

## Risque d'inondation et villes des pays en développement



Auteurs Yves KOVACS, Nicolas DOUSSIN, Marion GAUSSENS  
(SEPIA Conseils)

Coordination Laurent PACOUD, Olivier GILARD (AFD)

Pays

Multi-pays



Mots-clés

Risque d'inondation,  
vulnérabilité, risque naturel,  
gestion intégrée, aléa, eau,  
climat, prévision, pluie, crue

## AUTEURS

SEPIA Conseils est un cabinet de conseils fondé en 1991 réalisant des prestations d'ingénierie, de conseil, d'assistance à maîtrise d'ouvrage dans le domaine de l'eau pour des maîtres d'ouvrages publics et des aménageurs privés en France comme à l'International.

**Contact : [sepia@sepia-uw.fr](mailto:sepia@sepia-uw.fr)**

## RÉSUMÉ

Le risque d'inondation constitue le risque naturel touchant le plus de personnes à l'échelle mondiale. Il représente néanmoins davantage un risque en termes de dégâts matériels qu'un risque léthal pour la population affectée. La gestion intégrée du risque d'inondation (GIRI) constitue une réponse globale au risque d'inondation, structurellement systémique et encline à évoluer au cours du temps. Une approche opérationnelle de la GIRI consiste à considérer trois composantes de la gestion du risque d'inondation complémentaires et interconnectées : la prévention, la préparation et la culture du risque. Cette note technique explique les enjeux de chacune de ces composantes et dresse une liste non exhaustive des différents outils existants, en présentant également leurs limites d'application. Une présentation d'exemples de territoires à risque étaye, par des exemples précis, les éléments explicités dans la note.

## LANGUE ORIGINALE

Français

## ISSN

2492-2838

## DÉPÔT LÉGAL

4<sup>ème</sup> trimestre 2017

## AVERTISSEMENT

Les analyses et conclusions de ce document ne reflètent en aucun cas le point de vue de l'Agence Française de Développement ou de ses tutelles institutionnelles.

Les *Notes techniques* sont téléchargeables  
sur le site de l'AFD : <http://editions.afd.fr>

## SOMMAIRE

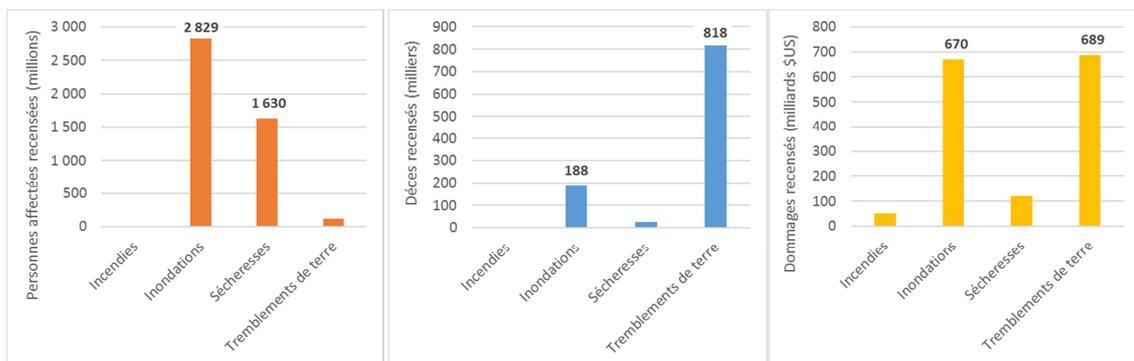
<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>I. Les inondations : la catastrophe naturelle affectant le plus de personnes à l'échelle mondiale .....</b>	<b>4</b>
<b>II. Le rôle central des villes pour les pays en développement .....</b>	<b>5</b>
<b>III. La prévention des risques pour un développement durable des territoires urbains .....</b>	<b>6</b>
<b>Caractérisation du risque d'inondation et de sa gestion.....</b>	<b>8</b>
<b>I. Le risque d'inondation résultant de multiples facteurs .....</b>	<b>8</b>
1. La vulnérabilité du territoire (ou la mesure des enjeux) .....	8
2. L'aléa inondation .....	12
3. Une échelle territoriale à adapter .....	15
<b>II. Vers une gestion intégrée du risque d'inondation .....</b>	<b>16</b>
1. La prévention du risque d'inondation au cœur de la limitation des dommages.....	17
2. La préparation à la gestion de crise pour faciliter la réaction à la survenue d'une inondation .....	18
3. La culture du risque, un préalable indispensable à la réussite opérationnelle d'une gestion intégrée des inondations.....	18
<b>La mise en œuvre d'une prévention efficace du risque d'inondation .....</b>	<b>20</b>
<b>I. Les outils de réduction des vulnérabilités .....</b>	<b>20</b>
1. Le recensement des enjeux .....	20
2. La planification urbaine et la gestion de l'occupation des sols .....	22
3. La réduction des vulnérabilités des bâtiments .....	23
<b>II. Les outils de gestion de l'aléa.....</b>	<b>24</b>
1. La connaissance de l'aléa .....	24
2. Les mesures structurelles de protection contre les inondations .....	28
<b>III. Les institutions à impliquer dans la prévention du risque .....</b>	<b>32</b>
<b>Une meilleure préparation à la crise.....</b>	<b>33</b>
<b>I. Les outils de prévision.....</b>	<b>34</b>
1. La prévision météorologique .....	34
2. La prévision des crues .....	35
<b>II. Les outils de planification de crise .....</b>	<b>36</b>
<b>III. Les institutions à impliquer dans la préparation.....</b>	<b>40</b>

<i>Le renforcement de la culture de risque .....</i>	<i>41</i>
I. Les outils pour améliorer la conscience du risque .....	41
II. Les partenaires institutionnels de la culture du risque .....	43
<i>Exemples de territoires à risque dans les pays en développement .....</i>	<i>44</i>
<i>Bibliographie .....</i>	<i>47</i>
<i>Annexe 1 – Lexique des termes techniques .....</i>	<i>55</i>
<i>Annexe 2 – Les impacts des inondations dans les pays d’intervention de l’AFD depuis 1990 .....</i>	<i>60</i>
<i>Annexe 3 – Les concepts-clés de genèse de l’aléa inondation.....</i>	<i>62</i>
<i>Annexe 4 – Différentes approches opérationnelles de la gestion intégrée du risque d’inondation.....</i>	<i>70</i>
<i>Annexe 5 – Les méthodes de dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations.....</i>	<i>75</i>
<i>Annexe 6 – Les différents types de radar utilisés pour la prévision météorologique .....</i>	<i>77</i>
<i>Annexe 7 – Les différents modèles de systèmes assurantiels .....</i>	<i>78</i>
<i>Annexe 8 – Analyses détaillées des territoires à risques .....</i>	<i>82</i>
<i>Précédentes publications de la collection .....</i>	<i>106</i>
<i>Qu’est-ce que l’AFD ? .....</i>	<i>110</i>

# Introduction

## I. Les inondations : la catastrophe naturelle affectant le plus de personnes à l'échelle mondiale

Avec plus de 2,8 milliards de personnes affectées depuis 1990 à travers le monde (EM-DAT, 2016), **les inondations constituent le phénomène touchant le plus de personnes à l'échelle mondiale** (UNISDR, 2015). Elles représentent néanmoins davantage **un risque économique en raisons des dégâts matériels induits** qu'un risque léthal pour la population affectée. La comparaison par rapport aux autres types de catastrophes naturelles montre par exemple que les inondations engendrent nettement moins de décès que les tremblements de terre (Figure 1).

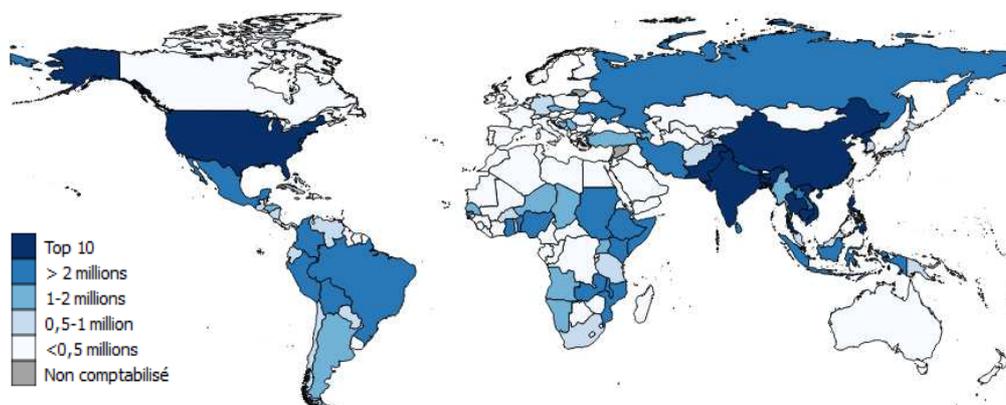


**Figure 1 : Comparaison des dégâts par les différentes catastrophes naturelles depuis 1990 à l'échelle mondiale (Données sources : EMDAT – 2016)**

**Les dégâts matériels générés impactent de manière significative les conditions de vie des personnes touchées par les inondations**, notamment par la dégradation des bâtiments (les habitations et les infrastructures stratégiques telles que les hôpitaux et les écoles), la perturbation ou la rupture de réseaux (eau potable, assainissement, déchets, énergie, transport), la perturbation ou l'arrêt des activités économiques, et le déplacement de populations.

A l'échelle mondiale, certains pays sont plus touchés que d'autres par les inondations (Figure 2). L'Asie est particulièrement exposée : 9 des 10 premiers pays en termes de populations affectées par les inondations sont asiatiques

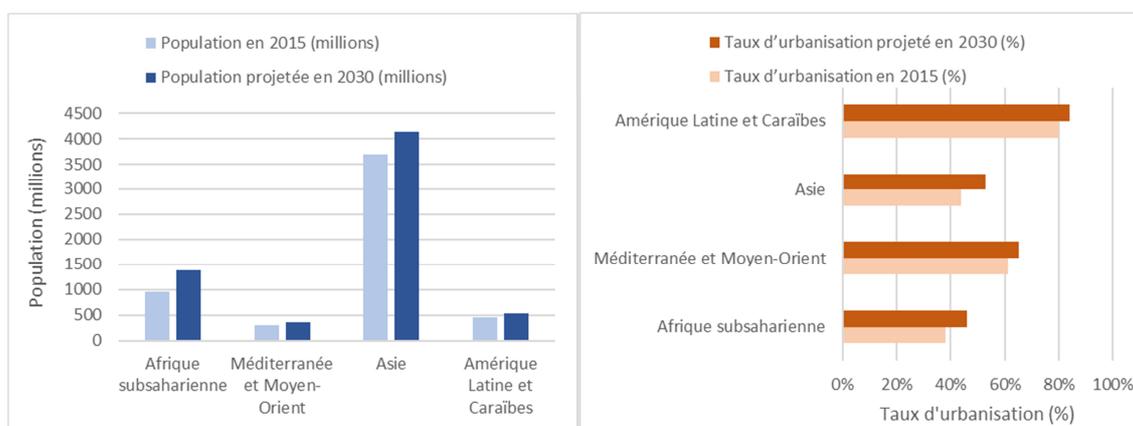
(dont la Chine en premier lieu)<sup>1</sup>. Le détail des impacts, humains et matériels, dus aux inondations pour chaque pays d'intervention de l'AFD est présenté en annexe.



**Figure 2 : Répartition mondiale des personnes affectées par les inondations depuis 1990 (EM-DAT, 2015)**

## II. Le rôle central des villes pour les pays en développement

L'urbanisation galopante dans les pays en développement, et en particulier en Afrique et en Asie (Figure 3), constitue un véritable défi pour la gestion du risque d'inondation.



**Figure 3 : Synthèse du développement démographique et urbain à horizon 2030 sur les régions d'intervention de l'AFD (ONU, 2014) (ONU, 2015)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ce que l'on peut rapprocher en premier lieu de la densité moyenne de population dans cette région.

<sup>2</sup> Les projections de l'ONU présentées dans ce rapport font référence au scénario « variante moyenne », scénario communément utilisé à l'échelle internationale. Mais la modification de certaines hypothèses peut entraîner des variations sensibles de ces projections. Parmi ces hypothèses, on retrouve en

**Le développement urbain catalyse l'augmentation des vulnérabilités en concentrant des enjeux humains et matériels dans les zones préalablement dédiées à d'autres occupations des sols mais souvent sujettes à un aléa d'inondation.** Les populations pauvres, issues de l'exode rural et attirées par les perspectives économiques, sont en effet amenées, faute de moyens, d'espaces disponibles et d'une planification territoriale efficace, à s'y installer. Il est à noter que ces populations préfèrent souvent s'installer (ou se réinstaller après une inondation) dans ces quartiers exposés car les perspectives économiques priment sur le risque qu'elles encourent.

En outre, la dynamique d'urbanisation tend vers une insuffisance des infrastructures de drainage, malgré les nouveaux investissements, ciblés essentiellement sur l'aléa inondation au lieu de s'attaquer à la réduction des vulnérabilités. On assiste alors à « une course en avant » pour construire des infrastructures répondant aux besoins croissants des villes (ce qui entraîne un retard constant sur les besoins assimilables à un sous-dimensionnement), tout en ayant des ressources financières limitées. Le développement de l'urbanisation engendre également une augmentation des ruissellements due à l'imperméabilisation des surfaces et peut entraîner une obstruction des voies naturelles d'écoulement.

### **III. La prévention des risques pour un développement durable des territoires urbains**

Dans les pays en développement, la gestion du risque d'inondation se place dans une position relative par rapport aux autres éléments naturels et sociaux ressentis comme un risque pour la population. **Le niveau d'acceptabilité sociale du risque d'inondation y est donc souvent plus élevé que celui des pays développés.**

Au regard de la dimension d'adaptation des territoires face au changement climatique et de réduction des risques naturels, le développement durable peut être envisagé comme un levier propice à augmenter la **résilience urbaine**, c'est-à-dire la capacité de la ville à s'adapter à des changements ou à des évolutions de contexte, et à se reconstruire à la suite d'une crise.

---

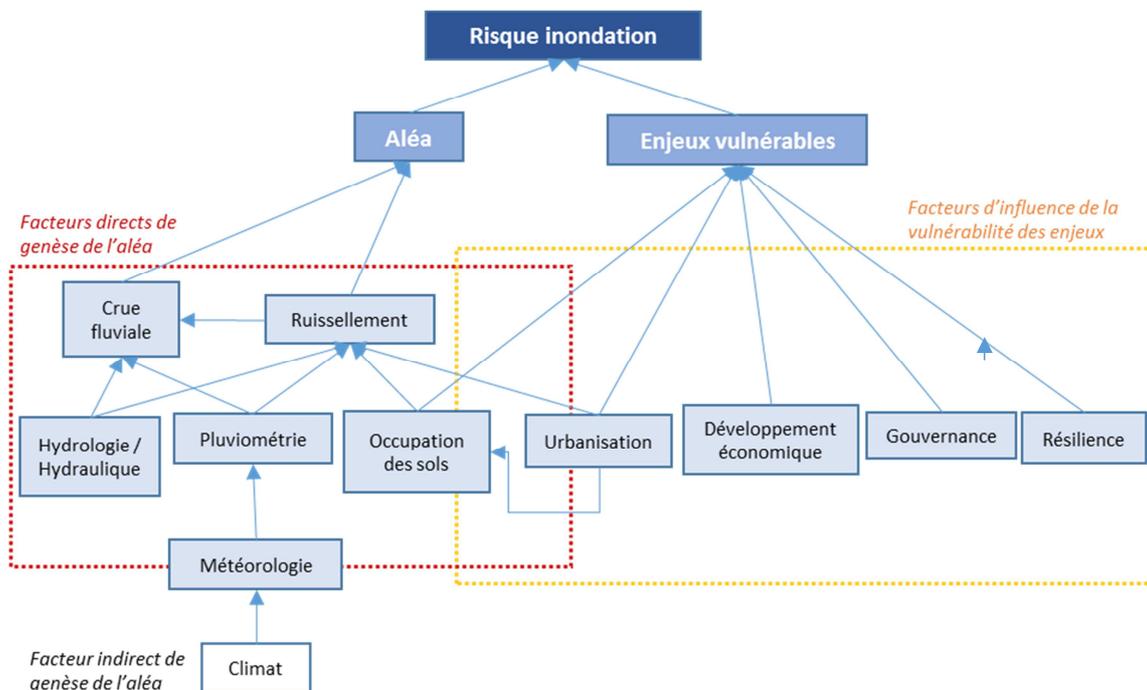
premier lieu l'évolution de la fécondité, facteur central de l'évolution démographique, mais également l'évolution des flux migratoires qui reste difficilement prévisible.

