure 72 :

Courbes bathygraphiques relatives des plans d'eau étudiés



Conception & réalisation : M. Carlini - 2005

II.4.1. Interprétation des morphométries et comparaison des morphologies des étangs étudiés

L'observation de la figure 72 permet de se rendre compte de la diversité des morphologies étudiées. Les profils s'échelonnent de formes convexes à concaves du bassin. Entre 10 et 80% de profondeur, il est possible de distinguer trois groupes de morphologies : convexe, avec la Pouge et le Pont à l'Age ; concave pour Cieux et les Landes ; linéaire à légèrement convexe pour Bois Chenu, le Theil, les Garennes et Puy Bavaud. L'étang des Oussines est légèrement concave jusqu'à 30% de profondeur et convexe au-delà de 50%.

En deçà de 10% de profondeur, les morphologies sont à étudier au cas par cas ; au-delà de 80% la fosse de vidange est parfaitement visible, exception faite de l'étang du Theil exempt de vidange lors de la bathymétrie et celui des Garennes pour lequel la fosse est très réduite.

Les plans d'eau de vallées encaissées que sont la Pouge et le Pont à l'Age se caractérisent par un profil convexe car ils subissent le poids d'héritages subaériens forts. Les talus occupent une part importante de leur superficie et leur inclinaison ne permet pas une modification par sédimentation. En outre leur faible largeur limite l'extension de modelés de type plaine centrale, enclavé entre les talus. La convexité du profil dénote une plus grande partie des superficie au-dessus de 50% de profondeur : ici plus de 70% des superficies. L'importante course du vent étant canalisée dans d'étroits couloirs, les zones soumises à l'érosion sont réduites et aucune concavité n'est décelable entre 0 et 10% de profondeur. En outre, les accumulations deltaïques importantes en amont accentuent la convexité depuis la surface. Les inflexions très légèrement concaves décelables entre 20 et 50% de

profondeur marquent la transition entre les talus et le glacis. Les fosses de vidanges sont dans la continuité du profil.

Les étangs de Cieux et des Landes présentent tous deux un profil tendant à la concavité. Ces deux étangs sont très anciens et possèdent plusieurs affluents ; néanmoins l'étang des Landes reste un cas particulier du fait de sa position dans le bassin sédimentaire de Gouzon. Leur point commun majeur est l'importance de leurs plaines centrales ; 58% de leurs superficies se situent en dessous de leur profondeur moyenne, ce qui favorise le développement des plaines. La concavité du profil se prolonge jusqu'à 90% de profondeur pour Cieux et 80 pour les Landes ; les plaines centrales étant particulièrement planes la fosse de vidange se marque par une brisure très nette de la courbe. La différence entre ces plans d'eau vient du quart supérieur du profil. L'étang de Cieux est un étang de confluence où les talus sont très marqués avec un impact de l'érosion lors des basses eaux visible entre 0 et 5% de profondeur. L'étang des Landes est très plat, les talus sont rares et peu marqués : le début du profil est plutôt rectiligne.

L'étang des Oussines a une morphologie globale particulière : l'amont est concave, le delta important comme dans le cas de Pranaud. Néanmoins l'aval est enserré entre de larges talus et la plaine centrale garde des irrégularités non encore gommées par les sédiments. Cette plaine reste suspendue au-dessus des plus grandes profondeurs ce qui laisse un profil convexe en dessous de la profondeur moyenne. Les sédiments apportés par la Vézère gonflent plus les formes deltaïques en amont que la plaine en aval.

Les étangs du Theil, du Puy Bavaud et de Bois Chenu voient leurs profils se croiser sans cesse autour d'une convexité légère au moins jusqu'à 65% de profondeur. Ces trois plans d'eau de petite taille sont récents occupent un petit vallon barré dans lequel ils s'allongent. Les talus sont marqués et peu attaqués par l'érosion ; la

concavité sommitale du profil du Puy Bavaud est due à son surcreusement anthropique et l'envasement au sortir de la dérivation. Leur mise en eau n'est pas assez ancienne et leurs plaines sont divisées ; elles sont visibles sur le profil autour de 70% de profondeur pour Rochechouart et Puy Bavaud. Le Theil présente une concavité basale due à l'absence de vidanges et donc de fosse. L'étang des Garennes se rapproche de cette catégorie mais son profil est plus concave dès 20% de profondeur. Ce petit étang triangulaire barre le même vallon que celui du Theil, mais le cours d'eau fut dévié à la construction. Sa faible emprise spatiale se traduit par des talus peu prononcés, et l'entrée latérale de l'affluent a édifié un delta et provoqué un envasement marqué de la partie Est, repérable par la concavité sommitale de la courbe. La forme générale ramassée a favorisé la constitution d'une plaine unique.

II.4.2. Une typologie spatiale et temporelle

A ce stade de notre étude, sans même avoir abordé les questions d'hydrodynamique, il semble patent que les étangs ne sont pas des trous d'eau inertes. La présence de morphologies propres sous-tend une action importante de la masse d'eau et des affluents. Les modelés observés montrent des étagements et des zonations morphologiques, reflets de l'étagement et la zonation des processus stagnustres. En outre, les étangs étudiés ont des caractéristiques radicalement différentes et trois groupes émergent de l'étude.

II.4.2.1. Une nécessaire prise en compte de toutes les échelles

Le barrage d'une vallée et son ennoyage va entraîner une modification du profil de cette vallée que l'on peut nommer morphogenèse lacustre ou stagnustre. Cette morphogenèse comporte deux grandes composantes : l'érosion et le

comblement. Ces processus s'opèrent à la fois dans la dimension horizontale et verticale. L'érosion nécessite la coïncidence de plusieurs paramètres que nous avons évoqués, dont la pente, la végétation et le fetch sont les plus importants. Or ces composantes rendent l'érosion stagnustre proportionnellement plus réduite que l'érosion lacustre. Le comblement par la sédimentation est soumis à deux facteurs : l'importance de la charge du ou des affluents et le temps. Dans ce cas, les affluents sont proportionnellement plus importants pour les petits plans d'eau que pour les grands lacs et la production biologique autochtone est proportionnellement plus forte du fait d'un plus faible volume d'eau et de la vocation piscicole. Concernant le facteur temps, on distingue des étangs anciens – médiévaux pour la plupart – ou très récents. Ainsi la sédimentation profonde ou deltaïque peut prendre une importance relative supérieure à celle des plus grands lacs. La prise en compte des échelles spatiales et temporelles est la clé de la compréhension des processus morphologiques stagnustres.

II.4.2.2. Une réelle identité morphologique stagnustre

La morphologie des étangs et étangs lacs n'est donc pas une simplification de la morphologie lacustre, ou sa réplique en modèle réduit. La réalité est infiniment plus complexe. Certains processus sont atténués et d'autres sont décuplés¹⁶². L'étang est un plan d'eau de barrage créé par la main de l'homme : en cela il se rapproche du lac de barrage artificiel. La comparaison s'arrête là : de nombreux étangs sont beaucoup plus anciens, parfois millénaires. Un autre facteur propre au Limousin les individualise : si les étangs sont tous d'origine artificielle dans notre région, leur fonctionnement est peu régulé comme dans le cas de la faible périodicité des vidanges. On peut considérer certains étangs non surcreusés ayant à la fois une

¹⁶² Idée déjà suggérée par Dussart, de façon très générale.

périodicité lâche dans les vidanges et une absence de curage comme étant « libres¹⁶³ » dans leur évolution morphologique.

Certains auteurs ont défini l'étang comme un « lac réduit à son espace littoral »¹⁶⁴ : notre étude prouve à quel point cette vision ne s'appuyait aucunement sur la morphologie. Tout au contraire, les formes profondes montrent une grande maturité – avec d'importantes plaines centrales engraisées par une forte sédimentation fine – alors que l'érosion littorale est peu développée. En outre, les théories très courantes aussi selon lesquelles l'étang est assez superficiel pour que la végétation puisse y pousser partout¹⁶⁵ est très contestable au regard des modelés profonds étudiés. Dire que l'étang est un lac réduit à sa zone profonde serait tout autant inepte. L'étang est un plan d'eau où la sédimentation est dominante, et où des processus de redistribution modèlent des zonations et des étagements morphologiques. L'impact des affluents est fort, comme en témoigne la présence de deltas imposants reflétant pour partie la domination du bassin d'alimentation¹⁶⁶, et l'hydrodynamique stagnustre organise ces apports sédimentaires en formes complexes. L'organisation de matériaux grossiers est particulièrement réduite, d'où une quasi-absence de plages naturelles.

Dans ce schéma global de morphologie stagnustre, nous avons vu des morphologies différentes. Tout comme les lacs, la diversité des étangs nécessite d'étudier les différentes morphologies pour essayer de dégager des types.

¹⁶³ Il serait abusif d'employer le terme naturel.

¹⁶⁴ Loup, 1974 ; Arrignon, 1998.

¹⁶⁵ « ponds are shallow enough to have vegetation rooted all over their beds » Cleave (1992) ; « (a pond is) shallow enough for plants rooted on the bottom to grow all over it » Fitter (1986).

¹⁶⁶ Le coefficient de domination donne une indication sur le rapport entre le lac et son bassin, néanmoins ce facteur est à tempérer au regard d'autres comme le débit du cours d'eau par exemple ou la pente de ce dernier qui ont une influence importante.

II.4.2.3. Types morphologiques des étangs de l'étude

Les huit plans d'eau étudiés permettent de dégager trois grandes catégories de morphologie se révélant par là même être des types de fonctionnement stagnustres. Ces types s'individualisent par la forme générale du bassin, la part relative des formes immergées ainsi que des processus d'érosion et d'accumulation. Le positionnement au sein du bassin versant est lui aussi un indicateur.

Les étangs de vallon (Fig 73) généralement récents, d'une superficie et d'un volume réduits sont très nombreux en Limousin. Si leur volume est peu important leur indice de creux peut être élevé car leur profondeur maximum est moyenne¹⁶⁷. La courbe bathygraphique souligne un profil plutôt rectiligne. Ils se situent en tête de bassin et donc barrent généralement de petits cours d'eau de faible rang ; la morphologie plane est simple : le développement du trait de côte est très faible, proche de 1. Les formes d'accumulation – notamment deltaïques – sont incomplètes et l'érosion est peu présente. La morphologie subaérienne est prégnante notamment en cas de surcreusement anthropique : les talus occupent une superficie importante. Ces plans d'eau développent néanmoins une morphologie complexe avec une réelle plaine centrale.

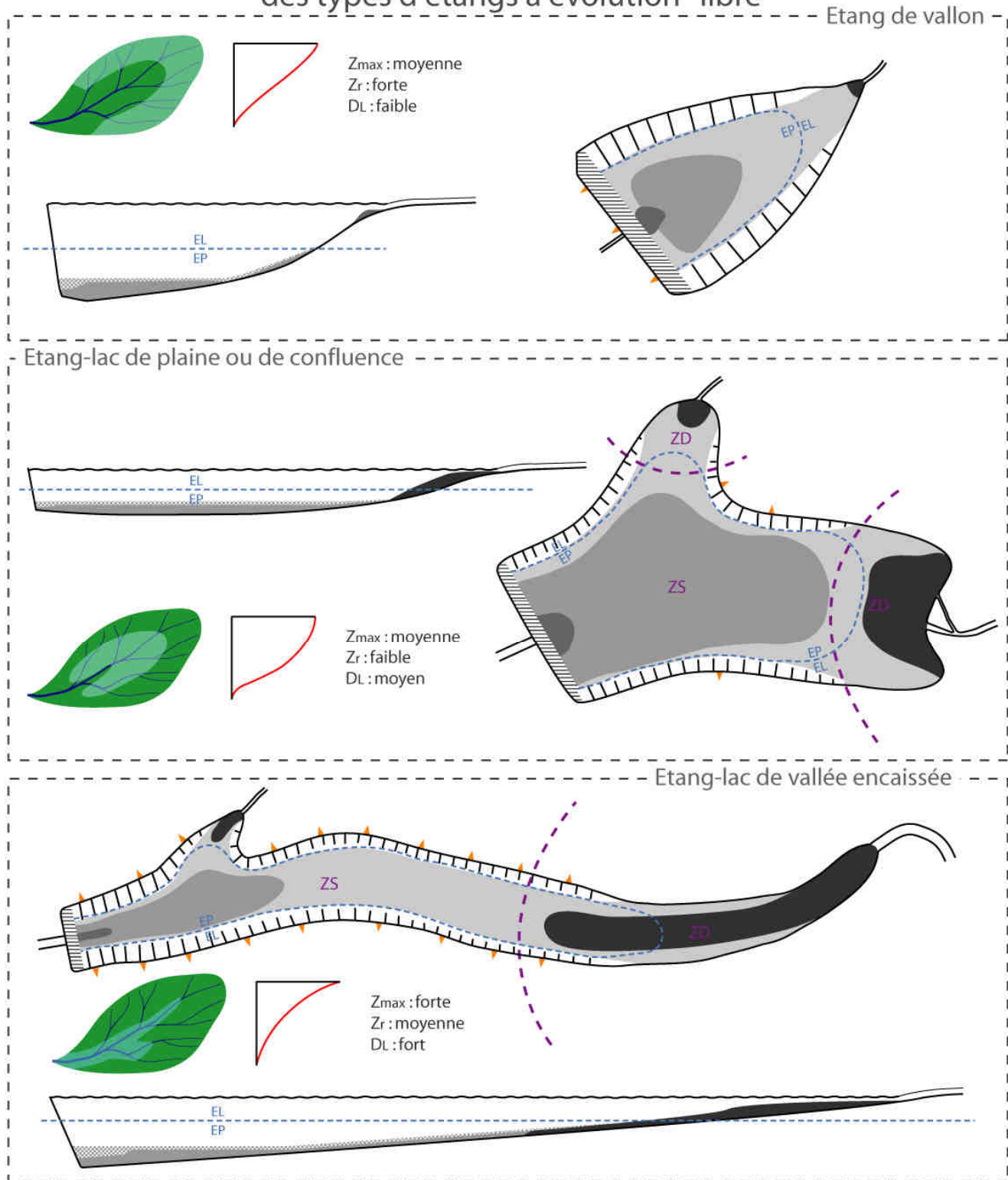
Les Etangs du Theil et des Garennes sont les archétypes de cette catégorie rassemblant des milliers d'étangs édifiés ces quarante dernières années en Limousin. L'étang du Puy Bavaud est trop anthropisé pour figurer dans cette typologie.

Les étangs-lacs de plaine ou de confluence (Fig. 73) s'étalent dans des modelés plus doux, et développent une identité morphologique forte si leur mise en eau est ancienne. Ils sont peu creux du fait de profondeurs faibles à moyennes et leur marnage peut induire de grandes variations de superficie : leur volume d'eau est

¹⁶⁷ Proche de 2 mètres pour les plans d'eau étudiés, mais cette profondeur ne saurait être un critère de détermination strict, cependant on peut considérer qu'il ont une profondeur moyenne relativement à leur superficie.

Figure 73 :

Typologie schématique des caractéristiques morphologiques des types d'étangs à évolution "libre"



- accumulation deltaïque
- plaine centrale
- glacis
- fosse de vidange
- talus
- érosion littorale
- digue
- EL : étage littoral
- EP : étage profond
- ZD : zone sous influence deltaïque
- ZS : zone stagnustre
- situation probable des étangs de ce type dans le bassin versant
- allure générale de la courbe bathygraphique
- Z_{max} : profondeur maximum
- Z_r : profondeur relative
- DL : développement de la côte

important. La courbe bathygraphique tend à la concavité, sauf à la base du fait de la fosse de vidange. Les formes d'accumulation dominant, avec un étagement marqué entre les formes deltaïques et une plaine centrale occupant une grande partie du bassin surtout si l'étang est ancien. Des traces d'érosion peuvent être remarquées, sur les berges les plus abruptes et là où la végétation est la moins dense. Ces plans d'eau se positionnent plus en aval dans le bassin par rapport aux étangs de vallon et peuvent compter plusieurs affluents ; diverses baies sont possibles et se traduisent par une valeur de développement du trait de côte moyenne. Une réelle différence entre zone sous influence deltaïque et zone de pleine eau stagnante est sensible.

Le Grand étang de Cieux et l'étang des Landes représentent des modèles respectivement pour la situation de confluence et celle de plaine. En outre, ils sont tous deux très anciens ce qui leur confère une grande maturité des caractères décrits ci-dessus. L'étang des Oussines peut être placé dans cette catégorie car ses caractéristiques morphologiques concordent ; sa particularité est de se trouver plus en amont que la moyenne, au débouché d'une tourbière dans un contexte morphoclimatique de moyenne montagne. Néanmoins son affluent est d'importance et son delta complexe ; la plaine centrale est aussi bien développée.

L'étang de Bois Chenu se situe entre les deux types précédents : sa superficie est faible et il occupe une situation plus en aval que les étangs de vallon. Son delta se développe mais les modelés profonds sont incomplets. Son profil bathygraphique est donc plutôt linéaire. Le temps affinera la maturité des modelés mais sa faible emprise spatiale ne laisse pas augurer la possibilité d'une zonation franche.

Les étangs-lacs de vallée encaissée sont à l'image des grands barrages de vallée : très profonds, hyper dominés par un affluent unique et fortement marqués par une morphologie subaérienne abrupte (Fig. 73). La courbe bathygraphique est convexe. Ils marquent le paysage de leur forme allongée leur conférant un fort

développement de la côte. Malgré leur forte profondeur maximale, la profondeur relative se situe sur une valeur moyenne. En effet l'importance du delta immergé et son avancée dans le plan d'eau créent une zone amont aux profondeurs faibles. La dichotomie amont-aval est une des spécificités de ce type. Souvent le plan d'eau n'est pas visible en entier du fait de la morphologie locale dans laquelle il s'inscrit, renforçant cette différenciation entre l'amont deltaïque et l'aval profond. Des falaises surplombantes se développent le long des berges très abruptes ou face à la course du vent particulièrement allongée. Si la masse d'eau est importante ces étangs sont sous l'influence tyrannique d'un grand bassin versant car situés très en aval et sont très marqués par une morphologie locale prégnante. L'étang de la Pouge et le lac du Pont à l'Age sont particulièrement représentatifs de ce type de plans d'eau.

La possibilité de mettre en place une réelle typologie souligne d'une part la présence de caractères communs forts entre tous les étangs étudiés et d'autre part des particularités identifiables communes à des sous groupes. Cela représente une preuve de l'identité morphologique des étangs et de la nécessité de leur étude en tant qu'objets géographiques à part entière et non comme une thématique accessoire de la limnologie. La typologie mise en place est évidemment représentative du seul Limousin et de ses particularismes¹⁶⁸, néanmoins la réflexion à mener est plus vaste. En effet, cette typologie a vocation à être fonctionnelle et non seulement descriptive. Les différents caractères mis en avant ont des impacts réels sur la gestion, comme en témoigne la détermination d'une fosse de vidange inédite en morphologie limnologique. Il s'agit de comprendre la morphologie et les fonctionnements stagnustres pour éclairer des aspects fondamentaux jusqu'alors délaissés mais aussi pour améliorer la gestion des milieux humides. La problématique la plus récurrente

¹⁶⁸ Nous avons vu qu'ils étaient importants pour les étangs, notamment pour la profondeur et donc le volume.

en Limousin concernant les étangs étant celle des vidanges et de leurs conséquences, nous franchirons naturellement le pas entre fosse de vidange et stockage sédimentaire.

II.5. Le stockage sédimentaire et les vidanges d'étang

L'étang est souvent considéré comme une cuvette de décantation car il stocke une grande partie des sédiments fluviaux s'il se situe sur le cours d'eau¹⁶⁹, cas fréquent en Limousin. Au cours du temps, les sédiments s'accumulent dans le plan d'eau et la restitution de cette matière, au moins en partie, s'effectue brutalement lors des vidanges. Les questions d'accumulation sédimentaire et de vidange sont à l'origine de nombreuses polémiques sur l'impact environnemental des étangs dans les régions où la densité de plans d'eau est forte. Les quelques 20 000 étangs limousins sont assurément sujets à controverse lorsqu'il s'agit des vidanges, surtout lorsque l'on considère leur faible périodicité et parfois le manque de clarté dans lequel elles se déroulent.

II.5.1. Le stockage sédimentaire et sa quantification

II.5.1.1. Les apports des tributaires au plan d'eau

La rupture de pente engendrée par la présence d'un étang sur le profil en long d'un ruisseau entraîne une diminution importante de la vitesse du flux liquide. Cette diminution est à l'origine du dépôt des sédiments dans le plan d'eau¹⁷⁰. Les

¹⁶⁹ Schlumberger, 1998, p17. Arrignon, 1998, p423.

¹⁷⁰ Il en va de même pour tout type de réservoir : « ...when a reservoir is constructed on a stream, all or most of the sediments transported into the reservoir by the stream will be deposited here. » (Bondurant & Livesey, 1973)

sédiments contenus dans le cours d'eau peuvent être d'origine minérale ou organique. Les sédiments sont transportés selon leur taille soit sur le fond du lit, par saltation ou roulage, soit en suspension dans l'eau. Les particules transportées sur le fond du lit, la charge de fond, représentent une réelle difficulté au niveau de la quantification¹⁷¹. Néanmoins des études ont mis en évidence une moins grande importance de ce processus en plaine plutôt qu'en montagne (Fergusson, 1981). Il a déjà été établi que la mobilisation de la charge de fond ne représente que 10% des transferts solides¹⁷² dans la zone géographique de notre étude. Par contre, les MES « constituent normalement 90 à 95% de la totalité des matériaux solides transportés¹⁷³ » ce qui rend leur quantification importante dans l'étude du stockage sédimentaire des étangs. Le Plan d'Eau de Recherche Expérimental de Cieux a été l'objet d'un suivi des débits et des MES entrant et sortant de l'étang de Cieux dans la période allant du 18 septembre 2002 au 30 juillet 2003 à un rythme hebdomadaire. Les mesures effectuées en milligrammes par litre ont été rapportées au débit en litres par seconde et les graphiques présentent donc l'apport sédimentaire réel, en milligrammes par seconde et en kilogramme par mois. Si les débits ne sont présentés que plus loin lors du bilan hydro-limnologique, une première constatation est l'absence de corrélation quantifiable entre débit et concentration en MES en mg/l (fig. 74).

« ...un lac constitue un piège plus ou moins efficace [...] le calme relatif des eaux entraîne une baisse de la compétence hydraulique : le lac est un bassin de décantation » (Campy & Meybeck, 1995)

¹⁷¹ « ... l'évaluation des quantités transportées par charriage présente beaucoup plus de difficultés. Ceci tient à la nature même du processus, mais également au fait que, le plus souvent, le charriage ne se produit qu'en période de crues, c'est-à-dire d'évènements peu fréquents durant lesquels les conditions de mesure sont délicates. » (Bravard & Petit, 1997)

¹⁷² Meade et al., 1990 cité par Maleval, 2002 p45.

¹⁷³ Parker et al., 1964 cité par UNESCO, 1986, p29.

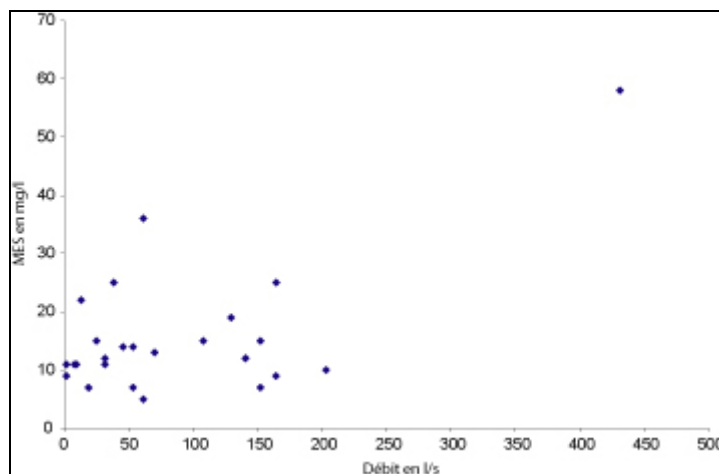


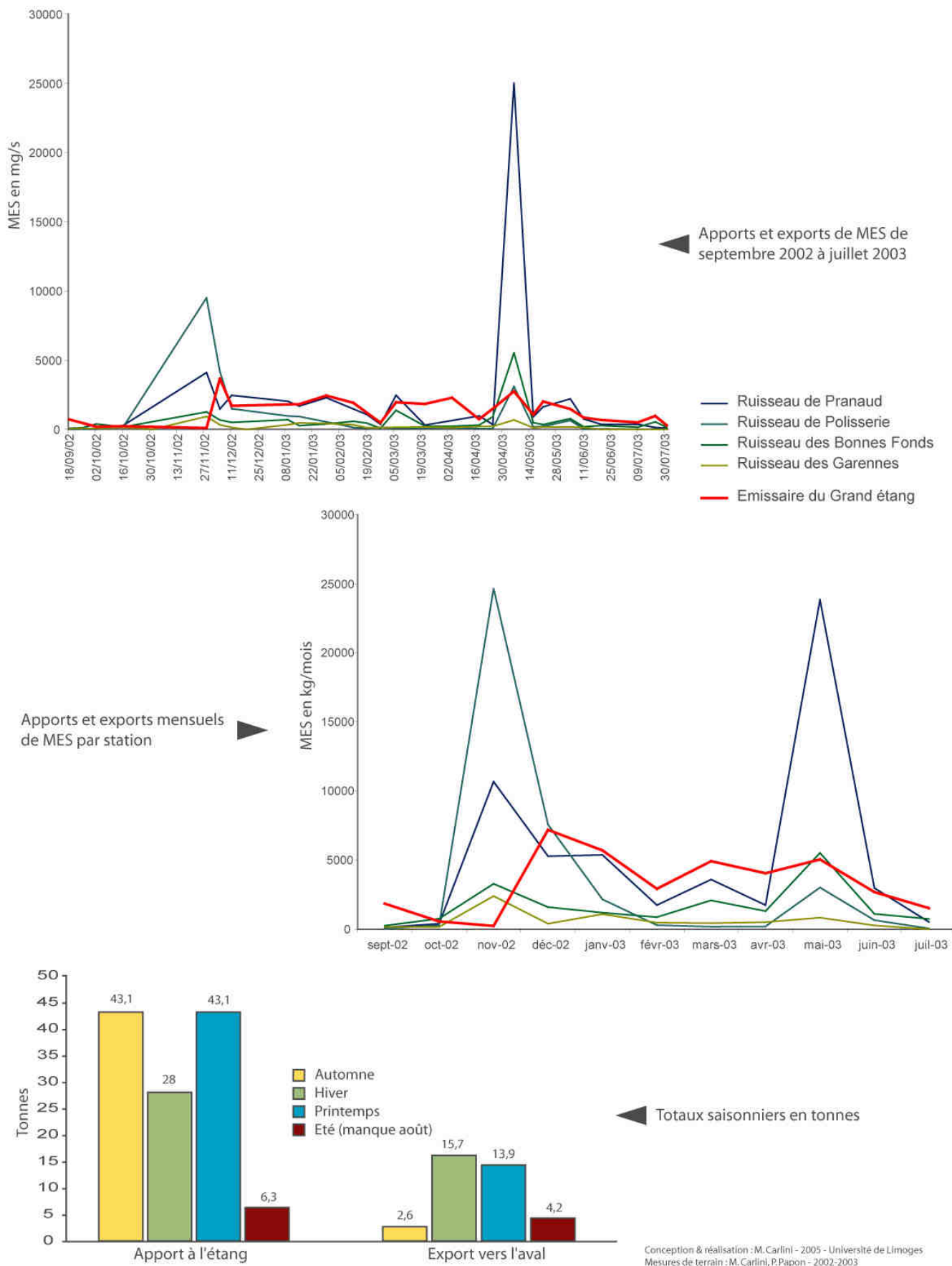
Figure 74 : graphique de corrélation entre débit et MES, station de Pranaud.

Evidemment, les apports réels de MES sont quant à eux dépendants de l'importance du débit et donc augmentent avec ce dernier.

Sur la période 2002-2003, on peut constater un comportement relativement semblable pour l'ensemble des affluents, même si les valeurs absolues de MES varient énormément. Deux pics majeurs dans les apports sont visibles pour tous les affluents le 27/11/02 et le 6/05/03 (Fig. 75). La faible emprise spatiale du bassin d'alimentation et la faible hétérogénéité de son occupation¹⁷⁴ se traduisent par une forte similarité du comportement des ruisseaux. Sur l'ensemble de l'année, le Ruisseau de Pranaud apporte à lui seul 46,5% des MES, suivi par le ruisseau de Polisserie avec 32,3% du total. Le ruisseau des Bonnes Fonds ne participe que pour 15,5% et celui des Garennes seulement 5,7 %. Le ruisseau de Pranaud étant l'affluent le plus long mais aussi le plus important de l'étang, et au regard du delta prenant place dans sa baie, ce résultat est peu surprenant. A l'échelle saisonnière, les deux pics à l'automne et au printemps imposent leur dynamique et ces deux saisons apportent les plus gros totaux sédimentaires : plus de 71% du volume de MES entrant annuellement.

¹⁷⁴ 62% de forêt, 36% de territoires agricoles – essentiellement de l'élevage et environ 0,5% urbanisé.
Source : photo-interprétation, cliché IGN 1999.

Figure 75 :
Les entrées et sorties de MES de l'étang de Cieux



Les exports de MES vers l'aval ne sont au contraire aucunement soumis au fonctionnement des affluents et donc du bassin d'alimentation. Tout d'abord, l'étang reçoit 120,5 tonnes de sédiments des affluents dans la période pendant qu'il en exporte 36,4 tonnes vers l'aval. L'étang de Cieux stocke donc 60% des MES qu'il reçoit par ses affluents ; en outre, son rythme de restitution est différent de son rythme d'acquisition des sédiments. Les plus importants exports de MES se produisent en hiver et au printemps alors qu'ils sont mineurs en automne (Fig. 75). Ce différentiel de fonctionnement entre les affluents de l'étang et son émissaire montre à quel point l'étang imprime son fonctionnement à l'aval. Cette inertie de fonctionnement est étroitement liée au comportement de la masse d'eau qui sera amplement discuté plus loin.

Nous nous garderons ici de prendre en compte les apports des affluents pour effectuer un bilan sédimentaire de l'étang de Cieux. Maleval (2002) a montré, sur le lac de Saint Pardoux (Haute-Vienne), l'importance prépondérante de la sédimentation autochtone qu'elle soit biogène ou provenant des berges. « (...) seuls 27,6% des apports sont à attribuer à la production allochtone, alors que la production autochtone atteint 72,4% (...) les prévisions de comblement qui ne se basent que sur les apports des affluents ne sont pas représentatives de la dynamique sédimentaire des lacs situés en plaine ou en moyenne montagne¹⁷⁵. »

Notre propos n'est pas ici le bilan sédimentaire de l'étang de Cieux, mais les épaisseurs de sédiments accumulées sur la plaine centrale, qui auront un impact direct sur les vidanges, nécessitent, elles, une quantification.

¹⁷⁵ Maleval, 2002, p219.

II.5.1.2. Les sédiments en place

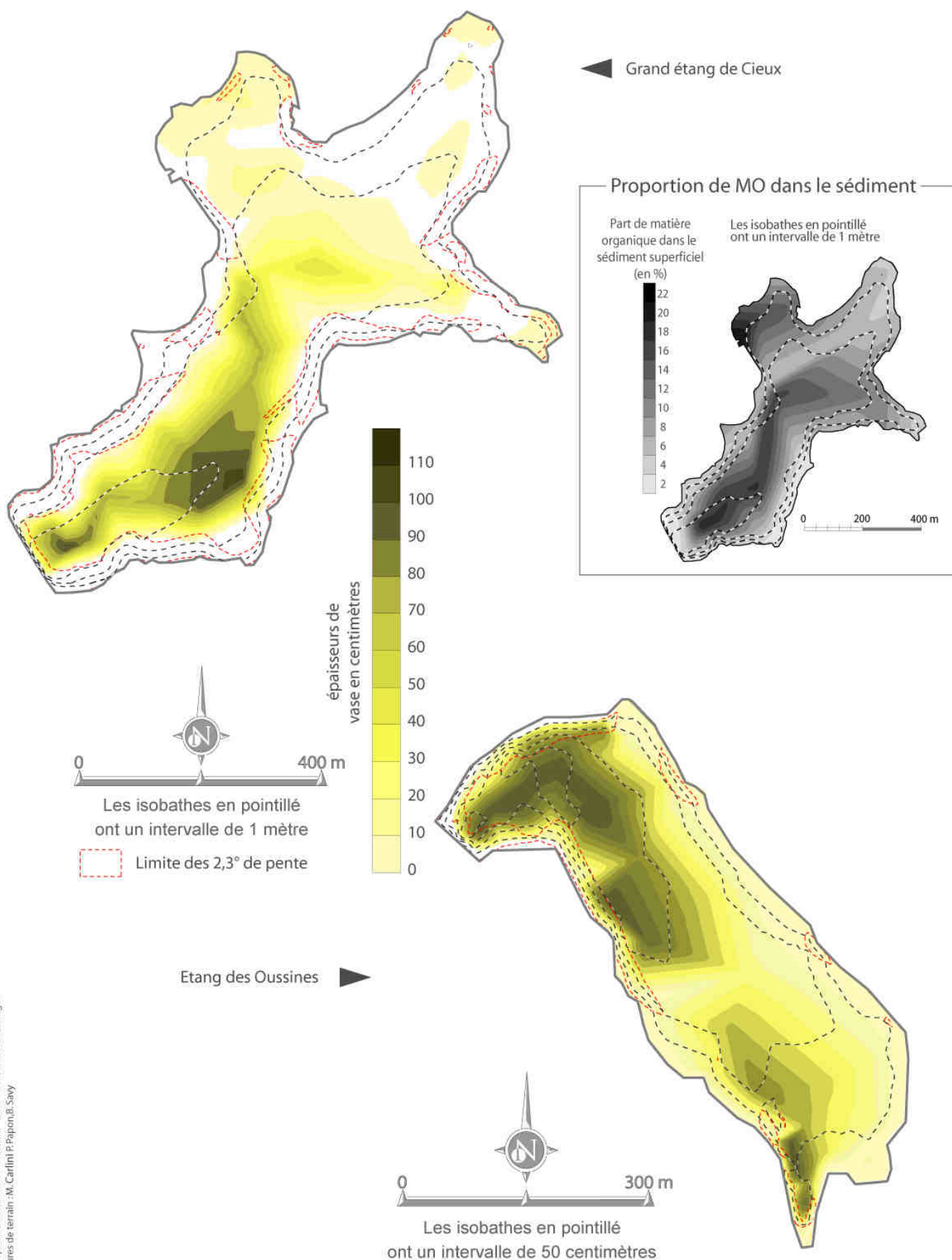
Les étangs retiennent donc une grande quantité de MES des affluents qui sédimentent sur le fond de la cuvette. En outre, il est opportun de rappeler que la seule étude de bilan sédimentaire prenant en compte la production autochtone se situe à seulement 20 km de l'étang de Cieux et qu'elle mettait en avant 37,3% de sédimentation autochtone biogène. Dans un milieu morfo-climatique similaire, il était intéressant d'essayer de quantifier les épaisseurs de sédiments stagnustres et si possible d'avoir une estimation de leur volume. Les étangs de Cieux et des Oussines ont été choisis pour cette quantification sédimentaire¹⁷⁶. Ces deux plans d'eau représentent des étangs-lacs de dimensions et d'ancienneté significatives ; leur périodicité de vidange est faible. Il présentent néanmoins une différence notable visible lors de l'étude morphologique : l'étang des Oussines est très largement dominé par son unique affluent, la Vézère, ce qui n'est pas le cas de l'étang de Cieux, ses quatre affluents étant d'importance moindre.

