SECTION 2

PROTECTION DE L'EXISTANT

1 Préalable

2 Les ouvrages de protection structurels à l'échelle du bassin

3 Les mesures de mitigation à l'échelle du bâti

Sommaire section 2

1. PREALABLE 4

1.1. DES AMENAGEMENTS STRUCTURELS ET NON STRUCTURELS 4
1.2. DES OUVRAGES DE PROTECTION STRUCTURELS NECESSAIRES MAIS PAS SUFFISANTS 5

2. LES OUVRAGES DE PROTECTION STRUCTURELS A L'ECHELLE DU BASSIN 7

2.1. LES OUVRAGES DE PROTECTION STRUCTURELS A INTEGRER DANS UNE GESTION INTEGREE GLOBALE 7
2.2. UN SCHEMA D'AMENAGEMENT A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT 8
2.3. DES EXEMPLES D'AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES STRUCTURELS DE PROTECTION 13
2.3.1. Les ouvrages hydrauliques visant à écrêter les crues 13
2.3.1.1. Les bassins écréteurs 14
2.3.1.2. Phénomènes d'amortissement et sur-inondation 18
2.3.2. Les ouvrages hydrauliques visant à augmenter le gabarit des cours d'eau 21
2.3.2.1. Le recalibrage du cours d'eau 21
2.3.2.2. L'endiguement local du cours d'eau 23
2.3.2.3. Le redimensionnement d'un ouvrage limitant 25
2.4. DES OUVRAGES DE PROTECTION VISANT A STABILISER LE LIT ET LES BERGES 26
2.4.1. Des ouvrages de stabilisation des berges du lit 26
2.4.2. Des ouvrages de stabilisation du profil en long du lit 28
2.4.2.1. Seuil de stabilisation 28
2.4.2.2. Piège à matériaux 30

3. LES MESURES DE MITIGATION 32

3.1. OBJECTIFS DE LA MITIGATION 32
3.2. LES TYPES DE MESURES DE MITIGATION 33
3.3. EXEMPLES DETAILLES DE MESURES DE MITIGATION 35
3.3.1. Exemples de mesures de mitigation en zone d'Aléa de mouvement de terrain 35
3.3.2. Exemple de mesures de mitigation en zone inondable 39
3.3.3. Exemples de mesures de mitigation en zone sismique 40
3.3.4. Exemples de mesures de mitigation vis-à-vis de l'Aléa Vents Violents 43

Tableau 1 Exemples de mesures de mitigation pour assurer la sécurité des personnes selon différents aléas 34
Tableau 2 Exemples de mesures de mitigation pour réduire les dommages aux biens selon différents aléas 34
Tableau 3 Exemples de mesures de mitigation pour faciliter le retour à la normale selon différents aléas 35

Figure 1 Cartographie synthétique des enjeux à l'échelle du bassin versant 11
Figure 2 Exemple d'un schéma d'aménagement d'un bassin versant 12
Figure 3 Description d'un ouvrage du schéma d'aménagement 13
Figure 4 Description des impacts liés aux différents ouvrages 13
Figure 5 Principe de l'écrêtement par un bassin écréteur 14
Figure 6 Retenue sèche vue d'amont 15
Figure 7 Barrage de Péligre sur l'Artibonite vue d'amont 16
Figure 8 Marnage disponible dans un barrage 17
Figure 9 Phénomène d'amortissement des crues dans le lit majeur 18
Figure 10 Hydrogrammes écrêtés dans le lit majeur 19
Figure 11 Exemple d'un recalibrage d'un cours d'eau par élargissement du lit mineur 22
Figure 12 Exemple d'un recalibrage par création d'un lit moyen 22

Figure 13 Exemple d'un recalibrage par création d'un chenal de crue 23
Figure 14 Exemple d'endiguement d'un cours d'eau 24
Figure 15 Exemple d'ouvrage dysfonctionnant 26
Figure 16 Coupe type d'une protection par gabions 27
Figure 17 Pose de gabions sur la commune de Jacmel 27
Figure 18 Schémas de principe d'un seuil en gabions 29
Figure 19 Exemple de seuil en enrochement (vue d'aval) 30
Figure 20 Schéma d''un piège à matériaux 30
Figure 21 Piège à matériaux Vue d'amont 31
Figure 22 Exemple de mur poids en béton, moyen de mitigation recommandé dans les zones vertes. 36
Figure 23 Exemple de mur poids en maçonnerie, moyen de mitigation recommandé dans les zones vertes. 37
Figure 24 Exemple de mur poids en gabions, moyen de mitigation recommandé dans les zones jaunes à orange 37
Figure 25 Exemple de mise en œuvre d'une zone refuge. 39
Figure 26 Exemple illustré de maçonnerie chaînée 41
Figure 27 Schéma maison chaînée 41
Figure 28 Exemples de maisons en maçonnerie chaînée 42
Figure 29 Effets du cyclone sur un bâtiment 43
Figure 30 Exemple de toiture à faible prise au vent 44
Figure 31 Effets destructeurs d'un vent violent 44
Figure 32 Exemple de dimensions de charpente incorrectes 45
Figure 33 Exemple de dimensions de charpente correctes 45
Figure 34 Exemple de charpente avant et après renforcement 45
Figure 35 Disposition de mise en place des tirefonds à tôles 46
Figure 36 Exemple de tôles fixées par des clous (photo de gauche) et de tôles fixées par des tirefonds (à droite). 46
Figure 37 Fermetures et ouvertures pendant l'événement cyclonique 47
Figure 38 Comportement d'une structure non contreventée soumise à une force extérieure horizontale (vent) 48
Figure 39 Comportement d'une structure soumise à une force horizontale (ici la diagonale s'oppose à l'allongement : elle travaille en traction) 48
Figure 40 Principaux types de contreventement 49

1. PREALABLE

L'objectif de cette section est de donner des exemples d'ouvrages de protection réalisables (structurelles ou non structurelles) pour réduire les risques naturels en précisant, en fonction du type d'aléas auxquels la zone est soumise et du type de protections envisagées, les précautions à prendre et les grands principes à respecter.

Ce guide n'a pas vocation de se substituer aux études spécifiques qui demeurent nécessaires pour définir précisément les aménagements à réaliser, mais de fournir une information sur le type d'aménagements ou travaux qui peuvent être engagés, d'en préciser les limites et d'avertir sur les éventuels méfaits d'aménagements mal étudiés.

1.1. Des aménagements structurels et non structurels

Deux grands types d'aménagements de protection peuvent être distingués :

- Des aménagements dits structurels destinés à réduire les aléas (inondation essentiellement) sur une zone plus ou moins grande à protéger par la mise en place d'ouvrages de génie civil dans le lit cours d'eau et sur les versants (barrages, recalibrages, digues,…). Ces techniques visent à modifier les conditions de formation et d'écoulement des crues pour réduire le risque inondation ou à stabiliser un talus pour éviter les glissements. Ces travaux sont souvent importants et coûteux et visent à assurer une protection collective (quartiers, lotissements, …). .

- Des aménagements locaux (souvent plus modestes que les aménagements structurels) destinés à réduire la vulnérabilité des bâtis existants vis-à-vis des autres aléas (chainage périphériques pour les maisons, mise en place de batardeaux devant les entrées, etc…). Ces aménagements n'ont pas pour vocation de réduire l'aléa mais de réduire la vulnérabilité du bâti vis-à-vis de l'aléa considéré. Ils visent à assurer une protection individuelle. On parle alors de mesures de mitigation et de mesures non structurelles.

➘Nota bene sur les autres mesures non structurelles :

Les mesures non structurelles regroupent toutes les mesures qui ne sont pas structurelles (à savoir qui ne sont pas des ouvrages en génie civil qui visent à modifier l'aléa, par exemple la formation et l'écoulement des crues).

Toutes les actions relatives à :

- la prévention (voir section1),
- la sauvegarde (voir section 3),
- l'information (voir section 4),
- la formation (voir section 5),

constituent donc des mesures dites non structurelles.

En termes **de travaux**,

- la mise en place de pratiques culturales adaptées (revégétalisation des parties les plus pentues, mise en place de haies transversales aux écoulements, de bandes enherbées à proximité des cours d'eau),
- la mise en place systématique de rétention ou infiltration des eaux pluviales à la parcelle sur les secteurs urbanisés,
- la reforestation, la restauration des zones humides,
- etc…,

constituent également des mesures dites non structurelles.

1.2. Des ouvrages de protection structurels nécessaires mais pas suffisants

Pour réduire de manière efficace les risques naturels en zone urbaine, il est absolument nécessaire de travailler conjointement sur les trois grands axes suivants:

- **La prévention** (pour éviter d'ajouter des enjeux dans les zones soumises à des aléas importants). La prévention, notamment par la mise en place d'un PRRN, est traitée dans **la section 1**.

- **La sauvegarde** (la planification et l'organisation des secours pendant la crise à travers les plans opérationnels de contingence par exemple) est traitée dans **la section 3**.

- **La protection par la mise en place de mesures de réduction de l'aléa** (ouvrages de protection contre les crues par exemple) et par la mise en place de **réduction de la vulnérabilité des bâtis existants (mesures de mitigation)**. Ces deux points font l'objet de la présente section.

Il faut préciser en effet que :

- Il est rarement possible (techniquement et financièrement) de réaliser des aménagements structurels qui permettent d'obtenir <u>un degré de protection important</u>. Les ouvrages de protection permettent ainsi de réduire la fréquence de submersion d'un secteur par exemple mais ne les suppriment pas entièrement. Un degré de protection centennal est rarement un degré de protection atteignable et optimum (les montants de travaux et

d'entretiens des ouvrages qui garantiront une protection centennale sont très souvent prohibitifs et largement supérieurs aux coûts des enjeux que l'on cherche à protéger). Dans tous les cas, les aménagements structurels ne peuvent pas offrir une protection absolue

- Quel que soit le degré de protection mis en place (même pour une digue garantissant par exemple une non-submersion pour une crue centennale), le risque qu'une crue supérieure à la crue de protection se produise n'est pas nul. La protection des populations ne pourra donc **jamais reposée uniquement sur la présence d'ouvrages structurels** de protection. Il existera toujours **un risque résiduel** lorsqu'on est protégé par un ouvrage structurel.

- Enfin, le risque de dysfonctionnement des ouvrages de protection pendant l'événement n'est pas nul. Une digue ou un vannage nécessite un entretien régulier dans le temps (pendant des dizaines d'années) sans que l'on puisse écarter à coup sûr la survenue d'un problème le jour de l'événement. Là encore, il est nécessaire d'intégrer la notion de **risque résiduel** lorsqu'on est protégé par un ouvrage structurant.

➘ Le degré de protection d'un ouvrage ? : Lorsqu'un ouvrage affiche un degré de protection de 50 ans par exemple (ou cinquantennal), cela signifie qu'il est efficace (et que les populations et les biens sont protégés) jusqu'à un événement cinquantennal (temps de retour de 50 ans). Ainsi, une digue contre les débordements d'une rivière assure une protection cinquantennale si une crue de temps de retour 50 ans peut transiter sans débordement par-dessus la digue. *Cela signifie également qu'il y aura, en moyenne 2 débordements par-dessus cette digue tous les 100 ans. Cette moyenne est bien évidement théorique (3 crues cinquantennales peuvent se produire 3 années de suite) mais cette moyenne permet de montrer concrètement les intérêts et les limites d'un ouvrage de protection.*

Si les ouvrages structurels peuvent apporter indéniablement des solutions permettant de réduire les risques, il est absolument nécessaire que ces solutions soient complétées par d'autres actions (prévention, sauvegarde, mitigation).

➘Nota bene : Pendant de nombreuses années, les politiques de protection contre les risques naturels se sont concentrés sur la réalisation de gros aménagements de protection **en négligeant** la prévention, la sauvegarde et la réduction de la vulnérabilité des bâtis existants (en France notamment). Ceci a eu pour conséquence positive de réduire effectivement, dans certains cas, les aléas (lorsque les aménagements étaient efficaces et entretenus) mais pour conséquence négative de **faire croire** aux populations et aux élus que, grâce à ces aménagements, **le risque avait disparu.**
Ce « faux » sentiment de sécurité s'est finalement avéré **très néfaste**. Il s'est traduit trop souvent par une augmentation des enjeux en zone inondable (construction de nouveaux lotissements derrière une digue par exemple) et une absence d'information et de planification des secours en cas de crise (les populations habitant derrière la digue ignoraient souvent l'existence même de risques liés aux débordements de la rivière qu'ils ne voyaient plus).
Les nouvelles politiques de gestion des risques ont remis à juste titre la priorité sur les mesures de prévention, de sauvegarde et de mitigation.
Les ouvrages de protection demeurent, dans beaucoup de cas, nécessaires mais sans être suffisants. Ils ne constituent plus les seules actions possibles. Ils doivent être intégrés au sein d'une gestion globale de réduction des risques.

2. LES OUVRAGES DE PROTECTION STRUCTURELS A L'ECHELLE DU BASSIN

2.1. Les ouvrages de protection structurels à intégrer dans une gestion intégrée globale

Avant de donner des exemples détaillés d'ouvrages structurels de protection, il faut préciser que pour l'aléa inondation (inondation de rivière ou torrent et à moindre titre le ruissellement urbain) toutes modifications réalisées sur le bassin versant (et du cours d'eau lui-même) vont entrainer des modifications (plus ou moins grandes) des conditions d'écoulement à l'amont immédiat et à l'aval des aménagements. L'hydrologie mais aussi l'hydraulique du cours d'eau vont être modifiées.

C'est une caractéristique de l'aléa inondation qui n'est pas présente (ou peu présente) pour les autres aléas.
Un aménagement visant à stabiliser un terrain à l'amont du bassin versant ne va pas influencer l'aléa mouvement de terrain à l'aval du bassin. Pour l'aléa mouvement de terrain, les impacts liés à un aménagement (que ces impacts soient positifs ou négatifs) restent très localisés autour de l'aménagement considéré.

Les modifications du bassin versant en sens large (liées à des aménagements structurels ou non) qui vont modifier l'hydrologie et l'hydraulique du cours d'eau sont de deux ordres :

<u>Modifications du bassin versant</u>

- La déforestation ou une urbanisation forte du bassin versant vont avoir pour conséquence de réduire l'infiltration des eaux de pluies et la rétention amont ce qui va générer une augmentation des débits de crue transitant vers l'aval.

- Les changements de pratiques culturales, l'augmentation du drainage des sols sur un secteur important vont augmenter les vitesses d'écoulement. Les crues seront schématiquement plus fortes et plus rapides.

- Le transport solide (dépôts de matériaux ou érosion dans le lit des cours d'eau) va être également très sensible aux changements du couvert végétal sur l'ensemble du bassin versant.

- un barrage qui écrête les débits à l'amont d'un bassin versant va avoir un impact positif (abaissement du débit de crue) sur tout le linéaire aval. Ce barrage aura cependant un impact négatif sur le transport solide (en bloquant toute ou partie des matériaux qui transitaient vers l'aval et en changeant le régime hydrologique des crues) ce qui va produire un déséquilibre sédimentaire du lit mineur à l'aval du barrage.

<u>Modification du cours d'eau</u>
De la même manière, tout aménagement réalisé sur le cours d'eau va avoir un impact (positif ou négatif) sur l'aval du cours d'eau.

- Le recalibrage d'un cours d'eau dans une traversée urbaine va permettre, par exemple, de réduire l'inondabilité au droit de l'aménagement mais va contribuer, en limitant les capacités d'expansion de la crue, à augmenter le débit (et les vitesses) transitant vers

l'aval. Ce recalibrage peut avoir, par exemple, un impact positif sur 500 m (le linéaire recalibré au droit des enjeux que l'on souhaite protéger) mais avoir un impact négatif sur plusieurs kilomètres à l'aval et pénaliser ainsi beaucoup d'autres enjeux.

- Le curage d'un cours d'eau dans une traversée urbaine va également permettre d'augmenter localement la capacité du lit et va donc présenter les mêmes conséquences pour l'aval (réduction des débordements et de l'écrêtement de crue). Les conséquences de l'enlèvement des matériaux réalisés devront être étudiées, vis-à-vis du risque de déstabilisation de l'équilibre sédimentaire du cours d'eau et du risque d'incision du lit.

- Un endiguement réalisé pour protéger des zones à enjeux va générer également, en supprimant des débordements et les zones d'amortissement qui écrêtent les débits de pointe de la crue, une augmentation du débit transitant vers l'aval.

- Un remblaiement local (en rive gauche par exemple) va augmenter les écoulements vers la rive droite et augmenter l'inondabilité de cette zone.

- Les agrandissements de sections d'ouvrages sous-dimensionnés (ponts, busages, seuils) et à l'origine de dysfonctionnements peuvent avoir les mêmes effets (augmentation locale de la capacité du lit mineur ➔ réduction des zones inondables ➔ réduction des zones d'écrêtement de crue ➔ augmentation des débits transitant vers l'aval).

En conclusion

Parce qu'un aménagement hydraulique génère toujours des impacts positifs ou négatifs sur l'amont immédiat mais surtout sur une très grande partie du linéaire aval, il convient de concevoir ces aménagements de protection au sein d'un schéma global d'aménagement du bassin versant.

Sans cela, sans une vision globale à l'échelle du territoire des zones qu'il faut protéger, des zones que l'on peut sur-inonder, sans une vision précise des impacts générés qu'il va falloir compenser, les aménagements faits par les uns peuvent avoir des effets négatifs pour les autres.

Les aménagements hydrauliques (qui visent à réduire l'aléa inondation ou ses effets) doivent donc être étudiés à l'échelle du bassin versant et les impacts hydrauliques (positifs ou négatifs) doivent être identifiés sur l'ensemble du linéaire du cours d'eau.

2.2. Un schéma d'aménagement à l'échelle du bassin versant

Pour toutes les raisons énoncées précédemment, il est nécessaire, avant d'entreprendre des travaux de protection structurants sur un cours d'eau d'établir un schéma d'aménagement à l'échelle du bassin versant du cours d'eau.

Les acteurs publics doivent donc réaliser des études générales à l'échelle des bassins versants pour la gestion des risques inondation en concertation avec les acteurs locaux et tout particulièrement avec les communes.

Le schéma d'aménagement à l'échelle du bassin versant va avoir deux objectifs principaux :

- Proposer des aménagements structurels et non structurels pour réduire les aléas sur les zones à enjeux, en adaptant les moyens les plus efficaces à mettre en place pour chaque situation.

- Vérifier, organiser la cohérence des aménagements hydrauliques sur l'ensemble du territoire.