Le lien entre prévention des risques et développement durable sur un territoire contribue ainsi à **accorder les différentes parties prenantes, dans une démarche participative, sur un niveau de risque acceptable** en fonction des zones du territoire, **et par la suite, à adapter en adéquation l'occupation des sols.**

# Caractérisation du risque d'inondation et de sa gestion

## I. Le risque d'inondation résultant de multiples facteurs

Selon une approche simplificatrice couramment utilisée, le risque d'inondation, comme tout risque de catastrophe, peut se caractériser par **l'exposition d'enjeux vulnérables à un aléa**, en l'occurrence un la présence temporaire d'eau. Ces deux facteurs principaux (enjeux et aléa) sont eux-mêmes **influencés par de multiples facteurs interconnectés**, tels que l'occupation des sols, l'urbanisation et la météorologie (Figure 4).



**Figure 4 : Représentation simplifiée des liens entre le risque d'inondation et ses composantes**

### 1. La vulnérabilité du territoire (ou la mesure des enjeux)

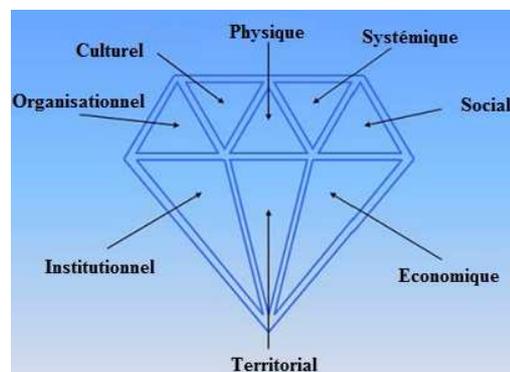
*Vers une conception multidimensionnelle de la vulnérabilité*

**La vulnérabilité est une composante essentielle du risque**, aujourd'hui reconnue comme telle dans la plupart des pays développés, comme la France, même si elle a longtemps été occultée au profit de la seule entrée de l'aléa dans la compréhension des risques naturels. **La vulnérabilité à l'échelle d'un territoire est variable non seulement dans l'espace** (l'analyse de

vulnérabilité ou des enjeux doit être réalisée à l'échelle de la parcelle) **mais aussi dans le temps** (l'urbanisation tend à concentrer les richesses sur un territoire limité).

La vulnérabilité d'un territoire peut être vue comme systémique en ce sens où **elle ne peut être résumée à la somme des enjeux qui se situent sur ce territoire**. L'intérêt d'une telle approche est **d'envisager l'atteinte indirecte à des enjeux non inondés mais dont le fonctionnement peut être perturbé du fait de la survenance d'un aléa qui alors se transforme en catastrophe**. L'exemple classique est celui d'une entreprise vulnérable aux crues d'un fleuve du fait de l'atteinte de ses voies d'accès, alors qu'elle-même n'est pas inondée : la crue ne permettant plus l'acheminement des matières premières nécessaires à son fonctionnement, ni de ses salariés, on peut considérer cette usine comme vulnérable aux inondations. Cette situation illustre le fait que la vulnérabilité doit s'appréhender à une échelle territoriale qui n'est pas stricto sensu délimitée par l'emprise géographique de la crue (l'aléa). L'intérêt est également de mettre en évidence de **possibles solidarités** organisées à une échelle territoriale adaptée pour rendre le risque collectivement plus acceptable.

La vulnérabilité en termes de risque naturel a fait l'objet de nombreuses définitions au cours des dernières années. Au fur et à mesure des réflexions et des analyses, le concept tend à se complexifier et à progressivement s'élargir pour tendre vers une **vulnérabilité « globale » et multidimensionnelle** intégrant les propriétés non seulement physiques mais aussi sociales, économiques, environnementales, institutionnelles. La vulnérabilité englobe ainsi également les capacités d'adaptation, les réponses et les interactions avec les perturbations et les stress. Cette nature multidimensionnelle peut être symbolisée par l'image du diamant (figure ci-contre), bien que celle-ci soit encore débattue dans la littérature mondiale. (Quenault et al., 2011). Elle a également comme défaut qu'elle ne permet pas de bien représenter les différents niveaux d'intrication de la vulnérabilité depuis l'individu / la parcelle, jusqu'à la société / la collectivité / le territoire. Cela limite son utilisation opérationnelle.



**Figure 5 : Analogie du diamant pour symboliser la nature multifacette de la vulnérabilité, adapté de Quenault et al. 2011**

En considérant cette approche multidimensionnelle de la vulnérabilité, **les pays en développement sont susceptibles de présenter une vulnérabilité globale significativement plus importante que d'autres pays, pour un même risque**, du fait des faiblesses de certaines facettes, en particulier économique, organisationnelle et institutionnelle, qui limitent leur résilience, et donc leur capacité à se remettre de crises importantes. Toutefois, **les dommages générés par les inondations des pays développés peuvent générer des dommages bien plus importants que ceux des pays en développement**. A cette aune, les pays développés sont en fait plus vulnérables, ce qu'ils compensent par une meilleure prévention et gestion des risques.

#### *La croissance urbaine comme facteur d'aggravation de la vulnérabilité*

L'urbanisation a une influence directe sur le risque d'inondation, en particulier : (Floater et al., 2014)

- **Le problème du dimensionnement des ouvrages d'assainissement ou de gestion des eaux pluviales, en adéquation avec les besoins.** Les infrastructures nouvellement construites sont souvent déjà dépassées au regard de la dynamique de croissance urbaine, qui n'a pas pu être anticipée au moment de la conception des ouvrages.
- **Les limites de l'application dans les villes en croissance des méthodes ou des normes effectives dans les villes développées** (en matière de gestion de l'occupation des sols par exemple), en raison notamment de la croissance urbaine souvent informelle et d'une gouvernance souvent faible (manque de contrôle).
- **Le problème du financement des infrastructures ou des politiques de gestion du risque d'inondation.** Les principales ressources financières sont accaparées pour répondre à la croissance de la ville, pour assurer les services essentiels tels que l'approvisionnement en électricité et en eau potable, le développement du réseau de transport et le développement économique. Ainsi le développement de la ville n'est pas synonyme de développement des moyens disponibles pour le risque d'inondation sauf si le niveau de richesse et de gouvernance le permet.

#### *D'autres facteurs d'aggravation de la vulnérabilité*

L'approche multidimensionnelle de la vulnérabilité met en exergue le rôle des institutions sur la vulnérabilité d'un territoire ou d'une population. De nombreux facteurs humains sont susceptibles d'entraîner une aggravation de la vulnérabilité, en particulier :

- **Une mauvaise gouvernance** qui peut se traduire par exemple sous la forme d'une absence d'institution référente en matière d'inondation, ou bien d'un surnombre d'institutions impliquées dont les missions et les périmètres d'action sont flous, compliquant ainsi leur coordination ;
- **Une absence ou une insuffisance de contrôle de planification de l'occupation** des sols, et de politique de logement engendrant une urbanisation anarchique, en particulier la construction d'habitation (informelle ou formelle) dans des zones inondables.

Au sein d'une même société, certains groupes de personnes vont également être plus vulnérables que d'autres. Les populations pauvres sont surexposées aux inondations dans les pays en développement (car souvent installées dans des zones d'aléa fort), où elles sont plus de 50 % plus susceptibles d'en être victimes que le reste de la population (Hallegatte et al., 2017). Elles disposent d'une moindre capacité à faire face à une catastrophe et à s'en relever : elles n'ont souvent pas les moyens de se protéger (leurs habitations souvent sommaires sont particulièrement fragiles face aux inondations), et leurs moyens financiers ne leur permettent pas nécessairement de réparer ou remplacer les équipements endommagés ou détruits (bien qu'en valeur financière, les populations pauvres aient moins à perdre que les riches), ni de se reloger après une catastrophe. Les personnes âgées, les enfants en bas âge, et les handicapés sont également particulièrement vulnérables en raison de leur manque de mobilité, leur manque d'indépendance et de leur faiblesse physique.

#### **Encadré 1 : Quel lien entre développement et vulnérabilité ?**

L'analyse des catastrophes naturelles, aussi bien dans les pays en développement (Thouret et Leone, 2003) que les pays développés (Townsend, 2006) montre que « la vulnérabilité n'est pas la stricte fonction inverse du degré de développement économique » (Leone & Vinet, 2011) : les enjeux et les dommages potentiels associés à une inondation sont plus importants dans les pays développés, mais la situation de risque, elle, est mieux maîtrisée et le risque est donc moins important. Ainsi **le développement économique et la richesse influencent la vulnérabilité dans deux directions antagonistes** : d'une part, ils peuvent permettre à un territoire de se doter d'outils de prévision ou de connaissance du risque d'inondation (réduction de la vulnérabilité et amélioration de la gestion de crise), et d'autre part ils impliquent une augmentation des enjeux, potentiellement situés en zone inondable (augmentation de la vulnérabilité).

Les inondations éclairs de Port-Louis à l'île Maurice en mars 2013, en sont un bon exemple : le développement en cours de l'île engendre de façon contradictoire une augmentation des moyens de réponse techniques mais également une augmentation des enjeux dans les zones soumises à un aléa, qui deviennent donc à risque, et probablement une diminution de la conscience collective du risque. Ainsi le développement relativement récent de l'île a entraîné non une disparition mais une modification des risques qui deviennent systémiques et structurellement plus difficiles à appréhender. (Asconit, 2013)

## 2. L'aléa inondation

La détermination de l'aléa, c'est-à-dire l'identification des zones inondables et l'évaluation de la période de retour associée à la submersion, la hauteur et la durée de submersion, et la vitesse du courant, suppose d'analyser plusieurs caractéristiques du bassin versant.

Le régime pluviométrique, l'occupation des sols, la végétation, influencent la formation du ruissellement, alors que les caractéristiques physiques, topologiques, topographiques et géologiques impactent à la concentration des écoulements. Une fois que l'eau a rejoint un cours d'eau, les écoulements sont régis essentiellement par la morphologie du cours d'eau et les lois de l'hydraulique. Les concepts clés de genèse de l'aléa sont décrits en annexe.

### Encadré 2 : Périodes de retour et fréquences de crue

Crue		Risque de voir la crue caractéristique atteinte ou dépassée au moins une fois		
Fréquence	Période de retour	Sur un an	Sur 30 ans	Sur 100 ans
<b>Décennale</b> 0,1	10 ans	10% 1 « chance » sur 10	96% Soit presque sûrement une fois	99,99% Soit sûrement une fois
<b>Trentennale</b> 0,03	30 ans	3,3% 1 « chance » sur 30	64% Soit 2 « chances » sur 3	97% Soit presque sûrement une fois
<b>Centennale</b> 0,01	100 ans	1% 1 « chance » sur 100	26% Soit 1 « chance » sur 4	63% Soit 2 « chances » sur 3
<b>Millennale</b> 0,001	1000 ans	0,1% 1 « chance » sur 1000	3% Soit 1 « chance » sur 33	10% Soit 1 « chance » sur 10

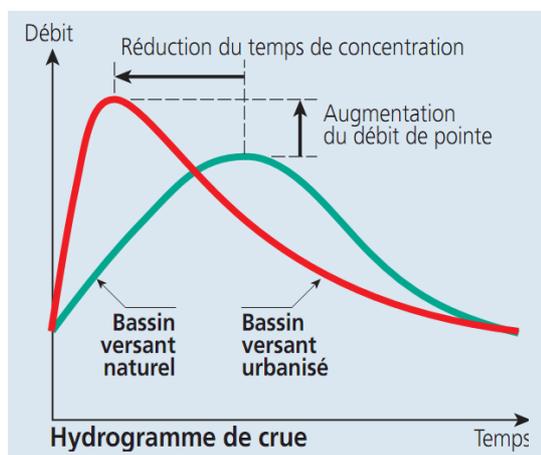
**La période de retour d'une crue est par définition l'inverse de sa probabilité annuelle de dépassement** (tableau ci-dessus) (Ledoux, 2006). Celle-ci est souvent différente de la période de retour de l'évènement pluvieux l'ayant engendrée, dans la mesure où elle est fonction, non seulement de l'évènement pluvieux, mais également des caractéristiques du bassin versant,

des caractéristiques du cours d'eau et des conditions météorologiques précédents l'évènement pluvieux.

La période de retour d'une crue observée est définie pour un endroit précis : une même crue pouvant présenter une période de retour de 10 ans à un point et de 100 ans à un point aval. Elle peut être différente suivant que l'on analyse le volume écoulé ou le débit instantané de pointe. Enfin, tout aménagement doit faire face à l'ensemble du champ des possibles défini par le régime des crues. C'est donc ce dernier qu'il faut tenter d'appréhender.

### *Deux types principaux d'inondation : ruissellement et crue fluviale*

Les inondations de type **ruissellement** résultent de l'écoulement dû à l'urbanisation qui entraîne une artificialisation des sols (routes, bâtiments, parkings) et qui réduit l'infiltration des eaux. Pour les plus petits bassins versants (de l'ordre du km<sup>2</sup> – au-delà de 100km<sup>2</sup> l'impact est difficile à mesurer), ceci se traduit graphiquement sur l'hydrogramme de crue par l'augmentation du débit de pointe, et par la réduction du temps de concentration (Figure 6).



**Figure 6 : Illustration de l'influence de l'urbanisation sur l'hydrogramme de crue (MEDDE France, 2004)**

L'eau ne pouvant pas s'infiltrer s'écoule dans les réseaux d'assainissement (s'ils existent et s'ils ne sont pas déjà saturés) et directement à la surface pour les événements plus rares et s'accumule dans les points bas. Les temps d'anticipation pour ce type d'inondation sont très courts (1 à 2 heures).

Les **inondations de plaine**, ou **crues fluviales**, résultent de la sortie d'une rivière de son lit ordinaire ou mineur pour atteindre son lit majeur. Ce type d'inondation se caractérise par une montée des eaux et une décrue plutôt lentes. La submersion peut durer plusieurs jours à plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Les dommages sont principalement fonction de la hauteur et de la durée de submersion. La répétition d'évènements pluvieux peut être un facteur déterminant dans ce type d'inondation : la pluie des premiers

événements s'infiltrer sur un sol sec, sans donner lieu à une réponse importante de la rivière en termes de débit. Celle des derniers événements ruisselle intégralement sur un sol saturé en eau et entraîne la crue de la rivière. Le temps d'anticipation de ce type d'inondation est plus important (de quelques heures à quelques jours suivant la taille du bassin versant concerné).

Sur des zones de montagne ou de piémont et des bassins versants petits à moyens (de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>) avec un relief accentué, l'inondation par débordement de rivière peut être qualifiée d'« éclair », **lorsque la concentration rapide des eaux issues d'averses intenses conduit à des écoulements et des submersions extrêmement brutaux**. La force du courant génère également un transport solide de matériaux (comme les branchages mais aussi des matériaux beaucoup plus lourds et volumineux comme des voitures), augmentant le risque de dommages humains et matériels et pouvant perturber les écoulements.

#### *Le changement climatique comme facteur aggravant de l'aléa*

De nombreux impacts directement ou indirectement reliés au changement climatique sont susceptibles de **modifier l'aléa inondation** (Quenault et al, 2011) :

1. **La modification des caractéristiques de la pluviométrie, en particulier l'intensité des précipitations et la modification de loi de probabilité des événements exceptionnels.** Ainsi, même dans les régions pour lesquelles une réduction du cumul annuel des précipitations est supposée, une augmentation de la fréquence et de l'importance d'épisodes pluvieux intenses pourrait entraîner une augmentation de l'aléa. Il est important de rappeler que **les projections concernant les précipitations sont plus incertaines que celles concernant la température** en raison de la complexité des phénomènes entrant en jeu ;
2. **L'augmentation des températures entraînant une accélération de la fonte des glaces, et donc une augmentation des flux d'eau dans les rivières,** risque d'encourager la génération d'inondation le long des rivières au régime nival ou glaciaire, comme par exemple en Patagonie chilienne ;

*D'autres facteurs d'aggravation de l'aléa*

Au-delà des caractéristiques propres du bassin versant, **les facteurs humains ou météorologiques sont susceptibles d'aggraver cet aléa**. L'anthropisation du lit des rivières (comprenant par exemple la coupure des méandres, la suppression des zones humides, la construction de ponts ou de buses) modifie l'écoulement dans le lit majeur, voire mineur, et donc la propagation de l'onde de crue. Par exemple, la coupure des méandres d'un cours d'eau se traduit par une augmentation de la pente et ainsi une augmentation des vitesses et du transport solide. La dimension temporelle au regard de la succession ou combinaison d'événements revêt une importance particulière concernant l'aléa inondation. Ainsi le cumul d'épisodes pluvieux peut entraîner la saturation progressive des sols, qui finit par conduire à une inondation pour des cumuls instantanés moyens (par exemple, à Pikine dans la banlieue de Dakar) : **ce n'est pas forcément l'évènement pluvieux le plus important qui va être à l'origine de l'inondation**.

Enfin, les débris et déchets charriés par les eaux en crue sont susceptibles de s'agréger jusqu'à devenir des obstacles à l'écoulement de l'eau (phénomène d'embâcle). La rupture de ces obstacles naturels (débâcle) va modifier la manifestation de l'aléa dans la mesure où, d'une part cette libération importante d'énergie peut aggraver les dégâts de la crue, et d'autre part les débris transportés eux-mêmes sont susceptibles de blesser ou de faucher les passants. Ce type de phénomènes tient une place particulièrement importante dans les pays en développement, en raison notamment du manque ou de la sous-efficacité de la collecte des déchets.

