



Ce guide traite de la construction de petits ouvrages en bois (barrages, seuils et soutènements de berges dont la taille n'excède pas 5 à 6 mètres de hauteur) dans les cours d'eau de plaine ou de montagne en France mais également à l'étranger.

Il est destiné prioritairement aux praticiens (maître d'ouvrage, maître d'œuvre ou entrepreneur) qui interviennent dans les milieux aquatiques, qu'ils s'agissent de collectivités territoriales, d'associations syndicales ou bien même de l'Etat par ses services spécialisés dans les séries domaniales.

Après un rappel du contexte général et historique ainsi qu'un rapide tour d'horizon de diverses réalisations en bois sur plusieurs continents dont l'Australie, ce guide fait plus particulièrement la synthèse des pratiques alpines et notamment celles mises en oeuvre en France, en Suisse et en Italie durant les vingt dernières années.

Les techniques de réalisation et de mises en oeuvre sont exposées avec, pour une gamme d'ouvrages les plus couramment utilisés, des éléments simples de prédimensionnement établis sur la base du « bon sens » et de méthodes empiriques.

Ce guide constitue actuellement le seul document de synthèse disponible en langue française sur le sujet. Le texte s'attache particulièrement à faire le lien entre les réglementations existantes dans la construction d'ouvrage (Eurocodes, règles de durabilité, ...) et les pratiques mises en oeuvre.

Les principes de calcul à la base du dimensionnement des ouvrages à doubles parois sont exposés en fin de document.

Ouvrages bois dans les cours d'eau - Etat de l'art, applications et dimensionnements



Ouvrages bois dans les cours d'eau. Etat de l'art, applications et dimensionnements

Guide technique



Ouvrages bois dans les cours d'eau

Etat de l'art, applications et dimensionnements

Guide technique

décembre 2009



Ce guide a été élaboré par Damien ROMAN, Office National des Forêts - Agence Travaux Rhône-Alpes, à partir de son mémoire d'ingénieur CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers).

Le pilotage du projet a été assuré par Claude BARTHELON, Office National des Forêts - Direction Territoriale Rhône-Alpes.

L'élaboration de ce guide a été possible grâce :

- au financement du Fonds de l'Environnement et du Développement Durable, compte tenu de l'intérêt de cette étude dans le cadre de la politique environnementale de l'ONF liée à sa certification ISO 14001, l'eau constituant l'axe 2 de cette politique,

- à la contribution de la Direction du Développement et de la Direction de l'Environnement et du Développement Durable de l'Office National des Forêts

- à la participation des personnes suivantes :

- Christian DEYMIER (ONF RTM 06),
- Hervé GARDON (ONF RTM 05),
- Marie JUPPET (ONF RTM 38),
- Christophe CHAPOULET (ONF 38),
- Jean-Michel MOUREY (ONF-DEDD)
- Alexandre MATRINGE (stagiaire ONF),
- Vincent EYRAUD (professeur enseignant bois IUT de Génie Civil de Grenoble),
- Nicolas VALLET (Association Rivière Rhône-Alpes),
- Pierre TROUILLET (professeur de génie civil au CNAM Rhône-Alpes),
- Hubert CHANSON (enseignant chercheur à l'Université de Queensland en Australie),
- Les nombreuses personnes représentant les collectivités et services forestiers étrangers rencontrés.

La conception et création graphique a été réalisée par Béatrice CAVE (ONF)

En couverture :

Barrage bois doubles parois
Monetier les Bains (05)
Source: ONF-RTM 05



Barrage de correction
torrentielle / Bordighera / Italie
Source: ONF-Damien Roman



Passé à poissons sur la rivière
Lignon (réalisation SYMILAV)
Source : ONF-Damien Roman



Barrage de correction simple
paroi / Monthez / Nant de
Choex / Suisse
Source : Service Forestier Fédéral
Suisse - James Medico

Barrage de correction
torrentielle sur le Riou Bourdoux
dans l'Ubaye (06)
Source : ONF-RTM (06) -
Georges Guiter





Préface

LE POINT DE VUE DE L'INGENIEUR HYDRAULICIEN

Si l'on exclut les barrages construits par les castors, les ouvrages en bois construits sur les cours d'eau ont été utilisés par les humains depuis plus de 3 000 ans (SMITH 1970, SCHNITTER 1994), et probablement plus car les structures en bois ne se conservent pas aussi bien que les pierres de taille, le béton ou les enrochements.

Dans ce contexte, et avec la nécessité impérative de respecter notre environnement, il est essentiel que notre société reconnaisse la valeur du bois comme un matériel de construction noble et de qualité.

Traditionnellement, les barrages et seuils en bois ont été utilisés et développés dans les régions où le bois était très abondant, par exemple en Europe et en Russie jusqu'au XVIII^e siècle, en Amérique du Nord aux XVIII^e et XIX^e siècles, en Australie aux XIX^e et XX^e siècles (photo ci-contre et figures 1 et 2 ci-après).

Depuis, notre société a perdu une partie de son expérience et savoir-faire dans le travail du bois, et les ouvriers travaillant ce matériel, de nos jours, sont considérés plutôt comme des artisans. Ce guide technique est un premier pas vers une approche plus scientifique et systématique de l'utilisation des ouvrages en bois au fil de l'eau. Cela faisait longtemps que l'on attendait un tel ouvrage !

Le bois est aussi un matériel universel et international. Comme l'eau, le bois n'a pas de frontière et il est disponible et utilisé sur tous les continents de notre planète à l'exception de l'Antarctique. De ce fait, le présent guide technique a des applications au niveau mondial et un intérêt pratique international, bien au-delà des intérêts politiques et matériels.

Ce guide démontre, de plus, l'étendue des applications des ouvrages en bois qui bénéficient de la flexibilité de ce matériel de construction et qui s'intègrent facilement, plaisamment et avec élégance à notre environnement et à la nature.

Toutes mes félicitations à l'auteur, et à l'Office National des Forêts pour le publier. Et je recommande, très fortement la traduction du guide en anglais, chinois, hindi, espagnol et portugais pour commencer afin de partager ce savoir-faire entre pays développés et pays en voie de développement, entre les hémisphères nord et sud, et entre l'Orient et l'Occident.

D'un point de vue pratique, je note qu'il y a peu de discussions techniques sur les problèmes de dissipation d'énergie et de résistance aux fluctuations de pressions et de contraintes de cisaillement pour les ouvrages de type barrage, et au fil de l'eau, durant une crue.

Cet aspect est important, comme le démontre le retour d'expérience (SCHUYLER 1909, WEGMANN 1926, CHANSON 2002), mais il sera probablement intégré dans une deuxième version de ce guide.

Hubert CHANSON
Professeur de classe exceptionnelle,
Université du Queensland,
Ecole d'ingénieurs de génie civil,
Brisbane QLD 4072, Australie,
Email: h.chanson@uq.edu.au



Barrage en remblai et déversoir en caissons en bois de Loudon Mill à Irvinebank, nord Queensland (Australie). Construit en 1943, il est toujours en utilisation
Source : Gordon GRIMWADE

Références

- CHANSON, H. (2002). «Timber Crib Weirs in Queensland, Australia. Some Heritage Structures with a Solid Operational Record.» Royal Historical Society of Queensland Journal, Vol. 18, No. 3, pp. 115-129.
- GORDIENKO, P.I. (1944). «Rockfill Overflow Dams.» Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo, No. 3 (in Russian).
- SCHNITTER, N.J. (1994). «A History of Dams : the Useful Pyramids.» Balkema Publ., Rotterdam, The Netherlands.
- SCHUYLER, J.D. (1909). «Reservoirs for Irrigation, Water-Power and Domestic Water Supply.» John Wiley & sons, 2nd edition, New York, USA.
- SMITH, N. (1971). «A History of Dams.» The Chaucer Press, Peter Davies, London, UK.
- WEGMANN, E. (1922). «The Design and Construction of Dams.» John Wiley & Sons, New York, USA, 7th edition.

Références Internet

{http://www.uq.edu.au/~e2hchans/tim_weir.html}
Timber Crib Weirs in Queensland, Australia

Brisbane, le 15 décembre 2009



Fig. 1 - Barrage en remblai et son déversoir en caissons en bois en Russie au XVII^e et XVIII^e siècle, d'après GORDIENKO (1944)

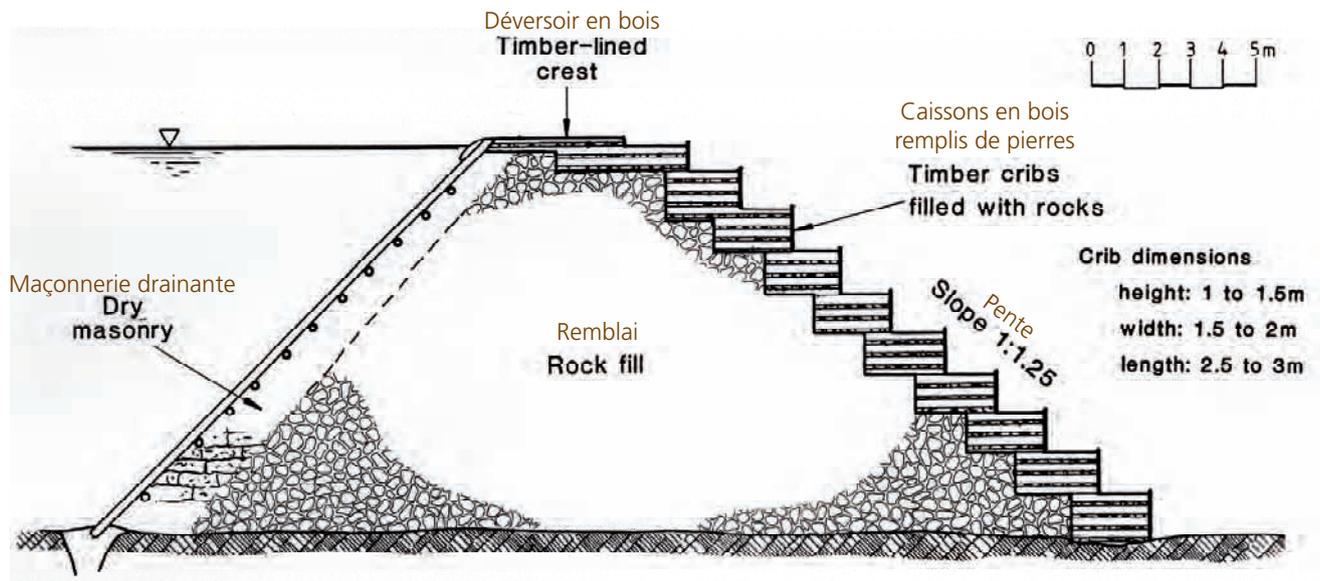
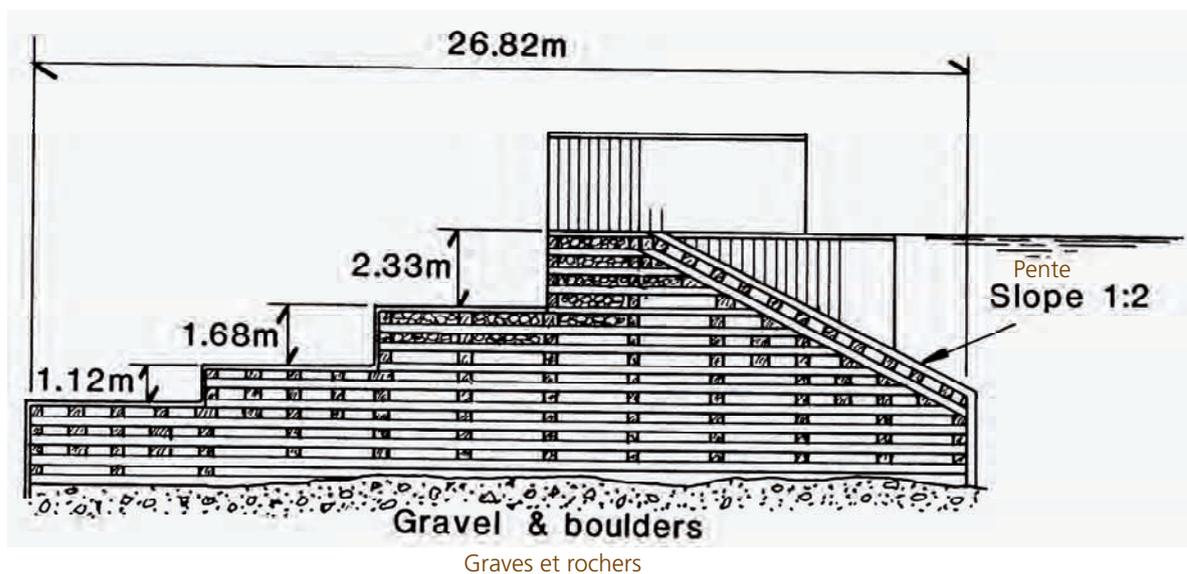


Fig. 2 - Barrage en bois sur la branche nord de la rivière Feather (USA) en 1912





1. Avant-propos.....	8
2. Pourquoi construire en bois ?	9
2.1. Une empreinte écologique limitée.....	9
2.1.1. Le bois, le cycle du carbone, l'accentuation de l'effet de serre.....	9
2.1.2. Le bois, un matériau à faible coût énergétique.....	9
2.2. Une durabilité variée.....	9
2.3. Une légèreté et une souplesse en terrains instables ou fragiles.....	10
2.4. Une bonne intégration paysagère.....	10
3. Historique des ouvrages en bois à travers le monde.....	11
4. Panorama des techniques actuelles et retour d'expérience	13
4.1. Description générale des phénomènes érosifs et objectifs des aménagements.....	13
4.2. Les ouvrages transversaux.....	14
Seuils bois à simple paroi (Timber sill).....	15
- Variante 1 : petits seuils rustiques transversaux.....	17
- Variante 2 : seuils en arc de cercle	19
- Variante 3 : seuils en «V»	20
Barrages à doubles parois (gabions bois).....	21
- Variantes de parements.....	22
- Variantes d'ailes	23
- Variantes de platelages.....	24
- Remplissage de l'ouvrage	25
- Les assemblages.....	26
Seuils à doubles parois.....	29
Barrages à simple paroi.....	30
4.3. Les ouvrages de soutènement de berges.....	32
4.3.1. Ouvrages à doubles parois, végétalisés, de soutènement de berges	32
4.3.2. Ouvrages autostables	35
4.4. Les ouvrages piscicoles.....	37
4.4.1. Seuils piscicoles avec cache à poissons.....	37
4.4.2. Passe à poissons	39
5. Le matériau bois.....	42
5.1. Atouts et performances du matériau bois.....	42
5.1.1. Variations de forme peu contraignantes.....	42
5.1.2. Les dégradations biologiques du bois.....	42
5.2. Classement mécanique des bois de structures	43
5.3. Durabilité et préservation des bois	45
5.3.1. les classes d'emploi	45
5.3.2. La durabilité naturelle	46
5.3.3. La prévention chimique : dans quel cas ?.....	47
5.3.4. La prévention constructive.....	47
5.3.5. La conservation dans l'eau et ses limites	48
5.3.6. Conclusion	48



6. Eléments de dimensionnement des ouvrages à doubles parois	49
6.1. Principe de justification des caissons	49
6.2. Quelles sont les actions à considérer ?.....	50
6.2.1. Evaluation des actions agissant sur les caissons.....	50
6.2.2. Différentes situations.....	51
6.2.3. Prévision des situations à envisager.....	51
6.3. Vérification de l'équilibre statique de la structure (EQU) & (GEO).....	54
6.4. Vérification de l'équilibre statique interne (STR).....	54
6.4.1. Théorie.....	54
6.4.2. Etude des éléments longitudinaux (longrines)	55
6.4.3. Etude des éléments transversaux (traverses ou tirants)	55
6.4.4. Etude des assemblages (d'après EC5 section assemblage par broches).....	55
6.4.5. Application numérique et outil de calcul	56
7. Bibliographie	57

1. Avant-propos

Ce guide est un outil destiné aux différents acteurs des milieux aquatiques qui souhaitent aménager un cours d'eau à l'aide d'ouvrages en bois. En effet, l'intérêt retrouvé pour le matériau bois voit ce secteur de la construction croître rapidement depuis quelques années.

On peut illustrer ce propos en regardant l'évolution significative du nombre annuel de nouveaux projets sur le secteur des ouvrages de correction torrentielle dans les régions de l'arc alpin. 500 ouvrages bois ont été construits ces 20 dernières années. On estime que d'ici 3 à 4 ans cette quantité aura doublé. La construction d'ouvrages en bois dans les cours d'eau représente aujourd'hui un chiffre d'affaires annuel de l'ordre de 2 à 2,5 millions d'euros sur le territoire national.

Le bois occupe une place de « leader » en tant que matériau écologique car naturellement renouvelable et capable de limiter les émissions de gaz CO₂ responsables du réchauffement climatique.

Ce guide s'attache à faire le point sur l'état de l'art des pratiques existantes. Les techniques de réalisation et de mise en œuvre utilisées pour les ouvrages les plus courants y sont présentées au travers d'un panorama sous forme de fiches synthétiques.

Il se base sur un retour d'expérience le plus large et exhaustif possible, ainsi que sur la réglementation existante (Eurocodes, règles de durabilité,...). Il pose les principes de dimensionnement qui permettent de justifier de la stabilité externe et interne des ouvrages les plus utilisés.

L'étude du dimensionnement des caissons doubles parois est présentée de façon plus approfondie à la fin du guide car ce sont les plus répandus.

L'attention du lecteur est attirée sur le fait que ce guide ne s'intéresse pas aux ouvrages de soutènement supportant des surcharges routières. Ils seront traités dans une prochaine version du document à l'aboutissement des travaux de recherche et de développement.

Attention, l'utilisation du bois en tant que matériau de construction soumis aux règles et codifications de la normalisation européenne ne doit en aucun cas ôter tout bon sens au lecteur quant à la nécessaire précaution qu'il doit prendre en utilisant un matériau «vivant» (hétérogénéité, singularité, méthode d'appréciation des caractéristiques mécaniques, etc...) . Les éléments fournis par ce guide n'ont donc pas pour vocation d'effacer toutes les pratiques antérieures mais de les compléter et de les justifier.



Ailes réalisées avec des longrines horizontales
Source : Italie / Bordighera / Office National des Forêts / Damien Roman

2. Pourquoi construire en bois dans les cours d'eau ?

2.1. Une empreinte écologique limitée

2.1.1. Le bois, le cycle du carbone, l'accentuation de l'effet de serre

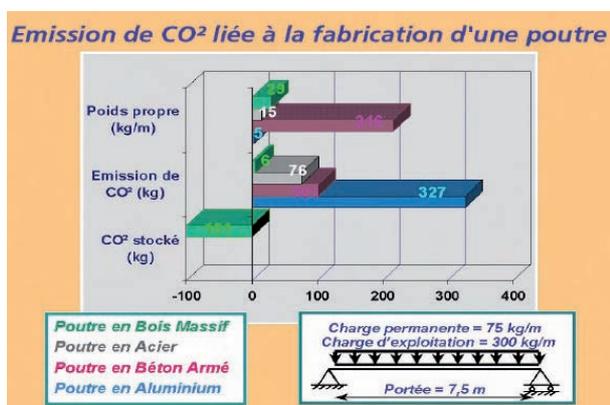
Aujourd'hui, on note des bouleversements rapides du cycle du carbone : l'utilisation des combustibles fossiles et la déforestation ont pour conséquence une augmentation du taux de gaz carbonique atmosphérique.

Le gaz carbonique est le principal responsable de l'accentuation de l'effet de serre. L'émission de gaz carbonique générée au cours du cycle de vie d'un produit est un critère d'importance. La fabrication du bois ne génère pas de gaz carbonique ; elle en consomme.

Le bois est un matériau de qualité qui se fabrique et se recycle naturellement sur terre depuis des centaines de millions d'années. Il est donc amené à jouer un rôle primordial dans l'industrie du futur, notamment dans le domaine de la construction.

Tout le carbone contenu dans le bois provient du CO₂ atmosphérique utilisé par l'arbre par photosynthèse. Construire en bois, c'est stocker du carbone. Pour un mètre cube de bois mis en œuvre (700 kg), ce sont 350 kg de carbone, soit plus de 1 200 kg de CO₂ en moins dans l'atmosphère.

D'autre part, préférer utiliser le bois c'est utiliser moins de matières plastiques, moins de béton, moins de matériaux non renouvelables dont la fabrication dégage du CO₂. Le graphique suivant positionne le bois dans une approche environnementale.



Emission de CO₂ liée à la fabrication d'une poutre / ENSTIB

2.1.2. Le bois, un matériau à faible coût énergétique

La fabrication et l'exploitation du matériau bois permettent le stockage du carbone et l'entretien des massifs forestiers. Par ailleurs, le bois, comme toutes les matières organiques naturelles, est biodégradable. Quelle que soit l'essence considérée, le bois est à plus ou moins long terme réintégré dans le cycle du carbone. Sa décomposition est réalisée par des organismes que l'on appelle tritivores (bactéries, champignons,...) et dans des conditions particulières qui sont par exemple présentes au niveau de l'humus forestier.

Le bois apparaît comme un choix « écologiquement responsable ». Voici quelques-uns de ses nombreux points forts :

- son exploitation est beaucoup moins polluante que l'extraction des autres matériaux,
- il est disponible pratiquement partout sur la planète et permet dans la plupart des cas un approvisionnement de proximité,
- sa transformation nécessite moins d'énergie et moins d'eau que celle d'autres matériaux,
- les sous-produits de l'industrie du bois peuvent être valorisés (énergie/chauffage).