➘ A noter *qu'a minima,* si la réalisation d'un schéma d'aménagement global n'est pas possible sur un bassin versant donné, il est absolument nécessaire que les impacts des aménagements hydrauliques proposés soient déterminés sur l'ensemble du bassin versant afin :

- De vérifier l'absence l'impact négatif sur les zones à enjeux (un aménagement pour protéger un secteur A ne peut pas avoir comme conséquence d'augmenter l'inondabilité des enjeux situés sur le secteur B).
- De proposer des mesures compensatoires visant à supprimer ces impacts négatifs le cas échéant (un recalibrage amont peut être associé à une restauration de zones d'expansion de crue de manière à obtenir un impact nul voire positif sur les débits transitant vers l'aval).

Cela nécessite que **la modélisation hydraulique soit réalisée sur une emprise plus large que l'emprise même des aménagements projetés.**
Ainsi, pour des travaux de recalibrage réalisé dans le lit mineur par exemple, il est nécessaire, *a minima,* de prolonger l'emprise du modèle hydraulique à l'aval et à l'amont du secteur recalibré jusqu'aux prochains secteurs présentant des enjeux et de vérifier l'absence d'impacts négatifs au droit de ces enjeux situés à l'amont et à l'aval immédiat du projet.

Le schéma d'aménagement doit être adapté à chaque territoire en fonction des aléas existants, des enjeux impactés et des configurations de sites particulières.

Le PRRN, décrit dans la section 1 du guide, apporte un grand nombre de données d'entrée (aléas, enjeux, risques) nécessaires à l'élaboration du schéma d'aménagement.

Les aménagements proposés doivent être choisis avec discernement pour être adaptés au territoire concerné : Il n'existe pas de « schéma d'aménagement standard » pouvant être reproduit sur tel ou tel territoire.

Le schéma d'aménagement réalisé à l'échelle du bassin versant doit cependant mettre en avant les principes incontournables suivants :

- le principe de réduction en amont des débits ruisselés par des techniques de type rétention, restauration de zones d'expansion, sur-inondation de ces secteurs, restauration de couvert boisé ou végétal, infiltration à la parcelle, techniques alternatives…

- la préservation de l'espace de mobilité des cours d'eau (rivières et ravines) à partir des analyses historiques et hydrogéomorphologiques (voir section 1). Les acteurs publics privilégient une gestion écologique de cet espace de mobilité en fonction de la sensibilité des biens exposés aux inondations et mettent l'accent sur un aménagement paysager, le cas échéant à vocation urbaine, en continuité avec les berges et la ripisylve associée au cours d'eau.

- Le rétablissement d'un transport sédimentaire équilibré (contrôle stricte des zones d'extraction, limitation des curages aux zones sensibles, …) afin d'éviter des phénomènes d'affouillement, incision ou de dépôts qui aggravent respectivement les glissements de terrain et les inondations.

- L'orientation de l'urbanisation en dehors des zones à risque afin d'éviter d'augmenter la vulnérabilité, à travers les règles de bon usage du sol présentées dans les PRRN (voir section 1).

- La programmation des opérations d'entretien des cours d'eau et des réseaux d'eau pluviale : embâcles, déchets, limitation du ruissellement.

- La mise en place de mesures non structurelles de réduction de la vulnérabilité du bâti (aménagements sur le bâti existant visant à réduire les effets de l'aléa : mise en place de batardeaux, création d'un plancher refuge, …).

- La mise en place d'aménagements structurels visant à réduire les débits de crue (sur-inondation amont par la mise en place de digues transversales dans le lit majeur, bassin écrêteur). A noter que ces solutions sont rarement efficaces si les pentes longitudinales du terrain (dans l'axe d'écoulements du cours d'eau) dépassent les 2% et sont donc à privilégier dans les secteurs très peu pentus.

- La mise en place d'aménagements structurels visant à augmenter la capacité du lit (de type recalibrages, endiguements de faible hauteur, chenaux de crue (ou coupures sèches, reprise de ponts, de busage ou de seuils sous dimensionnés). Ces solutions sont aussi à étudier, lorsque les autres possibilités d'aménagements ne sont pas réalisables (cours d'eau contraint par l'urbanisation, possibilités de restauration des zones d'expansion de crues insuffisantes,…). Les impacts hydrauliques inhérents à ce type d'aménagement doivent être déterminés et compensés le cas échéant.

- Une analyse comparative des différentes solutions proposées pour gérer les risques naturels doit être menée en intégrant notamment des critères environnementaux. Les solutions qui impactent le moins l'environnement sont à privilégier.

➘Très important :
Les aménagements structurels (recalibrage, endiguement, bassin écrêteur, etc…) ont pour objectif **de réduire l'aléa et donc les risques qui pèsent sur les enjeux existants** mais en aucun cas de favoriser l'implantation de nouveaux enjeux (habitats, commerces, …)
Les zones protégées par la nouvelle digue créée (par exemple) doivent donc rester interdites à la construction.

Les résultats attendus de ces schémas d'aménagement sont :

- La définition d'un ensemble d'aménagements cohérents sur l'ensemble du territoire

  - Les enjeux principaux du territoire doivent être protégés (les impacts en termes de réduction de l'inondabilité doivent être clairement annoncés). Les impacts hydrauliques négatifs doivent être compensés.

  - Les degrés de protection doivent être choisis en fonction des enjeux et des coûts des aménagements.

- Les aménagements choisis sont doivent être compatibles avec les contraintes environnementales. Les impacts environnementaux liés aux aménagements hydrauliques doivent être compensés.

- Les aménagements choisis sont étudiés à un stade « projet » (techniquement et financièrement).

- <u>La définition d'un programme d'actions permettant la réalisation des aménagements retenus</u>

  - Les maitres d'ouvrages des différents aménagements doivent être définis (état, communes, collectivités territoriales,…). Ils assurent la réalisation et l'entretien des ouvrages.

  - Un planning de réalisation et de financements des différents aménagements doit être établi. Les financements doivent intégrés les coûts d'investissement et les coûts d'entretien.

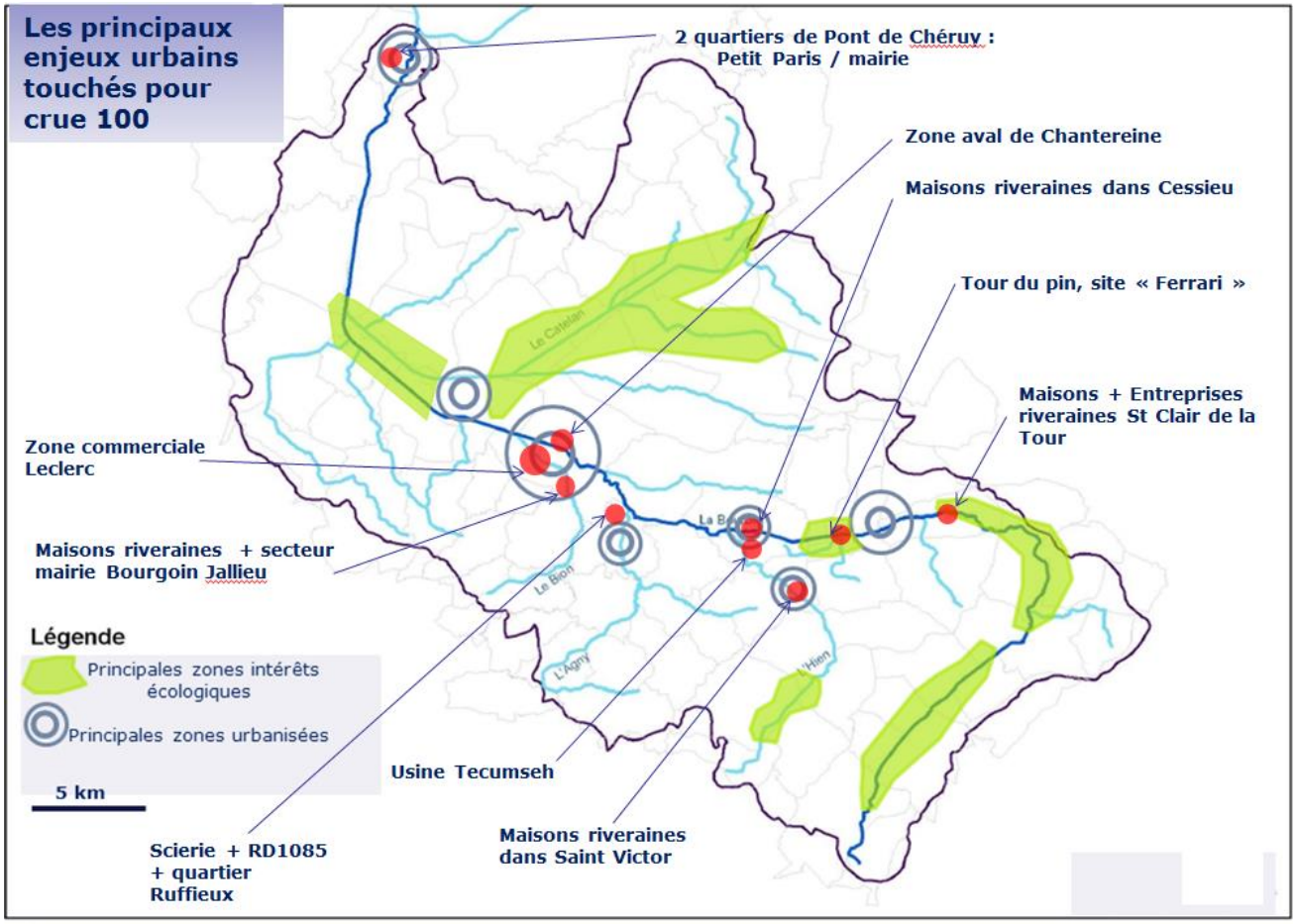


Figure 1 Cartographie synthétique des enjeux à l'échelle du bassin versant
(Source ARTELIA schéma d'aménagement global de la Bourbre)

Tous les enjeux du bassin versant, situés en zone inondables, ont été recensés et priorisés :

- Le bâti (lotissement, agglomération)
- Les industries/ entreprises
- Les zones agricoles
- Les zones naturelles
- Etc…

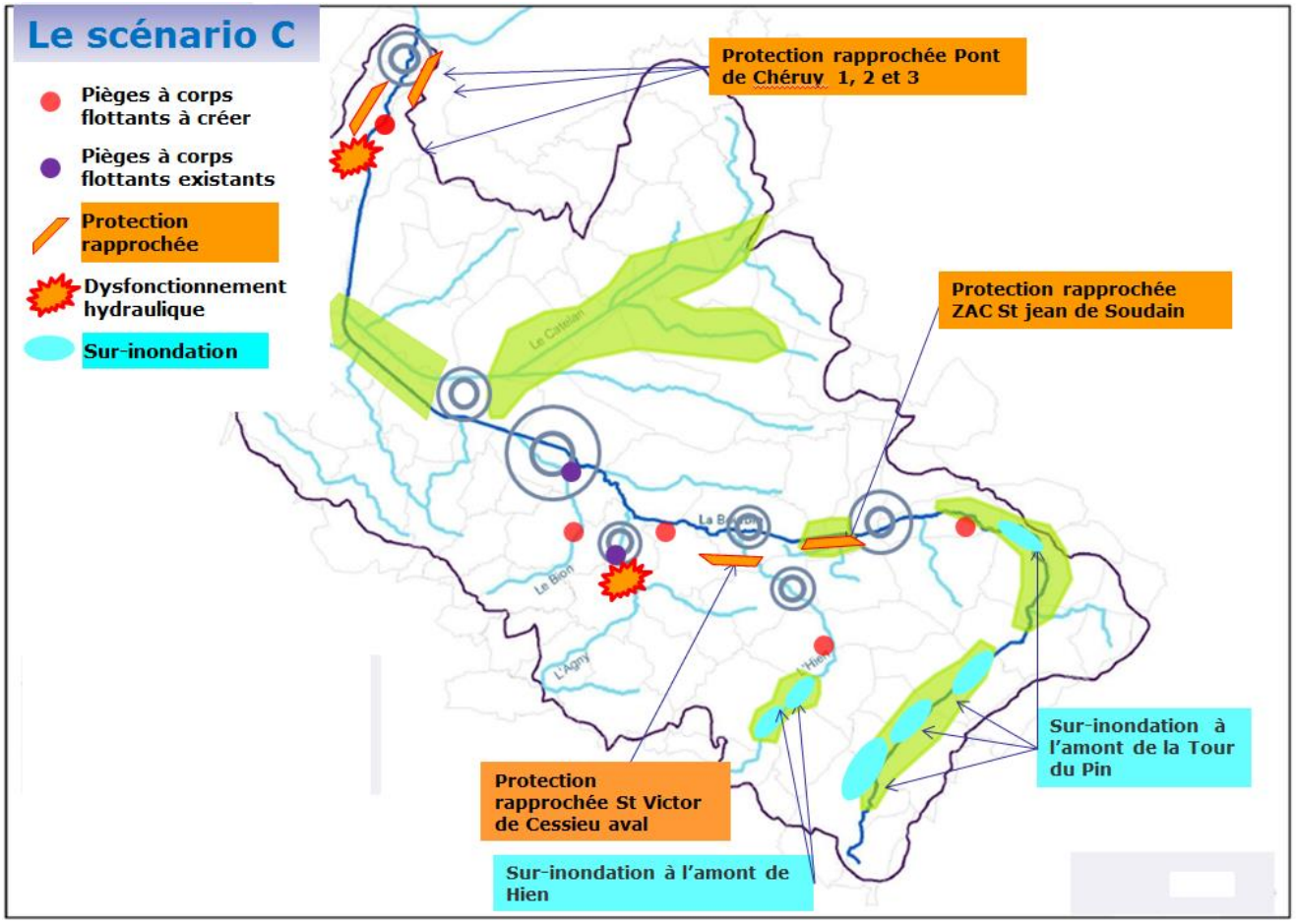


Figure 2 Exemple d'un schéma d'aménagement d'un bassin versant
(Source ARTELIA schéma d'aménagement global de la Bourbre).

Cette cartographie qui reprend de manière synthétique les principaux aménagements retenus :

- Des aménagements structurels sur les parties amont du bassin versant qui visent à écrêter les débits de crue.

- Des aménagements structurels sur les parties aval du bassin versant qui visent à protéger contre les débordements les enjeux importants (recalibrage, reprise de digues existantes, reprise de gabarits de ponts).

Dans l'exemple proposé, ce scénario a été retenu (parmi d'autres scénarios étudiés) car il présente le meilleur rapport financier entre le coût des aménagements (investissements et entretiens inclus) et le montant des dégâts évités.

Les deux figures ci-après présentent des exemples d'aménagements détaillés dans le cadre d'un schéma d'aménagement.

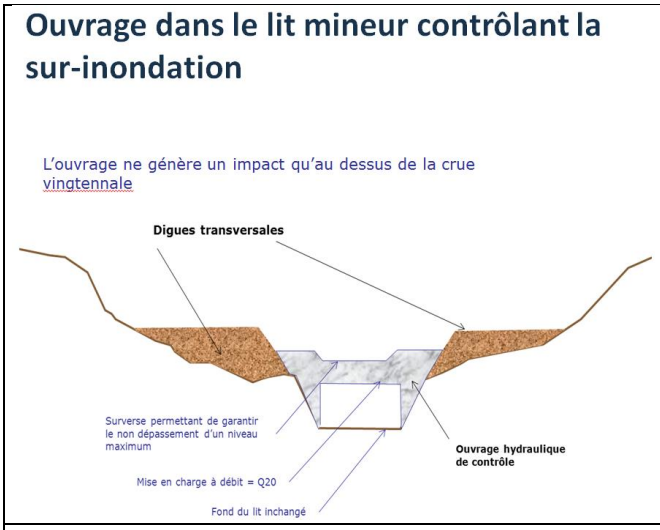


Figure 3 Description d'un ouvrage du schéma d'aménagement

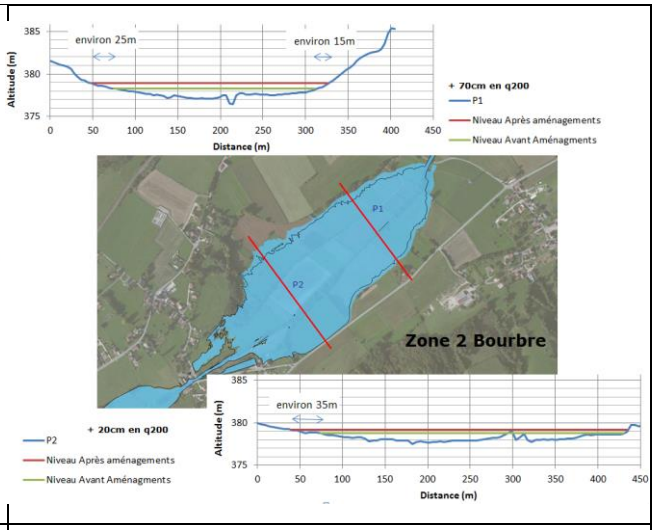


Figure 4 Description des impacts liés aux différents ouvrages

(Source ARTELIA schéma d'aménagement global de la Bourbre).

2.3. Des exemples d'aménagements hydrauliques structurels de protection

Pour toutes les raisons énoncées précédemment, tous les ouvrages hydrauliques structurels de protection doivent être intégrés dans un schéma d'aménagement couvrant l'ensemble du territoire.

2.3.1. LES OUVRAGES HYDRAULIQUES VISANT A ECRETER LES CRUES

Ces ouvrages, situés à l'amont du bassin versant ou à l'amont d'enjeux spécifiques qu'il convient de protéger, visent à écrêter les débits de crues et à réduire ainsi l'aléa inondation.

Il faut noter que ce type d'aménagement ne peut se mettre en place que dans le cadre « d'une solidarité de bassin », entre les secteurs amont et les secteurs aval du territoire. Dit autrement, ces ouvrages (et toutes les contraintes associées) sont faits sur un secteur amont (secteur sur lequel les enjeux menacés par les inondations sont généralement faibles) pour protéger un secteur aval qui est très fortement urbanisé et impacté par les crues.

- Leur impact en débit est positif (abaissement des débits de crue) sur la totalité du bassin aval (l'amortissement est cependant de plus en plus faible vers l'aval).
- Les impacts sur le transport solide et sur l'équilibre du profil en long des cours d'eau doivent être précisément étudiés par des experts en hydraulique, hydrologie et en transport solide.
    - Impact sur le transport solide par arrêt des matériaux dans la retenue.

- Impact sur le transport solide par modification du régime hydrologique (si les crues morphogènes sont écrêtées et deviennent plus rares à l'aval de l'aménagement).

- En fonction du type d'ouvrage mis en place, les risques entrainés par une rupture de ces ouvrages peut avoir des conséquences dévastatrices. L'entretien et la surveillance de ce type d'équipement sont donc fondamentaux et peuvent représenter une charge financière lourde pour la structure propriétaire de l'ouvrage.

- Les impacts environnementaux et sociétaux doivent être étudiés précisément.

2.3.1.1. LES BASSINS ECRETEURS

Les bassins écrêteurs peuvent être classés très schématiquement dans deux catégories :

- Les retenues sèches qui ne sont jamais en eau sauf pendant la crue.