### 3. Une échelle territoriale à adapter

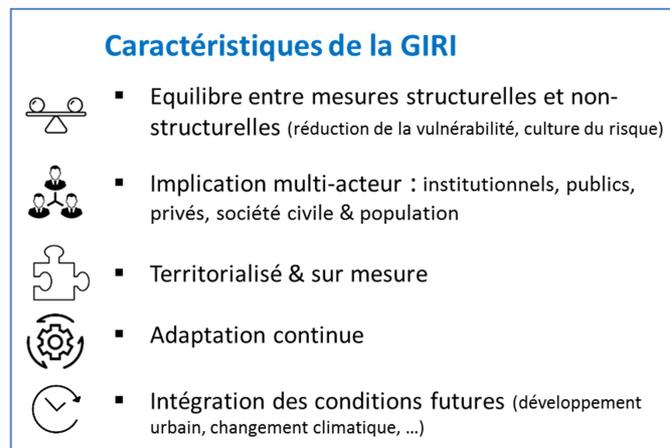
Le diagnostic du risque d'inondation suppose d'identifier l'échelle territoriale concernée. **Le périmètre d'analyse et d'action pour limiter le (ou les) risque(s) d'inondation varie en fonction de l'aléa considéré mais aussi en fonction des enjeux et de leur vulnérabilité**, de manière à intégrer à la fois les enjeux directement touchés (situés en zone inondable) et ceux indirectement touchés (situés en dehors des zones inondables mais dont l'inondation va impacter le fonctionnement – exemple inaccessibilité au site ou coupure d'électricité).

Aussi, l'analyse du seul territoire urbain peut suffire pour les inondations de type ruissellement, soumises à des pluies très localisées sur des bassins versants

restreints. Au contraire, la prise en compte de l'ensemble du bassin versant hydrologique est nécessaire pour les inondations de type crue fluviale : le périmètre d'étude doit alors comprendre une succession de territoires urbains et ruraux, de manière à, à la fois, mieux comprendre le phénomène d'inondation et agir sur l'ensemble des facteurs à l'origine de la crue.

## II. Vers une gestion intégrée du risque d'inondation

Comme précédemment mis en évidence, le risque d'inondation est structurellement systémique et enclin à évoluer au cours du temps, suivant notamment les influences climatiques, géomorphologiques, anthropiques et socio-économiques. Par conséquent, la réponse face à ce risque, ne peut être unique ni définie simplement : elle doit au contraire s'adapter aux spécificités locales et s'intégrer dans un processus d'actualisation continue.



**Figure 7 : Les principales caractéristiques de la gestion intégrée du risque d'inondation**

**La gestion intégrée du risque d'inondation (GIRI) constitue une réponse globale au risque d'inondation** en associant notamment la connaissance et la gestion de l'aléa, la réduction de la vulnérabilité mais aussi l'approche par bassin versant, la volonté politique, la coordination et l'intégration de l'ensemble des acteurs concernés. Elle intègre une dynamique de mise en relation des différentes composantes du risque et des parties prenantes concernées (dont les institutions, le secteur privé, et la société civile).

L'intérêt d'une approche intégrée du risque d'inondation est grandissant. En effet, **les mesures traditionnelles visant à lutter contre les inondations uniquement par l'aménagement d'ouvrages de protection ont dans bien des cas atteint leurs limites**. D'une part, suite à la démonstration de l'insuffisance récurrente de ces seules mesures au regard des aléas exceptionnels qui continuent de toucher même les pays développés malgré les investissements considérables consentis. D'autre part, sur la prise de conscience de la nécessité de développer une culture du risque d'inondation

intégrant sensibilisation et communication, modification de la planification, mesures non-structurelles, gestion de crise, même dans les zones considérées comme protégées.

Plusieurs approches opérationnelles tendant vers la gestion intégrée du risque d'inondation ont été mises en place, essentiellement dans les pays développés. L'une d'entre elles, que nous retiendrons comme référence dans la présente note technique, prend en compte **trois composantes d'une politique de gestion du risque d'inondation, complémentaires et interconnectées : la prévention, la préparation et la culture du risque**. D'autres approches de gestion intégrée du risque d'inondation sont présentées en détails en annexe.

### **1. La prévention du risque d'inondation au cœur de la limitation des dommages**

La prévention du risque d'inondation consiste à **organiser le territoire en vue d'anticiper la survenue d'inondation bien en amont de la situation de crise, de limiter les dommages et de favoriser la résilience**.

La prévention regroupe ainsi différentes actions, aussi bien en termes de **gestion raisonnée de l'occupation des sols**, que de **réduction des vulnérabilités et de protection des populations**. Elles visent notamment à : (Doussin, 2009)

- Limiter l'urbanisation en zone inondable,
- Gérer l'occupation du sol afin d'éviter un accroissement des écoulements et préserver les zones d'expansion de crue,
- Réduire la vulnérabilité des enjeux exposés,
- Protéger les enjeux et les populations par l'investissement dans des ouvrages dédiés,
- Entretien des ouvrages existants.

Elle nécessite donc une bonne connaissance des zones inondables et œuvre à l'amélioration continue de la connaissance et de la compréhension de l'aléa inondation reposant pour partie sur l'acquisition de données hydrologiques sur le long terme.

La démarche de prévention du risque d'inondation suppose également de s'interroger sur **le développement du territoire sur le long terme**, de manière à intégrer dans les réflexions et les actions menées, la croissance démographique, le développement économique du territoire et les éventuels impacts du changement climatique.

Cette démarche doit se bâtir sur la définition d'un niveau de risque acceptable, reconnaissant l'impossibilité de se protéger des événements les plus extrêmes pour lesquels on fera appel de préférence aux mesures de la composante suivante.

## 2. La préparation à la gestion de crise pour faciliter la réaction à la survenue d'une inondation

Cette composante a pour objectif **le renforcement de l'état de préparation aux inondations**, de manière à favoriser :

- **L'anticipation et l'efficacité des actions** de mise en sécurité des populations et des enjeux. La gestion de crise relève autant de l'alerte, de l'intervention des services de secours que de la coordination entre ces différents services, le déploiement des moyens d'intervention, les capacités de communication, etc.
- **Un rapide retour à la normale** des services (eau potable, assainissement, énergie, transport, etc.), des activités et des conditions de vie des populations touchées. Ce volet doit permettre d'éviter qu'une inondation forte ne se transforme en catastrophe ;
- **Une amélioration continue**, en s'inspirant des événements passés pour éviter de reproduire les erreurs commises et combler les manques identifiés. En outre, les catastrophes passées à l'échelle mondiale ont montré que la phase de reconstruction post-catastrophe constitue une opportunité critique pour **reconstruire en mieux et favoriser la résilience des territoires (UNISDR, 2015)**.

Alors que la prévention du risque d'inondation s'applique à l'échelle globale du bassin versant, il est important de focaliser la préparation (intégrant à la fois la prévision et la gestion de crise) en priorité sur les zones où se concentre la vulnérabilité.

## 3. La culture du risque, un préalable indispensable à la réussite opérationnelle d'une gestion intégrée des inondations

L'application sur le terrain du concept de gestion intégrée des inondations n'est pas toujours conforme à la stratégie prévue « sur le papier ». **Pour y arriver, il est nécessaire de renforcer la culture du risque jusqu'à ce que l'ensemble des acteurs concernés**, non seulement les institutions publiques et privées mais aussi la société civile et la population, prennent conscience de l'importance de traiter ces questions, et ce, tout particulièrement dans les pays en développement. Ainsi la motivation des parties prenantes est, dans les faits, plus importante que la manière dont est définie la gestion intégrée du risque

d'inondation. La culture du risque est primordiale dans la mesure où elle permet de : (CEPRI) (Doussin, 2009)

- **Réduire le sentiment global d'angoisse et d'anxiété** en cas de crue ;
- **Adapter les comportements des populations**, gage de réduction des conséquences négatives des inondations ;
- **Assurer une bonne efficacité des dispositifs de gestion du risque** (dispositions de prévention, de préparation, de surveillance, d'alerte et de gestion de crise).

La culture du risque passe par différents niveaux d'appropriation par la population des informations communiquées : (CEPRI)

- 1. La connaissance du risque.** L'information correctement interprétée sur le risque développe un état de connaissance du risque chez des individus. Toutefois connaître le risque n'implique pas le fait de se sentir concerné directement par ce risque.
- 2. La prise de conscience du risque.** Elle se caractérise par une appropriation personnelle de l'information sur le risque. Prendre conscience du risque d'inondation, c'est le prendre en compte comme un événement pouvant avoir un impact sur sa sphère personnelle ou collective (elle est d'autant plus présente chez les individus ayant vécu une inondation). Toutefois, la prise de conscience de ce que représente le risque pour soi ou pour un groupe ne conduit pas forcément à un comportement adapté pour se protéger face à ce risque.
- 3. L'acceptation du risque.** Elle amène les personnes à être demandeuses de plus d'informations, notamment d'une information ciblée sur le côté opérationnel, comme, par exemple, les moyens de s'informer en cas d'alerte. Elle est nécessaire pour initier un réel changement de comportement chez l'individu.
- 4. L'adaptation des comportements au risque.** Ceux-ci peuvent s'inscrire selon trois temps distincts : en anticipation de l'évènement (réduction de sa vulnérabilité), au moment de la crise (réaction adaptée pour limiter l'impact de l'inondation), et en post crise (facilitation du retour à la normale).



**Figure 8 Illustration de l'importance de comportements adaptés au risque d'inondation (CEPRI)**

# La mise en œuvre d'une prévention efficace du risque d'inondation

---

## I. Les outils de réduction des vulnérabilités

La réduction des vulnérabilités d'un territoire est une composante essentielle de la prévention du risque d'inondations. Elle présente l'avantage de pouvoir être mise en place avec des investissements moindres, en comparaison de ceux pour des mesures structurelles (telles que les digues, les bassins de stockage et les réseaux d'évacuation d'eaux pluviales). Mais **l'organisation institutionnelle est un préalable indispensable**, en particulier la coopération des institutions impliquées, la capacité des institutions à faire respecter les démarches instaurées, et l'adéquation des compétences du personnel avec les outils mis en place. De plus, la pérennité de sa mise en œuvre implique des moyens techniques, financiers, organisationnels, institutionnels dans la durée, pouvant générer au global des coûts importants.

Trois grandes familles d'outils de réduction de la vulnérabilité des enjeux peuvent être identifiées, relevant chacune de mesures non-structurelles. Elles sont présentées en détails dans les sous-chapitres suivants.

### 1. Le recensement des enjeux

Le recensement des enjeux consiste à formaliser la connaissance de l'occupation des sols, de manière à identifier les zones les plus vulnérables au risque d'inondation, et à caractériser ces vulnérabilités. L'objectif final d'une telle démarche est d'une part **de cibler les zones où agir en priorité**, et d'autre part de **fournir une réponse en matière de réduction de la vulnérabilité adaptée au contexte local et des spécificités du territoire**.

Parmi les outils disponibles pour mener à bien ce travail, nous pouvons citer en particulier :

- **L'analyse d'images satellites** : disponibles dans la majorité des pays, ces images permettent d'identifier sommairement l'occupation des sols, et notamment de distinguer les zones urbanisées de celles non-urbanisées. Elles peuvent fournir des premières informations sur les types de bâtis.
- **Les visites de terrain** : le déplacement sur le terrain est nécessaire pour analyser finement la vulnérabilité d'un territoire. Les informations recueillies, telles que la typologie des bâtiments, les matériaux de

construction généralement utilisés, le nombre d'étages, la surélévation du rez-de-chaussée, sont autant d'éléments indispensables. La vérification de la représentativité des zones visitées à l'échelle du territoire d'étude et la formation même sommaire des personnes qui en auront en charge sont des conditions nécessaires pour la bonne exploitation des données recueillies.

- **Les enquêtes auprès de la population locale et/ou la cartographie participative** : ces démarches partent du principe que les communautés locales disposent d'une bonne connaissance du terrain, et sont donc les mieux placées pour rendre compte des problématiques locales. Appliquée à la problématique du risque d'inondation dans les pays en voie de développement, l'exploitation des informations collectées permet notamment d'aider à évaluer les dégâts générés par une inondation, et d'identifier les zones les plus vulnérables. Elles permettent ainsi d'améliorer concrètement la connaissance du risque sur le territoire.

La cartographie participative va plus loin que les simples enquêtes en ce sens où elle consiste à confier à une communauté de personnes (regroupant par exemple des membres de la société civile, des ONG, des étudiants, des membres des gouvernements locaux) l'élaboration d'une cartographie sur une thématique donnée.

Ces démarches (enquêtes et cartographie participative) doivent être vues comme des outils complémentaires aux visites de terrain, mais qui ne peuvent pas s'y substituer dans la mesure où ces visites sont indispensables pour vérifier la fiabilité des données collectées auprès de la communauté locale.

- **Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)** : la synthèse des informations collectées sous un système SIG permet de générer tout type de cartes en lien avec la vulnérabilité, qui permettra ensuite de les croiser avec les informations sur l'aléa pour analyser le risque d'inondation.

Au-delà des limites liées à la manipulation des outils (moyens matériels – ordinateurs, électricité, logiciels SIG – et besoins de compétences en SIG), **le recensement des enjeux nécessite d'être régulièrement remis à jour, pour prendre en compte les évolutions du territoire.**

## 2. La planification urbaine et la gestion de l'occupation des sols

Les politiques d'aménagement du territoire, par leur interaction sur le territoire, peuvent contribuer à réduire le risque d'inondation. **La planification urbaine doit aider les villes à anticiper la survenue d'une inondation bien en amont d'une situation de crise et à maîtriser au mieux leur croissance et la rationalisation de leurs services** (transport, énergie, déchets, eau potable, assainissement, etc.) par la mise en place de schémas directeurs et de plans d'aménagement urbain. **L'intégration des projections de développement du territoire est fondamentale dans cette démarche** (au niveau démographique et économique).

La gestion de l'occupation du sol doit s'organiser sur :

- Les zones d'enjeux et vulnérables (essentiellement urbaines) pour permettre, si possible, l'étalement des eaux de crue, malgré le développement urbain ;
- Les zones semi-urbaines ou agricoles en amont pour ralentir les écoulements et écrêter les crues.

Les mesures envisageables s'attachent aux biens existants et aux biens futurs issus de la croissance urbaine sur le territoire, et consistent par exemple à : (Doussin, 2009)

- **Restreindre ou interdire de nouveaux aménagements dans les zones inondables.** Ces mesures peuvent avoir des impacts dans les domaines sociaux et économiques (problème du renouvellement de la population, fragilisation économique des territoires, etc.).
- **Améliorer l'aménagement des zones amont du bassin versant.** Elle peut passer, par exemple, par la limitation de l'imperméabilisation des sols, ou l'adaptation des pratiques agricoles (par exemple, la délimitation des parcelles par des haies transversales). De nombreuses études scientifiques ont montré que la gestion de l'occupation des sols sur les bassins versants est efficace pour des crues de fréquences élevées (période de retour jusqu'à 25 ans environ). Au-delà, les effets sont moindres voire négligeables.
- **Supprimer les biens vulnérables.** Ces mesures sont très difficiles à mettre en œuvre : les populations qui s'installent dans les zones à risque, le font la plupart du temps parce que ces zones sont les seules accessibles d'un point de vue foncier. La réponse à apporter doit s'inscrire dans le cadre plus général d'une politique d'aide au logement : la relocalisation des familles en logement illégal doit leur donner des alternatives, et le « squat » immédiatement détruit pour ne pas laisser la possibilité à une autre famille de venir s'installer. Ces actions s'organisent dans un cadre de concertation avec les populations ciblées, et avec l'implication d'associations ou de représentations de quartiers qui

sensibilisent les populations aux risques induits et travaillent à rendre acceptable le relogement.

La difficulté pour les pays en développement au regard de la planification est double. D'une part, il est nécessaire de pouvoir s'appuyer sur un cadastre et des règles de propriété foncière claires, ainsi que sur des mesures de contrôle efficaces et dissuasives de la part des services d'urbanisme. D'autre part, on est souvent confronté à l'insuffisance et à des difficultés d'accès à des données de projections du développement démographique et économique. Les recensements passés de la population constituent des sources d'informations utiles pour identifier et quantifier des tendances d'évolution.

### **3. La réduction des vulnérabilités des bâtiments**

**La diminution des vulnérabilités des bâtiments vise à réduire les dommages générés par l'entrée des eaux, et si possible, à limiter leur intrusion.**

Elle se traduit notamment par **la mise en place de normes de constructions**, pour les nouveaux bâtiments, ou la reconstruction ou rénovation de bâtiments existants. Elles peuvent par exemple demander la surélévation du rez-de-chaussée, la mise sur pilotis des bâtiments, la construction d'au minimum un étage, ou bien définir le type de matériau de construction à utiliser. Ces normes sont à adapter aux caractéristiques de l'aléa du territoire considéré ainsi qu'au contexte local (en prenant par exemple en compte la disponibilité et les réseaux d'approvisionnement des matériaux de construction recommandés). Comme précédemment, la difficulté de ce type de mesure réside dans la pérennité de leur mise en place et le défi de leur respect par la population.

