

6 Simulation des dépôts de sédiments fins dans les lits majeurs

Bien que le terme « cours d'eau » fasse généralement penser à celui de chenal, ce concept renvoie à une réalité plus vaste. Les lits majeurs, notamment, abritent d'importants processus hydrodynamiques et morphodynamiques en raison des crues récurrentes. Sur le plan écologique, ils soutiennent également l'implantation de nombreuses espèces devant être conservées. Le présent chapitre traite des processus de déposition de sédiments fins pertinents ainsi que des outils numériques utilisés pour prévoir les réponses fluviales, une thématique d'intérêt en particulier pour les projets de revitalisation des cours d'eau.

Daniel Conde, Carmelo Juez, Davide Vanzo, Christoph Scheidegger, Giovanni De Cesare et David Vetsch

6.1 Introduction

Les cours d'eau transportent des quantités considérables de sédiments inorganiques et de matériaux organiques. Les grains plus grossiers tels que les galets et le gravier sont transportés sous forme de charriage, sur le lit et en contact étroit avec celui-ci (Van Rijn 2005). Les grains les plus fins, en général ceux dont le diamètre ne dépasse pas 2 mm, sont transportés sous forme de matières en suspension (Van Rijn 1984) et sont principalement portés par l'écoulement. Il s'agit le plus souvent d'un mélange de limon, d'argile et de sable fin. La concentration des grains fins varie en fonction de la profondeur d'écoulement : concentration élevée à proximité du lit du cours d'eau et en baisse vers la surface. Le présent chapitre s'intéresse avant tout à l'identification et à la modélisation des processus liés aux matières en suspension et à la quantification de leur impact sur l'hydrodynamique et la morphodynamique fluviales. Nous nous concentrons en particulier sur les lits majeurs (fig. 33), car ceux-ci jouent un double rôle : ils protègent contre les crues et remplissent certaines fonctions écologiques (Baptista *et al.* 2018).

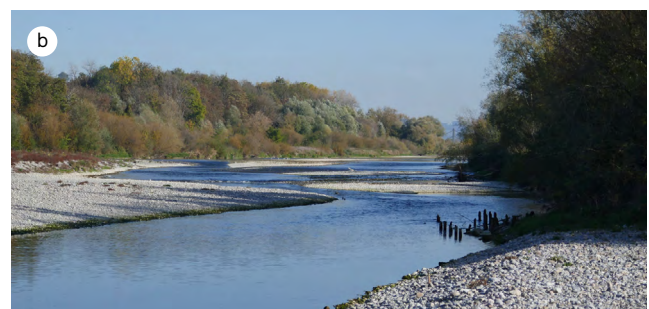
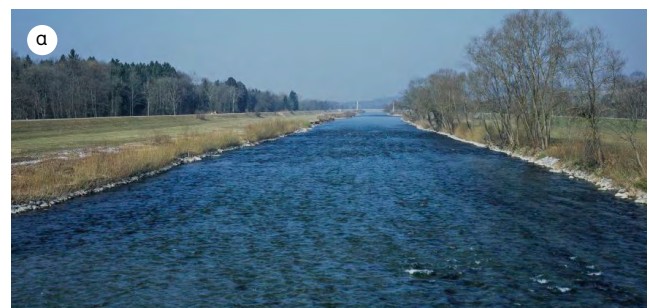
En ce qui concerne la protection contre les crues, les lits majeurs offrent l'espace nécessaire pour accueillir un transport accru lorsque le débit est élevé et protègent les biens et les personnes. De plus, ils fournissent des capacités de rétention et permettent de réguler les débits de crue, de retenir le bois flottant et d'assurer les dépôts de sédiments. Pour ce qui est des fonctions écologiques, les lits majeurs jouent un rôle important en tant que connecteurs entre les écosystèmes riverains et les écosystèmes terrestres adjacents. Différentes espèces riveraines s'établissent dans ces régions,

des espèces qui sont sensibles au subtil équilibre entre la rétention de nouveaux sédiments et l'extraction de matériaux anciens. Il est essentiel de maintenir ces corridors riverains en bonne santé pour assurer la continuité écologique.

L'évolution géomorphologique du corridor d'un cours d'eau est étroitement liée à la valeur ajoutée qu'apportent les lits majeurs. Le processus dominant pourra être soit l'érosion

Figure 33

Exemples sur la Thur : (a) tronçon avec un chenal composé artificiel et (b) tronçon avec élargissement après revitalisation.



Photos : (a) bibliothèque de l'ETH Zurich, archives photographiques / photographe : R. Huber ; (b) VAW, ETH Zurich