2.2. Une durabilité variée

Les différentes essences de bois ont une durabilité variable vis-à-vis des agents biologiques responsables de leur dégradation.

La durabilité réduite de l'ouvrage en bois peut être recherchée comme, par exemple, dans le cadre de projets de restauration écologique de cours d'eau associant les techniques du génie civil à celle du génie végétal (cas des caissons végétalisés de berges dont le bois est utilisé d'abord pour maintenir en place le matériel végétal, en attendant qu'il gagne son autonomie).

Ces ouvrages, en permettant l'installation de matériel végétal, peuvent potentiellement assurer une continuité écologique notamment au-delà d'une certaine altitude dans le haut des bassins versants. Dans ce cas, ce type de solution peut présenter une alternative intéressante aux lourds travaux d'enrochement qui ont pour conséquence de stériliser davantage des milieux parfois fragiles.



2.3. Une légèreté et une souplesse en terrain instable ou fragile

La densité du bois (700 kg/m^3) est quatre à six fois plus faible que celle des matériaux concurrents tels le béton ou la pierre. Cet avantage peut dans certains cas se révéler être un argument de choix lorsque l'on souhaite réaliser un ouvrage sur des sols fragiles supportant mal les surcharges.

D'autre part, le bois en tant que matériau naturel ligneux bénéficie d'une grande souplesse mécanique. On peut ainsi opportunément envisager de construire des ouvrages sur des sols déformables (terrain argileux par exemple) sans compromettre à terme la stabilité de la structure.



Avant

2.4. Une bonne intégration paysagère

Le bois bénéficie d'une bonne intégration paysagère dans les zones où la végétation arborée est présente. Cela peut être un argument de choix dans des sites fréquentés par le public ou dans des parcs naturels régionaux où la préservation du paysage est particulièrement recherchée.



Après

Barrage bois double paroi végétalisée de soutènement de berges / Syndicat mixte du Lignon / Saint Sixte (42) .
Source : ONF Damien ROMAN - juin 2008

3. Historique des ouvrages en bois à travers le monde

Etant probablement le premier à avoir utilisé le bois comme matériau de construction dans les cours d'eau, le castor qualifié à la fois de « bûcheron », « hydraulicien » et « terrassier » est un animal qui présente des caractéristiques particulières et inhabituelles d'aménageur de son écosystème. Ses barrages peuvent atteindre plus de 75 m de long et de 1 m de haut.

En Amérique du nord (USA, Canada), les ouvrages bois dans les cours d'eau ont été largement utilisés aux XVII, XVIII et XIX^e siècles par les colonisateurs nord européens en raison de la facilité et de la rapidité de construction de ces structures. Elles se retrouvent essentiellement dans les lieux où le bois d'œuvre nécessaire à la construction était disponible en quantité, ce qui rendait les projets économiquement plus intéressants.

On rencontre généralement deux variantes pour ces barrages : les barrages en madrier et les ouvrages en caissons de rondins.

Les barrages en madriers (Timber Plank) sont des structures « élégantes » qui emploient une variété de méthodes de construction utilisant des bois lourds assemblés suivant différentes techniques. Très peu d'ouvrages de cette époque sont encore en cours de fonctionnement. Présenté ci-contre, le «Redridge Dam», destiné à créer dans le Michigan une réserve en eau pour une industrie pionnière, est un témoin encore existant de cette époque.

Les ouvrages constitués de caissons en rondins (Timber Crib Dam) sont constitués de lourdes grumes assemblées à la manière d'une maison en bois ronds et remplis de terre ou de décombres.

Par ailleurs, en Australie, de nombreux ouvrages bois de type déversoir (Timber Crib Weirs) ont été construits depuis la fin du XIX^e siècle jusque dans les années 1960. Ces ouvrages réalisés pour irriguer des zones en plein essor agricole sont encore pour la plupart fonctionnels et assurent le stockage de l'eau dans de nombreuses régions arides du pays.

Beaucoup d'ouvrages ont été érigés dans le Queensland sur la base d'une conception standardisée. Ces ouvrages réalisés en paliers constitués de caissons remplis de pierres ont une face aval renforcée. L'ancrage de l'ouvrage dans le lit du cours d'eau est assuré par des pieux bois de grandes dimensions battus* mécaniquement sur une profondeur de plusieurs mètres dans le substrat.

Ces ouvrages ont été construits avec des essences locales tropicales (essentiellement eucalyptus) très durables. La majorité de ces barrages sont encore en état de fonctionnement après plus d'un demi-siècle (exemple ci-contre).



Barrage de Castor : Argentine Ushuaia
Source : Internet Wikipédia



«Redridge Dam» - Barrage en madrier bois / Etats-Unis/
Michigan / Photographié en 1978
Source : Kevin Musser <http://www.pasty.com/copperrange/redridge.htm#photos>



Cunningham weir / Australie / 1958
Source : Damien Roman / janvier 2009

*En génie civil, battre des pieux signifie les enfoncer.



En Europe également, le bois est utilisé pour aménager cours d'eau, canaux et bassins depuis plusieurs siècles. Par exemple en France, les salines d'Aigues-Mortes, utilisaient déjà le pin maritime au XIII^e siècle pour stabiliser les berges des canaux et bassins. Ces ouvrages, appelés «querelles» constitués de pieux circulaires et de madriers encore utilisés et régulièrement entretenus, constituent un patrimoine étendu sur une surface de près de 10 000 hectares en plein cœur du parc naturel régional de Camargue.

On retrouve également des seuils toujours en fonctionnement datant probablement du XVI^e et XVII^e siècle dans les grands cours d'eau de France. Positionnés près des fondations de ponts, ils sont destinés à limiter les phénomènes d'affouillement comme illustré ci-contre sur la Loire à Amboise.

Plus tard, dès le milieu du XVIII^e siècle dans les Alpes, au cœur des vallées montagnardes, on retrouve la trace d'ouvrages de canaux de drainage en bois.

Les forestiers ont eu une influence importante dans la réalisation d'ouvrages bois en montagne entre 1827, avec la promulgation du code forestier, et 1914, début de la «Grande Guerre». En effet, au début du XIX^e siècle, le gouvernement français, après le code forestier, entreprend avec les lois de Restauration des Terrains de Montagne (RTM) des travaux extrêmement importants de reboisement ainsi que de correction torrentielle.

Sous l'influence de forestiers tel P. DEMONTZEY, de nombreux ouvrages de correction torrentielle ont été réalisés dans les Alpes à partir des bois locaux (cas du mélèze dans les Hautes-Alpes : voir photo ci-contre).

Par ailleurs, des barrages très solides, en caissons végétalisés, ont été construits en Suisse. Le premier se trouve dans le torrent de Roetzligrund. Il mesure 10 m de hauteur sur 40 m de large. C'est le plus grand ouvrage de ce type recensé à la fin du XIX^e siècle. Il est constitué de couches de troncs d'arbres superposées, branches tournées vers l'amont, enfoncées dans les alluvions (Thiéry, 1891 ; Bernard, 1927).

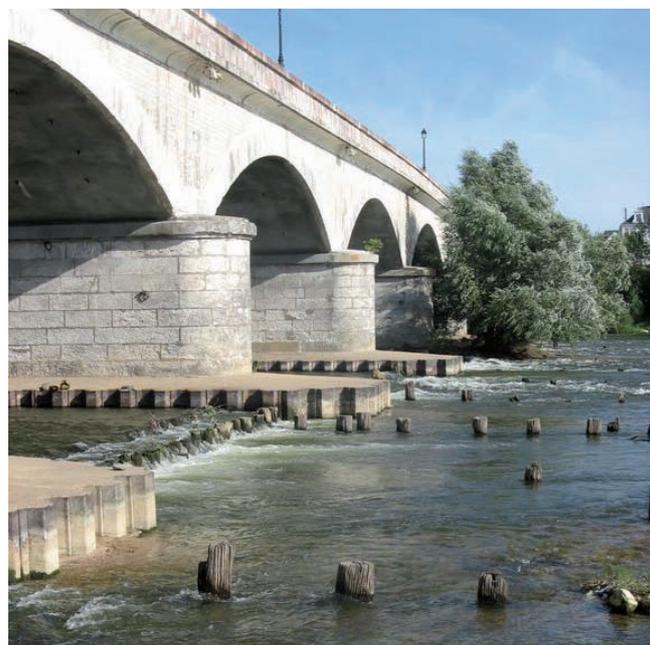
De nombreux ouvrages en bois ont été réalisés dans les Alpes italiennes à partir de cette même époque.

Avec l'apparition de nouveaux matériaux tels que les ciments permettant la réalisation de bétons de plus en plus performants, les procédés de construction en bois ont progressivement disparu en France pendant la seconde moitié du XX^e siècle.

Aujourd'hui, un regain d'intérêt pour les constructions en bois dans les cours d'eau est apparu depuis les années 1990 en France.



Soutènement de berges par des «querelles», marais salants d'Aigues-Mortes
Source : Damien Roman / juin 2008



Seuils en bois sur la Loire à Amboise
Source : Claude Barthelon /août 2008



Barrage bois de correction torrentielle / France / Commune de Vars (05) / Torrent de Chagnon / 1910
Source : ONF-RTM 05 / H. Gasdon

4. Panorama des techniques actuelles et retour d'expérience

Les techniques de base de construction des ouvrages de ces dernières décennies sont issues du génie civil. Elles ont recours à l'utilisation du bois comme matériau principal pour constituer la structure de l'ouvrage.

Celui-ci est souvent associé à des matériaux auxiliaires (remblais terreux, pierreux, géotextiles, tiges métalliques, câble d'acier...) dans le souci d'assurer la stabilité et la cohésion globale de l'ouvrage.

Ces ouvrages de génie civil sont parfois associés à des éléments «vivants», des plantes suivant les techniques du génie végétal. L'objectif est d'assurer le maintien en place des végétaux dans l'attente de leur développement et ainsi indirectement de leur gain en autonomie. Les techniques de génie végétal ne seront pas présentées ici puisqu'elles font appel à une ingénierie spécialisée par ailleurs développée dans de nombreuses publications.

Les techniques et modalités de mise en œuvre présentées sont le fruit de l'expérience ou le résultat de tentatives, d'échecs et réussites d'aménagements. Elles ne constituent cependant que des éléments de base pratiques de la construction d'ouvrages en bois. En fonction d'un diagnostic précis de terrain et des contraintes spécifiques de chaque situation, celles-ci nécessitent d'être adaptées, associées, combinées et toujours optimisées.

Leur présentation individualisée vise simplement à montrer la diversité des techniques, à aborder leurs conditions de mise en œuvre et de réussite, puis, par là même, à favoriser leur mise en pratique.

Afin de mieux appréhender la mise en œuvre d'ouvrages en bois, il est nécessaire de rappeler sommairement quels sont les phénomènes à l'origine de leurs genèses.

4.1. Description générale des phénomènes érosifs et objectifs des aménagements

On rencontre principalement les ouvrages présentés dans ce guide dans deux types de cours d'eau :

- Les rivières torrentielles, caractérisées par :
 - une pente élevée qui permet un écoulement rapide des eaux ;
 - une forte capacité d'érosion et de transport des matériaux grossiers (pierres, branches, arbres...).

Lors d'évènements pluvieux exceptionnels, une rivière torrentielle peut générer des crues très rapidement et mobiliser des matériaux de tailles impressionnantes. L'écoulement, très chargé en boue et en matériaux grossiers, peut parfois prendre l'allure d'une lave torrentielle.

- Les rivières de plaine, caractérisées par :
 - une pente douce qui permet des vitesses d'écoulement plus faibles ;
 - un transport en matériaux de granulométrie réduite.

Les rivières de plaine connaissent de nombreux processus d'érosion (enfouissement du lit, érosion des berges ...).

Contexte et objectifs :

Depuis 2000, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) donne des objectifs de résultats ambitieux en terme d'état ou de potentiel écologique des rivières, et en terme de continuité écologique.

Or, l'état des lieux du bassin français réalisé en 2004 a mis en évidence que, pour un grand nombre de masses d'eaux de surface, le principal obstacle au bon état écologique est un problème de qualité physique de la rivière (berge et lit mineur) et donc de qualité des habitats.

Rappelons qu'un cours d'eau en bon état permet de répondre à une multitude de fonctions et d'usages : qualité de l'eau, qualité paysagère, intérêt récréatif, qualité écologique, bon fonctionnement hydraulique (rétention des crues)...

Ce bon fonctionnement hydromorphologique peut être caractérisé par une grande diversité de faciès, des berges naturelles, des bancs alluviaux mobiles, une ripisylve variée, des annexes hydrauliques et, surtout, la dynamique la plus libre possible.

Les opérations de restauration physique d'un tronçon de cours d'eau nécessitent l'analyse la plus fine possible des potentialités en confrontation avec l'analyse des dysfonctionnements subis.

Typologie :

Il est possible de proposer une typologie simple qui permet de définir les actions de restauration à conduire suivant trois critères caractérisant les cours d'eau :

- la puissance spécifique W
- l'érodabilité des berges B
- le potentiel d'apports solide A



Classe	1	2	3	4
Puissance spécifique ¹ - W (en W/m ²)	<10	10-30	30-100	>100
Erodabilité des berges - B	nulle	faible	moyenne	forte
Potentiel d'apport solides - A	nul	faible	moyen	fort

Typologie des cours d'eau

Source : Manuel de Restauration Hydromorphologique des cours d'eau / Agence de l'eau Seine Normandie (référence bibliographique V)

Par exemple, un cours d'eau de type W4B3A3 (à forte puissance spécifique et à apports solides et érodabilité des berges moyens) sera probablement très réactif. Les travaux de restauration qui pourraient y être réalisés seront efficaces avec des résultats positifs rapides.

Niveau d'ambition des travaux de restauration :

On peut définir trois grandes catégories d'actions sur un cours d'eau visant à préserver ou à restaurer un bon fonctionnement hydromorphologique :

- la préservation,
- la limitation des dysfonctionnements futurs,
- la restauration.

Pour cette dernière, on peut distinguer trois niveaux d'actions allant d'une simple restauration de l'hydrosystème, souvent piscicole, à une restauration fonctionnelle plus globale.

Dans un contexte où l'on ne peut réaliser une véritable opération de restauration fonctionnelle, le recours à l'utilisation d'ouvrages en bois tels que des seuils, des barrages et soutènement de berges dans des cours d'eau dont l'emprise est contrainte peut s'avérer être la solution.

Il y a lieu toutefois d'être attentif car l'équilibre dynamique du cours d'eau, alors modifié par le point dur que constitue l'ouvrage, va chercher de nouveau à se stabiliser. On constate alors généralement l'apparition de désordres en aval immédiat des aménagements. En effet, dès qu'un ouvrage crée une chute d'eau, même modeste, une fosse d'affouillement peut se former à l'aval. Son extension dépend de la hauteur de chute mais aussi de l'érodabilité du lit. Quelques décimètres de chute en terrain très affouillable peuvent générer d'importants creusements.

Nous distinguerons, dans le panorama qui suit, les ouvrages transversaux aux cours d'eau (seuils et barrages) et les ouvrages de soutènement de berges. Les ouvrages piscicoles seront également traités à part.

4.2. Les ouvrages transversaux

Parmi les ouvrages bois transversaux dans les cours d'eau, on rencontre principalement des seuils et des barrages. La terminologie utilisée pour définir l'ouvrage n'est pas toujours employée de la même manière par les différents acteurs de l'eau.

Les barrages et les seuils en bois peuvent être différenciés de par leurs dimensions, l'organisation de leur structure interne ou encore leur fonction dans le cours d'eau :

- écrêteur de crue
- calage du fond du lit...

Aujourd'hui, en France, la majorité des ouvrages sont atterris et réalisés pour stabiliser le fond du lit ou les berges.

On propose d'adopter les définitions suivantes pour distinguer les seuils des barrages :

Un seuil est un ouvrage de correction de taille modeste (hauteur à la cuvette n'excédant pas 2 m), implanté transversalement au sens d'écoulement dans le lit du cours d'eau. Il a pour but essentiel de stabiliser le fond du lit du cours d'eau.

Un barrage est un ouvrage au fil de l'eau dont la hauteur est supérieure ou égale à 2 m. On traitera ici uniquement des ouvrages dont la hauteur n'excède pas 6 m.

Cette définition est celle utilisée par le CEMAGREF notamment dans son étude n° 18 «Équipement pour l'eau et l'environnement» (cf. référence bibliographique J) mais également celle utilisée par la circulaire du 8 juillet 2008 qui traite de la sécurité des ouvrages hydrauliques du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.

On rencontre deux grands types de structure :

- celles constituées de **caissons en rondins de bois** remplis de matériaux inertes agissant comme une construction «poids»,
- celles constituées d'une **simple paroi profondément ancrée** dans les berges du cours d'eau.

1. La puissance spécifique correspond sommairement au produit de la pente par le débit, qui caractérise les potentialités dynamiques du cours d'eau. La puissance est calculée comme suit : $\Omega = \gamma \cdot Q \cdot J$ (en watts/m).

La puissance spécifique (W) est calculée comme suit $W = \Omega / l$ (en watts/m²), où γ est le poids volumique de l'eau (9.81KN/m³), Q le débit (m³/s) (le débit de crue journalier de crue de fréquence 2 ans), J la pente de la ligne d'énergie en m/m, l la largeur du lit pour le débit utilisé (m).



Seuils bois à simple paroi (Timber sill)

➤ Description

La méthode la plus couramment utilisée comprend une seule paroi réalisée en bois ronds qui sont le plus souvent posés les uns sur les autres sans mortaise et assemblés par des tiges métalliques ou par clouage. Des pieux verticaux, en appui aval contre les rondins de bois transversaux, sont généralement présents pour renforcer la structure. On peut également rencontrer de nombreuses variantes exposées ci-après pour réaliser les seuils dans les cours d'eau.

➤ Champ d'application

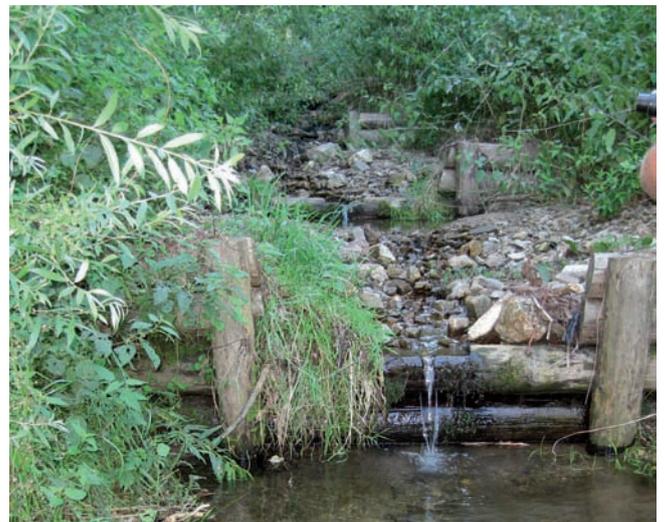
- Implantation dans tous les sols meubles pour pouvoir ancrer l'ouvrage dans les berges et/ou dans le lit si battage de pieux, sous réserve d'absence de zone de glissement de terrain.
- La mise en place de seuils successifs permet de «dissiper» l'énergie d'un cours d'eau de forte pente en limitant les vitesses d'écoulement (effet de chutes successives).
- Sur des cours d'eau dont le lit connaît un processus d'incision ou d'enfoncement ponctuel, la mise en place de seuils permet de rehausser le profil en long en favorisant les dépôts en recul immédiat de chaque ouvrage. Elle permet ainsi de stabiliser les berges amont.
- La mise en place d'un seuil peut également être dictée par la volonté de donner une direction particulière aux écoulements.
- La mise en place d'un seuil à l'aval direct d'un ouvrage de plus grande dimension (barrage, pile de pont...) peut être envisagée dans le but de limiter les phénomènes d'affouillement de ce dernier.

➤ Remarque

- Dans le cas d'un dénivelé important de lit à consolider, on préférera multiplier le nombre de seuils plutôt qu'édifier un ouvrage de hauteur de chute trop importante.



Succession de petits seuils à simple paroi / Syndicat mixte du Garon / Artilla (69)
Source : Office National des Forêts - Damien Roman



Petits seuils en bois avec les ailes fixées sur les pieux
Source : Office National des Forêts - Damien Roman / 2008

Seuils bois à simple paroi	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (main d'oeuvre et fourniture minimisées)	Peu résistants à de fortes sollicitations, notamment impact des chutes de blocs et passage de laves torrentielles
Mise en place manuelle dans des cours d'eau escarpés et difficilement accessibles	Résistent mal à l'affouillement et aux phénomènes de lessivage
Oxygénation du milieu, favorable à la faune aquatique et à l'autoépuration du cours d'eau	Nécessite des berges suffisamment meubles
N'entravent pas la migration piscicole (si faible hauteur de chute)	Peu appropriés en zone de glissement



➤ Mode opératoire

Les rondins de bois composant ces ouvrages doivent être ancrés dans les berges d'au moins 1 m de chaque côté. Il faut prendre soin de bien adapter la dimension de la cuvette en fonction du niveau des hautes eaux, afin que les ailes du seuil ne soient pas submergées.

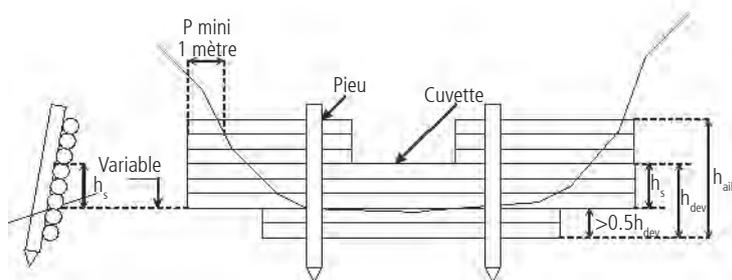
La profondeur d'ancrage de la paroi verticale constituant le corps d'ouvrage dans le lit du torrent doit être d'au moins 0,5 fois la hauteur de l'ouvrage à la cuvette ($0,5 h_{dev}$), pour se prémunir des phénomènes de lessivage en cas d'affouillement du pied de l'ouvrage.