- Les retenues permanentes (la variation du niveau d'eau dans la retenue génère l'écrêtement)

Le principe

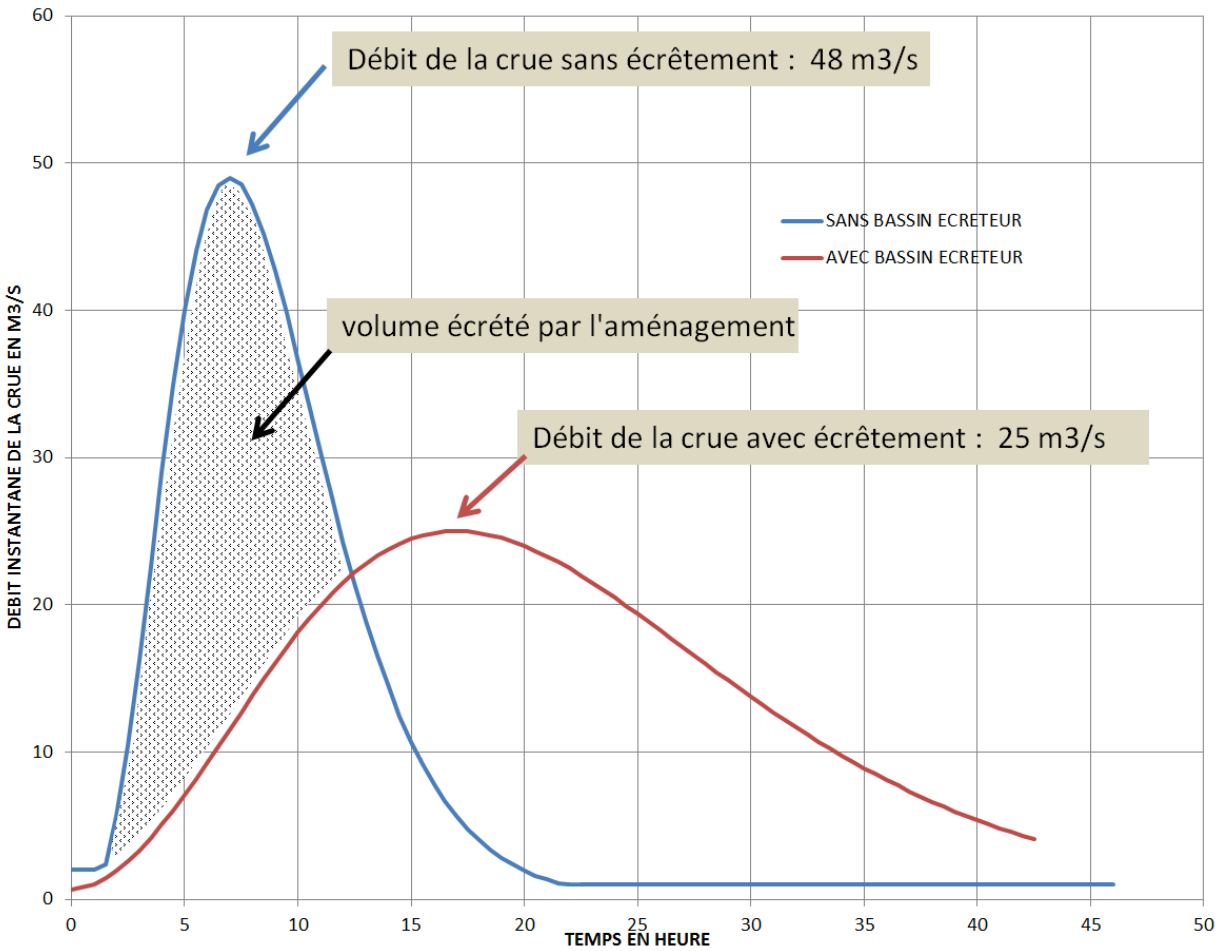


Figure 5 Principe de l'écrêtement par un bassin écrêteur
(Source ARTELIA)

2.3.1.1.1. LES RETENUES SECHES

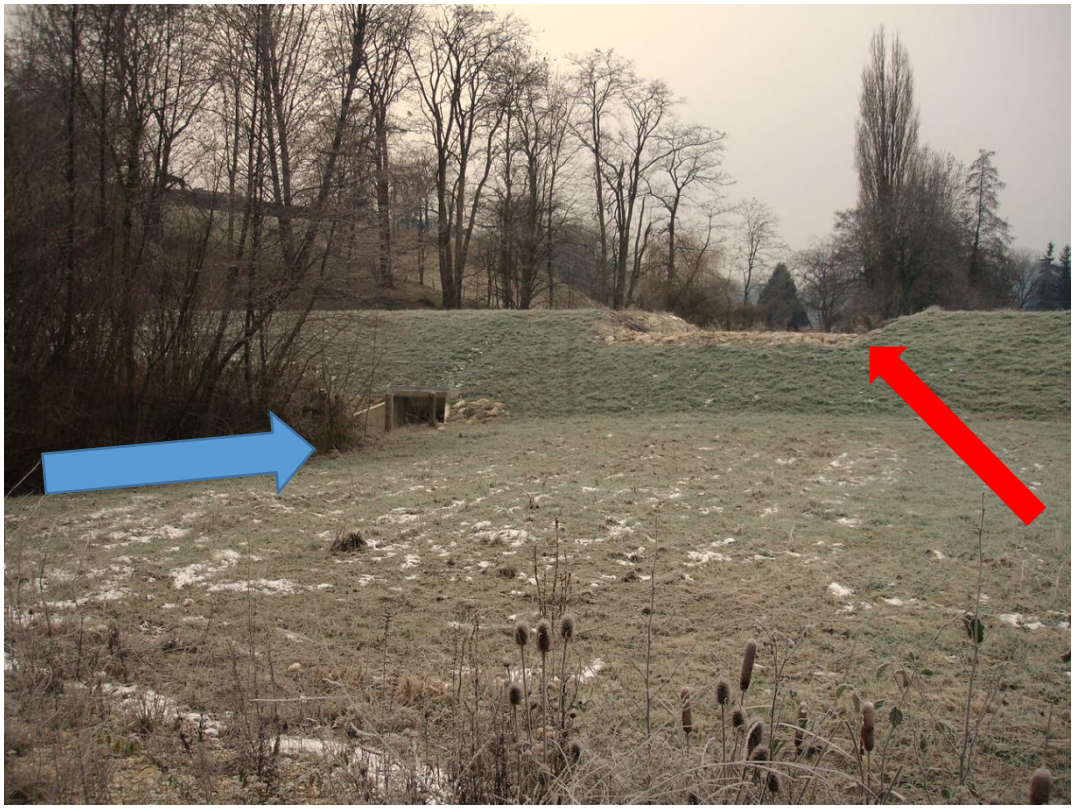


Figure 6 Retenue sèche vue d'amont
(Source ARTELIA Combe de Vé)

- Pour des débits ordinaires, le cours d'eau s'écoule dans son lit mineur sans générer de débordement ni de stockage (flèche bleue sur la photo ci-avant).

- En crue, l'ouvrage de contrôle (un dalot cadre dans l'exemple) va limiter le débit (appelé débit de fuite) ce qui va générer des débordements dans le lit majeur qui vont être contenus par la digue transversale qui fait barrage. Au maximum de la crue (ou en cas de crue supérieure à la crue de projet), les écoulements surversent par-dessus le déversoir de sécurité (protégé par une carapace en enrochements) qui garantit la tenue de la digue (la flèche rouge sur la photo ci-avant).

- La digue transversale joue le rôle d'un barrage pendant la crue. Sa réalisation puis son entretien doivent être confiés à des entreprises spécialisées. En cas de rupture de la digue, la propagation de l'onde de rupture peut avoir des conséquences bien plus graves que l'inondation naturelle du cours d'eau (effet de vague avec des hauteurs d'eau et des vitesses de propagation importantes).

- La capacité de l'ouvrage de fuite dans la digue (le dalot) est dimensionnée pour mobiliser les volumes de stockage au moment opportun, c'est-à-dire au maximum de la pointe de la crue qu'il convient d'écrêter. Il convient de vérifier, à l'aide d'une modélisation hydrologique et hydraulique de « l'efficacité réelle » de ce type de retenue c'est-à-dire de la capacité de l'aménagement à amortir le débit de pointe d'une crue. Il faut noter que le bassin peut être plein en crue sans avoir réduit pour autant le débit de pointe de la crue que l'on souhaite écrêter. C'est notamment le cas si l'ouvrage de fuite est sous-dimensionné.

- Il faut noter que ce type d'ouvrage ne peut pas être efficace pour toutes les intensités de crue. Ainsi, une retenue sèche peut permettre d'écrêter une crue moyenne mais sera totalement sans effet pour une crue forte car les volumes disponibles pour l'écrêtement

risquent d'être beaucoup trop faibles par rapport aux volumes d'eau mobilisés par la crue. Dans ces conditions, le maximum de débit de la crue forte va transiter alors que la retenue sera déjà pleine. Il n'y aura donc plus d'écrêtement. La retenue reste cependant très efficace pour des crues plus faibles mais plus fréquentes.

- Ce type d'aménagement peut être réalisé en cascade (série de digues transversales dans le lit majeur d'un cours d'eau). Il est cependant nécessaire d'équiper chacune des digues transversales de déversoir de sécurité pour éviter les érosions en cas de surverse qui entraineraient à leur tour des ruptures de digues en cascade.

- Ce dernier point renvoie à la notion de « faux sentiment de protection » évoqué en introduction de cette section. L'aménagement va écrêter souvent (et donc réduire l'aléa) mais ne va pas permettre de se prémunir contre toutes les crues. L'aménagement doit donc permettre de réduire l'aléa sur les enjeux existants. Mais l'aménagement ne doit en aucun cas permettre l'installation de nouveaux enjeux en zone inondable.

Pour les aménagements de type « retenue sèche », il faut retenir que :

- Les aménagements ont des coûts importants. Les impacts environnementaux et sociaux sont souvent « moyens » car ils ne se produisent que pendant les crues (l'aménagement a très peu d'impact pour un débit ordinaire du cours d'eau).

- Les effets d'amortissement sont souvent faibles. Le degré de protection recherché est souvent bas (crue décennale ou crue vingtennale). Ces aménagements viennent en complément d'autres ouvrages (recalibrage local, redimensionnement d'un ouvrage limitant).

- L'augmentation des inondations sur les secteurs aménagés peut nécessiter de mettre en place des protocoles d'indemnisation ou compensation pour les riverains et pour les agriculteurs qui utilisent ces terres.

2.3.1.1.2. LES RETENUES PERMANENTES

Figure 7 Barrage de Péligre sur l'Artibonite vue d'amont
(Source ARTELIA)

Il est rare que de tel aménagement (très coûteux et ayant beaucoup d'impacts sociaux et environnementaux) soit réalisé dans le seul but d'écrêter les cours d'un cours d'eau. Les retenues permanentes ont généralement des vocations multiples :

- soutien d'étiage,
- irrigation,
- alimentation en eau potable,
- production hydro électrique,
- écrêtement des crues.

L'écrêtement en crue est obtenu par le maintien d'une hauteur de marnage acceptable au-dessus du niveau normal de gestion de la retenue comme indiqué dans la figure ci-après.

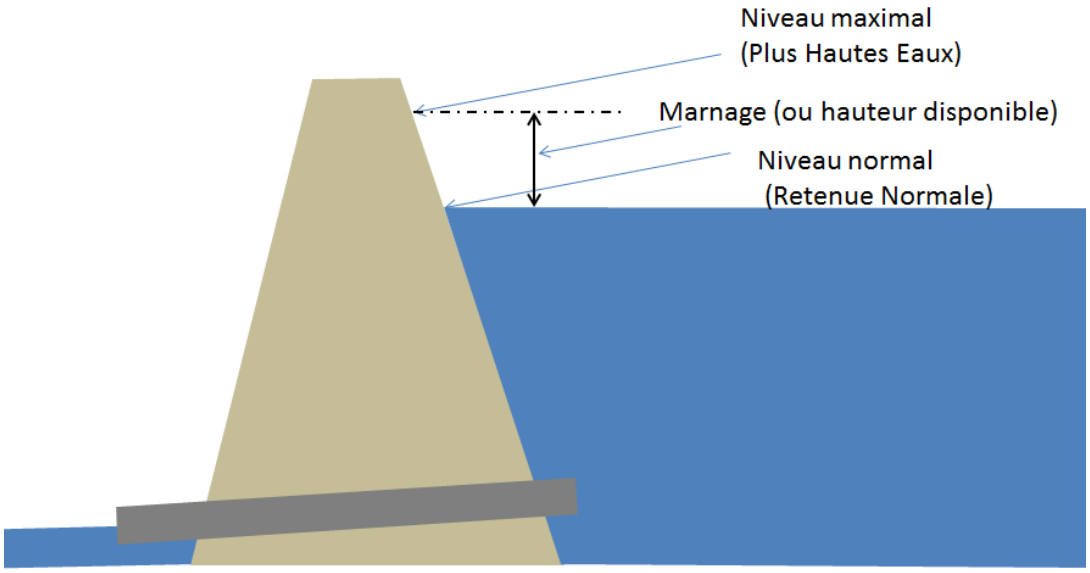


Figure 8 Marnage disponible dans un barrage
(Source ARTELIA)

Il faut noter que les vocations multiples d'une même retenue peuvent être antagonistes (le maintien du bassin plein, par exemple, pour garantir l'alimentation en eau potable avec, de ce fait, un marnage minimum, alors qu'il faudrait un marnage maximum pour écrêter les crues).
Le mode de gestion du barrage en fonction des différents objectifs qui lui sont assignés est donc nécessairement un compromis.

Cependant, de par les surfaces énormes des plans d'eau constitués à l'amont des barrages, une augmentation faible du marnage peut se traduire par des volumes de sur-stockage très importants. Une optimisation du mode de gestion d'un barrage existant peut s'avérer une solution efficace et peu coûteuse pour réduire l'aléa inondation.

<u>Pour les aménagements de type « barrage », il faut retenir que :</u>

- Les aménagements ont des coûts très forts tant financiers, environnementaux et sociaux (avec déplacements de population).

- Les effets d'amortissement peuvent être très importants.

- Le mode de gestion du barrage doit être optimisé pour répondre le plus efficacement possible aux différents objectifs qui lui sont assignés (irrigation, eau potable, énergie, écrêtement des crues). Si les enjeux inondés à l'aval le nécessitent, le mode de gestion du barrage doit évoluer pour dégager un marnage plus important.

2.3.1.2. PHENOMENES D'AMORTISSEMENT ET SUR-INONDATION

2.3.1.2.1. LE PHENOMENE PHYSIQUE

Lorsque la pente d'un cours d'eau est forte, il n'y a pas (ou très peu) d'amortissement de l'onde de crue.
Lorsque la pente du cours d'eau est faible, il peut y avoir un amortissement de l'onde de crue, le débit de pointe diminuant du fait du stockage d'un volume d'eau conséquent au fur et à mesure de la montée du niveau.

Les figures suivantes illustrent ce phénomène.

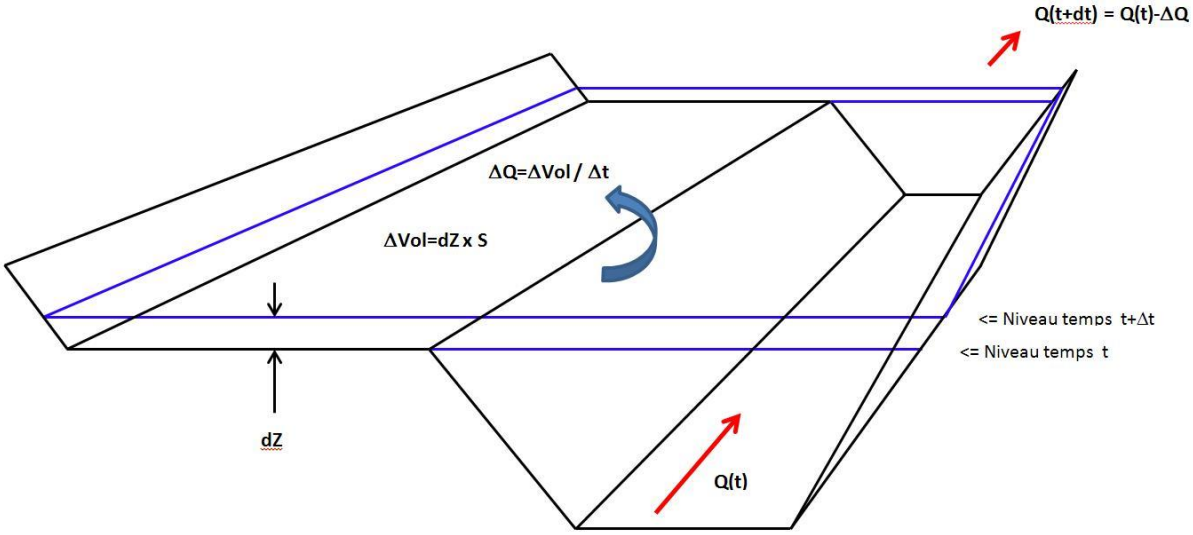


Figure 9 Phénomène d'amortissement des crues dans le lit majeur
(Source ARTELIA)

L'amortissement pendant la crue est lié à la part de débit qui est nécessaire, à chaque seconde, pour inonder de nouveaux espaces. Cette part de débit est soustraite au débit aval.

Considérons un tronçon de rivière le long de laquelle des débordements peuvent avoir lieu en lit majeur, sur une surface S.
Lorsque, pendant une durée Δt, le niveau monte d'une hauteur ΔZ au-dessus du niveau de plein bord, un volume ΔVol est stocké en lit majeur (ΔVol = ΔZ x S).
Ainsi, le débit sortant du tronçon est diminué de ΔQ = ΔVol/Δt.

Ce raisonnement appliqué à un hydrogramme de crue conduit au graphique suivant, représentant l'hydrogramme type entrant exprimé en pourcentage du débit de pointe et l'hydrogramme type sortant à l'aval du tronçon considéré.