## II. Les outils de gestion de l'aléa

### 1. La connaissance de l'aléa

La connaissance de l'aléa a pour objectif de :

- Identifier les zones inondables pour différentes périodes de retour, y compris les inondations exceptionnelles pour lesquelles les zones inondées sont souvent méconnues voire inconnues dans les pays en développement ;
- Caractériser les inondations en termes de vitesse de courant, hauteur de submersion et durée de submersion.

Une meilleure compréhension des phénomènes d'inondation et de leurs caractéristiques est un **préalable fondamental pour adapter les réponses en vue de limiter le risque d'inondation**. Cette connaissance permet ainsi **d'identifier les mesures de réduction de la vulnérabilité pertinentes pour le territoire, et de dimensionner correctement les ouvrages de protection**. Par exemple, la mise sur pilotis d'habitations n'est pertinente que sur des zones souvent inondées, avec peu de courant, voire avec une stagnation des eaux.

Les outils disponibles pour améliorer la connaissance de l'aléa à l'échelle d'un territoire comprennent notamment :

- **Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)** : il s'agit d'une représentation du relief d'une zone, indiquant l'altitude des différents points d'un maillage choisi (plus ou moins précis en fonction des besoins). En matière de risque d'inondation, la connaissance de la topographie permet d'identifier les zones inondables à partir de la connaissance d'une hauteur de submersion donnée (issue par exemple d'un modèle hydraulique). Sur les zones inondables, il est préférable qu'elle soit déterminée avec précision, à + ou - 20cm.

Si un MNT n'est pas directement disponible sur un territoire donné (ou que sa précision n'est pas suffisante), la topographie peut être étudiée à partir de l'analyse d'images satellites à très haute définition, ou par l'utilisation de capteurs sur moyens aéroportés ou héliportés, de type LIDAR (qui utilise la lumière pour mesurer les distances).

- **Les outils de mesure pluviométrique et hydrologique au sol** : ces outils, utilisés également en support de la prévision des phénomènes d'inondation (voir chapitre suivant sur la préparation), permettent d'engranger quantité de données locales sur l'aléa inondation, en particulier : les lames d'eau précipitées, les débits et les hauteurs d'eau des rivières. Il existe différents types d'appareils, dont en particulier :
  - **Les pluviomètres** ou les pluviographes qui recueillent les précipitations dans un récipient collecteur, ce qui permet de

mesurer la lame d'eau précipitée par unité de surface sur un intervalle de temps donné.

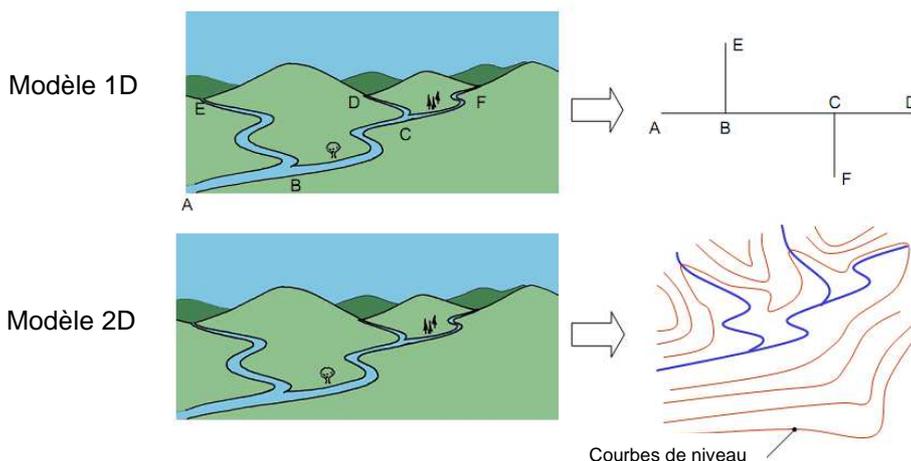
- **Les limnimètres** qui se présentent sous la forme d'une échelle graduée placée verticalement ou inclinée, permettant la lecture directe de la hauteur d'eau d'un cours d'eau, parfois couplés à des dispositifs d'acquisition automatique de la mesure.

Pour être fiables, ces outils de mesure doivent être placés à des endroits représentatifs des phénomènes locaux et la fréquence d'échantillonnage des données doit être suffisante pour suivre les phénomènes tout au long de leur occurrence (pluie ou crue). Notons cependant que ces dispositifs sont souvent défectueux ou inaccessibles lors des événements extrêmes.

Certains appareils peuvent être installés depuis plusieurs décennies : ils fournissent alors une base de données historique, qui, après traitement statistique, permet de construire :

- **des courbes IDF (Courbe Intensité-Durée-Fréquence)**. Ce sont des courbes illustrant graphiquement et de manière synthétique le régime pluviométrique en un point donné en établissant les relations entre les intensités, les durées et les fréquences des pluies. Elles sont utilisées en particulier pour estimer des ruissellements pour un type de pluie donné, et pour dimensionner des ouvrages. Dans de nombreux pays en développement, de telles courbes existent déjà, mais elles ont souvent été construites avant 1980, par l'ORSTOM ou des organismes équivalents. Il est toujours utile de les mettre à jour en intégrant les dernières chroniques de mesures.
  - **des pluies de projet** : il s'agit d'événements pluvieux artificiels représentatifs du territoire analysé et pour lesquels la période de retour est connue. Les pluies de projet sont utilisées en entrée des modèles hydrauliques mais ont le défaut de ne pas représenter l'ensemble du champ des possibles.
  - **des courbes QdF (Débit-durée-fréquence)**. Ces courbes synthétisent le régime hydrologique des cours d'eau et la résultante statistique des processus de transformation du régime des pluies sur un bassin versant en régime des débits sur une rivière.
- **Le modèle hydraulique de simulation** : il permet d'analyser la propagation des crues dans le réseau hydraulique et de caractériser en termes de hauteur de submersion et de vitesse d'écoulement les débordements éventuels. Pour être fiables, les modèles demandent à être calés par exemple à partir de l'historique des mesures des débits ou des hauteurs d'eau, et des laisses de crues.
- Il existe des modèles dits « 1D » (1 dimension modélisée) qui sont le plus habituellement utilisés car plus simples à mettre en œuvre (et nécessitant moins de données géométriques et topographiques) que les

modèles « 2D » (2 dimensions modélisées) (Figure 9). Un modèle 1D fait l'approximation que la vitesse de l'écoulement est identique sur toute la section mouillée de ce dernier. Pour des simulations où les écoulements dans le lit majeur sont beaucoup plus lents et ont des directions différentes que ceux du lit mineur, il existe des modèles 1D complétés par des casiers latéraux ou des modèles 2D qui sont plus difficiles à caler. On utilise ces modèles 2D surtout pour étudier plus en détails les phénomènes d'inondation sur une plaine inondable, et pour le côté pédagogique (car dynamique) de visualiser les résultats.



**Figure 9 : Illustration d'un modèle 1D (en haut) et d'un modèle 2D (en bas) (Guinot, 2003)**

- **La connaissance informelle de la population et des acteurs locaux impliqués** : comme pour le recensement des enjeux, la population locale constitue une source d'information également en matière de connaissance de l'aléa, en particulier concernant : la hauteur d'eau maximale d'une inondation, la durée approximative de l'inondation, une évaluation qualitative des courants. Cependant, cette démarche est limitée par la mémoire de la population : si celle-ci a été confrontée récemment à une inondation, les populations pourront apporter des éléments d'informations relativement fiables, ce qui ne sera pas forcément le cas pour des inondations ayant eu lieu il y a plusieurs années. Aussi, il est indispensable de coupler cette démarche à l'utilisation d'autres outils précédemment mentionnés, de manière à vérifier les informations collectées.
- **Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)** : ce sont des outils de représentation cartographique facilitant la présentation des résultats des analyses de l'aléa et de la vulnérabilité sur un territoire donné.

### **Encadré 3 : Les projections climatiques et leur intégration dans les outils de gestion du risque d'inondation**

L'étude des changements climatiques s'appuie sur la modélisation du système terrestre, par le biais de modèles climatiques. Les principales incertitudes de ces modèles s'attachent à : (MétéoFrance)

1. **Les limites de nos connaissances scientifiques des phénomènes en jeu** : différentes composantes du climat, et leur interaction sont incluses dans les modèles mais certains processus restent encore complexes à modéliser, en particulier les nuages (GIEC, 2013). De manière générale, les précipitations sont moins bien modélisées que l'évolution de la température moyenne. Dans son dernier rapport, le GIEC souligne toutefois **une amélioration des modèles climatiques globaux et régionaux**, grâce notamment à l'introduction de processus complémentaires (tels que le cycle du carbone, la calotte glaciaire, et les interactions chimie-climat), et à l'affinage du maillage (en 2013, de l'ordre de 150km pour les modèles globaux, et 25 km pour les modèles régionaux) (MétéoFrance).

2. Les incertitudes socio-économiques sur les comportements des sociétés, et les choix des sociétés (choix politiques) : elles tendent à augmenter avec le temps sur l'horizon temporel de modélisation.

Malgré ces incertitudes, **les résultats des modèles climatiques permettent de dégager des tendances d'évolution climatique**. Le GIEC met également en évidence **la valeur ajoutée des modèles régionaux**, par rapport aux modèles globaux, **en particulier dans des zones influencées par la topographie, par des phénomènes rapides et/ou localisés**.

La capacité prédictive à l'échelle locale reste entachée d'incertitude et les impacts sur le régime des cours d'eau est pour une grande partie occulté par l'incertitude sur la connaissance même de ces régimes. Il semble difficile de traduire leurs résultats et tendances en données d'entrée quantifiées et précises (telles que l'augmentation de la fréquence d'une pluie donnée), pourtant nécessaires pour les outils de gestion du risque d'inondation, comme l'Analyse Coût Bénéfice ou ACB (cf. encadré 4). Pour cet outil, il peut être par exemple très intéressant de réaliser un test de sensibilité, en posant des hypothèses maximisantes et minimisantes de l'augmentation de la fréquence d'une pluie donnée, de manière à évaluer l'influence de ce changement sur les résultats de l'ACB.

## 2. Les mesures structurelles de protection contre les inondations

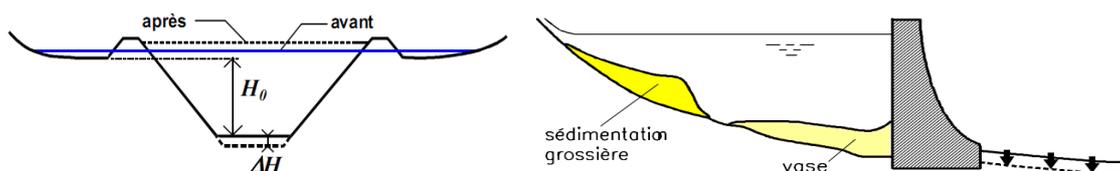
Selon l'UNISDR (2009), les mesures structurelles font référence à « **toute construction physique visant à réduire ou à éviter les éventuels impacts liés à des aléas, ou la mise en place de mesures d'ingénierie** » permettant de renforcer la capacité de résistance et la résilience de systèmes ou de structures face aux aléas. L'objectif principal est de protéger les biens et les personnes situés dans les zones d'expansion des crues, mais bien souvent, la construction de telles mesures a également pour objectif de permettre le développement urbain dans des zones soumises à l'aléa.

Les pays en développement ont tendance à concentrer leurs efforts et leurs financements sur la construction de telles mesures, alors que l'amélioration des connaissances et la réduction des vulnérabilités constituent le principal enjeu en vue de réduire le risque d'inondation.

### *Présentation et limites des mesures structurelles*

On distingue en général deux types de mesures structurelles (Sayers al. 2013) :

- **Les mesures structurelles « lourdes »** comprenant la construction d'aménagements importants de type :
  - **Infrastructures de drainage** pour faciliter l'évacuation des eaux pluviales (réseaux et bassin de stockage) ;
  - **Digues** visant une protection rapprochée des enjeux, en diminuant le champ d'expansion des crues, avec une augmentation des hauteurs et des vitesses dans le lit endigué ;
  - **Barrages** assurant un écrêtement à l'amont des enjeux, en retenant l'eau. Ce type de retenue joue le rôle d'un décanteur : le ralentissement de la vitesse entraîne un dépôt des matériaux solides transportés par le cours d'eau, qui varie en fonction de la granulométrie des matériaux ;
  - **Modifications du cours d'eau** visant à accélérer les écoulements au droit des enjeux (ex : augmentation artificielle de la section du lit mineur, suppression des méandres).



**Figure 10 : Illustration d'un endiguement (gauche) et de la construction d'un barrage (droite) (Degoutte, 2012)**

Les mesures structurelles lourdes ont été remises en question dans les pays développés, en raison d'une part de **la preuve de l'inefficacité de telles mesures pour des crues majeures**, en particulier quand ils se généralisent, et d'autre part d'une contestation scientifique et publique de **leurs impacts écologiques, économiques et morphologiques (Doussin, 2009)**.

- **Les mesures structurelles plus « douces », appelées également « ralentissement dynamique »**, qui visent à ralentir (et non accélérer) les débits et à favoriser leur écrêtement à l'amont des zones de concentration des enjeux. Elles comprennent l'installation de bassins de retenue, la préservation des zones d'expansion, la gestion alternative des eaux pluviales (et la favorisation de l'infiltration), le travail sur la rugosité des berges pour atténuer l'accélération des flux, etc. Ces mesures facilitent ainsi les synergies avec des démarches à visée écologique (restauration de zones humides, préservation des habitats d'espèces aquatiques) mais peuvent néanmoins présenter des risques sur les milieux environnants en cas de dysfonctionnement ou ruptures, bien qu'ils soient moindres par rapport aux mesures lourdes (**Doussin, 2009**).

#### *Une nécessaire meilleure conception des ouvrages*

Quel que soit l'ouvrage de protection envisagé, le dimensionnement passe par 1) le choix de la période de retour de l'événement pour lequel on souhaite se protéger, et 2) la sélection d'une méthode de dimensionnement adaptée aux outils disponibles et à la connaissance de l'aléa au droit où on souhaite construire l'ouvrage. Les différentes méthodes de dimensionnement sont présentées en annexe de ce rapport.

Les bonnes pratiques pour concevoir et dimensionner des infrastructures de protection contre les inondations consistent en particulier à :

- **Analyser l'ensemble des conséquences induites en amont** (pour le cas de retenue d'eau) **et en aval de la zone concernée** (pour les cas d'accélération des écoulements au droit des enjeux). La solidarité amont-aval passe par l'implication conjointe des différents acteurs. Leur collaboration peut être source d'importants bénéfices pour les différentes parties. Par exemple, pour réduire le risque d'inondation d'une zone urbanisée, il peut être plus pertinent et plus efficient de financer des mesures permettant de limiter les apports provenant des zones amont, plutôt que se restreindre à la construction d'ouvrages de drainage dans la zone urbanisée elle-même.
- **Analyser les impacts de l'ouvrage pour un événement de période de retour dépassant celle ayant servi au dimensionnement**, en particulier par la simulation en valorisant les modèles utilisés pour le dimensionnement.

- **Analyser les impacts d'un dysfonctionnement de l'ouvrage**, lié notamment à une réduction de capacité hydraulique de ces ouvrages (du fait d'embâcles, ou d'infrastructures linéaires les traversant, etc.).
- **Réaliser une analyse coût-bénéfice de l'infrastructure** (encadré 4).

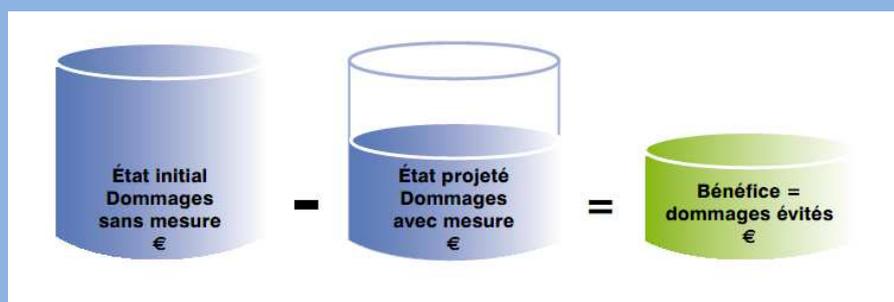
D'une manière générale, il est également essentiel d'inscrire le projet d'infrastructure dans une démarche de gestion intégrée des inondations ayant pour objectif général de réduire les dommages aux personnes et aux biens, et devant porter des améliorations sur l'état des connaissances, la réduction des vulnérabilités, la préparation, et le renforcement de la culture du risque.

