

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 125 (1999)
Heft: 9

Artikel: Modélisation conceptuelle de la dynamique érosive d'un cours d'eau: application à la cartographie des dangers liés aux érosions de la Venoge
Autor: Consuegra, David / Lance, Jean-Marc / Musy, André
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-79625>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Modélisation conceptuelle de la dynamique érosive d'un cours d'eau

Par David Consuegra,
Jean-Marc Lance et
André Musy
Institut
d'aménagement des
terres et des eaux,
Hydrologie et
aménagement
GR – EPFL
1015 Lausanne

Application à la cartographie des dangers liés aux érosions de la Venoge

Résumé

Cet article présente les résultats des activités menées dans le cadre du projet « Venoge » par l'Institut d'aménagement des terres et des eaux (IATE/HYDRAM) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Entrepris sous l'égide des services des eaux, sols et assainissement (SESA) et de l'aménagement du territoire (SAT) du canton de Vaud, en collaboration avec l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), ce projet répond au dépôt d'une initiative constitutionnelle qui a donné naissance à un plan d'aménagement cantonal: le PAC n° 284 de la Venoge. Ce dernier prévoit de redonner au cours d'eau un espace où il peut divaguer librement sans menacer l'intégrité d'objets vulnérables sis dans son lit majeur. L'IATE/HYDRAM a été sollicité pour développer une méthodologie capable de prévoir l'évolution probable du tracé de la rivière à moyen terme, d'analyser les conséquences d'effondrements de berges lors de crues importantes et d'évaluer les conséquences liées à l'enlèvement et/ou à l'ajout d'ouvrages de protection comme des enrochements. C'est par une modélisation conceptuelle du comportement naturel des divagations du cours d'eau que l'IATE/HYDRAM a pu répondre à ces différentes questions. Sur la base d'un système d'information géographique (MapInfo), deux cartes ont été produites; la première décrit les dangers liés à l'effondrement des berges lors d'une crue centennale alors que la seconde montre l'évolution des méandres à moyen terme. Combinées à une délimitation adéquate des objets menacés, ces informations ont permis d'identifier les déficits de sécurité actuels, de définir une limite d'intervention et d'en établir les règles de gestion en liaison avec la protection contre l'érosion.

Problématique

Le long de ses 25 km de parcours, le potentiel de divagation de la Venoge est fortement limité par l'occupation des sols; seules exceptions, les zones naturelles qu'elle traverse et qui, dans la plupart des cas, sont classées d'intérêt national. Le corridor de divagation a été réduit de manière significative par la construction d'infrastructures de communication, et par le développement de l'industrie, de l'agriculture et d'autres activités économiques. Cette situation a conduit, en 1989, au dépôt d'une initiative constitutionnelle qui a débouché sur un plan d'aménagement cantonal (PAC) [13]¹, dont l'un des objectifs principaux est de favoriser la dynamique écologique de la rivière en minimisant les interventions actives du type enrochements et en revitalisant certains secteurs. La figure 1 illustre la situation actuelle d'un secteur où une zone industrielle, des terrains agricoles et des infrastructures de communication se situent aux abords immédiats de la rivière. On peut en déduire la nature des conflits que la mise en place du PAC est susceptible de générer, puisque les potentialités de divagation et d'érosion restent élevées même aux abords des tronçons canali-

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt die Ergebnisse der Arbeit des « Institut de l'aménagement des terres et des eaux » (IATE/HYDRAM) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne im Rahmen des Projektes « Venoge ». Dieses Projekt wurde von der Gewässer- und Umweltschutzabteilung (SESA) und vom Amt für Raumplanung (SAT) des Kantons Waadt, sowie vom Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) veranlasst. Es entsprach der Hinterlegung einer verfassungsrechtlichen Initiative, die zu einer kantonalen Raumplanung führte. Dieser Plan bezweckt die Schaffung eines genügenden Raumes für den Fluss, damit dieser ungehindert überborden kann, ohne die empfindlichen Objekte in seinem Hochwasserbett zu gefährden. Das IATE/HYDRAM wurde beauftragt, eine Methodologie zu entwickeln, die es erlauben soll, den wahrscheinlichen mittelfristigen Werdegang der Flusslinienführung vorauszusehen, die Folgen von UferEinstürze bei beträchtlichen Hochwasserereignissen zu untersuchen und die Folgen der Entfernung oder der Errichtung von Schutzbauwerken – wie z. B. Steinblöcken – zu beurteilen. Dank einer Modellierung des natürlichen Verhaltens des Flusses konnte das IATE/HYDRAM diese verschiedenen Fragen beantworten. Anhand eines geographischen Informationssystems (*Mapinfo*) wurden zwei Karten erstellt: die erste beschreibt die bei einem hundertjährigen Hochwasserereignis mit UferEinstürzen verbundenen Gefahren, während die zweite die mittelfristige Entwicklung der Windungen zeigt. Kombiniert mit einer entsprechenden Abgrenzung der bedrohten Objekte, haben diese Informationen das Erkennen der gegenwärtigen Sicherheitsmängel erlaubt, sowie die Festlegung einer Grenze des Eingreifens und dessen Regelung in Zusammenhang mit dem Schutz gegen Erosion.

sés. Dans la zone alluviale, on peut encore distinguer d'anciens méandres, ce qui confirme une activité érosive importante. Compte tenu des objectifs du PAC et des besoins de protection des différents objets en présence, la gestion du cours d'eau doit aborder certains aspects tels que ceux présentés ci-après.

Lors d'une crue importante:

- a) L'effondrement de la berge peut-il menacer l'intégrité du bâtiment industriel (figure 1-a)?
- b) Si l'ouvrage O-460 s'effondre, quelle sera l'emprise de l'érosion? Peut-on envisager une menace sur la voie de chemin de fer (figure 1-b)?
- c) L'ouvrage O-490 peut-il être contourné par les érosions en amont de la courbure (figure 1-c)? Peut-on déterminer où sont appliquées les plus fortes contraintes sur cet ouvrage?

A moyen terme, d'ici une trentaine d'années par exemple:

- d) Le cours d'eau va-t-il atteindre la zone industrielle (figure 1-d)?
- e) Le cours d'eau va-t-il continuer sa progression contre la gravière à l'amont de l'enrochement O-460 (figure 1-e)? Quelles seraient les conséquences d'un démantèlement de cet ouvrage? Son abandon conduirait-il à une menace pour la voie de chemin de fer?