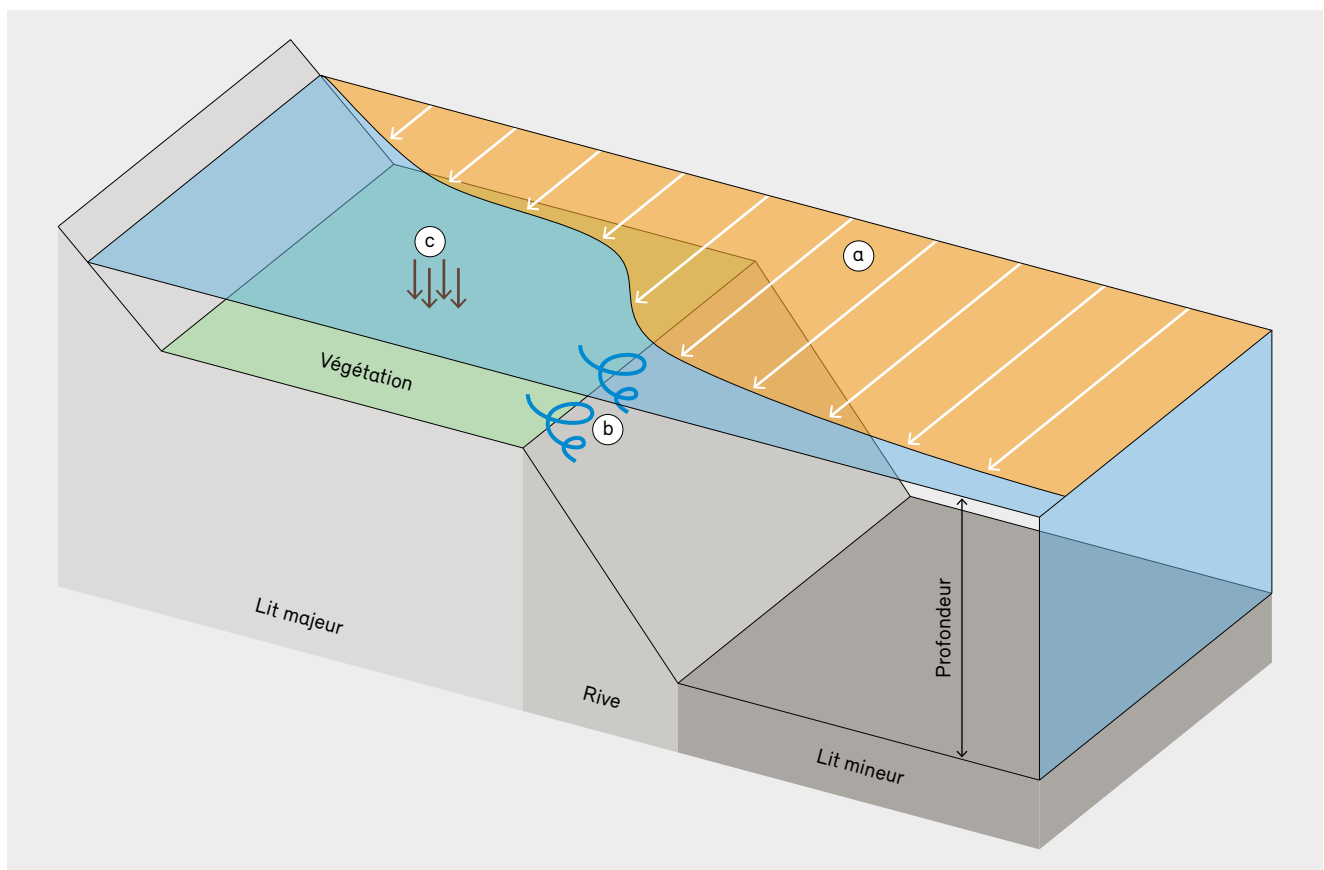
soit la sédimentation, et le facteur principal qui déterminera lequel des deux prévaudra est l'échange d'eau et de sédiments fins entre le chenal, soit le lit mineur, et le lit majeur. La présence de végétation dans le lit majeur a un impact significatif sur ces échanges hydrodynamiques étant donné que celle-ci contraint le fluide à réduire sa vitesse par rapport à la vitesse dans le lit mineur. Ce principe d'écoulement survient avec tout type de végétation, ce qui crée des forces tangentielles importantes entre l'écoulement dans le lit mineur du cours d'eau et l'écoulement dans le lit majeur, donnant lieu à une couche de cisaillement interne (fig. 34). Cette couche présente généralement plusieurs tourbillons qui créent des échanges et des mélanges latéraux. Il est fondamental de quantifier ces flux latéraux pour évaluer correctement la capacité

de débit effective du cours d'eau, en particulier lorsque l'écoulement est important, ainsi que les changements attendus des points de vue écologique et morphologique.

En vertu de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux, 1991) et de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, 1998), des milliers de kilomètres de cours d'eau seront revitalisés (fig. 33) dans le cadre d'une approche associant hydromorphologie et écologie. L'objectif politique est de remettre en état les habitats pour des animaux, des plantes et des champignons caractéristiques tout en conservant, voire en améliorant, la protection contre les crues et l'équilibre sédimentaire. Pour y parvenir, des modèles robustes sont nécessaires afin de prédire correctement les comportements morphodynamiques.

Figure 34

Configuration typique de l'écoulement dans une section composée d'un lit mineur et d'un lit majeur : (a) répartition des vitesses, (b) tourbillons dans la couche de cisaillement et (c) déposition latérale de sédiments.



6.2 Modélisation numérique

En termes simples, un modèle hydrodynamique numérique fournit une représentation virtuelle de l'écoulement de l'eau. Les modèles de ce type constituent des outils largement utilisés et bien acceptés dans le domaine de l'aménagement des cours d'eau. BASEMENT (Vanzo *et al.* 2021), que nous employons ici, est un logiciel gratuit de modélisation numérique développé au Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie de l'ETH Zurich. Au cœur du logiciel BASEMENT se trouve un module hydrodynamique capable de simuler des processus hydrodynamiques et morphodynamiques grâce à une large palette d'approches de modélisation qui tiennent compte de l'écoulement de l'eau, des forces de frottement, des turbulences et des mouvements des sédiments.