Dans la plupart des cas, les ailes permettant le centrage des écoulements sont réalisées au moyen d'une ou deux grumes qui prennent appui sur les pieux verticaux. Elles sont généralement clouées sur le bois supérieur. La durée de vie des pieux doit être considérée comme plus faible que le reste de l'ouvrage, puisqu'ils se trouvent dans des conditions de durabilité réduite (voir partie 5.3). Les pieux sont généralement battus mécaniquement. Dans le cas de petits ouvrages, lorsque le diamètre des pieux est inférieur à 10 cm, le battage est fait manuellement.

Un géotextile peut être associé à la construction du seuil pour éviter les phénomènes de lessivage, en particulier lorsque la forme des grumes utilisées est irrégulière. Il doit être fixé au parement amont, comme illustré sur la photographie ci-contre.

L'atterrissement* est généralement réalisé avec les matériaux pris sur place. Lorsque le site présente un déficit de matériaux, il est possible d'effectuer un atterrissement même minimum avec des rémanents de branchages par exemple. Il est vivement conseillé de ne pas laisser un ouvrage «nu» exposé au passage d'une crue. Ceci pourrait conduire à sa ruine.

Les assemblages entre les grumes sont généralement réalisés à l'aide de tiges métalliques (acier HA) de diamètre 10 à 12 mm battues manuellement. En théorie, les grumes doivent être pré-perçées d'un diamètre inférieur de 1 à 2 mm de celui de la tige. En pratique, elle le sont au diamètre de la tige.



Principe d'un seuil bois classique avec des ailes
Source : Office National des Forêts - Damien Roman



Installation des pieux
Source : Département du Rhône / Brigades vertes



Installation d'un géotextile contre le parement amont de l'ouvrage
Source : Département du Rhône / Brigades vertes

Seuils bois	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage prise au niveau de la cuvette	$H_{dev} \leq 2 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	$P \geq 1 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de la paroi verticale dans le lit du cours d'eau	$\geq 0.5 H_{dev}$
Diamètre des pieux verticaux et des rondins horizontaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux ainsi qu'à la hauteur du lit du cours d'eau)	$\varnothing \text{ min} = 10 \text{ à } 15 \text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 12 \text{ mm}$

*Nom employé pour désigner les matériaux de remblai se situant à l'arrière de l'ouvrage.



Variante 1 : petits seuils rustiques transversaux

Ces ouvrages rustiques et rapides à mettre en œuvre sont constitués de deux ou trois rondins superposés et assemblés à l'aide de tiges métalliques.

Au niveau du parement aval, des pieux verticaux sont généralement présents pour renforcer la structure. Un dispositif de recalibrage des débits d'étiage est généralement prévu (voir photographie ci-contre).

Ces ouvrages de stabilisation du fond du lit du cours d'eau permettent la migration de la faune piscicole.

Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté pour des cours d'eau à régime permanent avec de faibles pentes en long et ayant un lit relativement large (de 10 à 15 m).

➤ Mode opératoire

Joindre au plus 3 grumes l'une sur l'autre à l'aide de tiges métalliques type fer à béton HA 12 mm.

Un géotextile est généralement fixé sur le parement amont pour prévenir les phénomènes de lessivage.

Il est nécessaire de créer des ancrages dans les berges sur une profondeur de un mètre minimum et d'installer les troncs transversalement au cours de l'eau.

Les pieux sont battus mécaniquement (ex : cloche de battage pneumatique montée sur un brise-roche hydraulique).

Ils doivent être positionnés tous les mètres et leur profondeur d'ancrage est de 1 mètre au minimum. Les pieux sont solidarifiés aux troncs transversaux à l'aide d'acier à béton HA.

Dans certains cas, lorsque les berges sont trop instables, on peut assurer l'ancrage de l'ouvrage par un calage en enrochements.



Petit seuil rustique avec dispositif de recalibrage des débits
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu



Assemblage et préparation du seuil à terre à partir de grumes de bois

Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu

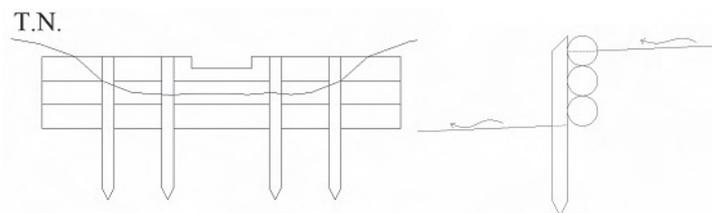


Schéma de principe d'un seuil rustique avec dispositif de recalibrage des débits

Source : Office National des Forêts / A. Matringue



Enrochement de berge rive gauche pour ancrer l'ouvrage
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu



Installation d'un seuil à la pelle mécanique
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu

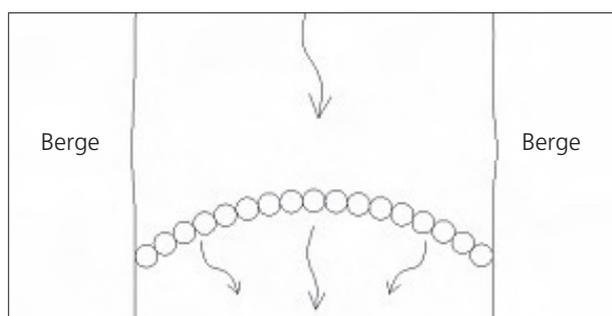
Seuils rustiques	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (main d'oeuvre et fourniture minimisées)	Ouvrage facilement contournable par les eaux
Mise en oeuvre rapide et mécanisable (suivant les conditions d'accessibilité du site)	Mauvaise résistance à l'affouillement et aux phénomènes de lessivage
Ouvrage pouvant être préfabriqué en atelier ou sur la berge	Ouvrage fortement limité en hauteur
Pas d'entrave à la migration piscicole de par sa faible hauteur de chute	

Seuils rustiques	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (2 à 3 rondins de bois)	$H \leq 50$ à 60 cm
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	$P \geq 1$ m
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	$P \geq 1$ m
Diamètre des pieux verticaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux)	\varnothing min = 10 à 15 cm
Diamètre des bois horizontaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	\varnothing min = 15 à 25 cm
Diamètre des tiges métalliques (acier à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 12$ mm



Variante 2 : seuils en arc de cercle

Ces ouvrages présentent une structure de taille réduite. Ils sont constitués de pieux jointifs disposés en arc de cercle. Grâce à leur forme incurvée ils permettent de recentrer les écoulements vers l'axe du lit limitant ainsi l'érosion des berges. En effet, la trajectoire des écoulements en sortie d'ouvrage est perpendiculaire au support (voir figure ci-dessous).



Source : Office national des Forêts / A Matringue

Ces seuils sont vulnérables aux phénomènes de déchaussement (pieux non solidarités) et de contournement (pas d'ancrage dans les berges).

➤ Mode opératoire

Les pieux sont battus mécaniquement sur une profondeur de 1 m au minimum à l'aide d'une cloche de battage.

L'arc de cercle est positionné partie convexe vers l'amont. Une configuration inverse aurait tendance à diriger les écoulements vers les berges aval.

Un géotextile est généralement fixé sur le parement amont pour éviter une vidange du remblai. La création d'une fosse de dissipation en enrochement est nécessaire pour lutter contre l'affouillement en pied d'ouvrage.



Seuil en arc de cercle

Source : Syndicat mixte du Lignon, de l'Anzon et du Vizézy



Installation du géotextile

Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu

Seuils en arc de cercle	
Avantages	Inconvénients
Faible quantité de bois nécessaire	Facilement contournable par les eaux (pas d'ancrage dans les berges)
Mise en oeuvre rapide et mécanisable (suivant les conditions d'accessibilité du site)	Mauvaise résistance à l'affouillement.
Pas d'entrave à la migration piscicole de par sa faible hauteur de chute	Peu de recul sur ce type d'ouvrage car peu de réalisations
	Lame d'eau non centrée représentant une difficulté ponctuelle de franchissement pour les espèces piscicoles

Seuils en arc de cercle	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage	H ≤ 50 cm
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	P ≥ 1 m
Diamètre des pieux verticaux (généralement adaptés à la disponibilité des bois locaux)	Ø min = 10 à 15 cm



Variante 3 : seuils en «V»

Ces ouvrages rustiques sont simples et rapides à mettre en œuvre. Ils sont constitués de rondins superposés et disposés en «V», la pointe du «V» étant orientée vers l'amont. Des pieux en aval de l'ouvrage servent à caler et renforcer la structure. Un platelage amont peut consolider la structure et faciliter le transit des écoulements sur l'ouvrage.

La forme en «V» permet de recentrer les écoulements comme les seuils en arc de cercle (voir figure ci-contre). Ce type d'ouvrage est particulièrement adapté pour corriger de petites ravines.

➤ Mode opératoire

Le lit de la rivière doit être nivelé pour faciliter la pose des rondins horizontaux qui doivent être ancrés dans les berges sur une profondeur de 1 m au minimum.

Les rondins disposés en «V», constituant le corps de l'ouvrage, sont assemblés par des tiges métalliques. Ils doivent être disposés de telle sorte que l'angle constitué par rapport au fil d'eau soit d'au moins 135°.

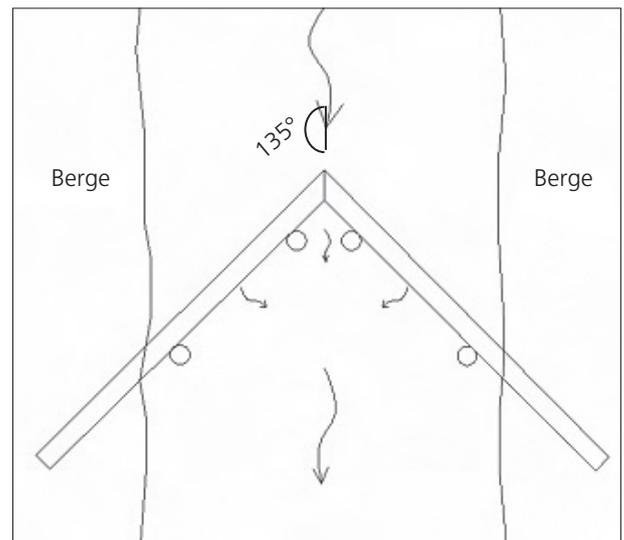
Les pieux verticaux sont battus mécaniquement et solidarités au corps de l'ouvrage par des tiges métalliques.

Un géotextile peut être fixé sur le parement amont du corps de l'ouvrage contre l'atterrissement pour prévenir la vidange des fines.

Le platelage est constitué de rondins de faibles diamètres taillés en biseau, enfoncés dans le lit du cours d'eau et cloués sur le corps de l'ouvrage. La création d'une fosse de dissipation en enrochement est conseillée pour protéger l'ouvrage de l'affouillement, en raison du point faible que constitue la partie centrale du corps de l'ouvrage.



Seuil en «V»
Source : Syndicat de la Reyssouze



Principe d'un seuil en «V»
Source : Office National des Forêts / A. Matringue

Seuils en «V»	
Avantages	Inconvénients
Investissement financier réduit (coût de la main d'oeuvre et de la fourniture minimisé)	Peu résistant à de fortes sollicitations, notamment à l'impact des chutes de blocs et au passage de laves torrentielles
Mise en oeuvre pouvant être faite entièrement à la main	Résistant mal à l'affouillement et au lessivage de l'atterrissement
Recentrage des faibles débits en période d'étiage	Peu de recul sur ce type d'ouvrage car peu de réalisations

Seuils en «V»	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (2 à 3 rondins de bois)	H ≤ 50 cm
Profondeur d'ancrage minimum des bois dans les berges	P ≥ 1 m
Profondeur d'ancrage minimum des pieux verticaux dans le lit du cours d'eau	P ≥ 1 m
Diamètre des pieux verticaux (adaptés à la disponibilité des bois locaux)	Ø min = 10 à 15 cm
Diamètre des bois horizontaux (adaptés à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	Ø min = 10 à 15 cm
Diamètre des tiges métalliques (type acier à béton HA) pour assemblage des rondins	Ø = 12 mm

Barrages à doubles parois (gabions bois)

➤ Description

Ces ouvrages sont constitués d'un entrecroisement de longrines (rondins les plus longs et perpendiculaires au sens d'écoulement des eaux) et de traverses (rondins plus courts et parallèles au sens d'écoulement du cours d'eau). La rigidité nécessaire est apportée par le remplissage de matériaux de natures diverses généralement disponibles sur place.

La stabilité de cette structure est assurée par le poids global de l'ouvrage et notamment celui des matériaux de remplissage qui devront par conséquent être suffisamment denses.

Ces ouvrages sont généralement dotés d'ailes dont la structure de construction variable est intégrée au corps de l'ouvrage. Ils se différencient néanmoins sur de nombreux aspects : nature des matériaux de remplissage, aménagement du parement extérieur, mode d'assemblage des éléments...

➤ Champ d'application

Les barrages à doubles parois ont principalement pour but la stabilisation du profil en long du cours d'eau. Ils sont généralement implantés en série comme les seuils.

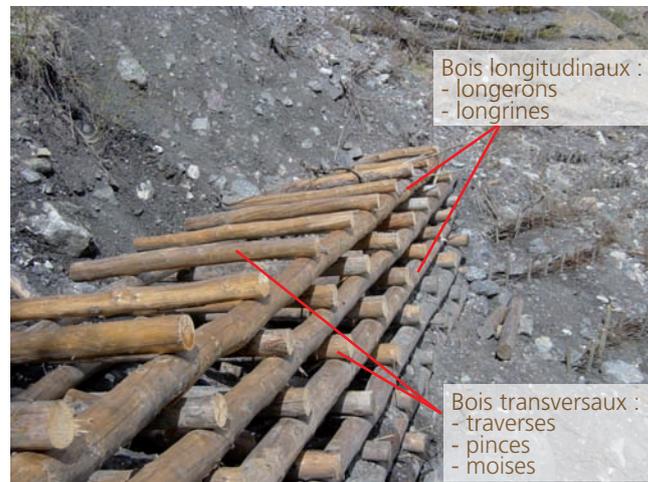
Sur des rivières dont le lit connaît un processus d'incision ou d'enfoncement ponctuel, la mise en place de barrages permet de rehausser le profil en long en favorisant les dépôts en amont de chaque ouvrage. La mise en place d'un barrage peut également être dictée par la volonté de donner une direction particulière à l'écoulement, éviter la divagation et stabiliser les berges, si des enjeux de proximité nécessitent ce type de correction.

Ce type d'ouvrage est largement utilisé dans les cours d'eau des grandes plaines australiennes pour constituer des réservoirs destinés à l'irrigation des terres agricoles.

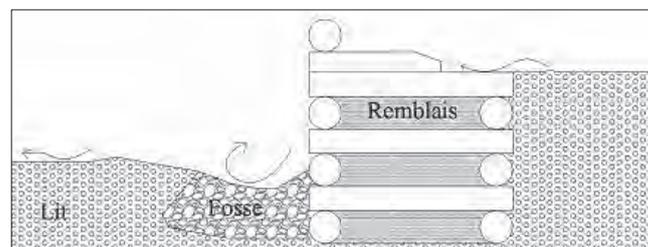
➤ Remarques

La hauteur de chute étant importante, les ouvrages doivent être munis de dispositifs anti-affouillement, généralement des radiers qui peuvent être réalisés en blocs de pierres ou également avec un platelage bois.

Lorsque l'on doit faire face à des régimes hydrauliques violents (par exemple : pluies tropicales australiennes ou simplement pluies cévenoles), une construction en marches d'escalier est nécessaire pour limiter la hauteur maximale de chute d'eau.



Ouvrage à doubles parois en bois
Source : Office National des Forêts / DN RTM



Coupe d'un ouvrage à doubles parois en bois
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



➤ Mode opératoire

Les ouvrages à doubles parois se distinguent par l'organisation de la structure interne de l'ouvrage. Il est possible de réaliser des ouvrages dont les traverses se trouvent alignées verticalement les unes sur les autres (figures 1 et 3 ci-contre) ou bien de les décaler régulièrement d'un demi-espace (figure 2 ci-contre).

Plusieurs avis s'accordent sur le fait que le montage représenté sur la figure 1 confère une rigidité plus importante que celui exposé en figure 2.

Par ailleurs, deux écoles s'opposent sur l'intérêt de commencer le montage de la structure de l'ouvrage par les traverses plutôt que par les longrines.

Peu utilisé, le montage commençant par les traverses (figure 3) est davantage employé lorsque l'on cherche à avoir une structure souple et peu sujette aux phénomènes d'affouillement.

Les ouvrages se distinguent également par leur parement aval qui peut être réalisé soit entièrement en bois, soit associé à des pierres soigneusement positionnées.

Variantes de parements

• Parement en pierres

Les pierres sont soigneusement positionnées entre deux rangs de longrines, de telle sorte qu'elles soient calées par celles-ci. Cette technique nécessitant des compétences spécifiques est très consommatrice de main d'oeuvre.

La pierre étant plus dense que le bois, la structure ainsi plus lourde offre une meilleure stabilité vis-à-vis des moments renversants. L'effet de «masse» compacte que constituent les pierres assemblées rend également la structure plus rigide et par conséquent moins sujette aux déformations.

Un déficit en bois locaux peut orienter vers un tel parement. En effet, dans les cours d'eau à régime torrentiel, les pierres sont généralement présentes alors que le bois peut faire défaut notamment dans le haut des bassins versants.

On peut aussi considérer, de façon plus subjective, que ce type de parement apporte une qualité esthétique qui, dans certains cas, peut être déterminante. Cette association pierre/bois permet également d'assurer un bon drainage des eaux superficielles et ainsi de préserver de façon plus durable la structure vis à vis des dégradations biologiques.



Figure 1 : Structure dont les traverses sont alignées verticalement et commençant par une longrine
Source : Office National des Forêts / Damien Roman

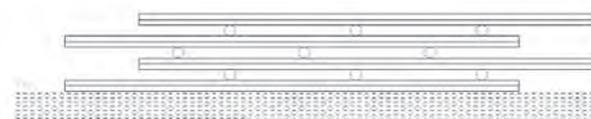


Figure 2 : Structure dont les traverses sont décalées verticalement et commençant par une longrine
Source : Office National des Forêts / Damien Roman

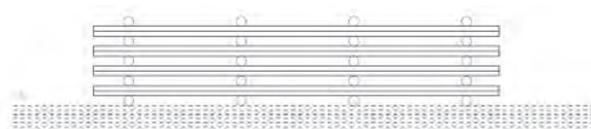


Figure 3 : Structure avec traverses sur le premier rang
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



Barrage en bois avec parement en pierres
Source : Office National des Forêts / DN RTM



• Parement en bois

On distingue trois variantes structurales dans la mise en place des bois de parement (voir photos ci-contre).

Les rondins de bois (appelés aussi bouche-trous) sont intercalés dans les intervalles laissés entre deux traverses successives parallèlement aux longrines (variante 1 de la figure ci-contre). Les bois sont de même diamètre que les traverses et se situent sur le même plan que les longrines alors que, dans le montage représenté en variante 2, les bois sont positionnés en retrait et peuvent par conséquent être d'un diamètre supérieur.

Ces deux techniques offrent l'avantage d'une mise en œuvre rapide et facilitée lorsqu'on dispose d'une quantité suffisante de bois. Les rondins ainsi positionnés sont liaisonnés à la structure par des tiges métalliques de type fer à béton ou simplement cloués.

La troisième variante se distingue des deux autres par l'orientation des rondins de bois positionnés parallèlement aux traverses sur toute la largeur de l'ouvrage et laissant ainsi apparaître uniquement la section de coupe sur le parement aval (voir photo ci-contre).

Cette technique de mise en œuvre est consommatrice de temps et nécessite de disposer d'une grande quantité de bois. En revanche, elle offre l'avantage de constituer une structure légère, de faible densité apparente, dont l'utilisation est à privilégier sur des sols peu portants. On rencontre généralement ce type de structures dans des cours d'eau de plaine.

Une quatrième technique, consistant à positionner des rondins verticaux à l'arrière du parement, commence à être utilisée. Elle présente l'avantage d'une mise en œuvre rapide.

Variantes d'ailes

La structure des ailes des barrages est généralement constituée sur le même principe que celle du corps de l'ouvrage par un entrecroisement de traverses et de longrines.

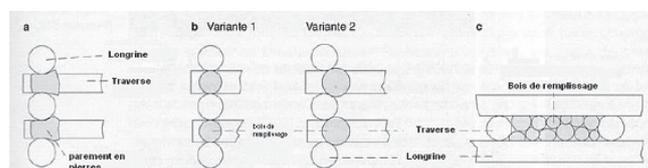
On rencontre cependant deux cas de figures dans le positionnement des longrines, ces dernières pouvant être soit positionnées horizontalement parallèlement à celles du corps de l'ouvrage, soit inclinées par rapport à l'horizontale d'un angle défini par le calcul hydraulique (généralement 1/1). Les données hydrauliques peuvent être déterminées à partir de l'étude n° 18 du CEMAGREF (référence J) ou d'après l'ouvrage de G. DEGOUTTE (référence H).

Dans tous les cas, les ailes doivent être solidaires au corps de l'ouvrage.