Le premier constat à l'étude de la figure 76 est l'importance de l'épaisseur de sédiments dans les deux étangs choisis en exemple. Cette dernière atteint 110 centimètres à Cieux et 115 à l'étang des Oussines. La partie amont de l'étang de Cieux et notamment les trois baies sont très peu envasées à l'exception des zones deltaïques ; en effet la sédimentation plus grossière est dominante et l'instrumentation ne peut quantifier ce type d'accumulation. On note tout de même 20 centimètres à la sortie de la baie de Pranaud, ainsi qu'au niveau du front deltaïque abandonné par le cours d'eau. Dans l'étang des Oussines, la situation est très différente : les eaux de la Vézère, fortes d'un débit important et froides en hiver¹⁷⁷, ont creusé un profond ravin sous stagnustre qui s'est remblayé au cours du temps.

¹⁷⁶ 65 mesures d'épaisseur dans l'étang de Cieux et 45 dans l'étang des Oussines ont été réalisées.

¹⁷⁷ Plus froides que l'étang lui-même, ce qui engendre un courant de densité, cet aspect sera abordé dans la troisième partie.

Figure 76 :
Cartes des épaisseurs de sédiments



Les épaisseurs maximales de sédiments se trouvent au niveau de ce ravin où elles atteignent 115 centimètres. Les épaisseurs s'amenuisent vers l'aval pour augmenter ensuite au niveau de la plaine centrale où elles atteignent 110 centimètres. L'importance des apports de l'affluent et la rareté des vidanges se traduisent par une couverture très importante de l'ensemble de la cuvette par des épaisseurs de sédiments souvent supérieures à 30 centimètres.

Le cas de l'étang de Cieux est différent : l'aval est lui aussi remblayé par les accumulations fines, avec deux zones où les épaisseurs sont les plus fortes. Au pied de la digue, mais aussi plus en amont, au nord est, les sédiments atteignent 110 centimètres ; la carte permet d'entrevoir le tracé de l'ancien thalweg comblé par la vase. Les talus sont particulièrement marqués par leur absence totale d'accumulation fine ce qui n'était pas le cas pour les Oussines. Pour Håkanson & Jansson, les dépôts permanents de particules fines sont rares au-delà de 2,3 à 2,9 degrés de pente¹⁷⁸. Il est à noter que la limite des 2,3° de pente est particulièrement efficiente pour l'étang de Cieux ; elle l'est beaucoup moins pour celui des Oussines néanmoins il est possible d'imputer cette erreur à un manque de précision engendré par l'impossibilité de tracer précisément la limite calculée alors par interpolation. Dans la réalité la limite entre dépôt de vase et absence de dépôt peut être très nette¹⁷⁹ : cela a permis de la tracer au G.P.S. lors de la vidange de Cieux, ce qui explique la précision du contour. Des accumulations ont néanmoins déjà été constatées dans des lacs de barrage pour les pentes supérieures à 5% (Maleval, 2002). En outre, l'hydrodynamique stagnante joue assurément un rôle et l'absence quasi-totale de sédimentation ne peut être imputée au seul facteur de la pente. L'étude de la teneur en matière organique montre des taux élevés, surtout aux endroits où la sédimentation est forte (Fig. 76) :

¹⁷⁸ « fine deposits rarely stay permanently on slopes inclining more than 4%-5% » Hakanson & Jansson, 1983, p194 (4% = 2,3° ; 5% = 2,9°)

¹⁷⁹ Cet aspect était particulièrement visible lors de la vidange de Cieux cf photo 38, p xx.

la zone de la plaine centrale cumule très nettement des valeurs d'épaisseur importante avec des taux de Matières Organiques proches de 20%¹⁸⁰. Les échantillons présentaient en outre une très forte teneur en eau.

L'utilisation des modèles numériques de terrain permet de cuber précisément les volumes de sédiment contenus dans les deux étangs : 85 000 mètres cubes pour l'étang de Cieux et 55 000 mètres cubes pour celui des Oussines. Ces valeurs absolues représentent 14,8% du volume total pour l'étang de Cieux et 35% pour celui des Oussines : l'absence de vidange des Oussines et l'impact de la Vézère sont ici particulièrement flagrants.

II.5.1.3. Un essai de prospective

Le protocole mis en place pour l'étude du plan d'eau de recherche expérimental de Cieux a permis de quantifier les flux solides entrants et sortants du plan d'eau durant un an, ainsi que les épaisseurs de sédiments accumulées dans toute la vie du plan d'eau. Etudier le comblement d'un étang par les sédiments et s'essayer à la prospective est un exercice périlleux. L'étude d'un étang-lac comme Cieux ne peut néanmoins s'envisager comme celle d'un lac naturel dans lequel les différentes couches profondes de sédiments, minéralisées et indurées, sont datables et interprétables grâce aux carottages. Des carottes effectuées lors de la vidange de 2002 ont permis de mettre en évidence que le fond de l'étang était constitué d'une couche de gravier au dessous de laquelle 40 à 70 centimètres d'argile étaient présents avant d'atteindre l'arène ou la roche en place (photo 39).

¹⁸⁰ Ces constatations rejoignent celles de Maleval (2002 p193-197)



Photo 39 : Une des carottes prélevées sur le talus ouest de l'étang de Cieux (Cliché Carlini)

La présence de cette couche d'argile ne semble pas être un acte de génie piscicole¹⁸¹ du fait de l'ancienneté de l'étang ainsi que de l'épaisseur de la couche. Le gravier présent au-dessus de la couche provient probablement de la redistribution des sédiments les plus grossiers issus de l'érosion des berges et des alluvions ainsi que des restes du sol précédant la mise en eau. La grande étanchéité conférée par cette couche épaisse d'argile sera évoquée de nouveau lorsque nous aborderons le bilan hydrologique de l'étang.

La problématique limousine du stockage sédimentaire dans les étangs, la grande ancienneté de certains d'entre eux couplée à la faible périodicité des vidanges posent néanmoins le problème de la vitesse de comblement et de l'espérance de vie des plans d'eau.

Durant la période 2002-2003 de surveillance de l'étang de Cieux, le cumul des MES stockées dans l'étang est de 84 tonnes si on déduit la vidange. Ce volume correspond à 1,18 mm rapporté à la superficie de l'étang¹⁸².

En gardant une périodicité de vidange décennale (le volume exporté lors de la vidange est calculé plus loin) et en prenant en compte uniquement les apports allochtones, les 572427 m³ de l'étang mettraient près de 1500 ans à se combler complètement. Or il est probable que ce chiffre soit très largement surestimé au

¹⁸¹ Sur des terrains poreux, il est possible d'étanchéifier le fond de la cuvette ; à l'heure actuelle on recourt à des procédés coûteux comme l'utilisation de géomembranes ou d'une couche de bentonite. (Schlumberger, 1998, p24 ; Arrignon, 1998, p407)

¹⁸² Si on retient une sédimentation correspondant à de la vase, soit une densité de 0,2.

regard des proportions entre sédimentation allochtone et autochtone que nous avons évoqués précédemment. En effet, en se basant sur les travaux de Maleval, on peut estimer que la sédimentation autochtone augmenterait le total des apports d'au moins un tiers, ce qui abaisserait le temps de comblement à environ 1120 ans, même si cette sédimentation majoritairement constituée de matière organique est relativement rapidement biodégradable..

II.5.2. Les vidanges, suivi et prévention

« Les enjeux de la vidange dépassent le simple examen des flux de matière induits. Créée par l'homme, l'étang disparaît en l'absence d'entretien par l'accumulation de matières. La vidange de l'étang participe à cet entretien et maintient de façon durable l'activité, les habitats, la faune et la flore qu'il recèle. »¹⁸³

Nous avons pu constater l'évolution morphologique « libre » d'un certain nombre de plans d'eau pourtant anthropiques, néanmoins les vocations de ces plans d'eau obligent à combattre le comblement naturel transformant tout plan d'eau en prairie humide. Ce comblement s'opère à une échelle de temps réduite pour les étangs, selon les apports de matières du bassin, la production autochtone et les exports sédimentaires. Une vidange peut néanmoins avoir plusieurs objets comme la pêche du plan d'eau, l'inspection des infrastructures ou la réalisation de travaux.

Le relargage sédimentaire occasionné lors des vidanges est une source potentielle de pollution pour les cours d'eau en aval, surtout si ceux-ci sont de première catégorie piscicole¹⁸⁴.

¹⁸³ Masson et al., 2005.

¹⁸⁴ L'arrêté du 27.08.1999 précisant le décret 96-102 du 02.02.1996 interdit les vidanges de plan d'eau du 1 décembre au 31 mars dans le cas où l'étang est en relation directe ou indirecte avec un cours d'eau de première catégorie piscicole.

II.5.2.1. La pratique des vidanges en Limousin

II.5.2.1.1. Régions d'étangs et pratiques liées aux étangs piscicoles

De nombreux étangs français sont consacrés à la pisciculture : environ 70 000 hectares consacrés à l'élevage de poisson selon Schlumberger et Bouretz (2002), 80 000 hectares selon Bachasson (1996). La concentration de ces plans d'eau dans des zones réduites a amené à la qualification de « pays d'étangs »¹⁸⁵ dont les plus connues sont la Dombes, la Brenne, la Sologne ou la plaine de la Woèvre (tableau 3).

Région géographique	Superficie de la région	Nombre d'étangs	Surface en eau	Densité de plans d'eau au km ²	Proportion de la surface en eau
Sologne	5 000 km ²	3000	11 500 ha	0,60	2,3 %
Brenne	800 km ²	2237	8 288 ha	2,80	10,4 %
Dombes	1 000 km ²	1100	12 000 ha	1,10	12 %
Woèvre	1 500 km ²	100	12 000 ha	0,06	8 %
<i>Limousin</i>	<i>16 900 km²</i>	<i>20 500/22 000</i>	<i>16 609 ha¹⁸⁶</i>	<i>1,25</i>	<i>0,9 %¹⁸⁶</i>

Tableau 3 : Les grandes régions d'étangs piscicoles françaises

La pratique de la pisciculture engendre un mode de gestion des plans d'eau bien particulier afin d'obtenir des résultats corrects. Au sein de ces régions, la pisciculture d'étang est une composante essentielle de l'économie rurale et les méthodes la régissant sont parfois millénaires. L'imbrication de nombreux étangs dans ces zones a entraîné la mise en place de pratiques spécifiques concernant les phases d'exploitations et les vidanges.

Dans la Dombes les étangs sont peu profonds, environ 0,5 à 1 mètre de profondeur moyenne, et sont placés en chapelet. Le système de production dombiste s'est mis en

¹⁸⁵ Trotignon, 2000, p7.

¹⁸⁶ DIREN Limousin, 2004. Ce recensement donne 13572 plans d'eau pour la région.

place au Moyen-âge, plus précisément au XIIIème siècle¹⁸⁷. Cette région est actuellement en procédure de classement Natura 2000 car les pratiques piscicoles ont favorisé l'extension de milieux riches en plantes rares¹⁸⁸ ; la Dombes compte 12 000 hectares de plans d'eau (Broyer, 1998). « Chaque étang est dans la dépendance de ceux d'amont et un droit coutumier règlemente les remplissages et les vidanges. » (Lebeau, 1976, p223) L'originalité de cette région vient de l'alternance entre l'évolage et l'assec correspondant respectivement à la mise en eau et la mise en culture. Traditionnellement, on comptait deux ans d'évolage pour un an d'assec. (Lebeau, 1976) La périodicité des vidanges est donc précisément définie. Les méthodes utilisées sont le fruit des traditions d'exploitation de la région et s'appuient sur des pratiques multiséculaires¹⁸⁹.

Les étangs de la Brenne existent pour certains d'entre eux depuis le moyen Age central et lors de l'introduction de la carpe au XIIIème siècle une réelle économie piscicole se mit en place¹⁹⁰. Dans cette région, la pêche se pratique au filet à l'intérieur de l'étang lorsqu'il est presque vide.

La « Sologne des étangs » regroupe 10% de la surface des étangs en France au sein d'une zone de 30 000 hectares comprise dans la région naturelle de la Sologne définie en 1941 couvrant 500 000 hectares (Beignet, 1998 ; Bernard, 2004). La pratique de l'assec existe aussi dans cette région, notamment pour la culture du seigle (Bernard, 2004). Avec la crise actuelle de l'agriculture, la pisciculture est devenue moins

¹⁸⁷ « Le premier témoignage indiscutable de la présence d'étang en Dombes remonte au XIIIème siècle : en 1230, la charte de fondation de la Chartreuse de Poleteins fait état d'un étang (...). (Berard et al., 2004)

¹⁸⁸ Source DIREN Rhône-Alpes.

¹⁸⁹ « Faire couler un étang consiste à ouvrir le *thou* (la bonde) assez longtemps à l'avance pour que l'étang soit en pêche à la date fixée [...] L'opération est toute entière tributaire du temps et peut varier d'une fois à l'autre [...] La première phase consiste à ouvrir faiblement le *thou* [...] puis il en modifie l'ouverture au fil des jours, en procédant par touches successives [...] Le réglage quotidien du débit et la phase finale de la mise en pêche demandent une grande expérience et une très grande connaissance du milieu. » (Bérard, 1982)

¹⁹⁰ R. Benarrous, 2003 ; R. Benarrous & M.-C. Marinval, 2003.

rentable que la chasse au gibier d'eau, très prégnante dans cette région (Beignet, 1998).

Chaque région d'étang connaît des pratiques de gestions et de vidange liés à son histoire et à l'intégration de la pisciculture dans l'économie rurale. Dombes, Brenne et Sologne présentent des similitudes fortes dans les pratiques piscicoles et par la pratique de l'assec. Il s'agit en outre de régions géographiques restreintes dans lesquelles la surface en eau est très importante. Pour toutes ces raisons il convient maintenant de se pencher sur le Limousin qui apparaît comme un cas très particulier dans le fonctionnement et la gestion de ses étangs.

II.5.2.1.2. Le cas limousin

La totalité des étangs limousins est d'origine anthropique, et la mise en eau de certains d'entre eux remonte au Moyen-âge. Ces étangs médiévaux étaient tournés vers la production de poissons notamment pour assurer le jeûne carné de fin de semaine et le carême¹⁹¹. De ce fait, nombre d'entre eux furent édifiés ou gérés par des ordres monastiques comme les Grandmontains, les Carmes ou les Augustins¹⁹².

L'étang limousin actuel est en majorité privé et destiné au loisir individuel, ce qui engendre une gestion bien différente des autres régions d'étang, notamment par rapport à la pratique des vidanges¹⁹³. La pisciculture occupant une place beaucoup plus réduite, la vidange est plus perçue comme une contrainte qu'une nécessité. Cette pratique est pourtant indispensable, quel que soit l'usage de l'étang. Les cours d'eau de la plupart des autres régions d'étangs sont de deuxième catégorie piscicole,

¹⁹¹ Balabanian & Bouet, 1989 ; Touchart & Graffouillère, 2004.

¹⁹² Hivernaud, 1976 ; Graffouillère 2002a.

¹⁹³ On peut rapprocher les pratiques limousines de celles de la Dordogne voisine. De fortes ressemblances sont notables : « la Dordogne n'a pas de tradition piscicole forte. La vidange de certains grands étangs constitue toujours une fête locale mais de nombreux petits étangs ont été peu à peu abandonnés. (...) La majorité (des propriétaires) gère directement les étangs. (Schlumberger et al., 1998)

ce qui pose moins de problèmes qu'en Limousin où la première catégorie domine et où près de 1200 kilomètres de cours d'eau sont classés pour la protection des poissons migrateurs¹⁹⁴. Les vidanges en Limousin se déroulent suivant un rythme souvent irrégulier, avec une périodicité fréquemment voisine de cinq ans. Les quatre dernières vidanges de l'étang de Cieux ont eu lieu en 1992, 1995, 2002 et 2005. L'étang du Theil fut vidangé puis mis en assec en 2004 après 30 ans d'exploitation. L'étang des Garennes est vidangé tous les dix ans, la dernière datant de 2001. Les dernières vidanges de la Pouge et des Landes remontent respectivement à 2001 et 2002.

Le système d'évacuation de l'eau a un impact important sur le déroulement de la vidange et sur les quantités de MES émises.

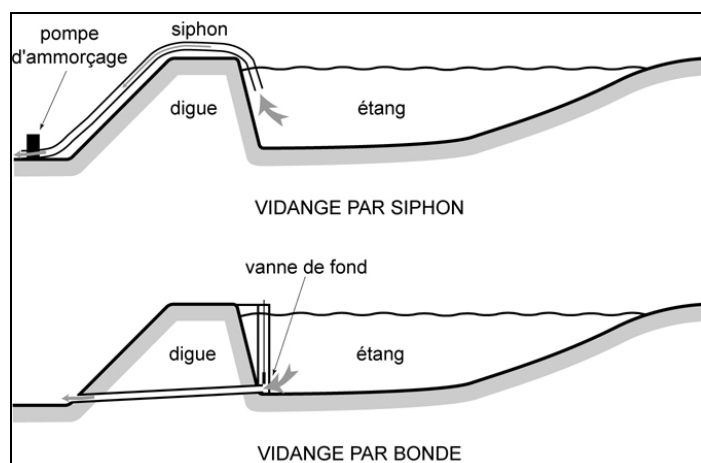


Figure 77 : systèmes de vidange (d'après Touchart & Graffouillère, 2004)

Les plus petits plans d'eau peuvent être vidangés au moyen d'un siphon, ce qui évite la mobilisation du sédiment (fig. 77). Mais la plupart des étangs limousins sont équipés d'une évacuation située au fond de l'étang, ou bonde (fig. 77). Cette évacuation peut être fermée par une vanne simple, ou dépendre d'un moine¹⁹⁵. Le

¹⁹⁴ Source DIREN Limousin.

¹⁹⁵ Le moine est un aménagement mis au point au Moyen Âge par des ecclésiastiques. Le principe consiste à pouvoir puiser l'eau à différentes profondeurs par l'ajout ou le retrait de planches et de

choix dans la date de la vidange dépend d'une part des contraintes règlementaires, d'autre part d'une volonté de la réaliser dans un contexte climatique favorable (les mois les plus pluvieux de l'année permettent une atténuation des impacts en aval et un remplissage plus rapide de l'étang).

Il est en outre nécessaire d'aménager la pêcherie située au pied de la digue, au sortir de la bonde. Un système de grille a pour rôle de retenir les poissons pour procéder à la « pêche » de l'étang et éviter l'introduction d'espèces en aval¹⁹⁶.

Le respect d'un débit régulier en aval lors de la vidange est très rare en Limousin. Cet aspect n'est pas règlementé, mais l'action de chasse brutale en fin de vidange se traduit souvent par une évacuation importante de vase, préjudiciable en aval.

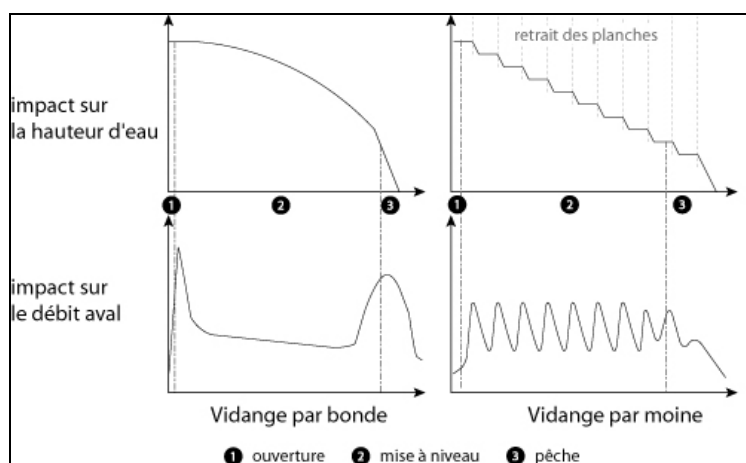


Figure 78 : impact du système de vidange sur la hauteur d'eau dans l'étang et sur le débit aval (d'après Touchart & Graffouillère, 2004)

La figure 78 illustre les répercussions d'une bonde sur le débit aval : lors de l'ouverture et de la pêche, deux pics apparaissent. Le contrôle de la baisse par un moine¹⁹⁷ n'engendre pas ce problème, mais le débit n'en est pas régulé pour autant.

grilles. En Limousin les moines sont actuellement conçus en béton. Ce type d'aménagement évite un relargage sédimentaire trop important mais n'équipe qu'environ 10% des plans d'eau de notre région. (Touchart & Graffouillère, 2004)

¹⁹⁶ L'écartement des grilles est à ce sujet un problème important ; ces dernières ne sont pas toujours suffisamment serrées pour retenir les alevins. (Mathelin, 2003, p14)

¹⁹⁷ Le principe de fonctionnement du moine est abordé en troisième partie. Cf figure 100.

Le suivi des vidanges permet de cerner le comportement sédimentaire durant cette période de la vie de l'étang, à la fois en aval, mais aussi à l'intérieur du plan d'eau.

II.5.2.2. Le relargage sédimentaire, dans l'étang et en aval

Selon notre classification, l'étang de Cieux est représentatif des étangs-lacs de plaine ou de confluence. Ce type de plan d'eau ne représente assurément pas la majorité des étangs limousins qui correspond aux petits étangs de vallon. Néanmoins cette étude privilégiant les étangs-lacs, le choix est fait de présenter la vidange de Cieux en 2002¹⁹⁸. Plusieurs arguments viennent appuyer ce choix. Tout d'abord la durée de la vidange de trois semaines (contre deux à six jours pour la plupart des petits étangs de vallon) permet d'envisager chacune des phases et d'étudier son impact. La position de l'étang sur le réseau hydrographique, 11 km avant la confluence avec la Glane sans aucun plan d'eau situé en aval, facilite la compréhension de l'impact de la vidange sur l'émissaire. Enfin, l'ancienneté de la pêche (photo 40) et de la bonde ainsi que la méthode employée sont représentatives des procédures traditionnelles de vidange des étangs limousins anciens.

II.5.2.2.1. Théorie et mise en place du protocole de suivi

La courbe illustrant l'impact aval d'une bonde sur le débit correspond aussi au cycle de relargage sédimentaire durant la vidange. L'évacuation des charges solides peut effectivement être scindée en trois parties. « Pendant les premières heures, les teneurs en MES peuvent dépasser 500 mg/l et proviennent de la mobilisation des dépôts localisés en amont immédiat de l'ouvrage de vidange ou de l'érosion du tronçon placé en aval. Au cours de la deuxième étape qui représente l'essentiel de la

¹⁹⁸ Les valeurs seront mises en perspective avec celles de vidanges d'étangs plus petits, étudiés par Mathelin en 2003.

Figure 79 :

Débit et MES lors de la vidange de l'étang de Cieux

(Novembre 2002)

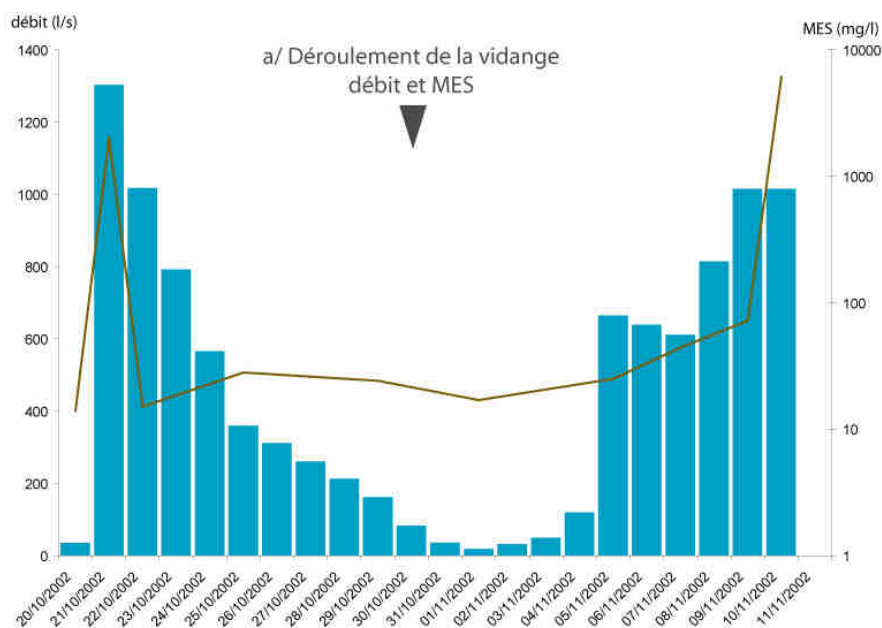


Photo 40 : Ouverture de la bonde



Photo 41 : Pêcherie lors de la vidange

b/ Suivi de l'onde provoquée par l'ouverture de l'étang

Un suivi régulier durant la vidange dans les heures suivant l'ouverture de la bonde ont permis de mettre en évidence le passage de l'onde jusqu'à la Glane, 10 kilomètres en aval.

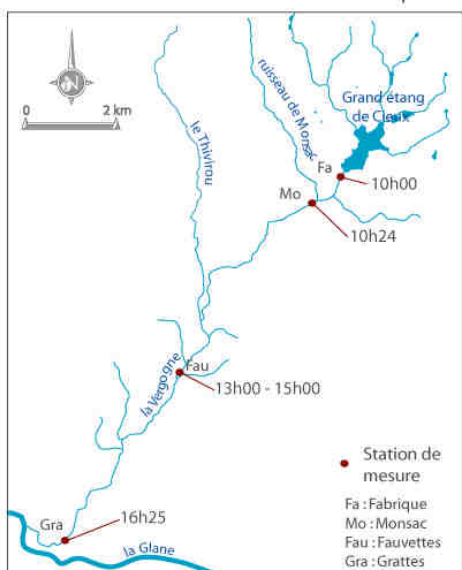
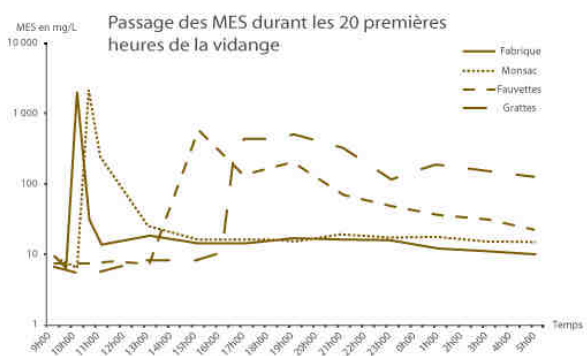
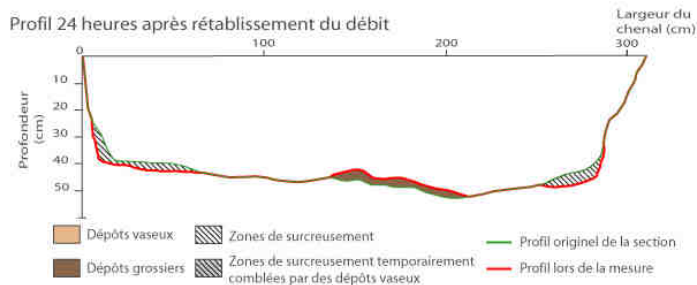
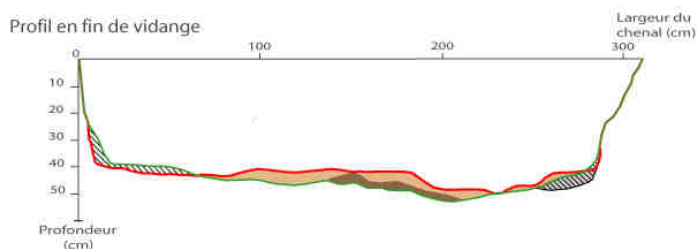


Photo 42-43 : la station des "grattes" avant et durant le passage de l'onde provoquée par la vidange

c/ Modification du chenal à la fabrique durant la vidange



Conception et réalisation : M. Carlini
Mesures : E. Mathelin, M. Carlini, B. Savy, P. Papon - 2002
Clichés M. Carlini - 2002

vidange, les teneurs en MES baissent et varient de 30 à 150 mg/l. Pendant la pêche [...] la mobilité des poissons dans une faible lame d'eau et les changements d'ouverture de vanne contribuent à mobiliser des dépôts et exporter des MES dont la teneur peut dépasser 1000 à 4000 mg/l. »¹⁹⁹

Pour étudier la vidange de l'étang de Cieux de novembre 2002, quatre stations de mesure furent déterminées en aval de l'étang de Cieux. La fabrique située en aval direct de la pêcherie ; la station de Monsac placée 975 mètres en aval de l'étang, après la confluence avec le ruisseau éponyme ; la station des Fauvettes choisie 5,7 kilomètres en aval de l'étang, enfin, la station des Grattes située un kilomètre seulement avant la confluence de la Vergogne avec la Glane, soit 10 kilomètres en aval de l'étang (fig. 79b). Deux protocoles ont été employés : tout d'abord, des prélèvements ont été effectués à l'ouverture toutes les 15 minutes durant la première heure puis toutes les deux heures durant les 17 heures qui suivirent et ce pour les quatre stations. Par la suite les prélèvements ont été réalisés tous les trois jours jusqu'à la pêche.

II.5.2.2.2. L'export de MES lors de la vidange de l'étang de Cieux

La figure du déroulement de la vidange du grand étang de Cieux en 2002 illustre parfaitement ce cycle, rythmé par l'ouverture, la vidange puis la pêche. Les deux pics de débit et de concentration en MES se retrouvent au début et en fin de vidange (fig. 79a). Le fait le plus marquant est l'importance des valeurs de MES excédant largement les chiffres cités dans les travaux de Banas *et al.* Lors de l'ouverture de la pelle, les taux atteignent 2000 mg/l pour un débit probablement supérieur à 1300 l/s. La configuration de la pêcherie et l'ouverture de la pelle ont empêché toute mesure du débit au moulinet lors de l'ouverture ou de la pêche (photos

¹⁹⁹ Banas et al., 2002. Ce schéma est construit à partir d'étangs piscicoles extensifs du bassin de la Seille.

40 & 41). En outre, l'importance de la vitesse du courant exclut un calcul fiable à partir des courbes de tarage sur la station de mesure de la fabrique ; les valeurs de débit pour ces deux évènements sont celles de la station de Monsac. Très rapidement, les taux de MES redescendent pour se placer à des valeurs proches de celles évoquées plus haut : entre 13 et 44 mg/l à la Fabrique, entre 15 et 38 à Monsac, entre 10 et 48 mg/l aux Fauvettes, enfin entre 10 et 31 mg/l aux Grattes. La période de la pêche est celle qui va engendrer les plus fort taux de MES dans l'émissaire. En Limousin, la pêche ne se pratique pas au filet, du fait de la profondeur des étangs et des épaisseurs de vase. Une pêcherie²⁰⁰ aménagée en aval de la bonde (Fig. 80)

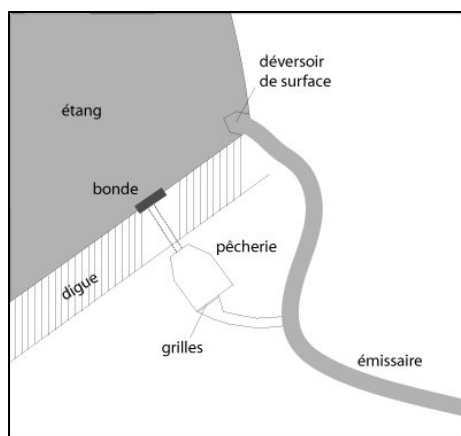


Figure 80 : situation de la pêcherie de l'étang de Cieux

permet de recueillir le poisson. Dans le cas d'étangs anciens comme celui de Cieux, la pêcherie est un ouvrage maçonné ancien comme le montre la photo 40.

Le débit est réduit quelques jours avant la pêche afin de préserver le poisson, puis, le jour fatidique, la bonde est rouverte au maximum, afin d'entraîner les poissons en aval par le conduit. Cette pratique engendre des augmentations très importantes dans les taux de MES, avec 6100 mg/l par exemple à Cieux. Cette valeur représente le problème majeur des vidanges en Limousin : des mesures durant la

²⁰⁰ Bassin dans lequel aboutit le busage de vidange de l'étang. Cet aménagement permet de capturer aisément le poisson. (Arrignon, 1998, p416)

pêche d'autres étangs, de superficie et avec des systèmes d'évacuation différents corroborent l'existence de très forts taux en fin de vidange²⁰¹.

Le calcul des volumes de MES exportés durant la totalité de la vidange permet de comprendre le problème de la pêche. La vidange de l'étang de Cieux a entraîné le l'export de 76,8 tonnes de MES au total, ce qui représente 2,15 t/ha²⁰². Cette valeur est proche de celles d'étangs extensifs. Dans le détail, le phénomène de la pêche qui ne représente que 0,6 % du temps total de la vidange a entraîné l'export de 48,65 t de MES soit plus de 63 % du total. Par rapport à ce chiffre la période intermédiaire, la plus longue avec 20 jours, ne représente que 28 % des MES exportées soit 21,4 t. Enfin, le phénomène de l'ouverture de la bonde et l'augmentation du taux de MES engendré lors de 24 premières heures reste minoritaire puisqu'il ne représente que 6,7 t de MES, soit une moyenne de 60 mg/l durant cette période.

Ces taux sont à mettre en relation avec la faible périodicité des vidanges en Limousin qui se traduit par des épaisseurs de sédiments importantes comme nous l'avons vu pour l'étang de Cieux ou des Oussines.

II.5.2.2.3. Impacts immédiats et impacts durables d'une vidange sur l'émissaire

Outre le déversement de MES et ses impacts directs sur la vie aquatique, le protocole adopté à Cieux permet de cerner deux phénomènes concernant l'aval à des échelles différentes : la progression de l'onde provoquée par l'ouverture de la bonde et la modification du chenal.

Le premier constat est donc l'observation d'une onde repérable aux différentes stations de mesure. L'impact potentiel de ce phénomène est fort puisque, 6 heures et

²⁰¹ Etang d'Agier en Corrèze, 0,2 ha vidange en novembre 2002, entre 1033 et 35360 mg/l ; Etang de Vicq en Haute-Vienne, 2 ha vidange en novembre 2002, 14000 mg/l. (Mathelin, 2003)

²⁰² Cette valeur est dans la fourchette donnée par Masson et al. (2005) pour les étangs du bassin versant de Lindre et de la Seille (entre 0,4 et 3,9 t de MES/ha) ; elle est en outre très proche de celle de l'étang de Lindre en 2000 : 2,6 t de MES/ha (Banas, 2001).

30 minutes après l'ouverture de la bonde, cette onde passait à la station Grattes située 10 km en aval (photo 42-43) avec un maximum de 480 mg/l de MES atteint à 19 heures (Fig. 79b). La baisse de concentration du pic de MES au sein de cette onde (de 2080 mg/l à 480 mg/l) est explicable par les pertes de charges dues à la rugosité du chenal²⁰³ ainsi que par la dilution occasionnée par les affluents²⁰⁴. Une fois cette onde passée, les taux de MES diminuent graduellement pour atteindre des valeurs proches de la période intermédiaire de vidange.

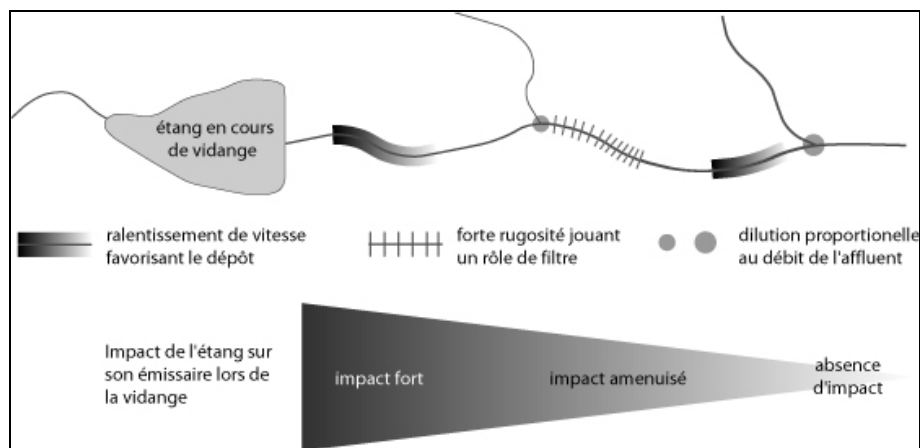


Figure 81 : Modélisation de l'impact de la vidange en aval (d'après Touchart et Graffouillère, 2004)

La distance d'impact en aval est fonction de l'importance du débit imprimé par la vidange par rapport au débit habituel de l'émissaire ; en outre, les facteurs de pente, de rugosité du chenal ainsi que les affluents conditionnent cette distance d'impact (Fig. 81)

L'augmentation très brutale du débit lors de l'ouverture (de 32,5 à 1300 l/s en quelques dizaines de minutes) génère une augmentation importante de la compétence de l'émissaire susceptible d'entraîner un affouillement des berges. Ce point nous amène au deuxième impact, la modification de la morphologie du chenal.