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

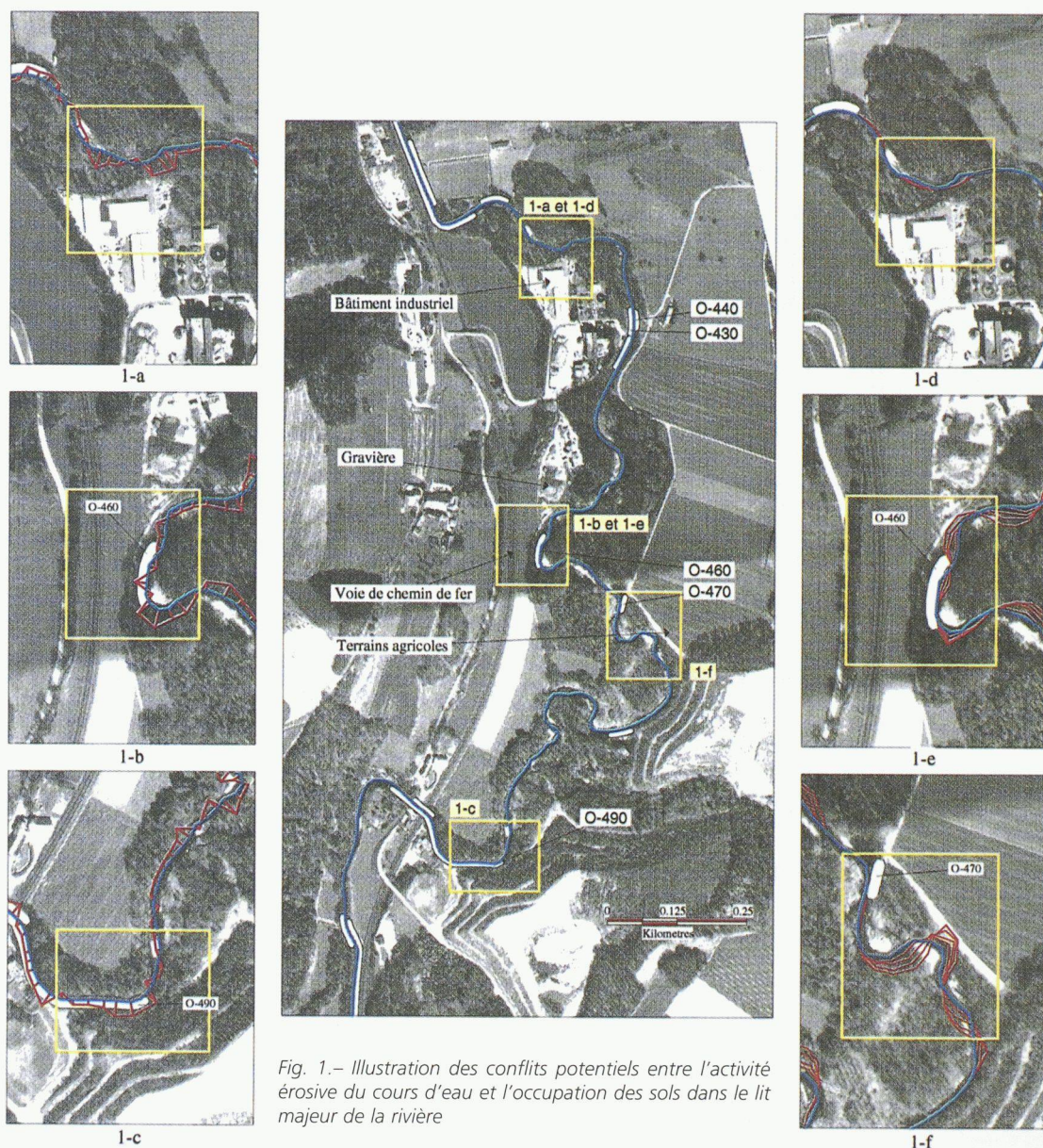
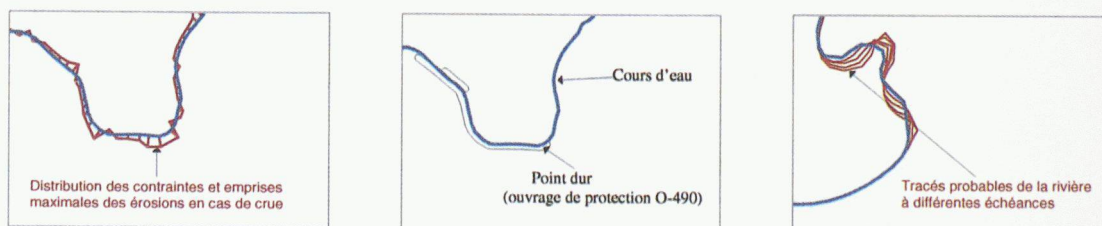


Fig. 1.— Illustration des conflits potentiels entre l'activité érosive du cours d'eau et l'occupation des sols dans le lit majeur de la rivière

Légende :



f) Même si le PAC renonce à protéger les terrains agricoles, peut-on estimer les pertes en terres que subiront certains exploitants (figure 1-f) ? Une des volontés premières du PAC étant de recréer un espace de liberté aussi large que possible, on comprendra aisément qu'on ne peut plus réagir face à des menaces potentielles par la pose systématique d'enrochements, qui figent encore davantage le tracé de la rivière. Des considérations empiriques simples, établissant des relations de proportionnalité entre la largeur du lit mineur et l'espace de divagation nécessaire ne sont guère plus adaptées, car elles ne prennent pas

en considération les effets des nombreux enrochements. Pour mieux identifier les conflits et bien cerner les implications du démantèlement d'ouvrages, il a fallu faire appel à des modélisations conceptuelles permettant d'envisager l'étude de scénarios. C'est à ces développements méthodologiques qu'est consacré le présent article.

Phénoménologie

La figure 2 illustre la complexité des phénomènes à modéliser par comparaison des tracés observés en

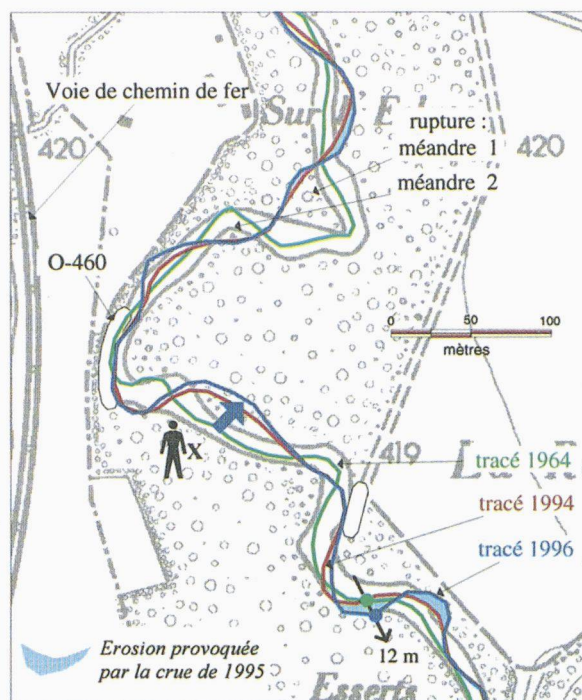


Fig. 2.— Tracés observés en 1964, 1994 et 1996

1964, 1994 et 1996. Les différences entre les deux tracés les plus récents proviennent essentiellement des érosions provoquées par une crue de temps de retour trente ans, survenue en 1995. On notera également la présence de deux enrochements destinés à contenir les divagations du cours d'eau ; dans un cas pour protéger la voie CFF, dans l'autre pour assurer l'intégrité d'un chemin agricole. La comparaison des divers tracés amène quatre remarques.

- Entre 1964 et 1994, les deux méandres aux environs du lieu-dit « Sur l'Ecluse » ont été coupés, probablement à la suite d'une crue ou à cause de la chute d'un arbre, phénomène aléatoire mais capable de modifier brutalement le tracé de la rivière.
- Au lieu-dit « Les Esserts », on pourra juger de l'ampleur des érosions en comparant les évolutions entre 1964 et 1994 avec celles provoquées uniquement par la crue de 1995. Pour cette dernière, la portée des érosions peut être équivalente aux arrachements progressifs survenus pendant trente ans. En fait, la rivière se déplace par à-coups à la suite de crues. Malheureusement, les informations disponibles ne permettent pas de modéliser un tel comportement. Ainsi, entre 1964 et 1994, on parlera d'un taux d'érosion moyen annuel de 0,4 mètre par année (12 mètres sur trente ans), même si l'on sait pertinemment que ce chiffre peut être atteint ou dépassé lors d'une seule et unique crue.
- La rupture des méandres a créé un rayon de courbure plus prononcé immédiatement à l'amont de l'enrochement (O-460) augmentant ainsi les contraintes d'arrachement à cet endroit et le risque de contournement de l'ouvrage. La menace sur ce dernier s'est donc aggravée à la suite de la rupture des méandres plus en amont.
- Au droit de l'enrochement (O-460), le tracé de 1964 s'est déplacé provoquant une translation et une amplification des méandres vers l'aval. Il est à ce propos intéressant de signaler qu'un observateur situé au point [x] de la figure 2 aurait certain-

nement été loin de penser que trente ans plus tard, au lieu de se rapprocher, la rivière allait plutôt s'éloigner d'une distance de 25 mètres. Au point [x], le comportement de la rivière dépend en effet fortement de ce qui se passe plus en amont.