Les tourbillons jouent un rôle considérable dans la détermination des forces de résistance totales, tout comme la flottabilité des matières transportées. Des modèles de conservation de l'énergie sont utilisés pour quantifier l'énergie cinétique turbulente de l'écoulement. D'autres méthodes de calcul des turbulences plus simples et moins exigeantes sont également implémentées. Concernant la modélisation des matières en suspension, un module advection-diffusion est associé avec des formules empiriques bien établies dans la littérature scientifique (Van Rijn 1984), où une contrainte de cisaillement plus élevée dans le lit du cours d'eau entraîne une mobilité des sédiments accrue.

Tous les paramètres de BASEMENT sont implémentés dans un flux de travail intuitif qui fournit aux personnes réalisant la modélisation un outil efficace pour prédire le comportement hydrodynamique et morphodynamique à différentes échelles d'aménagement des cours d'eau (Vanzo *et al.* 2021). Le présent chapitre exploite les capacités de BASEMENT pour une modélisation des processus à petite échelle qui s'appuie sur des observations expérimentales (Juez *et al.* 2019). Une conversion à une échelle supérieure, celle d'un tronçon de cours d'eau, est ensuite effectuée via une étude de cas d'un aménagement.

6.3 Processus

Une série d'expériences ont été conçues et réalisées pour évaluer l'influence de la géométrie du lit mineur et de la couverture végétale du lit majeur sur le comportement hydrodynamique et morphodynamique des écoulements des chenaux composés (Juez *et al.* 2019). Ces expériences devraient contribuer au développement et à l'utilisation de modèles, notamment lorsqu'il s'agit de planifier des interventions dans les cours d'eau, et permettre ainsi d'atténuer les problèmes liés aux sédiments fins.

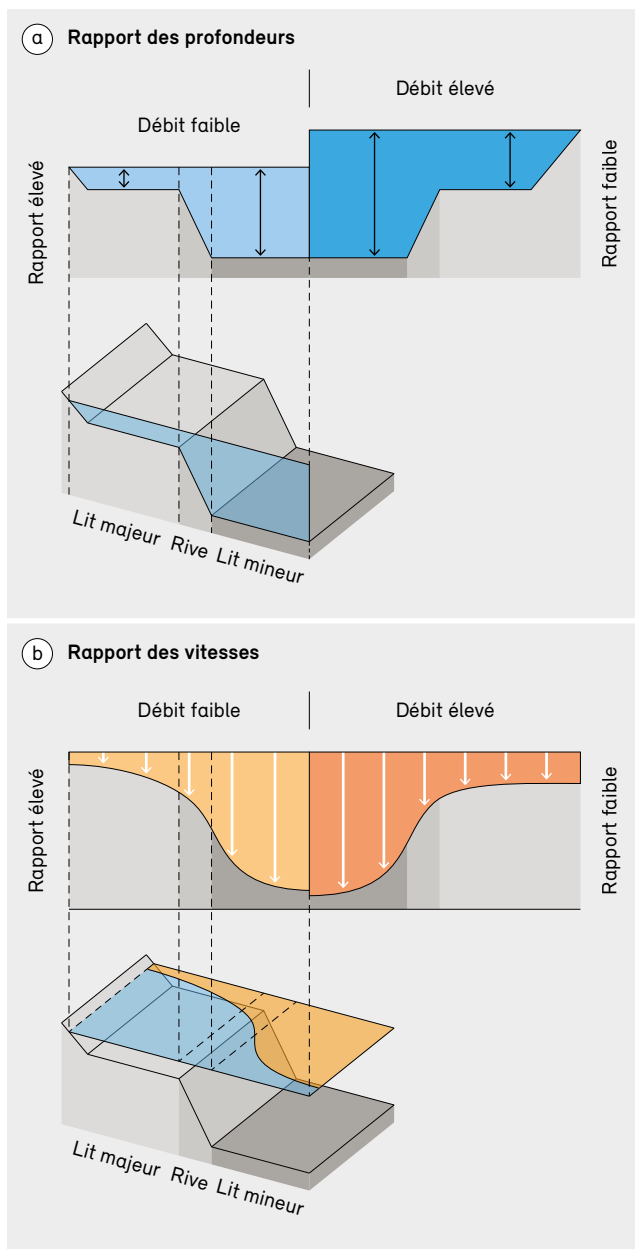
Sur le plan physique, l'écoulement dans des chenaux composés a été décrit dans le cadre de diverses expériences effectuées sur un modèle réduit situé à la Plateforme PL-LCH à l'EPFL. Ces mêmes tests ont été simulés dans l'environnement virtuel de BASEMENT pour sélectionner les paramètres à étudier et confirmer leur pertinence. Les paramètres retenus sont les suivants :

- (i) le rapport de profondeur, soit le rapport entre la profondeur d'écoulement du lit mineur et celle du lit majeur ;
- (ii) le rapport de vitesse, soit le rapport entre la vitesse moyenne d'écoulement du lit mineur et celle du lit majeur ;
- (iii) le rapport de largeur, soit le rapport entre la largeur du lit mineur et celle du lit majeur ;
- (iv) le type de couverture terrestre du lit majeur et la rugosité de celle-ci.

Le modèle réduit et son équivalent virtuel comprenaient un canal expérimental rectiligne avec un lit majeur ajustable latéralement, des couvertures terrestres de résistances variables pour les lits majeurs et des instruments pour mesurer la profondeur d'écoulement, la vitesse de surface et la concentration de sédiments en suspension. Pour garantir la cohérence des résultats, toutes les mesures ont été réalisées dans des conditions de débit constantes et uniformes, avec des profondeurs et des vitesses locales constantes dans le temps et l'espace.