²⁰³ Bravard, 2000, p.

²⁰⁴ Mathelin, 2003, p119-123.

Un transect fut mesuré en aval de la Fabrique à trois moments : avant la vidange, à la fin de celle-ci, enfin 24 heures après le rétablissement du débit par le déversoir de l'étang. L'étude de la modification du chenal est riche d'enseignements (Fig. 79c). La vidange a effectivement surcreusé la base des berges et une partie du fond du lit contiguë à ces berges. Les deux tiers de la largeur du lit, soit environ 2 mètres, au centre, ont été recouverts par des dépôts vaseux sous lesquels du matériel grossier a lui aussi été amené, mais en plus petite quantité. Un jour après le rétablissement complet du débit, on constate la disparition quasi-totale des dépôts vaseux ; le chenal a été modifié durablement, érodé sur les extérieurs et rehaussé au centre par les dépôts grossiers restés en place. Si la morphologie a changé, la section mouillée est restée similaire.

II.5.2.3. De la botte de paille au planning de vidange

Différents aménagements permettent avec plus ou moins de réussite de limiter l'impact sédimentaire induit par la vidange. Il peut s'agir d'infrastructures permanentes comme le moine, qui autorise une descente peu brutale du niveau de l'eau et un soutirage de l'eau depuis la surface, ou la dérivation qui permet une dilution dès l'aval de l'étang. La pêcherie située derrière la bonde et équipée de grilles à pour vocation de retenir le poisson. Ces grilles permettent néanmoins de freiner légèrement la vitesse de l'eau (photo 41) et favorisent ainsi un premier dépôt de sédiments.

La plupart du temps, les systèmes mis en place sont des dispositifs filtrants temporaires, comme des branchages ou des bottes de paille. Ces méthodes sont en général peu efficaces et peuvent être emportées par l'importance du courant.

Le recours à un bassin de décantation semble, avec certaines précautions, être une solution appropriée pour éviter le relargage sédimentaire en aval.

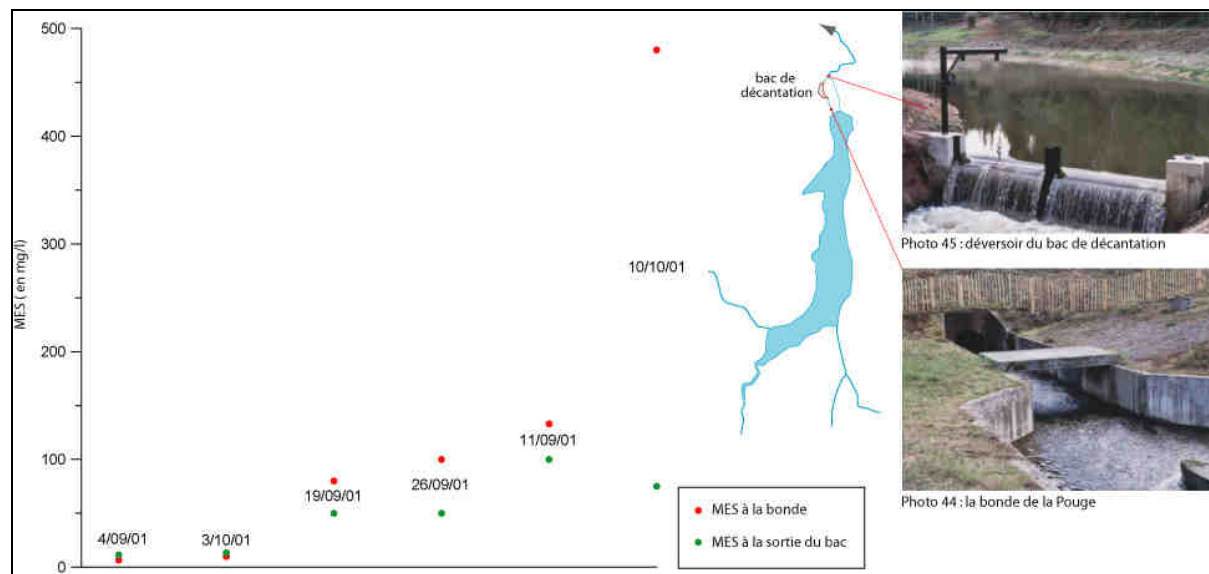


Figure 82 : Impact du bac de décantation lors de la vidange de l'étang de la Pougé

Lors de la vidange de l'étang de la Pougé, du 3 septembre au 11 octobre 2001, un bac de décantation de 0,23 ha fut creusé en aval de la bonde (photos 44 & 45). Ce bassin est équipé en aval d'un déversoir. L'étude des taux de MES durant la vidange (Fig. 82) permet de se rendre compte de l'effet du bac : les valeurs n'ont jamais dépassé 100 mg/l. La réduction de la quantité de MES n'est pas proportionnelle aux MES à la bonde mais on peut constater qu'au-delà de 50 mg/l le bac joue son rôle. Pour des valeurs inférieures, par contre, les taux de MES sont supérieures à la sortie du bac : cette constatation pose le problème du devenir du bac après la vidange. En effet, lorsque l'eau venant de l'étang est faible en MES, elle remet en suspension les matériaux accumulés dans le bac et les exporte en aval : le curage est donc une nécessité.

Nous avons vu que le relargage sédimentaire s'opère préférentiellement lors de la pêche et dans une moindre mesure lors de l'ouverture du plan d'eau (pour l'étang de Cieux ces deux événements représentent 72 % de l'émission totale de

MES). S'il peut sembler difficile de modifier durablement les valeurs sans modifier le principe de la vanne de fond, des pistes de solutions peuvent être apportées au regard de la connaissance morphologique de la cuvette. La connaissance de la morphologie et donc du volume d'eau couplée avec la surveillance des débits donne la possibilité de mettre en place un réel planning de contrôle de la vidange²⁰⁵. Ce calendrier prévisionnel, dont le principe a pu être testé sur l'étang du Puy Bavaud, permet un abaissement du plan d'eau beaucoup plus régulier et évite ainsi les variations brutales de débit en aval ainsi que les périodes d'étiages fréquentes pendant la période intermédiaire de la vidange.

Le nombre important d'étangs en Limousin et la localisation de nombre d'entre eux sur des cours d'eau de première catégorie piscicole font de la vidange un enjeu majeur dans la préservation de la qualité de l'eau. La géographie limnologique, par son expertise des plans d'eau doit jouer un rôle dans la prévention des pollutions occasionnées par les vidanges. La connaissance de la morphologie stagnante, des épaisseurs de sédiment et du volume d'eau est essentielle dans la détermination et le dimensionnement des infrastructures destinées à diminuer l'export de matières vers l'aval.

²⁰⁵ Touchart & Graffouillère, 2004, p61

Conclusion partielle

Les hommes, en barrant des vallons de plus ou moins grande importance, créèrent la totalité des étangs limousins. Cette genèse entraîne des conséquences sur la forme de l'étang, sur son fonctionnement et sa gestion. Les modes de gestion découlent le plus souvent de pratiques liées à la raison même de la mise en eau, à l'image du système élaboré dès le XIII^{ème} siècle de gestion piscicole de la Dombes.

L'étang limousin, ou plus précisément les différents types d'étangs limousins, présentent des particularités dans leur création comme dans leur gestion qui vont les rendre très spécifiques. Notre étude morphologique met tout d'abord en évidence l'importance de la topographie locale dans le fonctionnement futur du plan d'eau, ainsi que la facilité de création de petits étangs par le barrage des innombrables vallons du limousin. L'aspect très creux des étangs, qu'ils soient étang de vallon, étang-lac de plaine ou de confluence, ou étang-lac de vallée encaissée, favorise la mise en place d'un étagement morphologique et physique. Les preuves indéniables de cet étagement et de la complexité des phénomènes hydro sédimentaires impliqués résident dans la caractérisation de deltas d'étangs – allant jusqu'à une typologie de ces derniers – ainsi que de plaines centrales. Une typologie des étangs limousins fondée sur la morphologie, et donc en amont des autres processus, peut permettre d'éclairer les fonctionnements et les modes de gestion et représente en cela un travail utile de recherche pour l'intervention. Cette approche de la typologie des étangs s'adapte mieux au milieu limousin que les typologies basées sur la profondeur²⁰⁶, sur l'origine²⁰⁷, ou sur la destination²⁰⁸ du plan d'eau.

²⁰⁶ Typologie de Pilcher, 1939 (citée par Dussart, 1966, p233) différenciant flaques d'eau, mares, petits étangs et grands étangs.

²⁰⁷ Typologie de Welch, 1952, fondée sur l'origine des étangs ainsi que la permanence ou non de la masse d'eau.

²⁰⁸ Typologie de Bachasson, 1997, fondée sur la mise en valeur piscicole.

La gestion très particulière et notamment la faible périodicité des vidanges favorise une évolution « libre » des étangs, et la mise en place de ces modelés complexes et étagés. Leur connaissance et cartographie précises permettent au géographe limnologue d'envisager les impacts de la vidange sur l'aval ainsi que leurs causes internes au plan d'eau. La recherche s'ouvre alors sur l'intervention avec la mise en place d'outils pour le gestionnaire, comme le calendrier prévisionnel de vidange.

Ainsi, l'approche morphométrique privilégiée permet une étude première des masses d'eau que sont les étangs, de leurs niveaux et de leurs mouvements. Jusqu'alors, aucun volume d'étang n'était connu précisément, le calcul le plus souvent employé se fondant sur une profondeur moyenne correspondant à la moitié de la profondeur maximale. La géographie limnologique privilégie le plan d'eau et son émissaire comme objets centraux de la recherche et non comme uniques réceptacles de l'amont.

La mise en évidence de l'identité morphologique des étangs plaide pour une étude des processus prenant appui sur la forme de la cuvette, c'est-à-dire les différents mouvements qui agitent la masse d'eau de l'étang. Nous allons donc consacrer notre troisième partie à ces mouvements, verticaux ou horizontaux, ainsi qu'à leurs causes.

PARTIE III : L'EAU DES ETANGS

1 – Les variations verticales de la masse d'eau

2 – Etude dynamique

3 – Le fonctionnement limnique global

La morphologie des étangs est un facteur liminaire à toute étude limnologique, comme nous avons pu le voir, mais l'étang est avant tout un volume d'eau - que l'on appelle souvent plan d'eau, ne se souciant que de ce qui est offert à notre vue. Le mot étang provient du français *estanchier* « arrêter l'eau » et du latin *stagnum* « eau stagnante ». Cette étymologie entraîne souvent dans l'inconscient collectif une image d'eaux stagnantes ou dormantes. Les eaux des étangs sont stagnantes par opposition aux eaux courantes des rivières, mais ne sont en rien immobiles.

Les mouvements de l'eau dans les étangs s'établissent dans les trois dimensions et ont différentes origines. Ces mouvements sont tous en inter relation étroite avec la morphologie. Ces interactions entre morphologie et processus, trop souvent ignorés, constitueront le fil d'Ariane de notre étude des mouvements d'eau.

Les variations verticales du niveau d'eau sont liées au fonctionnement hydrologique, aux apports du bassin et au temps de rétention de l'étang ; les impacts sur la gestion de la ressource en eau comme ceux sur la morphologie des berges sont majeurs. L'étude de ces mouvements sous-tend la compréhension du bilan hydrologique global. La morphologie du plan d'eau et des zones soumises au marnage sont déterminantes dans la compréhension du bilan et représentent une approche possible de la gestion de la ressource en eau.

La courantologie stagnustre est inexistante. Il ne faudrait pas en déduire qu'aucun mouvement n'agite les étangs : en effet ne serait-ce que par l'existence de forçages externes comme ceux des vents il est légitime de s'interroger sur l'existence de courants. La compréhension de ces phénomènes passe par la comparaison avec les exemples lacustres, et présente des intérêts réels, fondamentaux et appliqués. Là encore, le conditionnement de la cuvette se montre omniprésent dans son impact sur la présence et le comportement des courants.

Le fonctionnement limnique, les relations entre la thermique, la morphologie et l'aménagement permet de replacer l'ensemble du travail dans une perspective de compréhension globale de l'étang. De la mesure à l'aménagement, aucune approche ne doit être négligée : les répercussions de la morphologie sur l'ensemble du fonctionnement stagnustre doivent être prises en compte pour l'étang et l'aval. Ainsi, l'intérêt et l'impact d'un aménagement susceptible de soutirer l'eau à différentes profondeurs, avec le moine, doit être étudié à au regard de ces connaissances.

III.1. Les variations verticales de la masse d'eau

La variation du niveau d'un plan d'eau est un enjeu actuel majeur apprécié sous l'angle de la biodiversité. L'impact de ces variations qui sont « susceptibles de modifier la courantologie ainsi que l'énergie érosive de la houle, générant des remaniements bathymétriques » (Miquet, 1997) est étudié dans les lacs et le recours à la régulation peut permettre la protection de ceintures de macrophytes (Miquet, 2003). Certains étangs-lacs limousins sont pourvus de ceintures importantes de végétation, à l'image de l'étang des Landes. Ce cas est néanmoins loin d'être fréquent mais la variation du niveau de certains étangs comporte des implications réclamant son étude, car elle est en liaison étroite avec l'ensemble du bilan du plan d'eau et conditionne la gestion de la ressource. Ce marnage des étangs limousins est évidemment lié à la forme des étangs, et les différentes morphologies ont des impacts importants sur la ressource en eau par le biais des volumes emmagasinés lors des variations de niveau.

III.1.1. Débits et marnage : les rythmes de variation de la masse d'eau

Le marnage correspond à l'amplitude existant entre les plus basses et les plus hautes eaux, que ce soit pour les océans, les lacs ou les étangs. La différence fondamentale se situe dans la périodicité de ce marnage. Les mers et océans ont des marées semi diurnes ou diurnes²⁰⁹, tandis que les eaux continentales connaissent des variations saisonnières de leur niveau. Les lacs de barrage représentent une situation particulière, car les importantes modifications de leur niveau sont induites par des activités comme le turbinage ou le soutien d'étiage. S'agissant des étangs, deux situations sont possibles, selon que le débit vers l'émissaire est régulé ou non par un dispositif ; la grande majorité des étangs limousins sont équipés d'un déversoir de surface²¹⁰ ne permettant aucune régulation. Ce cas de figure est celui de l'étang de Cieux, qui possède en outre un volume important : l'étude du comportement de son marnage est donc indispensable dans la perspective d'une meilleure compréhension de phénomènes stagnante peu ou pas régulés. A l'instar de son évolution morphologique, on peut considérer comme « libre » l'évolution de son niveau d'eau.

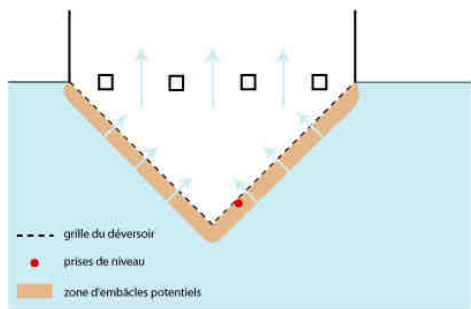
III.1.1.1. Méthodologie et durée de la surveillance

La configuration du déversoir de surface, la présence d'activités sur l'étang et la proximité de la voie publique ne permettent pas l'implantation d'un dispositif de surveillance permanente du niveau d'eau. La hauteur a donc été mesurée manuellement sur le déversoir (fig. 83a), à l'intérieur du plan d'eau, avec une précision centimétrique.

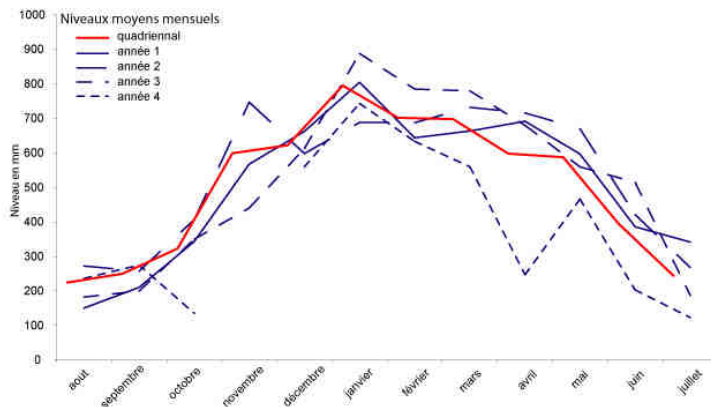
²⁰⁹ Ou semi diurne à inégalité diurne, selon la théorie dynamique de Laplace (Les Guides du SHOM, La marée, 1997, SHOM, Brest.)

²¹⁰ « (...) les moines n'équipent qu'environ un dixième des étangs limousins (...) » (Touchart et Graffouillère, 2004, p27)

Figure 83 : Variation de la hauteur d'eau de l'étang de Cieux entre 1999 et 2003

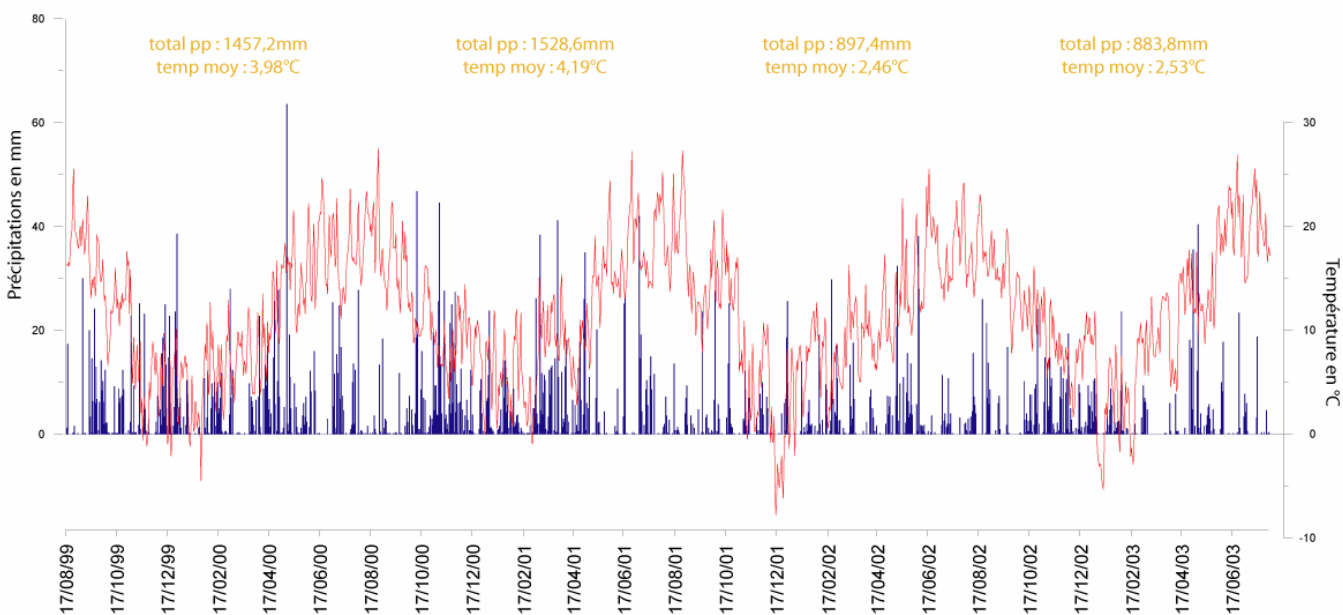
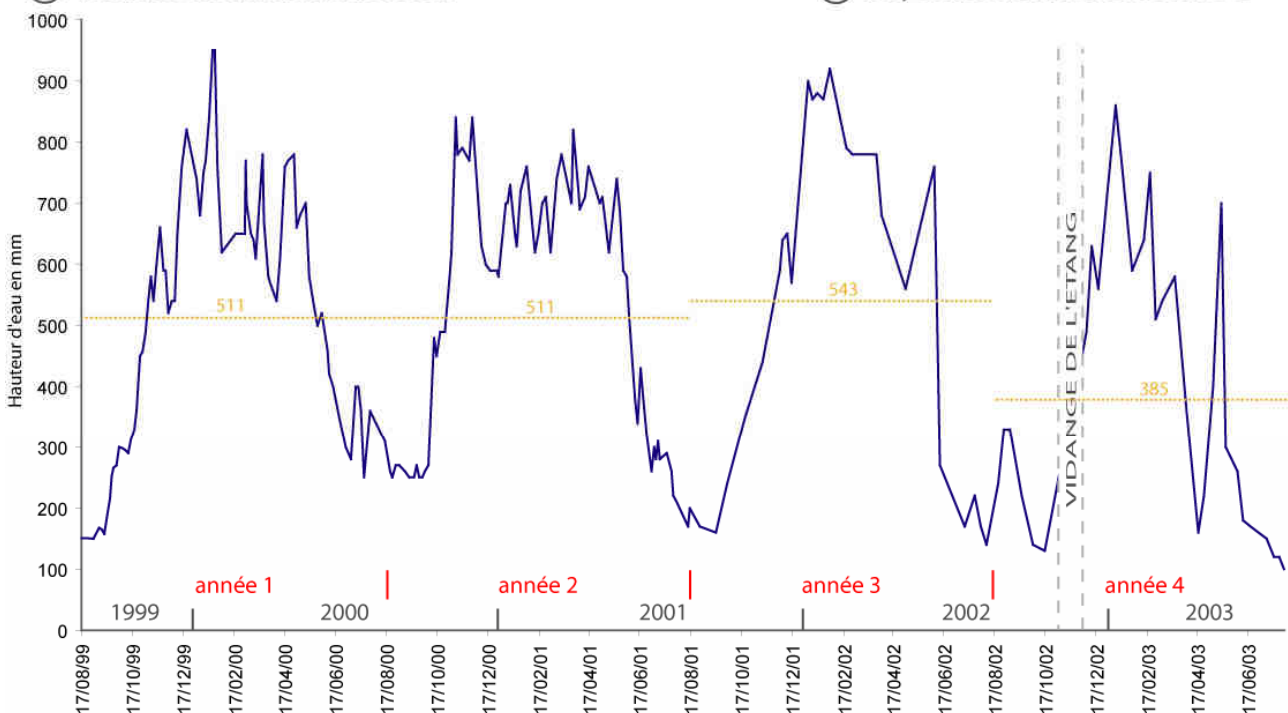


(a) Prise de niveau au déversoir



(b) Moyennes mensuelles de niveau

(c) Variation du niveau au déversoir



(d) Diagramme ombrothermique (station de nantiat/station cieux)

Conception & réalisation : Carlini - 2005

La surveillance s'étale entre le 17 août 1999 et le 30 juillet 2003, avec une périodicité moyenne légèrement supérieure à une mesure par semaine. La mesure du débit proprement dit ne porte, elle, que sur la dernière année, comme nous le verrons plus loin. Ces quatre ans de niveau d'eau autorisent à étudier le marnage de l'étang de Cieux à différentes échelles de temps : interannuelle, annuelle ou saisonnière.

III.1.1.2. Variations du niveau de l'étang de Cieux à différentes échelles

Le premier constat à l'étude des variations du niveau de l'étang de Cieux est l'importance de leur amplitude. Durant les quatre années de surveillance, le niveau est descendu à 100 mm d'eau dans le déversoir pour monter jusqu'à 950 mm. En outre, aucune crue n'a pu précisément être suivie, et le dépôt de débris sur le dessus du déversoir permet de penser que le niveau a temporairement dépassé un mètre.

III.1.1.2.1. Le marnage à l'échelle annuelle

Pour faciliter l'analyse, les années dénommées 1,2,3 et 4 sont comptées à partir du 17 août 1999, ce qui permet d'obtenir quatre cycles complets. L'allure globale de la figure 83b montre une variation de niveau dont le rythme semble imposé par les saisons hydrologiques fluviales²¹¹. La première, que l'on peut alors qualifier d'hiver hydrologique, est assurément la plus longue et se différencie très nettement de la phase d'étiage ou été hydrologique situé entre les mois de juin et d'octobre. L'étude des moyennes mensuelles quadriennales permet de comprendre le cycle de fonctionnement de l'étang. Tout d'abord, une augmentation rapide du niveau sur quelques semaines, le plus souvent entre le milieu du mois d'octobre et la fin du

²¹¹ Vigneau distingue un été hydrologique (période d'étiage et de tarissement) ainsi qu'un hiver hydrologique (fluctuation des débits à un très haut niveau, avec de nombreuses crues) entre lesquels s'intercalent un automne et un printemps hydrologiques, plus difficilement discernables. (1996, pp127-129)

mois de novembre, parfois un peu plus tard. Cette augmentation amène le niveau de l'état d'étiage à celui d'hiver hydrologique.

Les deux phases sont très nettement différenciées : durant les périodes de hautes eaux, le niveau ne passe quasiment jamais sous la barre des 500 mm d'eau tandis que durant les périodes de basses eaux, ce niveau ne dépasse pas 400 mm.

La transition entre ces périodes d'hiver et d'été hydrologique se fait brutalement. L'augmentation rapide est à mettre en relation avec le gonflement des débits dus aux précipitations à l'entrée de l'hiver mais surtout à la faiblesse de l'évaporation hors des mois d'été. Le climat hyperocéanique du Limousin induit un régime hydrologique pluvio-évaporal, avec une forte évaporation estivale se cumulant avec les minima pluviométriques. Il en résulte un régime hydrologique caractérisé par des basses eaux en saison chaude et des hautes eaux en saison froide.

Le niveau d'hiver, supérieur à 500mm, perdure jusqu'au début du mois de juin, avant de chuter rapidement. Le pic est atteint au mois de janvier ou l'étang atteint son volume maximum. Durant toute la période de l'hiver hydrologique, le niveau fluctue mais reste élevé ; la baisse la plus sensible et la plus durable se situe en mars-avril.

La chute du niveau est, à l'image de son augmentation, brutale. En quelques semaines, en juin, le niveau passe sous le seuil des 400mm. L'été hydrologique en Limousin s'étend de mai à septembre²¹² ; celui de l'étang de Cieux est décalé d'un peu plus d'un mois, de la mi-juin jusqu'au début du mois d'octobre.

²¹² Pour la normale 1961-1990, station de Limoges-Bellegarde (Touchart, 2001, p153)

III.1.1.2.2. Le marnage à l'échelle interannuelle

Le niveau moyen annuel de l'étang dénote d'une stabilité importante du niveau de l'eau durant les trois premières années de surveillance. Les années 1 et 2 ont un niveau moyen identique avec 511 mm et l'année 3 connaît un niveau légèrement supérieur avec 543 mm (fig. 83c). Seule l'année 4 possède un niveau beaucoup plus bas, 385 mm, imputable à des conditions climatiques particulières lors de l'année 2003 (fig. 83d) ; les niveaux moyens mensuels annuels restent toujours très proche de la moyenne quadriennale exception faite de cette année là (fig. 83b).

Une année hydrologique de l'étang de Cieux se déroule, comme nous venons de le voir, toujours de la même manière. L'augmentation du niveau varie légèrement selon les années, en durée comme en amplitude : de 330 à 660 mm entre le 19 octobre et le 19 novembre 1999, de 490 à 840 mm entre le 20 octobre et le 28 novembre 2000, de 350 à 650 mm entre le 21 octobre et le 11 décembre 2001, enfin de 490 à 630 mm entre le 5 et le 11 décembre 2002 après la fermeture de la bonde suite à la vidange du mois de novembre (fig. 83c).

Les étiages sont également plus ou moins prononcés selon les années, le plus net ayant été atteint en août 2003, hors de la période de surveillance ; néanmoins, jamais le déversoir de Cieux n'a cessé de couler.

L'année 4 présente un premier étiage sévère dès le mois d'avril tronquant ainsi la fin de l'hiver hydrologique. Cette baisse du niveau discernable au mois d'avril, tous les ans mais de manière plus ou moins accentuée, découle à la fois de la baisse des précipitations de printemps mais aussi de l'utilisation des réserves hydriques pour le développement de la végétation (Vigneau, 1996, p127). L'aspect plus marqué de cette période en année 3 mais surtout en année 4, c'est-à-dire au printemps 2003 découle de la baisse continue des précipitation de printemps dans la période étudiée

(437,8mm en année 1 ; 383,4mm en année 2 ; 290,6mm en année 3 ; 217,6mm en année 4 pour les totaux de précipitation sur les 3 mois de printemps).

Cette étude des variations du niveau de l'étang nous amène à nous interroger sur la relation entre ce dernier et le réseau hydrologique amont et aval. Les variations de niveau répercutent-elles directement les variations de débit amont et transmettent-elles sans changement ces variations en aval ?

II.1.1.3. Marnage et réseau hydrographique

Les variations du niveau de l'étang de Cieux dépendent d'un certain nombre de facteurs du bilan que nous allons aborder plus loin, mais surtout de la connexion de l'étang au réseau hydrographique, c'est-à-dire des apports par les affluents et du débit de l'émissaire. Il s'agit ici de comprendre comment l'étang réagit aux variations de débit de ses tributaires et quel rythme hydrologique il impose à son émissaire.

Tout d'abord, il est intéressant de comparer l'ensemble des débits entrant avec le débit sortant du plan d'eau, visible sur la figure 84 qui correspond à l'année 4 (été 2002 – été 2003).

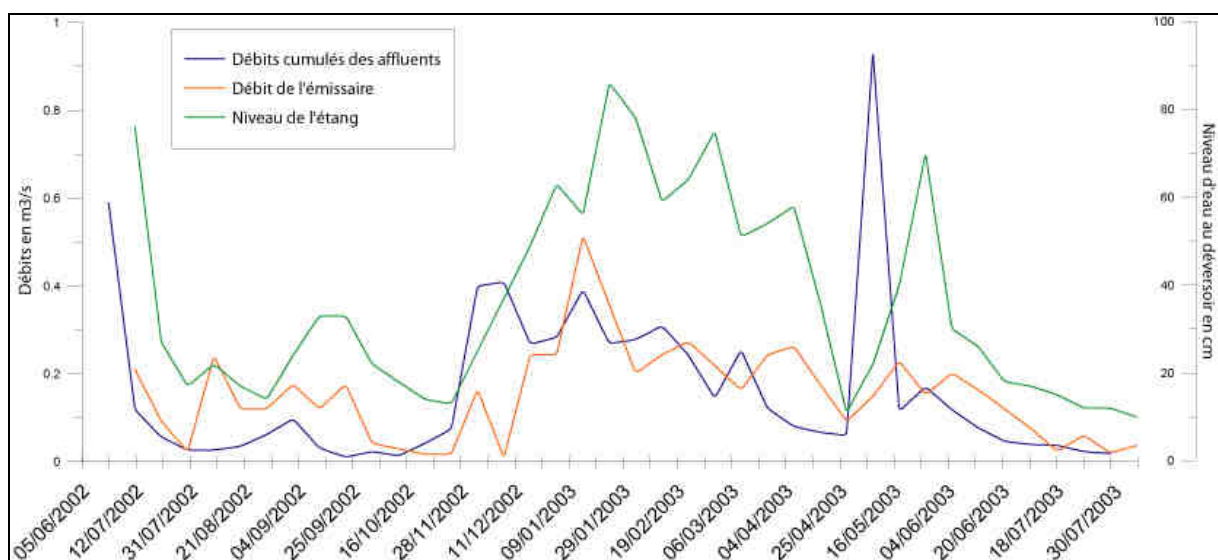


Figure 84 : la relation débit – marnage de l'étang de Cieux

Le premier constat est la profonde transformation du débit de l'émissaire. Si les débits moyens annuels sont très proches avec 0,158 m³/s pour les tributaires et 0,150 m³/s pour l'émissaire, les rythmes sont très différents. Tout d'abord, les pics de débits sont atténués et décalés dans le temps : cela est visible début décembre et à la mi-mai. Au mois de mai par exemple, les débits entrants sont multipliés par 15 alors que le débit en aval n'a augmenté que d'un facteur d'une fois et demie. Durant ces périodes le niveau du plan d'eau s'élève : on peut considérer que l'étang est en phase de stockage. Durant les étiages ou plus simplement lorsque le débit amont se réduit, le débit aval se maintient et le niveau du plan d'eau s'abaisse ce que l'on peut constater entre juillet et septembre 2002 mais aussi au mois d'avril 2003 : l'étang est alors en phase de soutien. Le fonctionnement hydrologique n'étant pas régulé, le système de déversoir et la présence temporaire d'embâcles végétaux rendent la relation entre le niveau d'eau et le débit aval parfois chaotique.

A l'instar des lacs, l'étang de Cieux, malgré un volume modeste au regard de ces derniers, a un rôle pondérateur sur les débits. Les valeurs de pondération entre 2002 et 2003 montrent l'influence très nette de l'étang. Pour la somme des débits entrants $R = 18,6^{213}$, tandis que pour l'émissaire $R = 7,2^{214}$.

III.1.1.4. Marnage, superficie et volume

Le volume de l'étang de Cieux a donc un impact sur les débits en aval, impact dépendant de la variation de la masse d'eau. Les variations de niveau que nous avons évoquées plus haut ont des répercussions très importantes sur la superficie du plan d'eau ainsi que sur son volume. La figure 85 montre les niveaux moyens de

²¹³ Débit mensuel le plus important en mai 2003 avec 0,4 m³/s ; le plus faible en septembre avec 0,02 m³/s.

²¹⁴ Débit mensuel le plus important en mars 2003 avec 0,25 m³/s ; le plus faible en juillet avec 0,035 m³/s.

l'étang ainsi que ses niveaux extrêmes, avec leurs conséquences sur la superficie et le volume de l'étang.

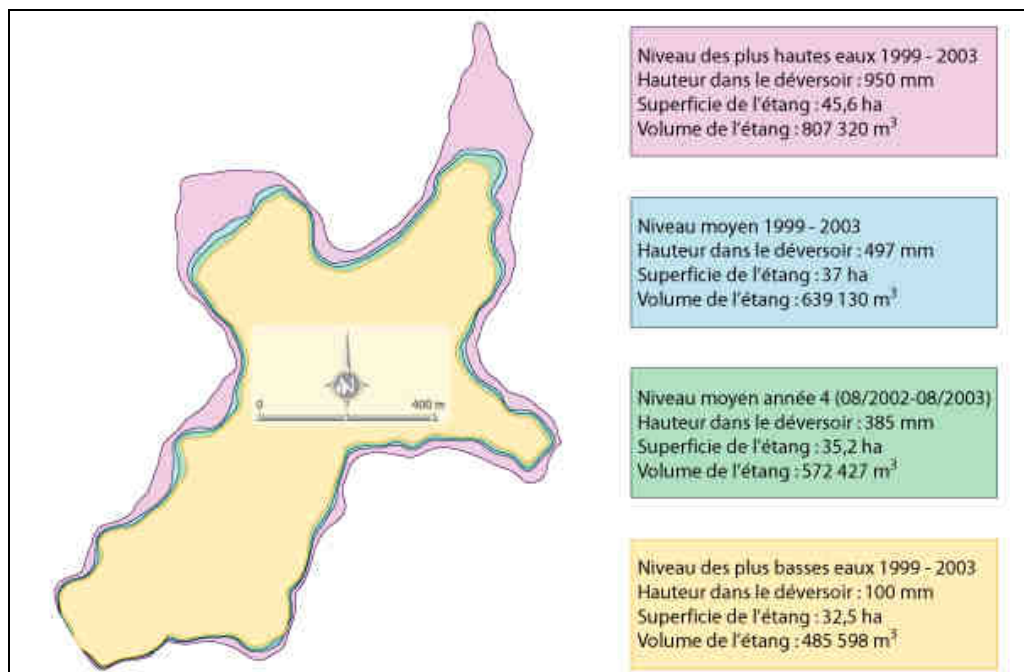


Figure 85 : niveaux moyens et extrêmes de l'étang de Cieux

Le premier constat concerne la comparaison entre l'étiage le plus sévère et les plus hautes eaux enregistrées : ces derniers sont séparés par 850 mm au déversoir, ce qui représente 13,1 hectares soit plus du tiers de la superficie moyenne quadriennale. L'impact sur le volume est encore plus marqué : les 321722 m³ qui séparent les deux niveaux extrêmes représentent la moitié du volume moyen quadriennal. L'importance du volume potentiellement stockable lors des plus hautes eaux permet de comprendre la possibilité du soutien d'étiage lorsque les débits des affluents faiblissent.