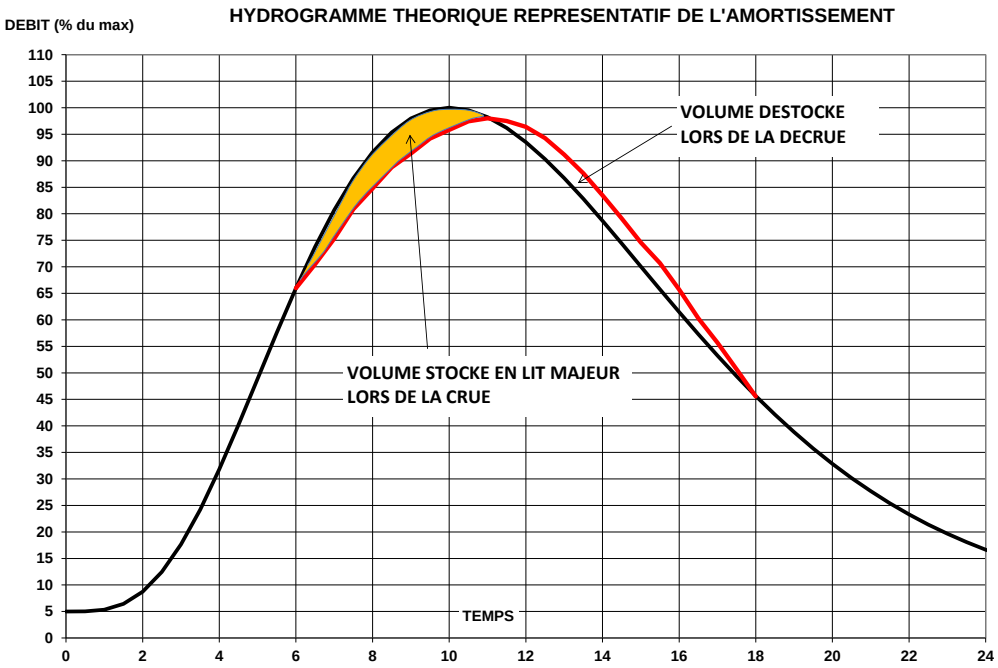


Figure 10 Hydrogrammes écrêtés dans le lit majeur
(Source ARTELIA)

A noter la différence de forme d'hydrogrammes entre un écrêtement obtenu dans une retenue (voir Figure 5) et un écrêtement obtenu par sur-inondation (Figure 10 Figure 10ci-avant).

Le volume stocké en lit majeur lors de la montée de crue induit une diminution de la pointe de la crue et, par voie de conséquence, une diminution des niveaux d'écoulement en aval de la zone de stockage.
A la décrue, ces volumes destockés (libérés) viennent augmenter le débit du cours d'eau (courbe rouge sur la figure précédente qui devient supérieure à la courbe noire, lors de la décrue).

2.3.1.2.2. LES PRINCIPES DE SUR-INONDATION

Le principe de sur-inondation consiste à augmenter, par rapport à l'état actuel, les inondations (les hauteurs d'eau et éventuellement les emprises de la zone inondable), sur des secteurs sans enjeu (ou à enjeux faibles).

L'augmentation des surfaces inondées et des hauteurs de submersion se traduit par une augmentation de l'écrêtement du débit de crue (voir Figure 10 Hydrogrammes écrêtés dans le lit majeur).

Cette sur-inondation peut être obtenue par la mise en place **d'ouvrages structurels** qui vont constituer des obstacles ponctuels et qui vont augmenter les niveaux d'eau.

Cette sur inondation peut également être obtenue par **les aménagements linéaires non structurels.**

A) Sur-inondation par des aménagements structurels

La sur-inondation peut être obtenue par l'ajout d'obstacle dans le lit mineur:

- **La mise en place d'ouvrages dans le lit mineur visant à créer un obstacle supplémentaire** (voir Figure 3 et Figure 4). Dans l'exemple fourni, il faut préciser que la

sur-inondation n'intervient qu'au-delà de la crue trentennale, ce qui signifie que pour toutes les crues inférieures, les ouvrages n'ont aucun impact (ni positif ni négatif). Les gains obtenus pour les crues de projet sont cependant souvent faibles (le débit maximum est amorti de quelques pourcents seulement).

- D'un seuil en rivière pour augmenter localement la hauteur d'eau.
  A noter que la mise en place de seuil se justifie également pour éviter ou supprimer le phénomène inverse à savoir une incision du lit qui a pour double effet négatif d'éroder les terrains et de réduire les volumes débordants (par enfoncement du lit) et donc l'amortissement naturel dans les zones d'expansion de crue.

- La suppression de digues existantes en bordure du lit mineur et qui limite, dans l'état actuel, les débordements et les phénomènes d'écrêtement. L'arasement des digues va évidemment augmenter la fréquence d'inondation des terrains protégés par ces digues, ce qui ne peut être réalisés que si les enjeux protégés sont faibles.

B) Sur-inondation par des aménagements non structurels

La sur-inondation peut être également être obtenue par des actions visant à renaturer le cours d'eau :

- La remise en place d'une sinuosité du cours d'eau si ce dernier a été artificialisé et rectifié. Schématiquement, le ralentissement des écoulements va conduire à un exhaussement des lignes d'eau et à un écrêtement supérieur.

- Une augmentation de la rugosité des lits majeurs (par une re-végétalisation raisonnée des lits). Là encore, l'augmentation de la rugosité (frottement de l'eau sur le terrain naturel) va conduire à un exhaussement des lignes d'eau et de l'écrêtement.

<u>Pour les aménagements de type « sur-inondation », il faut retenir que :</u>

- Les aménagements ont des coûts (financiers, environnementaux, sociaux) bien plus faibles qu'une retenue sèche ou qu'un barrage.

- Ces aménagements peuvent parfaitement s'intégrer dans une politique de renaturation du cours d'eau et de restauration du milieu naturel.

- Cependant, les effets d'amortissement sont souvent faibles (voire très faibles) et il faut donc multiplier les secteurs de sur-inondation pour avoir un effet sensible à l'aval.

- L'augmentation des inondations sur les secteurs amont nécessitent de mettre en place des protocoles d'indemnisation ou compensation pour les riverains.

2.3.2. LES OUVRAGES HYDRAULIQUES VISANT A AUGMENTER LE GABARIT DES COURS D'EAU

En complément d'ouvrages visant à écrêter les crues, il peut s'avérer nécessaire de mettre en place localement, au droit d'enjeux identifiées, des aménagements ayant pour objectif d'augmenter le gabarit du lit mineur et d'éviter ainsi les débordements.

Ces aménagements comprennent :

- Le recalibrage du cours d'eau.
- L'endiguement du cours d'eau.
- Le redimensionnement d'un ouvrage limitant.

Comme expliqué en introduction, ces aménagements génèrent des impacts sur les débits transitant vers l'aval. Il convient donc d'inscrire ces aménagements dans un schéma global et de vérifier en chaque point du bassin versant l'absence d'impact hydraulique négatif.

Les actions de recalibrage et d'endiguement ne doivent être entreprises qu'avec parcimonie et en dernier ressort, lors que les autres solutions ne peuvent pas être mises en place.

2.3.2.1. LE RECALIBRAGE DU COURS D'EAU

Le recalibrage (l'élargissement de la section d'écoulement) d'un cours d'eau peut s'avérer une solution intéressante dans les traversées urbaines si l'emprise disponible le permet.

L'augmentation de la section d'écoulement peut prendre plusieurs formes et se faire par :

- L'élargissement direct du lit mineur (voir figure 11 ci-après).
- La création ou l'élargissement du lit moyen. Cette solution, lorsque l'emprise disponible le permet, sera privilégiée car elle permet de laisser intact le lit mineur et de ne pas modifier son fonctionnement (voir figure 12 ci-après).
- La création d'un chenal de crue (ou chenal de dérivation), ce qui permet également de laisser intact le lit mineur tout en augmentant la capacité hydraulique en crue. Ce type de solution nécessite cependant une emprise disponible importante associée à une configuration topographique favorable (voir figure 13 ci-après).

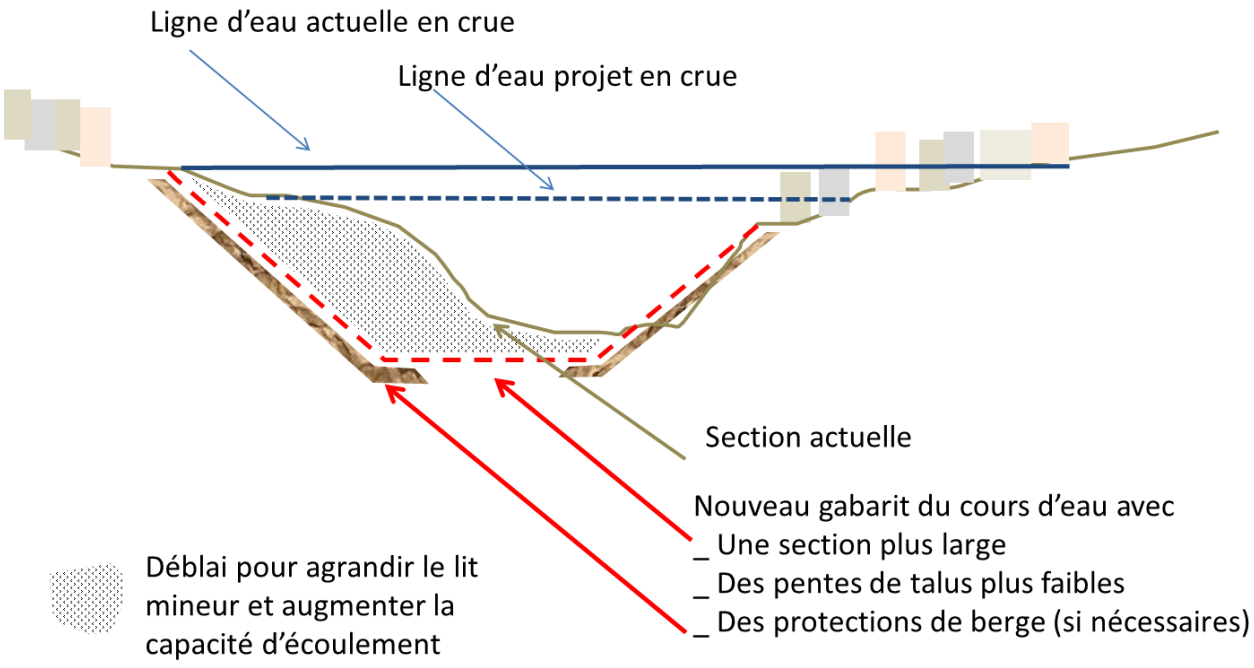


Figure 11 Exemple d'un recalibrage d'un cours d'eau par élargissement du lit mineur
(Source ARTELIA)

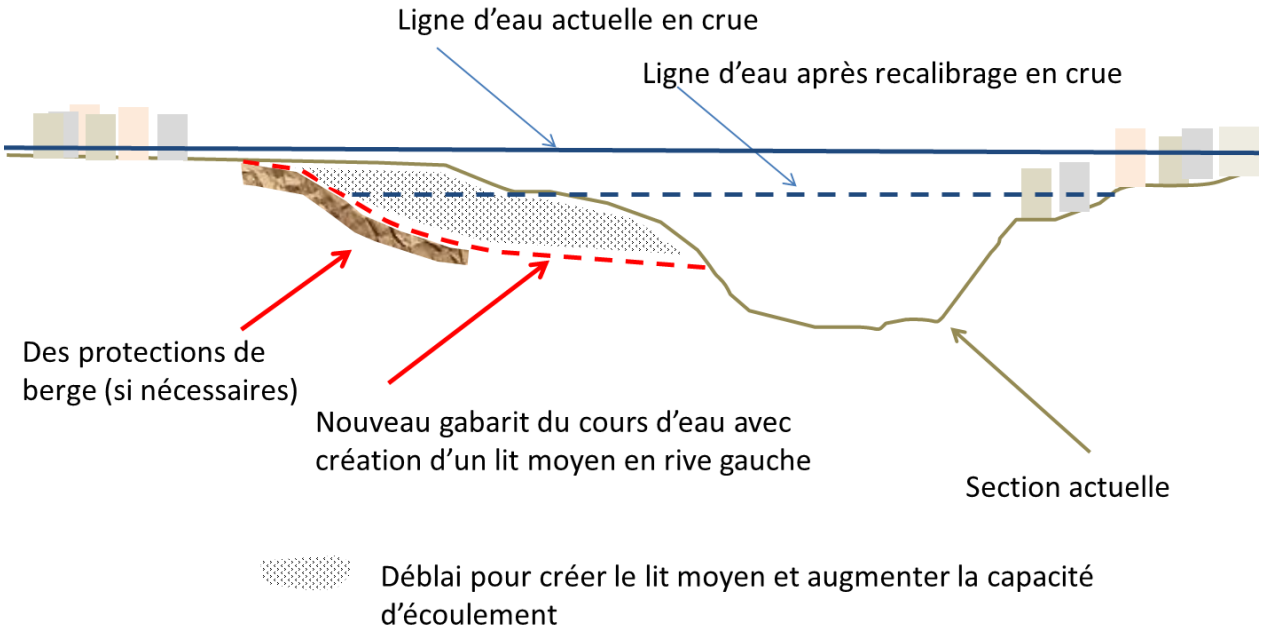


Figure 12 Exemple d'un recalibrage par création d'un lit moyen
(Source ARTELIA)

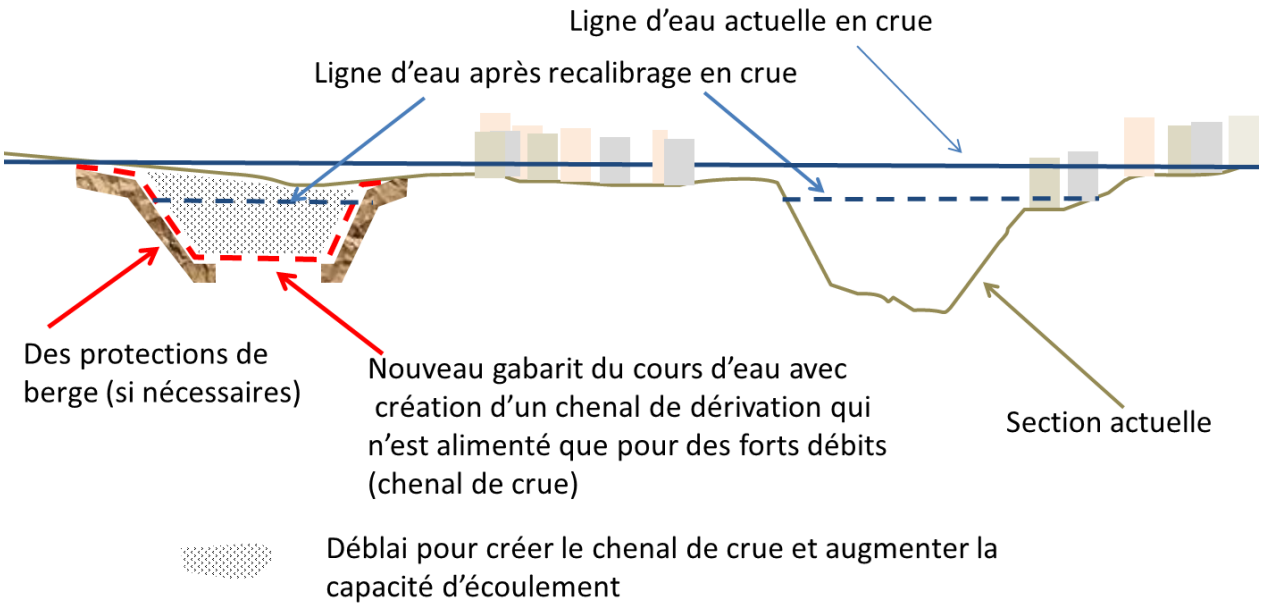


Figure 13 Exemple d'un recalibrage par création d'un chenal de crue
(Source ARTELIA)

Pour les aménagements de type « recalibrage », il faut retenir que :

- Ces recalibrages doivent être réalisés sur des linéaires importants pour qu'ils soient efficaces (souvent sur des linéaires de plusieurs centaines de mètres).
- Les impacts sur le milieu naturel sont importants pendant la phase travaux mais ces recalibrages peuvent être l'occasion de restaurer un cours d'eau très dégradé en adoucissant les pentes des berges, en restaurant un lit moyen et en installant une ripisylve disparue.
- Les conséquences sur le transport solide de cet élargissement du lit sur un linéaire donné (et donc de l'abaissement des vitesses d'écoulement sur ce tronçon) doivent être étudiés précisément (risques de dépôts importants dans la zone élargie).
- L'augmentation de la capacité du cours d'eau sur le linéaire aménagé a pour conséquence d'augmenter le débit qui transite vers l'aval, à travers des zones qui ne sont pas forcément aménagées. Dans ce cas, le recalibrage amont augmentera l'inondabilité du secteur situé à l'aval. Ces recalibrages sont donc à intégrer absolument dans un schéma d'aménagement d'ensemble pour pouvoir les associer à des aménagements compensatoires de type « sur inondation amont ».

2.3.2.2. L'ENDIGUEMENT LOCAL DU COURS D'EAU

Les endiguements sont des solutions de moins en moins utilisées car elles présentent de nombreux désavantages (risques de rupture, entretiens importants et coûteux, incitation à urbaniser dans les espaces protégés par la digue, impact sur la berge opposée).

Elles peuvent cependant, en étant totalement intégrées dans un schéma global d'aménagement, présenter localement des solutions intéressantes en complétant des actions de recalibrage ou en supprimant des points bas à l'origine des débordements.

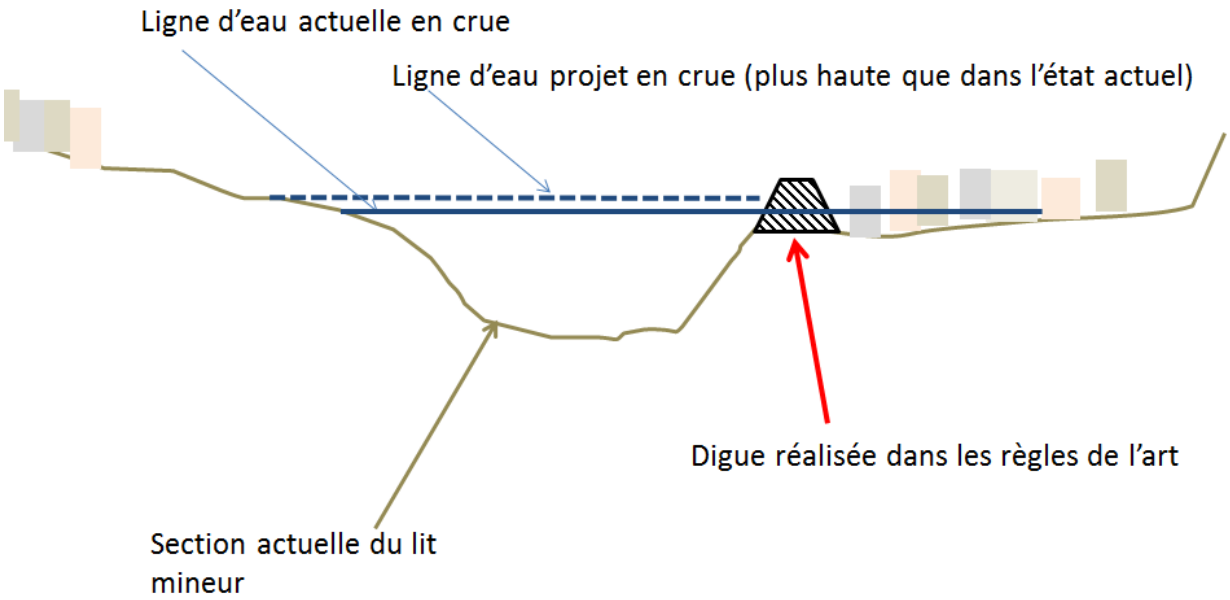


Figure 14 Exemple d'endiguement d'un cours d'eau
(Source ARTELIA)

Pour les aménagements de type « endiguement », il faut retenir que :

- Ces endiguements, contrairement au recalibrage, peuvent être réalisés très localement, sur des linéaires limités (autour d'un enjeu spécifique à protéger par exemple).
- Les impacts sur le milieu naturel et sur le paysage sont importants. Pour garantir la bonne tenue de digue, il est nécessaire qu'il n'y ait pas d'arbre sur le corps de la digue.
- De par les conséquences désastreuses que pourrait entrainer une rupture de digue, il est nécessaire de ne pas envisager de réaliser de digues trop hautes. Des digues de 2 m de haut semblent être un grand maximum.
- Les digues devront être conçues dans les règles de l'art par des bureaux d'étude spécialisés. Les hauteurs de digue devront être définies à partir des résultats des modèles hydrauliques. Ces hauteurs devront intégrées une marge de sécurité (appelée aussi revanche) qui sera définie en fonction des caractéristiques du cours d'eau (pentes, vitesses d'écoulement).
- Ces digues devront être éventuellement équipées de déversoir de sécurité (pour sécuriser la zone de surverse).
- Ces digues devront être réalisées dans les règles de l'art par des entreprises spécialisées (matériaux constitutifs de la digue, caractéristique du compactage des terres, végétalisation, etc…).