Les diverses expériences ont couvert des débits à des échelles réalistes tirées de données connues sur l'hydrologie fluviale. Les résultats de ces expériences ont montré que des débits plus élevés conduisaient à des rapports de profondeur et des rapports de vitesse plus faibles (fig. 35). Par ailleurs, nous avons observé que le rapport de vitesse

Figure 35
Effet des débits faible (à gauche) et élevé (à droite) sur (a) le rapport de profondeur et (b) rapport de vitesse.



Source : VAW, ETH Zurich

est sensible au rapport de largeur, les valeurs étant plus faibles dans les chenaux étroits (rapport de largeur plus élevé). Nous avons également remarqué que la différence relative de vitesse entre le lit mineur et le lit majeur couvert de végétation (fig. 36a) favorise l'apparition de tourbillons, qui sont essentiels aux échanges de masse latéraux. De

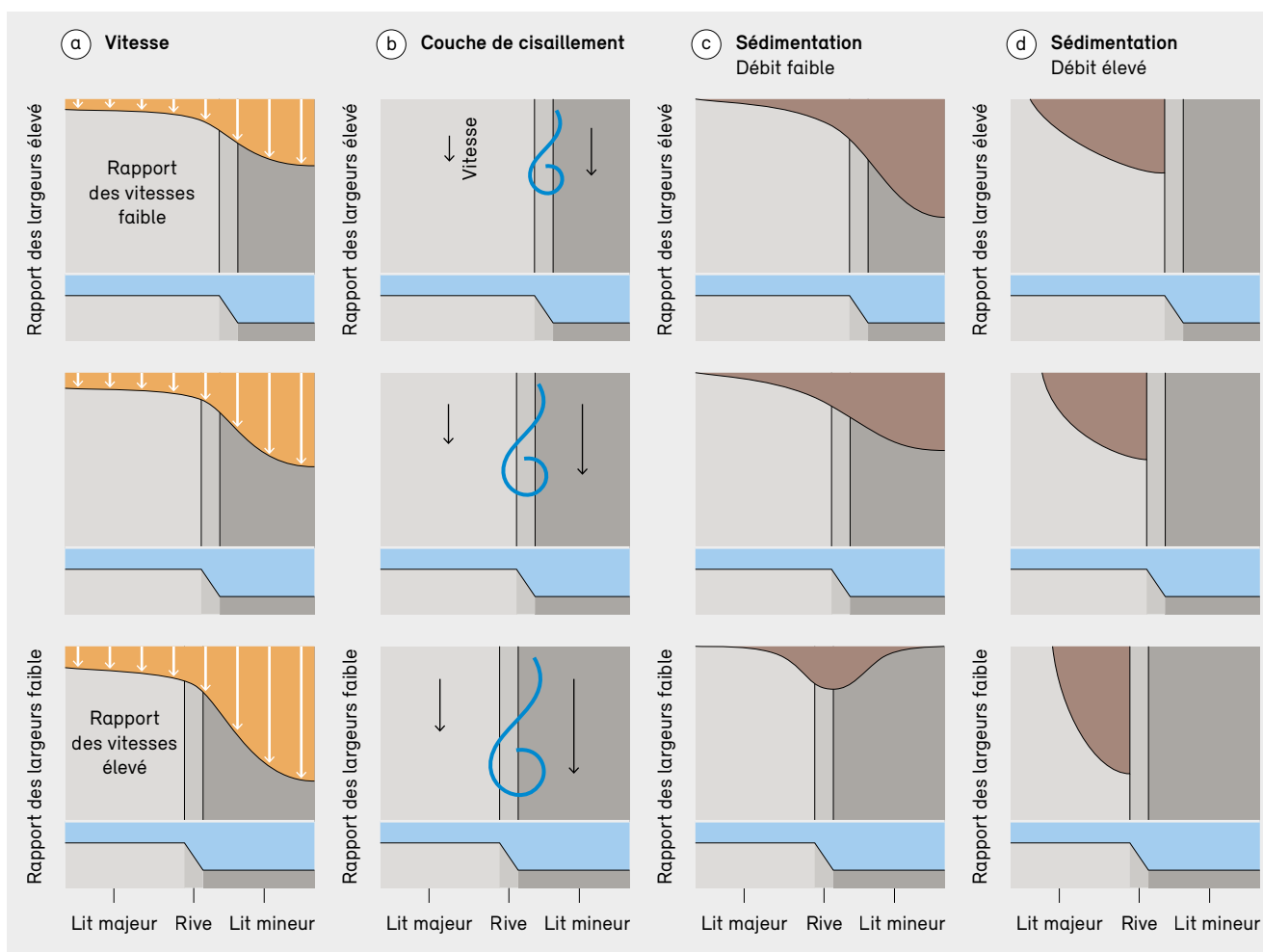
plus, des lits mineurs plus larges (rapport de largeur plus faible) sont associés à une plus grande variation de vitesse (représentée par des flèches à la fig. 36a) et à des couches de cisaillement et des vortex plus larges (fig. 36b).