Le cas des étangs de vallée encaissée est très différent. La morphologie des berges et la forte pente des talus se traduisent par une modification moins importante du volume dans le cas de variations du niveau d'eau (fig 85bis). Pour les

années 2003 et 2004, l'étang de la Pouge a varié entre les cotes 251,2m et 251,9m NGF, ce qui représente un marnage de 70 cm. (Source DOCOB)

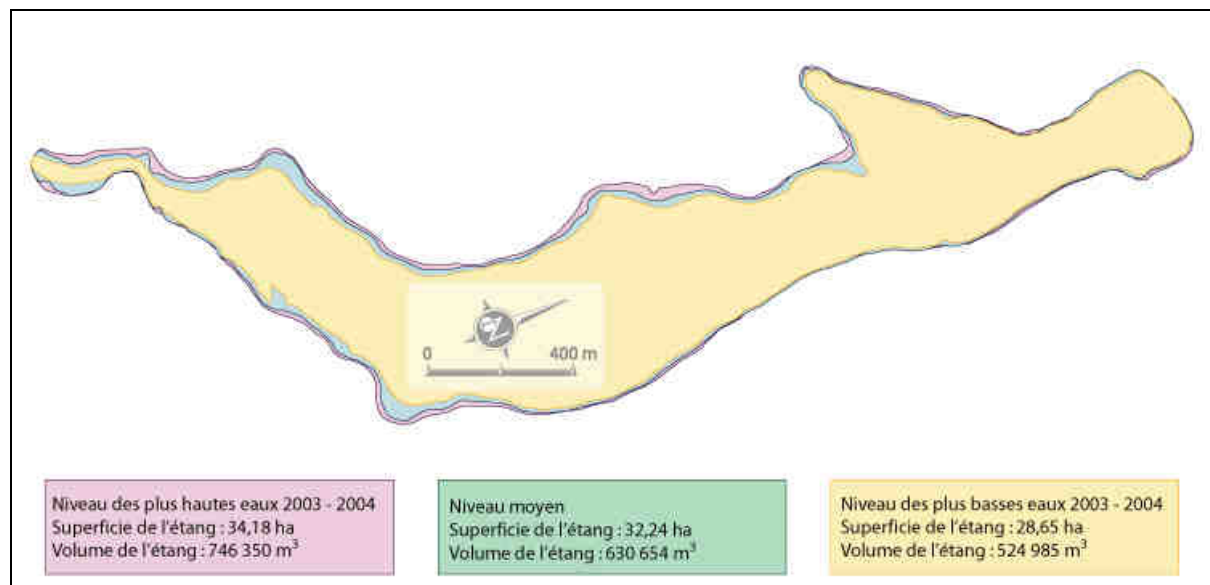


Figure 85bis : niveaux moyen et extrêmes à l'étang de la Pouge

La différence de comportement est très nette : les plus basses et plus hautes eaux sont séparées par 5,53 hectares, soit le sixième de la superficie moyenne. La différence de volume entre les niveaux extrêmes, 221365 m³, reste importante, elle représente légèrement plus du tiers du volume moyen. La capacité de stockage des étangs de vallée encaissée est donc intrinsèquement inférieure, parce que l'étalement de la montée du niveau sur les berges est spatialement plus restreint.

Dans le dernier cas des étangs de vallon, le marnage est excessivement réduit, et la présence de berges surcreusées limite l'évolution spatiale. Pour l'étang du Theil, le marnage pour l'année 2000 est de 16 centimètres en hautes et basses eaux (Graffouillère, 2000, p81) ce qui représente 3500 m³ et une variation de superficie négligeable. Le volume stockable est donc plus réduit relativement aux autres plans d'eau, et reste très faible dans l'absolu : les possibilités de soutien d'étiage peuvent être considérées comme nulles.

Les étangs, à l'instar des lacs, connaissent une variation de niveau saisonnière. Ce phénomène de marnage peut être qualifié de « libre » lorsqu'il n'est pas régulé et a un aspect remarquable : pour l'étang de Cieux, comme pour d'autres étangs-lacs limousin ce marnage est proportionnellement beaucoup plus important que dans les lacs. Pour prendre deux exemples, le Baïkal et le Tanganyika connaissent des marnages respectivement de 80 et 60 cm (Touchart, 1999. p14). Ce facteur est donc essentiel à la compréhension du fonctionnement hydrologique des étangs, mais la simple observation du niveau ne suffit pas, il est nécessaire de la replacer dans le bilan hydro-limnologique de l'étang.

III.1.2. le bilan hydro-limnologique

Cerner le comportement de l'étang en tant que masse d'eau passe assurément par une tentative de bilan hydrologique. Si cette question relève à première vue d'une nécessité impérieuse pour la connaissance fondamentale des étangs, son aspect appliqué est majeur, il en va de la gestion de la ressource en eau. Des bilans existent pour certains grands lacs de la planète mais nos recherches ne nous ont pas permis de recenser de bilan précis concernant des étangs à l'image de ceux de notre étude. Nous avons choisi de nommer ce bilan « hydro-limnologique » afin d'éviter la confusion avec un bilan hydrologique de bassin dans lequel des plans d'eau sont présents. Notre objet est ici le plan d'eau, et grâce à l'instrumentation du Plan d'Eau de Recherche Expérimental de Cieux il est possible de présenter un bilan hydro-limnologique représentatif des étangs de confluence ou de plaine²¹⁵ en Limousin. Le débit spécifique des affluents de l'étang, pour la période 2002-2003, est de 13,1 l/s/km² ce qui est conforme aux cours supérieurs des ruisseaux limousins.

²¹⁵ Selon notre typologie mise en place précédemment.

Avant de passer au bilan proprement dit, il convient d'aborder les composantes entrant dans son calcul.

III.1.2.1. Facteurs retenus pour le bilan

Les facteurs retenus pour la mise en place de ce bilan hydro-limnologique peuvent être divisés en deux catégories, les apports au plan d'eau et les pertes de ce dernier (fig. 86). Le contexte hydro-climatologique du Limousin a pour conséquence un bilan de type fluvial (Meybeck, 1995) et nous constaterons effectivement la part prépondérante des émissaires et du tributaire dans le fonctionnement hydrologique de l'étang de Cieux²¹⁶.

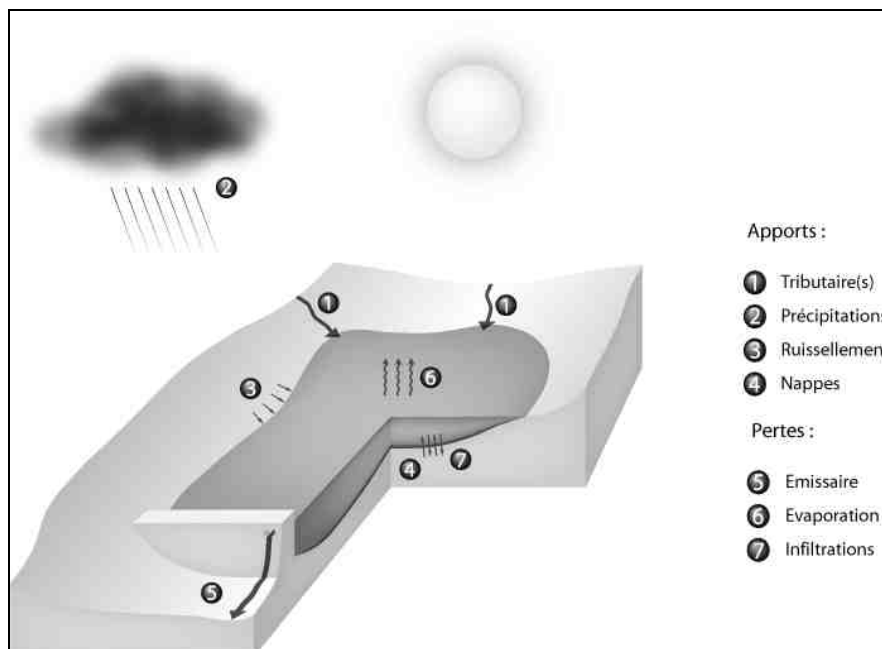


Figure 86 : Les facteurs du bilan hydro-limnologique d'un étang limousin (d'après Touchart & Graffouillère, 2004, modifié)

²¹⁶ Les facteurs détaillés subséquentement ont été cités en 1979 par Frécaut : affluents, eaux souterraines et précipitations directes pour les apports ; effluent, infiltration et évaporation pour les pertes.

III.1.1.1.1. Les apports au plan d'eau

Les apports en eau à l'étang sont principalement dus à ses affluents mais aussi, dans une moindre mesure aux précipitations incidentes sur la nappe d'eau, au ruissellement direct ainsi qu'à l'infiltration depuis les nappes.

La mesure hebdomadaire des débits des quatre affluents et de l'émissaire de Cieux entre le 5 juin 2002 et le 30 juillet 2003 a permis d'estimer le volume d'eau entrant et sortant de l'étang. Les stations limnimétriques se situent au plus près du plan d'eau : leur localisation précise est visible sur la figure 6.

La mesure des précipitations incidentes sur un étang où le marnage est important pose le problème de la représentativité d'une superficie moyenne du plan d'eau. Durant l'hiver hydrologique le volume du plan d'eau, donc sa hauteur et sa superficie sont à leur maximum, cette période correspond aussi aux apports pluviométriques les plus importants. Ces deux affirmations sont des évidences pourtant, elles sous-tendent un aspect primordial du bilan concernant les étangs. Le marnage de ces derniers est relativement beaucoup plus important que celui des lacs ; la superficie concernée par la variation du niveau d'eau est très conséquente comme nous avons pu le constater précédemment. De ce fait, les phénomènes se rapportant directement à la surface de l'eau, précipitations incidentes et évaporation, doivent nécessairement être adaptées aux superficies réelles de l'étang.

Le ruissellement direct est difficile à quantifier et de ce fait, son absence est fréquente dans les bilans lacustres. Pour le cas de l'étang de Cieux, nous avons tenté de cerner une aire de ruissellement directe. L'étude de la nature des berges et de la végétation, de la morphologie proche du plan d'eau a permis de dégager des zones dont on peut raisonnablement penser que l'eau précipitée s'écoule naturellement vers l'étang. La superficie de cette zone varie selon le marnage sachant que toute zone comprise sous la limite des hautes eaux correspond à une zone de ruissellement potentiel lorsque le

niveau descend. Cette estimation se fait probablement par défaut, mais la proximité des stations limnimétriques sur les affluents réduit le risque de sous estimation des apports.

III.1.1.1.2. Les pertes du plan d'eau

A l'instar des apports, la majeure partie des pertes en eau de l'étang s'effectue au travers de l'émissaire, les autres pertes de l'étang sont imputables à l'évaporation directe. Enfin, de très faibles infiltrations au travers de la digue peuvent aussi être prises en compte.

Le volume d'eau évacué par l'étang a été suivi avec la même méthode qu'à l'amont : par la mesure hebdomadaire des débits à l'aval direct de l'étang.

La mesure de l'évaporation pose un problème similaire à celui des précipitations incidentes. La mesure de l'évaporation a été effectuée sur un bac évaporatoire et vérifiée par la formule de Penman ; les valeurs d'évaporations doivent là aussi être rapportées aux superficies réelles. Dans le cas d'étangs dont les littoraux sont colonisés par des macrophytes, il est nécessaire de prendre en considération l'évapotranspiration induite par ces plantes²¹⁷.

Les infiltrations au travers de la digue se produisent majoritairement par une étanchéité imparfaite au niveau de la bonde. Plusieurs mesures du débit évacué réalisées par empotement vu la faiblesse de ce dernier ont permis de conclure à une perte régulière de 0,0002 m³/s.

²¹⁷ « Data on [...] evapotranspiration from macrophyte communities growing along the shore and banks of both standing and running waters and in wetlands are of great importance for correctly assessing the water budget of these sites. (Bican et al., 1986. pp 191-192)

III.1.1.1.3. La question de la nappe

Les relations du plan d'eau avec la nappe posent un problème : la quantification de ces relations ne peut s'effectuer que par la pose de nombreux piézomètres dans le bassin. Concernant le cas de l'étang de Cieux, nous avons déjà constaté la présence d'une couche d'argile importante sous le sol de l'étang²¹⁸. Nous avons donc choisi de ne pas prendre en compte les échanges avec la nappe.

III.1.2.2. Le calcul du bilan

Afin de prendre en compte correctement les superficies, les facteurs concernés – précipitations et évaporation – sont rapportés aux superficies moyennes mensuelles.

La première interrogation à la finalisation du bilan est l'équilibrage de ce dernier. En se reportant aux apports et pertes (fig. 87a) on constate que le bilan est excédentaire de 81114 m³. A cela il faut rajouter la différence de niveau entre le début et la fin de la période d'observation correspondant à 13083 m³ et retrancher les pertes annuelles de la vanne de fond correspondant à 6307,2 m³ et n'ayant donc pas été intégrées avant du fait de leur très faible importance. Au total le bilan est excédentaire de 87890 m³. Le chiffre absolu peut paraître important, néanmoins il convient de le nuancer en le rapportant à la globalité du bilan : la marge d'erreur correspond à seulement 1,55% des apports totaux du bilan. Plusieurs facteurs peuvent être mis en avant pour comprendre cette marge d'erreur, mais il semble que le rythme hebdomadaire de relevé des débits soit le plus susceptible de répondre à la légère surestimation du bilan. Seul un bilan pluriannuel pourrait permettre de réduire plus précisément cette marge d'erreur.

²¹⁸ Partie II.5.1.3. ainsi que photo 39.

Figure 87 : Le bilan hydro limnologique de l'étang de Cieux : stockages et déficits de la ressource en eau

a - apports et pertes mensuelles en mètres cubes

MOIS	APPORTS TRIBUTAIRES (m3)	PRECIPITATIONS INCIDENTES (m3)	APPORTS TOTAUX (m3)	PERTES EMISSAIRE (m3)	EVAPORATION (m3)	PERTES TOTALES (m3)	BILAN MENSUEL (m3)
août-02	174363.84	48708.83	223072.67	372642.95	28143.11	400786.06	-177713.39
sept-02	56678.40	13151.95	69830.35	282621.66	21573.60	304195.26	-234364.91
oct-02	78805.44	22430.78	101236.22	559206.91	10025.92	569232.84	-467996.62
nov-02	696195.98	38450.74	734646.72	130387.20	4002.58	134389.78	600256.94
déc-02	857445.12	38270.00	895715.12	893728.51	3537.49	897266.00	-1550.89
janv-03	838517.76	30391.93	868909.69	596501.11	3398.93	599900.04	269009.66
févr-03	562947.84	17502.66	580450.50	529634.49	8990.09	538624.58	41825.92
mars-03	503940.96	13783.69	517724.65	678316.45	22004.68	700321.13	-182596.48
avr-03	179539.20	35573.74	215112.94	360696.82	26875.28	387572.10	-172459.16
mai-03	1088144.64	34764.35	1122908.99	520975.94	32984.59	553960.53	568948.46
juin-03	209347.20	25182.36	234529.56	311110.16	44308.03	355418.19	-120888.63
juil-03	80017.20	17696.72	97713.92	95582.72	43487.81	139070.53	-41356.61
TOTAL	5325943.58	335907.73	5661851.31	5331404.92	249332.10	5580737.02	81114.29

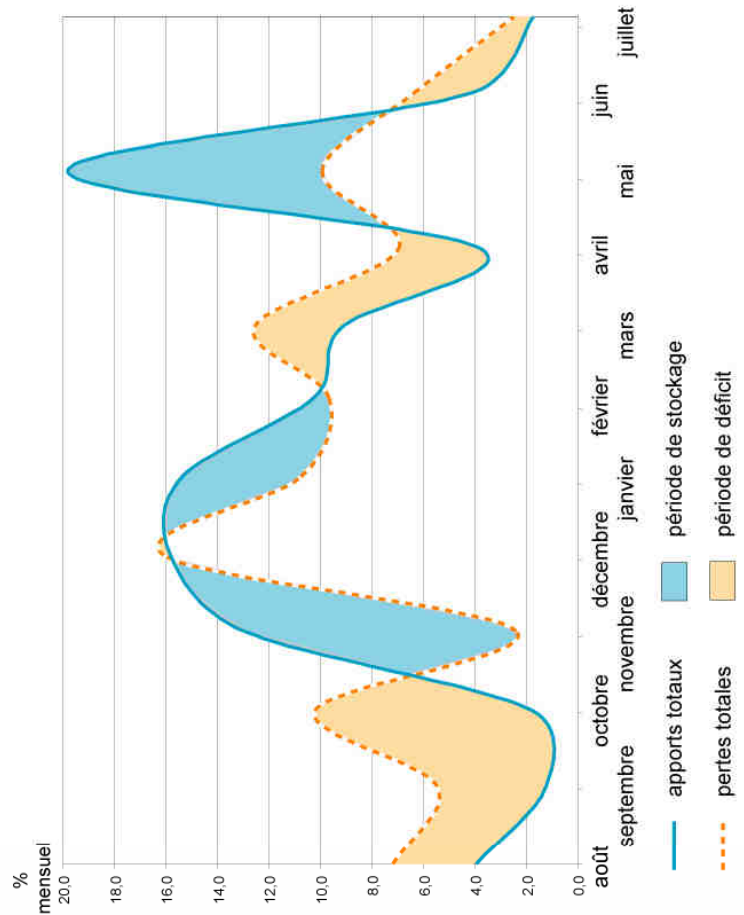
b - part des apports mensuels

MOIS	PART DES APPORTS TRIBUTAIRES	PART DES APPORTS PRECIPITATIONS
août-02	78.2	21.8
sept-02	81.2	18.8
oct-02	77.8	22.2
nov-02	94.8	5.2
déc-02	95.7	4.3
janv-03	96.5	3.5
févr-03	97.0	3.0
mars-03	97.3	2.7
avr-03	83.5	16.5
mai-03	96.9	3.1
juin-03	89.3	10.7
juil-03	81.9	18.1
Année	94.1	5.9

c - part des pertes mensuelles

MOIS	PART DES PERTES EMISSAIRE	PART DES PERTES EVAPORATION
août-02	93.0	7.0
sept-02	92.9	7.1
oct-02	98.2	1.8
nov-02	97.0	3.0
déc-02	99.6	0.4
janv-03	99.4	0.6
févr-03	98.3	1.7
mars-03	96.9	3.1
avr-03	93.1	6.9
mai-03	94.0	6.0
juin-03	87.5	12.5
juil-03	68.7	31.3
Année	95.5	4.5

d - périodes de stockage et déficit mensuelles



III.1.2.3. Bilan du Grand étang de Cieux (37 ha)

La réalisation de ce premier bilan hydro-limnologique sur un étang limousin va nous permettre de répondre à des questions fondamentales : quel est l'impact de l'étang de Cieux sur la ressource en eau pour l'année 2002-2003, quels facteurs sont prépondérants pour les apports et les pertes dans le cas d'un étang limousin ?

A l'échelle d'une année nous avons vu que l'étang modifiait peu la ressource en eau, en terme de quantité, puisque les débits moyens entrants et sortants sont similaires.

L'impact fluvial est très important sur l'étang : les tributaires représentent 94% des apports en moyenne sur l'année (fig. 87b). Les seuls mois où les précipitations directes prennent de l'importance sont le mois d'avril et les mois d'été, dans le premier cas du fait d'un pic important des précipitations et dans le second à cause des très faibles débits des affluents. S'agissant des pertes en eau, ce principe est encore plus frappant : le tributaire représente 95,5% de ces dernières et l'évaporation seulement 4,5% (fig. 87c). Seuls les mois de juin et juillet présentent une évaporation importante. A l'échelle de l'année toute entière, l'évaporation correspond à un total de 728 mm ou 0,23 l/s/ha en moyenne ; le mois où elle a été la plus efficace, juin, elle correspond à 0,5 l/s/ha en moyenne (fig. 87a).

Le bilan annuel a toutefois été modifié par la vidange de novembre 2002 : après la fermeture de la bonde, aucun écoulement n'a été maintenu en aval jusqu'à la réactivation du déversoir. Le mois de novembre apparaît donc comme une période importante de stockage. Par la suite les débits augmentent fortement en décembre : « Du fait du profil convexe de la partie supérieure de la cuvette, les quantités d'eau entrantes représentent une hauteur d'eau plus importante au déversoir lorsque le niveau est bas, cas de 2002. Au contraire, lorsque le niveau est plus élevé, ces surplus

d'eau ont tendance à se répartir sur une superficie plus grande dans la périphérie de l'étang, cas des années sans vidange. » (Touchart et Graffouillère, 2004)

III.1.3. Inertie et temps de renouvellement des eaux

Nous avons pu observer lors de l'étude des caractéristiques morphologiques de l'étang de Cieux (Tableau 1) que son volume était de 572 427 m³. Il s'agit du volume moyen pour l'année 2003. L'amplitude du marnage entraîne comme nous l'avons vu une variation énorme du volume stagnestre : 321 722 m³ entre les niveaux extrêmes. Les variations de niveau et du volume sont à l'origine du régime hydrologique stagnestre que l'étang impose à son émissaire fluvial. La modification du régime est due à l'inertie du plan d'eau. Pour essayer de quantifier cette inertie et donc l'impact de l'étang sur le régime hydrologique, le calcul du temps de renouvellement des eaux semble le plus approprié. Ce calcul s'effectue en calculant le quotient du volume de l'étang par le total des apports. La valeur du temps de renouvellement traduit l'inertie moyenne annuelle du plan d'eau, et les décalages temporels entre amont et aval ne sont donc par parfaitement calqués sur ce chiffre. Néanmoins, il exprime beaucoup plus distinctement le rapport entre le plan d'eau et le réseau hydrographique que d'autres indices comme le coefficient de domination. Il est possible de comparer les deux indices : pour l'étang de Cieux et celui des Landes, les valeurs de dominations sont respectivement 35 et 31. On peut donc en conclure que l'étang des Landes est moins soumis à son bassin que celui de Cieux. Prenons maintenant les valeurs de renouvellement des eaux. Pour l'étang de Cieux et pour l'année 4 de notre étude, ce temps de renouvellement est de 43 jours. Dans le cas de l'étang des Landes, il a pu être déterminé à 34 jours (Touchart & Graffouillère, 2004). L'utilisation du coefficient de domination pourrait laisser penser que moins l'étang est dominé, plus son inertie est grande ; en fait il n'en est rien. Le coefficient de

domination traite les surfaces, mais oublie la morphologie dont l'importance capitale apparaît ici. Le temps de renouvellement des eaux est le seul indice qui permette d'appréhender l'inertie réelle du plan d'eau. En cela, il peut être capital pour la recherche-intervention, dans un contexte de raréfaction de la ressource en eau, dans une région où l'on dénombre plus de 20 000 étangs.

La deuxième partie de ce travail nous avait permis de comprendre l'importance de l'étude de la morphologie du plan d'eau pour la connaissance de ce dernier. Ici, l'illustration est faite de la prépondérance de l'étude morphologique dans une connaissance poussée du fonctionnement de l'étang. Sans l'étude précise de la morphologie, point de calcul du volume ni de mise en relation de ce dernier avec le marnage. Sans les superficies réelles, les facteurs opérant à la surface du plan d'eau auraient été surestimés ou sous-estimés.

En outre l'étude du marnage de la masse d'eau et des périodes de soutien d'étiage constatés donne à réfléchir quant à la gestion de la ressource. L'étang de Cieux est représentatif des grands étangs de plaine ou de confluence ; si ces grands étangs ne constituent pas la majorité, leur capacité de stockage lors des périodes de hautes eaux est très importante. Il conviendrait de réfléchir à une rationalisation de ce surplus, notamment à son utilisation lors des étiages sévères, ce que des infrastructures plus adaptées que le simple déversoir peuvent permettre.

La masse d'eau connaît donc d'importants mouvements verticaux, mais ils ne sont pas les seuls à mettre en mouvement l'eau des étangs. Il est important de savoir, pour mieux comprendre le fonctionnement stagnustre global, si de réels courants peuvent être mis en évidence.

III.2. Etude dynamique

La deuxième partie de ce travail tenait pour propos liminaire la difficulté d'accéder à des travaux sur la morphologie des étangs, notamment récents. Travailler sur l'hydrodynamique stagnustre pose un autre problème : aucune étude de ce type n'est disponible. Il n'est même pas possible de s'appuyer sur des hypothèses générales tant le sujet est absent des recherches existantes sur les étangs. Il existe pourtant un réel enjeu dans la présence ou non de courants stagnustres, tout d'abord dans la mise en évidence de la complexité du phénomène dans de petits plans d'eau, puis dans les relations que ces courants peuvent entretenir avec nombre de problématiques de recherche-conseil.

L'inexistence de bibliographie concernant les courants des étangs impose la nécessité de se pencher sur les types de courants lacustres.

III.2.1. Les courants lacustres

La connaissance des courants lacustres a, elle, été considérée rapidement comme d'importance capitale en limnologie. Un chapitre est consacré à l'étude des courants dans la plupart des ouvrages de limnologie²¹⁹. Nous allons aborder les spécificités des courants lacustres ainsi que les forçages les produisant. Nous terminerons par des hypothèses sur la courantologie stagnustre avant d'étudier les résultats de terrain.

²¹⁹ Hutchinson, 1957 ; Ruttner, 1963 ; Lerman, 1978 ; Goldman & Horne, 1983 ; Wetzel, 1983 ; Touchart, 2002.

III.2.1.1. Spécificités des courants lacustres

Evoquer les spécificités des courants lacustres revient à les comparer aux courants marins. La différence majeure provient de l'exiguïté de la cuvette lacustre au regard des immensités océaniques. Les courants lacustres vont donc être sous les contraintes de la morphologie de la cuvette. Tout d'abord au niveau horizontal, car la propagation d'un courant est plus ou moins rapidement stoppée par la rive opposée à sa progression. Ensuite au niveau vertical, car les profondeurs lacustres ne sont pas comparables à celles de l'océan, et cet état accentue les frottements possibles avec le fond. Les courants lacustres développent par contrainte une grande complexité dans leur évolution spatiale.

L'autre grande différence est la permanence des courants ou plutôt leur non permanence. En effet, rares sont les lacs dont les courants peuvent être considérés comme permanents ; seuls les plus grands d'entre eux en connaissent²²⁰. Pour la plupart, les systèmes de courant sont soumis aux changements de vent (Csanady, 1978 ; Lemmin, 1998).

III.2.1.2. Type de courants lacustres

Un courant est essentiellement la conséquence de forçages externes sur la masse d'eau, tout du moins en ce qui concerne les lacs. Nous ne rentrerons pas ici dans une étude détaillée de la bibliographie concernant la courantologie, ce n'est pas le propos : nous allons faire une présentation concise des types de courants lacustres susceptibles d'exister dans les étangs.

L'interface entre le milieu lotique et le milieu lentique est une zone d'affrontement où se mêlent l'hydrodynamique de l'affluent et celle du plan d'eau.

²²⁰ Le Baïkal et la Caspienne, par exemple (Touchart, 2002, p220)

La différence de densité entre les eaux fluviales et les eaux lacustres amène plusieurs cas de figure.

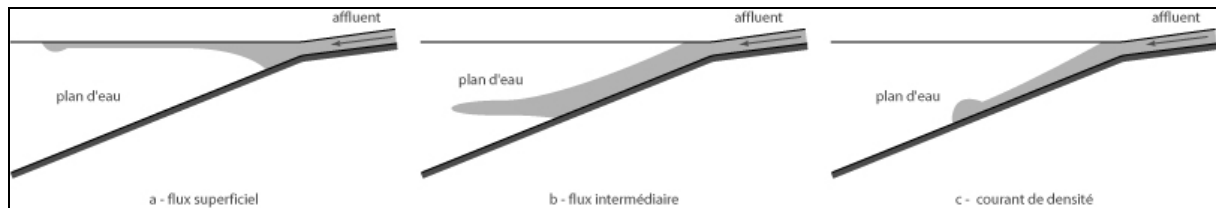


Figure 88 : Positionnement d'un courant hydrographique selon sa densité

Les courants induits peuvent être des flux superficiels (*overflow* – fig.88a) lorsque la densité de l'affluent est inférieure à celle du lac. Ils peuvent être intermédiaires (*interflow* – fig.88b) quand cette densité est supérieure à celle de l'épilimnion, mais inférieure à celle de l'hypolimnion ou du métalimnion : le flux s'intercale donc à la profondeur correspondant à sa densité. Enfin, si les eaux affluentes sont plus denses que l'ensemble des eaux du lac, le flux est profond (*underflow* – fig.88c) et on le retrouve sous le nom de courant de densité (Wetzel, 1983. pp 124-127).

Le facteur primordial dans l'hydrodynamique lacustre est le vent qui produit des courants de dérive²²¹. En soufflant sur la surface de l'eau, le vent entraîne une couche d'eau de surface plus ou moins épaisse (la couche d'Ekman). L'épaisseur de la couche d'eau emportée dépend à la fois de la force du vent, de la taille du lac ainsi que de la présence ou non d'une stratification thermique. Étant donné l'origine du courant, son orientation correspond à celle du vent, avec dans les plus grands lacs une déviation due à la force de Coriolis : la circulation des courants prend la forme

²²¹ «Toutes nos observations concordent pour montrer l'action puissante du vent sur la formation des courants. C'en est un des facteurs principaux. » (Bétand et Perrenoud, 1932. p250) ; «The most important type of current known in lakes is that caused by wind » (Hutchinson, 1952. p265) ; « water motions in lakes are mostly caused by the wind » (Csanady, in Lerman, 1978. p21) ; «Les courants de vent, ou de dérive, tiennent la première place dans la plupart des lacs (...)» (Touchart, 2002. p221). Ces quatre exemples dispersés dans le temps montrent la permanence de l'étude de la relation vent courants lacustres en limnologie.

de grand tourbillons²²². La vitesse du courant est une fraction de la vitesse du vent qui le produit, estimée entre 1,5 et 5% (Touchart, 2002. p222).

Le vent est aussi à l'origine d'un système complexe de courants appelé cellules de Langmuir. Ces cellules, dont l'origine précise n'est pas encore connue (Lemmin, 1995, p68), sont identifiables par de longues traînées visibles dans le sens du vent (figure 89) qui ont largement été décrites.

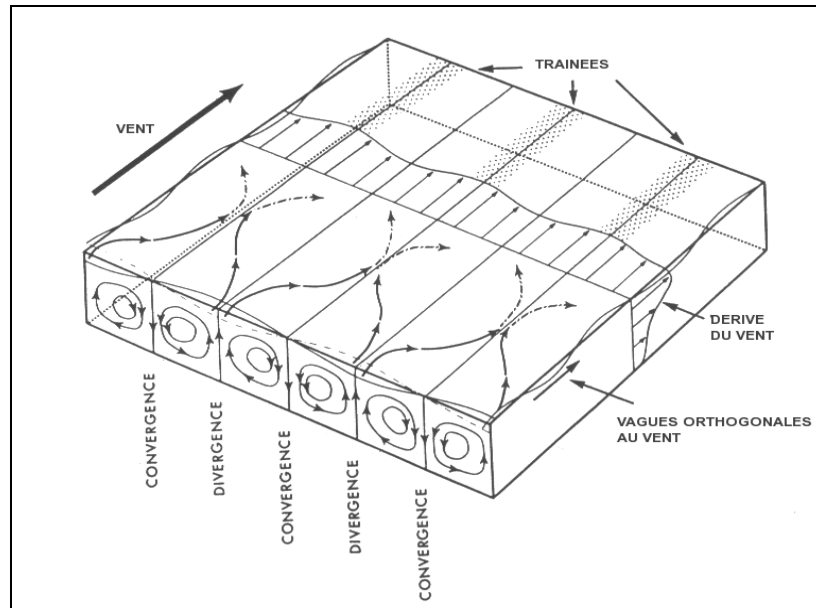


Figure 89 : Principe de fonctionnement des cellules de Langmuir (d'après Wetzel, 1983, modifié)

Ce fonctionnement en cellule correspond au résultat de l'interaction atmosphère-lac dans laquelle l'énergie des vagues est transformée en turbulence à petite échelle (Kondratiev & Filatov, 1999, p91 ; Touchart, 2002, p224). Les conditions d'apparition des traînées se situent avec un vent entre 3 et 5 m/s (Kondratiev & Filatov, 1999, p91).

III.2.1.3. Quelques hypothèses stagnustres

Avant d'interpréter les résultats obtenus par la mesure des courants sur le terrain, il peut être intéressant de formuler quelques hypothèses sur les phénomènes

²²² « The surface currents of very large lakes tend to circulate in large swirls or gyral » (Wetzel, 1983. p106)

potentiels en étang. Certaines pistes peuvent découler des enseignements de la courantologie lacustre par rapport à la courantologie marine. Les dimensions réduites des bassins stagnustres par rapports aux bassins lacustres poussent à l'extrême deux contraintes majeures : celle de la surface et donc de la côte opposée au courant ; celle de la profondeur et donc l'omniprésence de forces de frottement. On peut donc supposer que les courants en étang seront éphémères, et très largement influencés par le vent. En outre, la déviation due à la force de Coriolis ne s'applique pas pour de très faibles profondeurs²²³. Certains phénomènes, par contre, ont été constatés sur des lacs de faible superficie comme le lac Punnus-Jarvi (24km², source ILEC) sur lequel des cellules de Langmuir ont été repérées (Kondratiev & Filatov, 1999, p91).



Photo 46 : Cellules de Langmuir sur le lac de Vassivière (cliché Carlini, 2002)

Nous avons pu repérer plusieurs fois les traînées caractéristiques des cellules de Langmuir autant sur des étangs que des lacs, néanmoins, la photographie la plus nette est celle réalisée sur le lac de Vassivière, en novembre 2002, avec un vent entre 4 et 5 m/s (photo 46).

²²³ « in a lake with a depth of less than about 20 m, the angle of declination becomes insignificant » (Wetzel, 1983. p106)

S'agissant des courants de densité, leur genèse plus physique que dynamique pousse à croire que leur présence est possible en étang.