Barrage à doubles parois avec parements sur le même plan que les longrines

Source : Office National des Forêts



Parements des ouvrages doubles parois

Source : Office National des Forêts



Barrage à doubles parois avec parement réalisé en rondins disposés parallèlement aux traverses

Source : Brigades vertes / Département du Rhône



Ailes réalisées avec des longrines horizontales

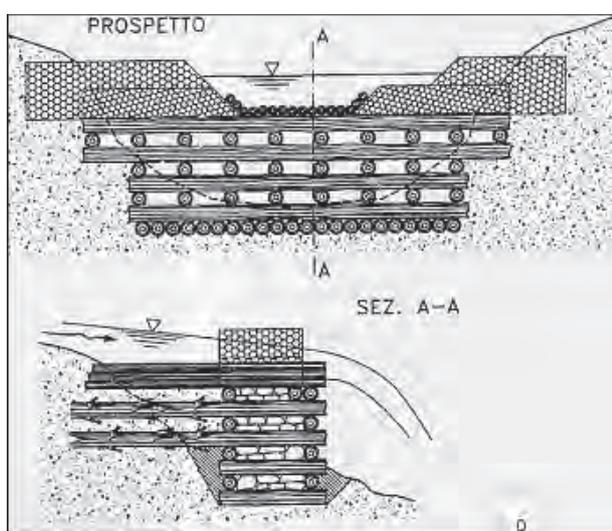
Source : Italie / Bordighera / Office National des Forêts / Damien Roman



Dans le cas des ailes inclinées, les longrines, sont ancrées dans le corps du barrage, a priori sur une longueur égale à la largeur de l'ouvrage.

Les ailes peuvent également être simplement réalisées par un ou plusieurs rondins de bois, lorsque le régime des écoulements ne nécessite pas une structure plus «lourde».

De façon plus marginale, on rencontre d'autres types de structures avec des ailes réalisées en gabions métalliques comme illustré sur la figure ci-dessous.



Source : Service forestier italien

Ces structures mixtes présentent essentiellement l'avantage de garantir une durabilité plus longue aux ailes qui sont généralement des zones de forte vulnérabilité vis-à-vis des dégradations biologiques.

En effet, les ailes sont les éléments de l'ouvrage les plus régulièrement soumis à de fortes variations hygrométriques et rarement protégées par un écoulement pérenne sur leur surface.

Variantes de platelages

La cuvette des barrages ainsi que les remontées d'ailes doivent être revêtues d'un platelage bois, afin d'éviter une infiltration massive des eaux de percolation susceptibles de générer des phénomènes de lessivage du corps de l'ouvrage.

Ces platelages sont généralement constitués par un assemblage de rondins de bois de sections constantes fixés sur la cuvette et les ailes par des tiges métalliques de type acier à béton.



Barrage autrichien à ailes réalisées avec des longrines inclinées
Source : Office National des Forêts / DN RTM



Ailes réalisées avec un rondin unique
Source : Conseil Général du Rhône / Brigades vertes



Platelage avec rondins refendus sur la longueur
Source : La Tamina / Brigades vertes / Département du Rhône



On rencontre également parfois des platelages constitués de rondins refendus sur la longueur positionnés en quinconce (ou non), comme illustré sur la figure 1 ci-dessous.

Attention : Les bois sciés sur la longueur se dégradent beaucoup plus rapidement que les bois refendus.

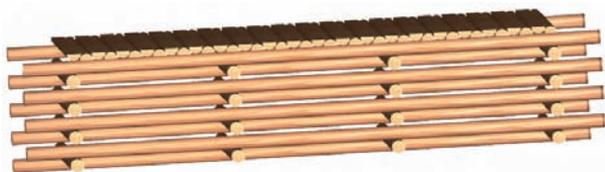


Figure 1 : Platelage avec rondins refendus sur la longueur et disposés en quinconce
Source : Office National des Forêts/Damien Roman



Figure 2 : Platelage avec rondins refendus sur la longueur disposés dans le même sens
Source : Office National des Forêts/Damien Roman



Figure 1 : Platelage avec rondins entiers disposés côte à côte
Source : Office National des Forêts/Damien Roman



Platelage avec rondins entiers
Source : Italie / Haute vallée de Suze / Damien Roman



Montage d'un platelage en rondins
Source : Brigades vertes / Département du Rhône

Remplissage de l'ouvrage

Le remplissage du caisson par des matériaux compactés dans l'espace constitué entre les deux parois est guidé par la disponibilité des matériaux sur place plus que par leur qualité.

Le risque de vidange des ouvrages est important lorsque les phénomènes d'affouillement de pied ou dans le corps de l'ouvrage ne sont pas traités comme cela est illustré sur la photo ci-contre.

Pour traiter les phénomènes de vidange des ouvrages, on peut mettre en place un géotextile dans le corps de l'ouvrage entre les matériaux de remplissage et la structure bois interne.



Vidange d'un caisson suite à un affouillement important
Source : Italie / Haute vallée de Suze / Damien Roman



Cette disposition est particulièrement recommandée lorsque le matériau de remplissage du caisson est composé en majorité d'éléments fins.

Il est par ailleurs possible de créer un dispositif anti-affouillement en aval immédiat de l'ouvrage.

Ce dispositif peut être constitué par une fosse de dissipation d'énergie en enrochements, comme cela est représenté sur la photographie ci-contre. Le dimensionnement de la fosse de dissipation peut être effectué à partir des travaux du CEMAGREF étude n°18 (voir référence J). En présence de sols fins, il est recommandé de poser les enrochements sur un géotextile comme illustré ci-contre.

Une autre technique consistant à réaliser un platelage en rondins bois au pied de l'ouvrage au niveau de la chute d'eau est largement utilisée, comme illustré sur la photographie ci-contre.

Lorsque les débits sont élevés et les hauteurs de chute importantes, il est possible de réaliser plusieurs caissons disposés en marches d'escaliers comme cela se pratique en Australie (voir photographie Cunningham weir, page 10).

Les travaux conduits par H. Chanson dans «The hydraulics of stepped chutes and spillways» (référence N) permettent de définir en fonction du régime hydraulique les caractéristiques dimensionnelles précises de l'ouvrage en marche d'escalier à construire.

Les assemblages

Afin de garantir une cohésion globale de la structure interne des ouvrages, il est nécessaire d'assurer d'une part une continuité efficace entre deux longrines successives et d'autre part une liaison entre ces dernières et les traverses.

Les assemblages doivent être réalisés avec soin car ils sont généralement à l'origine des désordres constatés dans les structures.

Suivant les configurations des ouvrages à réaliser, il est généralement nécessaire d'assurer l'assemblage de deux longrines successives lorsque les dimensions de la structure sont plus importantes que la longueur des bois disponibles.

Dans ce cas trois techniques sont utilisées pour assurer la continuité mécanique de l'élément.



Création d'une fosse de dissipation en enrochements en aval de l'ouvrage

Source : Brigades vertes / Département du Rhône



Dispositif anti-affouillement

Source : Italie / Oulx / Frana Riugio Rey

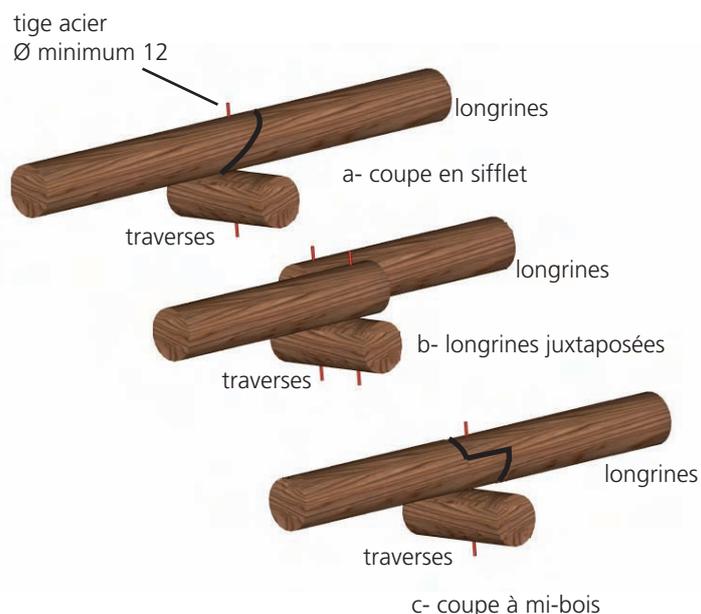


Figure 1 : Techniques d'assemblage des longrines et traverses
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



La première technique consiste à abouter deux longrines se trouvant sur un axe commun et à les liasonner à la traverse par une tige métallique de type acier à béton HA. La coupe de jonction entre les deux pièces de bois peut être réalisée soit en «sifflet» soit à «mi-bois» comme exposé sur la figure 1 (a et c).

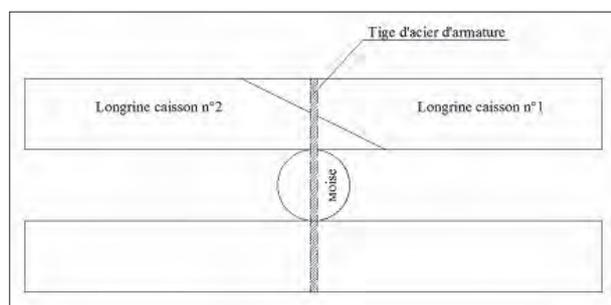
Toutes deux offrent les mêmes garanties d'un point de vue mécanique, mais il est préférable d'utiliser la méthode de la coupe en «sifflet» pour les assemblages se trouvant dans des conditions de dégradation biologique élevées, car cette technique limite les zones de stagnation d'eau.

Une autre méthode consiste à assurer la continuité mécanique des longrines en les juxtaposant côte à côte sur une traverse et en les liasonnant respectivement, comme dans les cas précédents, par des tiges métalliques. Cette technique illustrée figure 1-b présente l'avantage de renforcer la structure de l'ouvrage au niveau de l'assemblage, mais a l'inconvénient de créer un décalage parfois en mauvaise adéquation avec le profil que l'on souhaite donner à la structure.

Remarque : La technique (mi-bois) présentée sur la photographie ci-contre est simple et rapide, mais les découpes horizontales favorisent la stagnation de l'eau et donc l'apparition de champignons. D'autre part, l'assemblage présenté devrait être réalisé sur le même axe que les traverses.

Quel que soit le choix du type d'assemblage retenu, il est préférable de réaliser la liaison entre deux longrines au niveau d'une traverse par des tiges métalliques d'un diamètre minimum de 12 mm.

Ces tiges doivent travailler en doubles cisaillements, ce qui confère à l'assemblage une meilleure résistance mécanique (voir partie 6).



Assemblage travaillant en double cisaillement
Source : Office National des Forêts/Damien Roman

On rencontre aussi des ouvrages dont les assemblages sont réalisés avec des «clameaux», notamment pour rabouter des longrines. Cette technique largement utilisée en Italie reste néanmoins peu fiable.



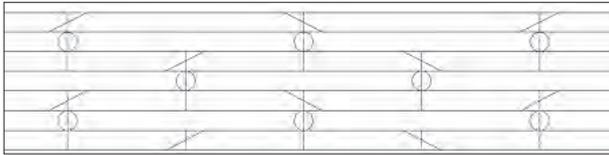
Assemblage de deux longrines par une coupe à mi-bois
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



Assemblage de deux longrines par un clameau
Source : Bordigherra / Italie / Office National des Forêts/
Damien Roman



➤ **Montage type**



Vue de face d'un montage permettant de limiter les désordres
Source : Office national des Forêts / A.MATRINCE

Ce type de montage permet d'optimiser la prévention des désordres susceptibles de nuire à la tenue de l'ouvrage.

En effet, le montage en quinconce des traverses évite de concentrer les assemblages et par conséquent les zones de faiblesse suivant un même axe.

D'autre part, il est préférable de positionner les traverses au niveau de la jonction entre deux longrines afin de faire travailler les tiges en doubles cisaillements.

➤ **Exemple d'assemblage à proscrire**

La disposition figurant sur la photo ci-contre présente l'avantage d'être simple et rapide à mettre en œuvre ; mais elle concentre les points de faiblesses sur un même axe. D'autre part, l'eau s'écoule difficilement au niveau de l'assemblage, ce qui favorise localement la rétention d'humidité et par conséquent le développement de champignons responsables de la dégradation du bois.



Assemblage de longrines à proscrire
Source : Office National des Forêts / Damien Roman

Barrage à doubles parois	
Avantages	Inconvénients
Ouvrage résistant à de fortes sollicitations (ex : crue avec charriage et laves torrentielles)	Très consommateur en bois et en main d'œuvre
Limitation des mouvements de terre puisque les matériaux de déblais peuvent être réutilisés en remblais	Mauvaise résistance à l'affouillement et au lessivage
Grâce aux ailes, stabilisation des berges et recentrage des écoulements	Mise en œuvre nécessairement mécanisée
Un retour d'expérience déjà important sur ce type de réalisation (et outils de dimensionnement)	Inadapté dans les rivières peuplées d'une faune piscicole migratrice (sans passe à poissons) au vu de la hauteur de l'ouvrage
Hauteur de chute permettant une oxygénation efficace du cours d'eau	

Barrage à doubles parois	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur maximum de l'ouvrage (au niveau de la cuvette)	$2\text{ m} \leq H \leq 5\text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans le berges	$P \geq 1\text{ m}$
Largeur de la base de l'ouvrage	$b \geq H/2$
Diamètre des longrines (généralement adapté à la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \text{ min} = 15\text{ cm}$
Diamètre des traverses (généralement adapté à la disponibilité des bois locaux et à la largeur du lit)	$\varnothing \text{ min} = 15\text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (acier à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 12\text{ mm}$



Seuils à doubles parois

Les caractéristiques sont identiques à celles des barrages à doubles parois avec une hauteur de cuvette limitée à 2 m.



Seuil à doubles parois
Source: Italie / Oulx / ONF - Damien ROMAN / Juillet 2008

➤ Description

Ces ouvrages sont constitués de grumes entières empilées et disposées perpendiculairement au sens d'écoulement des eaux. Elles sont ancrées dans les berges du cours d'eau.

Le parement ainsi obtenu constitue le corps de l'ouvrage qui peut être doté ou non d'ailes.

Ce type d'ouvrage est couramment employé dans les Alpes suisses, mais également en Haute-Savoie sous le nom de « radier », dans des cours d'eau à régime torrentiel.

Les barrages sont généralement associés à un dispositif anti-affouillement constitué d'un platelage en rondins de bois au niveau de la chute d'eau.

➤ Champ d'application

Le choix d'installer ce type d'ouvrage est généralement guidé par la disponibilité et la longueur des bois à proximité du site de construction.

On rencontre généralement ce type d'ouvrage dans des ravines profondes et encaissées dont les berges respectives RD et RG du torrent ne sont pas trop éloignées, c'est-à-dire n'excédant pas une quinzaine de mètres en sommet d'ouvrage.

Ce type d'ouvrage est également utilisé pour concourir au franchissement d'un cours d'eau par une piste (« radier » en Haute-Savoie). Dans ce cas, l'ouvrage est équipé au niveau de la cuvette d'un platelage en rondins de bois destiné à guider les eaux et améliorer le franchissement par les véhicules.

➤ Remarques

La majorité des ouvrages rencontrés ont été réalisés à partir d'essences résineuses de type sapin ou épicéa (classé 2 ou 3) dans un environnement favorisant la dégradation biologique du bois.

Dans de telles conditions, le remplacement des ouvrages est à prévoir à plus ou moyenne échéance suivant les conditions (durée de vie moyenne 10 à 15 ans maximum) sauf si l'objectif est une recolonisation du site par la végétation.



Barrages à simple paroi avec dispositif anti-affouillement
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



Barrages à simple paroi dans une ravine suisse
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



➤ Mode opératoire

Les pièces de bois sont choisies puis prélevées sur place. Leurs diamètres souvent élevés, leurs rectitudes ainsi que leurs longueurs sont les principaux critères à prendre en considération au moment du choix des arbres. Les grumes ainsi sélectionnées sont empilées les unes sur les autres avec un fruit* de 10 à 15 %, puis ancrées dans les berges du torrent sur une longueur minimum de 2 m.

Des traverses appelées tirants* sont régulièrement intercalées dans le parement de l'ouvrage. De longueurs variables, elles sont destinées à renforcer la stabilité externe de l'ouvrage. Elles sont liaisonnées au corps de l'ouvrage à une extrémité, alors que l'autre extrémité laissée libre est positionnée en limite du terrassement.

On rencontre parfois des ouvrages dont les tirants sont parallèles au sens d'écoulement des eaux (Haute-Savoie) ou encore des ouvrages dont les tirants sont dirigés vers les berges (Suisse, Val Suza) formant ainsi un angle avec le fil d'eau se situant entre 10 et 45°.

L'atterrissement de l'ouvrage par du remblai, généralement issu des terrassements, se fait à mesure du montage de la structure.

Les liaisons entre les grumes sont assurées par des tiges d'acier d'un diamètre minimum de 16 mm suivant le principe du double cisaillement comme exposé plus haut. Ces assemblages peuvent également être renforcés par un câblage dans les zones les plus sollicitées.



Montage de la structure avec les tirants
Source : Service Fédéral Forestier Suisse / James Médico

Barrage à simple paroi	
Avantages	Inconvénients
Ouvrage résistant à de fortes sollicitations (ex : crue avec charriage et laves torrentielles)	Utilisation de grumes de grosses sections et de grandes longueurs
Limitation des mouvements de terre puisque les terrassements sont limités	L'ouvrage doit être équipé d'un dispositif anti-affouillement en raison de la hauteur de chute importante
Valorisation de bois locaux de grosses sections dans des zones difficiles à exploiter ou commercialement inexploitable	Mise en oeuvre nécessairement mécanisée
Faible déstabilisation des terrains en place lors de la mise en oeuvre	Inadapté dans les rivières peuplées d'une faune piscicole migratrice
Terrassement limité	Peu de retour d'expérience sur ce type de réalisation car son utilisation est marginale
	Modélisation délicate de la structure en vue de réaliser son dimensionnement mécanique

Barrage à simple paroi	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur de l'ouvrage (au niveau de la cuvette)	$2 \text{ m} \leq H \leq 5 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans les berges	$P \geq 2 \text{ m}$
Diamètre des grumes transversales	$\varnothing \text{ min} \geq 25 \text{ cm}$
Diamètre des tirants	$\varnothing \text{ min} \geq 25 \text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour réaliser les assemblages	$\varnothing = 16 \text{ mm}$

*Fruit : inclinaison du parement aval de l'ouvrage
Tirant : élément de structure travaillant en traction destiné à ancrer l'ouvrage dans le terrain naturel



4.3. Les ouvrages de soutènement de berges

4.3.1. Ouvrages à doubles parois, végétalisés, de soutènement de berges

➤ Description

Ces soutènements, destinés à renforcer les berges des cours d'eau, ont une structure semblable à celle des ouvrages à doubles parois utilisés pour réaliser des seuils et barrages. Ils fonctionnent comme des structures poids. Ils sont remplis de matériaux inertes pris sur place et associés à du géotextile synthétique afin de limiter les phénomènes de lessivage.

Les ouvrages peuvent fonctionner seuls ou bien être végétalisés par bouturage suivant les techniques du génie biologique. Dans une telle configuration, la structure de l'ouvrage a pour objectif d'assurer un rôle de soutien temporaire de la berge, le temps que les plants soient suffisamment enracinés et puissent assurer seuls cette fonction.

Il est proposé ici de faire l'examen d'une structure végétalisée puisque couramment employée dans les rivières de plaine.

➤ Champ d'application

On peut utiliser ce type d'ouvrage pour consolider des berges raides et fortement sapées, surtout si elles assurent le soutien d'une infrastructure (route, chemin rural...) y compris en remplacement d'ouvrages en maçonnerie, de pierres ou en gabions métalliques.

Pour les structures végétalisées, il faut s'assurer de la disponibilité de boutures en quantité suffisante et de conditions stationnelles propices à un bon taux de reprise de la végétation.

➤ Remarques

La végétation sur l'ouvrage, une fois bien installée, fournit un ombrage suffisant permettant de maintenir un taux d'humidité élevé au contact du bois assurant ainsi une meilleure durabilité de la structure en bois.

On peut considérer ici que la végétation et la structure bois de l'ouvrage sont complémentaires.



Avant revégétalisation



Après revégétalisation

Ouvrage de soutènement de berges
Source : Communauté de Communes du Pays de Charvieu



Les caissons végétalisés présentent une rugosité latérale plus forte que les ouvrages en enrochements ou les murs en béton. Ceci contribue à limiter les désordres liés au report d'érosion vers l'aval, couramment observés avec des ouvrages de rugosité inférieure.

La présence d'un géotextile à chaque étage de la structure permet d'éviter une vidange complète du remblai en cas de détérioration.

Ouvrage végétalisé de soutènement de berges	
Avantages	Inconvénients
Stabilisation et protection immédiates des berges (avant même une reprise efficace de la végétation)	Traitement spécifique du sol support de fondation (compactage et remblais) parfois nécessaire pour éviter affouillement et déchaussement de l'ouvrage
Structure souple supportant des petites déformations (notamment les tassements différentiels)	Mise en oeuvre pendant la période de dormance des végétaux
Bonne intégration paysagère de l'ouvrage dans son environnement	Utilisation d'un remblai riche en matériaux terreux pour faciliter la reprise des espèces végétales
Retour d'expérience riche avec de nombreuses réalisations réussies	Traitement des reports d'érosion de berges par création de seuils ou barrages en aval immédiat de l'ouvrage
Modélisation du fonctionnement mécanique de la structure, donc possibilité de justifier les calculs de stabilité	

Ouvrage végétalisé de soutènement de berges	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur de l'ouvrage	$1 \text{ m} \leq H \leq 4 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans le berges	$P \geq 2 \text{ m}$
Diamètre des longrines (fonction de la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \text{ min} \geq 15 \text{ cm}$
Diamètre des traverses (fonction de la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \text{ min} \geq 15 \text{ cm}$
Diamètre des tiges métalliques (type fer à béton HA) pour assemblage des rondins	$\varnothing = 14 \text{ mm}$
Largeur de la base de l'ouvrage	$b \geq H/2$
Fruit du parement de l'ouvrage	20 %

➤ Mode opératoire

Préparation du terrain

Le caisson doit reposer sur une assise régulière et nivelée. Cette assise doit également être consolidée, résistante et ne pas trop se déformer. Dans un lit présentant une granulométrie avec majoritairement des éléments grossiers (cailloux, galets), la préparation de cette assise peut se faire directement en travaillant et compactant le sol en place.