Les expériences ont montré que la présence de végétation dans les lits majeurs (par comparaison à une surface terrestre à nu) entraîne des forces de friction plus importantes, ce qui contribue à faire augmenter le rapport de vitesse. Un effet secondaire a été observé dans la couche de cisaillement, où un rétrécissement de sa largeur engendre une légère augmentation de l'intensité maximale de contrainte pour des chenaux plus étroits à végétation dense. Concernant le dépôt de sédiments en suspension, les expériences ont montré que le débit et les rapports de profondeur correspondants (fig. 35) exercent également une influence notable. Pour des débits moins élevés (écoulements moins profonds avec rapports de profondeur plus élevés) dans des lits majeurs couverts de végétation, la sédimentation dans le lit mineur était largement dépendante du rapport de largeur, les géométries plus étroites entraînant une plus forte concentration de sédiments dans le lit mineur (fig. 36c). Pour les écoulements plus profonds (rapport de profondeur plus faible) à des débits plus élevés, nos résultats montrent que les sédiments se propagent plus dans le lit majeur et s'y déposent (fig. 36d) et que presque aucune sédimentation ne survient dans le lit mineur. Avec un lit majeur à nu, une plus grande diffusion latérale des sédiments est observée, en particulier dans les chenaux étroits (rapport de largeur élevé).

Enfin, les expériences ont montré que le flux latéral de l'eau et des sédiments en suspension dépend essentiellement du rapport de profondeur et du rapport de largeur, et accessoirement de la rugosité du lit majeur. Nous avons constaté qu'un lit mineur plus étroit correspond à un transport latéral de sédiments en suspension plus élevé. Cela peut s'expliquer par la dynamique turbulente dans la couche de cisaillement et conduire, à terme, à une plus forte dispersion des sédiments le long du lit majeur, en particulier pour les écoulements profonds. Selon nos recherches, le facteur dominant le plus manifeste dans le comportement à la fois hydrodynamique et morphodynamique de l'écoulement d'un chenal composé avec un lit majeur couvert de végétation est le rapport de vitesse, tandis que le facteur le plus marginal était la présence de végétation de grande taille (arbres).

Figure 36

Différents effets (vue en plan) d'un canal étroit (rapport de largeur élevé) ou large (rapport de largeur faible) : (a) répartition des vitesses, (b) couche de cisaillement et distribution des sédiments pour (c) un débit faible ou (d) un débit élevé.



Source : VAW, ETH Zurich

Cela s'applique principalement aux chenaux composés dont la géométrie est simple telle la géométrie du modèle réduit utilisée dans les expériences. Pour les géométries complexes, il conviendra d'étudier le comportement de façon spécifique, soit par calcul numérique, soit par expérimentation.

6.4 Aspects écologiques

En écologie, les lits majeurs sont des écosystèmes riverains qui dépendent des régimes de perturbation tels que les crues, le transport de sédiments et les variations des eaux souterraines. Les différentes granulométries de sédiments jouent un

rôle important dans la formation des habitats, essentiellement parce que la capacité des sédiments à stocker de l'eau croît à mesure que leur granulométrie décroît. Les endroits présentant de grandes proportions de sédiments fins sont des lits de germination essentiels pour des plantes, des bryophytes et des lichens, qui stimulent le renouvellement de la végétation riveraine. Les étroites relations d'interdépendance entre la morphologie des chenaux, les éléments structurels (tels que les bancs de gravier), les débris de bois flottants et les blocs créent un environnement diversifié avec une connectivité latérale qui favorise le développement d'écosystèmes variés et résilients.

L'espace disponible étant limité, la revitalisation des lits majeurs se concentre sur les écosystèmes hautement dynamiques tels que les bancs de gravier et les forêts alluviales pionnières (*Salicion elaeagni*, *Alnion incanae*). Les étapes tardives des forêts alluviales comme les étangs et les zones ouvertes particulièrement desséchées (*Psoretea decipientis*, communautés lichéniques terricoles multicolores), avec des perturbations peu fréquentes en lien avec les crues, sont des habitats actuellement sous-représentés dans les lits majeurs revitalisés. Le brouillard et une humidité de l'air élevée qui surviennent fréquemment dans ces environnements autrement secs favorisent des communautés comprenant des espèces comme le lichen *Buellia asterella*, un colonisateur fréquent de sable compact rarement inondé. Désormais éteinte en Suisse, cette espèce est menacée à l'échelle mondiale.

Selon les résultats des expériences précitées, la présence d'arbres de grande taille n'exerce pas de forte influence sur l'hydrodynamique ou la morphodynamique. En laboratoire, nous n'avons pas testé les effets des buissons, bien que

leur présence en grand nombre puisse accentuer les effets de la végétation herbacée et entraîner une sédimentation accrue. La disponibilité d'éléments structurels de grande taille constitue également un aspect pertinent pour générer une grande diversité et implanter une biodiversité caractéristique des lits majeurs. Les débris de bois grossiers jouent un rôle important à proximité de cours d'eau à bras multiples, où des sites rarement inondés peuvent également être constitués. La création de bancs de gravier et la mise en place de blocs à des niveaux rarement inondés pourraient considérablement faire grimper la diversité des habitats dans les lits majeurs revitalisés.

6.5 Étude de cas

Nous avons utilisé un tronçon du Rhin alpin proche de Widnau (Suisse) et de Höchst (Autriche) (fig. 37) comme étude de cas pour illustrer la simulation morphodynamique des sédiments fins dans les lits majeurs. Le Rhin alpin débute dans les Alpes suisses (canton des Grisons), puis longe la frontière avec le Liechtenstein et l'Autriche avant de se jeter dans le lac de Constance. Comme des zones densément peuplées et des activités économiques majeures sont situées le long du Rhin alpin, la protection contre les crues dans cette région est primordiale : les dégâts matériels potentiels dus à des événements de crues majeurs sont estimés à plus de dix milliards de francs. Des projets en cours cherchent à améliorer la capacité hydraulique du Rhin alpin par des mesures de revitalisation telles que l'élargissement du chenal.