#### Encadré 4 : Analyse Coût-Bénéfice

Une Analyse Coût-Bénéfice (ACB) vise à évaluer la faisabilité économique d'un projet en comparant ses coûts de mise en place (investissement initial et coûts de fonctionnement) aux dommages qu'il permet d'éviter. Il s'agit d'élaborer des arguments chiffrés et consolidés pour justifier la réalisation des aménagements (par exemple pour la recherche de financements).

Les recommandations générales et bonnes pratiques de la réalisation de ce type d'analyse sont décrites notamment dans le document de communication du CEPRI.

L'ACB repose sur la comparaison entre un état initial (sans mesure) et un état projeté comprenant la mise en place de mesures complémentaires (ex : aménagement d'un ouvrage de protection contre les inondations). La différence entre ces deux états correspond aux dommages évités grâce à la mise en place du projet, c'est-à-dire ses bénéfices.



**Figure 11 : Principe de calcul des bénéfices liés à l'aménagement de mesures (Source : CEPRI)**

La comparaison entre ces deux états est réalisée **pour plusieurs évènements avec des périodes de retour diverses**. En particulier, il est indispensable d'intégrer une crue fréquente. En effet, dans certains cas, les principaux bénéfices de ce type d'infrastructures sont générés pour les évènements les plus fréquents : ce sont eux qui vont peser le plus dans l'ACB, car bien que les

dommages évités soient plus faibles en absolus que ceux d'une crue décennale, ils interviennent beaucoup plus régulièrement. En complément, il peut être intéressant d'intégrer un événement de très grande ampleur (période de retour de 1000 ans) comme référence des dommages maximaux potentiels. L'ACB étant réalisée sur **un horizon temporel défini**, la comparaison doit s'établir à la fois pour **la situation actuelle** (avec un urbanisme actuel) et pour **la situation future, prenant en compte la croissance urbaine** sur l'horizon temporel choisi ainsi que les éventuels impacts liés au changement climatique.

### *L'importance de la maintenance des ouvrages*

Au-delà de leur conception et de leur construction, le problème de la maintenance des ouvrages de protection est un aspect fondamental de la prévention des risques d'inondation dans la mesure où un mauvais entretien peut conduire à l'apparition de défaillances dans le fonctionnement des ouvrages, voire même à la probabilité de rupture des ouvrages.

**En ce qui concerne les infrastructures de type drainage, le problème majeur est le risque de réduction de la capacité d'évacuation.** Cette dernière peut être liée à un problème d'envasement ou d'accumulation de déchets. Elle peut également être causée par des constructions coupant l'infrastructure (conduites d'eau, buses, ponts, etc.) et provoquant une réduction de la capacité hydraulique. Dans la plupart des pays en développement, les volumes de déchets transportés par les crues sont importants (arbres, voitures, vélos, cadis, etc.), et peuvent provoquer des embâcles au sein des infrastructures de protection. Même une maintenance qu'on pourrait appeler préventive, qui consisterait à nettoyer juste avant la crue les cours d'eau ou les infrastructures de drainage, pourrait rester sans effet : les déchets pouvant se retrouver piégés sont véhiculés par les eaux depuis l'amont des bassins versants. Pour limiter ce risque de réduction de la capacité d'évacuation, il faut notamment s'assurer que les infrastructures de drainage aient une taille importante et une géométrie la plus régulièrement profilée possible, et disposent d'une pente d'au moins 1/1000 (pour provoquer un débit d'autocurage évitant la sédimentation).

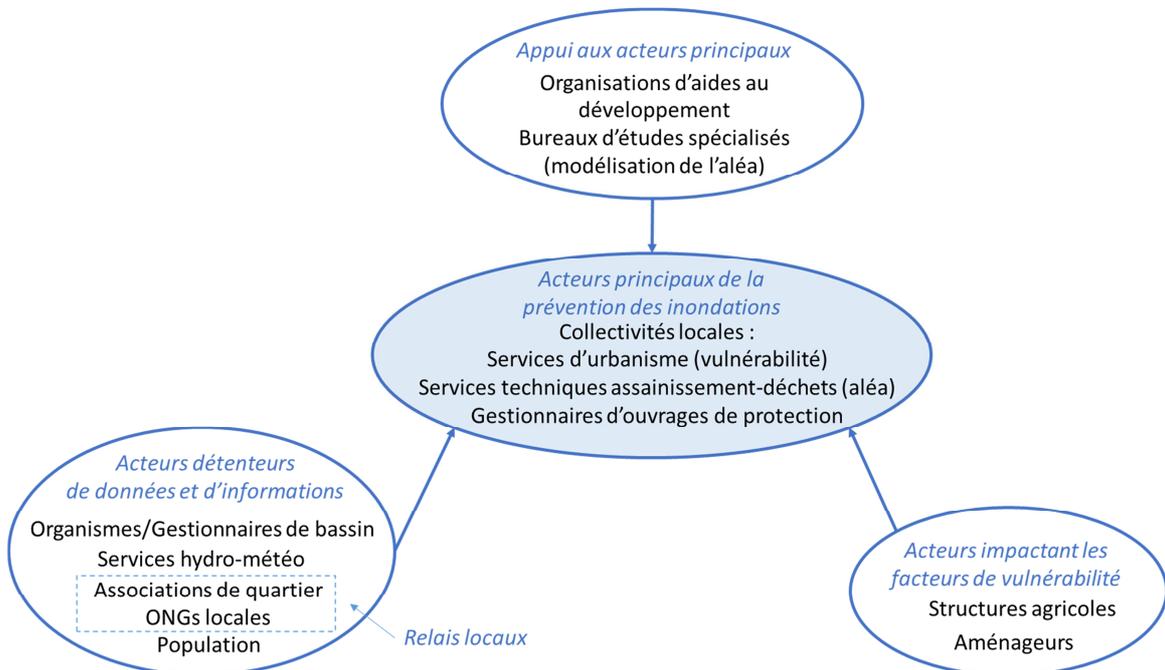
**En ce qui concerne les digues et les barrages, la problématique de la maintenance est liée à la solidité de l'ouvrage** (et donc aux matériaux qui le constituent) **et à sa vétusté.** Ici, il s'agit plutôt de vérifier régulièrement qu'il n'y a pas de végétations (arbres) ou d'usages incontrôlés des talus risquant de

fragiliser la structure de l'ouvrage. Il s'agit aussi de faire vérifier régulièrement l'ouvrage par un spécialiste en génie civil, et si possible avoir des plans de l'ouvrage et savoir de quoi il a été constitué.

Les problèmes de maintenance doivent être aussi analysés par le prisme de la propriété et de la police : il faut définir précisément les acteurs impliqués, ainsi que les actions (entretien, restauration, surveillance) à la charge de chacun. Il faut enfin s'assurer régulièrement que chaque partie prenante a connaissance de ses responsabilités, et les accepte, pour assurer le bon fonctionnement de l'ouvrage dans le temps.

### III. Les institutions à impliquer dans la prévention du risque

Les institutions, locales ou non, à impliquer dans la prévention du risque d'inondation dépendent évidemment du contexte local. Il est toutefois possible de dresser un bilan général des acteurs susceptibles d'être impliqués : celui-ci est présenté dans la Figure 12.



**Figure 12 : Synthèse des types d'acteurs principaux susceptibles d'être impliqués dans la prévention du risque d'inondation d'un territoire**

## Une meilleure préparation à la crise

---

Dans le contexte des inondations, la préparation passe notamment par **la mise en place de systèmes d'alerte**. Selon l'UNISDR, ces systèmes rassemblent « **l'ensemble des capacités nécessaires pour produire et diffuser en temps opportun, des bulletins d'alerte permettant à des individus, des communautés et des organisations menacées par un aléa, de se préparer et d'agir de façon appropriée et en temps utile** » (UNISDR, 2009). Les systèmes d'alerte s'appuient à la fois sur des prévisions météorologiques et des prévisions de crue.

Mais l'intérêt de ces prévisions, dans le cadre de la gestion du risque d'inondation, réside essentiellement dans **la mise en place d'actions associées au niveau de risque prévu, et définies en amont de la crise dans un document de planification** de type plan de contingence. Ces actions comprennent notamment l'information des acteurs de la gestion de crise et de la population, l'évacuation des secteurs les plus à risque, la mise en place de « petites » mesures structurelles par la population pour réduire la vulnérabilité des bâtiments (par exemple, l'installation de batardeau ou la mise en place de sacs de sable pour empêcher l'eau d'entrer dans les bâtiments), et de manière plus générale la coordination et la communication entre les acteurs impliqués dans la gestion de crise.

Ainsi, pour assurer un système d'alerte des crues efficace, il est indispensable de :

- Concevoir le système sur la base de la compréhension de l'aléa climatique auquel est soumis le territoire, et de sa vulnérabilité face à cet aléa ;
- Trouver un équilibre entre les informations transmises à la population et celles aux services concernés par la gestion de crise ;
- Organiser les structures de base de manière à ce que les rôles et les responsabilités de chacun soient bien établis, partagés et acceptés en amont de la crise. Ceci peut être complexe, dans la mesure où plusieurs ministères peuvent gérer des responsabilités distinctes dans le cadre d'activités liées à la prévision et à l'annonce des crues.

Il convient cependant de rappeler que le délai d'anticipation potentiel des crues varie fortement en fonction de la taille du bassin versant, et du type de crue. Dans le cas des crues éclairs, où la cinétique de l'évènement est extrêmement rapide, le temps disponible entre le moment d'une prévision fiable et l'occurrence de l'évènement est bien souvent de moins de 1 heure ce qui reste

très court pour activer un processus efficace d'alerte – évacuation. S'il permet de réduire le risque léthal, il n'a que peu d'effet sur la réduction des dommages économiques.

## I. Les outils de prévision

### 1. La prévision météorologique

En matière de gestion du risque d'inondation, la prévision météorologique permet de prévoir les épisodes pluvieux à venir sur un territoire donné, et dans la mesure du possible de les quantifier (en termes d'intensité, de durée, de hauteur d'eau précipitée, etc.). Les outils de mesure météorologiques au sol (détaillés dans le chapitre précédent sur la prévention) sont également utilisés en support de la prévision : ils permettent d'engranger quantité de données locales sur l'aléa inondation et, en fonction de la densité d'appareils installés, offrent une vision de la variation spatio-temporelle des événements météorologiques. En complément du réseau au sol, les prévisions peuvent être réalisées à différentes échelles :

- **La prévision numérique, à l'échelle d'une nation voire d'un groupe de nations.** Elle s'appuie sur **des modèles de prévision** sophistiqués utilisant de gros calculateurs. Les pays en développement n'ont en général pas les ressources (techniques, humaines) pour faire tourner de tels modèles. Cependant la nécessité, pour tous les modèles déjà mis en œuvre, de résoudre le problème de la prévision à l'échelle de l'ensemble du globe rend ces modèles utilisables par n'importe quel pays qui pourra préférer utiliser des modèles déjà éprouvés (quitte à l'améliorer en fournissant des données supplémentaires sur son territoire), plutôt que de développer à grand frais son propre modèle.  
De façon générale, des progrès considérables ont été accomplis dans l'amélioration des scores de la prévision numérique, bien que les précipitations restent difficiles à reproduire du fait de l'extrême variabilité spatiale et temporelle de ce paramètre. Dans la prévision des événements pluvieux forts ou extrêmes, un modèle régional permet une mise en alerte d'un territoire avec une grande pertinence. Cependant, un événement pluvieux fort ou extrême est le plus souvent localisé dans l'espace et le temps, ce que le modèle numérique a du mal à préciser. C'est pourquoi la prévision numérique doit être relayée par la prévision immédiate.
- **La prévision immédiate à une échelle plus locale.** Elle repose sur l'extrapolation de l'imagerie fournie par les satellites météorologiques géostationnaires et par les radars météorologiques.
  - **L'observation satellitaire :** Les satellites géostationnaires fournissent des images qui cartographient en permanence la

couverture nuageuse, et qui permettent d'observer son évolution et son déplacement, et d'identifier les zones de convection nuageuse les plus actives. Le potentiel prédictif de l'imagerie des satellites géostationnaires est particulièrement évident dans le cas des cyclones (systèmes pluvieux organisés, à cycle de vie long – semaines – et à déplacement assez prévisible) à partir du suivi des images successives du satellite.

- **Le radar météorologique** : il est l'instrument par excellence de surveillance hydrométéorologique et d'alerte aux inondations. Il est l'outil central de la prévision immédiate, en servant à :
  - établir des statistiques de pluie, à identifier les zones les plus vulnérables en relation avec la topographie et l'urbanisation, et à dimensionner des ouvrages pour le réseau d'assainissement (dimensionnement de collecteurs et de bassins de rétention) ;
  - alimenter en données une plateforme de service qui pourrait (sous réserve de la mise en place d'un service de protection civile et de l'élaboration de plans de contingence) élaborer en temps réel des diagnostics de dangerosité et envoyer des alertes appropriées aux équipes d'astreinte.

Les principaux types de radar utilisés dans le domaine météorologique sont présentés en annexe de ce document.

## 2. La prévision des crues

En complément de la prévision météorologique, il existe des systèmes de prévision de crue. Ils permettent de fournir aux différents acteurs de la gestion de crise (autorités, organisme de gestion de l'eau, services de transport, services de télécommunications, services de sécurité publique, services de santé) des informations pour qu'ils se préparent à la crise, et sachent comment réagir. (OMM, 2011)

Selon l'OMM, un système de prévision des crues efficace se compose des éléments suivants :

- **Des prévisions spécifiques** concernant les précipitations en termes de quantité et d'échéance, pour laquelle la prévision numérique est indispensable ;
- **Un réseau de stations hydrométriques** (manuelles ou automatiques) reliées à un centre de commande par tout type de télémessure ;
- **Un logiciel de modélisation des prévisions de crues**, relié au réseau d'observation et fonctionnant en temps réel ; de plus en plus, on essaie aujourd'hui d'aller vers une prévision des zones inondées mais la difficulté est importante ;

- **Une chaîne d'alerte**, activée lorsqu'un évènement d'ampleur significative survient ou est imminent. Il est essentiel de vérifier qu'il s'adresse à des acteurs qui ont un plan d'action et qui ont la capacité opérationnelle de l'exécuter.

## II. Les outils de planification de crise

La planification est un outil essentiel de la gestion de crise, dont le principal objectif est de rendre les opérations de secours efficaces en : (Ledoux, 2006)

- Garantissant une mobilisation et une mise en place rapide des moyens de secours disponibles ;
- Fixant à l'avance la ligne de commandement et le partage des responsabilités.

La planification d'une situation de crise à l'échelle nationale ou locale peut se traduire sous la forme d'un **plan de contingence** (organisation des secours). Ce type de plan doit définir de manière claire, précise et concise, les rôles et les responsabilités des différentes institutions impliquées, mais aussi les outils à mobiliser et les procédures à mettre en place en cas de crise (ONU/BCAH, 2008). De nombreux guides d'élaboration de plan de contingence existent, issus des organismes des Nations Unies ou d'autres organisations telles que la Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge. Mais il faut garder en mémoire qu'un plan de contingence doit être adapté à la spécificité du risque d'inondations sur le territoire donné, en termes d'aléa et de vulnérabilité. Nous retiendrons cependant les quelques préconisations suivantes :

- **Gérer la crise par étapes croissante de mobilisation** avec un déclenchement séquentiel qui soit le produit de **l'autorité coordinatrice** (ex : Préfecture ou Primature) et non celui des fournisseurs d'information (ex : services météorologiques) ;
- **Réfléchir à une échelle pertinente** : nationale pour les pays en ayant les moyens, régionale voire même internationale pour les crises majeures ;
- **Prendre en compte les moyens de communication** en vue de la coordination des acteurs et de la diffusion de l'information (ex : poste de commandement de crise) ;
- **Prévoir l'organisation des secours et de l'évacuation, et recenser les moyens et équipements disponibles.** Le secours est généralement assuré par les pompiers : ils disposent pour cela d'équipements tels que des camions, des échelles voire des embarcations flottantes, pour ramener les personnes sinistrées en lieux sûrs. La mobilisation d'ambulances permet d'assurer les premiers soins aux blessés, ou, le cas échéant, les transférer vers des structures médicales équipées pour

les soigner. Les collectivités locales doivent également anticiper l'évacuation des personnes dans les secteurs à risque, ce qui passe notamment par la définition de procédures d'évacuation, de procédures de communication auprès des populations, et l'identification, en amont de la crise, des zones de refuge adaptées à la population à accueillir : ces refuges doivent en particulier être situés en dehors des zones inondables, rester accessibles malgré les inondations et disposer, dans la mesure du possible, d'un point d'eau. Les ONGs jouent également un rôle prépondérant dans la prise en charge des personnes sinistrées, par l'apport d'équipements d'hébergement (lits de camps) ainsi que de nourriture et d'eau potable.