III.2.2. Les campagnes et leurs résultats

III.2.2.1. Les courants hydrographiques

Les courants stagnustres dont la présence est la plus patente sont les courants provoqués par l'entrée d'un tributaire dans l'étang. La morphologie de certains deltas composites, comme nous l'avons observé dans la partie II de ce travail induit l'affrontement entre le cours d'eau et l'étang. Si la simple mise en évidence de ces courants peut se faire assez facilement par la mise en place d'une méthode de suivi dynamique simple, la mesure réelle et la cartographie sont elles, beaucoup plus complexes. La méthode employée sur la figure 90a est la suivante : une fois la bouée lâchée, une série de photos est prise à intervalles réguliers, à partir d'un pied et avec une focale fixe. Ce procédé ne permet pas de connaître la vitesse de progression mais donne une idée précise du déplacement du courant de subsurface. Dans le cas présenté, le courant entre droit dans l'étang, direction sud-ouest dans le prolongement du cours d'eau, puis oblique vers l'ouest jusqu'à plus de six mètres de l'embouchure ; un point de stabilité temporaire est atteint à la limite de la zone d'influence du cours d'eau, l'expérience ayant été conduite en l'absence de vent. Ce type de détermination n'a été utilisé que pour valider la présence ou non d'un courant hydrographique : les différents essais réalisés que ce soit au Theil, pour les différents affluents de l'étang de Cieux²²⁴ ou à la Pouge ont toujours été concluants. En revanche, la progression du courant étant dépendante tout à la fois du débit entrant, de la densité de l'eau et des conditions de vent, la diversité des situations

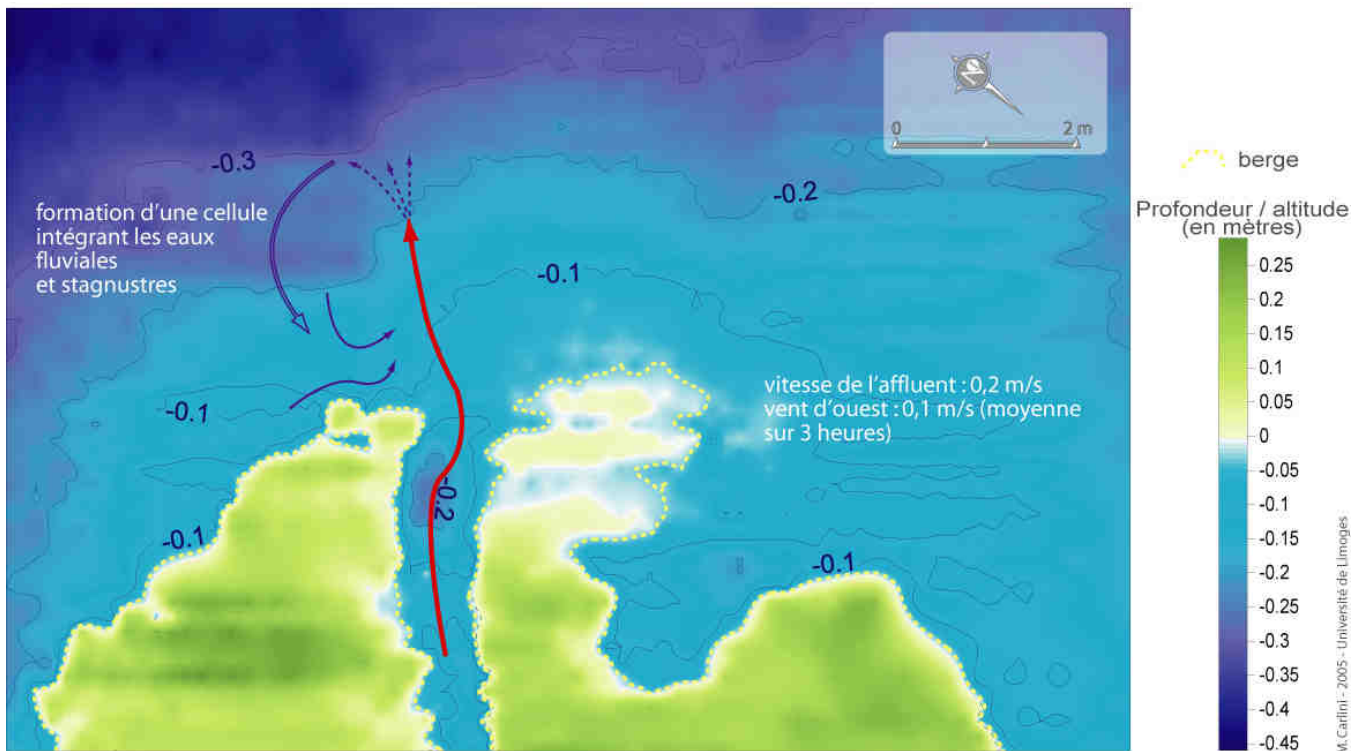
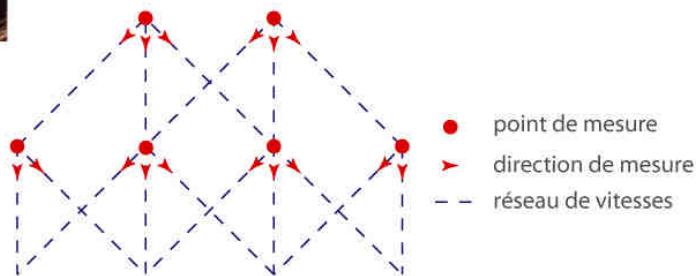
²²⁴ Dans le cas de la baie de Pranaud, en l'absence de vent et lorsque le débit entrant est important (entre 0,1 et 0,2 m³/s) la progression de la bouée dérivante est de 50 à 100 mètres.

Figure 90 : Mise en évidence, mesure et cartographie de courants hydrographiques de faible intensité en zone deltaïque peu profonde (étang du Theil)



◀ (a) Détermination d'un courant hydrographique de surface à l'aide d'une méthode de suivi dynamique. (Janvier 2001)

Principe d'utilisation du micro-mouinet pour déterminer les courants (b) ▶



- ↔ courant hydrographique
- ↔ courants de dérive
- ↔ zone de diffusion
- ↔ courant de retour

(c) Confrontation entre courants fluviaux et de dérive (juillet 2001)
D'après Graffouillère, 2001 et Touchart, 2002 modifié)

empêche d'utiliser cette méthode pour cartographier : là est la limite de ce type d'instrumentation.

Le recours à la multiplication de points de mesure pour recourir à un suivi statique des courants au niveau des deltas pose aussi un problème. Le courantomètre que nous utilisons doit, pour fonctionner correctement être utilisé pour une profondeur minimale de 1,25 mètres (75 centimètres sous la surface et 50 centimètres au-dessus du fond, cf I.3.3.1.2.) : son utilisation dans les zones deltaïques est compromise. L'opportunité existante consiste en l'utilisation détournée d'un micro-moulinet pour les plus faibles profondeurs. Cette méthode demande d'innombrables précautions car le micro-moulinet n'est pas en mesure de mesurer la direction du courant, seulement sa vitesse. La conception d'un maillage précis de points sur le terrain permet d'établir un réseau de lignes figurant les vitesses dans différentes directions (fig. 90b). L'utilisation du micro-moulinet permet de valider et de cartographier la présence de courants hydrographiques et de dérive à très grande échelle, pour des vitesses très faibles. La méthode de réseau de vitesse a permis de comprendre le fonctionnement présenté par la figure 90c. Le courant le plus fort est le courant provenant de l'entrée du tributaire qui ne dépasse pas 0,2 m/s et dont la direction est clairement dictée par la morphologie immergée du delta. Les courants de dérive sont plaqués le long de la berge, et leur vitesse est très faible (9 cm/s) ; néanmoins, lorsque l'on s'éloigne, ces courants se renforcent (19 cm/s). Cette observation a poussé à prendre d'autres mesures et à mettre en évidence un courant de retour constituant une cellule intégrant à la fois les eaux fluviales et stagnantes. Si l'emprise spatiale de ces courants est très réduite, ils sont suffisamment pérennes pour continuer de circuler lors de la prise de mesures au moulinet.

La mise en évidence de ce courant permet de mieux comprendre la morphologie du delta et son évolution. La méthode de mesure employée, si elle a donné des résultats

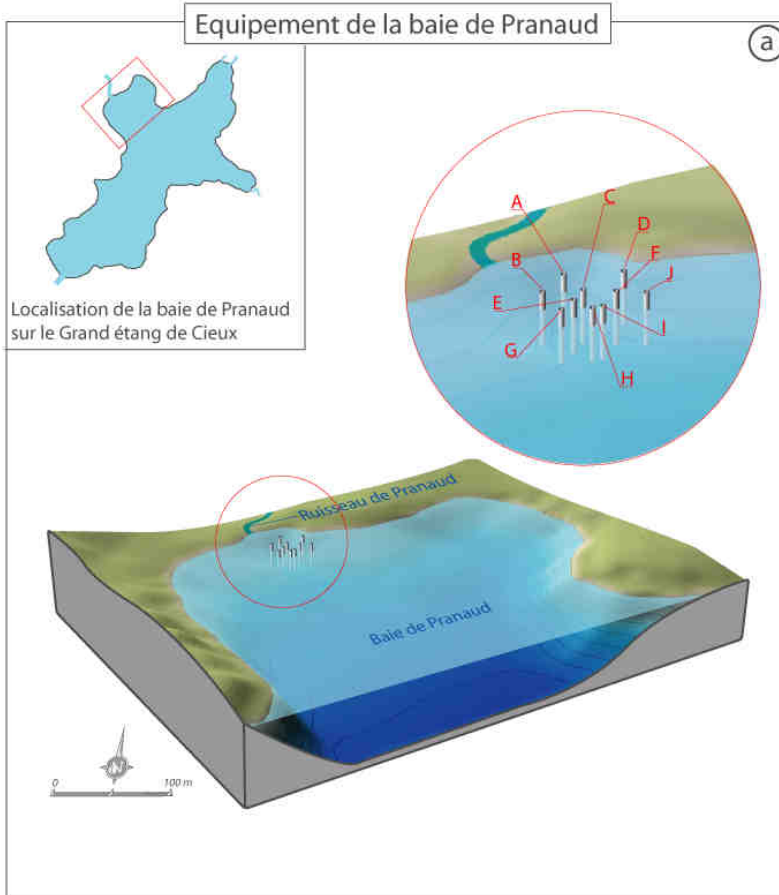
concluants, est tout de même invasive et susceptible de perturber les courants objets de l'étude. Vu les restrictions dues à la profondeur que nous avons déjà abordées, il reste peu de solutions pour cartographier précisément un courant hydrographique.

Nous avons choisi de nous tourner pour cela vers un potentiel courant de densité, dont la mesure peut être réalisée à l'aide de thermomètres enregistreurs de petite taille.

III.2.2.2. Le courant de densité en Baie de Pranaud

Comme pour certaines parties de ce travail, l'étude du courant de densité en baie de Pranaud résulte d'une réflexion et d'un travail d'équipe. Suite à des campagnes menées en été, lors de fortes stratifications thermiques et d'observations ponctuelles dans la baie ou dans l'affluent lui-même le choix fut fait d'étudier le courant entrant dans la baie par sa dynamique thermique. Tout d'abord, quelques mesures ponctuelles ont permis de délimiter le périmètre dans lequel devrait être mis en place le suivi. S'agissant de l'emploi de thermomètres, le suivi est assurément de type statique : il est donc nécessaire qu'un maillage suffisamment précis soit mis en place pour cartographier le courant. En outre, il faut travailler en trois dimensions, tout en usant d'un nombre de thermomètres enregistreurs nécessairement limité. Néanmoins, 19 sondes purent être utilisées lors de la campagne du 31 juillet 2003. Ces sondes furent ordonnées sur des pieux placés dans la partie amont de la baie (encadré γ a) et ont fonctionné entre 10h40 et 16 heures à raison d'une mesure toute les trois minutes. Quatre transects à dix mètres d'intervalle sont réalisés sur le terrain (encadré γ b) les pieux sont repérés par G.P.S. mais aussi triangulés entre eux à l'aide d'un décamètre pour minimiser les erreurs de localisation. Le détail de la répartition horizontale et verticale des sondes est détaillé sur l'encadré γ b.

mesures terrain : Carlini, Papon, Savy - Conception et réalisation : Carlini, Savy 2005

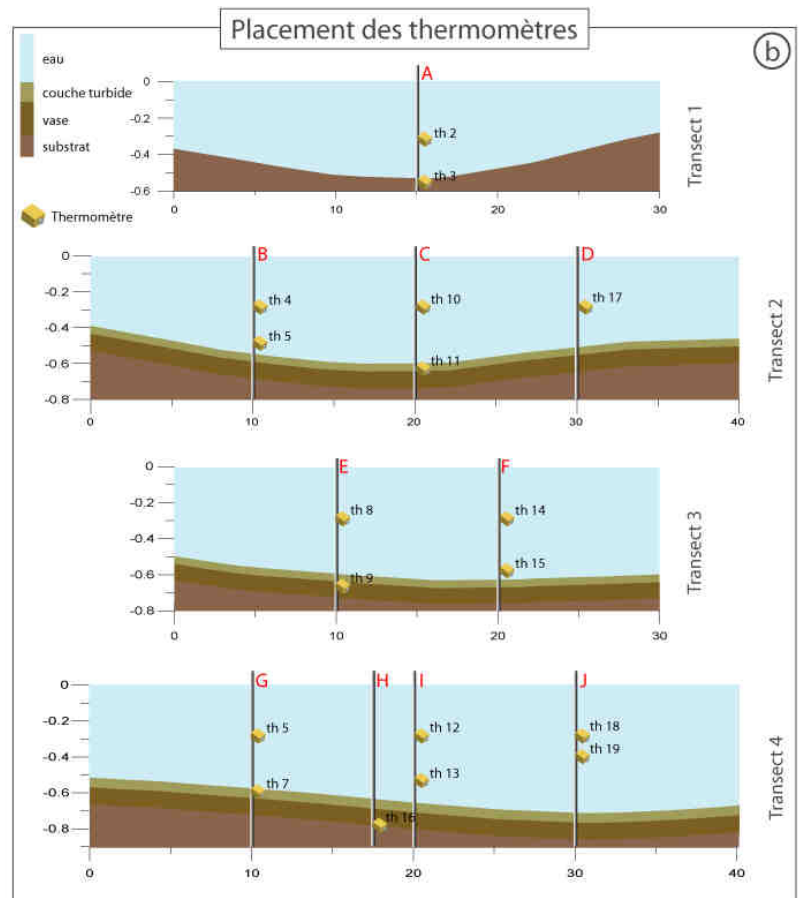


Nous avons choisi de mettre en évidence la présence d'un courant de densité, imposé par les températures fraîches de l'eau du tributaire entrant dans une baie surchauffée d'un étang limousin durant l'été 2003. L'étang de Cieux, de 34,6 ha et de 3,6m de profondeur maximale, est alimenté par trois tributaires dont deux de rang un et un de rang deux. Nous avons équipé la baie dans laquelle débouchait le ruisseau de Pranaud d'un maillage de pieux supportant des sondes thermiques enregistreuses. Ces 19 sondes ont fonctionné le 32 juillet 2003 de 10h40 à 16h durant les heures les plus chaudes de la journée. Elles étaient programmées pour mesurer et enregistrer une température de l'eau toutes les trois minutes.

Les sondes thermiques ont été réparties sur quatre transects espacés de 10 mètres et équipés différemment en fonction d'observations préalables.

Le premier transect, situé à l'arrivée de l'émissaire, ne comporte qu'un pieu et deux thermomètres. Les transect 2,3 et 4 comportent plusieurs pieux pour saisir la composante horizontale du courant de densité.

En outre les sondes sont disposées sur toute la tranche ainsi qu'en dessous de l'interface eau-sédiment dans le but de localiser le courant de densité dans sa dimension verticale.

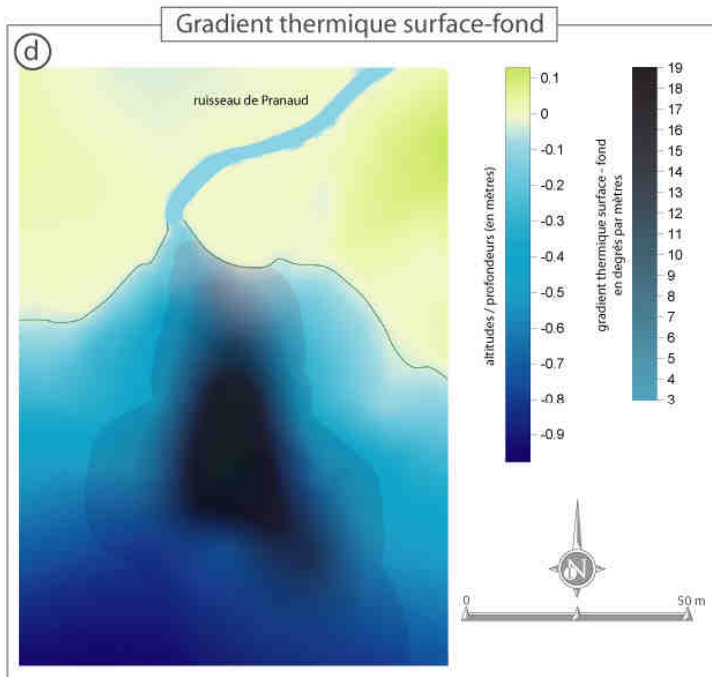
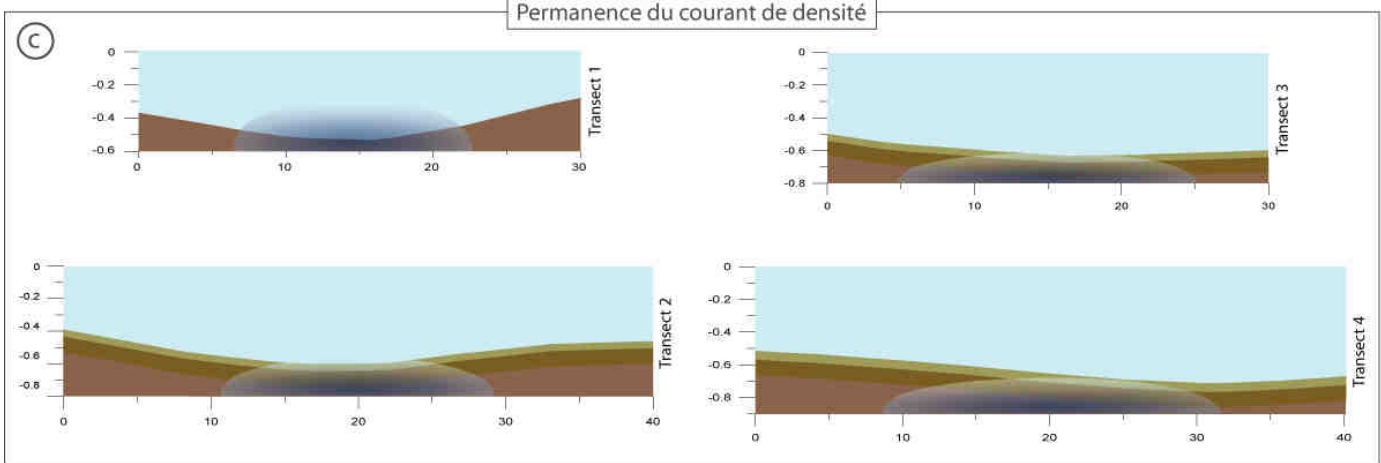


Encadré γ

Mise en évidence d'un courant de densité dans l'étang de Cieux

mesures terrain : Carlini, Papon, Savy - Conception et réalisation : Carlini, Savy 2005

Encadré γ



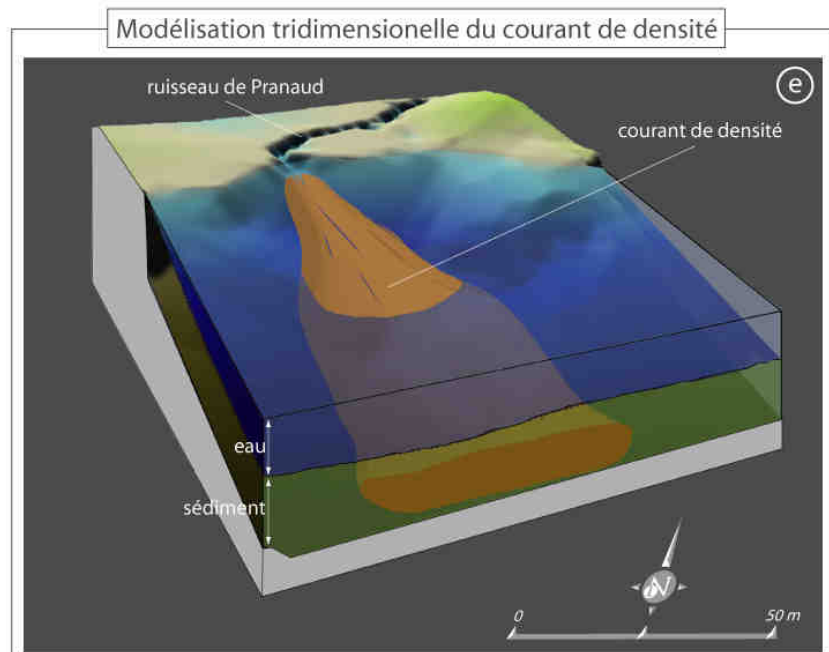
Une fois les données récoltées et analysées, l'examen des moyennes thermiques sur la période de mesures montrait immédiatement des différences notables, les valeurs moyennes étant comprises entre 18,6 et 24,8°C sur l'ensemble du maillage. Des gradients thermiques très forts sur la tranche d'eau, compris entre 10 et 19,2°C/m, ont révélé la permanence du courant de densité sur la durée de l'expérimentation tandis que d'autres beaucoup plus faibles (de 1 à 2,5°C/m) caractérisent une stratification thermique classique dans la tranche d'eau.

Nous avons pu isoler spatialement la persistance du courant de densité sur la période en montrant un panache qui s'élargit et gagne en profondeur à mesure qu'il pénètre dans la baie. Nous avons pu le suivre en dessous de l'interface eau-sédiment.

La modélisation tridimensionnelle prend en compte les données recueillies par les thermomètres, mais aussi des observations ponctuelles pour représenter l'aval du transect 4.

Le couplage des données permet de visualiser le point de plongée du panache sous l'interface eau-sédiment et son élargissement progressif à mesure qu'il avance dans la baie.

Néanmoins, il n'a pas été techniquement possible de mesurer la disparition du courant en aval



Au total, 2964 données thermiques ont été enregistrées : un travail sur les moyennes a permis de mettre en évidence la permanence du courant de densité sur la période, par transect d'abord (encadré γc). Le jour de cette campagne, l'étang de Cieux connaissait une stratification thermique qui se traduisait dans la baie de Pranaud par un gradient surface-fond situé entre 1 et 2,5°C/m. La température du ruisseau de Pranaud a varié entre 16°C et 19,6°C pendant la période, tandis que l'eau de surface variait, elle, de 23°C à 27°C. La cartographie du gradient thermique surface-fond révèle la présence du courant de densité (encadré γd) : les valeurs de gradient, toujours supérieures à 10°C/m atteignent 19,2°C/m au niveau du transect 2, vers 15 heures. La cartographie du gradient sur les moyennes thermiques dessine un panache qui s'élargit à mesure qu'il avance dans la baie ; son étude en coupe par transects nous a déjà permis de nous rendre compte qu'il s'enfonçait très rapidement. Certains thermomètres ont été enfoncés dans le sédiment meuble, à l'instar de la sonde 16 située sur le pieu H (encadré γb). Cette sonde permet de se rendre compte que le cœur du courant de densité circule au sein même du sédiment : la température moyenne sur la période donnée par la sonde 13 située 13 cm au dessus du fond est de 24,1°C alors que la température moyenne de la sonde 16 enfoncée de 12 cm dans le sédiment est de 22,8°C. En comparaison, la température moyenne du sédiment hors du courant est de 24°C (thermomètre 9, placé à 10 cm de profondeur dans le sédiment). Deux paramètres n'ont pu être techniquement mesurés, il s'agit de la disparition totale du courant en aval, ainsi que la limite inférieure de ce dernier dans le sédiment. Néanmoins, grâce à des mesures morphologiques complétant la bathymétrie d'origine (profondeur et épaisseur de sédiment), il a été possible de reconstruire fidèlement le modelé à grande échelle de la zone étudiée. La encadré γe est une modélisation tridimensionnelle du courant de densité de la baie de Pranaud, tel qu'il était probablement le 31 juillet 2003 entre 10h40 et 16h. La nature physique

de ce courant, différentiel thermique important entre les eaux fluviales et stagnustres, lui confère sa stabilité tout au long de la journée. La modélisation montre bien l'élargissement rapide du courant ainsi que son point de plongée dans le sédiment meuble.

Cette expérience est riche d'enseignements à la fois sur le fond et sur la forme. Tout d'abord, elle identifie des courants de densité en étang ; l'étagement morphologique que nous évoquions dans la deuxième partie de ce travail se complète d'un étagement des processus physiques et dynamiques. Ensuite, la réalisation du modèle comme la conception méthodologique amenant au placement des sondes démontre la nécessité de s'appuyer sur l'étude du modelé et de traiter toutes les thématiques conjointement : morphologie stagnustre, limnologie physique et dynamique. Enfin, la conception, le travail de terrain comme l'interprétation nécessitent de recourir au travail en équipe, comme le montre l'ensemble de l'encadré γ .

III.2.2.3. Les courants de dérive

Les courants de dérive sont ceux dont l'étude est la plus complexe : les problèmes sont les mêmes que pour l'étude des courants hydrographiques, étendus à la superficie totale du plan d'eau, et avec une plus grande instabilité des mouvements d'eau.

III.2.2.3.1. Une grande difficulté de mesure

Pour tenter de cartographier ces derniers plusieurs conditions doivent être réunies : tout d'abord, il convient de coupler les méthodes eulériennes et lagrangiennes, car nous ne disposons que d'une bouée et d'un courantomètre. Il faut ensuite multiplier les points de mesure, mais les conditions climatiques, et notamment le vent, doivent peu varier. Plusieurs essais ont d'abord été menés sur

l'étang de Cieux, celui de la Pouge, ainsi que sur les retenues de Lavaud et du Mas Chaband, sur le haut bassin de la Charente, ceci afin d'éprouver le matériel et d'optimiser son utilisation : certains résultats partiels seront évoqués ultérieurement. Les courants se montrant très instables lorsque le vent augmente, la campagne la plus intéressante fut menée en été sur l'étang de Cieux.

Entre 10 heures et 17h30, le 25 juillet 2003, nous procédâmes à plusieurs lâchers de la bouée dérivante équipée de la dérive profonde et du récepteur GPS. Dans le même temps l'embarcation était immobilisée selon le protocole établi dans le I.3. et le courantomètre était immergé à différentes profondeurs. Au total, la bouée équipée du courantomètre fut immergée trois fois et la bouée dérivante mise à l'eau trois fois également. Durant les mesures statiques et dynamiques, menées par couple, la vitesse et la direction du vent étaient enregistrées toutes les minutes. Cette campagne fut la plus riche en enseignements car plusieurs conditions étaient réunies : tout d'abord, une relative stabilité du vent autant dans sa direction que dans son intensité (fig. 91a). La moyenne de vent sur la campagne²²⁵ est de 0,76 m/s et les rafales n'ont jamais dépassé 2m/s. Le vent a majoritairement soufflé du nord, près de 50 % du temps ; 75 % du temps si on considère un intervalle nord-ouest / nord-est. Ensuite, les premières mesures des courants ont montré une relative stabilité de ces derniers ce qui a poussé à multiplier les mesures.

III.2.2.3.2. La validité de la bouée dérivante à dérive profonde

Le problème potentiel majeur dans l'exploitation de ce matériel était de s'assurer que la dérive avait un ascendant suffisant sur la partie émergée exposée au vent. Les problèmes peuvent être de deux ordres : une erreur pure et simple si la

²²⁵ La validation de l'hypothèse évoquée en méthodologie se confirme ici : la mesure du vent doit se faire au plus près du plan d'eau : les mesures de notre station météorologique ne sont pas satisfaisantes. Non seulement il s'agit de moyennes horaires, mais en outre le vent mesuré n'a ni la même vitesse moyenne, ni la même direction.

bouée est exclusivement tractée par le vent ou une déviation de la mesure du courant. Evidemment, ces problèmes devaient être minimisés par la conception de la partie sommitale en stirodur ainsi que par l'enfoncement de la bouée à l'aide du lest. Néanmoins rien ne pouvait être totalement validé sans des expériences de terrain concluantes : les premières mesures donnèrent des direction de courants profonds déviant de l'axe principal du vent, mais cela ne nous suffit pas. La validation incontestable de notre matériel est apparue lors de la campagne majeure sur Cieux. Durant une heure de mesure, entre 14h30 et 15h30, alors que le vent était de NNE avec une vitesse moyenne de 0,73 m/s, la bouée dérivante, - dérive réglée entre 70 et 150 cm de profondeur²²⁶-, a suivi une course orientée vers le NNO, face au vent, avec une vitesse moyenne de 2,1 cm/s. La bouée dérivante était alors située au NO de la bouée fixe 1 (fig. 91b).

L'utilisation de ce matériel étant validé par cette expérience, les données seront prises en compte lors de la modélisation des courants. Deux précision sont à apporter pour une utilisation correcte de ce type de bouée : la profondeur doit être suffisante pour que les 80 cm de dérive soient efficaces, mais ne touchent pas le fond²²⁷ ; le vent doit être correctement pris en compte car des vents trop violents vont nécessairement entraîner la partie supérieure de la bouée et fausser les mesures.

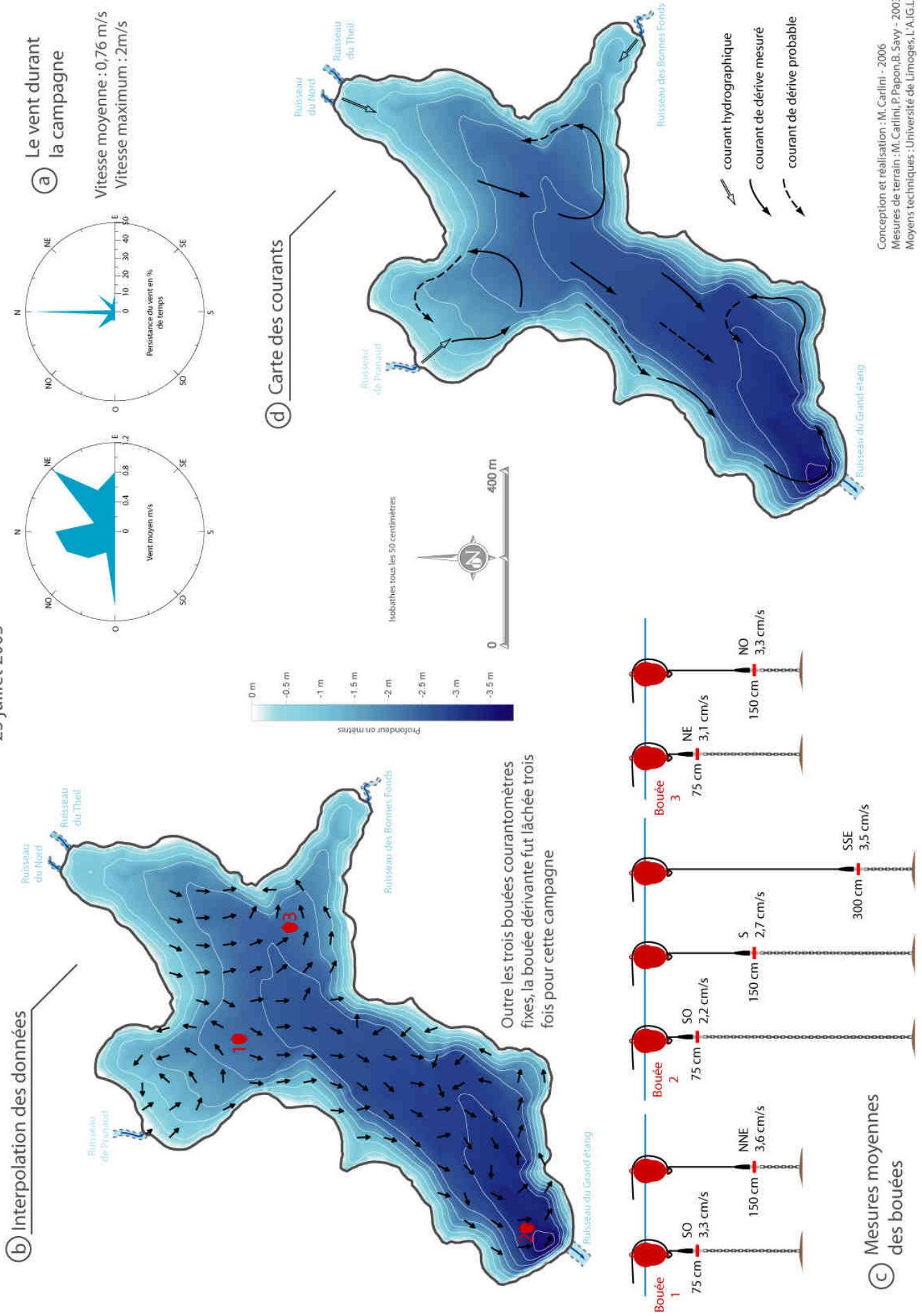
III.2.2.3.2. La réalisation d'une carte de courants pour l'étang de Cieux

Les premières séries de mesures auraient pu nous pousser à abandonner l'idée d'une cartographie des courants en étangs, tant ces derniers apparaissaient changeants en direction comme en vitesse. La relative constance du facteur éolien et des courants de dérive évoquées plus haut permettent d'esquisser une carte de courantologie stagnustre se fondant uniquement sur des mesures.

²²⁶ Comme pour toute cette campagne.

²²⁷ On peut considérer que l'utilisation est raisonnable à partir de 1,75 mètres de profondeur.

Figure 91 : Modélisation des courants de l'étang de Cieux entre 70 et 150 cm de profondeur, par vent de Nord
25 juillet 2003



Conception et réalisation : M. Carlini - 2006
Mesures de terrain : M. Carlini, P. Papon, B. Savy - 2003
Moyens techniques : Université de Limoges, L'AGLLE

En observant les trois bouées statiques représentant les vitesses moyennes et l'orientation moyenne des courants durant la période de mesure on se rend compte que le courant subit une variation d'orientation systématique entre la surface et le fond (fig. 91c). Les mesures de la direction du courant sont restées très stables à chaque point de mesure. Les vitesses mesurées sont conformes à ce que l'on pouvait attendre : les courants de dérive ont une vitesse « allant de 1,5 à 5 % de celle du vent » (Touchart, 2002.p222). En les comparant à la vitesse moyenne du vent, elles doivent se situer entre 1,2 et 3,8 cm/s. Si les vitesses instantanées se rapprochent toujours de ces valeurs, leurs variations permanentes ne nous permet pas de les comparer entre elles, ni de déduire un phénomène de l'augmentation apparente de la vitesse avec la profondeur.

Les différentes courses de la bouée dérivante obéissent au même ordre de grandeur dans la moyenne des vitesses, entre 2 et 2,5 cm/s. Le système d'enregistrement des points du récepteur GPS, à intervalles de temps régulier montre aussi des accélérations de la bouée pouvant dépasser 5 cm/s.

La relative stabilité des courants tout au long des mesures nous a poussés à utiliser simultanément les données de toute la journée. Dans d'autres conditions, il aurait fallu disposer d'au moins trois courantomètres, de trois bouées dérivantes, trois barques et neuf personnes pour faire fonctionner le tout. L'ensemble des données de direction pour chacun des points, celles des bouées fixes comme celles enregistrées par la bouée dérivante, ont permis de faire un squelette des courants mesurés entre 75 et 150 cm de profondeur²²⁸. Nous avons choisi d'interpoler une grille à partir de cette base (fig. 91b), grille de laquelle les directions trop éloignées d'une mesure ont été soustraites. Cette carte a servi de base à la réalisation de la carte

²²⁸ Aucun de nos dispositifs ne permet de mesurer correctement le courant de surface : la petites bouées dérivantes ne peuvent être équipées de GPS, la bouée équipée du récepteur doit avoir sa dérive profonde et le courantomètre doit être au moins à 75 cm sous la surface.

des courants elle-même. Au final seules les directions sont représentées, l'interpolation des vitesses étant trop aléatoire à partir de nos mesures.