Nous montrons ici un exemple d'application de BASEMENT comme outil de soutien à la conception. La zone étudiée s'étend du kilomètre 80,1 au kilomètre 82,6 du Rhin alpin (fig. 37), où les établissements urbains atteignent le bord des digues extérieures de protection contre les crues. Le cadre de modélisation comprend la plupart des modules disponibles dans BASEMENT, à savoir des modules hydrodynamiques (avec modélisation du frottement et de la turbulence ainsi que de la morphodynamique) intégrant la modélisation à la fois du charriage et des matières en suspension.

Le frottement est modélisé grâce à la formule GMS (Gauckler-Manning-Strickler) bien connue, où la contrainte de cisaillement entre le lit du cours d'eau et l'écoulement est déduite à partir d'un coefficient empirique qui dépend de la

Figure 37

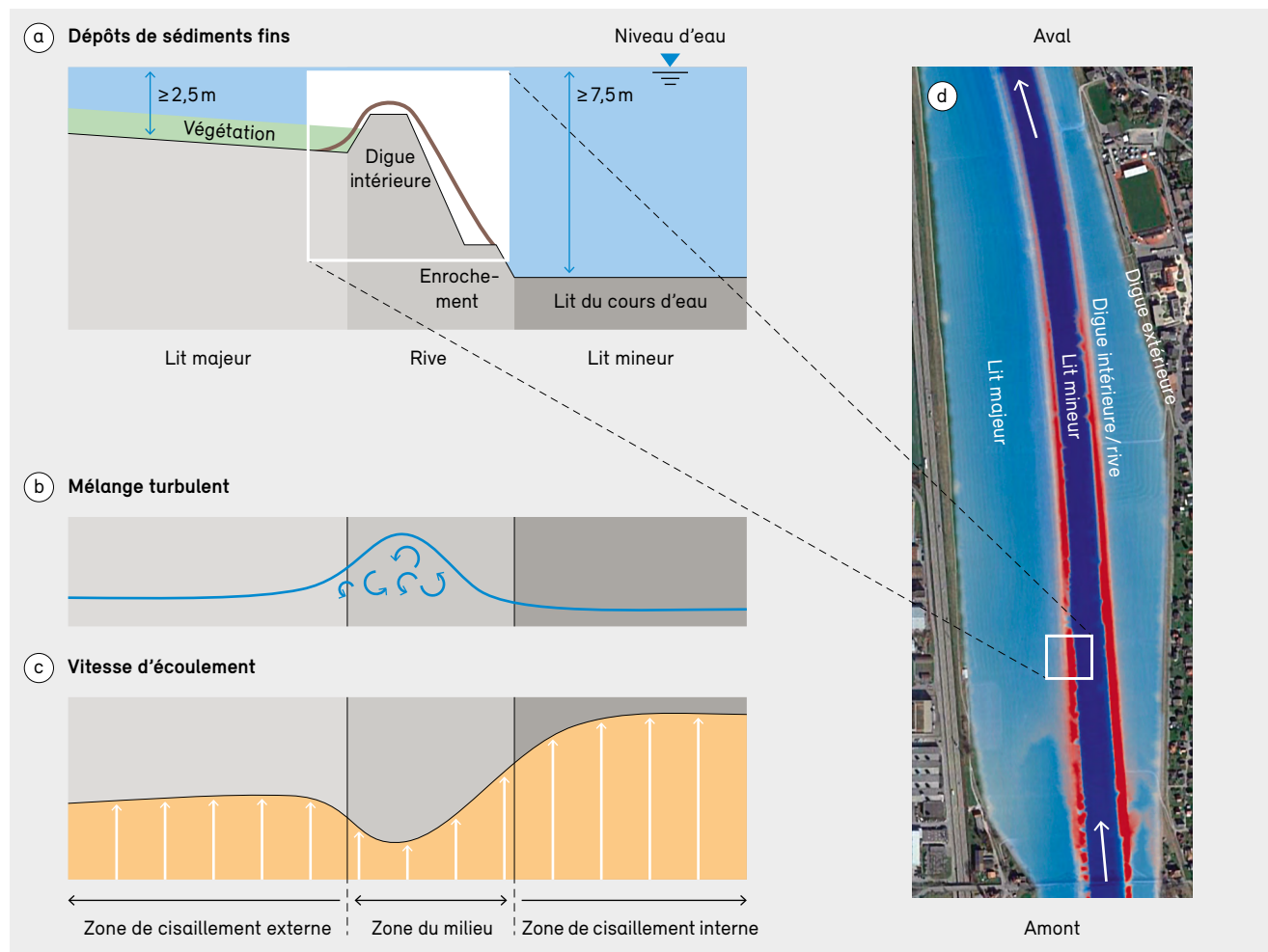
Tronçon de cours d'eau retenu pour l'étude de cas : Rhin alpin à Widnau (a) pour un faible écoulement et (b) dans des conditions de crues (vue dans la direction de l'écoulement).



Source : IRR

Figure 38

Représentation schématique des résultats pour la situation actuelle dans le Rhin alpin à $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: (a) vue en coupe des dépôts de sédiments (ligne brune), (b) mélange turbulent, (c) répartition des vitesses et (d) vue aérienne du tronçon étudié, les dépôts de sédiments étant représentés en rouge.