Par le biais de ces exemples, le lecteur percevra mieux la complexité des processus en jeu (influence des rayons de courbure et des conditions de bord, amont ou aval) et le caractère aléatoire, donc difficile à maîtriser, de certains événements tels que les crues, la coupure des méandres ou encore les chutes d'arbres. Or si les développements théoriques relatifs aux divers aspects de l'érosion des cours d'eau sont nombreux [4], toutes les approches, même à des niveaux de complexité très différents, affichent un caractère nettement hydraulique impliquant des débits, des vitesses, des profils longitudinaux et transversaux ainsi que les caractéristiques des sols du fond du lit et des berges. Et bien que toutes ces données s'avèrent nécessaires au calcul des contraintes d'arrachement et du transport solide, le tout doit encore être adapté aux conditions particulières dans les méandres où la nature hélicoïdale des écoulements complique singulièrement les processus. Pour s'en convaincre, il suffira de consulter la littérature spécialisée et plus particulièrement les travaux du laboratoire hydraulique de Delft en Hollande [3,11].

Cela étant, il demeure utopique de croire que ces approches sont en mesure de bien décrire des caractéristiques hétérogènes relatives aux méandres eux-mêmes, aux taux d'érosion, aux types de sols ou encore à la végétation croissant sur les berges. Si l'on y ajoute les difficultés à quantifier le potentiel d'effondrement des ouvrages et à maîtriser des phénomènes aussi aléatoires que la chute d'arbres, on comprendra aisément que les approches de type hydraulique ne sont applicables que lorsque l'on dispose d'une quantité très importante de données.

Dans le cadre de la présente étude, où il est plutôt question de déceler des tendances migratoires du tracé pour identifier les conflits avec l'occupation du sol, on peut donc retenir une approche plus qualitative capable, cependant, d'exploiter au mieux les informations décrivant l'évolution des tracés ; dans le cas qui nous occupe, il s'agit de ceux observés en 1964, 1994 et 1996. Ces derniers ont été digitalisés à partir d'« orthophotos » à l'échelle 1/5000, si bien que nous avons tout naturellement été conduits à retenir une modélisation des divagations du cours d'eau de nature plus conceptuelle, à l'image de celle proposée par le Département des sciences environnementales de l'Université de Virginie aux Etats-Unis [6,7]. Il s'agit d'une combinaison de deux modèles : le premier définit la relation entre l'évolution en plan d'un méandre et son rayon de courbure [5] alors que le second décrit l'influence entre méandres [8].

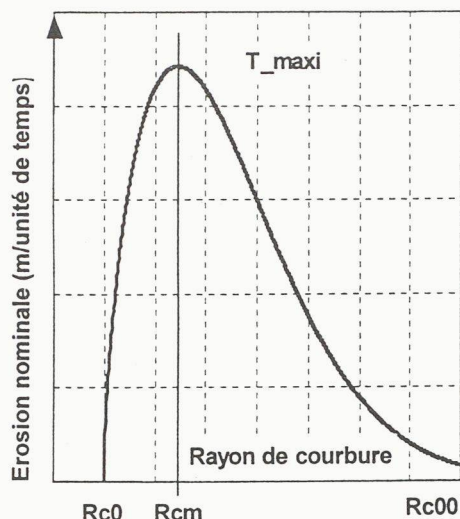


Fig. 3. – Erosion nominale et rayon de courbure

Modèle conceptuel

A partir d'observations rapportées en 1975 et 1983, Hickin et Nanson ont montré que l'érosion nominale en un point i du cours d'eau, dépend du rayon de courbure en ce point lorsqu'il n'y a pas d'influence de l'amont. La figure 3 illustre l'allure de cette fonction, comparable à une fonction de type gamma. Pour des rayons de courbure Rc_0 et Rc_{00} , l'érosion nominale est nulle. Elle atteint en revanche un maximum (T_{maxi}) pour un rayon de courbure « optimum » (Rc_m). L'expression analytique décrivant l'érosion nominale ($T_{nom}(i)$) en fonction du rayon de courbure au point i s'écrit :

$$T_{nom}(i) = k_1 * X(i)^{(b-1)} * e^{-k_2 * X(i)^b} \quad (1)$$

$$X(i) = Rc(i) - Rc_0$$

$T_{nom}(i)$ est généralement exprimée en mètres de terre érodée par unité de temps. Il s'agit d'un taux moyen de progression du méandre.

Les différents termes de l'équation (1) se définissent comme suit :

$Rc(i)$ Rayon de courbure au point i (m).

Rc_0 Rayon de courbure donnant une érosion nulle (m); généralement équivalent à la largeur du lit mineur du cours d'eau selon les recommandations de Hickin et Nanson [5]. Pour la Venoge on adoptera une valeur moyenne de 10 mètres.

k_1, k_2, b Paramètres 1, 2 et 3 déterminant les valeurs de Rc_m , T_{maxi} et définissant l'allure de la courbe de la figure 3.

En corrigeant l'érosion nominale par l'influence des méandres à l'amont, on obtient l'érosion réelle $T_{réelle}(i)$. L'expression analytique proposée par Howard [6] et Parker s'écrit :

$$T_{réelle}(i) = \Omega * T_{nom}(i)$$

$$+ \delta * \left[\int_0^\infty T_{nom}(i - \xi) * G(\xi) d\xi \right] / \left[\int_0^\infty G(\xi) d\xi \right] \quad (2)$$

où ξ représente une distance vers l'amont mesurée à partir du point i et $T_{nom}(i - \xi)$ l'érosion nominale correspondante. Dans la littérature, plusieurs valeurs

de Ω et de δ ont été proposées. Par souci de simplicité, le modèle de Ikeda et al. [8] a été choisi. Les valeurs correspondantes de Ω et δ sont égales à $-1,0$ et $2,0$ respectivement; la fonction $G(\xi)$ s'écrit :

$$G(\xi) = e^{-\alpha\xi} \quad (3)$$

L'influence des méandres à l'amont équivaut donc à une érosion moyenne calculée en pondérant toutes les valeurs nominales par leur distance respective (ξ) au point d'intérêt. La portée de l'influence amont est gouvernée par le 4^e paramètre du modèle : α , et elle décroît de façon exponentielle en fonction de la distance ξ . Il est intéressant de constater que l'érosion réelle peut être du même signe que son homologue nominale ou de signe opposé en fonction de l'importance de l'influence amont. On peut donc espérer simuler des inversions de courbure analogues à celles de la figure 2.