Par contre, dans un substrat limoneux ou vaseux instable, un apport de tout venant est nécessaire (voir photo ci-contre). Pour une meilleure stabilité de l'ouvrage, l'assise doit présenter une pente de 5 à 10% orientée côté berge pour un fruit total du parement de l'ordre de 20%.



Réalisation de l'assise de fondation de l'ouvrage avec du remblai en tout venant
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu



Mise en œuvre et phasage

Sur l'assise de fondation ainsi réalisée, on procède au montage des longrines et traverses.

A chaque étage de longrines, un géotextile est mis en place, dans lequel des matériaux terreux de remplissage doivent être compactés mécaniquement (godet de la pelle hydraulique ou roulé). Un travail manuel complémentaire est nécessaire pour combler des vides sous les rondins.

Les traverses placées perpendiculairement sur les longrines sont fixées à l'aide de tiges d'acier d'armature dont le diamètre est de 14 mm au minimum.

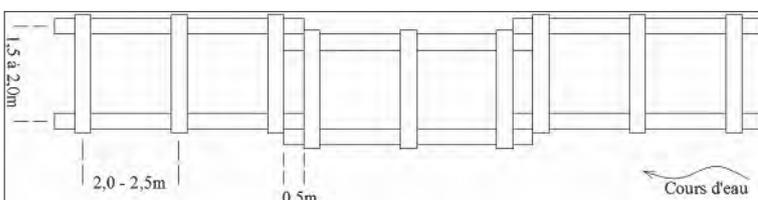
Intercalées entre les longrines, des boutures de saules (ou autre espèce) sont couchées en rangs serrés (la base des branches à l'intérieur du caisson). Les branches, de diamètre de 2 à 5 cm, doivent traverser toute l'épaisseur du caisson pour venir en butée contre la berge. Elles ne doivent pas dépasser de plus de 20 à 30 cm le front du caisson.

Parmi les boutures, on peut également intégrer des plants à racines nues en les couchant. Ces derniers sont taillés de manière à ce que la croissance soit immédiatement verticale.

Pour la reprise des branches, il est important que chaque couche de matériaux terreux soit bien tassée, afin d'éviter les vides.

Lorsque l'on détecte des arrivées d'eau en amont de l'ouvrage, un dispositif de drainage est à prévoir. Il peut être réalisé alors par une chemise drainante constituée de galets, de graviers ou de tout-venant grossier. Les plantes jouent cependant un rôle non négligeable de drainage par leur système racinaire.

Si l'aménagement est réalisé sur un tronçon de grande longueur comprenant plusieurs éléments, on peut réaliser la continuité de l'ouvrage avec une reprise entre chaque élément sur un minimum de 50 cm.



Assemblage de deux caissons
Source : Office National des Forêts/A. Matringe



Mise en place des traverses et des longrines
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu



Mise en place des boutures de saule
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu

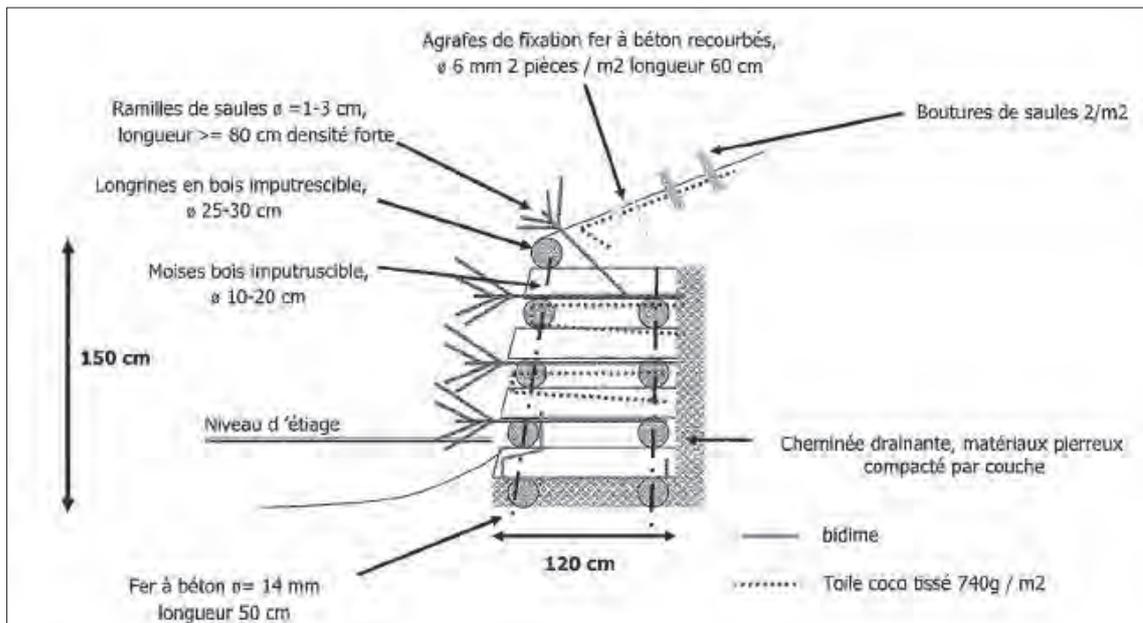


En sommet d'ouvrage, une toile de «coco» ou «jute» peut-être installée afin de protéger les semences et/ou les boutures du ruissellement.

Ce géotextile doit être fixé à l'aide d'agrafes plantées dans le remblai.



Traitement de l'érosion de surface par ensemencement et bouturage sur toile de coco
Source : Communauté de Communes du Pays de Charlieu



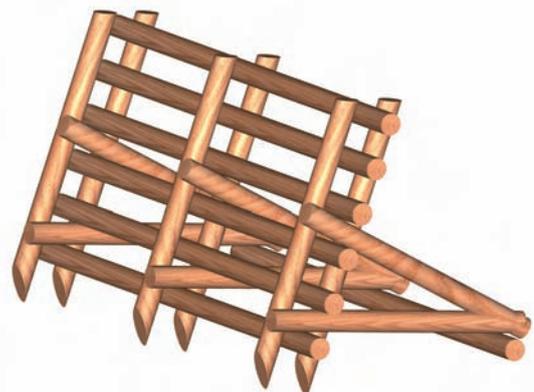
Coupe d'un ouvrage à doubles parois végétalisé de soutènement de berges
Source : Syndicat Mixte Interdépartemental des Affluents du Chéran (extrait du CCTP)

4.3.2. Ouvrages autostables

➤ Description

Les ouvrages autostables représentent aujourd'hui une frange très marginale des réalisations en bois. On rencontre ce type de structure essentiellement en Italie dans la haute vallée de Suze. Ils sont généralement revégétalisés par bouturage suivant les techniques du génie végétal, comme cela a été détaillé précédemment.

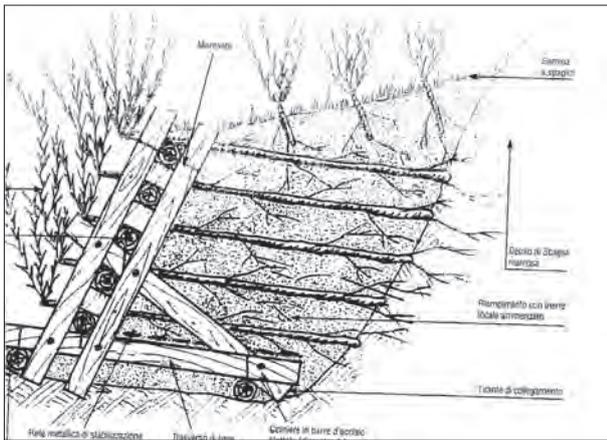
Leur structure réalisée en bois rond est composée d'un parement vertical incliné de quelques degrés qui s'articule autour d'une semelle composée de longrines et de traverses. Un tirant oblique reliant semelle et parement vient rigidifier la structure en la triangulant.



Représentation schématique d'un ouvrage bois autostable
Source : Office National des Forêts / Damien Roman



Cette structure caractérisée d'autostable trouve sa stabilité externe dans l'équilibre qui s'établit entre le poids des terres amont reposant sur les éléments de structure (essentiellement traverses et longrines amont) et les poussées qui la déstabilisent. Une modélisation mécanique du comportement de cette structure n'est cependant pas évidente à réaliser.



Coupe de principe d'un ouvrage bois autostable
Source : Service forestier italien du Val d'Aoste



Ouvrage autostable
Source : Italie / Val Suza / Damien Roman

Ouvrage autostable	
Avantages	Inconvénients
Faible consommation en bois d'oeuvre pour réaliser le montage de la structure	Très peu de retour d'expérience car le nombre de réalisations est faible et se limite à des expériences menées par les forestiers italiens
Peu vulnérable aux problèmes de ruines des assemblages car ils sont peu nombreux	Importance et nécessité de mécanisation des terrassements pour constituer l'assise de l'ouvrage
Les matériaux de déblai peuvent être utilisés en remblai	Modélisation du comportement de la structure complexe (production d'une note de calcul pour justifier de la stabilité de l'ouvrage non disponible actuellement par conséquent)
L'ouvrage peut être végétalisé suivant les techniques du génie végétal de la même façon que les ouvrages à doubles parois	
Préfabrication possible en atelier	

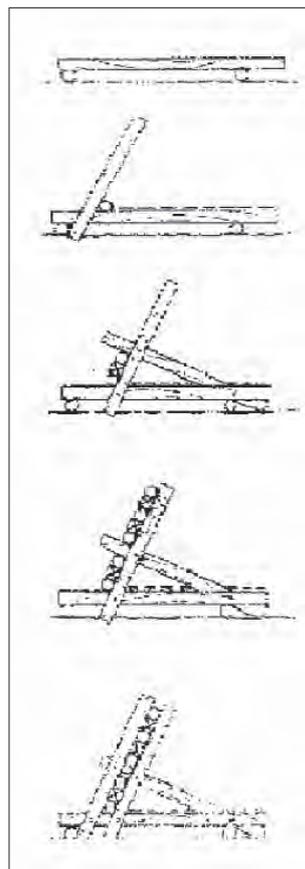
Ouvrage autostable	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur de l'ouvrage	$1 \text{ m} \leq H \leq 4 \text{ m}$
Base de l'ouvrage	$0.5 H \leq b \leq 0.7 H$
Diamètre des tiges d'assemblage (filetées et boulonnées)	$\varnothing = 14 \text{ mm}$
Fruit de l'ouvrage (inclinaison vers la berge)	20 %



➤ Mode opératoire

La mise en œuvre de ce type de structure a été élaborée par les forestiers italiens pour optimiser le temps de montage.

Elle est présentée de façon schématique ci-contre.



Mode opératoire d'un ouvrage bois autostable
Source : Service forestier italien du Val d'Aoste

4.4. Les ouvrages piscicoles

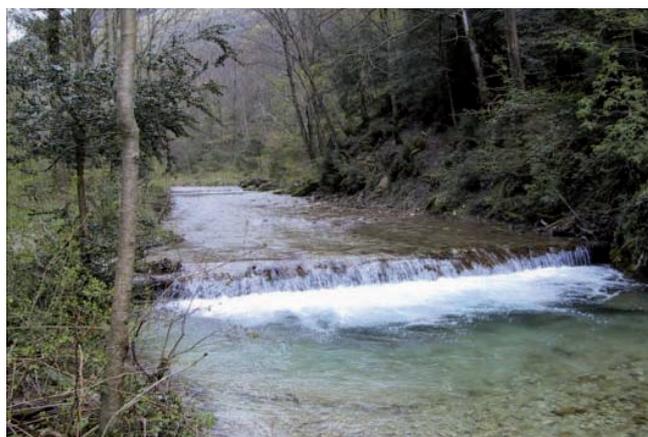
4.4.1. Seuils piscicoles avec cache à poissons

➤ Description

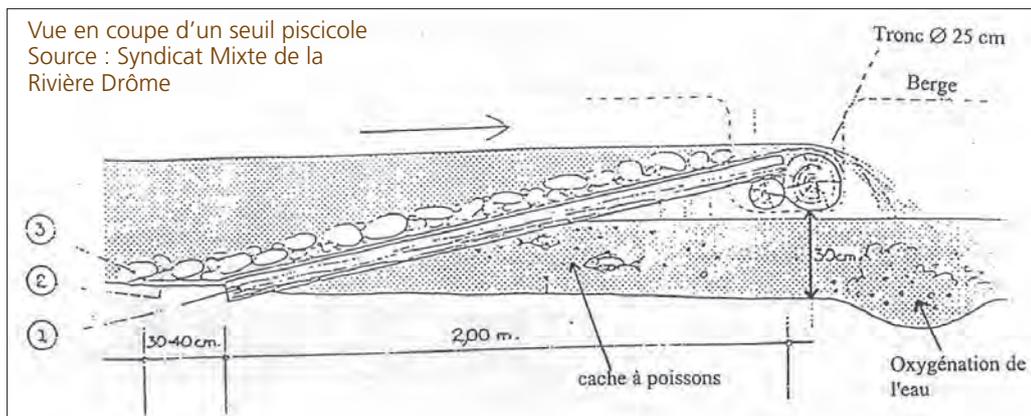
Les seuils piscicoles sont des ouvrages de taille modeste (faible hauteur de chute : inférieure à 35 cm), implantés transversalement dans le lit du cours d'eau. Ils ont pour objectif principal d'améliorer la qualité du milieu pour la faune piscicole, notamment grâce à :

- la création d'une cache à poisson sous l'ouvrage, qui améliore la capacité d'accueil et la reproduction des poissons
- l'oxygénation du milieu par la chute d'eau produite par le seuil
- la création de zone refuge en période d'étiage (au niveau des fosses de dissipation)
- la faible hauteur de chute permettant la migration des espèces

Ils sont généralement constitués de deux rondins superposés et fixés à l'aide de tiges d'acier. Un platelage amont en appui sur les bois transversaux est généralement présent pour créer la cache à poissons sous celui-ci (voir figure ci-après).



Seuil piscicole dans le bassin versant de la Drôme
Source : Syndicat mixte de la rivière Drôme



➤ Champ d'application

On rencontre généralement ce type d'ouvrage dans des cours d'eau qui nécessitent une sauvegarde ou un repeuplement piscicole. Ils sont utilisés aussi en remplacement de seuils en béton ou enrochements.

➤ Remarque

Malgré des conditions de durabilité optimisées (bois en contact permanent avec l'eau), il est préférable de choisir des essences naturellement durables de classe 4 (ex : robinier faux acacia), ou à défaut, de classe 3 (mélèze, châtaignier...), pour réaliser les ouvrages.



Réalisation du platelage en rondins de petits diamètres
Source : Syndicat mixte de la rivière Drôme

Seuil piscicole	
Avantages	Inconvénients
Mise en oeuvre simple et rapide avec un coût modéré	Risque d'érosion important qui nécessite généralement un traitement spécifique des berges en aval immédiat de l'ouvrage
Contribution à la stabilisation du profil en long du lit du cours d'eau	Ouvrage facilement contournable pour les eaux du fait de sa faible hauteur de chute. Les ancrages dans les berges doivent être particulièrement soignés (enrochements, câblage...)
Pas d'étanchéité particulière à prévoir car le seuil se colmate naturellement grâce aux particules fines en suspension dans l'eau vu le mode de réalisation	Stabilité de l'ouvrage reposant entièrement sur l'ancrage dans les berges

Seuil piscicole	
Critères de prédimensionnement	
Hauteur de l'ouvrage	$0.35 \text{ m} \leq H \leq 0.5 \text{ m}$
Profondeur d'ancrage minimum de l'ouvrage dans les berges	$P \geq 1 \text{ m} +$ (câblage ou enrochements si besoin)
Diamètre des bois transversaux (fonction de la disponibilité des bois locaux)	$\varnothing \geq 20 \text{ cm}$



➤ Mode opératoire

Une préparation préalable du site est nécessaire afin d'enlever tous les rochers qui sont susceptibles de gêner la mise en place du seuil.

La première phase du chantier consiste à réaliser un ancrage sur chaque berge d'une profondeur d'au moins un mètre. Des troncs (généralement deux) sont disposés perpendiculairement au lit du cours d'eau, puis calés dans les berges à l'aide de blocs rocheux trouvés sur place.

Un platelage est ensuite réalisé à l'aide de plusieurs rondins de petits diamètres mis côte à côte et disposés perpendiculairement aux troncs, dans le sens d'écoulement du courant d'eau.

Un treillis soudé peut ensuite être installé sur le platelage. Il doit être «crampillonné*» afin d'être bien solidarisé à l'ensemble de l'ouvrage.

On dispose ensuite sur le pourtour du platelage des pierres de taille moyenne (25 à 50 kg) trouvées sur place pour lester l'ouvrage notamment en cas de crue. L'ensemble du seuil est ensuite recouvert de matériaux pris sur place.

Lorsque les berges sont trop meubles pour assurer un bon ancrage de l'ouvrage, des câbles peuvent être fixés aux extrémités des troncs. Ces câbles sont ensuite fixés sur des points durs (bloc rocheux, arbres...).

Ces ouvrages sont généralement réalisés en régie par des équipes spécialisées dans l'aménagement de cours d'eau.

4.4.2. Passe à poissons

➤ Description

C'est un ouvrage dont le but principal est de permettre aux espèces migratrices le franchissement d'un obstacle présent dans le lit du cours d'eau, en particulier lors de la montaison (migration vers l'amont). En effet, certaines espèces ont besoin de migrer dans le cadre de leur cycle de développement et/ou de reproduction (ex : ombre commun, truite, saumon, anguille...).

Cependant, des obstacles, même de faible hauteur, peuvent entraver cette migration : la hauteur de franchissement admissible pour une truite est de 30 cm contre 25 cm pour l'ombre commun.



Ancrage des seuils dans les berges
Source : Syndicat mixte de la rivière Drôme



Vue d'ensemble d'une passe à poissons
Source : Office National des Forêts / A. Matringe, 2008

*crampillonné : cloué avec des pointes courbées pour assurer la fixation d'une grille



Nous ne disposons que de peu d'exemples de réalisation de ce type d'ouvrages en bois.

Nous proposons ici de faire l'examen d'un ouvrage qui fait référence et dont l'efficacité est à présent reconnue. Il se situe sur la commune de Saint Galmier (Loire) dans la rivière Lignon.

Il a été réalisé en régie par le Syndicat Mixte du Lignon, de l'Anzon et du Vizézy (SYMILAV). Il a pour objectif principal de permettre à la truite et à l'ombre commun de franchir un seuil artificiel existant. Il permet aussi de stabiliser et de protéger la berge en rive droite soumise à une forte érosion.

➤ Mode opératoire

La passe à poisson est constituée de douze bassins successifs assemblés, dont la structure s'apparente à un caisson.

La technique de la «fuste» a été utilisée pour réaliser les assemblages. Elle permet d'ajuster parfaitement les grumes les unes sur les autres afin d'assurer une étanchéité optimale comme illustré sur la photographie ci-contre.

Pour cela, toutes les faces inférieures des longrines ont également été entaillées longitudinalement. Les découpes ont été réalisées sur place à l'aide d'un compas «trusquin» pour faciliter la précision de la découpe. Pour assurer la migration de l'ombre commun, la hauteur de chute entre chaque bassin est de 25 cm, la truite pouvant franchir des obstacles de 30 cm.

L'ouvrage n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique de dimensionnement. Le diamètre des troncs est de 25 cm, diamètre le plus couramment utilisé pour cette technique de construction.

Une semelle en béton armé a été prévue pour les fondations et la présence d'un radier en enrochement à l'aval immédiat de l'ouvrage a été réalisé.

Les troncs sont en plus liaisonnés par des tiges métalliques type acier à béton pour solidariser et rigidifier davantage la structure.

La réalisation de l'ouvrage s'est achevée durant l'été 2007. Il a fallu 56 m³ de mélèze, pour une surface totale d'ouvrage réalisé de 70 m².