- Ces digues doivent être entretenus et inspectés régulièrement.

- Même pour des digues de faibles linéaires et/ou de faibles hauteurs, un maitre d'ouvrage doit être clairement identifié pour assurer sur le long terme l'entretien et la pérennité des digues. Il faut absolument éviter que des tronçons de digues soient réalisés et se retrouvent, 10 ans après leur construction, sans entretien et sans vérification par absence de maitre d'ouvrage.

2.3.2.3. LE REDIMENSIONNEMENT D'UN OUVRAGE LIMITANT

L'étude hydraulique peut mettre en évidence le sous-dimensionnement d'un ouvrage de type couverture, pont ou seuil par rapport à la capacité moyenne du tronçon amont et/ou du tronçon aval.
Le sous dimensionnement peut être facilement mis en évidence par l'analyse du profil en long des lignes d'eau en crue (voir section 1 chapitre « aléa inondation / modélisation hydraulique »).

Dans ce cas, l'ouvrage hydraulique sous-dimensionné peut être remplacé par un ouvrage correspondant au gabarit moyen du tronçon. La perte de charge singulière liée au sous dimensionnement de l'ouvrage incriminé sera fortement réduite, entrainant une baisse des niveaux d'eau en crue et des débordements.

Pour les aménagements de type « redimensionnement d'ouvrage », il faut retenir que :

- Ces redimensionnements, lorsqu'ils suppriment un véritable dysfonctionnement, sont hydrauliquement très efficaces et peuvent abaisser sensiblement l'aléa.

- Les impacts sur le milieu naturel et sur le paysage sont faibles (en dehors de la phase travaux) car ce sont des aménagements ponctuels.

- La détermination du gabarit des ouvrages et de leur calage altimétrique doit être réalisée par des experts hydrauliciens qui doivent tenir compte, au travers d'une étude hydraulique plus large (idéalement un schéma d'aménagement global) :

    - De la capacité hydraulique moyenne du tronçon (pour ne pas sur-dimensionner inutilement un ouvrage).
    - De l'évolution du fond du lit (pour anticiper un exhaussement du lit qui rendrait inefficace le nouvel ouvrage).
    - De la nécessité d'entretien, notamment liée au transport solide. Le gabarit d'une couverture peut être ainsi surdimensionné en hauteur pour permettre les passages du personnel d'entretien.

- Même si la suppression des dysfonctionnements hydraulique est absolument nécessaire, il faut garder à l'esprit que la suppression des zones inondables constitue également une réduction des zones d'écrêtement. Les impacts positifs sur un quartier (réduction forte des inondations après la reprise d'un ouvrage) s'accompagnent souvent d'impacts négatifs sur les quartiers situés à l'aval. Là encore, ces reprises d'ouvrage sont à intégrer absolument dans un schéma d'aménagement d'ensemble pour pouvoir, le cas échéant, proposer des aménagements ou actions compensatoires.

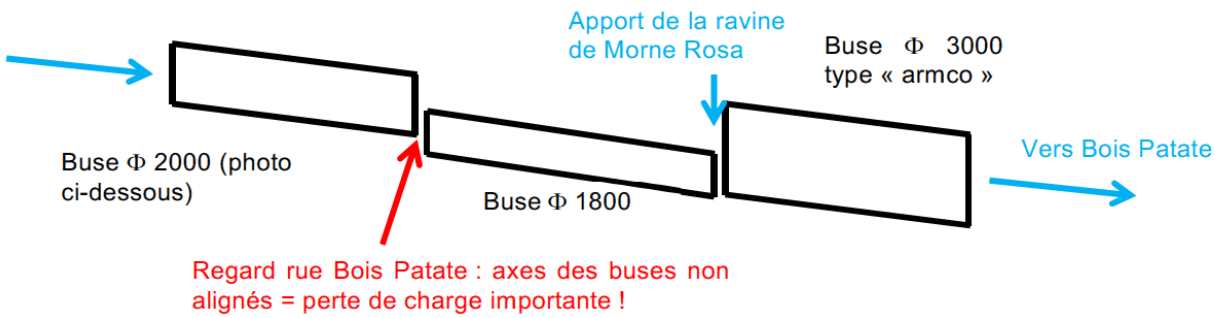


Figure 15 Exemple d'ouvrage dysfonctionnant

Couverture de la ravine de Canapé vert port au prince Haïti (Source IMSRN-SOGREAH)

2.4. Des ouvrages de protection visant à stabiliser le lit et les berges

La succession des crues peut provoquer localement des érosions de berge pouvant menacer des enjeux situés à proximité des cours d'eau (enjeux pas forcément concernés par l'aléa inondation par ailleurs).

La mise en place de protection latérale (pour protéger les berges du cours d'eau contre l'érosion) peut donc être réalisée pour protéger des enjeux forts mais ce type de solution doit être envisagé avec parcimonie et si possible dans le cadre d'un schéma d'aménagement global :

- Ces protections ont un impact direct sur le fonctionnement naturel du cours d'eau qui va être contraint sur tout le linéaire protégé
- L'érosion des berges ne va pas être supprimée et risque de se déplacer (à l'amont ou à l'aval ou sur la berge opposée). En protégeant un premier linéaire de berge, on risque d'être obligé de protéger des linéaires de plus en plus longs.
- La stabilité de ces protections est directement liée à la stabilité du profil en long du lit.

2.4.1. DES OUVRAGES DE STABILISATION DES BERGES DU LIT

Les techniques de protections de berge préconisées ici sont déjà largement utilisées en Haïti. Il s'agit de protection à base de caissons de gabions, technique assez facile à mettre en œuvre et peu onéreuse.
Ces ouvrages sont flexibles ce qui leur permet de s'adapter à des petits mouvements de terrain.

Elles se composent :

- D'une structure de gradins en gabion qui peut s'adapter à la pente de la berge à protéger.
- D'un sabot (ou réserve de pied) sur lequel s'appuie la structure en gabions et qui protège le fond du lit contre l'affouillement. Le matelas est relativement souple et vient tapisser le fond du lit en cas d'affouillement sans que la structure se casse.

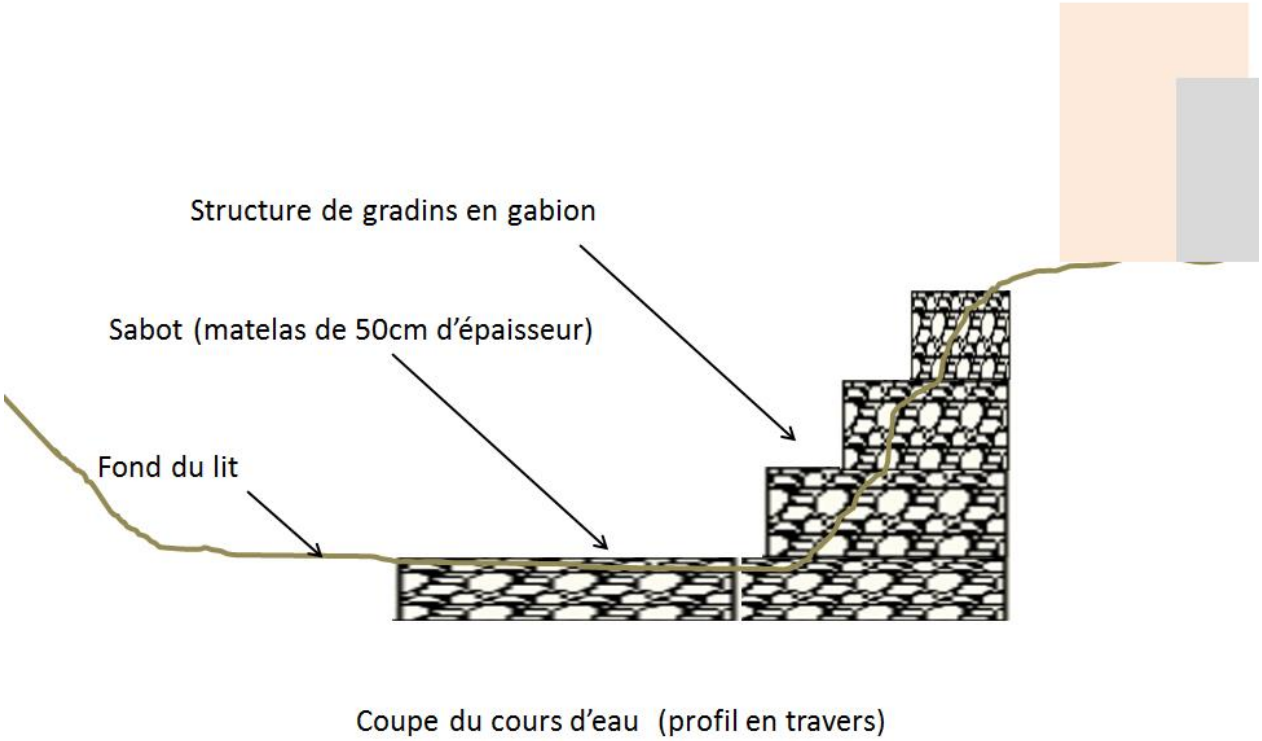


Figure 16 Coupe type d'une protection par gabions
(Source ARTELIA)

Figure 17 Pose de gabions sur la commune de Jacmel
(Source ARTELIA)

2.4.2. DES OUVRAGES DE STABILISATION DU PROFIL EN LONG DU LIT

Deux situations opposées peuvent nécessiter la réalisation d'ouvrage :

- Un cours d'eau qui s'incise avec un risque d'effondrement des berges et des ouvrages qui se retrouvent déchaussés et déstabilisés.
- Un cours d'eau qui s'engraisse avec des dépôts de matériaux qui limitent la capacité d'écoulement, au droit d'ouvrages notamment.

2.4.2.1. SEUIL DE STABILISATION

Pour assurer la pérennité des ouvrages de protection des berges, mais aussi tout simplement pour éviter une incision forte du lit (lié à un déséquilibre du transport solide), il peut être nécessaire de mettre en place des ouvrages de stabilisation longitudinale du profil du cours d'eau.

Des seuils hydrauliques peuvent être placés de manière ciblée en certains points des ravines et des cours d'eau.

➘ Important

Si la crête du seuil est calée à la cote de fond du profil du cours d'eau (l'effet recherché est d'arrêter l'incision du lit), il n'y a aura pas d'impact du seuil sur les niveaux d'eau en crue.

En revanche, si la crête du seuil est calée au-dessus de la cote de fond du profil du cours d'eau (l'effet recherché est de faire remonter le fond du lit), le lit va s'engraisser à terme et la capacité du lit mineur avant débordement va être réduite. **L'aléa inondation sur le secteur va être augmenté.**

La technique proposée ici se base toujours sur le principe du gabion et plus particulièrement du seuil à paroi aval verticale.

Le choix de cette géométrie plutôt que celle de seuils à paroi aval inclinée ou en gradins se justifie lorsque :

- Il y a un manque d'emprise au sol disponible (dans les ravines urbaines).
- Il y a un charriage de matériaux important qui va générer beaucoup d'abrasion (la surface de gabions à protéger serait plus importante avec des seuils à paroi aval inclinée ou en gradins).

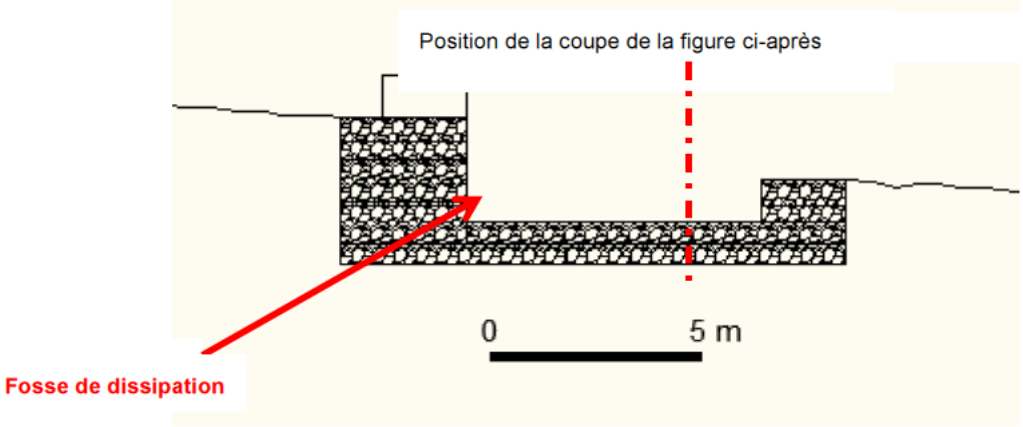
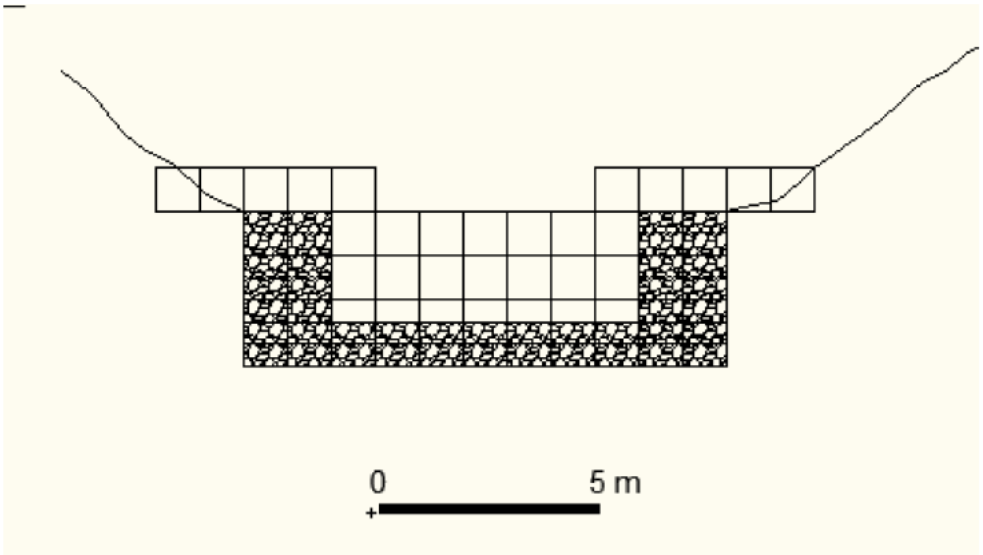


Schéma de principe d'un seuil en gabions : profil en long



Vue aval du seuil, coupe au niveau de la fosse de dissipation

Figure 18 Schémas de principe d'un seuil en gabions
(Source IMSRN-SOGREAH PPRN16/6)

Toutes les autre techniques classiques de construction de seuil en rivière restent évidement valables (seuil en enrochements libres, seuils en enrochements liaisonnés béton,...).
Il conviendra d'adapter la solution technique en fonction des configurations des sites et des cours d'eau (emprises disponibles, pentes, débits) et des différentes contraintes.

Figure 19 Exemple de seuil en enrochement (vue d'aval)
(Source ARTELIA)

2.4.2.2. PIEGE A MATERIAUX

Sur un cours d'eau qui transporte beaucoup de matériaux, des dépôts importants au droit des ouvrages hydrauliques (entrée d'une buse, d'un dalot) peuvent réduire énormément les sections d'écoulement et provoquer ainsi beaucoup de débordements.

Pour remédier à ce problème, une plage de dépôt peut être créée à l'amont de l'ouvrage afin de provoquer artificiellement le dépôt de matériaux charriés avant que ceux-ci n'atteignent l'ouvrage.

Le principe de base consiste à diminuer les vitesses d'écoulements pour que les matériaux puissent s'amonceler sur la largeur de la section d'écoulement. Pour ce faire, un ouvrage appelé « barrage filtrant » peut être placé à l'aval de la plage de dépôt pour permettre le ralentissement des écoulements. La section à l'amont de cet ouvrage devra être élargie pour permettre aux volumes de matériaux d'être stockés.