Mise en œuvre

Le tracé initial du cours d'eau est représenté par un vecteur $W_0(i, x_i, y_i)$ où i est le numéro du point et x_i et y_i ses coordonnées respectives. En principe, on choisit un nombre de points suffisant pour bien décrire le parcours de la rivière; la distance entre deux points est comprise entre 10 et 20 mètres. En un point i quelconque, l'équation (1) fournit l'érosion nominale. En considérant qu'entre deux points p et $p-1$, la variation de cette dernière est linéaire, l'intégrale de l'équation (2) a une solution analytique (fig. 4) :

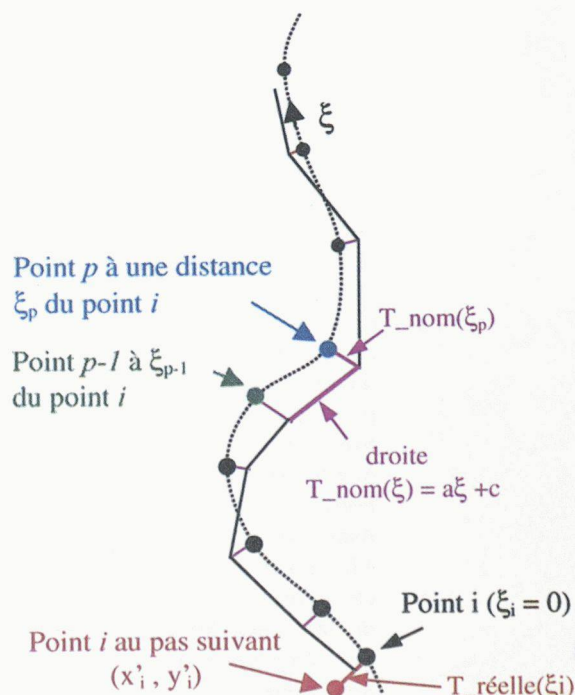


Fig. 4. – Mise en œuvre du modèle de divagation

$$\text{Influence} = \frac{\left[\frac{1}{\alpha} (\alpha \xi + c - \alpha a) e^{-\alpha \xi} \right] \cdot \frac{\xi p}{\xi p - 1}}{\left[e^{-\alpha \xi} \right] \cdot \frac{\xi p}{\xi p - 1}} \quad (4)$$

avec: $T_{nom}(\xi) = a \xi + c$

Les bornes d'intégration ξ_p et ξ_{p-1} représentent les distances entre les points (i et p) et (i et $p-1$) respectivement. Les paramètres a et c sont calculés en posant: $a \cdot \xi_{p-1} + c = T_{nom}(\xi_{p-1})$ et $a \cdot \xi_p + c = T_{nom}(\xi_p)$. Au point i , l'érosion réelle $T_{réelle}(i)$ est obtenue en ajoutant à $T_{nom}(i)$, le cumul des influences calculées avec l'équation (4) pour tous les couples de points sis à l'amont. Le déplacement du nœud i s'effectue le long de l'axe défini par son rayon de courbure; par convention du côté de la rive gauche si l'érosion réelle est positive. Le déplacement (d_i) est obtenu en multipliant l'érosion réelle par le pas de temps utilisé. Le choix de ce dernier n'est pas très déterminant dans la mesure où il s'agit de calculer un taux moyen d'érosion sur une période donnée; 32 ans dans le cas qui nous occupe. Cependant, un pas de temps de quatre ans a été retenu pour bien prendre en compte les effets liés à la rupture des méandres. Les nouvelles coordonnées (x'_i , y'_i) du point i peuvent finalement être déterminées. En répétant cette démarche pour tous les points du vecteur W_0 , on décrit le tracé de la rivière 4 ans plus tard. Si l'évolution calculée empiète sur un enrochement, le nœud i conserve ses anciennes coordonnées.

Le nouveau tracé dénommé $W_1(i, x'_i, y'_i)$ affiche des rayons de courbure différents; ce qui modifie les érosions nominales et réelles. On peut donc calculer la nouvelle évolution du tracé de la rivière pour les quatre années suivantes et ainsi de suite jusqu'à la fin de la période de simulation.

Tous les enrochements recensés en 1996 ont été maintenus lors des simulations. D'ailleurs, ils existaient déjà en 1964. Jusqu'à présent, ils ont été bien entretenus par les services concernés de l'Etat; aucun effondrement majeur n'a été signalé depuis 1964. Au droit de ces ouvrages, les migrations du cours d'eau ne sont donc pas autorisées. Que ce soit pour le cours d'eau en entier ou pour des tronçons spécifiques, les premier et dernier points du vecteur W sont toujours fixes. On les fera donc coïncider avec des enrochements pour ne pas biaiser les résultats des simulations.

Avant de démarrer une nouvelle itération temporelle, il faudra vérifier le potentiel de rupture des méandres. On associe à chaque nœud i une distance de rupture dr_i dans l'axe défini par le rayon de courbure (Rc_i) et de même signe que d_i (fig. 5). Toujours dans cette même direction, on calcule la distance dp_i séparant le nœud concerné de la plus proche intersection avec le

tracé de la rivière; il y aura rupture du méandre si $dr_i > dp_i$. La distance de rupture est proportionnelle à la largeur moyenne du cours d'eau ($W \sim 10$ mètres); elle est également pondérée par rapport au déplacement d_i pour tenir compte des nœuds qui sont soumis aux contraintes les plus élevées. Ainsi, la distance de rupture s'écrit:

$$dr_i = k_3 \cdot W \cdot \frac{d_i}{\max[d_i]} \quad (5)$$

avec k_3 paramètre de calage

Lorsqu'il y a rupture d'un méandre, tous les points compris entre i et z (fig. 5) sont supprimés, le nouveau segment de cours d'eau est découpé, au besoin, si sa longueur dépasse 20 mètres (distance maximale entre deux nœuds successifs). Le paramètre k_3 s'ajoute à la liste de ceux du modèle décrit par les équations (1), (2) et (3), à savoir: k_1 , k_2 , b et α .

Même si l'approche conceptuelle décrite jusqu'à maintenant est surtout orientée vers l'évaluation des migrations du tracé de la rivière à moyen et long termes, elle peut également être appliquée pour évaluer de manière approximative, l'étendue des érosions lors d'une crue isolée à partir d'un tracé initial. On supposera alors qu'il existe une relation de proportionnalité entre les déplacements d_i calculés avec les 5 paramètres décrits plus hauts et ceux (d_{i-crue}) provoqués par une forte crue, par exemple avec des temps de retour compris entre 30 et 100 ans si l'on reprend les recommandations de l'Office fédéral de l'économie des eaux [OFEE, 1997]. Ce faisant, on traduit un concept simple; les plus fortes érosions lors d'une crue se produisent dans les secteurs où les déplacements moyens sont les plus élevés puisque c'est à ces

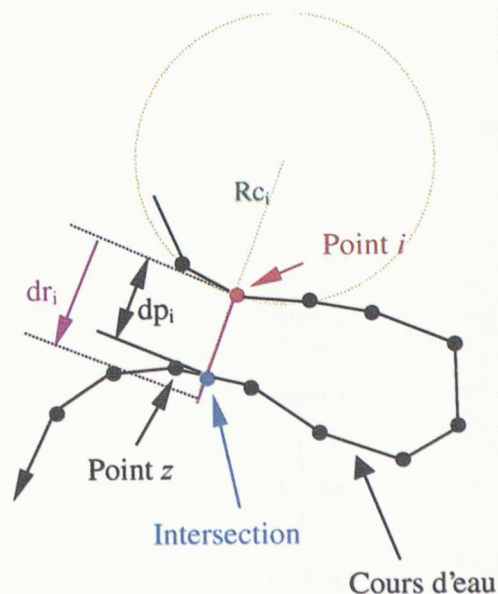


Fig. 5.- Critères permettant d'évaluer le potentiel de coupure d'un méandre

endroits que le modèle indique la présence de fortes contraintes et/ou de faibles résistances des berges. Ce facteur de proportionnalité sera appelé k_{100} . Il s'agit du 6^e et dernier paramètre du modèle de divagation utilisé.