La carte réalisée montre l'importance de la morphologie sur l'évolution des courants, comme nous l'avions supposé plus avant dans le propos. Dans la partie médiane de l'étang, les courants s'allongent vers le sud-ouest alors que le vent est majoritairement de nord (fig. 91d). Au niveau de la digue, le courant tourne vers le sud puis s'oriente au sud-est. Cette rotation est d'autant plus sensible en profondeur : il pourrait ici s'agir d'un point de plongée avec un courant de retour profond, opposé au courant superficiel. Le courant semble remonter plus au nord-est avant d'être repris par l'orientation principale, sud-ouest. Une petite cellule semble présente mais nos mesures n'ont pas montré une grande stabilité du phénomène. À l'inverse nous avons pu constater la présence d'une cellule cyclonique dans la baie de Pranaud. C'est à cet endroit que notre bouée dérivante est remontée face au vent. Plusieurs mesures statiques et dynamiques ont permis de mettre en évidence le phénomène. Cette cellule semble intégrer le courant hydrographique créé par le ruisseau de Pranaud, à l'instar de ce qui se passe dans le plus petit étang du Theil (fig. 90c) mais à une toute autre échelle. L'importance du courant de densité profond produit par le ruisseau entrant dans un plan d'eau surchauffé (jusqu'à 31°C mesurés en surface) mis en évidence dans l'encadré γ est de nature à perturber le courant de dérive. La formation de la cellule est donc contrainte à la fois par la morphologie de la baie dont l'amont est très peu profond et par le fonctionnement thermo-dynamique particulier induit par le courant de densité profond.

Au niveau de la baie des Bonnes Fonds, le courant provenant du nord semble obliquer à l'approche de la berge pour remonter ensuite, selon le même principe qu'à l'approche de la digue mais avec des vitesses plus faibles.

Les mesures partielles réalisées dans l'étang de la Pouge comme dans un étang à niveau constant en amont de la retenue de Lavaud, dans le bassin de la Charente, destinés à tester la bouée nous ont montré que les courants étaient en grande partie influencés par des plans d'eau allongés. Les courants y sont plus linéaires et la morphologie locale canalise le vent dans le sens longitudinal du plan d'eau. Dans le cas de vents transversaux au plan d'eau, les mesures ne furent pas concluantes.

Plusieurs enseignements sont à tirer de cette expérience sur les courants en étangs. La nature instable de cette hydrodynamique la rend compliquée à mesurer et donc à cartographier. Malgré les nombreuses mesures que nous avons effectuées, seules une petite portion est réellement exploitable. Mais la carte produite sur l'étang de Cieux représente une réalité de terrain rigoureusement mesurée, et elle est riche d'informations. Des courants temporaires s'établissent en étang, et à l'instar des courants lacustres ces derniers connaissent une déviation par rapport au vent, ici due à la morphologie.

La présence de courant est une indication supplémentaire de l'étagement et de la zonation de processus limnologiques dans les étangs, à une échelle allant de quelques heures à quelques jours. Il serait probablement impossible de tirer des règles générales ou un modèle fonctionnel de courantologie stagnustre tant le nombre et la diversité de ces plans d'eau est importante. Néanmoins, nos mesures montrent que les plans d'eau de vallée encaissée réagissent aux forçages par des courants plutôt linéaires alors que les étangs de confluence ou de plaine se prêtent à la mise en place de cellules relativement pérennes pour des processus stagnustres.

Il est déterminant de savoir que ces courants existent et qu'il est possible de les mesurer, pour répondre à diverses questions allant de la localisation d'une plage artificielle jusqu'au déplacement de pollutions.

III.3. Le fonctionnement limnique global

Morphologie, volume de l'étang et mouvements de l'eau sont liés, comme nous avons pu le voir précédemment. L'étude de la morphologie précède celle des sédiments, du bilan hydro limnologique et de l'étude des courants, comme la géographie limnologique doit précéder les études chimiques et biologiques dans les plans d'eau. Cet ordre est nécessaire à la compréhension du fonctionnement global de l'étang. Il faut se pencher ici sur ce qui « est sans aucun doute le fait majeur de toute la limnologie »²²⁹ : l'étagement thermique. Ce point n'a pas encore été abordé dans ce travail car il a été et est encore l'objet d'études approfondies concernant les étangs limousins. Néanmoins ce paramètre est essentiel pour comprendre la globalité du fonctionnement des étangs. Un rappel du fonctionnement thermique des étangs de notre étude permettra d'éclairer l'influence de la morphologie sur le fonctionnement physique des étangs, ouvrant ainsi la porte à la possibilité d'aménager raisonnablement en tenant compte des paramètres réels du milieu.

III.3.1. Le comportement thermique des étangs limousins

Dès le début de la deuxième partie de ce travail, nous avons rappelé que le fonctionnement thermique des étangs limousins était complexe. Les travaux effectués ont le grand avantage de prendre place sur une partie des étangs de notre étude²³⁰. La température de l'eau d'un étang ne décroît pas toujours régulièrement de la surface vers le fond, une stratification est possible à l'instar des fonctionnements lacustres.

²²⁹ Touchart, 2001, p202.

²³⁰ Il n'y a ici aucun hasard, simplement une volonté permanente de travailler en équipe, qui plus est sur des terrains en partie communs.

III.3.1.1. Stratification directe, inverse et homothermie

Dans les lacs d'eau douce, l'évolution de la température avec la profondeur peut se faire suivant trois modèles : elle peut croître ou décroître avec la profondeur, ou rester stable. Quoiqu'il en soit, en eau douce, le profil de température se dirige dans un seul sens. Ces différents états thermiques des masses d'eau furent mis en évidence à la fin du XVIII^e siècle²³¹.

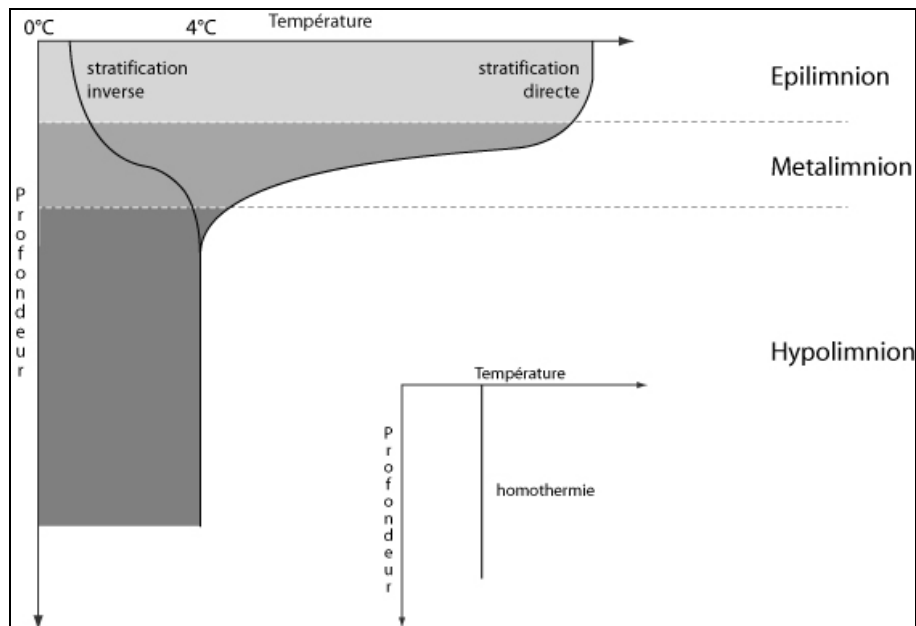


Figure 92 : Profils thermiques en lac d'eau douce
(d'après Dussart, 1966 ; Touchart, 2001 et Savy, 2006, modifié)

Les trois états thermiques présentés par la figure 92 se succèdent durant le cycle annuel. Durant la période estivale, la couche superficielle, réchauffée par les radiations thermiques, flotte sur les eaux plus froides des profondeurs. Durant la saison froide, la stratification peut être inverse du fait de la baisse de la densité de l'eau douce en deçà de 4°C²³². Lorsque la valeur de température est quasiment constante de la surface au fond, on se trouve dans une situation d'homothermie.

²³¹ Par de Saussure, philosophe suisse (Touchart, 2001, p205)

²³² On rencontre dans les ouvrages de limnologie soit la valeur de l'eau distillée de 3,98°C soit celle de 4°C. Citons ici Hutchinson (1957), Dussart (1966), Wetzel (1983), Lemmin (1995), Touchart (2001, 2002), Savy (2006).

La forme caractéristique du profil thermique stratifié provient de la présence d'une couche de saut thermique, appelée métalimnion. Cette couche thermique, ainsi que ses bornes supérieures et inférieures sont difficiles à définir²³³, et ce n'est assurément pas l'objet de notre travail. Cette strate, par son fort gradient de température, et donc de densité, est responsable de l'aspect convexo-concave du profil thermique stratifié.

Il s'agit là, brièvement résumé, du fonctionnement thermique lacustre. L'épaisseur de la tranche d'eau est beaucoup plus faible dans les étangs de notre étude, par rapport aux lacs qui ont permis de mettre en évidence le phénomène de stratification thermique. L'intégralité l'étang est un épilimnion ; néanmoins les sauts thermiques sont importants dans les étangs (Touchart, 2002, p110).

Les données présentées ici sont celles mesurées par les thermomètres enregistreurs identiques à ceux utilisées pour décrire le courant de densité. Il ne s'agit pas de données inédites, elles ont été déjà présentées antérieurement²³⁴. Les thermomètres sont placés sur des chaînes et enregistrent la température toutes les heures « tous les 30 cm les 2,30 premiers mètres, puis tous les mètres jusqu'au fond » (Touchart, 2001, p235).

²³³ Touchart, 2001, p 210 ; Savy, 2006, p 158.

²³⁴ Notamment dans « De la température de l'eau à la géographie des lacs » (Touchart, 2001), « Limnologie physique et dynamique » (Touchart, 2002) ainsi que « Les étangs limousins en questions » (Touchart & Graffouillère, 2004).

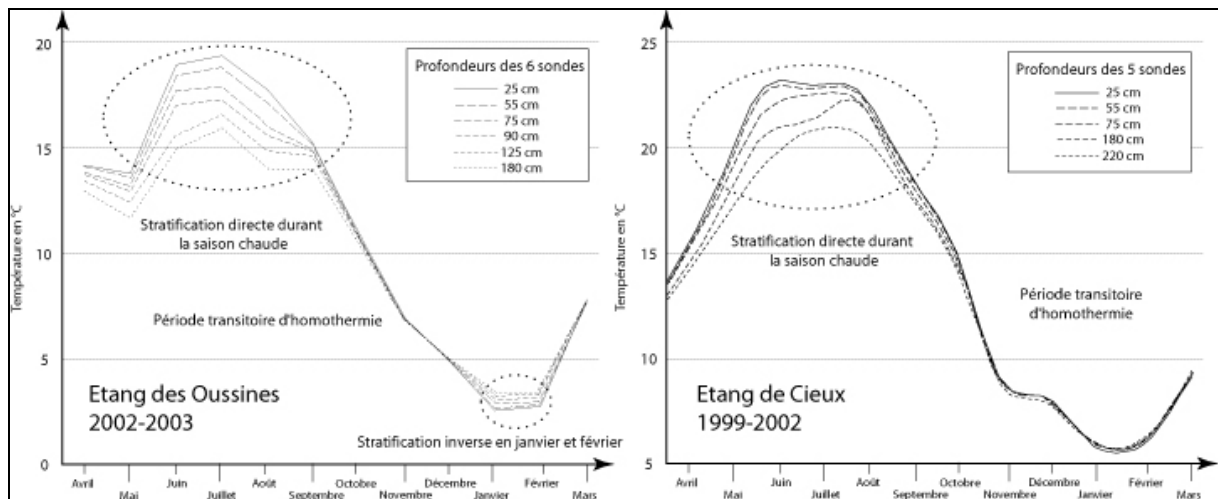


Figure 93 : Cycle thermique saisonnier de deux étangs limousins (d'après Touchart & Graffouillère, 2004, modifié)

Pour comprendre le comportement thermique des étangs-lacs limousins, Il est intéressant de se pencher sur les moyennes mensuelles (fig. 93). Dans le cas de l'étang des Oussines comme celui de Cieux, la stratification thermique directe est très nette de mai à septembre. Le reste de l'année, une situation d'homothermie prime comme c'est le cas pour la période 1999-2002 à Cieux. L'étang des Oussines présente en 2003 une stratification inverse, lors des mois de janvier et février, due à l'altitude de l'étang combinée à un hiver rigoureux.

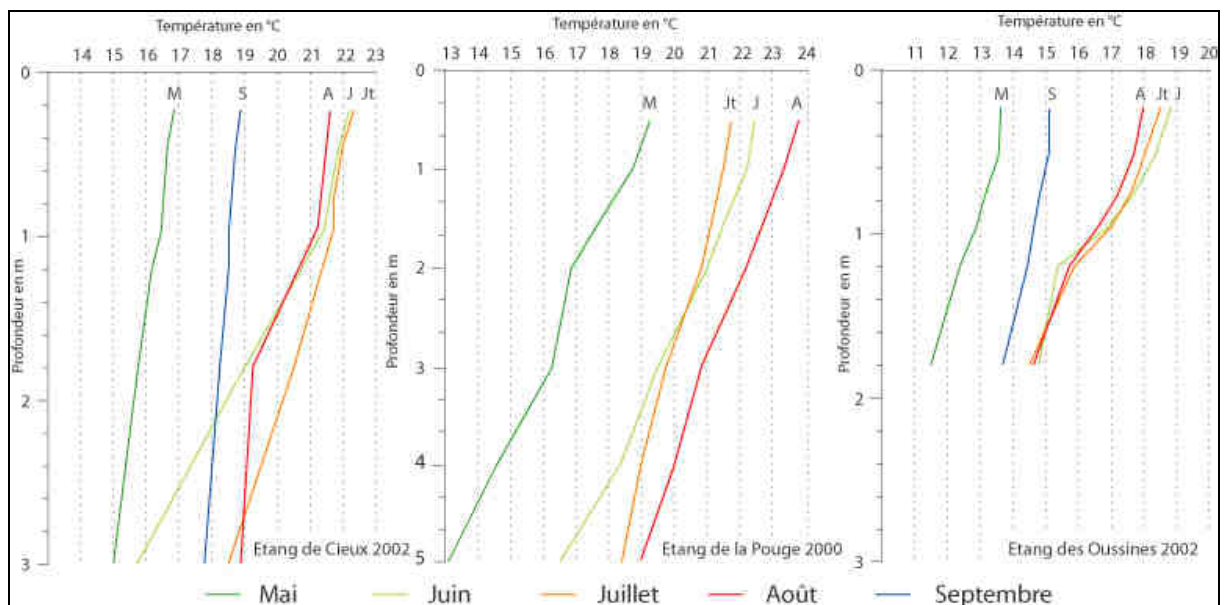


Figure 94 : Profils thermiques mensuels des étangs de Cieux, de la Pouge et des Oussines (d'après Touchart & Graffouillère, 2004, modifié)

Les profils thermiques mensuels permettent d'apprécier le réchauffement des étangs en saison chaude, pour l'année 2000 dans le cas de la Pouge et 2002 pour les Oussines et Cieux. Pour ces derniers, on note un réchauffement global au début de l'été, jusqu'au mois de juillet ; par la suite, jusqu'au mois de septembre, les eaux se refroidissent. La température des eaux de surface augmente plus que celle des eaux de fond : respectivement 5,3°C d'augmentation contre 3,9°C entre mai et juillet pour l'étang de Cieux ; 5,2°C d'augmentation contre 3,3°C pour l'étang des Oussines. En outre, les courbes s'inclinent en avançant dans la saison, dénotant dans les moyennes mensuelles l'augmentation de la fréquence des stratifications directes. Dans le cas de l'étang de la Pouge, la situation est différente : dès le mois de mai l'eau de surface est nettement plus chaude que l'eau de fond et la décroissance de la température avec la profondeur est de plus en plus rapide : la stratification est déjà installée en mai 2000.

III.3.1.2. Typologie thermo-mictique des étangs limousins

La mise en place d'une stratification thermique stagnustre estivale en Limousin est donc une réalité de terrain même si son existence est encore parfois mise en doute. Aborder, même succinctement, la seule typologie thermo-mictique²³⁵ réalisée sur des étangs en Limousin, semble ici incontournable.

Basée sur plus de 800 000 données thermiques, il s'agit de la première typologie présentant des seuils de fonctionnement thermique quantifiés pour l'ouest de la France (Touchart, 2002, pp 267-270). D'après cette typologie, le seuil entre polymicticité continue et discontinue se situe entre 0,8 et 1 mètre de profondeur : en dessous de cette valeur, le plan d'eau est brassé en permanence y compris en saison chaude. Cela ne signifie pas qu'une stratification est impossible, mais elle est

²³⁵ Cette typologie s'appuie à la fois sur la thermique et sur les rythmes de brassage.

éphémère²³⁶. Vers 3 à 4 mètres de profondeur, les étangs polymictiques discontinus ne sont que peu brassés durant la période estivale, souvent à l'occasion de dépressions durables. Pour ces plans d'eau on considère que l'épilimnion est posé sur « un segment de métalimnion » (Touchart, 2001, p 322). Enfin, à partir de 5 à 6 mètres, les étangs dont le fetch est réduit connaissent une micticité saisonnière. Leur stratification directe est stable durant toute la période chaude et l'on peut considérer qu'il se comportent, pour la question thermique, comme des lacs (Touchart, 2001, p325).

Une zonation thermique du Limousin est possible d'après les mesures et les caractéristiques dégagées : les étangs pelliculaires de Basse-Marche sont polymictiques continus, ainsi que les étangs de tourbière les moins profonds de la montagne limousine. En fait, même si il est impossible d'envisager des mesures thermiques à l'échelle de la région toute entière, il est raisonnable de penser que de nombreux étangs limousins sont dans cette situation. L'impact de la morphologie pré-submersion évoquée longuement dans notre deuxième partie pousse à croire que dans les monts du Limousin va se trouver la catégorie polymictique discontinue. Cela est confirmé par les mesures (Touchart, 2001, p322) et Cieux en est un bon exemple.

Enfin, on peut trouver dans les monts de Châlus des étangs dont la profondeur maximale excède 6 mètres et dont le fonctionnement monomictique chaud est clairement lacustre.

III.3.1.3. Les relations entre thermique et hydrodynamique

Plusieurs phénomènes amènent une destruction de la stratification et donc conduisent à l'homothermie au sein de la tranche d'eau. Ces phénomènes illustrent

²³⁶ « (...) la convection libre est capable d'homogénéiser la tranche d'eau chaque nuit » (Touchart, 2002, p 272)

parfaitement la relation étroite qui existe entre la thermique et l'hydrodynamique d'un plan d'eau.

Le refroidissement de la couche superficielle de l'eau due aux conditions atmosphériques déclenche un mécanisme de convection libre. L'eau plus froide descend à cause de l'augmentation de sa densité et l'épaisseur d'eau refroidie grandit ; ce phénomène peut déboucher sur une homothermie totale de la tranche d'eau. Des expériences montrent que cette convection n'est pas homogène mais qu'elle se fait par des panaches d'ordre décimétriques²³⁷.

L'action du vent sur le plan d'eau produit des courants, comme nous avons pu le voir précédemment. Ce phénomène engendre un brassage mécanique de la tranche d'eau ; la durée et l'amplitude de ce forçage externe sont plus réduites car produites par des phénomènes de type « coup de vent ». « Le mouvement des masses d'eau près de la surface, dans la direction du vent, ne peut se poursuivre sans avoir un effet sur le reste de la colonne d'eau. Il doit être équilibré d'après le principe de continuité, par un courant de retour compensatoire dans les couches profondes » (Lemmin, 1995, p66). L'importance d'un coup de vent sur un plan d'eau va dépendre de la course du vent ou fetch : plus cette dernière sera longue et plus les événements venteux produiront des courants susceptibles de déstratifier.

Enfin les courants de densité sont symptomatiques de la liaison étroite entre thermique et hydrodynamique puisque dans le cas d'un affluent plus dense, comme nous l'avons vu pour le ruisseau de Pranaud, l'affluent crée la poussée horizontale du courant mais son positionnement en profondeur résulte de sa température. Ce cas précis a fait l'objet d'un traitement avancé précédemment, nous n'y reviendrons pas.

²³⁷ « (...) différents panaches verticaux (ou cheminées) de dimension limitée se formeront, dans lesquels l'eau froide va descendre » (Lemmin et al., 1999, p57)

Notre thématique concernant le fonctionnement global des étangs, après avoir abordé des notions fondamentales sur la thermique lacustre et stagnustre, nous allons maintenant aborder l'interaction entre la morphologie stagnustre et le fonctionnement physique de l'étang.

III.3.2. Influence de la morphologie stagnustre sur le fonctionnement physique

III.3.2.1. Etang de plaine et étang de vallée encaissée

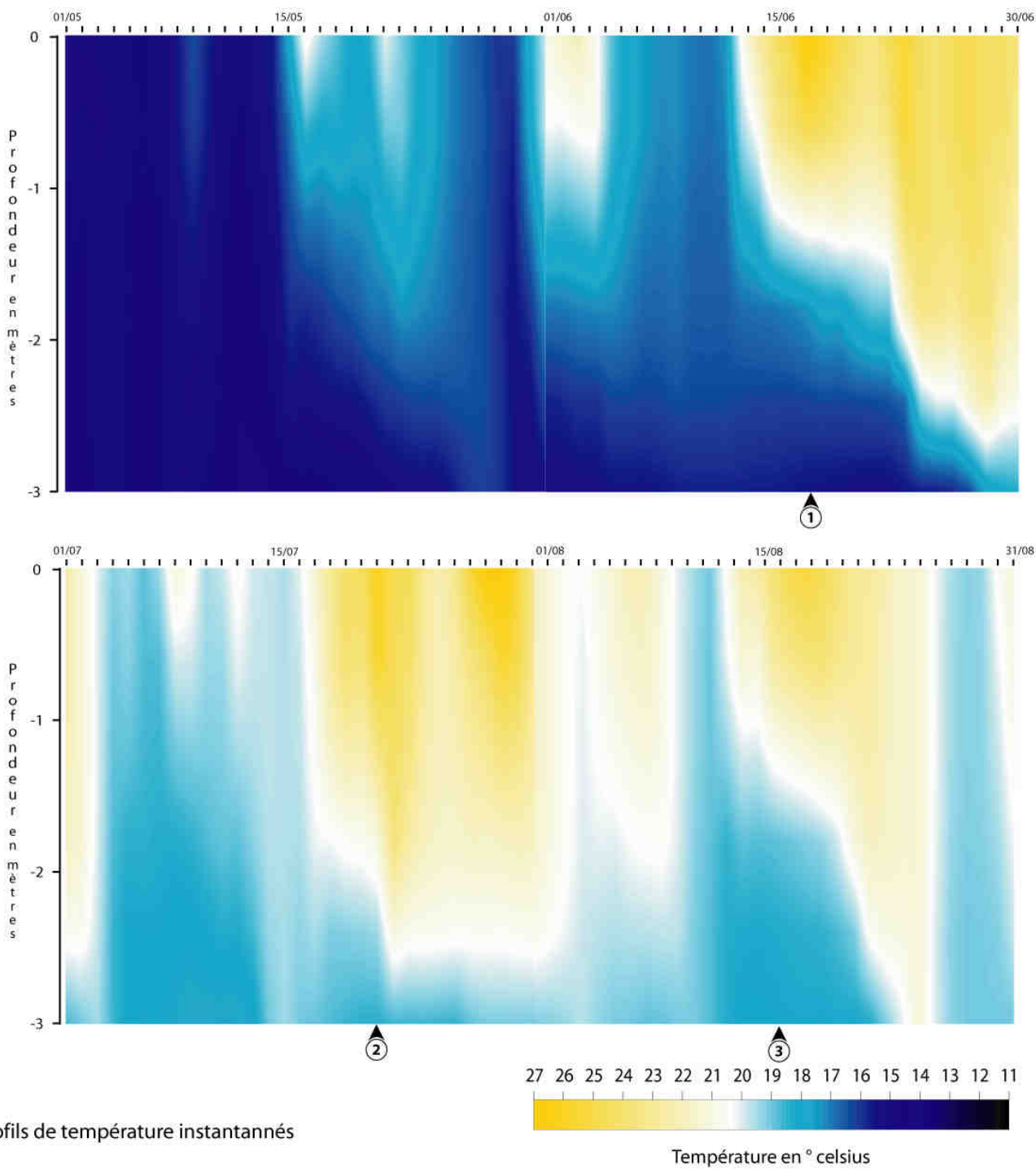
Etant donné la mise en place d'une typologie morphologique inédite, on peut se demander si la morphologie de l'étang influence sa structure thermique. Nous allons nous attacher aux deux archétypes de notre typologie : l'étang de Cieux et celui de la Pouge. Afin de visualiser le comportement thermique de ces deux plans d'eau, il est possible de recourir à un type de diagramme présentant les moyennes journalières de température de l'eau selon la profondeur en ordonnées et les jours en abscisses.

Ces diagrammes profondeurs-jours-températures (PJT) présentent figure 96 et 97 les comportements thermiques de l'étang de la Pouge entre mai et août 2000 et celui de l'étang de Cieux entre mai et août 2002. Pour l'étang de la Pouge, les thermomètres sont placés sur une chaîne à la verticale des plus grandes profondeurs, un peu en amont de la bonde. Ils mesurent la température avec un pas de temps horaire ; les profondeurs des thermomètres sont -0,5, -1, -1,5, -2, -3, -4 et -5 mètres.

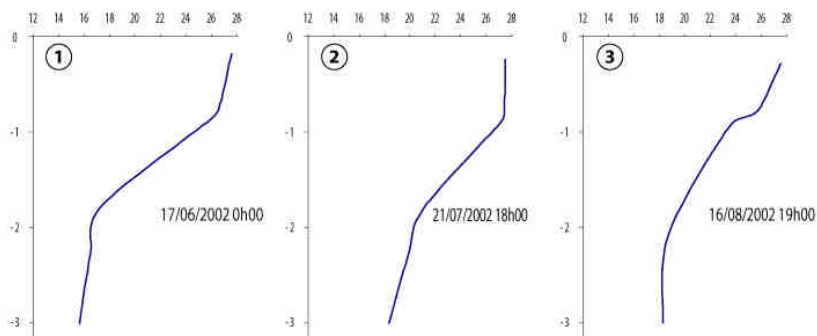
Pour l'étang de Cieux, la bouée est située 200 mètres en amont de la digue ; les profondeurs des thermomètres sont -0,25, -0,75, -0,90, -1,8, -2,3, -3 mètres.

Les données n'étant pas disponibles pour la même année, du fait des aléas des mesures thermiques, la comparaison directe des diagrammes est donc impossible ; en

Figure 96 : Diagramme profondeur-jour-température de l'étang de Cieux entre mai et août 2002

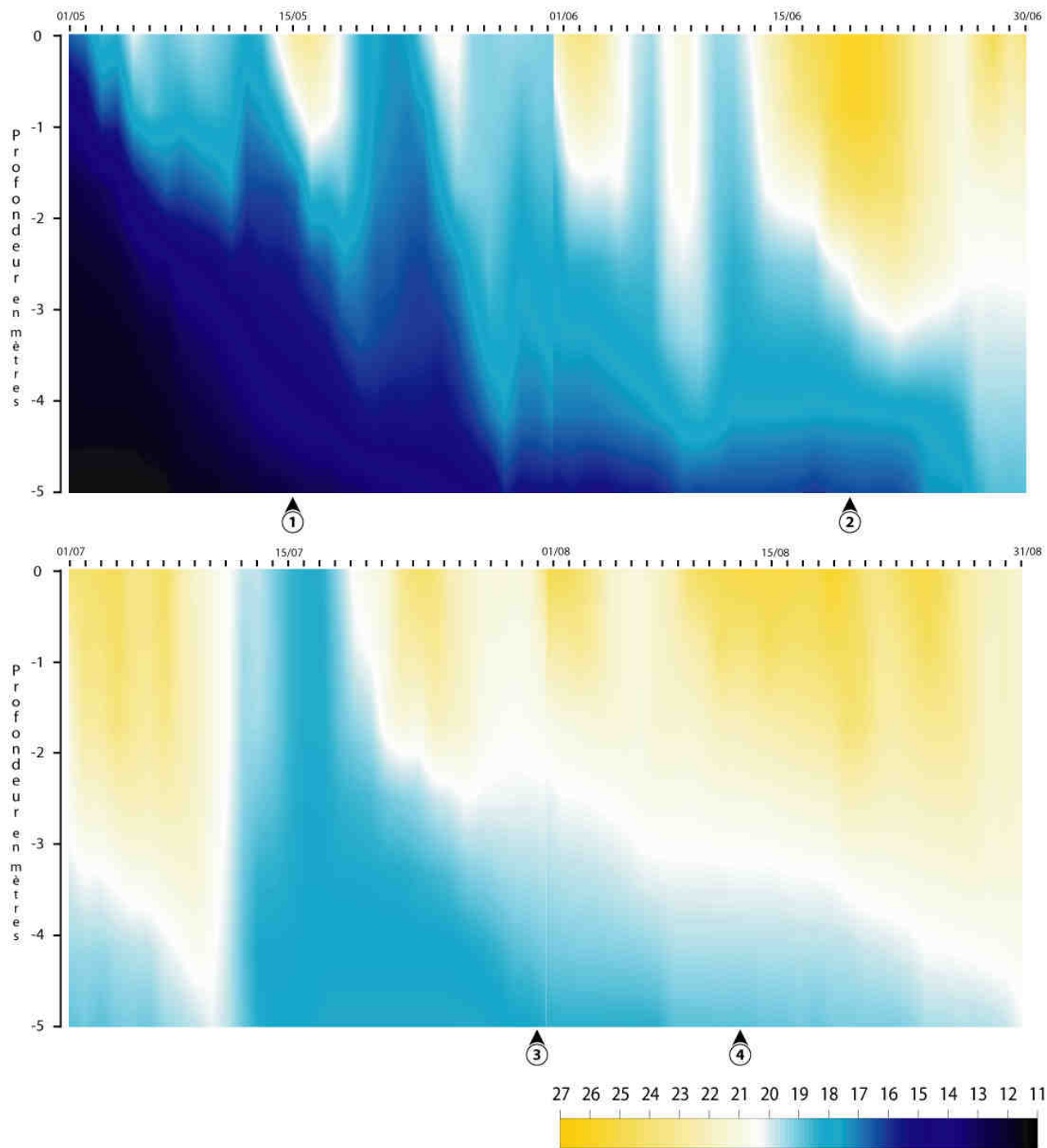


Profils de température instantanés

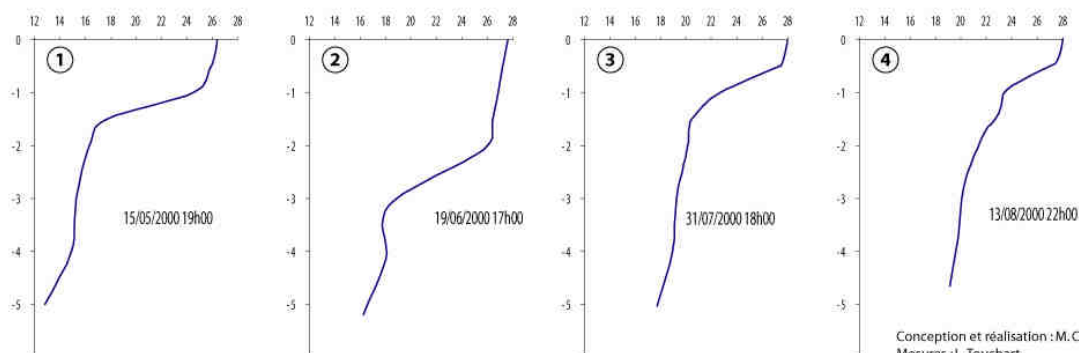


Conception et réalisation : M. Carlini, B. Savy - 2006
 Mesures : L. Touchart
 Moyens techniques : Université de Limoges.

Figure 97 : Diagramme profondeur-jour-température de l'étang de la Pouge entre mai et août 2000



Profils de température instantannés



Conception et réalisation : M. Carlini, B. Savy - 2006
 Mesures : L. Touchart
 Moyens techniques : Université de Limoges.

revanche, les différences de comportements de la stratification dans le temps peuvent être étudiés.

L'étang de la Pouge connaît ses premières stratifications au cours du mois de mai, néanmoins les périodes d'homothermie sont fréquentes jusqu'au 13 juin. Une période de stratification s'ensuit, durant un mois. Le plan d'eau est brassé durant plusieurs jours, à la mi-juillet puis la stratification se remet en place de manière durable et se prolonge au-delà du mois d'août. Au total, après la mise en place de la stratification, le plan d'eau ne sera brassé qu'une fois durant la période estivale. Il est à noter que ce brassage est complet, la moyenne journalière de la tranche d'eau avoisinant les 19°C durant cette période. Lorsque la stratification est durable, l'épilimnion a tendance à s'épaissir. La présence d'un métalimnion n'est néanmoins pas visible à cette échelle de temps (fig. 96).

La première stratification apparaît à Cieux au début du mois de juin, mais la stratification se met durablement en place autour du 13 juin. La période estivale est à Cieux plus chaotique. Le début du mois de juillet est occupé par une homothermie. La stratification se remet en place durant trois semaines suivi d'une courte déstratification. Du 13 au 25 août, le plan d'eau est de nouveau stratifié, puis est de nouveau brassé (fig. 97).

La différence majeure entre le comportement thermique des deux étangs est la différence dans le rythme de brassage. L'étang de la Pouge n'est brassé qu'une fois durant la période estivale quand celui de Cieux l'est trois fois. On peut premièrement se demander si cette différence provient de la différence de profondeur entre les deux plans d'eau. Ce facteur n'est pas déterminant à lui seul : durant les périodes de stratification, l'évolution de la tranche d'eau des deux étangs est similaire, malgré la différence de profondeur (fig. 96 & 97). Les profils instantanés sont similaires : la forme de la courbe le 19 juin 2000 à la Pouge et le 17 juin 2002 à Cieux sont très

proches, pour une température de surface équivalente et une différence surface-fond identique. La thermocline se trouve un mètre plus en profondeur à la Pougé.

En revanche, la forme de l'étang peut jouer un rôle déterminant, notamment sa morphologie plane. Le fetch continu modulé en fonction des normales 1971-2001 présenté à l'encadré fetch montre clairement que la forme allongée de l'étang de la Pougé orienté nord-sud est moins sensible aux flux d'ouest et de sud-ouest, majoritaires lors de la période estivale. En outre la zone aval profonde, près de la digue, où est installée la bouée, est particulièrement épargnée par ces flux qui affectent majoritairement l'amont du plan d'eau recourbé vers le sud-ouest.

L'étang de Cieux représente une situation complètement différente : sa forme multilobée dont l'orientation majeure sud-ouest nord-est, le prédispose particulièrement au brassage par tous les vents, et particulièrement par les flux de sud-ouest (encadré β).

A ce facteur surfacique, il est bon de rajouter que la morphologie locale joue un rôle de canalisation ou d'abri des vents. Dans le cas des étangs de vallée encaissée, l'orientation du plan d'eau est donc un facteur primordial pour la stabilité de la stratification ; les étangs de confluence sont, eux, sensibles à plusieurs directions de vent.

La stratification thermique dans les étangs limousins dépend donc de la profondeur pour sa mise en place et de la morphologie pour sa persistance. Les étangs-lacs, de plaine ou de vallée encaissée subissent cette stratification estivale. Les conséquences de cette stratification ne sont pas exclusivement thermiques.

III.3.2.2. Conséquences de la morphologie : l'exemple du moine

La morphologie des étangs limousins, et notamment leur grande profondeur, peut occasionner une désoxygénation de couches profondes lors de la période estivale.

Cette désoxygénation inverse le processus de minéralisation de l'azote ammoniacal produit par la décomposition de la matière organique présente dans le plan d'eau (fig. 98).