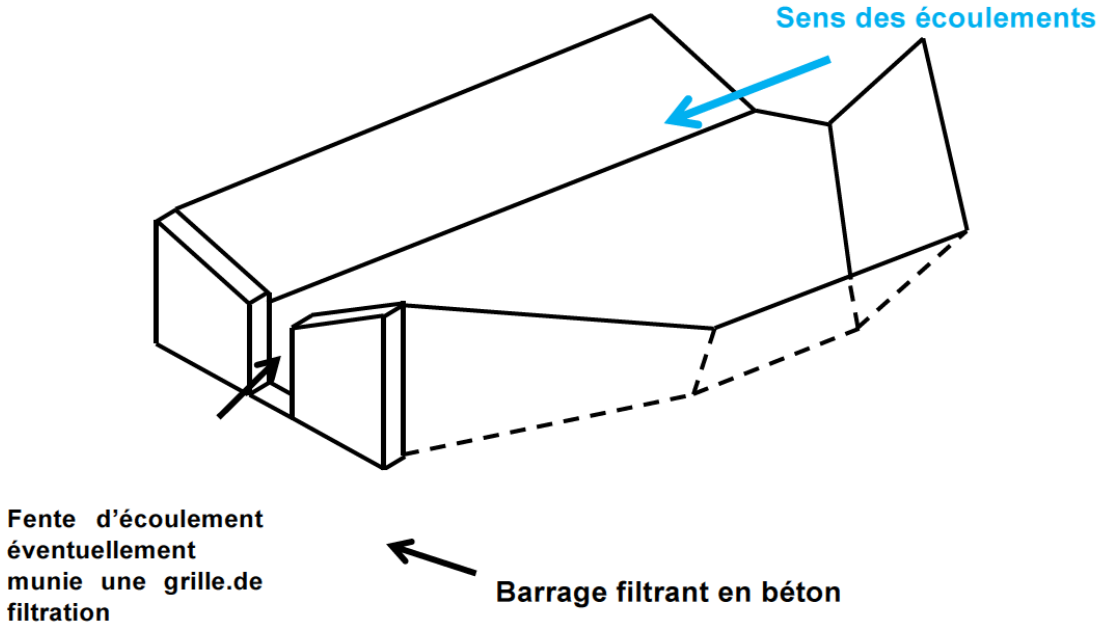


Figure 20 Schéma d"un piège à matériaux
(Source IMSRN-ARTELIA PPRN 16/6)

Le bon fonctionnement de cet ouvrage nécessite un curage régulier, après chaque dépôt par une crue. Pour faciliter cet entretien, des jalons fixes pourront être ancrés au niveau de la plage de dépôt pour indiquer l'épaisseur de matériaux à extraire afin d'éviter le surcreusement.

Idéalement, l'aménagement devra se situer à proximité d'une voirie afin de faciliter les extractions par des engins de chantier ..

Figure 21 Piège à matériaux Vue d'amont
(Source Institut Risques Majeur Irma-Grenoble.)

3. LES MESURES DE MITIGATION

Comme expliqué précédemment en introduction de cette section, les ouvrages structurels de protection (comme les digues) n'offrent pas une protection absolue et donnent un faux sentiment de sécurité. Face à ce constat, il faut, de façon complémentaire, agir sur la réduction de la vulnérabilité.

3.1. Objectifs de la mitigation

L'objectif de la **mitigation** est d'atténuer les dommages, en réduisant ou n'augmentant pas la vulnérabilité des enjeux. Cette notion concerne notamment les enjeux suivants : les personnes, les constructions (habitations, biens économiques, bâtiments nécessaires à la gestion de crise, les établissements recevant un public vulnérable…), les équipements et les réseaux de communication, d'électricité, d'eau, de communication, etc.

Les mesures de mitigation sont des **mesures de réduction de la vulnérabilité**. Ce terme est défini dans la partie « Eléments de vocabulaire » dans l'Introduction du guide.

- La **vulnérabilité des biens (mobiliers et immobiliers)** dépend de leur nature (maison, entrepôt, édifice culturel…), de leur localisation et de leur résistance intrinsèque à un aléa donné. Plus un bien est vulnérable, plus les dommages sont importants.

- La **vulnérabilité des personnes** dépend de leur connaissance préalable du phénomène (alerte et information préventive), des caractéristiques du phénomène (intensité, hauteur, vitesse…), des conditions d'exposition (intérieur, extérieur d'un bâtiment, d'un véhicule, obscurité, froid, sommeil, existence d'un lieu refuge …), du comportement adopté pendant le phénomène (formation aux gestes de sécurité, culture du risque).

➘ « Nous sommes vulnérables lorsque nous croyons à tort être en lieu sûr ».

Extrait du guide « La mitigation en zone inondable, Réduire la vulnérabilité des biens existants » MEDDE, France

NB : La mitigation suppose notamment ***la formation des divers intervenants*** *(architectes, ingénieurs en génie civil, entrepreneurs, etc.) en matière de conception et de prise en compte des phénomènes climatiques et géologiques, ainsi que la définition de règles de construction. L'application de ces règles doit par ailleurs être garantie par un contrôle des ouvrages. Cette action sera d'autant plus efficace si tous les acteurs concernés, c'est-à-dire également les intermédiaires tels que les assureurs et les maîtres d'œuvre, y sont sensibilisés.*

La mitigation relève également d'une ***implication des particuliers****, qui doivent agir personnellement afin de réduire la vulnérabilité de leurs propres biens.*

Si l'État et les communes ont des responsabilités dans ce domaine, chacun doit prendre conscience que, à son niveau en tant que propriétaire, locataire ou plus simplement citoyen, il peut contribuer à se protéger efficacement et diminuer sa propre vulnérabilité.

Les mesures de mitigation ont vocation d'agir sur l'existant (adaptation du bâti existant) tout comme sur les projets de constructions.
Sur le bâti existant, le constat est que bien souvent les constructions n'intègrent pas le risque (dans la structure, les aménagements, les matériaux, les équipements ...) pour des raisons économiques et par méconnaissance du phénomène et de ses caractéristiques (comme la hauteur pour une inondation) et par l'oubli de règles de construction traditionnelles.

Les dommages potentiels peuvent être donc directs (dommage aux biens, équipements...) ou indirects (perte de clients pour une entreprise par exemple...).
Les phénomènes désastreux récurrents et les dommages considérables qu'ils provoquent ont un coût et sont un frein au développement du pays.
Les mesures de mitigation doivent permettre de réduire ces dommages.

Les mesures de mitigation suivent 3 objectifs principaux :

- Assurer la sécurité des personnes : mettre en œuvre des mesures qui facilitent la mise à l'abri des personnes dans l'attente de la fin de l'événement ou de l'arrivée des secours (lorsque dans certains cas, l'évacuation préventive n'est pas possible) ;

- Réduire les dommages aux biens et aux activités : pour minimiser les travaux de remise en état de la structure ou des équipements ;

- Faciliter la reprise, le retour à la normale : pour limiter le délai de réinstallation des personnes, de reprise d'activités, dans les conditions de sécurité et de salubrité.

3.2. Les types de mesures de mitigation

Les mesures sont relatives aux techniques de construction (pour les nouveaux projets) au choix des équipements et de leur emplacement, au choix des matériaux...

En effet, lorsque la sécurité des personnes est mise en jeu, la réduction de la vulnérabilité peut être idéalement obtenue par la délocalisation des habitations, des activités les plus exposées.

Cela nécessite la mobilisation d'outils fonciers dans un cadre réglementaire spécifique.

Or, ce principe de délocalisation ne peut pas répondre à toutes les situations d'exposition au risque.
De fait, les mesures de réduction de la vulnérabilité s'attachent à mobiliser des outils de l'habitat :

- Définir et promouvoir des outils de construction adaptés aux aléas subis, aux abords des bâtiments et au niveau des équipements intérieurs et des équipements.

- Identifier et freiner (arrêter) l'utilisation de matériaux susceptibles d'engendrer des dommages aux tiers (au voisinage, à l'environnement...).

Les tableaux ci-après exposent des exemples de mesures de réduction de la vulnérabilité par type d'aléa et par objectif. Ces exemples sont extraits des Actes du Groupe de Travail relatif à la sécurisation du contenu réglementaire des PPRN, MEDDE, Direction Générale de la Prévention des Risques, France.

Objectif : Assurer la sécurité des personnes	
Aléas	Mesures
Inondation (selon paramètres : hauteurs, vitesses, durée de submersion)	Niveau refuge, ouvrant de toiture, rehaussement des réseaux…Empêcher la flottaison d'objets…
Glissement de terrain	Drainage des réseaux pour éviter les infiltrations d'eau, vérification de l'étanchéité des canalisations, éloignement, évacuation des eaux de ruissellement, maintien, entretien des murs de soutènement…
Chute de blocs/éboulement	Entretien de la végétation, renforcement des façades et toitures exposées…
Séisme	Adaptation des équipements : fixation des armoires, des étagères des citernes et de tout élément dont la chute pourrait causer des graves blessures, entraver l'évacuation des bâtiments, ou aggraver les conséquences d'un séisme (pollution…)
Tsunami	Niveau refuge à organiser sur bâtiments publics fiables situés dans la zone littorale, ouvrant de toiture
Tempête tropicale et Ouragan	Equiper chaque ouverture de volet paracyclonique. Limiter l'effet de prise au vent de la toiture, Renforcer la fixation de la toiture sur les murs porteurs, En cas de terrasse couverte, désolidariser le toit de la terrasse du toit de la maison. Mettre en place des dispositifs de contreventements horizontaux et verticaux parfaitement liaisonnés. Ancrage des futurs bâtis sur des dalles épaisses. Elagage des arbres situés trop près des maisons. Fixation des objets pouvant être emportés par l'ouragan.

Tableau 1 Exemples de mesures de mitigation pour assurer la sécurité des personnes selon différents aléas
(Source MEDDE France complétée par ARTELIA)

Objectif : Réduire les dommages aux biens (bâtiments, réseaux, équipements…)	
Aléas	Mesures
Inondation (selon paramètres : hauteurs, vitesses, durée de submersion)	Limiter la pénétration des eaux (installer des batardeaux), Rehausser les réseaux, empêcher la flottaison d'objets, rehausser les équipements sensibles, …
Glissement de terrain	Drainage des réseaux pour éviter les infiltrations d'eau et raccordement aux réseaux d'assainissement (si existants), vérification de l'étanchéité des canalisations, éloignement, évacuation des eaux de ruissellement, maintien, entretien des murs de soutènement…
Chute de blocs/éboulement	Entretien de la végétation, renforcement des façades et toitures exposées…
Séisme	Adaptation des équipements : fixation des armoires, des étagères des citernes et de tout élément dont la chute pourrait causer des graves blessures, entraver l'évacuation des bâtiments, ou aggraver les conséquences d'un séisme (pollution…)
Tsunami	Mêmes mesures que pour l'inondation + mesures d'urbanisme visant à interdire l'implantation des bâtiments sensibles dans les zones soumises à tsunami
Tempête tropicale et Ouragan	Equiper chaque ouverture de volet paracyclonique. Limiter l'effet de prise au vent de la toiture, Renforcer la fixation de la toiture sur les murs porteurs, En cas de terrasse couverte, désolidariser le toit de la terrasse du toit de la maison. Mettre en place des dispositifs de contreventements horizontaux et verticaux parfaitement liaisonnés. Ancrage des futurs bâtis sur des dalles épaisses. Elagage des arbres situés trop près des maisons. Fixation des objets pouvant être emportés par l'ouragan.

Tableau 2 Exemples de mesures de mitigation pour réduire les dommages aux biens selon différents aléas
(Source MEDDE France complétée par ARTELIA)

Objectif : Faciliter le retour à la normale	
Aléas	Mesures
Inondation (selon paramètres : hauteurs, vitesses, durée de submersion)	Limiter la pénétration des eaux (installer des batardeaux), Rehausser les réseaux, empêcher la flottaison d'objets (notamment polluants), rehausser les équipements sensibles, rehausser les réseaux (réseau électrique descendant et séparatif), choisir des matériaux de revêtement du sol et des murs isolants, résistants à l'eau, installer un drain périphérique …
Glissement de terrain	Drainage des réseaux pour éviter les infiltrations d'eau et raccordement aux réseaux d'assainissement (si existants), vérification de l'étanchéité des canalisations, éloignement, évacuation des eaux de ruissellement, maintien, entretien des murs de soutènement…
Chute de blocs/éboulement	Entretien de la végétation, renforcement des façades et toitures exposées…
Séisme	Adaptation des équipements : fixation des armoires, des étagères des citernes et de tout élément dont la chute pourrait causer des graves blessures, entraver l'évacuation des bâtiments, ou aggraver les conséquences d'un séisme (pollution…)
Tsunami	Mêmes mesures que pour l'inondation + mesures d'urbanisme visant à interdire l'implantation des bâtiments sensibles dans les zones soumises à tsunami
Tempête tropicale et Ouragan	Equiper chaque ouverture de volet paracyclonique. Limiter l'effet de prise au vent de la toiture, Renforcer la fixation de la toiture sur les murs porteurs, En cas de terrasse couverte, désolidariser le toit de la terrasse du toit de la maison. Mettre en place des dispositifs de contreventements horizontaux et verticaux parfaitement liaisonnés. Ancrage des futurs bâtis sur des dalles épaisses. Elagage des arbres situés trop près des maisons. Fixation des objets pouvant être emportés par l'ouragan. Fixation des objets sensibles dans la maison pouvant être cassés.

Tableau 3 Exemples de mesures de mitigation pour faciliter le retour à la normale selon différents aléas
(Source MEDDE France complétée par ARTELIA)

Toutes ces mesures de mitigation doivent être combinées pour réduire efficacement la vulnérabilité des personnes et des biens.

3.3. Exemples détaillés de mesures de mitigation

3.3.1. EXEMPLES DE MESURES DE MITIGATION EN ZONE D'ALEA DE MOUVEMENT DE TERRAIN

L'exemple suivant est extrait du Règlement PRRN 16/6 Quartiers de Morne Hercule, Morne Lazard et Nerette et Bas Canapé Vert, Bois Patate, Jean Baptiste, Morne Ebo et Morne Villa Rosa, IMSRN et SOGREAH, septembre 2012.

Deux types de techniques sont utilisés de manière complémentaire pour réduire l'instabilité d'un bâtiment face au risque de glissement de terrain : le soutènement et le drainage.

Parmi les techniques de soutènement celle du mur poids est le moyen de mitigation recommandé par le règlement PPRN 16/ pour les secteurs situés en zone verte et jaune.

Technique de soutènement : le Mur poids
Intérêt de la mesure
Cette technique la plus utilisée en Haïti. Le poids et l'encastrement dans le sol s'opposent à la poussée des terres exercées par les terrains amont. Le principal avantage de cette technique est sa facilité de mise en œuvre et donc son coût raisonnable.
Conditions de mise en œuvre

Le **dimensionnement du mur** doit prendre en compte la résistance de l'ouvrage au basculement, au poinçonnement et au glissement (de l'interface ouvrage/sol), critères qui dépendent de la qualité du sol de fondation, de son encastrement et de la géométrie du mur. Il doit aussi prendre en considération la résistance interne du mur.

La **réalisation du talus provisoire du terrain naturel en amont de l'ouvrage** doit être étudiée afin d'éviter tout mouvement de terrain pendant les travaux. Si un talutage suffisant n'est pas envisageable, des techniques de confortement provisoires devront être mises en place. Les talus provisoires devront également être protégés de l'infiltration de l'eau.

Des **drains** doivent être installés dans l'ouvrage, mais également en pied, et à l'amont pour éviter l'accumulation d'eau à la base de l'ouvrage, au niveau de l'encastrement, et son infiltration dans le sol de fondation du mur. Ces drains doivent être protégés (filtres géotextiles) de manière à éviter leur colmatage. L'évacuation de l'eau transitant par les drains doit être étudiée afin de ne pas augmenter l'aléa en aval de l'ouvrage.

Le **massif de remblais en amont de l'ouvrage** doit être de bonne qualité afin de permettre l'écoulement et le drainage des eaux d'infiltrations ou souterraines et ainsi d'éviter la mise en place de surpressions le long de la paroi amont de l'ouvrage. La bonne qualité de ces matériaux permet également de réduire la poussée sur le mur. La hauteur de ces ouvrages est limitée à 2 ou 3 mètres. Au-delà, il faudra opter pour une solution de confortement plus élaborée.

Les **fondations des murs poids** doivent être dimensionnées afin de supporter le poids de l'ouvrage, mais également de manière à éviter tout affouillement et sous cavage de l'ouvrage (principalement dus à l'action érosive des cours d'eau).

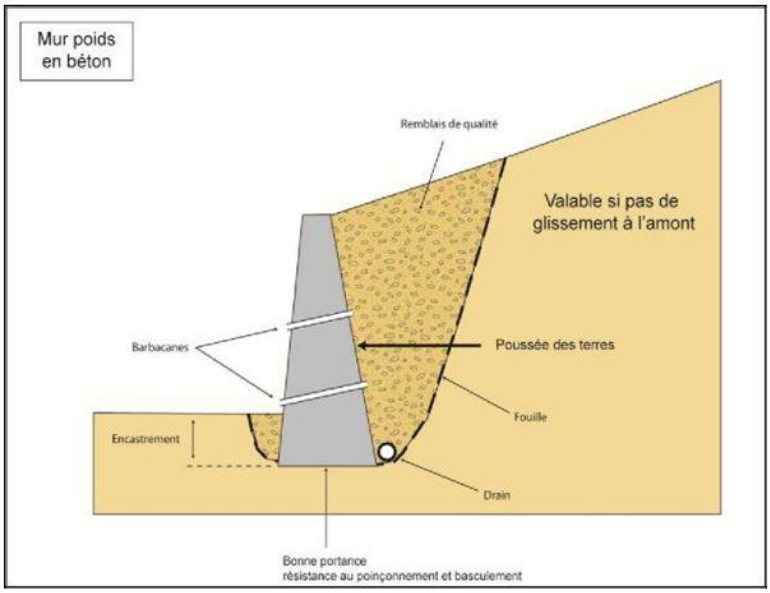


Figure 22 Exemple de mur poids en béton, moyen de mitigation recommandé dans les zones vertes.

(Source IMSRN-SOGREAH PPRN 16/6)

Technique en béton relativement simple, pas nécessité de matériel spécifique, le béton peut être armé afin de renforcer la structure.

Une attention particulière doit être portée sur le choix des matériaux, des techniques de mise ne œuvre (coffrage, coulage du béton…) afin d'assurer la stabilité interne de l'ouvrage, l'intégrité de la structure.

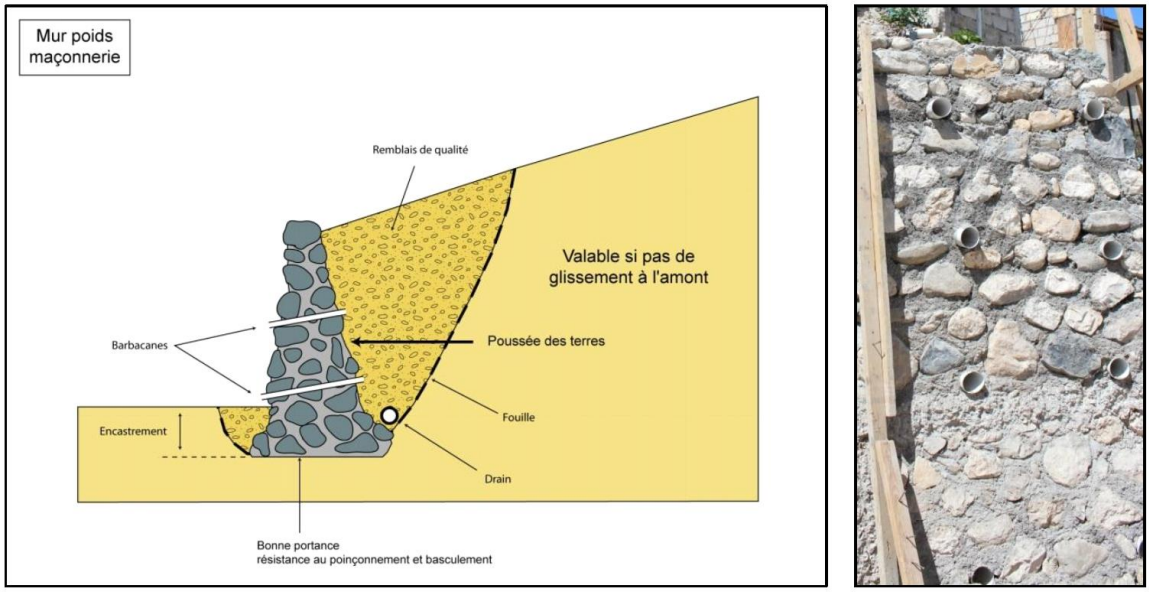


Figure 23 Exemple de mur poids en maçonnerie, moyen de mitigation recommandé dans les zones vertes.
(Source IMSRN-SOGREAH PPRN 16/6)

Mur peu coûteux, technique de construction simple

.