Calibrage du modèle

Les six paramètres décrits plus haut doivent être calés sur la base de tracés observés comme ceux de 1964, 1994 et 1996. Rappelons que les différences entre les parcours de 1994 et de 1996 résultent essentiellement d'une crue trentenaire accompagnée de profondeurs d'eau de l'ordre de 3 à 4 mètres, voire 5 mètres par endroit, et de vitesses du courant autour des 2 à 3 m/s. Un méandre a été coupé pendant cet épisode. D'autres ruptures de méandres ont également eu lieu entre 1964 et 1996; certaines d'entre elles peuvent être approximativement datées. On dispose donc de toutes les informations nécessaires au calibrage du modèle de divagation décrit précédemment.

On débute par une optimisation des paramètres k_1 , k_2 , b et α à partir des tracés de 1964 et de 1996. Le calage s'effectue sur des tronçons comme celui de la figure 6; ceux où une coupure de méandre a eu lieu sont provisoirement exclus de cette première étape. A partir du tracé de 1964 et avec un pas de temps de 4 ans, on simule l'évolution du parcours de la rivière jusqu'à 1996. Il s'agit de minimiser la surface séparant les tracés observé et simulé (fig. 6). Cette surface est normée par la longueur du tronçon. On obtient une erreur exprimée en m² d'érosion par mètre de cours d'eau. Les erreurs de calage obtenues sur plusieurs tronçons peuvent donc être comparées de manière objective. Le but recherché est de trouver une seule combinaison de paramètres (k_1 , k_2 , b et α), capable de minimiser le cumul des erreurs calculées individuellement par tronçon.

La détermination du paramètre k_3 (rupture des méandres) constitue l'étape suivante du calibrage du modèle de divagation. A partir de la combinaison optimale de paramètres (k_1 , k_2 , b et α) et en utilisant les tronçons où des coupures de méandres se sont produites, on ajuste la valeur de k_3 de manière à reproduire les différentes ruptures ainsi que leurs périodes respectives d'apparition.

L'optimisation du paramètre k_{100} constitue la dernière étape du calibrage. A partir de la combinaison optimale de paramètres (k_1 , k_2 , b et α) et en excluant les tronçons où des ruptures de méandres ont eu lieu, on ajuste la valeur de k_{100} de manière à ce que les étendues des érosions distinguant les tracés de 1994 et de 1996 soient bien reproduites. On assimilera l'intervalle de deux ans à un seul pas de temps. A partir du tracé initial de 1994, les déplacements d_i calculés pour l'ensemble des nœuds seront modifiés proportionnellement par le facteur en question pour at-

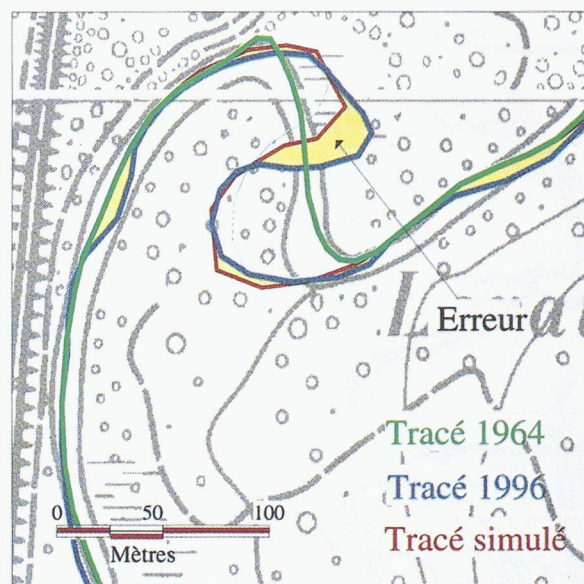


Fig. 6. – Simulation du tracé de 1996 à partir de celui de 1964. Critère de calage du modèle de divagation

teindre les étendues des érosions provoquées par la crue de 1995 (d_{i-crue}). L'intérêt du paramètre k_{100} est évident; pour n'importe quel stade d'évolution du tracé, il est désormais possible de quantifier les érosions provoquées par une forte crue. Il convient de souligner que la procédure de vérification des coupures de méandres est également activée à la fin du calcul de tous les d_{i-crue} .

La combinaison optimale des paramètres (k_1 , k_2 , b , α et k_{100}), couplée à une valeur de k_3 égale à 3 (équation (5)), aboutit à des simulations « satisfaisantes » sur la plupart des tronçons du cours d'eau (fig. 7). Les six premières figures illustrent les résultats de la calibration de (k_1 , k_2 , b , α et k_3) alors que les figures 7 et 8 montrent les performances du paramètre k_{100} .

L'optimum global ne peut cependant pas reproduire certains comportements sectoriels que les paramètres optimisés localement étaient en mesure de préserver (fig. 8). Force est de constater qu'une seule et unique combinaison de paramètres n'est pas en mesure de reproduire fidèlement l'ensemble des processus de divagation.

Il est donc préférable de travailler avec plusieurs combinaisons de paramètres, toutes représentatives de comportements locaux. On partira du principe que les incertitudes émanant de phénomènes aléatoires, comme les chutes d'arbres, sont, du moins en partie, reprises par l'ensemble des combinaisons retenues. Le tracé de la Venoge a donc été découpé en douze tronçons pour lesquels des combinaisons acceptables de paramètres ont été recherchées. Une centaine de combinaisons (k_1 , k_2 , b , α , k_3 et k_{100}) ont été retenues. En regard du critère de calibration utilisé, elles peuvent être toutes considérées comme équiprobables.

Identification des dangers liés à l'érosion

Le modèle décrit et calé précédemment est en mesure de répondre aux questions posées lors de l'introduction de la problématique générale (fig. 1). On produit, pour cela, deux cartes de nature différente. La première délimite, à partir du tracé actuel, les étendues potentielles des arrachements des berges suite à une