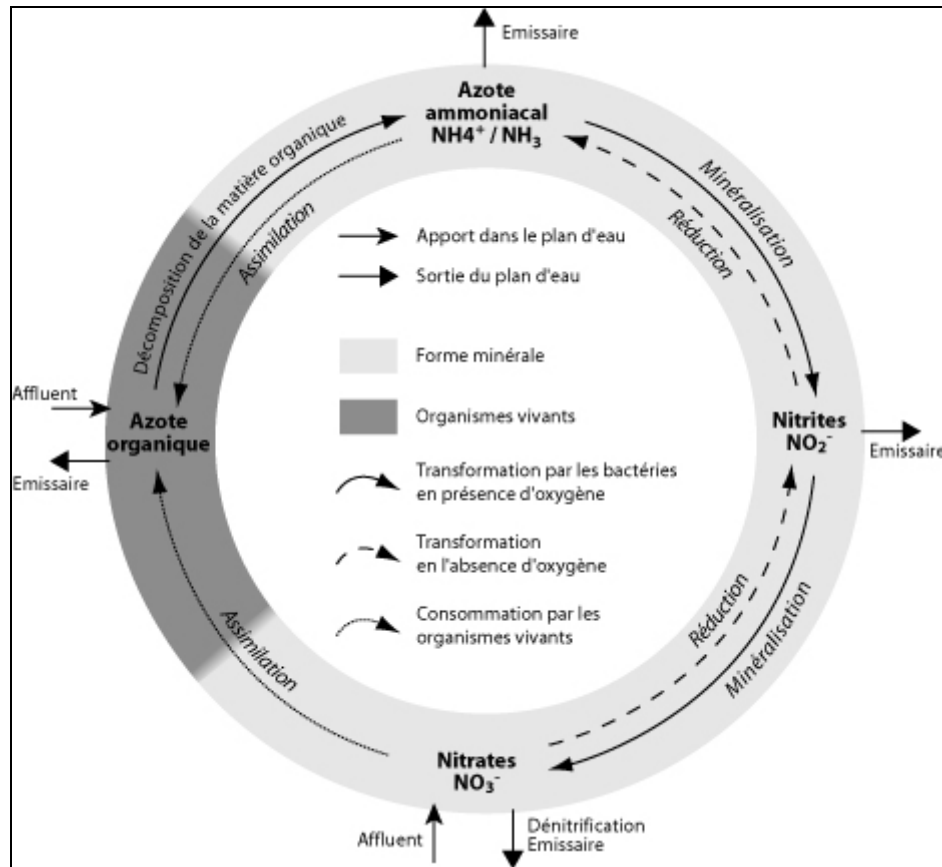


Figure 98 : Cycle simplifié de l'azote dans un plan d'eau (d'après Touchart et Graffouillère)

En présence d'oxygène l'azote ammoniacal se minéralise complètement jusqu'à la phase nitrates. Mais lors d'une stratification thermique stable, les étangs peuvent présenter de très forts gradients de leur teneur en oxygène entre la surface et le fond (Touchart, 2001, p281). En l'absence d'oxygène, les nitrates présents dans le sédiment se réduisent pour produire de l'azote ammoniacal et des nitrites. Ce processus a pu être observé pour des profondeurs inférieures à 4 mètres dans le grand étang de Cieux (fig. 99).

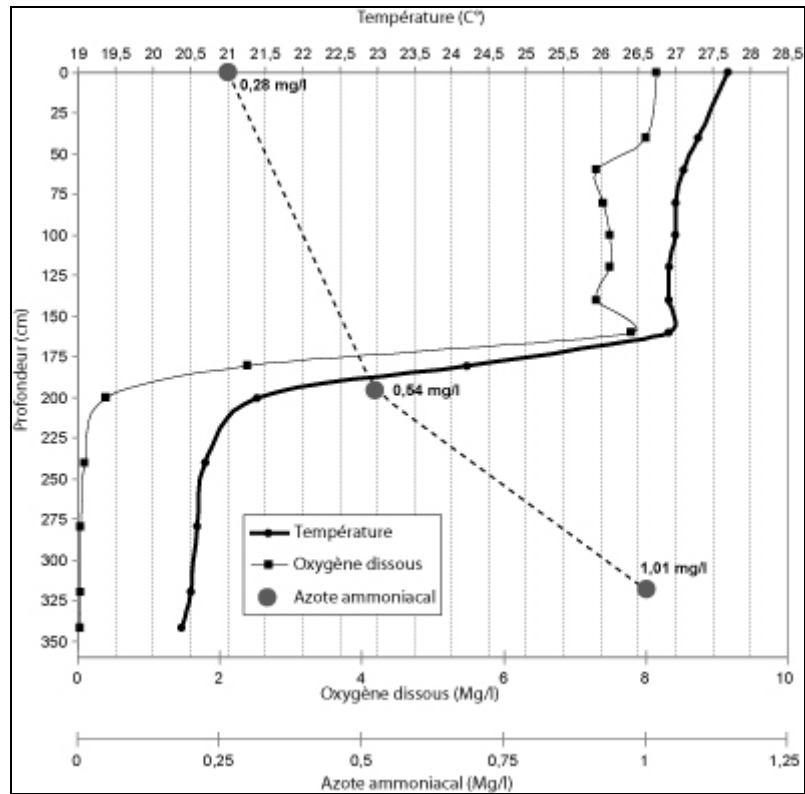


Figure 99 : Stratification et désoxygénation de la colonne d'eau
Etang de Cieux, 9 juillet 2003, 15 heures (d'après Touchart et Graffouillère, modifié)

Les mesures réalisées le 9 juillet 2003 à proximité de la digue montrent une stratification thermique comportant une couche de saut thermique très nette (fig. 99). La température de l'eau de surface excède 27,5°C, tandis qu'au fond de l'étang elle reste inférieure à 20,5°C. Entre 175 et 225 cm de profondeur, la température bascule brutalement de 27 à 21°C. Cette couche de saut thermique empêche l'arrivée de l'oxygène en profondeur : une oxycline très marquée est visible également. Entre 175 et 200 cm de profondeur l'oxygène dissous passe de près de 8mg/l à un taux proche de 0. L'augmentation de l'azote ammoniacal est étroitement liée à cette diminution de l'oxygène. Les trois prélèvements (réalisés à l'aide du système R.A.LIQ. décrit dans l'encadré barque) montre l'augmentation du taux d'azote ammoniacal, particulièrement en dessous de l'oxycline.

« Il convient d'être prudent quant à l'interprétation des valeurs brutes d'azote ammoniacal, sa toxicité dépendant d'un croisement de plusieurs paramètres. Une eau peut contenir une faible quantité d'azote ammoniacal mais un fort pourcentage d'ammoniac. Notamment lorsqu'une eau de surface est chaude et que son pH est élevé. A l'inverse, l'eau des couches profondes peut parfois contenir de fortes concentrations en azote ammoniacal en raison d'une stratification thermique. La température et le pH de cette eau sont réduits, ce qui entraîne des faibles taux d'ammoniac. » (Touchart et Graffouillère, 2004)

La question que pose la présence d'azote ammoniacal dans le fond désoxygéné des plans d'eau est celle de sa propagation en aval. Certains dispositifs prélèvent l'eau à différentes profondeurs, voire au fond de l'étang pour alimenter l'émissaire. Le principal aménagement de ce type est le moine, même s'il n'équipe pas plus de 10% des étangs en Limousin (fig. 100). Le moine présente des avantages réels mais comprend des inconvénients potentiels rarement évoqués.

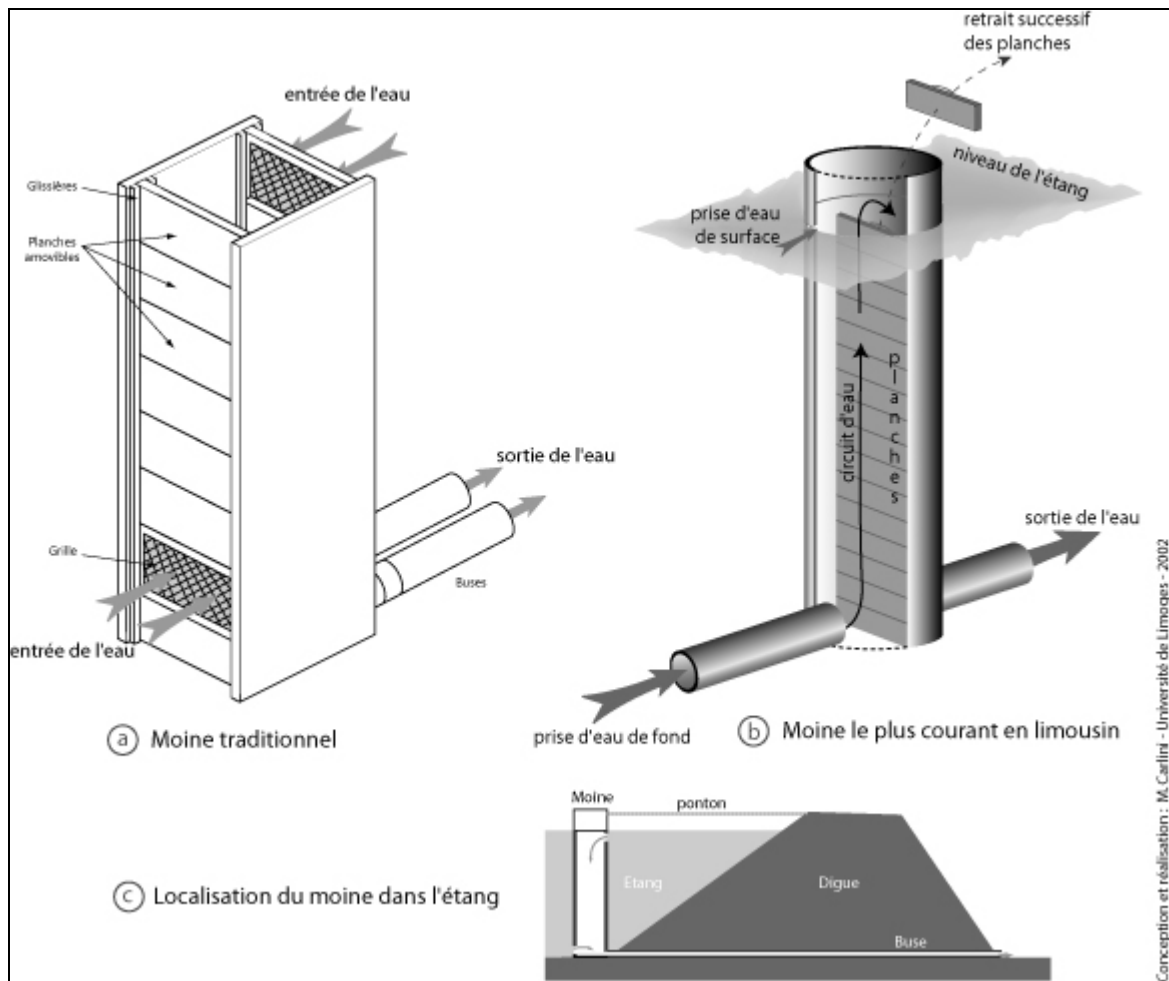
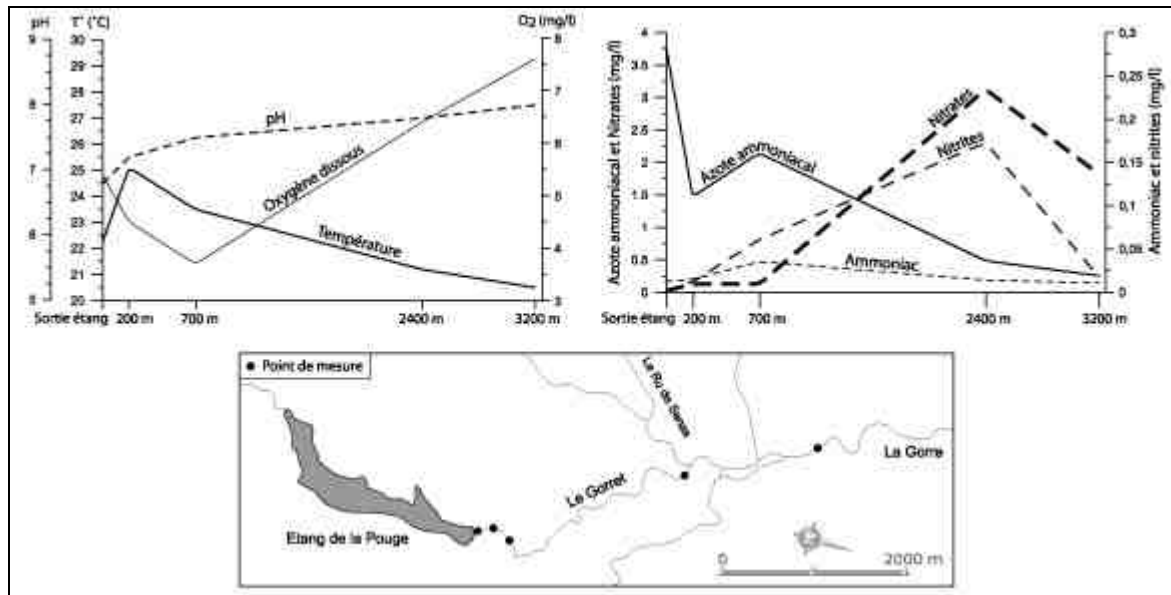


Figure 100 : Fonctionnement d'un moine

Différents types de moine existent ; le principe est de pouvoir puiser l'eau différentes profondeurs par le biais de planches et de grilles (fig. 100a) ou par un système de vase communicants équilibré, là aussi par des planches (fig. 100b). Le moine est situé en amont de la digue afin de se baser sur la plus grande profondeur de l'étang (fig. 100c). Cet aménagement est préconisé pour plusieurs raisons : il permet de maintenir le débit réservé en cas d'étiage ainsi qu'après une vidange (ce qui n'est pas le cas des déversoirs de surface) et les eaux soutirées au fond sont plus fraîches en été que les eaux de surface, ce qui présente un avantage certain pour les populations piscicoles en aval.

Dans le cas où les seules eaux de fond seraient rendues à l'aval du plan d'eau, le problème de la désoxygénation du fond peut constituer un risque pour l'émissaire du plan d'eau. Ce type de système est présent à l'étang de la Pouge, dont nous avons vu que la stratification thermique était présente durant toute la période estivale, avec un seul brassage.



La figure 101 permet de mesurer l'impact du relargage d'une eau désoxygénée et chargée en azote ammoniacal en aval de l'étang de la Pouge durant la période estivale. Cinq points de mesure ont été choisis : la sortie du moine, 200, 700, 2400 et 3200 mètres en aval. Le dernier point de prélèvement est situé dans la Gorre près la confluence du Gorret (fig. 101b). A la sortie du moine, l'eau est effectivement fraîche (22°C) mais ce bénéfice se perd rapidement puisque l'eau se réchauffe dans les 200 premiers mètres du fait de la présence du bassin de décantation avant de refroidir naturellement pour atteindre un peu plus de 20°C en aval. La valeur d'azote ammoniacal est très élevée à la sortie de l'étang (3,8 mg/l) mais les faibles pH et température conditionnent une faible proportion d'ammoniac. Entre le moine et 700

mètres le taux d'oxygène chute brutalement tandis que ammoniac, nitrates, nitrites et azote ammoniacal augmentent ; plus en aval l'azote ammoniacal et l'ammoniac reprennent des valeurs normales mais les nitrates et les nitrites connaissent un pic à 2400 mètres (0,17 mg/l de nitrites). Cette augmentation des nitrites peut être préjudiciable à la vie aquatique.

L'installation d'un moine est donc un aménagement à tempérer selon la morphologie du plan d'eau. Dans le cas d'étangs-lacs de vallée encaissée, le fait de soutirer exclusivement l'eau de fond est à pratiquer avec prudence. La recherche d'eau plus fraîche est une problématique en Limousin, mais il faut garder à l'esprit que si l'eau est froide en profondeur et surchauffée en surface cela provient de la présence d'une couche de saut thermique et il est probable dans ce cas de figure que l'eau de fond soit désoxygénée.

Cette mise en lumière de l'impact des moines en saison estivale démontre la prédominance possible de la morphologie sur les différents facteurs, y compris physiques et chimiques de l'étang. L'étude de cette morphologie, y compris avant submersion d'un vallon peut permettre d'envisager les aménagements adaptés pour une gestion durable de l'étang et de l'aval.

III.3.2.3. Aménager en tenant compte de la morphologie

Trouver « la » solution d'aménagement idéale et unique pour les étangs et la préservation de l'aval reste une gageure. Cependant, au regard de la typologie des étangs il est possible d'envisager les aménagements les plus adaptés selon les cas. Selon la DIREN Limousin, « un système de dérivation²³⁸, couplé avec un moine véritable, est l'équipement idéal pour la bonne gestion des étangs ». Le problème de la dérivation, outre son coût élevé et la possible absence de maîtrise foncière, réside

²³⁸ La dérivation est un canal parallèle au plan d'eau permettant de répartir le débit entre ce canal et le plan d'eau.

dans les problèmes locaux de topographie pouvant empêcher son implantation. Pour les étangs situés directement sur un cours d'eau, cet aménagement représente pourtant un avantage certain, car en « déconnectant » le plan d'eau du réseau hydrographique, il gomme les impacts possibles. La mise en place de ce dispositif peut être profitable sur les nombreux plus petits étangs placés en tête de bassin.

Le contrôle du niveau d'eau est primordial, aussi bien pour l'étang que pour l'aval ; en cela, le moine présente des avantages par sa gestion du niveau d'eau. Le problème reste celui de la stratification thermique produisant des eaux de fond certes froides, mais potentiellement nocives.

Une solution pourrait venir du brassage forcé des plans d'eau : dans le cas de lacs de barrage profonds comme celui du Mas Chaband destiné à soutenir l'étiage estival de la Charente, un destratificateur à injection d'air a été mis en place pour casser la stratification estivale. En France, une dizaine de plans d'eau, pour la plupart de grands barrages mis en eau depuis moins de 50 ans, sont équipés de la sorte (Savy, 2006, p198) afin de lutter contre l'eutrophisation et les cyanobactéries. Aux Etats-Unis et notamment en Alabama, différents types de destratificateurs sont utilisés sur les étangs de production²³⁹ comme sur les étangs de loisir²⁴⁰ et ce, depuis les années 1970.

Au Canada, la problématique est également très étudiée, que ce soit par l' « Administration du rétablissement agricoles des Prairies » qui préconise l'aération de tout plan d'eau, y compris des mares²⁴¹ ou les sociétés privées qui vendent des destratificateurs adaptés à la superficie et la morphologie des petits plans d'eau.

²³⁹ « For years, catfish farmers have relied on large, emergency aerators powered by power take offs of farms tractors to prevent fish stress and mortality at times when DO concentrations were low » (Boyd & Taufik, 1987, p3)

²⁴⁰ « motors and pumps aided in preventing oxygen deficiencies (...) » (McCoy & Ruzic, 1973, p8)

²⁴¹ http://www.agr.gc.ca/pfra/flash/dugout/fr/dugout_f.htm

Au regard de notre typologie, nous pouvons tenter ici de faire une synthèse des aménagements semblant adaptés aux paramètres abordés dans ce travail dans une perspective de gestion concertée de la ressource en eau, pour l'étang ainsi que pour l'aval.

Pour les plus petits étangs situés notamment en tête de bassin, que nous avons appelés étangs de vallon, nous venons de voir que la dérivation est un aménagement utile comme c'est le cas à l'étang du puy Bavaud, mais sa mise en œuvre reste minoritaire en Limousin. Une piste à prendre en considération est le caractère trop rigide des déversoirs de surface majoritaires sur ces petits étangs. Le marnage étant faible, comme nous l'avons vu, des étiages peuvent survenir. Il serait utile de mettre en place un système permettant de mieux gérer le niveau d'eau, sans forcément avoir à recourir à la mise en place d'un moine.

Pour les étangs-lacs de confluence ou de plaine, la gestion du niveau est un enjeu majeur d'autant que les marnages et le stockage de la ressource sont importants. Un système comme le moine peut sembler adapté à une gestion cohérente de la ressource, sous réserve d'une surveillance de l'apparition d'une stratification thermique estivale.

Pour les étangs-lacs de vallée encaissée, l'implantation d'un moine pose assurément le problème de la désoxygénation et de ses corollaires. Les solutions potentielles résident dans le soutirage d'une eau intermédiaire et non systématiquement de l'eau de fond et peut-être dans la convection forcée utilisée plus systématiquement outre-atlantique.

Conclusion partielle

Les étangs-lacs limousins ont des spécificités marquées comme le démontre l'étude du bilan hydro-limnologique de l'étang de Cieux et le volume d'eau induit par les marnages importants. Ces caractéristiques sont dues en grande partie à des étangs plus « creux », au sens de Delebecque, par rapport aux autres régions : la morphologie de l'étang, en conditionnant le volume de ses eaux, influence le fonctionnement global. Les étangs de vallon étudiés ne présentent pas l'inertie suffisante au soutien des étiages de début d'été.

La présence de courants que l'on ne peut qualifier de pérennes mais qui présentent une stabilité suffisamment importante pour être mesurée plusieurs heures durant démontrent la complexité des processus stagnustres. Il faudra à l'avenir tenir compte du paramètre hydrodynamique tant il est imbriqué dans l'ensemble des fonctionnements lacustres et stagnustres.

Démontrer la stratification thermique dans les étangs limousins n'était pas un enjeu, car cela fut fait précédemment. La nécessité de relier le comportement thermique avec les types morphologiques d'étangs et d'ouvrir sur l'aménagement par l'entremise d'un dispositif comme le moine, se justifie pleinement. La relation entre la morphologie et la persistance de la stratification thermique, les impacts induits par la désoxygénation soulignent l'enchevêtrement des processus et exhortent à des études globales.

Au sein de ces étangs-lacs, la différence de comportement face au marnage, aux courants et à la stabilité de la stratification thermique confirme la typologie morphologique mise en place lors de la deuxième partie. Cette typologie n'est donc pas seulement morphologique, elle constitue une réalité fonctionnelle pour les étangs limousins. Cette classification permet d'éclairer de nouvelles pistes au regard des problématiques concernant la qualité et la quantité de l'eau disponible pour les

années futures. Les deux catégories d'étangs-lacs dégagés, ceux de confluence ou de plaine et ceux de vallée encaissée sont de nature à répondre à certaines problématiques futures, sous réserve d'être gérés dans l'intérêt collectif.

Conclusion générale

Multiséculaires ou récents, gérés ou à l'abandon, les étangs sont une réalité de la géographie limousine. Malgré la prééminence de la morphologie dans toute étude limnologique et l'interaction de l'hydrodynamique avec l'ensemble des processus limniques, ces deux thématiques fondamentales n'avaient jusqu'à présent jamais approché les étangs limousins.

L'inclination de la limnologie tout à la fois pour les grands lacs et pour la biologie n'est certainement pas totalement étrangère à cette situation ; les particularismes des étangs limousins, dans leur fonctionnement comme dans leur gestion, en sont certainement une autre cause. La problématique de la ressource en eau réclame pourtant la connaissance sur laquelle seule peut se fonder la gestion des milieux.

Le premier problème soulevé par l'étang est sa définition en Limousin comme ailleurs. Nous avons tenté de répondre à cette question en proposant une définition à la fois scientifique et généralisable. L'étang est un plan d'eau continental, dont les dimensions et les usages ne permettent pas d'établir la zonation ni l'étagement des différents processus stagnustres de façon durable. Cette proposition ne résout néanmoins pas les questions liées à la dimension sociale de l'étang et ne donne volontairement pas de bornes spatiales arbitraires.

Un certain nombre d'étangs ont donc fait l'objet d'une étude de géographie limnologique, résolument ancrée au terrain mais exploitant les ressources de traitement et d'analyse offertes par la géomatique. Cette recherche a nécessité la mise en œuvre de méthodologies originellement lacustres, mais adaptées à l'échelle de travail et aux problématiques stagnustres. Cette démarche produit des données de terrain inédites permettant de caractériser l'étang-lac limousin.

La morphologie de l'étang est évidemment, à l'instar des lacs naturels et des barrages, influencée par le modelé dans lequel il prend place. Ce conditionnement entraîne un impact sur le développement du plan d'eau et sur sa morphologie plane. Ainsi l'aspect multilobé des berges traduit la présence d'un étang de confluence, à l'instar de celui de Cieux, alors que les vallées encaissées produisent des plans d'eau étroits et allongés, rectilignes ou sinueux illustrés par l'étang de la Pouge ou le lac du pont à l'Age.

Le constat ne doit pas se borner à cette identification première, car la présence du plan d'eau modifie fortement la morphologie immergée comme celle des berges situées à l'interface entre le milieu stagnustre et les terres émergées. Cette transformation s'opère à l'étage littoral comme à l'étage profond. Cet étagement morphologique démontre que le fonctionnement des étangs-lacs peut être rapproché de celui de lacs, avec toutefois quelques différences.

Les modelés stagnustres littoraux sont façonnés par l'érosion et l'accumulation. Dans les étangs la composante érosive est proportionnellement plus faible que les lacs. Néanmoins, dans les zones où le sol est à nu, comme dans le cas d'une plage artificielle, il est possible d'enregistrer des microfalaises atteignant 45 centimètres de hauteur pour 80 de surplomb, comme c'est le cas pour l'étang de Cieux. Les modelés d'accumulation littoraux sont également rares à l'exception des deltas. Ces deltas construits et étagés furent les premiers à nous faire prendre conscience de la complexité morphologique des étangs limousins. Dans le cas d'étangs anciens, lorsque le marnage est important, existent des deltas composites possédant une emprise depuis les fonds de baies émergées jusques au plafond. L'ensemble du delta de Pranaud dans l'étang de Cieux représente une surface de cinq hectares et demi.

Les modelés stagnustres profonds résultent de l'accumulation et de la redistribution des sédiments. La présence quasiment systématique de plaine centrale démontre la réalité de modelés profonds le plus souvent plus aboutis que pour les lacs de barrage récents. Les étangs les plus anciens, comme Cieux, les Oussines, les Landes ou la Pouge développent d'importantes plaines centrales – 10 hectares pour Cieux, 25 pour les Landes - se basant sur d'importantes épaisseurs de sédiments. La morphologie de la cuvette est déterminante dans le développement du plafond, limité à une extension longitudinale pour les plans d'eau les plus encaissés. L'existence de plaines secondaires, non encore reliées souligne en revanche l'immaturation de ces modelés comparativement aux lacs naturels.

Sur le plan morphologique, les facteurs se dégageant de notre étude sont la superficie, conditionnant grandement les modelés d'érosion et d'accumulation littoraux, l'âge du plan d'eau influençant les modelés profonds et l'impact anthropique, notamment la vidange qui modifie durablement la morphologie globale. En tenant compte de ces trois paramètres, les étangs-lacs ne sont pas un stade intermédiaire – entre les plans d'eau trop petits pour voir des phénomènes complexes se mettre en place, les lacs de barrage et les lacs naturels – mais une évolution différente. Comparés aux lacs naturels, ils sont plus récents, plus petits et plus anthropisés ; ils sont plus anciens mais plus petits que les lacs de barrage ; enfin ils sont plus anciens et plus grands que les mares ou les plus petits étangs. L'impact morphologique de leur gestion est souvent équivalent à celui des lacs de barrage et des autres étangs.

Les étangs-lacs développent une morphologie spécifique où la sédimentation et ses modelés prennent le pas sur l'érosion. Les formes littorales sont plus embryonnaires que pour les lacs de barrage et les formes profondes nettement plus

matures. La mise en évidence de cet étagement morphologique était primordiale à la compréhension des étangs ; en outre la cartographie synthétique d'une géomorphologie des étangs jette les bases d'une typologie de ces derniers.

Les étangs de vallon, récents pour la plupart, placés en tête de bassin et dont la superficie est faible. Ces étangs sont majoritaires : la DIREN comptabilisait en 2004 80% d'étangs d'une superficie inférieure à 1 hectare en Haute-Vienne.

Les étangs-lacs de plaine ou de confluence, situés plus en aval sur les bassins, sont plus étendus et l'étagement morphologique est marqué. Les modelés profonds et les deltas sont très développés. Cette catégorie regroupe des étangs souvent anciens voire médiévaux.

Les étangs-lacs de vallée encaissée montrent des similitudes avec la catégorie précédente, mais sont plus influencés par l'héritage morphologique. Souvent allongés et profonds les modelés s'étirent, les deltas sont immergés et la plaine centrale segmentée et d'emprise spatiale plus réduite.

Les vidanges et leur gestion doivent être liées à cette connaissance de la morphologie, car l'influence qu'elle exerce est réelle. La faible périodicité des vidanges en Limousin au regard des autres régions se traduit souvent par des volumes sédimentaires importants. Cette thèse apporte les premières quantifications sédimentaires précises sur ce type de plan d'eau. Ces mesures et le cubage sédimentaire sont un réel enjeu dans la problématique des étangs et représentent une avancée de la recherche-conseil dans ce domaine. La connaissance correcte du volume d'eau ouvre la perspective d'une maîtrise accrue : la mise en place de planning de vidange est un exemple d'aide efficace à la gestion.

Cartographier l'étang en trois dimensions correspond au fait qu'il s'agit d'un volume et non d'une surface. Ce volume, véritable identité fonctionnelle de l'étang, doit être mis en relation avec l'amont, son bassin d'alimentation, et son aval. L'étude de la morphologie doit se mettre au service des autres thématiques dont elle est le support.

Une fois de plus, il fut nécessaire de s'attaquer à un aspect peu ou pas abordé, la réalisation d'un bilan hydro-limnologique sur un étang. Il découle de ce bilan inédit la prépondérance du caractère fluvial des apports et des pertes en eau, largement plus importants que les précipitations incidentes et l'évaporation, pour les plus grands étangs et à l'échelle annuelle. Le rôle du marnage dans l'inertie du plan d'eau et dans la potentialité d'un soutien des étiages sous réserve d'être géré raisonnablement est clairement mis en évidence. Cette approche révèle la nécessité de pratiquer ce type de bilan sur de plus petits plans d'eau comme les étangs de vallon.

Les eaux des étangs, si souvent qualifiées de stagnantes, ne sont pourtant pas dormantes ou totalement immobiles. Une cartographie des courants stagnustres mesurés est intéressante à plusieurs titres. Tout d'abord, les modélisations ne sont pas adaptées à de si petits plans d'eau ; le matériel de terrain ne l'est pas non plus. Pourtant ces courants existent et leurs influences sur les sédiments, les pollutions méritent d'être étudiées. Concernant la courantologie stagnustre, le premier pas est donc franchi, mais de nombreuses questions restent en suspens concernant la pérennité des courants et leur modifications tout au long de l'année.

La solution pour une gestion durable des étangs provient du croisement des approches, comme le démontre la dernière sous partie de cette thèse, mêlant morphologie, thermique et paramètres chimiques dans une approche amont-aval au travers de l'exemple d'un aménagement préconisé en Limousin : le moine. Cet

aménagement qui soutire de l'eau en profondeur est considéré comme positif ou négatif selon si l'on envisage un seul paramètre ou une vision privilégiant l'étang seul ou l'aval seul. La géographie limnologique permet de croiser à la fois les thématiques et les échelles afin d'envisager de manière globale les aménagements et leurs impacts sur le milieu.

Tout comme celle de la cuvette lacustre, l'étude de la cuvette stagnustre est à la fois aux prémices et au cœur des problématiques des étangs. Les étangs-lacs limousins doivent être pris en considération car leur gestion ne peut et ne doit être identique à celle des étangs de vallon. Ils sont par leurs caractéristiques morphologiques et physiques à même d'être au cœur de politiques de développement durable si leur gestion est responsable et fondée sur un socle de connaissances solides.

Le choix du Limousin et de ses étangs a été justifié par leurs spécificités égrenées au fil de ce travail. Pour autant il ne faudrait pas occulter l'intérêt des résultats pour l'ensemble de la recherche sur les étangs. Nous avons choisi d'étudier les étangs limousins à la lumière des connaissances et méthodologies lacustres. Cette approche nouvelle prend tout son sens dans la cartographie des courants stagnustres jusqu'alors ignorés. Cette démarche nous a permis de discerner des étangs-lacs complexes et de sortir du cloisonnement disciplinaire entre lac et étang. La typologie de ces plans d'eau, mise en lumière pour le Limousin, peut et doit trouver un écho au-delà de cette région. La connaissance de leur fonctionnement apporte de nouveaux éléments aux autres thématiques limnologiques, pour les petits plans d'eau comme pour les lacs. Elle peut enrichir leur définition, permettre de proposer une classification plus adaptée et d'ériger l'étang-lac en un véritable type fonctionnel.

Bibliographie

AFNOR, 1997 – *Qualité de l'eau. Recueil des normes françaises*. Tome 2, 2^{ème} édition éditée par l'Agence Française de Normalisation. NF EN 872. pp. 95-103.

ANDRIEU J.P., JIGOREL A., 1997 - *Expérience française récente dans le domaine de la gestion des sédiments dans les réservoirs*. « Commission Internationale des Grands Barrages ». XIX^{ème} Congrès des Grands Barrages, Florence, 1997. pp. 365-383.

ARRIGNON J., 1998 – *Aménagement piscicole des eaux douces*. Paris, Techniques et documentation, 589p.

ARX W.S. von, 1962 - *An introduction to physical oceanography*. Reading, Addison-Wesley, 422p.

AXELSSON V., 1967 - « The Laitaure delta, a study of deltaic morphology and processes » *Geografiska Annaler*, 49A(1), p 1-127.

AYERS J.C., ANDERSON D.V., CHANDLER D.C., LAUFF G.M., 1956 – « Currents and water masses of lake Huron. » *Great Lakes research institute of Ann Harbor*, technical paper, p 1-101.

BACHASSON B., 1996- *Mise en valeur des étangs*. Paris, Technique et Documentation, Lavoisier. 176p.

BALABANIAN O., BOUET G., 1989 – *L'eau et la maîtrise de l'eau en Limousin*. Treignac, Les Monédières, 301p.

BANAS D., 2001 – *Flux de matières en étangs piscicoles extensifs : Rétention, sédimentation, Exportation*. Thèse de l'Université de Metz, mention Sciences de la vie, spécialité Hydrobiologie, 237 p.

BANAS D., MASSON G., LEGLIZE L., & PIHAN J.C., 2002 – « Discharge of sediments, nitrogen (N) and phosphorus (P) during the emptying of extensive fishponds : effect of rainfall and management practices. » *Hydrobiologia*. 472 : 29-38.

BEIGNET A., 1998 – « La Sologne » *Zones Humides Infos*. 21(3) : 10-11

BELLAICHE G., 2004 – « Deltas », *Encyclopaedia Universalis*, CD-ROM Version 10.

BENARROUS R., 2003 – « La Brenne des étangs, une zone humide créée au Moyen-Age » *Zones Humides Infos*. 42(4) : 2-3

BENARROUS R., MARINVAL M.-C., 2003 – « Carpes et zones d'étangs, des histoires étroitement liées » *Zones Humides Infos*. 42(4) : 3-4

BERARD L., 1982 – *Terres et eaux en Dombes. Technologie et droit coutumier*. Lyon, P.U.L., 254 p.

BERARD L., MARCHENAIS P., 2004 - « Les étangs de la Dombes : le poids du social dans la valorisation économique de la carpe » Actes de la journée d'études du G.H.Z.H. : *Les étangs, espaces de production hier et aujourd'hui*, pp 17-25.

BERNARD C., 2004 – « L'étang solognot du XIXème au XXème siècle : un témoin de l'évolution économique de la région » Actes de la journée d'études du G.H.Z.H. : *Les étangs, espaces de production hier et aujourd'hui*, pp 27-39.

BERQUEZ H., 2000 – *Recherche, installation de matériel et développement logiciel pour bathymétrie fluviale par saisie synchrone entre sondeur et tachéomètre robotisé*. Le Mans, Mémoire d'ingénieur E.S.G.T., 72p.

BERTHOIS L., FROIDEFOND J.M., 1983 – *Traité de bathymétrie*. Bordeaux, Mémoires de l'institut de géologie du bassin d'aquitaine, 160p.

BETANT A., PERRENOUD., 1932 – « Etudes sur la partie occidentale du lac de Genève. » *Mémoires de la société de physique*, 41(2), p 225-293.

BICAN J., DRBAL K., DYKYJOVA D., KVET J., MARVAN P., ONDOK J-P., POKORNY J., PRIRBAN K., SMID P., 1986 – « Ecology of fishpond vegetation » in HEJNY S., RASPOPOV I.M., KVET J., Ed, *Studies on shallow lakes and ponds*, Prague, Academia Praha, 256p : 171-229

BOYD C., TAUFIK A., 1987 – « Evaluation of aerators for channel catfish farming. » *Alabama agricultural experiment station / Auburn university bulletin*, 584, 52p.