- **Favoriser la continuité des services prioritaires, ainsi que leur remise en service rapide.** Les services prioritaires comprennent notamment l'approvisionnement en eau, en énergie, et la gestion des déchets. Pour faciliter la remise en service des équipements, il peut être envisagé d'interrompre les services à titre préventif au moment de la crise (par exemple pour mettre hors d'eau les équipements électriques). La mise en place de petites mesures structurelles telles que les batardeaux ou les sacs de sable permet également de protéger les équipements de manière à éviter leur dégradation et permettre une remise en service rapide après la décrue. Les pompiers peuvent également être dotés d'équipements de pompage pour évacuer l'eau des zones immergées.
- **Intégrer l'évacuation des populations** (procédures d'évacuation, identification de zones de refuge adaptées à la population à accueillir, communication auprès des populations, approvisionnement en eau et nourriture, etc.).

Les limites liées à un plan de contingence sont notamment liées à :

- **Sa mise en œuvre opérationnelle.** Il est fondamental de ne pas réduire la question de la gestion de crise à une problématique de moyens et aux capacités techniques disponibles. Même si ce point est évidemment essentiel, l'approche organisationnelle est déterminante. En effet, la gestion de crise relève autant de l'intervention que de la coordination entre les différentes parties prenantes, le déploiement des moyens d'intervention, les capacités de communication, etc.
- **Sa diffusion.** Pour être efficace, le plan de contingence doit être connu et accepté par tous les acteurs impliqués. Ils doivent avoir conscience des missions et responsabilités qui leur reviennent.
- **La nécessité de sa mise à jour régulière,** de manière à prendre en compte les changements institutionnels (très fréquents dans certains pays en développement) et les améliorations en matière d'équipements et outils disponibles, ainsi qu'à intégrer les enseignements tirés des expériences récentes.

Les **exercices de simulation** de gestion de crise sont des outils complémentaires à la définition d'un plan de contingence, qui permettent de

tester son efficacité et son caractère opérationnel, ainsi que d'identifier les potentiels manques ou faiblesses du plan de contingence et des ressources disponibles. Pour être valorisable, la réalisation d'une telle simulation implique de formaliser le déroulement de l'exercice et les enseignements tirés dans un rapport, qui pourra être utilisé par la suite pour améliorer la gestion de crise, et le plan de contingence associé. A noter cependant, que la conduite de tels exercices nécessite des moyens financiers, organisationnels (poursuite des activités et des services durant l'exercice) et matériels.

En complément, il existe **des outils d'aide et de coopération internationale** pour accompagner les pays dans de telles démarches, en particulier le **PNUD** et l'**UNDAC**. L'UNDAC (*United Nations Disaster Assessment and Coordination*) fait partie du système international de réponse d'urgence, et a pour mission de :

- Aider les Nations Unies et les gouvernements des pays affectés par une catastrophes durant la première phase d'une urgence soudaine ;
- Contribuer à la coordination des secours internationaux déployés à l'échelle nationale ou locale.

L'UNDAC intervient, sans frais de la part des pays affectés, sur sollicitation des Nations Unies ou des gouvernements des pays touchés. (OCHA, 2017)

**La phase de reconstruction, post-crise**, est également une étape déterminante de la gestion du risque d'inondation. **Elle doit être intégrée dans la planification de la crise**, de manière à assurer un retour à la normale le plus rapide possible. Les outils disponibles pour le relèvement après une catastrophe intègrent notamment :

- **Les systèmes assurantiels.** Ils permettent à la population exposée au risque de bénéficier d'une protection sur les dommages potentiels, et ainsi de se relever rapidement d'une catastrophe qui l'aurait touchée. Ils peuvent également permettre de mutualiser les dommages, et d'inciter les parties prenantes à comprendre et identifier le risque. Il existe plusieurs types de systèmes assurantiels, détaillés en annexe de ce rapport. Il est difficile d'imposer un système alors que dans nombre de pays le système assurantiel de base (multirisque habitation pour résumer) n'existe pas.

L'animation d'un fonds par les pouvoirs publics peut être une option (exemple de la Caisse Centrale de Réassurance en France) mais n'est pas une obligation. Par contre les autorités publiques, ont deux responsabilités :

- Favoriser un déploiement sur une large échelle pour éviter des primes trop élevées ;
- Produire et / ou diffuser la donnée relative aux risques et aux dommages causés par les inondations.

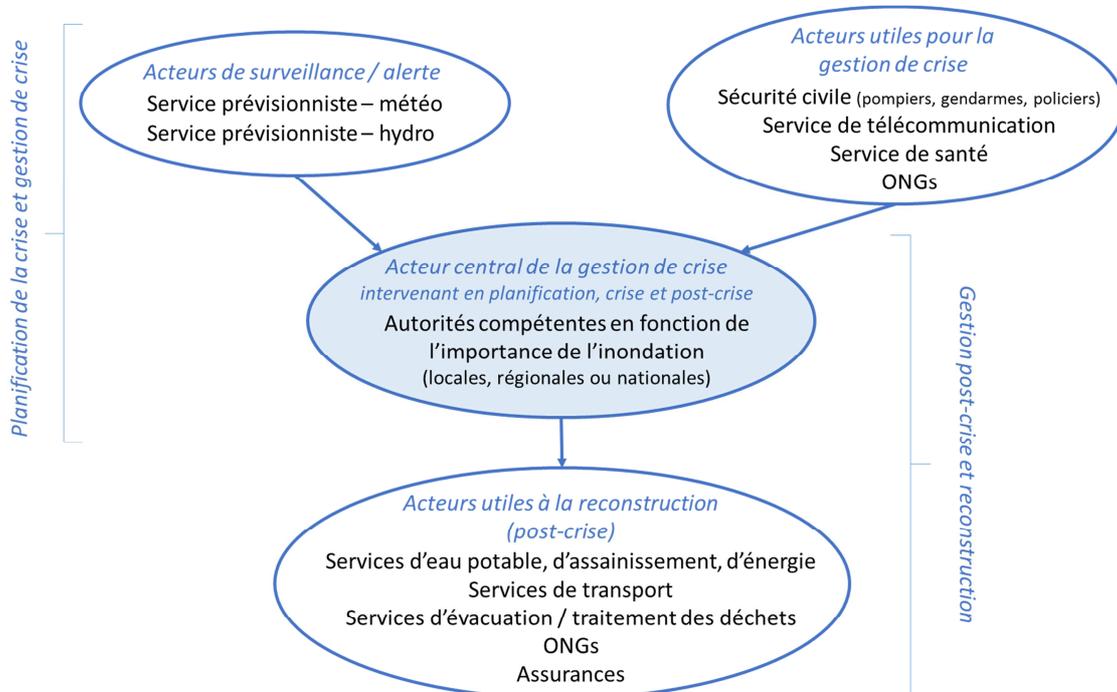
Le GFDRR organise régulièrement un meeting sur le sujet « Role of insurance in disaster risk reduction - RIDRR ».

Les différents modèles de systèmes assurantiels sont présentés en annexe de ce document.

- **Le retour d'expérience** consiste à rechercher les causes, à tenter de reconstituer le déroulement d'un événement catastrophique pour en tirer les enseignements essentiels en termes de prévention et de gestion de crise. Cet outil doit permettre de capitaliser l'ensemble des connaissances liées à un événement et de les transmettre au plus grand nombre par la suite. Il permet donc de garder une mémoire fine de l'événement. **(IRMA)**

### III. Les institutions à impliquer dans la préparation

Les institutions à impliquer dans la préparation au risque d'inondation sont présentées sur la Figure 13.



**Figure 13 : Synthèse des types d'acteurs principaux susceptibles d'être impliqués dans la préparation au risque d'inondation**

# Le renforcement de la culture de risque

---

## I. Les outils pour améliorer la conscience du risque

Le renforcement de la culture de risque est un élément clé de la gestion du risque d'inondation. Ses deux enjeux principaux sont la prise de conscience du risque potentiel d'inondation et l'intégration des comportements à avoir en situation de crise. Tous les acteurs sont concernés par cet aspect de la gestion du risque d'inondation et en particulier les habitants, souvent peu informés des risques existants et des bonnes pratiques en cas d'inondation.

La diffusion de l'information concernant le risque d'inondation peut être réalisée par plusieurs biais, dont en particulier :

- **La sensibilisation à l'école.** Les enfants comptent parmi les populations les plus vulnérables en cas de catastrophes. Les informer sur les risques existants et la conduite à tenir en cas de crise, participe à leur propre protection mais également à celle des membres de leur communauté. Cet outil permet également de former au risque d'inondation les futurs adultes du pays.

Pour généraliser l'enseignement de connaissances sur le risque d'inondation à l'échelle d'un pays, il est important de bénéficier du soutien du Ministère en charge de l'éducation, habilité à inscrire ce type de cours dans les programmes d'enseignement primaire et secondaire. C'est le cas par exemple au Mexique où l'enseignement de matières comportant des connaissances sur les catastrophes est obligatoire dans les écoles (**UNISDR, 2006**).

La sensibilisation à l'école fait partie des thèmes clés de l'UNISDR dans ses campagnes mondiales pour la prévention des catastrophes. L'UNISDR produit également des guides à destination des écoles et des professeurs, tel que celui intitulé « Eau et aléa en Afrique : Guide à l'usage des écoles »<sup>3</sup>.

- **Les « serious game »** : cet outil pédagogique permet de sensibiliser les populations, notamment les enfants, de manière ludique, en s'appuyant sur les nouvelles technologies (informatiques et sur smartphones), et de les aider à comprendre les enjeux des risques. L'ONU a mis en place le jeu « Halte aux catastrophes » ([www.stopdisastersgame.org](http://www.stopdisastersgame.org)), qui simule plusieurs types de catastrophes, dont les inondations. Le joueur doit se préparer à la survenue d'une inondation, avec un budget fixé qu'il doit dépenser pour améliorer l'aménagement du territoire et préparer son territoire à la crise.

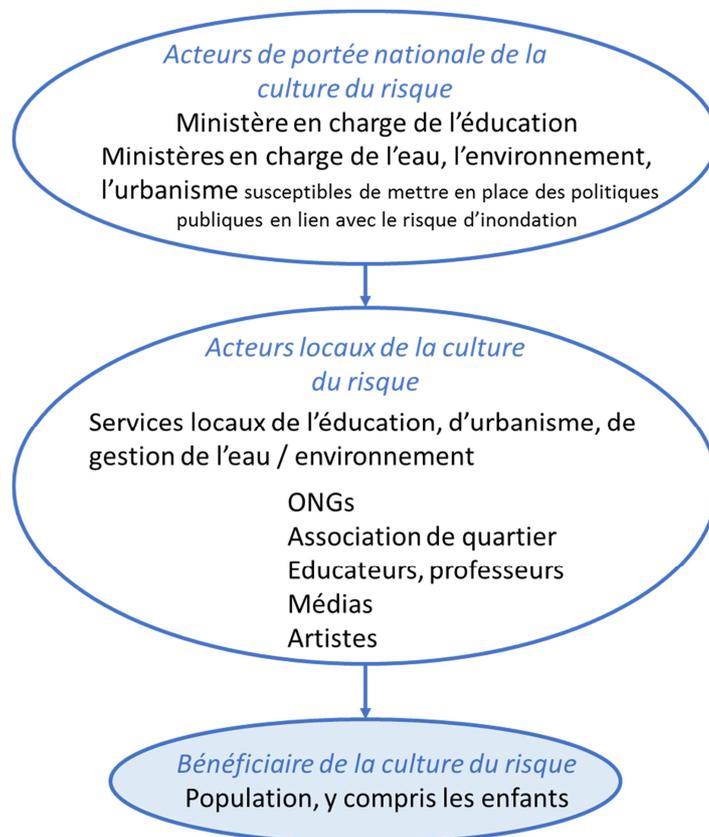
---

<sup>3</sup> Disponible à l'adresse suivante : <https://www.unisdr.org/2004/campaign/docs/eau-et-aleas-ecoles.pdf>

- **La réalisation d'exercices de simulation** d'une inondation, auprès des acteurs impliqués mais aussi de la population, et notamment dans les écoles. En complément d'une amélioration de l'organisation des services impliqués (voir chapitre précédent), ce type d'exercice, s'il implique la population, participe à l'intégration, auprès des habitants, des comportements à avoir et des bonnes pratiques en situation de crise, en les confrontant à une situation concrète.
- **La pose de repères de crue.** Ces outils permettent de se rappeler les hauteurs atteintes par les crues auxquelles ils se rapportent, de les comparer les unes aux autres et de constater la fréquence de leur survenue (**Site : Les risques majeurs, 2009**). Ils matérialisent ainsi le risque d'inondation et l'associent à un lieu précis. Ils participent ainsi au maintien de la mémoire collective locale des événements passés, à condition qu'ils soient bien visibles et surtout bien expliqués. Il peut être par exemple pertinent d'accompagner la pose de repères de crue, de panneaux explicatifs complémentaires (expliquant ce que sont les repères de crue, et fournissant des informations complémentaires sur les inondations historiques sur ce lieu, voire sur la commune).
- **L'implication de la population lors de la mise en place de politiques publiques par le biais de réunions publiques d'information et/ou des ateliers de concertation**, de manière à informer les habitants sur le risque d'inondation lui-même et les démarches existantes pour s'en protéger. Ces réunions peuvent également être l'occasion de collecter des informations supplémentaires et d'intégrer les retours des habitants.
- **Le lancement de campagnes de sensibilisation** auprès de la population, portées par les ONGs et éventuellement les associations de quartiers, relais locaux qui bénéficient de la confiance de la population.
- **L'organisation d'expositions ou de démarches artistiques**, en lien avec le risque d'inondation pour diffuser l'information de manière originale et informelle, auprès de la population.

## II. Les partenaires institutionnels de la culture du risque

Les acteurs et institutions à impliquer dans la culture du risque d'inondation, de portée nationale et locale, sont présentés sur la Figure 14.



**Figure 14 : Synthèse des types d'acteurs principaux susceptibles d'être impliqués dans le renforcement de la culture du risque**

## Exemples de territoires à risque dans les pays en développement

---

Dans ce chapitre, cinq villes de pays en développement localisées dans les différentes régions d'intervention de l'AFD ont fait l'objet d'une analyse spécifique. Cette analyse vise à étudier à une échelle géographique fine le risque d'inondation dans les pays en voie de développement, pour d'une part étayer par des exemples précis, les résultats explicités dans les chapitres précédents, et d'autre part faire ressortir des caractéristiques spécifiques à chaque ville, illustrative de la région d'intervention concernée. Les cinq villes ou territoires étudiés sont :

- **Dakar**, capitale du Sénégal, pays caractéristique du contexte sahélien (région d'intervention : Afrique subsaharienne)
- **Beyrouth**, capitale du Liban, illustrant le cas des pays méditerranéen (région d'intervention : Méditerranée et Moyen-Orient)
- **Port-Louis**, capitale de Maurice, illustratif du contexte insulaire dans l'océan indien (région d'intervention : Afrique subsaharienne)
- **Hanoï et le delta du Fleuve Rouge au Vietnam**, (région d'intervention : Asie)
- **Sao Paulo**, ville centrale du Brésil et principale mégalopole d'Amérique Latine (région d'intervention : Amérique Latine et Caraïbes)

L'analyse a permis de faire ressortir des points communs et/ou récurrents pour les différents territoires :

- **La vulnérabilité liée à l'installation de populations** (souvent les plus pauvres) dans des zones exposées au risque d'inondation ;
- **L'aggravation de l'aléa par le changement climatique** : les effets de cette problématique globale se feront ressentir partout, avec un risque particulièrement important pour les zones côtières exposées à la montée du niveau de la mer (quatre des études de cas sont concernées par ce risque) ;
- **L'aggravation du risque par le développement urbain** ayant souvent entraîné une urbanisation des zones inondables et une augmentation des ruissellements ;
- **L'insuffisance des infrastructures de drainage** qui ne sont souvent pas assez performantes pour répondre aux besoins croissants liés au développement de l'urbanisation.