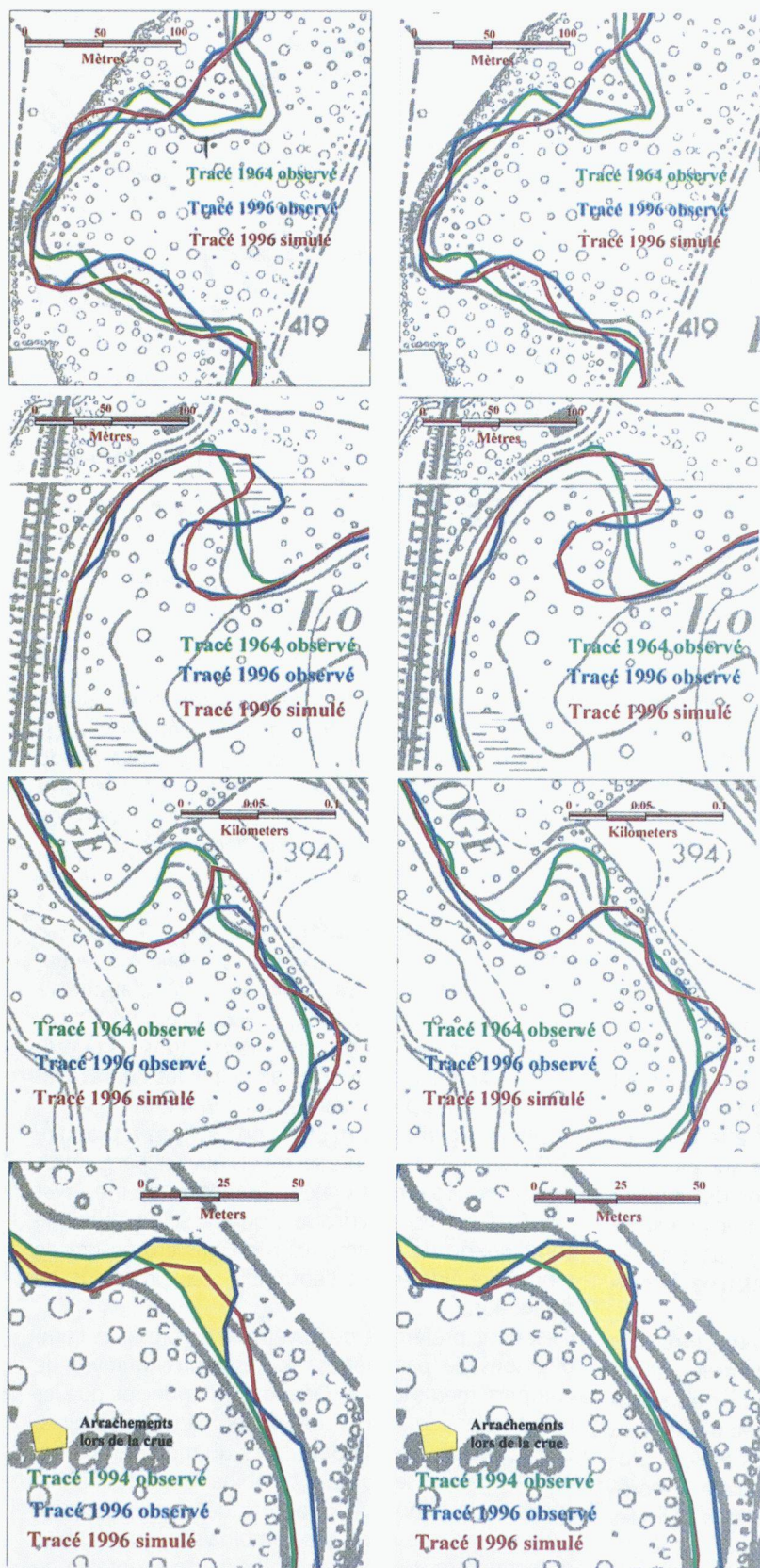


Fig. 7. – Tracés observés et simulés avec un optimum global

Fig. 8. – Tracés observés et simulés avec des optimum locaux

crue isolée analogue à celle de 1995. De son côté, la seconde carte affiche un caractère plus évolutif puisqu'elle indique la largeur dont la rivière fera probablement usage dans un avenir plus ou moins rapproché, en admettant que le régime hydrologique garde des caractéristiques analogues à celles de la période

de calage. Des considérations d'ordre pratique nous ont conduit à choisir une période de prévision non supérieure à 30 ans.

Les figures 9 et 10 montrent les informations contenues dans ces deux cartes pour le secteur de la figure 1. Les étendues des érosions lors d'une crue isolée ainsi que la largeur nécessaire aux divagations du cours d'eau résultent d'une enveloppe de tous les déplacements calculés (d_{i-cru} ou d_i selon les cas) avec toutes les combinaisons de paramètres retenues ; ceci se justifie par le fait que le critère de calage leur attribue des niveaux de vraisemblance comparables.

La carte de la figure 10 part du principe que tous les ouvrages existants constituent des points durs empêchant le tracé de se déplacer. Par contre, on délimitera l'étendue potentielle des érosions liées à une forte crue au droit des ouvrages pour en déduire un potentiel d'effondrement suivant l'état d'entretien de ces derniers. Cette hypothèse nous paraît raisonnable dans la mesure où en cas de crue (fig. 9), il y a un danger d'effondrement de l'enrochement alors que du côté des divagations progressives (fig. 10), on a toujours la possibilité d'intervenir pour stabiliser les ouvrages menacés.

On reconnaîtra dans les cartes des figures 9 et 10 des éléments communs comme l'étendue de la forêt, les terrains agricoles ainsi que le tracé actuel de la Venoge.

On retrouve également les différentes surfaces à protéger. Ces dernières sont associées à des objets de type surfacique comme des bâtiments ou de type linéaire à l'image d'infrastructures de communication (chemins, routes, voie de chemin de fer, etc.). Dans le premier cas, la surface à protéger préserve une bande minimale de terrain autour du bâtiment ou de son voisinage immédiat. Pour un objet linéaire la surface à protéger est équivalente à sa largeur majorée d'une bande supplémentaire prise de chaque côté. Dans les deux cas, la largeur de la bande minimale de terrain dépend de la vulnérabilité de l'objet vis-à-vis de l'instabilité des berges. Des valeurs nulles sont attribuées aux terrains agricoles alors que, par endroits, des distances de 20 mètres peuvent être nécessaires pour protéger la voie de chemin de fer. Rappelons que la PAC n° 284 de la Venoge renonce à protéger tous les terrains agricoles.

La surface à protéger ne doit jamais être menacée par l'activité érosive du cours d'eau. Lors d'une forte crue, les étendues potentielles des érosions ne doivent jamais empiéter sur les surfaces à protéger. Sur la carte de la figure 9, toutes les intersections entre la surface rouge et les surfaces ocres situent des conflits potentiels. On est donc en mesure de répondre aux questions a), b) et c) soulevées par la figure 1.

La surface à protéger du bâtiment industriel (voir figure 1-a) pourrait être touchée par l'étendue potentielle des érosions lors d'une forte crue sans pour au-