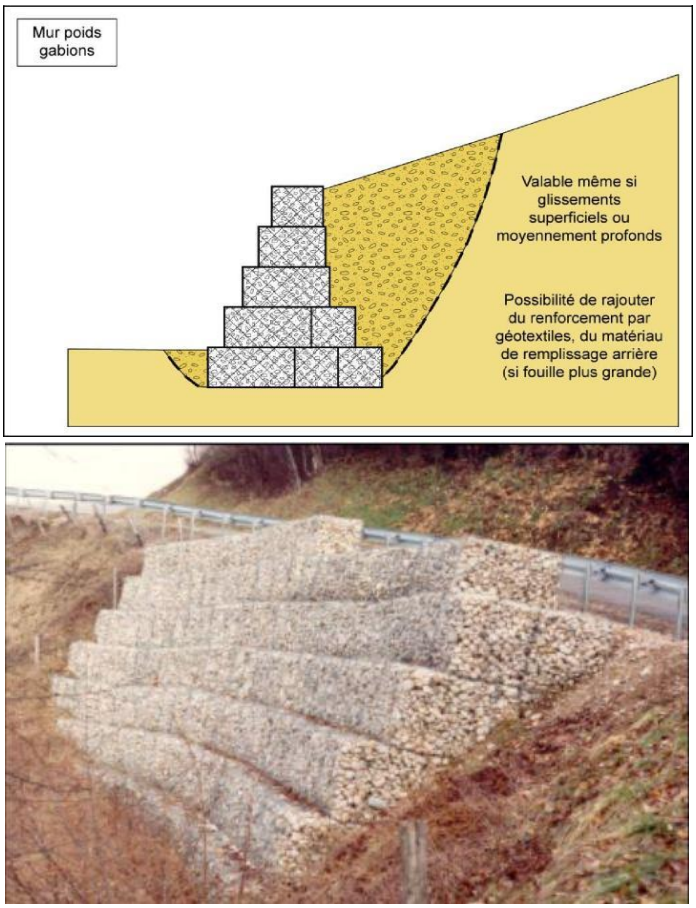


Figure 24 Exemple de mur poids en gabions, moyen de mitigation recommandé dans les zones jaunes à orange
(Source IMSRN-SOGREAH PPRN 16/6)

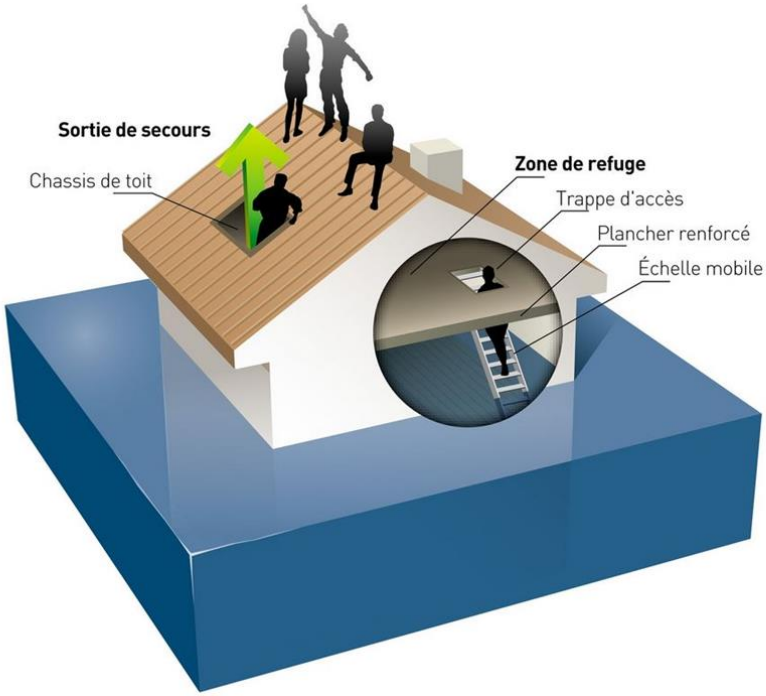
Les murs en gabions représentent également une technique peu chère et facile à mettre en œuvre. L'avantage du gabion est que les éléments constitutifs du mur font office de drains, sous

réserve que le matériau de remblais utilisé empêche le colmatage de la surface arrière du mur par les éléments fins du sol. Cette technique peut être utilisée dans des contextes de glissements superficiels ou moyennement profonds. Les éléments n'étant pas liés entre eux, la souplesse de l'ouvrage autorise de légères déformations, permettant ainsi d'éviter la fissuration puis la ruine du mur. Cette technique peut être adaptée en fonction de son environnement. Les lits de gabions de fondation peuvent par exemple être ancrés au sol par des éléments métalliques ou des nappes de géotextiles peuvent être intercalées entre les lits de gabions, se prolongeant dans les matériaux de remblais, afin d'utiliser le frottement de ces matériaux pour augmenter la stabilité de l'ouvrage.
Limites d'utilisation
Son utilisation n'est pas adaptée à toutes les situations. Le mur poids en béton et en maçonnerie peut être une technique assez coûteuse suivant le prix des matériaux, notamment si le mur est armé. Les murs poids en béton ne sont pas adaptés aux cas de glissements en amont. La rigidité du mur ne permet pas de déplacements de l'ouvrage, ce qui provoquerait sa ruine rapide.

3.3.2. EXEMPLE DE MESURES DE MITIGATION EN ZONE INONDABLE

L'exemple suivant est extrait du Guide La mitigation en zone inondable, Réduire la vulnérabilité des biens existants, Eléments pour l'élaboration du Plan de Prévention du Risque Inondation, MEDDE, France 2005.

Pour assurer la sécurité des personnes, un moyen de mitigation peut être proposé pour faciliter la mise hors de portée de l'eau des personnes, dans les zones inondables où les hauteurs d'eau peuvent être importantes.

Identifier ou créer une zone refuge
Intérêt de la mesure
L'objectif de la zone refuge est de permettre aux occupants du bâtiment de se mettre à l'abri en attendant l'évacuation ou la décrue. Il convient de créer ou identifier un espace refuge au-dessus de la cote d'eau de référence attendue. La conception de la zone refuge doit permettre aux occupants de se manifester auprès des services de secours. Pour cela, la zone refuge doit être accessible (escalier intérieur, extérieur, échelle), sécuritaire, offrir un confort minimum (espace).
Conditions de mise en œuvre
La zone refuge doit être dimensionnée en fonction du nombre d'habitant dans le logement avec une surface minimale de 6 m^2 et de 1 m^2 par personne. La hauteur minimale doit être d'1.20m. Le plancher doit supporter la charge supplémentaire occasionnée par les occupants de la maison et un sauveteur. C'est une mesure permanente, qui nécessite de lourds travaux de construction si pas d'espace pré-existant.    *Figure 25 Exemple de mise en œuvre d'une zone refuge.* (source CEPRI)
Limite d'utilisation
Certaines habitations, certains bâtiments peuvent être entièrement submergés par les eaux. Dans les cas les plus extrêmes, les pouvoirs publics devront prendre les mesures nécessaires pour délocaliser le bien.

3.3.3. EXEMPLES DE MESURES DE MITIGATION EN ZONE SISMIQUE

Lors d'un séisme, les déplacements du sol engendrent dans le bâtiment des forces en réponse. Alors que les éléments solidaires du sol suivent ces déplacements, les parties en élévation ne suivent pas instantanément ces déplacements et il s'ensuit une déformation de la structure. Les efforts maximum se reportent aux angles du bâtiment. Certaines dispositions de la structure sont préjudiciables à la bonne tenue du bâtiment au séisme. Ces défauts de conception de la structure, doivent être corrigés par des renforcements. La transmission des forces sismiques horizontales et verticales s'effectue des planchers aux panneaux de contreventement et aux fondations.
La mesure présentée ci-après permet d'adapter la structure au séisme et la faire résister aux sollicitations dues aux secousses. Elle doit être cumulée à d'autres mesures de précaution comme le choix de l'implantation du bâtiment (site stable), sa forme (simple), le choix des matériaux de construction (de qualité), les fondations, la forme de la toiture, l'espacement du bâtiment avec d'autres bâtiments voisins, les techniques de construction dans les règles de l'art....

Renforcer la structure d'un bâtiment par la maçonnerie chaînée
Intérêt de la mesure
L'objectif est de préserver les vies humaines et de diminuer les dommages aux bâtiments. Il faut pour cela que les bâtiments soient étudiés et exécutés pour ne pas s'effondrer même partiellement, lorsqu'ils sont soumis à un tremblement de terre déterminé. Le non-effondrement de l'habitation ou du bâtiment d'activité est requis pour garantir seulement la sécurité des personnes. **Les murs de chaînage** assurent la rigidité de la structure. Ces éléments en béton armé placés tout autour des murs enchaînent les murs et les ancrent au sol (jouent le rôle de tirants pour le plancher) et assurent la rigidité des panneaux de contreventement (les "membrures" et les "montants" de la poutre en treillis qu'ils forment avec les parties maçonnées) ; Dans le plan du plancher, le **chaînage périphérique horizontal** joue à la fois le rôle de tirant pour sous-tendre la voûte de décharge et de tendeur pour remonter les efforts au droit des panneaux de contreventement. Dans le **panneau de contreventement, le chaînage périphérique** joue un rôle de montant et de membrure.
Conditions de mise en œuvre
La maçonnerie chaînée est un système de construction où les murs sont porteurs (de la charge verticale et horizontale). Ils sont construits d'abord et le béton des colonnes et les chaînages sont coulés ensuite pour garantir la solidité de l'ensemble. Les chaînages verticaux sont disposés : • aux jonctions des murs et à tous les angles saillants et rentrants de la construction ; • en bordure des panneaux de contreventement et en intermédiaires ; • ils règnent sur toute la hauteur de la construction et sont obligatoirement rectilignes. Les chaînages horizontaux sont disposés : • Au niveau des fondations ; • De chaque plancher ; • Au niveau des étages

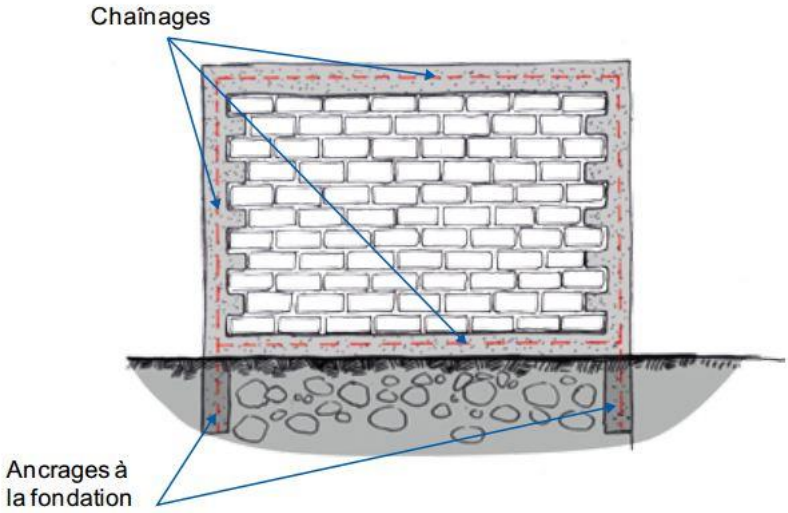


Figure 26 Exemple illustré de maçonnerie chaînée

(Source Guide de bonnes pratiques pour la construction de petits bâtiments en maçonnerie chaînée en Haïti, MTPTC, MICT, Septembre 2010)

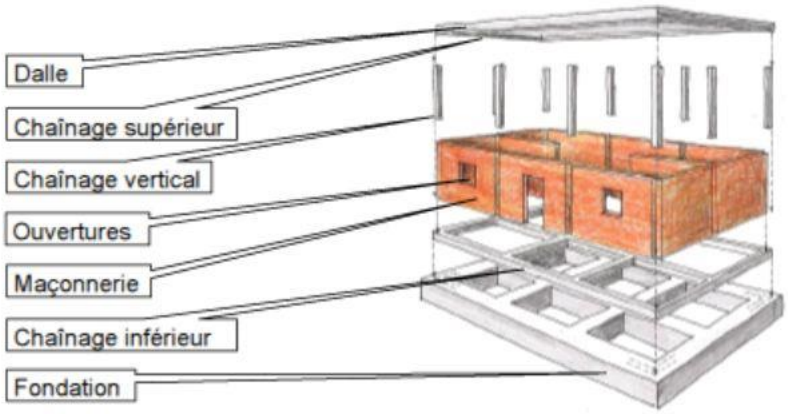


Figure 27 Schéma maison chaînée

(Source Leçon présentée par Tom Schacher, Centre de Compétence Reconstruction de la Coopération Suisse en Haïti pour le compte de l'Institut National de Formation sur la base technique pourvue par le MTPTC, version révisée par Nadia Carlevaro, mars 2013)

Figure 28 Exemples de maisons en maçonnerie chaînée

(Source Leçon présentée par Tom Schacher, Centre de Compétence Reconstruction de la Coopération Suisse en Haïti pour le compte de l'Institut National de Formation sur la base technique pourvue par le MTPTC, version révisée par Nadia Carlevaro, mars 2013)

Limite d'utilisation
Le niveau de l'agression sismique est fixé par les pouvoirs publics à partir de considérations socio économiques et politiques. Un tremblement de terre pourrait dépasser ce niveau. Dans ce cas, un endommagement important du bâtiment serait possible bien qu'il ait été construit pour résister aux séismes. Le coût de ce type de construction lié aux obligations de qualité sur le chantier et le coût de la main d'œuvre rendent difficiles la mise en œuvre de ces techniques. Le manque de formation des maçons, (auto-) constructeurs.

3.3.4. EXEMPLES DE MESURES DE MITIGATION VIS-A-VIS DE L'ALEA VENTS VIOLENTS

Les exemples suivants sont extraits du site Prim.net (site portail thématique du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie – France -, dédié à la prévention des risques majeurs) et du guide de renforcement parasismique et paracyclonique des bâtiments édité par le MTPTC.

L'objectif des mesures constructives paracycloniques repose sur un ensemble de principes conceptuels et de dispositions structurelles. Il ne s'agit pas de garantir une résistance totale du bâti contre tout phénomène cyclonique, mais d'améliorer la résistance générale du bâtiment.

Un bâtiment construit selon les règles paracycloniques pourra subir des désordres structurels plus ou moins importants, mais la vie des occupants ne doit pas être menacée.

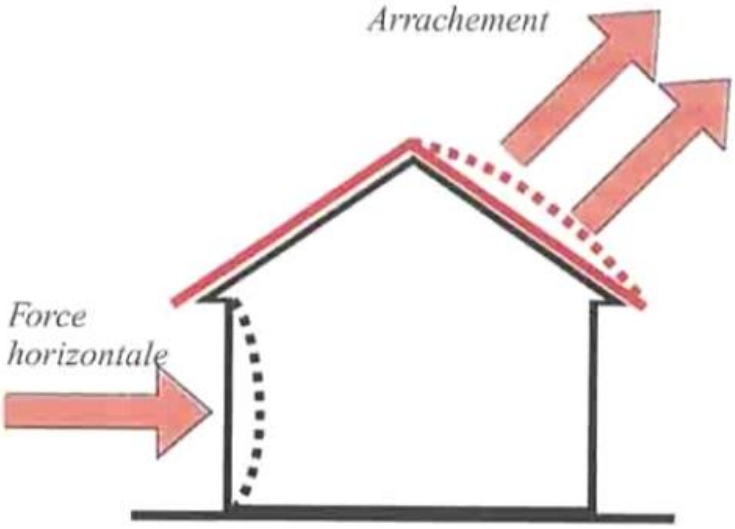


Figure 29 Effets du cyclone sur un bâtiment
(Source MTPTC : Guide de renforcement parasismique et paracyclonique des bâtiments)

Les mesures constructives paracycloniques, en cherchant à améliorer la résistance aux vents violents, s'attachent notamment à optimiser les paramètres essentiels suivants :

- La limitation de la prise au vent (importance des débords de toitures, géométrie et pente du toit).
- Le renforcement de la toiture
- Le renforcement ou la protection des ouvertures (portes et fenêtres)
- Le renforcement du contreventement

Limiter la prise au vent de l'habitat

Intérêt de la mesure

La résistance au vent violent est directement liée à la prise au vent de l'habitat.
En limitant dès la conception du bâti sa prise au vent, on améliore sa résistance globale du bâti de manière intrinsèque.