Source : VAW, ETH Zurich / photo aérienne ©swisstopo

rugosité du matériau du lit et de la sinuosité de la surface. Ce coefficient tient également compte de la présence de végétation et de sa traînée hydrodynamique, indépendamment du type concerné. Nous tenons compte de la turbulence générée par la couche de cisaillement, entre le lit mineur et le lit majeur ainsi qu'au lit du cours d'eau, en termes de résistance à l'écoulement et de dispersion des sédiments via le modèle standard « $k-\varepsilon$ ». En ce qui concerne la dynamique sédimentaire, les taux d'échanges verticaux sont modélisés selon les formules proposées par Meyer-Peter-Muller pour le charriage et par Van Rijn pour les matières en suspension (Vetsch *et al.* 2021). Le site Internet de BASEMENT (www.basement.ethz.ch) fournit des exemples de fichiers de configuration pour ce type d'applications.

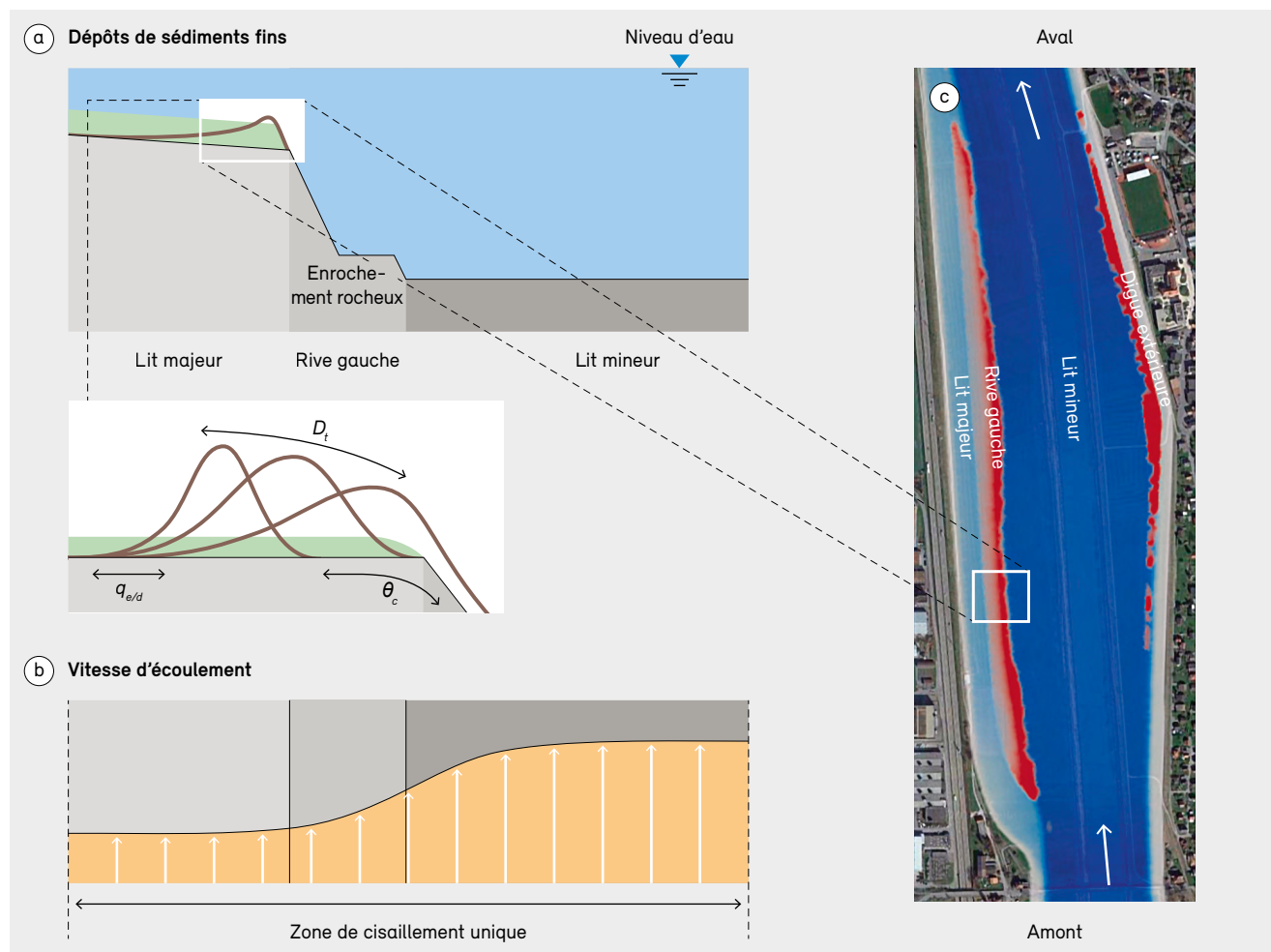
La figure 38c illustre le domaine étudié. Le modèle comprend deux conditions limites : une condition à l'amont et une condition à l'aval, toutes deux imposant un régime d'écoulement uniforme ; l'ensemble des forces agissant sur l'écoulement sont équilibrées, sans accélération ni décélération. Les coefficients de Manning sont calibrés sur la base des données d'observation hydrométriques acquises via les stations hydrologiques. Les valeurs obtenues sont compatibles avec les valeurs bien établies pour les lits majeurs couverts d'herbe (il a été démontré que la végétation de grande taille comme les arbres a un impact moindre ; les buissons n'ont pas été pris en compte), les cours d'eau au lit de gravier et les digues en enrochement.