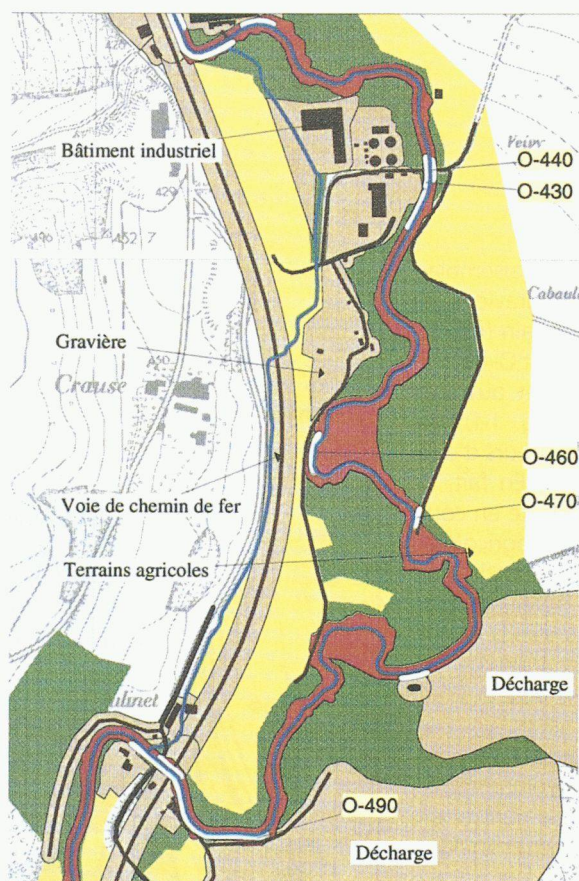


Fig. 9. – Etendue potentielle des érosions provoquées par une crue importante

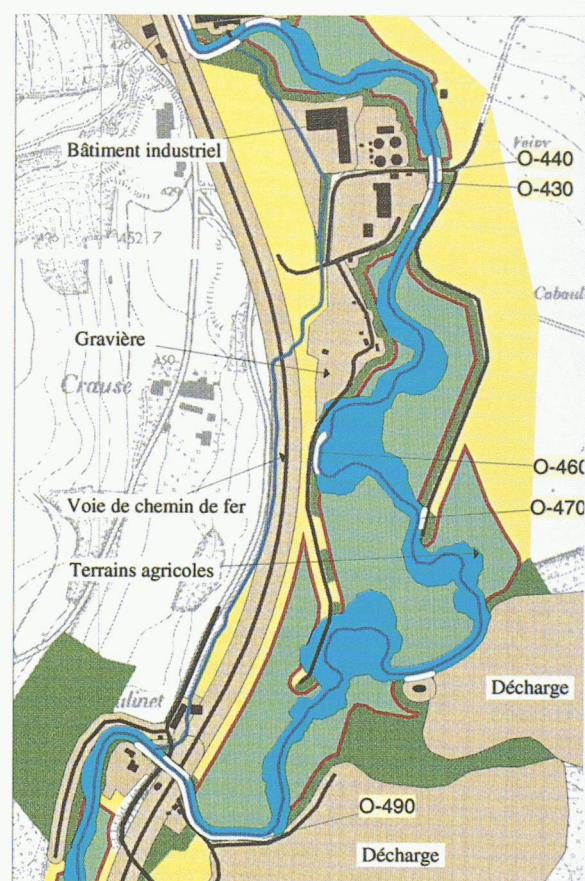
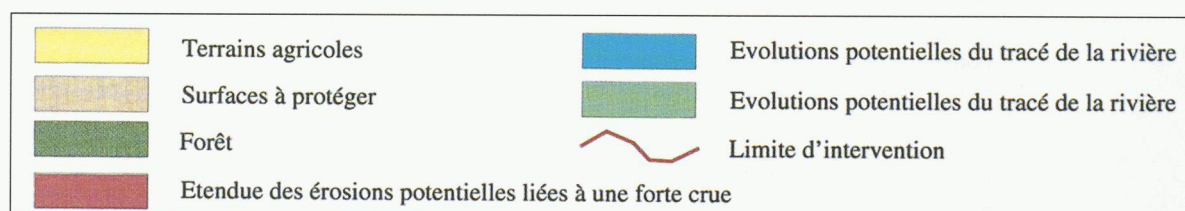


Fig. 10. – Evolution potentielle du tracé de la rivière dans les trente prochaines années



tant menacer le bâtiment lui-même. En fait, les plus fortes contraintes (par conséquent, les déplacements les plus importants; d_{i-cru}) se produisent un peu plus à l'aval de l'objet en question. L'effondrement de l'ouvrage O-460 (fig. 1-b) conduirait à de fortes érosions en amont et en aval de celui-ci; il s'agit également des endroits où sont appliquées les contraintes les plus fortes. Au droit de l'ouvrage lui-même, les érosions affichent une emprise limitée. La voie de chemin de fer n'est pas directement menacée. L'activité érosive en amont de l'ouvrage O-490 est importante (fig. 1-c); cet ouvrage pourrait se faire contourner lors d'une forte crue. S'il venait à s'effondrer, la stabilité du versant, haut d'environ 10 mètres à cet endroit, serait sérieusement entamée; la pollution du cours d'eau par les produits stockés dans la décharge pourrait avoir des effets graves.

La carte de la figure 10 permet d'étudier l'évolution du tracé de la rivière à plus long terme, 30 ans dans le cas qui nous occupe. Par rapport à la figure 9, il faut noter l'inclusion d'un nouvel élément; il s'agit de la limite d'intervention. On délimite ainsi une surface à l'intérieur de laquelle le cours d'eau peut divaguer librement sans aucun danger. Par rapport à la surface à protéger, la limite d'intervention est positionnée à une distance équivalente à la valeur maxi-

male de tous les d_{i-cru} calculés lors de l'élaboration de la carte de la figure 9. En effet, si l'évolution potentielle du tracé touche la limite d'intervention, une crue importante pourrait provoquer des érosions (d_{i-cru}) susceptibles d'envahir la surface à protéger; on serait alors confronté à un déficit de sécurité à moyen terme.

On pourra apprécier la complémentarité des deux cartes puisque la première identifie les conflits à court terme alors que la deuxième permet de repérer les endroits qui, à moyen terme, pourraient être menacés par l'activité érosive du cours d'eau. Dans le cadre du PAC n° 284 de la Venoge, la surface définie par la limite d'intervention constitue l'espace maximale de liberté de la rivière alors que l'évolution potentielle du cours d'eau (fig. 10) est assimilable à la surface qu'il occupera probablement ces trente prochaines années. Le repérage des conflits potentiels se fait aux endroits où la surface bleue coupe la limite d'intervention.

On peut donc répondre aux questions restantes soulevées par la figure 1; il s'agit plutôt d'aspects liés à la gestion du cours d'eau et de ses enrochements. A moyen terme, le tracé de la rivière touche la limite d'intervention des bâtiments industriels (fig. 1-d). Une consolidation du tracé dans ce secteur sera très cer-

tainement nécessaire. Le cours d'eau va vraisemblablement continuer sa progression vers la gravière en arrachant une vingtaine de mètres de terrain (fig. 1-e). La tendance à contourner l'enrochement O-460 se confirme. Le risque d'effondrement de cet ouvrage est élevé. En aval de l'ouvrage O-470 (fig. 1-f), les pertes en terres liées à l'activité érosive du cours d'eau seront limitées (10 mètres au maximum). En fait, le cours d'eau a tendance à revenir sur son axe en coupant le méandre juste en face des terrains agricoles. En plus de son aptitude à fournir des diagnostics sur la situation actuelle du cours d'eau ou encore des prévisions sur l'évolution potentielle du tracé, on peut également envisager d'étudier des scénarios d'enlèvement et/ou d'ajout d'ouvrages de protection. Pour répondre à la question soulevée par la figure 1-e, quant aux conséquences d'un démantèlement de l'ouvrage O-460, la figure 11 illustre l'évolution probable du tracé en supprimant cet enrochement et un autre plus en aval (O-470) protégeant un chemin agricole qui pourrait être déplacé.

En principe, et selon les règles du PAC n° 284 de la Venoge, tout ouvrage sis à l'intérieur de la limite d'intervention peut être supprimé alors que tous ceux sis à l'extérieur sont à maintenir impérativement. Quand l'ouvrage se situe dans le voisinage immédiat de la limite d'intervention, c'est la vulnérabilité des biens à protéger qui fait la décision. Quand plusieurs objets sont concernés, c'est le plus vulnérable qui prédomine. Le PAC n° 284 de la Venoge admet la mise en place de mesures pour protéger des objets dans les catégories E, F et G [12], suggère une pesée d'intérêts pour les catégories D (chemins agricoles) et renonce à protéger les catégories A et B (terrains agricoles) [13]. La figure 11 traite le cas de l'ouvrage O-460 protégeant la voie de chemin de fer ainsi que celui de l'ouvrage O-470 qui assure l'intégrité d'un chemin agricole (catégorie D), ces deux ouvrages étant sis dans le voisinage de la limite d'intervention. Alors que la suppression de l'ouvrage O-470 redonnerait au cours d'eau un peu plus de liberté pour divaguer, les conclusions relatives à l'enrochement O-460 sont un peu plus nuancées. En effet, la progression vers la voie de chemin de fer resterait modérée (surface rouge), les plus fortes contraintes s'exerçant en amont et en aval de la courbure. Le potentiel de rupture du méandre est élevé; le cours d'eau pourrait ainsi se rapprocher de son axe et s'éloigner de la zone conflictuelle. Puisque la limite d'intervention serait franchie, une action est nécessaire. Deux possibilités sont envisageables; la première consiste à consolider l'enrochement, la deuxième est de le démanteler et de faire en sorte que le tracé de la rivière coupe le méandre au plus vite.