Assemblage des bois suivant la technique de la «fuste»
Source : Syndicat mixte du bassin versant du Lignon, de l'Anzon et du Vizézy



Assemblage des rondins
Source : Syndicat mixte du bassin versant du Lignon, de l'Anzon et du Vizézy



Remarque :

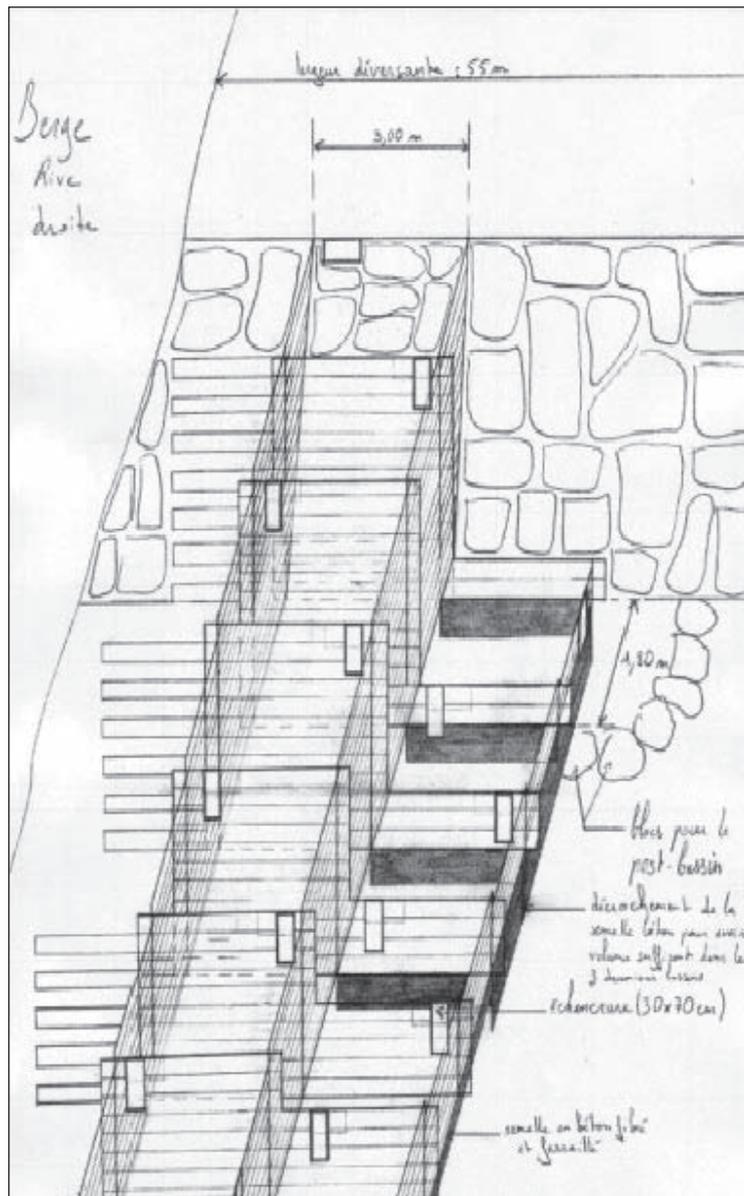
Le dimensionnement hydraulique de l'ouvrage a nécessité le soutien de spécialistes de la faune piscicole. Le débit réservé transitant dans l'ouvrage (soit environ 300 L/s) est nécessaire pour que l'ombre commun puisse migrer sans difficulté d'un bassin à l'autre.

Chaque bassin dispose d'une capacité d'environ 5 m³.



Représentation schématique de la passe à poissons
Source : Syndicat Mixte du bassin versant du Lignon, de l'Anzon et du Vizézy

Encoche de franchissement d'un bassin à l'autre
Source : Office National des Forêts /A. Matringe, 2008



5. Le matériau bois

L'utilisation du bois dans les structures présente de multiples avantages environnementaux (écologiques, esthétiques...), techniques (propriétés mécaniques, légèreté, souplesse...) et économiques (matière première disponible, emplois locaux...).

Il convient de faire un tour d'horizon, non exhaustif dans cette partie, des principales caractéristiques à connaître lorsque que l'on souhaite réaliser un ouvrage en bois dans un cours d'eau.

5.1. Atouts et performances du matériau bois

Le bois étant un matériau issu du vivant, son comportement mécanique et sa durabilité naturelle sont propres à chaque essence.

Construire en bois implique donc de bien connaître les caractéristiques mécaniques et les phénomènes responsables de la dégradation du bois pour les différentes essences.

Par sa nature, le bois est particulièrement sensible aux variations hygrométriques ambiantes. Pour une température et une hygrométrie données, il existe un état d'équilibre nommé équilibre hygroscopique. Ainsi le bois en service contient une certaine quantité d'eau mesurée par ce que l'on appelle le taux d'humidité.

La connaissance de cette caractéristique du matériau permet de prendre les dispositions adaptées vis-à-vis de deux phénomènes : les variations dimensionnelles de forme et les dégradations biologiques du bois.

5.1.1. Variations de forme peu contraignantes

Le fluage se traduit par une augmentation, au cours du temps, de la déformation d'un élément soumis à des charges permanentes ou quasi-permanentes. Ce phénomène est fortement dépendant de l'humidité du bois. Plus l'humidité augmente et plus le fluage (donc la déformation finale de l'élément) est important. L'humidité, lors de la mise en œuvre est un facteur déterminant.

L'examen du fluage dans le cas des ouvrages bois classiques en rivière ne fait pas l'objet d'une vérification systématique car les effets résultants n'ont en général pas d'effet dimensionnant.

La prise en compte du fluage peut être retenue dans le cas d'ouvrages spécifiques (par exemple mixtes, association bois / béton métal).

Le bois se déforme longitudinalement et transversalement (déformation de la section). A titre indicatif, pour une variation d'humidité donnée, la déformation transversale est 20 fois plus importante que la variation longitudinale qui est souvent négligée dans le bois.

Les coefficients de variations dimensionnelles des bois résineux ont pour valeurs :

- transversalement (hauteur et largeur de la section) : $\beta_{90} = 0.25$ % par % d'humidité.
- longitudinalement : $\beta_{00} = 0,01$ % par % d'humidité

De même que pour le fluage, la prise en compte des variations dimensionnelles n'est pas systématique.

Cette vérification est à réserver aux ouvrages spécifiques, notamment à ceux dont la structure associe des matériaux avec des comportements mécaniques différents (béton et bois ou métal et bois).

Les variations dimensionnelles liées à l'humidité ne sont pas contraignantes dans les dimensionnements des ouvrages rencontrés dans les cours d'eau. On privilégie par usage d'abord la stabilité.

5.1.2. Les dégradations biologiques du bois

En revanche, la dégradation biologique du bois est un facteur à intégrer dès la conception d'un ouvrage bois dans un cours d'eau.

Les dégradations biologiques du bois ont pour origines le développement de champignons, la présence d'insectes ou celles des térébrants marins.

Les champignons se développent lorsque :

- la substance nutritive des bois favorise leur germination,
- l'humidité est suffisante,
- le milieu et la température sont favorables.

Il y a risque à partir d'un taux d'humidité de 22% dans les bois dont la durabilité (naturelle ou conférée) est insuffisante.

En revanche, une immersion totale et par conséquent une absence d'oxygène inhibe le développement des champignons, augmentant ainsi considérablement la durabilité du bois.



Ces champignons responsables de plus de 90% des dégradations rencontrées sur les ouvrages bois en cours d'eau sont de deux types :

- les pourritures qui entraînent des dégradations mécaniques des bois
- les moisissures qui occasionnent des modifications de couleur et d'aspect.

Lutter contre ces champignons revient à protéger le bois contre des niveaux hygrométriques «moyens» compris entre 20 et 80 %.

Les insectes à larves xylophages évoluent de manière cyclique. Après ponte des insectes dans les bois, les larves se développent en se nourrissant du bois et en creusant des galeries.

Quelques essences exotiques résistent **naturellement** à toutes les attaques biologiques parmi lesquelles l'Azobé, l'Ipé, le Teck.

Le robinier ou faux acacia est la seule essence indigène de nos forêts occidentales qui présente les mêmes caractéristiques.

Les dégradations biologiques des traverses sur les photos ci-contre ont pour conséquence la perte rapide des propriétés mécaniques du bois et par suite la ruine de l'ouvrage. Le nombre d'ouvrages concernés reste faible et des paliatifs existent. Ils sont présentés dans le chapitre 5.3.

5.2. Classement mécanique des bois de structures

Le matériau bois présente une très grande variabilité dans ces propriétés. Cette variabilité n'est pas seulement effective d'une essence à l'autre (variabilité interspécifique) ; elle l'est également au sein d'une même essence (variabilité intraspécifique) et également d'un même arbre.

En l'absence de classement, les variations de propriétés physiques ou mécaniques peuvent être importantes. La nécessité du classement est garante de la fiabilité du matériau utilisable dans la construction. Le degré d'exigence reste moindre dans les cours d'eau.

Traditionnellement, le classement des bois de structure se fait à partir de l'examen visuel des singularités et de l'évaluation de la densité par le biais de la mesure des largeurs de cernes.



Dégradation rapide des traverses d'un ouvrage en mélèze d'Autriche de 2003 par des pourritures cubiques
Source : Bordigherra / Italie / Office National des Forêts / Damien Roman



Il convient de distinguer :

Le classement d'aspect : l'apparence du bois et des critères d'esthétique sont pris en compte. Ce classement doit se limiter à des usages non travaillant. Sur le plan européen, les critères de classement sont définis dans la norme NF EN 1611-1.

Le classement de structure : il peut être réalisé soit à partir de la méthode visuelle soit à partir de méthode de classement par machine.

• Classement par la méthode visuelle (norme NF B 52-001, déc. 1998)

Chacune des trois classes visuelles en France est associée à une classe de résistance.

Les bois de structure sont répartis en classes de résistance désignées chacune par une lettre :

- C pour les résineux et le peuplier ;
- D pour les feuillus ;
- GL pour le bois lamellé collé.

Le nombre suivant la ou les lettres indique la valeur caractéristique de résistance en flexion en MPa (ou N/mm²)

Exemple : un bois classé C24 correspond à une pièce de structure en peuplier ou résineux ayant une résistance caractéristique en flexion de 24 MPa.

Les classes de résistance du bois massif (résineux) sont les suivantes :

C14, C16, C18, C24, C27, C30, C34, C40.

Remarque : un C18 classé visuellement n'a pas exactement les mêmes propriétés mécaniques qu'un C18 classé mécaniquement. Il correspond plutôt à un C24. La plupart des bois sont sous-classés visuellement par rapport au classement mécanique.

• Classement par machine

Ces méthodes permettent un classement objectif et précis et une bonne optimisation de la matière. Elles permettent de sérier les pièces directement dans les différentes classes, dont celles supérieures à C30, en mesurant les caractéristiques mécaniques individuelles de chaque pièce de structure par un contrôle non destructif.

Ces méthodes de classement des bois sont communes aux deux méthodes de calcul des structures en bois. La réglementation en matière de dimensionnement fait aujourd'hui référence à deux méthodes qui cohabitent à court terme :

- Les dernières méthodes de calcul **«aux contraintes admissibles»** utilisées dans les règles CB71, déjà anciennes, se sont révélées largement insuffisantes pour traiter de problèmes complexes et ne seront plus applicables depuis le 1er janvier 2010.

- La méthode de calcul **« aux états limites »**, utilisée dans l'Eurocode 5 applique des coefficients de sécurité partiels, d'une part aux résistances, d'autre part aux actions. C'est une méthode de calcul semi-probabiliste avec coefficients de sécurité partiels. Les résistances caractéristiques sont définies comme correspondantes au fractile de 5% : sur un lot testé mécaniquement, seulement 5% des pièces ont une valeur de résistance inférieure.

Il y a dans cette démarche de classement un intérêt technologique et économique évident permettant de contourner les problèmes de fiabilité du matériau liés à la grande variabilité de ses propriétés. On se propose par la suite de se référer uniquement à cette méthode.

Le tableau suivant rassemble les grandeurs mécaniques en fonction des différentes classes de résistance. L'ensemble de ces données est disponible dans la norme NF EN 338.

NB : A ce jour, il n'existe pas de classement de structure pour les bois ronds. Ils sont toutefois classés qualitativement selon les normes : NF EN 1316 (bois ronds feuillus – classement qualitatif) et ENV 1927.

Les écarts admissibles sur les dimensions sont conformes à la norme NF EN 1313.

Le classement sera attesté prochainement par la communauté scientifique européenne.

Dans le cadre d'un prélèvement sur site des bois de construction de l'ouvrage. Sans indications précises sur les caractéristiques mécaniques de bois prélevés, choisir une classe de bois par défaut plutôt faible. (C24 tout au plus pour les bois résineux).

Dans le cas où l'on doit réaliser des ouvrages d'importance, des tests mécaniques peuvent être envisageables sur un échantillonnage de grumes.

Caractéristiques mécaniques pour le calcul de structures bois - Valeurs pour H = 12 %						
	Notation EC5	Classes de résistance NF EN 338 (extraits)				
		C14	C18	C24	C30	C40
Contraintes caractéristiques (contraintes admissibles) (MPa)						
Flexion	$f_{m,k}$	14	18 (8)	24 (10,5)	30 (13,2)	40
Traction axiale (L)	$f_{t,0,k}$	8	11 (5)	14 (6)	18 (9)	24
Traction perpendiculaire (R ou T)	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5 (0,13)	0,5 (0,2)	0,6 (0,2)	0,6
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	18 (8,5)	21 (9)	23 (10,5)	26
Compression perpendiculaire	$f_{c,90,k}$	2	2,2 (2,1)	2,5 (2,3)	2,7 (2,5)	2,9
Cisaillement	$f_{v,k}$	1,7	2 (0,9)	2,5 (1,1)	3 (1,3)	3,8
Module de déformation au fractile de 5 % (Module moyen) (MPa)						
Module axial (L)	$E_{0,05}$ $E_{0,moyen}$	4 700	6 000 (9 000)	7 400 (11 000)	8 000 (12 000)	9 400
Module perpendiculaire (R ou T)	$E_{90,moyen}$		(300)	(370)	(400)	
Module de cisaillement	G_{moyen}		(560)	(680)	(750)	
Densité moyenne						
	d_{moyen}		0,38	0,42	0,46	

Caractéristiques mécaniques du bois

Source : Le Matériau bois/De l'arbre au bois/ENSTIB

5.3. Durabilité et préservation des bois

Ce domaine est parfaitement encadré par la normalisation. Ainsi, pour vérifier l'aptitude à l'emploi d'un élément considéré, il faut suivre la logique suivante :

- déterminer la classe d'emploi de l'élément considéré,
- choisir une essence de bois,
- vérifier que cette essence est suffisamment durable sans traitement (selon NF EN 350 et NF EN 460). Sinon, vérifier qu'elle est imprégnable (selon NF EN 350) puis choisir le traitement et son mode d'application (selon NF EN 599 et NF EN 351).

5.3.1. Les classes d'emploi

L'évaluation des risques d'altération biologique, l'identification des zones sensibles et la nature du traitement de préservation éventuel se déterminent d'après les cinq classes d'emploi (anciennement « classes de risques »).

Une classe d'emploi correspond aux différentes situations en service auxquelles peuvent être exposés le bois et les produits à base de bois. A chaque classe d'emploi correspondent les potentialités d'attaque par différents agents biologiques d'altération des propriétés du bois ou des produits à base de bois.

Il existe 5 classes d'emploi, définies ci-dessous par la norme européenne EN 335 (1997-2007) :

Classe d'emploi 1 : Bois placés en intérieur, toujours à l'abri des intempéries.

Exemples : Parquets, meubles

Classe d'emploi 2 : Bois placés en intérieur, soumis à des risques occasionnels de condensation et ayant pu être exposés temporairement aux intempéries.

Exemples : Charpente, éléments de toiture.

Classe d'emploi 3 : Bois placés en extérieur, soumis à des alternances rapides d'humidification et de séchage. Tous les ouvrages exposés aux intempéries relèvent de cette classe à condition que leur conception permette l'évacuation de l'eau et de l'humidité.

Exemples : Menuiserie (fenêtres, portes), revêtements extérieurs, bardages.

Classe d'emploi 4 : Bois placés en extérieur et soumis à des humidifications fréquentes ou permanentes et susceptibles de retenir l'eau et l'humidité pendant une durée significative. Tous les ouvrages en contact avec le sol sont, entre autres, classés dans cette classe d'emploi.

Exemples : Clôtures, poteaux, passerelles extérieures, terrasses extérieures.

Classe d'emploi 5 : Tous les ouvrages en bois en contact avec de l'eau de mer.

Exemples : Jetées, pontons, et autres aménagements en bord de mer.



Remarque : la classe 5 n'est pas simplement une aggravation de la classe 4 mais caractérise une attaque différente.

Plus la classe d'emploi est élevée, plus le risque de dégradation biologique, notamment par les champignons, est élevé, et plus il faut mettre en œuvre un bois durable, que ce soit naturellement ou artificiellement (après traitement).

Pour la réalisation d'ouvrages bois dans les cours d'eau, utiliser de préférence des bois adaptés à la classe 4, lorsque cela est possible.

5.3.2. La durabilité naturelle

Compte tenu de leurs caractéristiques propres, les essences utilisables en structure se comportent différemment vis-à-vis des risques d'attaques biologiques.

Dans l'analyse de durabilité, il faut prendre en compte les caractéristiques de l'aubier et du bois parfait.

L'aubier est la zone extérieure de l'arbre, physiologiquement active au moment de l'abattage, riche en éléments nutritifs. Cette zone est sujette aux attaques d'insectes ou de champignons. Elle est peu résistante aux attaques, mais très facilement imprégnable.

Le bois parfait (duramen) est la partie interne de l'arbre, physiologiquement inactive à l'abattage. Elle est chargée en tanins et en résines. Les bois duraménisés sont généralement peu imprégnables, mais naturellement durables.

Lors de l'utilisation de bois ronds directement prélevés sur site et non destinés à transformation, l'écorçage de la grume n'est recommandé que si les procédés utilisés restent non traumatisants pour le bois (éviter l'écorçage mécanique).

Le tableau suivant indique, pour les essences de bois les plus utilisées en France dans la construction, la classe d'emploi maximum qui peut être atteinte, avec traitement de préservation adapté, ou sans traitement mais en purgeant l'aubier du bois, ainsi que la résistance naturelle de l'essence à l'attaque de termites :

Essence de bois	Avec traitement	Sans traitement	Termites
Châtaignier	aucun	3	Moyenne
Chêne	4	3	Non
Douglas	3	3	Non
Epicéa	3	aucun	Non
Mélèze	3	3	Non
Pin sylvestre	5	3	Non
Pin maritime	5	3	Non
Robinier	aucun	4	Bonne
Sapin	3	aucun	Non
Western Red Cedar	3	3	Non
Ipé, Doussié, Merbau, Moabi, Padouk	aucun	4	Bonne
Azobé, Iroko	aucun	3	Bonne

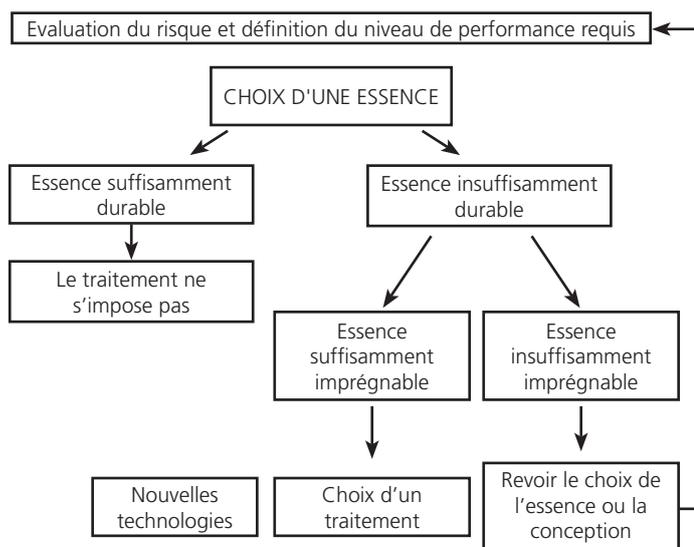
Classes d'emploi des bois courants avec ou sans traitement chimique
Source : www.fcba.fr



5.3.3. La prévention chimique : dans quels cas ?

• Méthodologie de décision

La norme EN 335 donne une séquence de méthodologie générale de décision pour choisir le bois massif approprié à la classe de risque à utiliser, représentée par la figure ci-dessous.



Logigramme décisionnel pour le traitement du bois
Source : www.fcba.fr

Cet arbre de décision montre que le traitement chimique est effectivement une solution de dernier recours. Il peut être évité ou minimisé si :

- une conception réfléchie permet de limiter les risques d'humidification,
- le choix du bois porte sur une essence suffisamment durable naturellement.

Dans le cadre d'une démarche environnementale globale, un traitement préventif de préservation du bois, dans le respect des réglementations et des exigences techniques, peut rendre l'écobilan d'un ouvrage en bois encore plus favorable par :

- l'élimination des risques (un traitement préventif permet d'éviter les traitements curatifs plus difficiles, plus chers et plus polluants),
- l'utilisation d'essences locales,
- l'augmentation des performances à l'usage et des durées de service.

La limitation des impacts d'un produit ou d'un ouvrage sur l'environnement n'est pas une démarche simpliste qui interdit l'utilisation du bois traité. Même traité, le bois reste souvent le meilleur choix.

Remarque : Dans le cadre d'une utilisation dans les cours d'eau, peu d'évaluations des dangers de pollution ont pu être conduites. C'est pourquoi il est recommandé d'être prudent avec l'utilisation de ces produits.

Il est généralement préférable d'utiliser une essence locale plutôt qu'une essence traitée, même si les conditions de dégradation ne sont pas optimisées.

La dégradation biologique des ouvrages en bois dans les cours d'eau est principalement liée aux attaques fongiques, ce qui impose de respecter un certain nombre de mesures constructives générales pour assurer la durabilité de l'ouvrage.

5.3.4. La prévention constructive

La prévention constructive vise à maintenir le bois à une humidité toujours inférieure à 22 %. Le bois n'atteint cette humidité d'équilibre que dans des conditions extrêmes, à savoir plus de 90 % d'humidité relative de l'air quelle que soit la température. Cette humidité critique n'est généralement atteinte qu'en cas d'apport d'eau liquide : pluie, condensation, contact avec un matériaux poreux humide. C'est le cas dans les cours d'eau.

La prévention constructive repose sur deux principes complémentaires qui doivent être respectés pendant toute la durée de vie de l'ouvrage :

- L'eau ne doit pas rentrer dans le bois.
- Si l'eau rentre dans le bois, elle doit pouvoir s'évacuer rapidement.