Conditions de mise en œuvre

Pour lutter efficacement contre l'effet « prise au vent » il faut réduire autant que possible la taille de ce qui dépasse des murs porteurs (débord de toiture). Au-delà d'une trentaine de centimètres, des techniques particulières sont nécessaires pour renforcer le débord et limiter le risque de soulèvement du toit. Pour un meilleur compromis entre forces de soulèvement et surpression du versant au vent, la pente du toit doit se situer autour de 30 °. Un toit à quatre pentes, avec une inclinaison de 30 °, est recommandé. **La pente du toit est l'élément principal de défense des structures de maisons individuelles contre les forces de soulèvement et d'arrachement.**

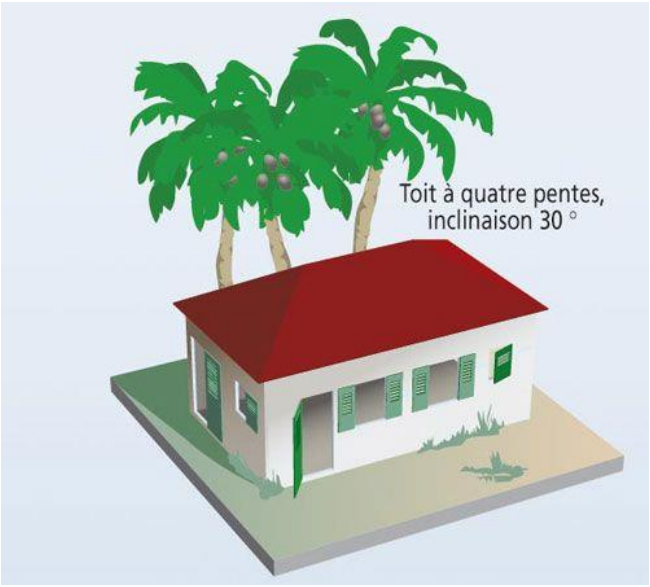


Figure 30 Exemple de toiture à faible prise au vent
(Source PRIM.NET)

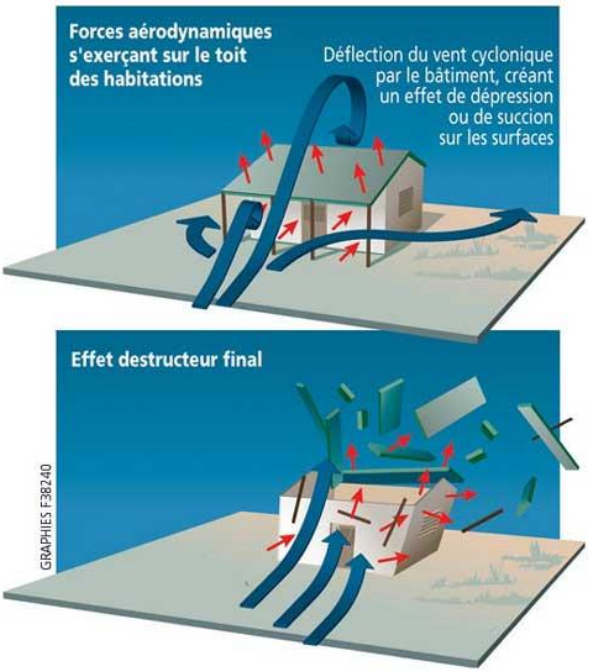


Figure 31 Effets destructeurs d'un vent violent
(Source PRIM.NET)

Dans le cas de la réalisation **d'une terrasse couverte**, une conception adaptée est indispensable (par exemple **non continuité physique entre les toitures de la bâtisse et la terrasse** de façon à ce que si cette dernière est emportée, cela ne mette pas en péril la toiture principale).

Limite d'utilisation

Ce type de toiture doit être prévu dès l'origine du projet de construction.
Le coût de ce type de construction lié aux obligations de qualité sur le chantier et le coût de la main d'œuvre rendent difficiles la mise en œuvre de ces techniques.
Le manque de formation des maçons, (auto-) constructeurs.

Le renforcement de la toiture face aux vents violents

Intérêt de la mesure

Face au vent violent, c'est la toiture qui subit les plus grandes forces de soulèvement et d'arrachement. De plus, l'emploi très fréquent de la tôle ondulée comme couverture sur le territoire haïtien rend ces toitures très vulnérables avec les conséquences destructrices pour l'ensemble du bâti (voir figures précédentes).

Des mesures constructives permettent de renforcer la résistance des couvertures face à ces vents violents.

Conditions de mise en œuvre

La charpente : les dimensions de la charpente doivent être calculées pour une bonne résistance au vent suivant (American Society Civil Engineers 7(05) chapitre 6). Pour les bâtiments courants de un à deux niveaux, la solution de charpente par pannes est une solution économique car les tôles sont alors fixées directement sur ces pannes et il n'est pas nécessaire d'ajouter des tasseaux à tôles. L'écartement des pannes, qui reçoivent directement les tôles de couverture, ne doit pas excéder 60 cm. Les jonctions des pannes doivent se faire sur les appuis.

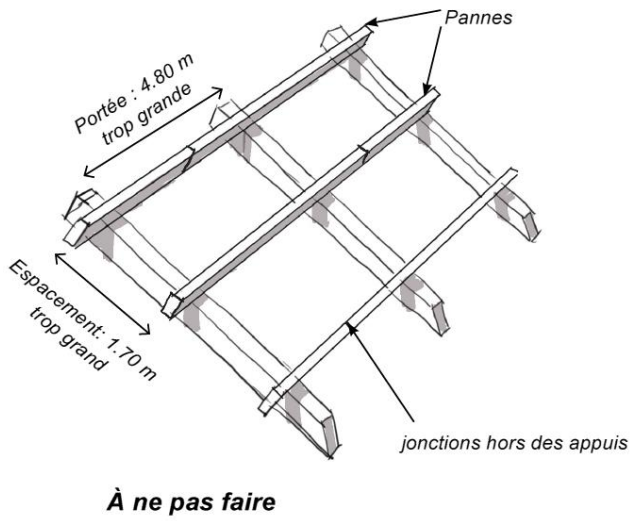


Figure 32 Exemple de dimensions de charpente incorrectes

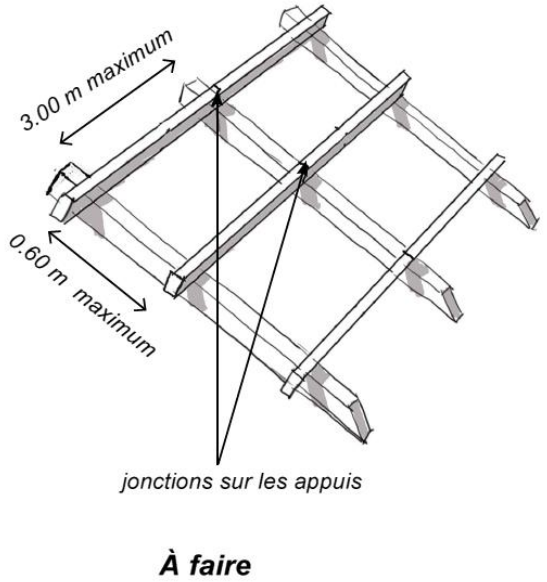


Figure 33 Exemple de dimensions de charpente correctes

(Source MTPTC : Guide de renforcement parasismique et paracyclonique des bâtiments)

Figure 34 Exemple de charpente avant et après renforcement

(Source MTPTC : Guide de renforcement parasismique et paracyclonique des bâtiments)

L'emploi de la tôle ondulée doit nécessairement s'accompagner de certaines précautions : fixation à l'aide de vis et non par des clous, recouvrement suffisant entre les tôles, ancrage des tôles toutes les trois ondes, aux extrémités du toit fixation des tôles sur les planches ou sur le béton des murs porteurs par des vis tous les 50 cm. Pour les toits en tuiles, il est nécessaire de n'utiliser que des tuiles à emboîtement (romanes, mécaniques). Les tuiles des extrémités et de faîtage doivent être scellées au mortier

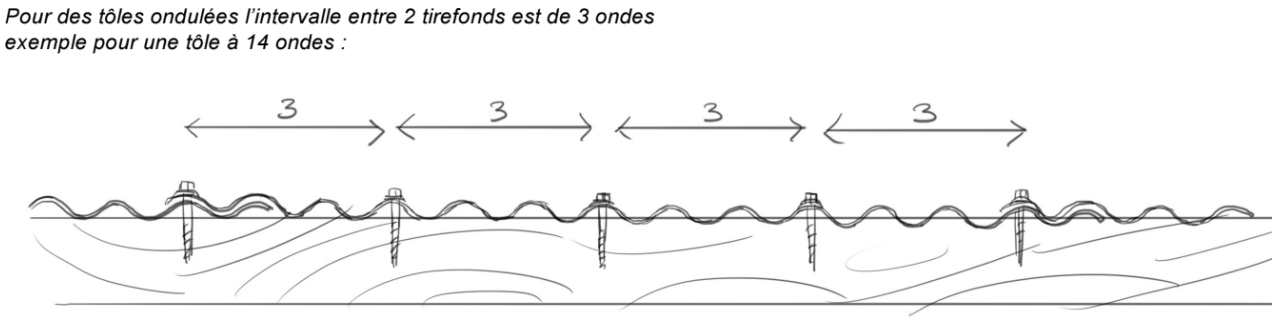
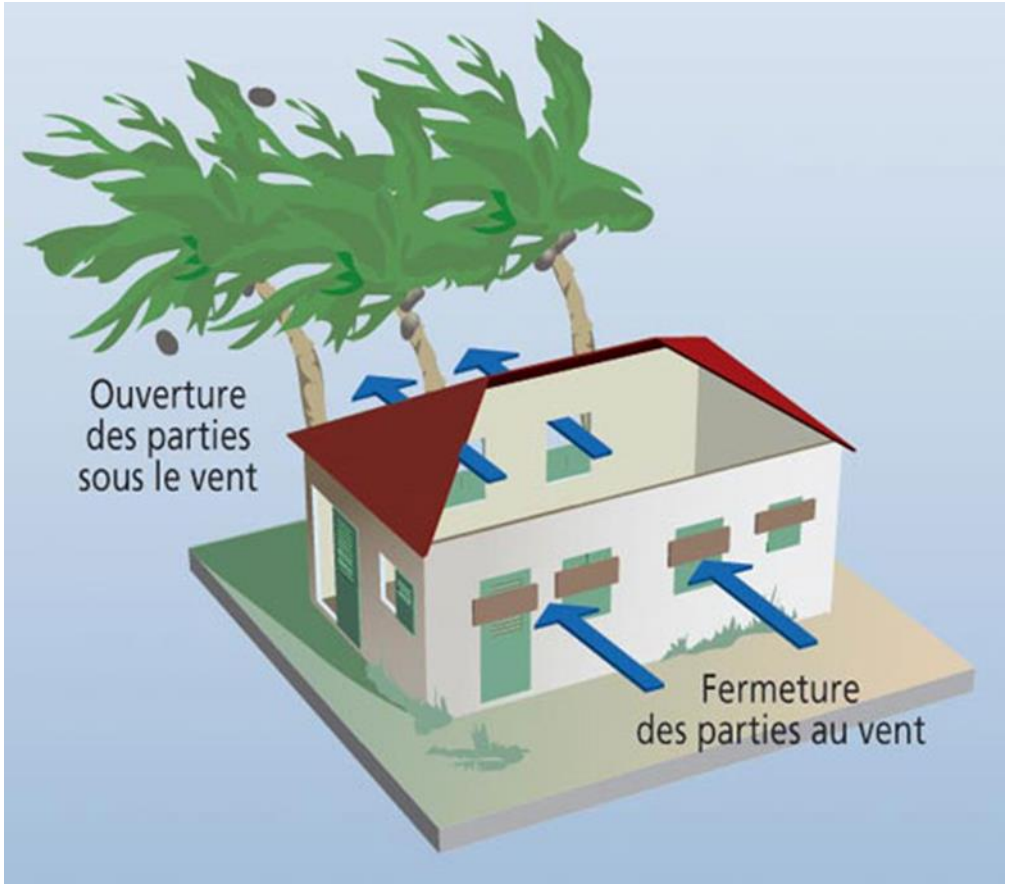


Figure 35 Disposition de mise en place des tirefonds à tôles
(Source MTPTC : Guide de renforcement parasismique et paracyclonique des bâtiments)

Figure 36 Exemple de tôles fixées par des clous (photo de gauche) et de tôles fixées par des tirefonds (à droite).
(Source MTPTC : Guide de renforcement parasismique et paracyclonique des bâtiments)

Limite d'utilisation

Le coût de ce type de construction lié aux obligations de qualité sur le chantier et le coût de la main d'œuvre ne sont pas dans ce cas forcément rédhibitoires (techniques relativement simples) mais le renforcement de la toiture ne sera véritablement efficace que si les autres éléments du bâti ont également été renforcés.
Le manque de formation des charpentiers (auto-) constructeurs.

le renforcement ou la protection des ouvertures (portes et fenêtres)
Intérêt de la mesure
Si les dépressions sur le toit dues au vent se conjuguent à une mise en surpression de l'intérieur du logement (impact d'un corps étranger ou ouverture d'une porte ou d'une fenêtre sur la façade au vent), les forces de soulèvement sont fortement augmentées, provoquant ainsi d'importants dégâts. Le renforcement des ouvertures, en plus de limiter les dégâts à l'intérieur de l'habitat, participe activement à une meilleure résistance de bâti tout entier.
Conditions de mise en œuvre
Quel que soit le type d'ouverture, elle doit impérativement être protégée par un système de volets paracycloniques. À défaut, l'épaisseur du vitrage doit être d'au moins 6 mm. De trop grandes surfaces « ouvertes » sont dans tous les cas à proscrire (même protégées par des volets). En cas d'absence de volet, **l'utilisation de panneaux de contreplaqué peut être une solution d'urgence efficace (fixation des panneaux sur un cadre en bois avec des chevrons).** Si l'ouverture est plus étroite que haute, les renforts doivent être horizontaux. Si votre baie est plus large que haute, les renforts doivent être verticaux.    *Figure 37 Fermetures et ouvertures pendant l'événement cyclonique* (Source PRIM.NET) La fermeture des parties au vent et l'ouverture des parties sous le vent permet, durant le cyclone, de créer des dépressions compensatrices sur le profil du bâtiment. Un puits de dépression, ouvert en toiture, constitue une autre application de ce principe.
Limite d'utilisation
Les volets para-cycloniques (et *a fortiori* des fenêtrés, porte fenêtres et portes para-cycloniques) resteront des équipements chers qui ne pourront pas être utilisés largement sur Haïti. En revanche, les principes de protection des ouvertures avec des panneaux de contreplaqués peuvent s'appliquer et s'avérer efficaces si l'alerte est donnée suffisamment tôt.

Un contreventement adapté aux vents violents

Intérêt de la mesure

Le contreventement correspond à l'agencement des pièces d'une construction (d'une maison par exemple), destiné à en assurer la stabilité, à s'opposer à sa déformation due aux efforts horizontaux ou à son renversement.

Le renforcement des contreventements lors de la construction permet d'adapter l'habitat aux conditions cycloniques. A noter que le renforcement des contreventements est également préconisé pour les constructions anti-sismiques. Les constructions en maçonnerie chaînée se comportent généralement bien vis-à-vis de l'action cyclonique. Elles sont naturellement lourdes et rigides, deux facteurs favorables vis-à-vis de l'action du vent. Une bonne conception et une réalisation soignée du chaînage est néanmoins primordiale : la maçonnerie doit être systématiquement confinée par une ceinture en béton armé (voir Figure 26 Exemple illustré de maçonnerie chaînée).

Conditions de mise en œuvre

Les contreventements verticaux (murs simples) ne sont pas suffisants en zone cyclonique. Des contreventements horizontaux doivent également être assurés à l'aide des toitures (charpente bois correctement dimensionnée avec une bonne mise en œuvre, bon choix du bois, bon ancrage de la charpente à la structure, etc...) et des planchers. L'ensemble du dispositif de contreventement doit être soigneusement liaisonné.

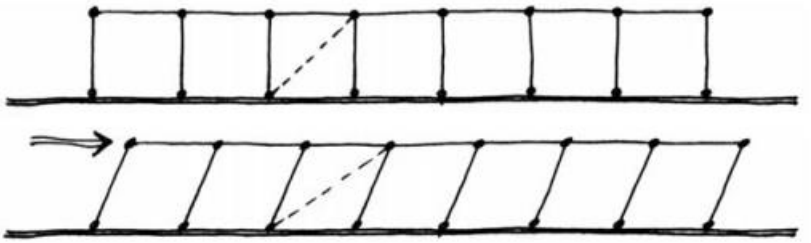


Figure 38 Comportement d'une structure non contreventée soumise à une force extérieure horizontale (vent)
(Source CONCEPTION PARACYCLONIQUE par Barré/de la Foye/Moreau pour le MEEDDE France)

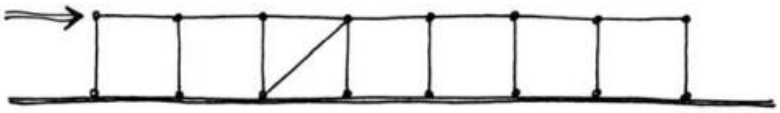
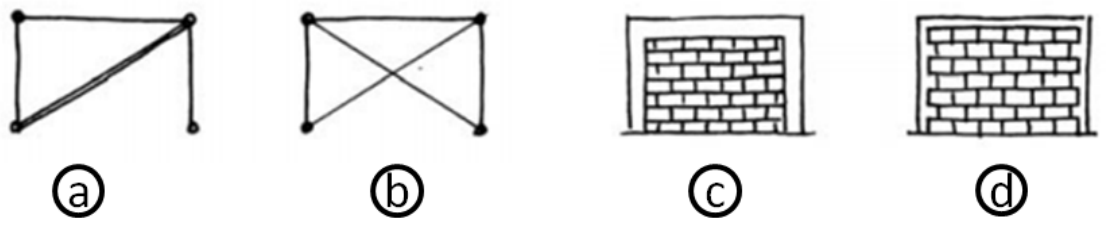


Figure 39 Comportement d'une structure soumise à une force horizontale (ici la diagonale s'oppose à l'allongement : elle travaille en traction)
(Source CONCEPTION PARACYCLONIQUE par Barré/de la Foye/Moreau pour le MEEDDE France)



a: une diagonale capable de travailler en traction et en compression
b : deux diagonales capables de travailler en traction
c : ossature poteaux-poutres avec remplissage en maçonnerie
d: maçonnerie chaînée

Figure 40 Principaux types de contreventement
(Source CONCEPTION PARACYCLONIQUE par Barré/de la Foye/Moreau pour le MEEDDE France)

Limite d'utilisation
La grande majorité de ces mesures ne peuvent être réalisées que si elles sont prévues dès l'origine du projet de construction. Le coût de ce type de construction lié aux obligations de qualité sur le chantier et le coût de la main d'œuvre rendent difficiles la mise en œuvre de ces techniques. Le manque de formation des maçons, (auto-) constructeurs.

➘ Résumé

Les caractéristiques des aléas influencent le niveau de vulnérabilité des personnes et des biens. Par exemple, pour une crue, les paramètres d'impacts (de vulnérabilité) sont la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de submersion. Il est nécessaire avant de faire un choix de mesures de mitigation de bien connaître le comportement d'un bâtiment en fonction des caractéristiques de l'aléa.

Au-delà de la structure du bâtiment, son usage et ses fonctions pour la population sont également des paramètres qui déterminent son niveau de vulnérabilité. Les atteintes ne sont pas les mêmes en termes de sécurité des personnes, de fonctionnement selon le type d'établissement.

Par exemple, pour étudier la vulnérabilité d'une entreprise il faut tenir compte de la vulnérabilité des stocks, des approvisionnements en matières premières, des livraisons de produits, du matériel informatique… Pour un bâtiment industriel, il faudra regarder aussi les risques de pollution pouvant être engendrés pour le voisinage avec des conséquences parfois désastreuses : cuves de fioul, produits toxiques… Pour les Etablissements Recevant du Public, la priorité sera la sécurité des personnes vulnérables (enfants, personnes âgées…). Les mesures de mitigation à mettre en place devront donc être adaptées aux diagnostics réalisés.