Conclusions

C'est par une modélisation conceptuelle et globale que l'IAATE/HYDRAM appréhende les dangers liés à

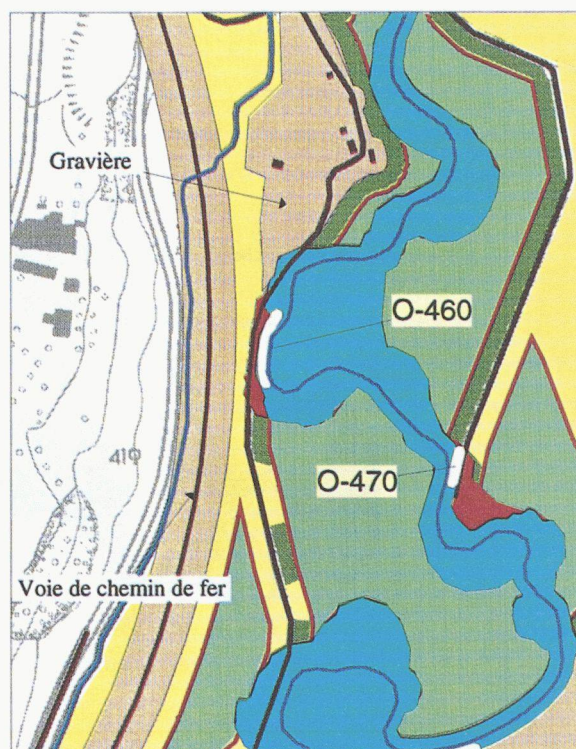


Fig. 11. — Etude des conséquences du démantèlement des ouvrages O-460 et O-470 sur l'évolution potentielle des tracés de la rivière

l'érosion d'un cours d'eau tel que la Venoge. Cette approche a permis d'établir un diagnostic de la situation actuelle vis-à-vis de l'étendue potentielle des arrachements provoqués par une forte crue, de formuler des prévisions à moyen terme sur l'évolution probable du tracé et d'étudier plus spécifiquement des scénarios d'ajout et/ou d'enlèvement d'ouvrages comme des enrochements.

Les exemples décrits dans le présent article justifient pleinement le recours à la modélisation. N'oublions pas que le cours de la Venoge se caractérise par une fréquente alternance de secteurs où l'occupation des sols est très contraignante et exigeante en matière de protection, et de zones naturelles marquées par une importante activité érosive. On pourrait comparer le cours d'eau à un serpent dont certaines parties du corps peuvent se contorsionner librement alors que d'autres, très courtes mais malheureusement fort nombreuses, sont maintenues fixes. C'est aux abords de ces passages obligés que se manifestent la plupart des conflits entre l'espace de divagation nécessaire et l'occupation des sols. Dans un contexte de ce type et dans le cadre du PAC n° 284 de la Venoge, les décisions relatives au démantèlement d'ouvrages de protection doivent donc s'appuyer sur des bases scientifiques solides. Le recours à la modélisation conceptuelle des divagations du tracé et des étendues potentielles des érosions, constitue certainement une

approche originale et pertinente pour ce type de décisions. Le revers de la médaille est que la modélisation demande des données de calage, en l'occurrence, des photographies aériennes permettant de suivre l'évolution du tracé pendant trente ans. Or nous avons pu utiliser les tracés observés en 1964, 1994 et 1996, intervalle de temps pendant lequel on a même vécu une crue de temps de retour trente ans. Quelle chance diront certains ! Encore fallait-il mettre en œuvre le modèle, développer des procédures d'estimation des paramètres, incorporer les incertitudes – importantes pour de tels phénomènes – et présenter le tout sous forme de cartes, semblables à celles reproduites dans le présent article, qui soient intelligibles pour les gestionnaires des cours d'eau. Au vu des premières applications effectuées par les Services concernés de l'Etat, il semble que le pari est gagné.

Références

- [1] BEVEN K. AND BINLEY A.: « The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction », *Hydrological Processes*, Vol. 6, pp 279-298, 1992
- [2] BRAVARD J.-P. ET PETIT F.: « Les cours d'eau, dynamique du système fluvial », Masson & Armand Colin Editeurs, Paris, 1997
- [3] CROSATO A.: « Simulation of meandering river processes » in *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Report N° 90-3, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1990
- [4] GRAAF ANNA: « Hydraulic Processes in Meandering Naturel Rivers, Variables influencing on the hydraulic modelling, a literature study », EPFL, 1996
- [5] HICKIN E. J. AND NANSON G. C.: « Character of channel migration on the Beaton River, northwest British Columbia, Canada », *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, pp 487-494, 1983
- [6] HOWARD A.D AND KNUTSON T.R.: « Sufficient Conditions for River Meandering: A Simulation Approach », *Water Re-*

Remerciements

Cette étude a été financée par le Service des eaux, sols et assainissement (SESA), le Service de l'aménagement du territoire (SAT) de l'Etat de Vaud, ainsi que par l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE). Nous tenons à remercier vivement MM. F. Matthey et P. Hohl (SEPE), P. Steiner (SAT) et J.P. Jordan (OFEE) de leur précieuse collaboration. Nous tenons également à relever la participation active des chefs de secteurs, MM. P. Bujard et R. Pradervand, qui ont apporté, par leur expérience de terrain, d'importantes informations pratiques sur la dynamique et la gestion des cours d'eau.

sources Research, Vol. 20, N° 11, pages 1659-1667, November 1984

- [7] HOWARD A.D.: « Modelling channel evolution and floodplain morphology », In *Floodplain Processes* (M.G. Anderson, D.E. Walling, and P.D. Bates, eds), Chichester, John Wiley & Sons, p 15-62, 1996
- [8] IKEDA S., PARKER G., SAWAI K.: « Bend Theory of river meanders, 1, Linear development », *Journal of Fluid Mechanics*, n° 112, pp363-377. 1981
- [9] LANCE J.-M ET CONSUEGRA D.: « Bassin versant de la Venoge: étude des risques liés à l'érosion », rapport technique + dossier de cartes, EPFL, DGR, IATE/HYDRAM, 1998
- [10] MALAVOI J.R. ET SOUCHON Y.: « Dynamique fluviale et dynamique écologique, cas d'application de la Loire », in *La Houille Blanche* N° 6/7, 1996
- [11] MOSSELMAN E.: « Theoretical investigation on discharge-induced river bank erosion » in *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*, Report N° 89-3, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1989
- [12] OFEE, Office fédéral de l'économie des eaux: « Recommandations pour la prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire », 1997
- [13] S.A.T., Service de l'aménagement du territoire du canton de Vaud: « Plan d'aménagement cantonal N° 284 de la Venoge, 1995

EPFL: exposition des travaux de diplôme des architectes, session 1999

Chaque année une exposition ouverte au public permet de découvrir l'ensemble des travaux de diplôme du département d'architecture de l'EPFL.

Plans et maquettes présentés illustrent les thèmes qui préoccupent et intéressent les étudiants: on constate un intérêt croissant pour l'environnement et l'écologie, pour les thèmes liés à la réhabilitation de notre patrimoine bâti. La diversité des problématiques abordées témoigne de la complexité de l'approche architecturale.

L'exposition de cette année aura lieu du 25 mai au 21 juin 1999 au Polydôme de l'EPFL à Ecublens, à l'extrémité nord-est de l'allée Piccard. Elle sera ouverte du lundi au vendredi de 12 à 19 heures.

Les jurys de diplôme siégeront du 17 au 21 mai 1999. Les séances sont publiques.

La liste des travaux de diplôme est disponible sur Internet <http://www.epfl.ch/plans>, l'horaire détaillé des séances des jurys et le plan d'accès sur <http://dawwww.epfl.ch/diplomes/index.html>.