BRUNAUD D., 2003 – *L'étang de Landes, ou le rôle déterminant du marnage dans la présence et le maintien d'un riche écosystème*. Limoges, Mémoire de maîtrise, 179p.

BRUSHIN J., FALVEY H., 1975 – « Vagues de vent sur un plan d'eau confiné. Considérations générales et application au Léman (Petit-Lac) » *Bulletin technique de la Suisse Romande*, 101(14) : 225-232

- BRUSHIN J., SCHNEITER L. 1978 – « Caractéristiques des vagues dans les lacs profonds. Vagues de bise sur le Léman (Petit-Lac). Campagnes de mesures 1974-1978 » *Bulletin technique de la Suisse Romande*, 104(19) : 269-276.
- BROYER J., 1998 – « La gestion et l'aménagement des étangs en Dombes ». *Zones Humides Infos*. 21(3) : 9-10
- CAPART A., 1955 – « L'échosondage dans les lacs du Congo Belge. Techniques et résultats acquis » *Bulletin agricole du Congo Belge*, 46(5), p 1075-1103.
- CAUVIN C., 1998 – « Des transformations cartographiques » *Mappemonde*, 49(1), p12-15.
- CAVERIVIERE M., 1950 – « L'exploitation des étangs de Sigean » *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 21(1) : 61-80.
- CLEAVE A., 1992 – *Projects with freshwater life*. Rainsburry, Crowood Press 128p.
- COLLET L.W., 1925 – *Les lacs - Leur mode de formation – Leurs eaux – Leur destin*. Paris, Gaston Doin, 320p.
- COMBROUZE P., 2000 – « Lacs et étangs » in *Espaces naturels du Limousin Le limousin côté nature*. Limoges, p 34-35.
- COSANDEY C. et ROBINSON M., 2000 – *Hydrologie continentale*. Paris, Armand Colin, 360p.
- DELEBECQUE A., 1898 – *Les lacs français*. Paris, Chamerot et Renouard, 436p.
- DIETRICH G., 1963 – *General oceanography, an introduction*. New York, J. Wiley, Interscience, 586p.
- DIREN Limousin – L'étang en Limousin.
- DIREN Limousin – Les étangs du Limousin, une richesse à gérer. Fiches techniques réalisées par le lycée agricole d'Ahun.
- DIREN Limousin, 2004 – Inventaire cartographique des étangs en Limousin. 34p.
- DUSSART B., 1953 – *Températures et mouvements des eaux dans les lacs, introduction à l'étude d'un milieu*. Paris, 1^{ère} Thèse, 155p.
- DUSSART B., 1966 – *Limnologie, l'étude des eaux continentales*. Paris, Gauthier Villars, 677p.
- DUSSART B., 2004 – « Limnologie », *Encyclopaedia Universalis*, CD-ROM Version 10.

- FITTER R. 1986 – *Collins field guide of freshwater life*, Londres, Collins, 382p.
- FOREL F.A., 1892 – *Le Léman, monographie limnologique*. Lausanne, F Rouge Editeur, 542p.
- FRECAUT R., 1979 – « les bilans hydrologiques des lacs. » *Annales de géographie*, 485 : 1-15.
- GIANNINI J.A. 1986 – A description of large-scale variability in the ocean using the diffuse attenuation coefficient. *Proc., IGARSS'86, Today solution for tomorrow's information Need's*, vol. 3, 1, pp. 313-318.
- GILBERT G. K., 1885, «The topographic features of lake shores. » *U.S. Geological Survey, Fifth Annual Report*, p. 69-124.
- GOLDMAN C., HORNE A., 1983 – *Limnology*. New York, McGraw-Hill, 464p.
- GRAFFOUILLERE M., 2000 – *Etude limnologique et hydrologique de trois étangs de la région de Cieux*. Limoges, mémoire de maîtrise, 91p.
- GRAFFOUILLERE M., 2001 – *Les deltas d'étang : une étude limnologique à différentes échelles*. Limoges, mémoire de D.E.A., 87p.
- GRAFFOUILLERE M., 2002a – « Utilisation des archives en géographie limnologique. Une tentative de détermination de la mise en eau de l'étang de Cieux » *Archives en Limousin*, 19, pp 31-33.
- GRAFFOUILLERE M., 2002b – « l'apport des outils de la géomatique à l'étude des lacs méditerranéens : l'exemple du barrage de Matemale dans les Pyrénées orientales » *The mediterranean world environment and history*, Paris, Elsevier, p 285-293
- GUILCHER A., 1954 – *Morphologie littorale et sous-marine*. Paris, P.U.F., 215p.
- HÅKANSON L., 1981 – *A manual of lake morphometry*. Berlin, Springer-Verlag, 78p.
- HÅKANSON L., JANSSON M., 1983 - *Principles of lake sedimentology*. Berlin, Springer-Verlag, 284p.
- HÅKANSON L., PETERS R.H., 1995 – *Predictive limnology : methods for predictive modelling*. Amsterdam, SPB Academic Publishing, 464p.
- HALBFAß W., 1923 – *Grundzüge einer vergleichenden Seenkunde*. Berlin, Bornträger, 354p.

- HIVERNAUD A., 1976 - *Petite histoire de Cieux. De l'âge de pierre à la fin du 19^{ème} Siècle.* Limoges, Bontemps, 148p
- HUTCHINSON G.E., 1957 - *A treatise on limnology. Volume I. Geography, physics and chemistry.* London, John Wiley, 1015p.
- JIGOREL A., 1992 - *Etude sédimentologique du lac de Grandlieu.* I.N.S.A. de Rennes, Département de Loire Atlantique, Syndicat d'aménagement, pp 1-41.
- JIGOREL A., 1998 - *Bilan de la sédimentation dans la retenue de l'Arguenon et sur l'étang de Jugon.* I.N.S.A. de Rennes, service départemental de l'agriculture et de l'environnement, 55p.
- JIGOREL A., 1999 - *Etude de l'envasement de la retenue sur le Blavet (Côtes d'Armor). Vidange décennale 1998.* Conseil Général, service départemental de l'agriculture et de l'environnement, 55p.
- JOHNSON D.W., 1919 - *Shore processes and shoreline development.* New York, J.Wiley, 584p.
- LAMBERT A. & GIOVANOLI F., 1988 - « Records of riverborne turbidity currents and indications of slope failures in the Rhone delta of lake Geneva. » *Limnology and Oceanography*, 33(3) p 458-468.
- LAPOIX F., 1999 - « Etangs », *Encyclopaedia Universalis*, CD-ROM Version 5.
- LEBEAU R., 1976 - *Atlas et géographie de la France moderne. La région lyonnaise.* Paris, Flammarion.
- LEMMIN U., 1995, « Limnologie physique » in POURRIOT R. et MEYBECK M.(sous la direction de) - *Limnologie générale.* Paris, Masson, 956 p : 60 - 226.
- LERMAN A., 1978 - *Lakes : chemistry, geology, physics.* New York, Springer-Verlag, 363p.
- LOUP J., 1974 - *Les eaux terrestres. Hydrologie continentale.* Paris, Masson, 175p.
- LUCAS K., 1904 - « A bathymetrical survey of lakes of New Zealand » *Geographical journal*, 23, p 645-760
- LYZENGA D.R. 1978 - «Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. » *Applied optics*, 17(3), p38-383
- MALEVAL V., 2002 - *Le lac de Saint Pardoux et l'évolution des lacs de barrage artificiel.* Limoges, Thèse de doctorat, 358p.

MASSON G., BANAS D., FRANCOIS D., CIZEL O., LEGLIZE L., DIDIER S. & CORBONNOIS J., 2005 – « Vidange des étangs piscicoles : contraintes réglementaires et d'exploitation, incidences environnementales. » Bulletin de l'association de Géographes français, 82(2) p 224-233.

MATHELIN E., 2003 – *Etude hydrologique es vidanges d'étang en Limousin : un phénomène à l'interaction entre plan d'eau et émissaire*. Limoges, Mémoire de maîtrise, 141p.

McCoy E. W., Ruzic J. E., 1973 – «Alabama's recreational catfish ponds.» *Alabama agricultural experiment station /Auburn university bulletin*. 451, 22p.

MEYBECK M., 1995, « Les lacs et leur bassin » in POURRIOT R. et MEYBECK M.(sous la direction de) – *Limnologie générale*. Paris, Masson, 956 p : 6 - 59.

MILLER K., 2000 – « A review of GLONASS » *The Hydrographic Journal*, 98.

MIQUET A., 1997 – « La régulation du lac du Bourget (France) : nouveau fonctionnement hydraulique, impacts environnementaux. » *Revue de géographie alpine*, 2 p 11-21

MIQUET A., 2003 – « La conservation des macrophytes : enjeux sociologiques et de gestion au lac du Bourget (Savoie, France). » Actes du séminaire : *Gestion et conservation des ceintures de végétation lacustre*, p 7-16.

MURRAY S., PULLAR L., 1910 – « Bathymetrical survey of the scottish fresh-water lochs » Edinburg, Challenger office, 785p.

NEUMANN J., 1959 - « Maximum depth and average depth of lakes » *Journal of fishery research board*, 16(6), p 923 - 927.

NION G., 2002 – *Etude du plan d'eau de recherche expérimental de Cieux : l'évaporation et les questions d'hydroclimatologie en Limousin*. Limoges, Mémoire de maîtrise, 98p.

NION G., 2003 – *Hydroclimatologie des plans d'eau dans l'ouest de la France et en Limousin : la question de l'évaporation*. Limoges, Mémoire de D.E.A., 82p.

PAPON P., 2002 – *Le fonctionnement des plans d'eau superficiels : les problèmes de vulnérabilité et de gestion au Balaton et en Limousin*. Limoges, Mémoire de D.E.A., 98p.

PASKOFF R., 1998 - *Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution*. Paris, Armand Colin, 260p.

PEDLOWSKY J., 1986 – *geophysical fluids dynamics*. New York, Springer-Verlag, 710p.

POURRIOT R. et MEYBECK M., 1995, « Les milieux lacustres » in POURRIOT R. et MEYBECK M.(sous la direction de) – *Limnologie générale*. Paris, Masson, 956 p : 1 – 3.

REMENIERAS G., 1986 - *L'hydrologie de l'ingénieur*. Paris, Eyrolles, 455p.

ROSELLO-TOURNOUD M.G., 1991 – *Analyse du comportement d'un écosystème lagunaire à diverses échelles de temps et d'espace. Application à l'étang de Thau*. Montpellier, Thèse de doctorat, 210p.

RUTTNER F., 1963 - *Fundamentals of Limnology*. Toronto, University of Toronto Press, 295p.

SCHARDT H., 1892 – « Notice sur l'effondrement du quai du Trait de Baye à Montreux, précédé de quelques considérations générales sur la morphologie géophysique des rives lacustres, la formation des cônes de déjection. » *Bulletin de la Société Vaudoise de Sciences Naturelles*, 28(109) 35p.

SCHLUMBERGER O., 1998 – *Mémento de pisciculture d'étang*. Cahors, Cemagref éditions, 238p.

SCHLUMBERGER O., BOURETZ N., 2002 – « Réseaux trophiques et production piscicole en étangs fertilisés (dordogne, France) » *Revue des sciences de l'eau*, 15(1) : 177-192

SCHLUMBERGER O., ALLARD J. Y., GOUY S., 1998 – « La pisciculture en Dordogne, un exemple de développement rural. » *Zones Humides Infos*. 21(3) : 14-15

SCHWOERBEL J., 1987 – *Handbook of limnology*. Chichester, Ellis Horwood Limited, 228p.

STUFFLE L.D. 1996 – *Bathymetry from hyperspectral imagery*. Monterey, Naval postgraduate school, Master Thesis, 77p.

SYBRANDY, A.L. AND NIILER, P.P. (1991) «The Woce/Toga Lagrangian drifter construction manuel. » SOI Report 91/6, WOCE Report 63. 58p.

THUNUS V., ZUUR E., LAMBERT P., et GODET CH., 1994 « A numerical simulation of transport and sedimentation of suspended particles in Lake Neuchâtel. » *Eclogae geol. Helv.*, 87(2), p 385-402.

TIBERIUS C., JONG K., 2002 – « Developments in Global Navigation Satellite Systems » *The Hydrographic Journal*, 104.

TOUCHART L., 1994 – *Le Baïka et le Léman, géographie et histoire de la géographie de deux lacs*. Univ. Paris IV Sorbonne, Thèse de doctorat en géographie, 337p.

- TOUCHART L., 1998 – *Le lac Baïkal*. Paris, L'Harmattan, 240p.
- TOUCHART L., 1999 – « Le Léman et la géographie physique, de la carte manuelle au traitement informatique » in BERTOLA C., GOUMAND C. et RUBIN JF. – Découvrir le Léman 100 ans après François-Alphonse Forel. Genève, Slatkine, 922p : 27-40.
- TOUCHART L., 2000 – *Les lacs. Origine et morphologie*. Paris, L'Harmattan, 202p.
- TOUCHART L., 2001a – « Der tägliche und jahreszeitliche Einfluss kleiner Wasserflächen auf die Temperatur von wasserläuffen am beispiel des sees Theil im Limousin » *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 45(5) : 201-207.
- TOUCHART L., 2001b – *De la température de l'eau à la géographie des lacs*. Univ. Limoges, Thèse d'HDR en géographie, 480p.
- TOUCHART L., 2002 – *Limnologie physique et dynamique. Une géographie des lacs et des étangs*. Paris, L'Harmattan, 395p.
- TOUCHART L. & GRAFFOUILLERE M. (sous la direction de) (2004) – *Les étangs limousins en questions*. Limoges, Editions de l'A.I.G.L.E., 180p.
- TIMMS B.V., 1992 – *Lake geomorphology*. Adelaide, Gleneagles, 180p.
- TROTIGNON J., 2000 – *Des étangs pour la vie. Améliorer la gestion des étangs*. Montpellier, Atelier technique des espaces naturels, 70p.
- UNESCO, 1986 – « Méthodes de calcul de la sédimentation dans les lacs et les réservoirs. » Contribution au Programme Hydrologique International, II Project, Stevan Bruck, rapporteur, 227p.
- VANNEY J.-R. 1993 – *Le mystère des abysses*. Paris, Fayard, col. « le temps des sciences », 522p.
- WELCH P.S., 1952 – *Limnology*. New York, McGraw-Hill, 538p.
- WETZEL R.G., 1983 - *limnology*. Philadelphia, Saunders College Publishing, 858p.

Tables

Table des figures

Toutes les figures sont créditées    l'auteur, sauf mention contraire.

Figure 1	Coupe schématique d'un appareil de sondage.	30
Figure 2	Sondeur Belloc.	31
Figure 3	Le sondeur Pullar et son utilisation	32
Figure 4	Principe de fonctionnement d'un échosondeur.	34
Figure 5	Impact de la largeur du faisceau sur l'observation du fond	35
Figure 6	Equipement du Plan d'Eau de Recherche Expérimental de Cieux	47
Figure 7	Localisation des plans d'eau étudiés	56
Figure 8	Présentation des plans d'eau étudiés à la même échelle	57
Figure 9	Localisation des plans d'eau étudiés dans le cadre climatologique limousin	58
Figure 10	Localisation des plans d'eau étudiés dans le cadre géologique limousin	59
Figure 11	Bassin d'alimentation du Grand ��tang de Cieux	60
Figure 12	Bassin d'alimentation de l'étang de la Pouge	62
Figure 13	Bassin d'alimentation de l'étang des Landes	64
Figure 14	Bassin d'alimentation de l'étang de Oussines	66
Figure 15	Bassin d'alimentation de l'étang de Rochechouart	67
Figure 16	Bassin d'alimentation du lac du Pont à l'Age	68
Figure 17	Fonctionnement théorique du système G.P.S. et récepteurs utilisés	76
Figure 18	Principe de la perche sédimentaire	87
Figure 19	Présentation de la bouée dérivante avec dérive profonde et G.P.S.	104
Figure 20	Création d'une matrice de points	110
Figure 21	Architecture de la triangulation de Delaunay	112
Figure 22	Comparaison des isobathes interpolées	115
Figure 23	Comparaison des calculs de pente	116
Figure 24	Rendu en coupe des interpolations	117
Figure 25	Triangulation de Delaunay sur la zone étudiée	118
Figure 26	Schéma classique de formation de la côte lacustre d'érosion	130
Figure 27	Coupe schématique d'un delta torrentiel	133
Figure 28	De l'apparition de l'étang de Cieux à sa morphologie actuelle	146
Figure 29	Cartographies anciennes de l'étang de Cieux : la carte de Cassini et le cadastre napoléonien	147
Figure 30	Modèle bathymétrique du Grand ��tang de Cieux	150
Figure 31	Bathymétrie du Grand ��tang de Cieux	151
Figure 32	Carte des pentes du Grand ��tang de Cieux	152
Figure 33	Carte des convexités et concavités du Grand ��tang de Cieux	153
Figure 34	Modèle bathymétrique de l'étang de la Pouge	154
Figure 35	Bathymétrie de l'étang de la Pouge	155
Figure 36	Carte des pentes de l'étang de la Pouge	156
Figure 37	Carte des convexités et concavités de l'étang de la Pouge	157
Figure 38	Modèle bathymétrique de l'étang des Landes	158
Figure 39	Bathymétrie de l'étang des Landes	159
Figure 40	Carte des pentes de l'étang des Landes	160
Figure 41	Carte des convexités et concavités de l'étang des Landes	161
Figure 42	Modèle bathymétrique de l'étang des Oussines	162

Figure 43	Bathymétrie de l'étang des Oussines	163
Figure 44	Carte des pentes de l'étang des Oussines	164
Figure 45	Carte des convexités et concavités de l'étang des Oussines	165
Figure 46	Modèle bathymétrique de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)	166
Figure 47	Bathymétrie de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)	167
Figure 48	Carte des pentes de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)	168
Figure 49	Carte des convexités et concavités de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)	169
Figure 50	Modèle bathymétrique du lac du Pont à l'Age	170
Figure 51	Bathymétrie du lac du Pont à l'Age	171
Figure 52	Carte des pentes du lac du Pont à l'Age	172
Figure 53	Carte des convexités et concavités du lac du Pont à l'Age	173
Figure 54	Modèle bathymétrique des étangs du Theil et des Garennes	174
Figure 55	Bathymétrie des étangs du Theil et des Garennes	175
Figure 56	Carte des pentes des étangs du Theil et des Garennes	176
Figure 57	Carte des convexités et concavités des étangs du Theil et des Garennes	177
Figure 58	Modèle bathymétrique de l'étang du Puy de Bavaud	178
Figure 59	Bathymétrie de l'étang du Puy de Bavaud	179
Figure 60	Carte des pentes de l'étang du Puy de Bavaud	180
Figure 61	Carte des convexités et concavités de l'étang du Puy de Bavaud	181
Figure 62	Carte géomorphologique du Grand étang de Cieux	182
Figure 63	Carte géomorphologique de l'étang de la Pouge	183
Figure 64	Carte géomorphologique de l'étang des Landes	184
Figure 65	Carte géomorphologique de l'étang des Oussines	185
Figure 66	Carte géomorphologique de l'étang de Bois Chenu (Rochechouart)	186
Figure 67	Carte géomorphologique du lac du Pont à l'Age	187
Figure 68	Carte géomorphologique des étangs du Theil et des Garennes	188
Figure 69	Carte géomorphologique de l'étang du Puy de Bavaud	189
Figure 70	Transects des talus en aval de l'étang de la Pouge réalisés lors de vidanges	204
Figure 71	Le delta composite de Pranaud dans l'étang de Cieux	207
Figure 72	Courbes bathygraphiques relatives des plans d'eau étudiés	225
Figure 73	Typologie schématique des caractéristiques morphologiques des types d'étangs à évolution « libre »	232
Figure 74	graphique de corrélation entre débit et MES, station de Pranaud	237
Figure 75	Les entrées et sorties de MES de l'étang de Cieux	238
Figure 76	Cartes des épaisseurs de sédiments	241
Figure 77	systèmes de vidange	249
Figure 78	impact du système de vidange sur la hauteur d'eau dans l'étang et sur le débit aval	250
Figure 79	Débit et MES lors de la vidange de l'étang de Cieux	252
Figure 80	situation de la pêche de l'étang de Cieux	254
Figure 81	Modélisation de l'impact de la vidange en aval	256
Figure 82	Impact du bac de décantation lors de la vidange de l'étang de la Pouge	258
Figure 83	Variation de la hauteur d'eau de l'étang de Cieux entre 1999 et 2003	268
Figure 84	la relation débit – marnage de l'étang de Cieux	272
Figure 85	niveaux moyens et extrêmes de l'étang de Cieux	274
Figure 85bis	niveaux moyen et extrêmes à l'étang de la Pouge	275
Figure 86	Les facteurs du bilan hydro-limnologique d'un étang limousin	277

Figure 87	Le bilan hydro-limnologique de l'étang de Cieux : stockages et déficits de la ressource en eau	281
Figure 88	Positionnement d'un courant hydrographique selon sa densité	287
Figure 89	Principe de fonctionnement des cellules de Langmuir	288
Figure 90	Mise en évidence, mesure et cartographie des courants hydrographique de faible intensité en zone deltaïque peu profonde (étang du Theil)	291
Figure 91	Modélisation des courants de l'étang de Cieux entre 70 et 150 cm de profondeur, par vent de Nord	300
Figure 92	Profils thermiques en lac d'eau douce	305
Figure 93	Cycle thermique saisonnier de deux étangs limousins	307
Figure 94	Profils thermiques mensuels des étangs de Cieux, de la Pouge et des Oussines	307
Figure 96	Diagramme profondeur-jour-température de l'étang de Cieux entre mai et août 2002	312
Figure 97	Diagramme profondeur-jour-température de l'étang de la Pouge entre mai et août 2000	313
Figure 98	Cycle simplifié de l'azote dans un plan d'eau	316
Figure 99	Stratification et désoxygénation de la colonne d'eau Etang de Cieux, 9 juillet 2003, 15 heures	317
Figure 100	Fonctionnement d'un moine	319
Figure 101	Impact du soutirage de l'eau de fond de l'étang de la Pouge sur le Gorret durant une période de stratification thermique. 26 août 2003	320

Note : il n'y a pas de figure 95

Table des encadrés collectifs

Encadré α	Présentation du laboratoire de terrain	107
Encadré β	La prise en compte du fetch dans l'étude de l'érosion de berges	200-201
Encadré γ	Mise en évidence d'un courant de densité dans l'étang de Cieux	294-295

Table des photographies

Photo 1	Le sondeur Pullar et son utilisation	32
Photo 2	Flotteur de fond laissant une trace d'huile sur le Léman	41
Photo 3	Courantomètre mécanique	43
Photo 4	Le grand étang de Cieux depuis le nord de la digue	61
Photo 5	L'étang de la Pouge depuis la digue	63
Photo 6	L'étang des Landes	65
Photo 7	L'étang des Oussines	69
Photo 8	L'étang de Bois Chenu vu du sud	70
Photo 9	Le lac du Pont à l'Age	70
Photo 10 & 11	Etangs du Theil et des Garennes	71
Photo 12	L'étang du Puy bavaud	72
Photo 13	Les trois récepteurs utilisés lors de l'étude	76
Photo 14	Perche bathymétrique	81

Photo 15	Embout de la perche sédimentaire	87
Photo 16	Le micro-moulinet C2	91
Photo 17	Station météo Weather Monitor II	96
Photo 18	Courantomètre Doppler, console de lecture et sonde	99
Photo 19	Courantomètre Doppler et sa bouée stabilisatrice présentées au laboratoire	100
Photo 20	Thermomètre enregistreur	101
Photo 21 & 22	Les bouées dérivantes type I et II	102
Photo 23	Bouée dérivante hors d'eau	104
Photo 24	Face supérieure avec G.P.S.	104
Photo 25	Mise à l'eau sur l'étang de Cieux	104
Photo 26	Bouée dérivante et bouée test	104
Photo 27	Anémomètre portable Skywatch 3-D	108
Photo 28	La digue de l'étang du Theil depuis l'intérieur de l'étang	202
Photo 29	Falaises surplombantes dans l'étang de la Pouge	203
Photo 30	L'encaissement du ruisseau dans la marge	207
Photo 31	La plaine deltaïque	207
Photo 32	La marge deltaïque aux basses eaux	207
Photo 33	L'encaissement du Gorret dans le delta de la Pouge lors d'une vidange	212
Photo 34	Le talus prodeltaïque lors de la vidange de la Pouge	212
Photo 35	Flèche sur la rive droite du delta du Theil	214
Photo 36	Delta lors de la vidange de l'étang des Garennes	215
Photo 37	La plaine centrale de l'étang de la Pouge durant une vidange	221
Photo 38	La plaine centrale de l'étang de Cieux durant une vidange	222
Photo 39	Une des carottes prélevées sur le talus ouest de l'étang de Cieux	244
Photo 40	Ouverture de la bonde	252
Photo 41	Pêcherie lors de la vidange	252
Photo 42 & 43	La station des Grattes avant et durant le passage de l'onde provoquée par la vidange	252
Photo 44	La bonde de la Pouge	258
Photo 45	Déversoir du bac de décantation	258
Photo 46	Cellules de Langmuir sur le lac de Vassivière	289

Table des matières

Avant – propos	1
Introduction générale	9
PARTIE I : D'UNE LIMNOLOGIE LACUSTRE A LA MISE EN PLACE D'UNE METHODOLOGIE DE GEOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE POUR L'ETUDE DES ETANGS LIMOUSINS	19
I.1. De l'océanographie à la géographie limnologique	21
I.1.1. Epistémologie : évolution des problématiques de la limnologie	22
I.1.2. Le socle de l'étude limnologique : histoires et techniques de la bathymétrie	27
I.1.2.1. La mesure ponctuelle de la profondeur	29
I.1.2.2. La mesure « continue linéaire » de la profondeur	33
I.1.2.3. La mesure « continue surfacique » acoustique de la profondeur	37
I.1.2.4. La mesure « continue surfacique » optique de la profondeur	38
I.1.3. Des filets dérivants aux modélisations	40
I.1.4. Du concept de limnosystème au Plan d'Eau de Recherche Expérimental. : le souci de placer le plan d'eau au centre de la démarche	44
I.1.4.1. Du terme système...	44
I.1.4.2. ...au limnosystème...	45
I.1.4.3. ...et à la réalité du terrain.	46
I.1.5. La nécessité actuelle de résultats appliqués	48
I.2. Quel cadre géographique pour une étude des étangs ?	49
I.2.1. L'objet géographique étang	49
I.2.1.1. De la définition du mot étang	49
I.2.1.2. De la spécificité de l'étang limousin	52
I.2.2. Un jeu d'échelles horizontales et verticales réclamant une typologie pour l'étude	53
I.2.3. Les plans d'eau étudiés au cœur de leurs bassins d'alimentation	61
I.2.4. L'importance de l'échelle temporelle : la date de mise en eau	74
I.3. Des méthodologies dictées par les échelles	74
I.3.1. L'étude de la morphologie	75
I.3.1.1. La question de la localisation	77
I.3.1.1.1. Localisation à l'aide du G.P.S.	77
I.3.1.1.2. La triangulation « artisanale »	80
I.3.1.2. Le choix des méthodes de sondage	81
I.3.1.2.1. Le sondage à la perche graduée	81
I.3.1.2.2. Le sondage à la ligne de sonde	83
I.3.1.2.3. L'utilisation d'un échosondeur	84
I.3.1.2.4. Les bathymétries réalisées	85
I.3.1.3. Les méthodes d'étude du sédiment	86
I.3.1.3.1. L'estimation de l'épaisseur du sédiment	87

I.3.1.3.2. Prélèvement de sédiment à l'aide de la benne de Lenz	89
I.3.2. L'étude de l'hydrologie	90
I.3.2.1. La surveillance des cours d'eau	90
I.3.2.1.1. La mesure des débits	90
I.3.2.1.2. La mesure des MES	93
I.3.2.2. La surveillance des niveaux stagnustres	94
I.3.2.3. La surveillance des facteurs climatiques	95
I.3.3. L'étude des courants	97
I.3.3.1. Méthodes eulériennes (suivi statique)	97
I.3.3.1.1. Le micro moulinet	98
I.3.3.1.2. Le courantomètre	99
I.3.3.1.3. Les thermomètres	101
I.3.3.2. Méthodes lagrangiennes (suivi dynamique)	102
I.3.3.2.1. Les bouées dérivantes simples	102
I.3.3.2.2. La conception d'une bouée équipée d'une dérive profonde et d'un GPS	105
I.3.3.3. La surveillance du vent	106
I.4. Apports de l'informatique et de la géomatique à la géographie limnologique	108
I.4.1. L'apport des Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.) et des Modèles Numériques de Terrain (M.N.T.)	109
I.4.2. Interpolation et réalisation de bathymétrie	110
I.4.2.1. Principe de l'interpolation	110
I.4.2.2. Choix d'une interpolation	112
I.4.2.3. Application à la bathymétrie	113
Conclusion partielle	119

PARTIE II : DE LA MORPHOLOGIE DES ETANGS ET DE SES CONSEQUENCES SUR LEUR GESTION 123

II.1. La morphologie limnologique et ses représentations	126
II.1.1. L'étagement de la morphologie lacustre	128
II.1.1.1. Les modelés lacustres littoraux	128
II.1.1.1.1. Les représentations de la côte lacustre d'érosion	129
II.1.1.1.2. Les modelés d'accumulation lacustre littoraux	131
II.1.1.1.3. Les deltas lacustres	132
II.1.1.1.4. Le ravin sous lacustre	134
II.1.1.2. les modelés lacustres profonds	134
II.1.1.3. La régularisation lacustre	135
II.1.2. Les outils de quantification morphologique de la géographie limnologique	136
II.1.2.1. La carte bathymétrique	137
II.1.2.2. Le modèle bathymétrique	137
II.1.2.3. Les cartes de pente et de concavité	138
II.1.2.4. Les courbes bathygraphique et profondeur-volume	139
II.1.2.5. Les indices	140

II.1.2.6. La carte géomorphologique	142
II.2. Les héritages morphologiques	143
II.2.1 Tentative de modélisation de l'étang de Cieux lors de sa mise en eau	143
II.2.1.1. De l'utilité d'une modélisation historique	144
II.2.1.2. Mise en place d'un protocole méthodologique	144
II.2.1.3. Résultats et perspectives	147
II.2.2. La morphométrie « plane »	190
II.2.3. Le modelé subaérien	193
II.2.3.1. Le talus	193
II.2.3.2. Le thalweg	195
II.2.4. Un certain conditionnement morphologique	196
II.3. Des modelés stagnustres étagés à l'image du fonctionnement lacustre	198
II.3.1. Les modelés stagnustres littoraux	198
II.3.1.1. les modelés d'érosion	199
II.3.1.2. Les modelés d'accumulation	204
II.3.2. Le cas particulier des deltas d'étangs, entre zonation et étagement	205
II.3.2.1. Marnage et marge deltaïque	206
II.3.2.2. Le grand delta composite d'étang	208
II.3.2.2.1. Le delta de Pranaud du Grand étang de Cieux	208
II.3.2.2.2. Les deltas du Nord et des Bonnes Fonds du Grand étang de Cieux	210
II.3.2.3. Le grand delta immergé d'étang	211
II.3.2.4. Le delta moyen d'étang	213
II.3.3. Les modelés stagnustres profonds	216
II.3.3.1. L'invention du plafond et de la plaine centrale, un retour épistémologique nécessaire	217
II.3.3.2. Détermination morphologique des modelés profonds	219
II.3.3.3. Les « grands fonds » des étangs	220
II.4. Synthèse morphologique	224
II.4.1. Interprétation des morphométries et comparaison des morphologies des étangs étudiés	226
II.4.2. Une typologie spatiale et temporelle	228
II.4.2.1. Une nécessaire prise en compte de toutes les échelles	228
II.4.2.2. Une réelle identité morphologique stagnustre	229
II.4.2.3. Types morphologiques des étangs de l'étude	231
II.5. Le stockage sédimentaire et les vidanges d'étang	235
II.5.1. Le stockage sédimentaire et sa quantification	235
II.5.1.1. Les apports des tributaires au plan d'eau	235
II.5.1.2. Les sédiments en place	240
II.5.1.3. Un essai de prospective	243
II.5.2. Les vidanges, suivi et prévention	245
II.5.2.1. La pratique des vidanges en Limousin	246
II.5.2.1.1. Régions d'étangs et pratiques liées aux étangs piscicoles	246
II.5.2.1.2. Le cas limousin	248
II.5.2.2. Le relargage sédimentaire, dans l'étang et en aval	251
II.5.2.2.1. Théorie et mise en place du protocole de suivi	251

II.5.2.2.2. L'export de MES lors de la vidange de l'étang de Cieux	253
II.5.2.2.3. Impacts immédiats et impacts durables d'une vidange sur l'émissaire	255
II.5.2.3. De la botte de paille au planning de vidange	257
Conclusion partielle	260
PARTIE III : L'EAU DES ETANGS	263
III.1. Les variations verticales de la masse d'eau	266
III.1.1. Débits et marnage : les rythmes de variation de la masse d'eau	267
III.1.1.1. Méthodologie et durée de la surveillance	267
III.1.1.2. Variations du niveau de l'étang de Cieux à différentes échelles	269
III.1.1.2.1. Le marnage à l'échelle annuelle	269
III.1.1.2.2. Le marnage à l'échelle interannuelle	271
III.1.1.3. Marnage et réseau hydrographique	272
III.1.1.4. Marnage, superficie et volume	273
III.1.2. le bilan hydro-limnologique	276
III.1.2.1. Facteurs retenus pour le bilan	277
III.1.1.1.1. Les apports au plan d'eau	278
III.1.1.1.2. Les pertes du plan d'eau	279
III.1.1.1.3. La question de la nappe	280
III.1.2.2. Le calcul du bilan	280
III.1.2.3. Bilan du Grand étang de Cieux (37 ha)	282
III.1.3. Inertie et temps de renouvellement des eaux	283
III.2. Etude dynamique	285
III.2.1. Les courants lacustres	285
III.2.1.1. Spécificités des courants lacustres	286
III.2.1.2. Type de courants lacustres	286
III.2.1.3. Quelques hypothèses stagnustres	288
III.2.2. Les campagnes et leurs résultats	290
III.2.2.1. Les courants hydrographiques	290
III.2.2.2. Le courant de densité en Baie de Pranaud	293
III.2.2.3. Les courants de dérive	297
III.2.2.3.1. Une grande difficulté de mesure	297
III.2.2.3.2. La validité de la bouée dérivante à dérive profonde	298
III.2.2.3.2. La réalisation d'une carte de courants pour l'étang de Cieux	299
III.3. Le fonctionnement limnique global	304
III.3.1. Le comportement thermique des étangs limousins	304
III.3.1.1. Stratification directe, inverse et homothermie	305
III.3.1.2. Typologie thermo-mictique des étangs limousins	308
III.3.1.3. Les relations entre thermique et hydrodynamique	309
III.3.2. Influence de la morphologie stagnustre sur le fonctionnement physique	311
III.3.2.1. Etang de plaine et étang de vallée encaissée	311
III.3.2.2. Conséquences de la morphologie : l'exemple du moine	315

III.3.2.3. Aménager en tenant compte de la morphologie	321
Conclusion partielle	324
Conclusion générale	327
Bibliographie	337
Table des figures	349
Table des encadrés collectifs	351
Table des photographies	351

**Morphologie et hydrodynamique des plans d'eau : le cas des étangs-lacs en Limousin –
Copyright © 2006 Matthieu Carlini**

Copyleft : cette oeuvre est libre, vous pouvez la redistribuer et/ou la modifier selon les termes de la
Licence Art Libre.

Vous trouverez un exemplaire de cette Licence sur le site Copyleft Attitude <http://www.artlibre.org/>