Les précautions constructives relèvent du bon sens :

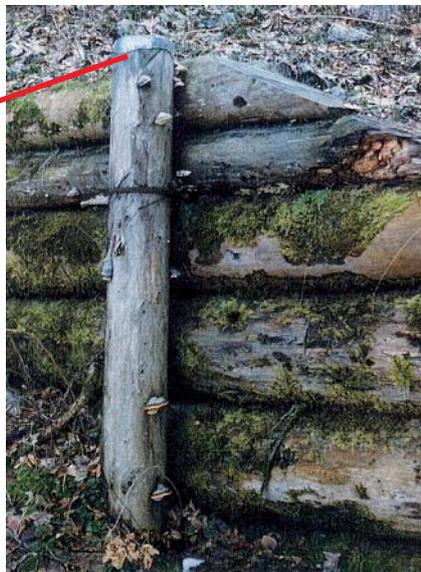
- permettre l'évacuation des eaux,
- ne pas mettre en contact le bois directement avec le sol, le béton,
- éviter les pièges à eau : simplifier les assemblages, placer les fissures sur les parties basses des pièces, limiter les risques de fente en permettant au bois de bouger librement...

Mesures de prévention constructive simples

Protection de l'extrémité d'un pieu par une couverture métallique.

La zone de contact entre le pieu et le sol n'en est pas moins vulnérable aux dégradations biologiques par les champignons.

Source : ONF



Protection sur tête de pieu d'ouvrage d'irrigation australien (Bonshaw weir)

Source : Office National des Forêts / Damien Roman / janvier 2009



Protection sur tête de pieu d'ouvrage d'irrigation australien (Silveleaf weir)

Source : Office National des Forêts / Damien Roman / janvier 2009

5.3.5. La conservation dans l'eau et ses limites

Un autre moyen pour éviter le développement de champignons dans le bois consiste à le maintenir à une humidité supérieure à 80 %. Manquant d'oxygène, le champignon ne s'installe pas dans des bois immergés ou aspergés d'eau. Cette particularité a été mise en évidence pour conserver les grumes mises à terre par les tempêtes de décembre 1999.

Ainsi les ouvrages dans les cours d'eau dont la structure est immergée en permanence se trouvent dans des conditions de conservations optimales vis-à-vis des dégradations biologiques par les champignons.

Il faut également tenir compte de l'anisotropie* du bois. Les couches transversales (le bois de bout) sont les plus perméables. Il faut donc éviter de les exposer aux intempéries : coupe en biseau, protection en métal ou en matière plastique... La présence de fil penché (éléments du bois oblique par rapport aux faces de la pièce) favorise l'entrée d'eau dans le bois.

Au contraire, une section parfaitement radiale, obtenue par fendage (la direction privilégiée de fente est la direction radiale), est relativement imperméable grâce à l'absence de section ouverte d'éléments longitudinaux et aux rayons ligneux formant les lames sur lesquelles on va pouvoir faire transiter de l'eau, pour peu que la surface soit légèrement inclinée. Les platelages de certains barrages peuvent ainsi être réalisés avec des bois refendus.

5.3.6. Conclusion

Les ouvrages bois dans les cours d'eau se situent parmi les conditions de dégradations biologiques les plus défavorables. Même s'il semble parfois difficile d'apporter la réponse appropriée à ces mécanismes de dégradation, le concepteur doit chercher un compromis adapté à chaque situation.

L'impact environnemental de chaque option retenue doit également être intégré à la réflexion.

Par exemple, la valorisation d'un bois local même fortement dégradé est sans doute à préférer à l'utilisation d'une essence tropicale ou traitée.

L'utilisation de bois de classe 4 est à privilégier. Les conditions de dégradation biologique du bois sont favorisées par l'alternance d'humidité et de sécheresse. Les cours d'eau à régime d'écoulement non permanent, rarement accompagnés d'un ombrage, sont des sites particulièrement défavorables pour les ouvrages présents.

* anisotropie : exprime le fait que le bois ne possède pas les mêmes propriétés physiques dans les sens longitudinal, transversal et radial

6. Éléments de dimensionnement des ouvrages à doubles parois

Parmi l'ensemble des ouvrages en bois présentés dans le panorama de ce guide, on propose de s'intéresser plus particulièrement au dimensionnement mécanique des ouvrages à doubles parois (caissons bois ou gabions bois).

En effet, les ouvrages à doubles parois sont les structures les plus largement employées dans les cours d'eau et la modélisation mécanique de leurs comportements peut être approchée convenablement en utilisant les règles de la résistance des matériaux ainsi que les règlements existants en vigueur (Eurocodes disponibles auprès de l'AFNOR - www.afnor.org).

Les hypothèses retenues pour la définition des modèles de comportement de l'ouvrage ainsi que les valeurs caractéristiques propres aux ouvrages dans les cours d'eau sont issues des travaux du CEMAGREF publiés dans l'étude n°18 (voir référence bibliographique J).

Le dimensionnement de la section de cuvette des ouvrages n'est pas abordé ici. Il est calculé à partir des données hydrauliques connues du bassin versant.

Une étude hydraulique spécifique préalable peut être nécessaire. Elle permet d'estimer les différents paramètres nécessaires pour définir le nombre et la géométrie de l'ouvrage à construire.

Les débits du projet ainsi déterminés et les pentes d'atterrissement naturel des terrains permettent de définir respectivement la section hydraulique de l'ouvrage, la hauteur de la chute au niveau de la cuvette (h_{dev} sur la figure 6.1 ci-après) et l'intérêt de mettre en place un dispositif anti-affouillement.

La présentation suivante s'attache à donner uniquement les grands principes de dimensionnement, l'ensemble des éléments qui permettent d'établir la note de calcul détaillée étant disponibles dans le mémoire CNAM de Damien Roman (voir référence bibliographique X).

6.1. Principe de justification des caissons

Le critère de pré-dimensionnement communément utilisé pour les caissons se base sur l'expérience et les traditions locales.

Pour ce genre d'ouvrage, une règle générale s'est imposée au fil du temps selon laquelle la base de la construction doit avoir une largeur au moins égale à la moitié de sa hauteur.

$$b \geq \frac{1}{2} h$$

b = épaisseur de l'ouvrage
h = hauteur totale de l'ouvrage

Considérant les hauteurs non négligeables que les caissons bois peuvent atteindre, il semble opportun d'envisager un traitement plus complet de la phase de dimensionnement de ces ouvrages.

L'analyse statique des caissons consiste à vérifier la stabilité externe de la structure et à évaluer successivement les efforts et contraintes qui s'opèrent dans les éléments qui constituent l'assemblage des caissons.

Selon les règles définies par les Eurocodes, une structure doit être vérifiée pour assurer, pendant toute la durée d'exploitation, la sécurité des personnes et permettre une utilisation conforme à sa destination. Elle doit résister à toutes les actions, déformations et influences (humidité) susceptibles d'intervenir pendant sa réalisation (montage sur chantier) et sa durée d'utilisation.

Cette vérification doit être présentée aux Etats Limites Ultimes (ELU*), mais pas aux Etats Limites de Service (ELS*), rarement pertinents et dimensionnants, compte tenu de l'usage et de la destination de la structure.

Il convient de procéder aux vérifications suivantes selon les règles Eurocode :

- STR : vérification de la résistance des différentes parties de la structure (stabilité interne)
- EQU : vérification des pertes d'équilibre statique (renversement)
- GEO : déformation du sol de fondation de l'ouvrage (poinçonnement et glissement)

6.2. Quelles sont les actions à considérer ?

Il s'agit de l'ensemble des forces appliquées à la structure. Le poids propre du caisson est une action permanente (noté G1) ainsi que les poussées dues aux atterrissements non déjaugés* et déjaugés*.

Les charges d'exploitation (notées Q) sont les actions résultant d'écoulements liquides, transmises par le sol d'atterrissement ainsi que les actions de poussées directes.

* ELU : limite de stabilité ou de rupture des matériaux

ELS : limite acceptable de déformation

Un atterrissement est qualifié de déjaugé lorsqu'il est saturé en eau. Dans ce cas, la densité de l'atterrissement est égale à γ_w (poids volumique de l'eau). Un atterrissement non déjaugé a une densité γ_h (poids volumique du matériau humide).

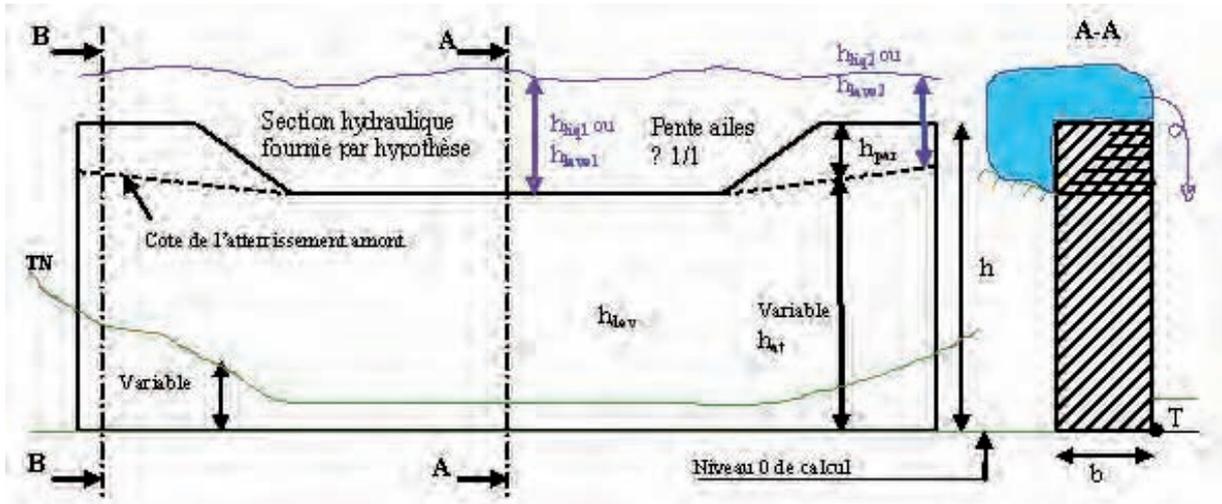


Figure 6.1 : Représentation cotée d'un ouvrage à doubles parois avec des ailes

- h_{dev} : hauteur du déversoir (cuvette)
- h_{at} : hauteur de l'atterrissement
- h_{liq1} : hauteur de la lame d'eau liquide prise au niveau de la cuvette
- h_{liq2} : hauteur de la lame d'eau liquide prise au niveau des ailes
- h_{lav1} : hauteur de la lave torrentielle prise au niveau de la cuvette
- h_{lav2} : hauteur de la lave torrentielle prise au niveau des ailes
- h_{par} : hauteur de parement de l'ouvrage non atterrie (au niveau de l'aile)

Les poussées supplémentaires des atterrissements résultant des surcharges provoquées par les écoulements de laves torrentielles (notées A), sont à considérer comme des actions accidentelles.

Par la suite on observe généralement un colmatage de la partie supérieure du lit du cours d'eau et ceci dans un contexte de situation durable.

6.2.1. Evaluation des actions agissant sur les caissons

Ces actions consistent en des forces de volume (actions pondérales essentiellement) et des forces de surface (poussée des terres, poussée hydrostatique, poussée dynamique des écoulements de laves...).

• Poids propre du caisson (G_1)

Le poids propre du caisson est une action pondérale de volume dont le point d'application est le centre de gravité du caisson. Son intensité est fonction de la densité apparente du caisson notée $\gamma_{caisson}$.

• Action de poussée des atterrissements (G_2 et G_3)

On considère que l'ouvrage présente un niveau d'atterrissement (h_{dev}) au minimum correspondant à celui de la cuvette (on atterrira si possible l'ouvrage jusqu'au sommet du parement sur toute sa longueur).

Dans le cas des torrents où peuvent survenir des laves torrentielles, pour éviter l'effet dynamique d'un « choc » sur le parement amont de l'ouvrage, l'atterrissement doit être réalisé artificiellement, le plus complètement possible avant la mise en service de l'ouvrage.

Pendant une période intermédiaire lorsque le terrain à l'amont n'aura pas atteint un bon niveau de colmatage, l'ouvrage pourra être éventuellement soumis à une poussée d'un sol entièrement déjaugé.

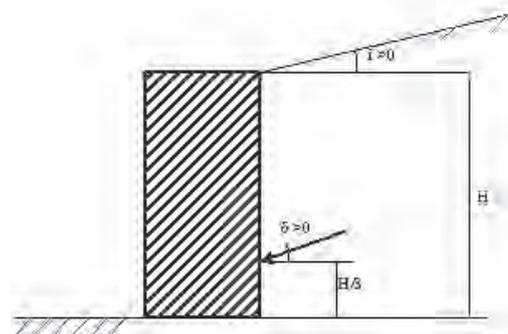
Calcul pratique

De nombreuses théories ont été conduites, permettant d'évaluer la poussée active des terres sur un écran (Coulomb, Rankine, Boussinesq...) selon différentes hypothèses et contextes.

Sur un plan pratique, on peut retenir des modélisations qui simplifient l'approche comme indiqué sur la figure ci-après.

Les poussées sont considérées comme s'appliquant directement sur le parement amont et leur inclinaison par rapport à la normale à ce parement est définie par l'angle δ , pris égal à φ si la paroi est parfaitement rugueuse, ce qui est le cas pour les caissons en bois.

Pour les calculs et dans le sens de la sécurité, il est couramment retenu une hypothèse de poussées des terres normale au parement (évaluation des poussées avec $\delta = 0$).





Sont à distinguer :

- les actions de poussée d'un atterrissement non déjaugé : G_2
- l'action globale de poussée d'un atterrissement déjaugé : G_3

•Actions transmises par les écoulements (Q_{11} , A_{11} , A_{13})

- les actions résultant d'écoulements torrentiels Q_{11} et A_{11} transmises par le sol d'atterrissement non déjaugé.

Il s'agit de poussées supplémentaires occasionnées par l'effet de surcharge dû à l'écoulement de lames d'eau ou de laves torrentielles surmontant l'atterrissement.

- les poussées dynamiques des écoulements de laves torrentielles A_{13} contre le parement de l'ouvrage sur une hauteur h_{par}

La détermination exacte d'équivalents statiques de ces poussées de nature dynamique (chocs) est très difficile. On retient, en négligeant les poussées verticales éventuelles, une évaluation de l'ordre de grandeur d'un équivalent statique de calcul des poussées dynamiques à l'aide d'un diagramme de poussée de n fois la poussée hydrostatique induite par une lame d'eau non chargée.

6.2.2. Différentes situations

Les justifications de la structure ou d'un des ses éléments, vis-à-vis de chaque état limite à examiner doivent être envisagées pour différentes situations, chacune d'elles nécessitant des justifications séparées.

Dans notre cas, les différentes situations à considérer sont essentiellement définies par divers états de charges appliqués correspondant à la «vie de l'ouvrage».

On propose de retenir les examens de situations accidentelles associées à des phénomènes d'écoulements de lave torrentielle, de situations transitoires associées aux phénomènes d'écoulements liquides en surface (crue) et des situations durables ou transitoires (déjaugage) en l'absence des phénomènes cités ci-dessus.

6.2.3. Prévion des situations à envisager

A l'issue de sa construction, l'ouvrage est totalement atterri* artificiellement jusqu'au niveau de la cuvette sur une hauteur h_{dev} et au niveau des ailes sur une hauteur h_{at} .

Pendant cette période, les terres d'atterrissement en phase de consolidation et de colmatage sont éventuellement susceptibles d'être complètement déjaugées par l'écoulement d'eau.

Cette première étape constitue le cas de charge n°1 (situation transitoire où la poussée globale est assimilée à une action permanente).

Dans la deuxième partie de la «vie de l'ouvrage», le caisson est totalement atterri par des terrains consolidés et non déjaugés. Ceci constitue le cas de charge n°2. (durable).

L'ouvrage doit être à même de supporter les sollicitations résultant du passage de crues liquides (cas de charge n°3, situation transitoire et accidentelle) et d'une lave torrentielle (cas de charge n°4, situation accidentelle).

La crue liquide conduit à observer, au niveau du déversoir, une hauteur d'eau h_{liq1} et une hauteur h_{liq2} au niveau de l'aile (figure 6.1).

On retient généralement, dans le cadre de l'examen d'une situation transitoire, la hauteur d'eau au niveau de la cuvette pour un période de retour de 50 ans, mais on pourra également examiner dans certains cas une situation accidentelle avec une période de retour exceptionnellement plus longue (100 ans).

L'écoulement de la lave torrentielle conduit à observer, à un niveau du déversoir une hauteur d'écoulement de lave h_{lave1} , au niveau de l'aile une hauteur d'écoulement h_{lave2} et une hauteur d'impact au niveau de l'aile h_{par} .

Les différentes situations sont illustrées sur la figure 6.2 ci-après. Les différentes sollicitations qui en découlent sont illustrées sur la figure 6.3 ci-après.

*L'atterrissement désigne les matériaux de remblai se situant à l'arrière d'un ouvrage.



Figure 6.2 : Modélisation des différents cas à considérer pour dimensionner le caisson bois

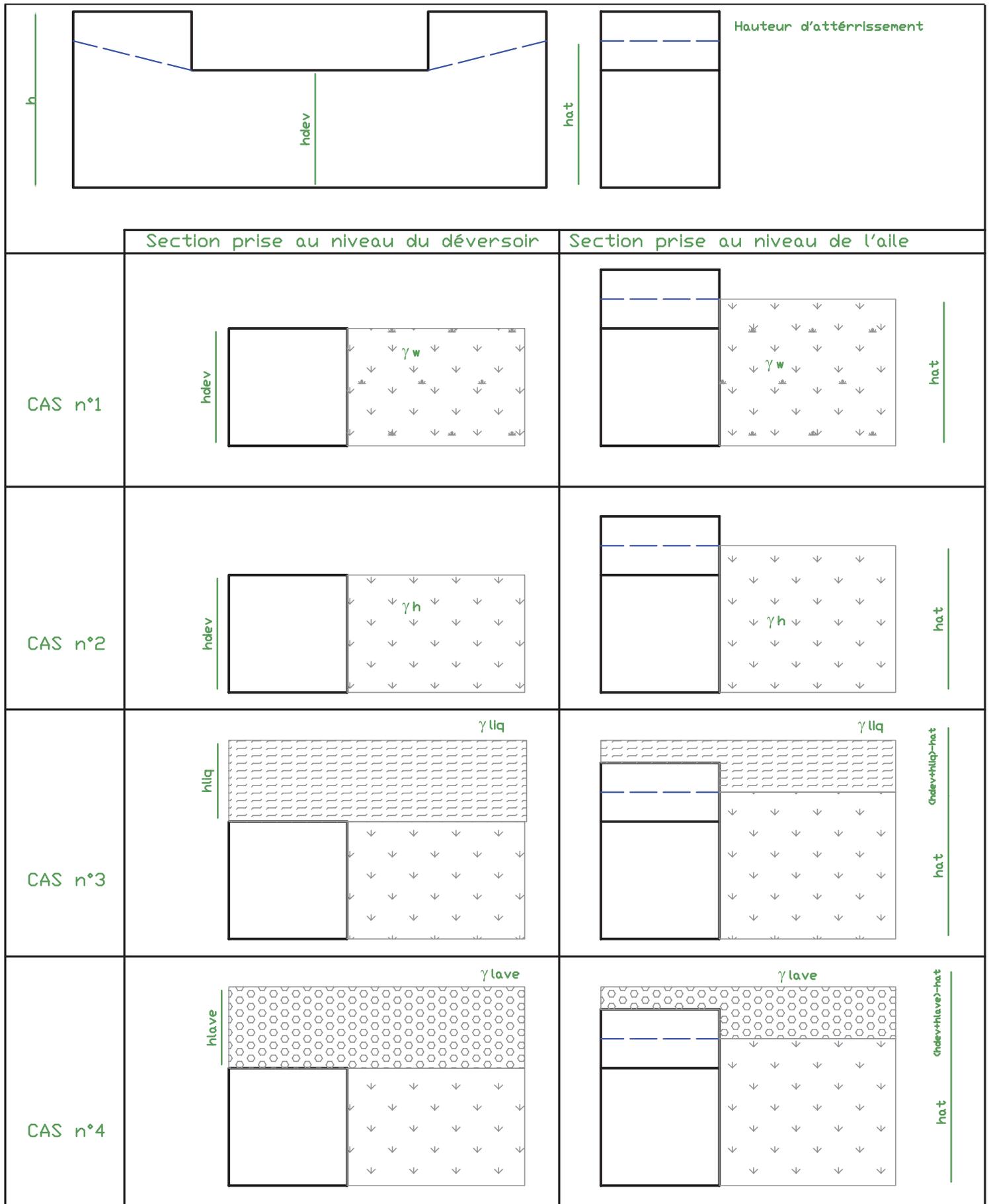
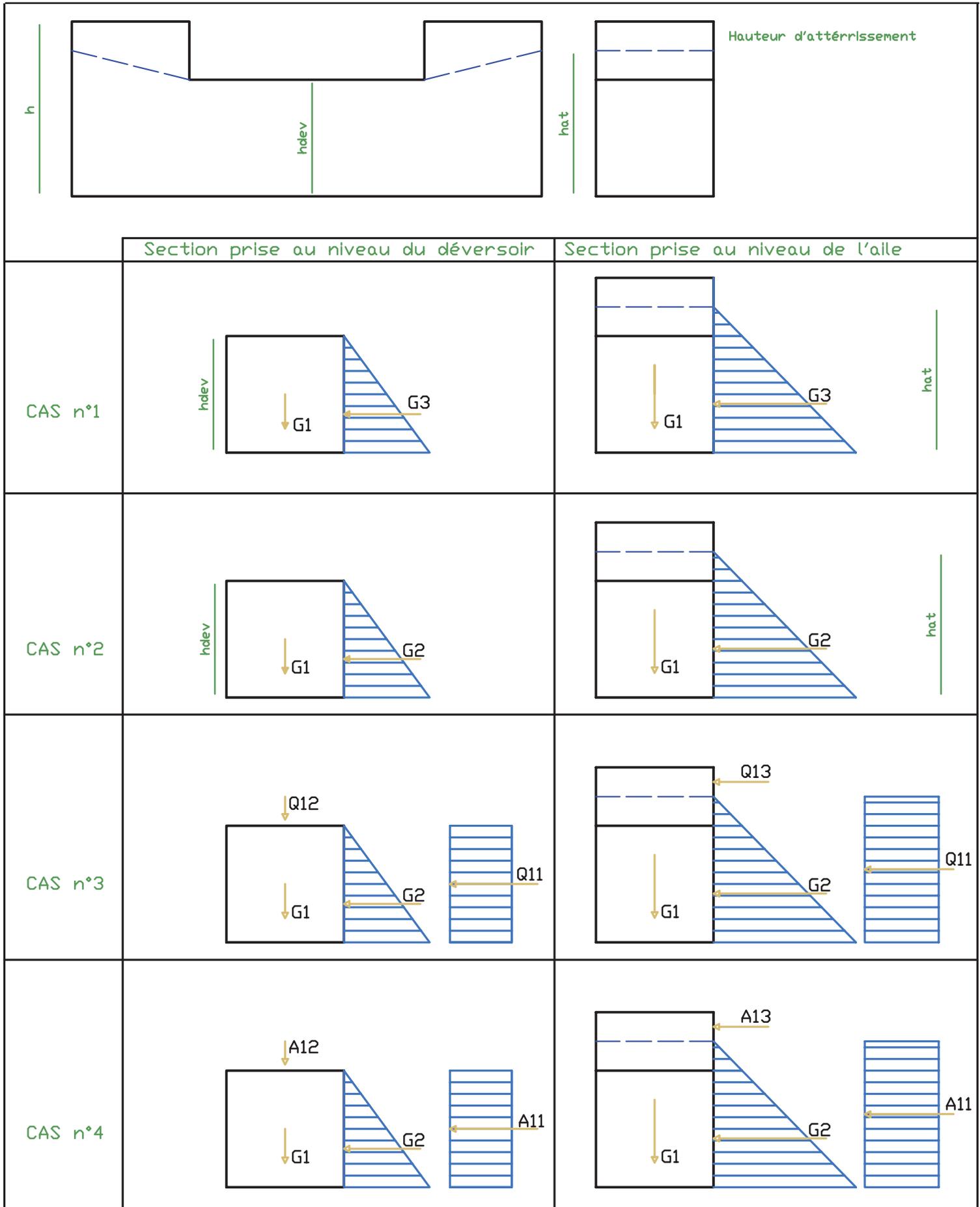