À l'instar des résultats obtenus dans les expériences de laboratoire, l'étude de cas montre clairement l'influence des processus de turbulence. Deux zones de cisailment distinctes se développent de chaque côté des digues intérieures (fig. 38b) et on observe une transition en douceur de la vitesse entre les zones de faible et de forte rugosité. Si ce processus n'est pas minutieusement paramétré, les couches de cisailment ne sont pas prises en compte et la répartition transversale des vitesses peut être erronée. Les formes de dépôts de sédiments simulées ont tendance à apparaître le long des digues intérieures, du côté du lit mineur (fig. 38a), avec une sédimentation supplémentaire

(dans une plus faible mesure cependant) qui survient dans les lits majeurs dans les cas de déversement au-dessus des digues à des débits plus élevés ($> 2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Bien que la géométrie de ce système ne soit pas comparable à celle utilisée dans les expériences de laboratoire, le même comportement a été observé durant les crues de 2005 et 2009. Ce comportement est aussi réaliste en ce qui concerne les vitesses, les zones où les vitesses sont plus faibles entraînant des taux de sédimentation plus élevés (fig. 38a et 38b). Deux scénarios de débit sont pris en compte, $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, qui correspondent respectivement à la capacité d'écoulement du lit mineur

Figure 39

Représentation schématique des résultats pour la situation du projet de revitalisation dans le Rhin alpin à $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$: (a) vue en coupe des dépôts de sédiments (ligne brune) et influence des paramètres des modèles, (b) répartition des vitesses et (c) vue aérienne du tronçon étudié, les dépôts de sédiments étant représentés en rouge. Les paramètres illustrés sont la diffusion turbulente (D_t), la contrainte de cisailment critique (θ_c) et le taux d'échanges verticaux ($q_{e/d}$).



et à celui du chenal composé. La concentration annuelle moyenne de sédiments en suspension pour le Rhin alpin est appliquée à la condition limite à l'amont.

La quantité de sédiments déposés croît à mesure que le débit croît, ce qui suggère que la disponibilité des sédiments est un facteur primordial et que la probabilité que des crues subséquentes emportent de précédents dépôts dans le lit majeur baisse. Le résultat probable est un processus de dépôt continu, d'une part, dans les parties du lit majeur adjacentes aux digues lorsque celles-ci sont inondées à des débits supérieurs à $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et, d'autre part, sur les rives, même lorsque les débits sont inférieurs à $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Cela entraîne une réduction du transport dans le lit mineur. Dans les scénarios de référence portant sur de brefs événements de crues (48 heures), les sédiments recouvrent entre 0,8 % et 1,6 % de l'espace disponible dans le lit majeur (volume de sédiments déposés allant de 8000 à $16\,000 \text{ m}^3$).

La présente application montre comment utiliser le logiciel BASEMENT pour évaluer les besoins d'entretien actuels et futurs eu égard aux conditions régnant dans les lits majeurs. Une configuration simple telle que décrite ici peut également servir pour la planification de futurs projets liés aux cours d'eau (fig. 39c). À titre d'exemple, nous prenons une

configuration revitalisée du même segment tout en conservant les modèles et les hypothèses de la première application. Une telle configuration comprend un important élargissement du lit mineur, avec une suppression totale du lit majeur de droite et un raccourcissement de moitié environ du lit majeur de gauche. À des débits élevés ($2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), les résultats montrent une couche unique de cisaillement (fig. 39b) et une accumulation de sédiments principalement sur l'unique lit majeur à gauche (fig. 39a et 39c), ce qui correspond à 0,4 - 0,9 % de sa zone d'écoulement utile (2000 à 4500 m^3), en fonction de la configuration du module morphodynamique pour les sédiments fins. Pour des débits plus faibles (inférieurs à $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), la sédimentation survient le plus souvent sur les rives et dans le lit mineur.

Les paramètres les plus pertinents (fig. 39a) dans cet exemple sont la diffusion turbulente (D_t), la contrainte de cisaillement critique (θ_c) et le taux d'échanges verticaux ($q_{e/d}$). La diffusion turbulente est le proxy principal pour l'échange de masse entre le lit mineur et le lit majeur et favorise le transport latéral des sédiments et leur dispersion sur le lit majeur. La contrainte de cisaillement critique est déterminante pour la mobilité des sédiments, qui se déposent dès lors davantage sur les zones latérales. Les paramètres restants définissent les taux d'érosion et de dépôt des sédiments en suspension sur le lit majeur.

Encadré 9 : En pratique – élimination des sédiments fins des lits majeurs

Daniel Dietsche et Mathias Speckle, Régulation internationale du Rhin (IRR)

Le tronçon du Rhin alpin décrit dans le présent chapitre est placé sous la responsabilité de la Régulation internationale du Rhin (Internationale Rheinregulierung, IRR), qui stipule qu'une élimination rapide des sédiments après une crue (p. ex. curer les sédiments et les remettre dans le lit mineur) était une méthode très efficace. Les branches et les racines sont transportées vers son delta et utilisées pour des aménagements écologiques. Les sédiments déposés peuvent également être éliminés

plus tard, mais une surveillance régulière et des prévisions sont nécessaires pour garantir que la capacité d'écoulement prévue est maintenue. Il a été observé que la présence de végétation entraîne davantage de dépôts de sédiments, même lorsque les niveaux d'eau sont faibles. Cet exemple pratique illustre le besoin de disposer d'outils fiables pour prévoir la quantité de sédiments déposés et tester des solutions potentielles pour leur élimination. Qu'elles soient exploitées par les administrations publiques ou par des bureaux d'étude privés, les nouvelles possibilités numériques qu'offre le logiciel BASEMENT soutiendront un développement sûr et écologique des cours d'eau helvétiques.