En outre, l'analyse a également permis d'identifier des caractéristiques propres à chacune des villes, présentées dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Principales caractéristiques des études de cas**

Etude de cas	Les principales caractéristiques
Dakar	<p><b>La perte de la culture du risque liée à la période de sécheresse</b> des années 1970, ayant pour conséquence l'installation des populations dans des zones exposées au risque mais asséchées au cours de la sécheresse</p> <p><b>Le relèvement de la nappe phréatique</b> de Thiaroye, désormais affleurante</p> <p><b>Les impacts sociaux des inondations</b> mis en évidence, entraînant notamment des tensions au sein d'un voisinage</p>
Port-Louis	<p><b>Le faux sentiment de sécurité</b> engendré par le développement de la ville, et qui a entraîné une perte de la culture du risque d'inondation ;</p> <p><b>La problématique des pratiques agricoles</b> : l'abandon des terres de culture de la canne à sucre, sans prise en charge particulière, entraîne une augmentation des ruissellements</p> <p><b>Le contexte insulaire du pays</b>, le rendant dépendant des activités du port</p>
Beyrouth	<p><b>Le problème des réfugiés ayant fui les conflits, entraînant une vulnérabilité spécifique</b></p> <p><b>La problématique de la collecte des déchets</b> qui est non seulement susceptible d'aggraver l'aléa, mais également susceptible de provoquer des épidémies en cas de contamination des eaux lors d'inondations</p>
Delta du Fleuve Rouge	<p><b>La problématique de la gestion de l'occupation des sols en amont du bassin versant</b>, avec plus précisément une dynamique de déforestation entraînant une augmentation des ruissellements au niveau du delta ;</p> <p><b>La stratégie de gestion des inondations tournée uniquement vers du tout-structurel et sans priorisation des secteurs à protéger en priorité</b> : ces infrastructures (réseau de digues) sont aujourd'hui dégradées et participent à l'augmentation de l'exposition des populations face au risque d'inondation (sans oublier qu'elles engendrent la perte de la culture du risque). L'augmentation démographique et du niveau de vie au cours des 20 dernières années contribuent à l'augmentation de la vulnérabilité.</p>
Sao Paulo	<p><b>Les inégalités sociales</b> qui ont pour conséquence l'installation des populations les plus pauvres dans des favelas souvent exposées au risque d'inondation</p> <p><b>La caractéristique « mégalopole » de la ville</b>, exacerbant les problématiques liées à l'imperméabilisation des sols et l'augmentation des ruissellements</p>

La synthèse détaillée des études de cas (Tableau 2) permet de mettre en évidence les caractéristiques et les impacts du risque d'inondation, suivant les critères du développement durable : aspect social, aspect environnemental et aspect économique. Les analyses détaillées sont présentées en annexe de ce rapport.

Tableau 2 : Synthèse des études de cas

Etude de cas	Type d'inondation	Aspects sociaux	Aspects environnementaux	Aspects économiques
Dakar (Sénégal)	Ruissellement urbain Submersion marine	<i>Caractéristiques :</i> - Vulnérabilité liée à la <b>perte de la culture du risque au cours des années de sécheresse</b> , qui a entraîné une installation massive des populations (souvent pauvres) dans les zones exposées aux inondations - Aggravation de la vulnérabilité par le développement de l'urbanisation sur les voies naturelles d'écoulement des eaux <i>Impacts :</i> - Dégradation du cadre de vie et <b>des liens entre les habitants</b> (augmentation des tensions notamment entre voisins) - Risque sanitaire du aux eaux stagnantes (développement d'épidémie) et potentiellement à la contamination de la ressource en eau	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de l'aléa par le <b>relèvement de la nappe phréatique de Thiarye</b> - Aggravation de l'aléa par le changement climatique	<i>Impacts :</i> - Risque d'interruption des activités de la ville, cœur économique du pays
Port Louis (Maurice)	Inondation éclair	<i>Caractéristiques :</i> - Vulnérabilité liée au <b>faux sentiment de sécurité engendré par le niveau de développement de la ville</b> - Vulnérabilité liée à l'installation de populations pauvres dans des zones exposées (sur les pentes) et au manque de maîtrise de l'occupation du sol - Aggravation de la vulnérabilité par le développement de l'urbanisation sur les voies naturelles d'écoulement des eaux <i>Impacts :</i> - Contamination possible des sources d'eau potable	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de l'aléa par les <b>pratiques agricoles en amont</b> (abandon des terres utilisées pour cultiver la canne à sucre) - Aggravation de l'aléa par le changement climatique	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de la vulnérabilité liée au <b>contexte insulaire du pays</b> , qui est dépendant des importations <i>Impacts :</i> - Risque d'interruption des activités de la ville, cœur économique du pays, et notamment du port
Beyrouth (Liban)	Inondation éclair Ruissellement urbain Submersion marine	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de la vulnérabilité par la <b>forte concentration urbaine en zone côtière</b> - Vulnérabilité liée aux <b>flux des réfugiés</b> (syriens notamment) - Vulnérabilité liée à l'insuffisance des infrastructures de drainage <i>Impacts :</i> - <b>Risque sanitaire lié aux déchets dragués par les eaux d'inondation</b>	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de l'aléa par la <b>présence de déchets dans les rues</b> (obstruction des infrastructures de drainage et des voies d'écoulement des eaux) - Aggravation de l'aléa par le changement climatique	<i>Impacts :</i> - Risque d'interruption des activités de la ville, cœur économique du pays, et notamment du port (qui fait transiter 75% du PIB du Liban)
Delta du fleuve Rouge (Vietnam)	Crue fluviale Submersion marine	<i>Caractéristiques :</i> - Vulnérabilité liée à la <b>dégradation des infrastructures de protection face au risque d'inondation (réseau de digues)</b> malgré les efforts d'entretien et de surveillance des équipements - Vulnérabilité liée à la forte concentration de population dans des zones exposées	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de l'aléa par la <b>problématique de déforestation en amont de la région du delta</b> - Aggravation de l'aléa par le changement climatique	<i>Impacts :</i> - Risque d'interruption des activités de la région, cœur économique du nord du Vietnam
Sao Paulo (Brésil)	Ruissellement urbain Inondation éclair	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de l'aléa par le <b>développement de l'urbanisation de cette mégalopole</b> (2000km <sup>2</sup> hautement urbanisés) - Vulnérabilité liée aux <b>inégalités sociales</b> , en particulier dans les quartiers pauvres appelés favelas exposés au risque d'inondation (constructions sommaires, avec des risques de glissements de terrain) - Vulnérabilité liée à l'insuffisance des infrastructures de drainage	<i>Caractéristiques :</i> - Aggravation de l'aléa par la présence de déchets dans les rues (obstruction des infrastructures de drainage et des voies d'écoulement des eaux) - Aggravation de l'aléa par le changement climatique	<i>Impacts :</i> - Risque d'interruption des activités de la région, cœur économique du pays

## Bibliographie

---

- ADRC. (2005). *Total disaster risk management - Good Practices*.
- AFD. (n.d.). *AFD 2025 Dossier thématique Démographie et migrations*.
- Ambroise, B. (1998). *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles*. Bucarest: HGA.
- Armand, R. (2009). *Etude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratique de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement*. Université de Strasbourg.
- Asconit. (2013). *Renforcement des politiques publiques et appui aux structures nationales de coordination, de prévention et de gestion des risques naturels et des catastrophes dans les pays membres de la COI*.
- Banque Mondiale. (2009). *Climate Resilient Cities: A primer on reducing vulnerabilities to disasters - City Profile Hanoi, Vietnam*.
- Banque Mondiale. (2012). *CLIMATE CHANGE, DISASTER RISK AND THE URBAN POOR: CITIE S BUILDING RESILIENCE FOR A CHANGING WORLD*.
- Bassin de la Sarthe Amont. (2007). *Les zones d'expansion des crues*. Plaquette de communication.
- BBC Weather. (2011). *Weither Beirut - Average conditions*. Retrieved février 2016, from <http://www.bbc.com/weather/276781>
- BRL Ingénierie. (2015). *Conception et mise en place d'un système d'alerte précoce axé sur les inondations*.
- CEPRI. (n.d.). *Sensibiliser les populations exposées au risque d'inondation - Comprendre les mécanismes du changement de la perception et du comportement*.
- CIA. (2015). *The World Factbook*. Retrieved octobre 2015, from <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mp.html>
- Croix Rouge. (2013). *MENA Workshop on Urban Disaster Risk Reduction and Management - Building Urban Resilience.*, (p. [http://www.unisdr.org/files/36460\\_36441beirutworkshoponurbandrreport.pdf](http://www.unisdr.org/files/36460_36441beirutworkshoponurbandrreport.pdf)). Beyrouth, Liban.
- Degoutte. (2012). *Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale - Agro ParisTech*.

- Diongue, M. (2014). Périphérie urbaine et risques d'inondation à Dakar: le cas de Yeumbeul Nord. *ESO, Travaux et Documents*, n°37, p 45-54.
- Doussin, N. (2009). *Mise en oeuvre locale d'une stratégie globale de prévention du risque d'inondation: le cas de la Loire moyenne*. Géographie. Université de Cergy Pontoise.
- EM-DAT. (2015, octobre 10). *Database, EM-DAT The International Disaster Database - extrait du 10/10/2015*. Retrieved octobre 2015, from <http://www.emdat.be/database>
- EM-DAT. (2016, novembre 25). *Database, EM-DAT The International Disaster Database - extrait du 25/11/2016*. Retrieved octobre 2015, from <http://www.emdat.be/database>
- Fagoonee, I. (2005). *Integrating disaster-management information in Mauritius*.
- Floater, G., Rode, P., Friedel, B., & Robert, A. (2014). Steering urban growth: governance, policy and finance. *The New Climate Economy Cities Paper 02. LSE Cities London School of Economics and Political Science*.
- Fontenelle, J.-P. (2006). La décentralisation de l'hydraulique agricole du delta du Fleuve Rouge au Viêt-nam: rupture ou continuité? *Hérodote*, n°121, 2ème trimestre 2006, p55 -72.
- FuturaSciences. (2014, février). *Climat ou météo, quelle différence?* Retrieved octobre 2015, from <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/qr/d/meteorologie-climat-meteo-difference-5922/>
- Gerrits, M. (2010). *The role of interception in the hydrological cycle*. Université Technique de Delft, Pays-Bas.
- GFDRR. (2011). *Climate Risk and Adaptation Country Profile ; Vulnerability, Risk reduction and adaptation to Climate Change*.
- GFDRR. (2014). *Sénégal: Inondations urbaines. Le Relèvement et la Reconstruction à partir de 2009*.
- GIEC. (2001). *Bilan 2001 des changements climatiques: mesures d'atténuation*. Rapport du Groupe de travail III du GIEC.
- GIEC. (2013). *Changements climatiques 2013 - Les éléments scientifiques*. Glossaire.
- GIEC. (2013). *Evaluation of Climate Models*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Climate Change

- 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assess. .
- GIEC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of the working group II to the Fifth Assessment Report of IPCC*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY USA: Cambridge University Press.
- Gilard, O. (2006). Risques d'inondation dans le delta du Fleuve Rouge. De la nécessité d'améliorer leur prise en compte dans le processus d'aménagement du territoire. *Hérodote*, n° 121, 2ème trimestre 2006, p52-54.
- Gouvernement du Sénégal. (2010). *Rapport d'évaluation des besoins post-catastrophe - Inondations urbaines à Dakar en 2009*.
- Gouvernement Français. (2012). *Portail interministériel de Prévention des Risques Majeurs - Inondation*. Retrieved Février 2016, from <http://www.risques.gouv.fr/risques-naturels/inondation>
- Gouvernement Français. (2012). *Prévention des Risques Majeurs - Lexique*. Retrieved Septembre 2015, from <http://www.risques.gouv.fr/lexique>
- Guinot. (2003). *Les modèles numériques en hydrologie et en hydraulique*. Ecole Doctorale Mathématiques et Informatique Fondamentale de Lyon, 17 juin 2003.
- Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Bangalore, M., & Rozenberg, J. (2017). *Indestructible – Renforcer la résilience des plus pauvres face aux catastrophes naturelles*. Licence : Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO: Washington, DC : La Banque mondiale. GFDDR.
- Hansson, K., & Ekenberg, L. (2002). Flood mitigation strategies for the Red River Delta. *The Commons in Age of Globalization, The Ninth Biennial Conference of the International Association for Study of common property*.
- Hunink, J., & Droogers, P. (2013). *Agricultural runoff and urban flooding in Mauritius: evidence, methods and mitigation measures*.
- Hunink, J., & Droogers, P. (2013). *Agricultural runoff and urban flooding in Mauritius: evidence, methods and mitigation measures*.
- IAGU. (2009). *Préparation à la gestion des périls naturels et des risques liés aux changements climatiques à Dakar, Sénégal*.

- ICLEI. (2012). *Climate Change Projections for Port-Louis: adding value through downscaling*.
- INMET. (2015). *Gráficos Climatológicos (cartes climatologiques sur la base de données entre 1961 et 1990)*. Retrieved octobre 2015, from <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>
- IRMA. (n.d.). *Les arrêtés de catastrophes naturelles en Rhône-Alpes*. Retrieved novembre 2015, from [http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers\\_numero.php?id\\_DT=2](http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_numero.php?id_DT=2)
- IRMA. (n.d.). *Retour d'expérience et mémoire*. Retrieved novembre 2015, from [http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers\\_articles.php?id\\_DTart=93&id\\_DT=10](http://www.irma-grenoble.com/05documentation/04dossiers_articles.php?id_DTart=93&id_DT=10)
- Kastrissianakis, K. (2012). Transformations urbaines et affirmation de nouvelles souveraineté: la cas de Beyrouth. *Rives méditerranéennes*, n°42, p 75 - 95.
- Ledoux, B. (2006). *La gestion du risque inondation*. Lavoisier, Tec&Doc.
- Leone, F., & Vinet, F. (2011). *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles: Analyses géographiques*. PULM.
- Maddox, Y. (2014, décembre). *Flood Insurance Models around the World*. Retrieved novembre 2015, from <http://www.intermap.com/risks-of-hazard-blog/flood-insurance-models-around-the-world>
- McSweeney, C., New, M., & Lizcano, G. (2012). *UNDP Climate Change Country Profiles : Mauritius*.
- MEDDE France. (2004). *Les inondations - Dossier d'information*.
- MEDDE France. (2015). *EauFrance - Glossaire (Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie)*. Retrieved octobre 2015, from <http://www.hydro.eaufrance.fr/glossaire.php#debit>
- MétéoFrance. (n.d.). *Les incertitudes dans les scénarios de changement climatique*. Retrieved from MétéoFrance: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/les-incertitudes-dans-les-projections-climatiques>
- MétéoFrance. (n.d.). *Les incertitudes dans les scénarios de changement climatique*. Retrieved from MétéoFrance: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/les-incertitudes-dans-les-projections-climatiques>

- Ministère de l'Environnement de Maurice. (2012). *Technology Needs Assessment for an enhanced climate change adaptation and mitigation*.
- Minsitère de l'Environnement du Liban. (n.d.). *Vulnerability and Adaptation*. Retrieved février 2016, from [http://www.iisd.org/pdf/2009/rising\\_temps\\_middle\\_east.pdf](http://www.iisd.org/pdf/2009/rising_temps_middle_east.pdf)
- Mounirou, L. (2012). *Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso: Quantification et transposition des données*. Université Montpellier II et Fondation 2iE.
- Musy, A. (1998). *Hydrologie appliquée*. Bucarest: HGA.
- Musy, A. (2005). *Cours d'Hydrologie Générale, Section SIE et GC, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*. Retrieved Septembre 2015, from <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>
- Musy, A. (2005). *Hydrologie Générale, Section SIE et GC, Ecole Polytechnique Fédérale*. Retrieved Septembre 2015, from <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>
- OCDE. (2009). *Japan: Large scale Floods and earthquakes*. Paris, France: OECD Publications.
- OCHA. (2017, 01 13). *What is UNDAC?* Retrieved from OCHA: <http://www.unocha.org/what-we-do/coordination-tools/undac/overview>
- Oliveira, C., Da Silva, C., Sosnoski, A., Bozzini, P., Rossi, D., Uemura, S., et al. (2014). Warning system based on real-time flood forecasts in Sao Paulo, Brazil. *6th International Conference on Flood Management, September 2014*. Sao Paulo, Brazil.
- OMM. (2011). *Manuel sur la prévision et l'annonce des crues*. Genève, Suisse.
- OMM, & UNESCO. (1992). *Glossaire international d'hydrologie*. Retrieved octobre 2015, from <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm>
- ONU. (2011). *Assemblée générale : Droit à un logement convenable, 66ème session*.
- ONU. (2014). *World Urbanization Prospects : The 2014 Revision*.
- ONU. (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision (medium variant)*. DVD Edition.

- ONU/BCAH, O. &. (2008). *Préparation à une réponse efficace en cas de catastrophe : Ensemble de directives et indicateurs pour la mise en œuvre de la priorité 5 du Cadre d'action de Hyog*. Genève, Suisse.
- Osseiran, N. (2015, octobre). *Health crisis rears its head as rains batter Lebanon*. Retrieved février 2016, from <http://www.dailystar.com.lb/News/Lebanon-News/2015/Oct-26/320237-health-crisis-rears-its-head-as-rains-batter-lebanon.ashx>
- Owens, J. (2015). Rainy Season Accentuates Lebanon Trash Crisis. *Voice of America*, <http://www.voanews.com/content/rainy-season-accentuates-lebanon-trash-crisis/3042127.html>.
- PNUD. (2014). *Rapport sur le développement humain 2014 - Pérenniser le progrès humain : réduire les vulnérabilités et renforcer la résilience*. New York City, NY, USA.
- PRB. (2015). *2015 World Population Data Sheet*. Retrieved octobre 2015, from Population Reference Bureau, Washington DC: <http://www.prb.org/Publications/Datasheets/2015/2015-world-population-data-sheet/world-map.aspx#map/world/population/2015>
- Quenault, B., Pigeon, P., Bertrand, F., & Blond, N. (2011). *Vulnérabilité et résilience au changement climatique en milieu urbain: vers de nouvelles stratégies de développement urbain durable?* Programme interdisciplinaire de recherche Ville et Environnement - Rapport de recherche.
- Redd, B. (2013). Why does Lebanon flood so badly? *Executive Magazine*, <http://www.executive-magazine.com/economics-policy/lebanon-floods-policy>.
- Revista. (2013). *Harvard review of latin america – cambridge (massachussets)*.
- Sachs, C. (1981). Croissance urbaine et faélisation des métropoles : Sao Paulo et Rio de Janeiro. *Economie et Humanisme*, n°260 - juillet-août 1981.
- Sauvageot, H. (2000). Le radar polarimétrique, une nouvelle approche pour l'observation des chaps de précipitations. *La Météorologie*, 8ème série - n°31 - p 25 à 41.
- Simas, I., Rodrigues, C., & Sant'Anna Neto, J. (2015). Inondations dans la métropole de Sao Paulo: analyse détaillée des évènement pluvieux. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015*.