Figure 6.3 : Modélisation des différents efforts à considérer pour dimensionner le caisson bois





6.3. Vérification de l'équilibre statique de la structure (EQU) et (GEO)

Elle concerne successivement :

- la vérification au renversement : (EQU) à l'ELU. Elle consiste à s'assurer que les moments générés par les éléments de réduction des efforts destabilisateurs pondérés sont inférieurs aux moments générés par les éléments de réduction des efforts stabilisateurs pondérés. Les moments sont calculés par rapport au point T comme représenté sur la figure ci-dessous.
- la vérification au glissement: (GEO) à l'ELU. On étudie ici le phénomène de glissement de l'élément de barrage sur son assise en fondation (voir figure ci-dessous). On considère généralement que le plan de glissement le plus sensible se situe dans le sol immédiatement sous l'assise de l'ouvrage.

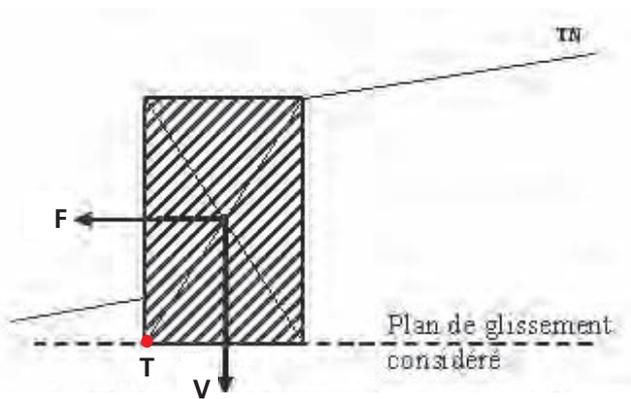


Figure 6.4 : Vérification de l'équilibre GEO de renversement et de glissement à l'ELU

- la déformation du terrain de fondation (GEO) à l'ELU (portance). En considérant le sol comme un matériau homogène et isotrope* au comportement élasto-plastique, dans le cadre des ouvrages en bois, on vérifie uniquement un état limite ultime de mobilisation de la capacité portante du sol.

La justification à l'ELU de mobilisation du sol de fondation consiste à imposer une limitation de l'intensité maximale des contraintes normales appliquées au sol, sous la semelle de l'ouvrage.

6.4. Vérification de l'équilibre statique interne (STR)

Cette vérification consiste à définir les sections appropriées pour les traverses et les longrines en bois qui constituent le corps de l'ouvrage caisson, mais également les assemblages.

6.4.1. Théorie

En phase de construction, l'ouvrage est soumis aux contraintes apportées par le matériau de remplissage. Tout événement climatique important (crue liquide et lave), qui interviendrait en cours de montage de l'ouvrage, conduirait à sa ruine.

A l'issue de la construction, l'ouvrage entièrement atterri (cuvette et ailes) est soumis aux contraintes supplémentaires suivantes :

- contraintes dues au matériau de remplissage et au remblai amont,
- contraintes dues aux surcharges sur l'ouvrage.

D'une manière générale, les pressions internes apportées dans l'ouvrage tendent à écarter les parements verticaux de la structure. Ces pressions sont reprises par les éléments transversaux (tirants) et les éléments longitudinaux (longrines). Elles sont représentées sur le schéma ci-dessous.

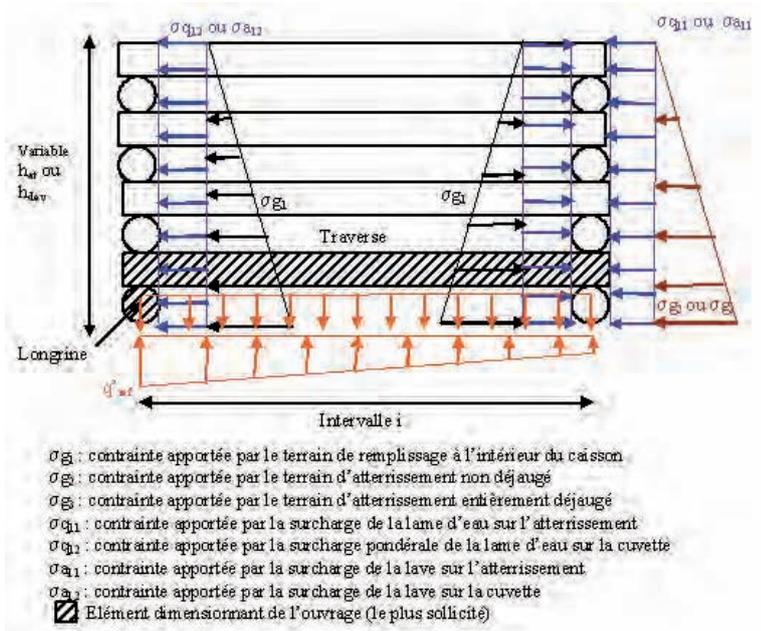


Figure 6.5 : Coupe d'un caisson à doubles parois Contraintes internes appliquées

*Adjectif employé pour qualifier un matériau qui possède les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions.

6.4.2. Etude des éléments longitudinaux (longrines)

Compte tenu de la répartition triangulaire des contraintes et de l'absence de butée sur le parement aval de l'ouvrage, l'élément le plus sollicité se situe au niveau de la base aval de l'ouvrage, comme indiqué en hachuré sur la figure ci-dessous.

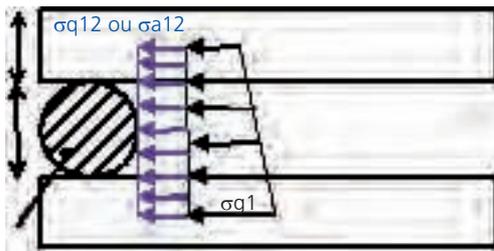


Figure 6.6 : Contraintes appliquées à l'élément longitudinal le plus sollicité

Les longrines sont sollicitées en flexion simple suivant la direction Y dans le plan (X, Y)

6.4.3. Etude des éléments transversaux (traverses ou tirants)

La traverse est sollicitée en flexion dans le sens des pressions horizontales exercées par le matériau de remplissage, représentées en rouge sur la figure 6.7 ci-après suivant la direction X dans le plan (X, Y). Ces efforts s'exercent de part et d'autre des traverses et tendent donc à s'annuler, tandis que les pressions locales calculées restent très faibles (hypothèses traduites des études conduites par les Italiens (voir référence bibliographique R). On propose par conséquent de ne pas conduire systématiquement de vérifications à ce niveau.

La traverse est également sollicitée en flexion, vis-à-vis de la reprise des efforts de frottement verticaux (non visible sur la figure ci-après) du matériau de remplissage sur le parement intérieur, suivant la direction Z dans le plan (Y, Z) sur la figure 6.7 ci-après.

Ces effets développés dans la théorie de poussée des silos deviennent dimensionnants pour des ouvrages de hauteur supérieure à 7 mètres. (voir travaux italiens en référence bibliographique S).

Il faut vérifier ici les traverses vis-à-vis des efforts de traction exercés par le matériau de remplissage sur les éléments longitudinaux, suivant la direction Y dans le plan (X, Y) de la figure ci-après. Cet effort tend à éloigner les deux parements et est entièrement repris par les traverses.

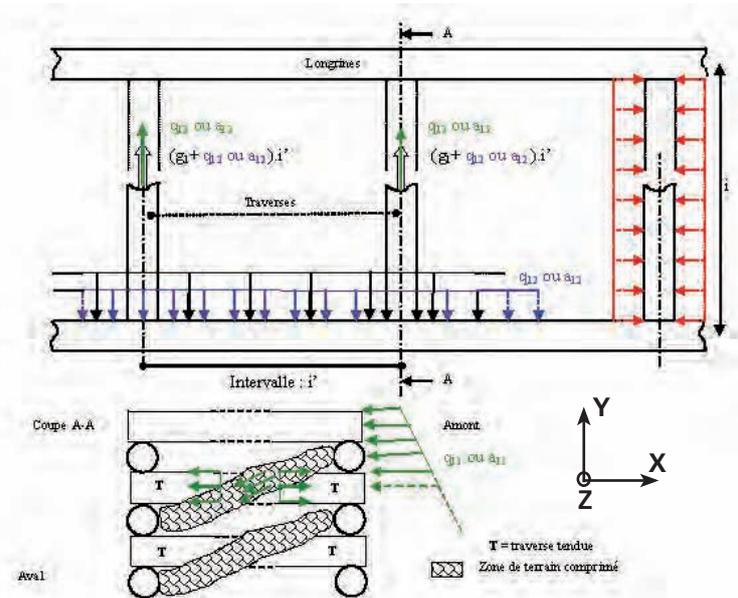


Figure 6.7 : Modélisation des efforts internes sollicitant ongrines et traverses

Chaque traverse inférieure reprend donc les réactions d'appui de deux longrines. De plus dans certains cas, lorsque les surcharges de nature accidentelles à l'amont de l'ouvrage sont dimensionnantes (parement des ailes non atterri), des efforts normaux de traction sont transmis aux traverses. Ces derniers transitent depuis le parement amont jusque dans les traverses d'après un modèle mécanique assimilable à celui du «treillis», comme représenté sur la coupe A-A de la figure précédente. Les traverses sont donc sollicitées en traction axiale.

6.4.4. Etude des assemblages (d'après EC5 section assemblage par broches)

Les éléments longitudinaux et transversaux sont assemblés par des broches métalliques (au sens de l'EC5). Ces broches, le plus souvent des tiges d'acier HA, sont maintenues dans le bois par serrage.

La tolérance de leur diamètre est $d \pm 0,1 \text{ mm}$ et le diamètre des avant-trous dans le bois doit être inférieur ou égal au diamètre de la broche.



Pour dimensionner l'assemblage il convient de vérifier successivement :

1- la valeur caractéristique de la **capacité résistante de la tige** en fonction du mode de rupture . Il est impératif de faire travailler les tiges en double cisaillement (voir figures ci-dessous).

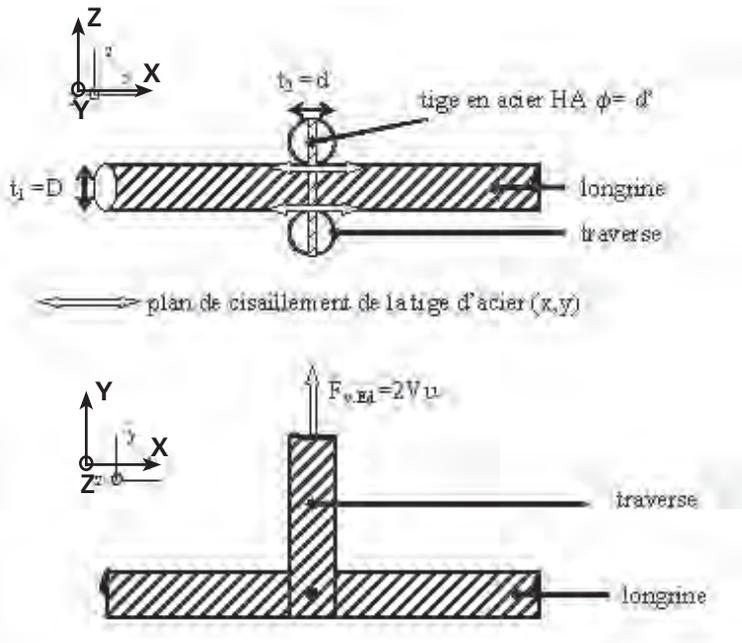


Figure 6.8 : Modélisation des efforts dans les assemblages

Pour vérifier la capacité résistante d'un assemblage, il faut étudier les quatre modes de rupture potentiels suivants :

- Écrasement du bois dans les deux traverses
- Écrasement du bois dans la longrine centrale
- Écrasement du bois dans les traverses et rotule plastique dans la tige
- Écrasement des deux pièces de bois et rotule plastique dans la tige

2- la **résistance au cisaillement de la broche**.

Ce mode de rupture est peu probable en construction bois.

3- la **vérification des cotes de pince**.

Les distances des broches par rapport aux bords du bois dépendent du diamètre de la broche et de l'orientation de la force par rapport au fil du bois, comme illustré sur la figure 6.9 ci-après.

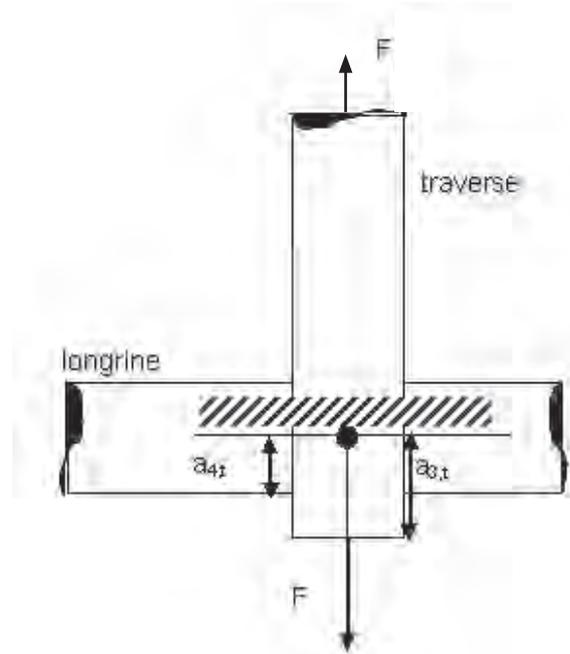


Figure 6.9 : Vérification des cotes de pince d'un assemblage

La distance de la broche par rapport aux rives et aux extrémités est fonction du point d'application du chargement.

Pour les traverses, comme on est dans le cas d'une extrémité chargée, avec un angle entre l'effort appliqué et le fil du bois de 0°, il faut respecter la cote de pince suivante :

$$a_{3,t} = \max(7d'; 80 \text{ mm})$$

(d' = diamètre de la broche en mm)

d'après EC5 : section assemblages par broches.

Pour les longrines, comme on est dans le cas d'une rive chargée, avec un angle entre l'effort appliqué et le fil du bois de 90°, il faut respecter une cote de pince de :

$$a_{4,t} = \max[(2 + 2\sin\alpha)d' ; 3d']$$

(d' = diamètre de la broche en mm)

d'après EC5 : section assemblages par broches.

6.4.5. Application numérique et outil de calcul

La création de la note de calcul nécessaire pour justifier de l'ensemble des équilibres de l'ouvrage génère un grand nombre de calculs et de vérifications comme cela a été détaillé ci-dessus.

Afin de simplifier cette étape et de limiter les risques d'erreurs, la création d'une feuille de calcul sous Excel est actuellement en test. Son utilisation doit permettre de dimensionner aisément les ouvrages en bois de type doubles parois (caissons).



7. Bibliographie

- Réf A** : BENOIT Y., LEGRAND B., TASTET, 2008. *Eurocode, Calcul de structure en bois*. AFNOR, Eyrolles, Paris, 443p.
- Réf B** : LE GOVIC, 1995. *Les assemblages dans la construction bois*. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA), 139p.
- Réf C** : Groupe de travail IRABOIS, 2006. Eurocode 5, Réaliser vos notes de calcul de façon autonome, Manuel simplifié. FFB, CMP, CTBA, CAPEB, 109p.
- Réf D** : AFNOR, 2003. Eurocode 0, Base de calcul des structures. Afnor, 72p.
- Réf E** : AFNOR, 2005. Eurocode 5, Conception et calcul des structures en bois. Afnor, 117p.
- Réf F** : AFNOR, 2005. *Eurocode 7, calcul géotechnique*. Afnor, 141p.
- Réf G** : GOULET J., BOUTIN JP., 1998. *Résistance des matériaux, aide mémoire*. L'Usine nouvelle, DUNOD, PARIS, 309p.
- Réf H** : DEGOUTTE G., 2006. Diagnostic, aménagement et gestion des rivières (hydraulique et morphologie fluviale appliquée). Lavoisier, 260p.
- Réf I** : ADAMP, DEBIAIS N., GERBER F., LACHAT B., BIOTEC Biologie appliquée, 2008. *Le génie végétal*. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, La Documentation française, 290p.
- Réf J** : TACNET JM., DEYMIER C., MATHYS N., 1994. Equipement pour l'eau et l'environnement, Conception et calcul de barrages de correction torrentielle, Etude n°18. CEMAGREF, GRENOBLE, 287p.
- Réf K** : BESSON L., 1996. Les risques naturels en montagne, Traitement Prévention Surveillance. Artès-publialp, 437 p.
- Réf L** : DIROL D., DEGLISE X., 2001. *Mécanique et ingénierie des matériaux, Durabilité des bois*. Hermes Science Publications, PARIS, 415p.
- Réf M** : CHANSON H., 2002. *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. A.A.BALKEMA PUBLISHERS, 384p.
- Réf N** : CHANSON H., MOSSA M., YASUDA Y., 2004. *Fluvial, Environmental & Coast Developments in Hydraulic Engineering*. A.A.BALKEMA PUBLISHERS, 235p.
- Réf O** : SCHUYLER JD., Reservoir for irrigation, water-power and domestic water-supply. JOHN WILEY & SONS, New York, 501-512.
- Réf P** : WEGMANN E., 1922. *The design and construction of dams*. JOHN WILEY & SONS, New York, CHAPTER IV 281-392.
- Réf Q** : Interventi di sistemazione des territorio con tecniche di ingegneria naturalistica. REGIONE PIEMONTE.
- Réf R** : Traduit de l'italien par BON M., *Les ouvrages en bois dans les torrents de montagne*. Agence Régionale pour la Prévention et Protection de l'Environnement de la région Vénétie.
- Réf S** : Region Piemonte, 2000. *Opere in legno di regimazione idraulica e consolidamento dei versanti*. Provincia di Torino, Regione Piemonte, Consorzio Forestale Alta Valle Suza, Oulx.
- Réf T** : TRIBOULOT P., 2008. *Le matériau bois, de l'arbre au bois*. Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois, Epinal, 20p.
- Réf U** : ADAM P., DEBIAIS N., 2007. *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*. Agence de l'eau Seine Normandie, Direction de l'eau des milieux aquatiques et de l'agriculture (DEMAA), 104p.
- Réf V** : MATRINGE A., 2008. *Les ouvrages bois dans les rivières en Rhône Alpes*. Rapport de stage Université de Savoie, Chambéry, Association Rivière Rhône Alpes, ONF.
- Réf W** : RUOLT F., 2005. *Ouvrages bois soutènement et correction torrentielle*. Rapport de stage Institut Universitaire Professionnel de Grenoble, ONF DN RTM, 91p.
- Réf X** : ROMAN D., 2009. *Les ouvrages bois dans les cours d'eau. Etat de l'art, applications et dimensionnement*. Mémoire d'ingénieur CNAM, 130 p.