- Site : *Les risques majeurs*. (2009). Retrieved from Les repères de crue: <http://www.risquesmajeurs.fr/les-rep%C3%A8res-de-crues>
- Sueur, J.-P. (2011). *Villes du futur, futur des villes : quel avenir pour les villes du monde ? (Analyses)*. Rapport d'information n°594 (2010-2011) à destination du Sénat français.
- Thanh Pham, X. (2008). *Etude Icimatique de la mousson vietnamienne et applications à la prévision saisonnière*. Thèse de doctorat. Climatologie, Université de Bourgogne.
- Townsend, F. F. (2006). *The federal response to hurricane Katrina: lessons learned*.
- UNDP. (2015, novembre). *Launching of Flood Risk Assessment and Mapping for Lebanon*. Retrieved février 2016, from <http://www.lb.undp.org/content/lebanon/en/home/presscenter/articles/2015/11/26/launching-of-flood-risk-assessment-and-mapping-for-lebanon.html>
- UN-Habitat. (2011). *Mauritius : Port Louis urban profile*.
- UNHCR. (2014, avril). *Syrian refugees in Lebanon surpass one million*. Retrieved février 2016, from <http://www.unhcr.org/cgi-bin/texis/vtx/search?page=search&docid=533c15179&query=lebanon%20syrian%20refugees#hit1>
- UNHCR. (2015). *Registration Trends for Syrians in Lebanon*. Weekly statistics as of: 05/03/2015.
- UNISDR. (2006). *La réduction des risques de catastrophes commence à l'école - 2006-2007 Campagne mondiale pour la prévention des catastrophes*.
- UNISDR. (2009). *Terminology*. Retrieved Septembre 2015, from UNISDR: <http://www.unisdr.org/we/inform/terminology>
- UNISDR. (2013). *Consultation nationale sur le cadre d'action post-2015 pour la réduction des risques de catastrophes*.
- UNISDR. (2013). *Lebanon embarks on regional first with disaster risk plan*. Retrieved février 2016, from <https://www.unisdr.org/archive/34432>
- UNISDR. (2015). *Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes 2015-2030*.
- UNISDR. (2015). *GAR - Réduction du risque de catastrophe : Bilan mondial*. Nations Unies.

UNISDR. (2015). *Review of Mauritius: UNISDR working papers on public investment planning and financing strategy for disaster risk reduction.*

Wikipédia. (2016). *Beyrouth*. Retrieved février 2016, from [https://fr.wikipedia.org/wiki/Beyrouth#Beyrouth\\_d.27une\\_reconstruction\\_.C3.A0\\_l.27autre\\_.28apr.C3.A8s\\_1990.29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Beyrouth#Beyrouth_d.27une_reconstruction_.C3.A0_l.27autre_.28apr.C3.A8s_1990.29)

## Annexe 1 – Lexique des termes techniques

---

**Aléa (*hazard*)** : La notion d'aléa (*hazard* en anglais) se définit en France, comme un phénomène d'origine naturelle ou humaine plus ou moins dommageable selon son intensité, selon le portail interministériel de prévention des risques majeurs (2012). A l'échelle internationale, l'UNISDR (2009) propose une définition similaire précisant les types de dommages en termes humain (décès, blessures ou autres effets sur la santé), matériel, environnemental et/ou socio-économique<sup>4</sup>.

**Bassin versant (*catchment area* ou *watershed*)** : unité hydrologique drainant les eaux ruissellement à sa surface et les évacuant vers le point le plus en aval du réseau hydrographique

**Capacité d'infiltration (*infiltration capacity*)** – appelée aussi infiltrabilité ou capacité d'absorption : flux maximal que le sol est capable d'absorber lorsqu'il est soumis à une pluie suffisamment abondante ou qu'il est recouvert d'une surface d'eau.

**Catastrophe (*disaster*)** : toute perturbation importante du fonctionnement d'une communauté ou d'une société impliquant des impacts et des pertes majeurs sur les plans humains, matériels, économiques et environnementaux, ceux-ci entraînant un dépassement des capacités propres à ces communautés ou sociétés à faire face [...] Les catastrophes sont souvent décrites comme la résultante de la combinaison d'une exposition à un aléa, des conditions de vulnérabilité en place, et d'une incapacité à faire face ou à réduire les conséquences négatives potentielles (UNISDR, Terminology, 2009)

**Climat (*climate*)** : une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type, définie par l'Organisation météorologique mondiale, est de 30 ans). Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent (GIEC, 2013)

---

<sup>4</sup> Site Internet de l'UNISDR. Définition en anglais : « A dangerous phenomenon, substance, human activity or condition that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage ».

**Courbe Intensité-Durée-Fréquence – courbes IDF – (*Intensity-Duration-Frequency curve*)** : courbe illustrant graphiquement et de manière synthétique les connaissances pluviométriques d'un point donné en établissant les relations entre les intensités, les durées et les fréquences des pluies. Elles sont utilisées en particulier pour estimer des débits pour un type de pluie donné, et pour dimensionner des ouvrages.

**Crue (*rising river*)** : augmentation du débit d'une rivière (MEDDE France, 2004). Ainsi une crue n'engendre pas systématiquement d'inondation.

**Embâcle** : agrégat de débris transportés par les eaux lors d'une crue jusqu'à former un obstacle obstruant l'écoulement de l'eau (MEDDE France, 2004)

**Débâcle** : rupture brutale de des bouchons naturels formés par les débris transportés par les eaux lors d'une crue (MEDDE France, 2004)

**Enjeux** : ensemble des personnes, des biens et des infrastructures localisés dans des zones inondables et qui sont ainsi soumis à des pertes potentielles (UNISDR, 2009)

**Etiage (*low flow period*)** : période de basses eaux pendant laquelle le débit d'un cours d'eau atteint son minimum (MEDDE France, Les inondations - Dossier d'information, 2004).

**Evapotranspiration (*evapotranspiration*)** : processus engendrant le transfert du sol vers l'atmosphère de l'eau interceptée en combinant l'évaporation au niveau des sols nus et des surfaces d'eau libre et la transpiration de la végétation. L'évapotranspiration représente une partie importante des transferts du cycle hydrologique : ainsi ce processus représente 62% de la précipitation incidente à l'échelle mondiale, et 55% pour un bassin versant en climat tempéré (comme en France par exemple) (Musy, 2005).

**Exutoire (*outlet*)** : point du bassin versant le plus en aval du réseau hydrographique

**Débit de crue** pour une année donnée : une des manières de caractériser les crues d'une année est d'utiliser soit le plus fort débit instantané soit le plus fort débit journalier. Sur plusieurs années, on détermine statistiquement, à partir d'un échantillon le plus fourni possible de débits de crue annuels, la valeur du débit associé à différentes périodes théoriques de retour (2, 5, 10 etc.). (MEDDE France, 2015)

**Débit d'étiage** : débit minimum d'un cours d'eau calculé sur un temps donné en période de basses eaux. Ainsi pour une année donnée on parlera de : débit d'étiage journalier (MEDDE France, 2015)

**Fonction de production** : procédure permettant de convertir la pluie brute en pluie nette. Elle est spécifique à un bassin versant donné et intègre notamment les caractéristiques d'occupation de sol et de végétation et les conditions météorologiques (Musy, 2005).

**Fonction de transfert** : procédure permettant de convertir la pluie nette en débit à l'exutoire. Elle intègre les caractéristiques physiques, topologiques, géologiques et météorologiques (Musy, 2005).

**Hyétogramme (*hyetograph*)** : courbe représentant l'évolution de l'intensité d'une précipitation en un point donné au cours du temps

**Hydraulique (*hydraulics*)** : branche de la mécanique des fluides traitant des écoulements dits à surface libre, graduellement variés, qui ont lieu dans des cours d'eau naturels ou artificiels.

**Hydrologie (*hydrology*)** : science étudiant les processus qui régissent les fluctuations des ressources en eau des terres émergées et traite des différentes phases du cycle hydrologique (OMM & UNESCO, Glossaire international d'hydrologie, 1992). Il convient de noter que les méthodes utilisées en prévention (statistique) n'ont rien à voir avec celles utilisées en prévision (modèle pluie-débit). On peut donc distinguer au moins deux « écoles » hydrologiques

**Hydrogramme de crue (*flood hydrograph*)** : courbe représentant l'évolution du débit à l'exutoire du bassin versant en fonction du temps (Musy, 2005)

**Infiltration (*infiltration*)** : transfert vertical de l'eau de la surface du sol dans les couches superficielles du sol, sous l'effet de la gravité et de la pression, à condition que ce dernier ne soit pas saturé.

**Inondation (*flood*)** : **submersion temporaire, par l'eau, de terres qui ne sont pas submergées en temps normal.** Cette notion recouvre les inondations dues aux crues de rivières, des torrents de montagne et des cours d'eau intermittents méditerranéens ainsi que les inondations dues à la mer dans les zones côtières (Gouvernement Français, 2012)

**Interception (*interception losses*)** : part des précipitations stoppée par la végétation ou les infrastructures urbaines (toits, sols peu perméables comme les routes, etc.) et restituée à l'atmosphère par évaporation (Gerrits, 2010) (Musy, 2005). Les eaux ainsi interceptées ne participent donc pas aux écoulements.

**Isochrone (*isochrone*)** : courbe correspondant aux zones présentant des temps de concentration des eaux égales. La détermination des isochrones

permet de mieux appréhender le comportement hydrologique d'un bassin versant et de caractériser les contributions relatives des sous-bassins versants. (Musy, 2005)

**Lit majeur** : zone comprenant les zones basses situées des deux côtés du lit mineur, sur une distance pouvant aller de quelques mètres à plusieurs kilomètres en fonction de l'ampleur de crue. Le lit majeur correspond à la limite des crues exceptionnelles. (MEDDE France, 2004)

**Lit mineur** : lit ordinaire du cours d'eau. (MEDDE France, 2004)

**Mesures d'atténuation** : ensemble des mesures provenant d'une intervention de l'homme pour réduire les sources de gaz à effet de serre ou à renforcer leurs absorptions par les puits (GIEC, 2001). Ce type de mesure n'est pas directement en lien avec le risque d'inondation

**Mesures d'adaptation** : ensemble des mesures d'appropriation des systèmes naturels ou humains aux conditions propres à un milieu nouveau ou en évolution.

### **Météorologie**

**Modèle climatique (*climate model*)**: représentation numérique du système climatique fondée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composantes et leurs processus d'interaction et de rétroaction, et qui tient compte d'une partie de ses propriétés connues (GIEC, 2013).

**Module**, appelé également module interannuel : débit interannuel défini comme la moyenne des débits annuels sur une période d'observation suffisamment longue pour être représentative des débits mesurés ou reconstitués. Il caractérise l'écoulement d'une année « moyenne » ; (MEDDE France, 2015)

**Période de retour (*return period*) d'une crue** : inverse de la probabilité annuelle de dépassement de la crue (Ledoux, 2006)

**Précipitations (*precipitation*)** : ensemble des eaux (sous forme liquide ou solide comme par exemple la neige ou la grêle) tombant à la surface du sol, sous l'effet de changement de température ou de pression.

**QMNA** : débit mensuel minimal d'une année hydrologique. Il se calcule de manière statistique, pour certaines périodes de retour (par exemple 5 ans, qui s'écrira QMNA5), à partir des débits moyen mensuels (par mois calendaire) ; (MEDDE France, 2015)

**Régime permanent** : régime d'écoulement de l'eau pour lequel le débit est constant dans le temps (adapté par exemple pour des écoulements en rivière à l'étiage ou en régime moyen). Le régime permanent peut être uniforme (les caractéristiques géométriques du chenal et la rugosité sont constantes sur le tronçon considéré) ou varié (la géométrie et la rugosité varie le long du tronçon). (Degoutte, 2012)

**Régime transitoire** : régime d'écoulement de l'eau pour lequel le débit varie en fonction du temps : l'écoulement d'une rivière en crue s'attache typiquement à un régime transitoire. (Degoutte, 2012)

**Réponse hydrologique (*hydrological response*)** : manière dont un territoire réagit lorsqu'il est soumis à une précipitation.

**Réseau hydrographique (*waterway ou water system*)** : ensemble des canaux, cours d'eau et rivières, naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, participant à l'écoulement des eaux sur un bassin versant donné. (Musy, 2005)

**Résilience (*resilience*)** : la capacité d'un système exposé à un aléa à résister, à s'en accommoder ou à s'en remettre en temps opportun et de manière efficace (UNISDR, 2009)

**Risque de catastrophe (*disaster risk*)** : la potentialité de pertes catastrophiques en vies humaines, état sanitaire, moyens de subsistance, actifs et services, qui peuvent concerner une communauté ou une société, spécifiée sur une période future (UNISDR, Terminology, 2009)

**Temps de réponse (*basin lag ou lag time*)** : intervalle de temps entre le centre de gravité de la pluie nette et la pointe de crue ;

**Temps de montée** : intervalle de temps entre le début du ruissellement et l'atteinte du débit de pointe ;

**Temps de base** : intervalle de temps total de ruissellement dû à une précipitation ;

**Temps de concentration (*time of concentration*)** : intervalle de temps nécessaire à une particule d'eau tombée sur la partie du bassin versant la plus éloignée hydrologiquement à atteindre l'exutoire.

**Vulnérabilité (*vulnerability*)** : propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (bien, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés (Leone & Vinet, 2011)

## Annexe 2 – Les impacts des inondations dans les pays d'intervention de l'AFD depuis 1990

Selon la base de données internationales EMDAT (D. Guha-Sapir, R. Below, Ph. Hoyois - EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database – www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium.)

Nom	Nombre inondations	Nombre de décès	Nombre de personnes touchées	Montant estimé des dommages ('000 \$)
Afghanistan	69	4 136	617 539	87 000
Afrique du Sud	25	517	506 471	909 724
Algérie	35	1 494	238 442	1 480 917
Angola	29	561	1 098 219	10 000
Bangladesh	58	5 605	127 170 897	8 044 300
Bénin	15	122	2 047 547	3 315
Birmanie	19	462	1 118 412	136 655
Bolivie	24	674	2 820 455	1 139 500
Botswana	7	35	158 102	5 000
Brésil	76	2 756	7 234 065	4 832 670
Burkina Faso	13	131	548 961	150 176
Burundi	20	132	90 638	-
Cambodge	18	1 641	13 275 587	1 419 100
Cameroun	14	126	374376	-
Cap-Vert	1	3	150	-
Chine	201	28 196	1 830 502 400	203 998 228
Colombie	53	2 091	10582299	3 443 003
Comores	2	6	67 637	5 000
Congo	9	28	173 114	59
Cote d'Ivoire	8	114	8 875	-
Djibouti	3	196	240 000	2 119
Egypte	9	669	168 498	141 000
Equateur	18	505	793 858	1 309 800
Ethiopie	42	1 905	2 243 256	18 300
Gabon	1	1	77 845	-
Ghana	16	427	3 857 190	33 500
Guinée	10	19	371 426	-
Guinée Bissau	4	5	58 542	-
Haïti	35	3 100	561 088	1 000
Inde	178	35 775	555 474 809	48 025 329
Indonésie	121	4 269	6 844 634	6 528 609

Nom	Nombre inondations	Nombre de décès	Nombre de personnes touchées	Montant estimé des dommages ('000 \$)
Jordanie	2	10	18 000	1 000
Kenya	43	1 175	2 922 123	148 338
Laos	16	144	3 832 743	143 828
Liban	1	-	17 000	-
Madagascar	6	66	159 987	150 000
Mali	19	106	252 692	-
Maroc	20	1 150	232 896	295 200
Maurice	1	11	82	-
Mauritanie	14	53	173 419	-
Mexique	41	1 719	4 376 674	4 215 000
Mozambique	26	1 291	7 274 644	668 600
Namibie	13	264	1 099 450	20 490
Niger	19	288	1 527 381	67 474
Nigéria	40	1 281	9 985 009	613 422
Ouganda	18	268	1 062 845	4 171
Pakistan	64	10 302	62 862 129	19 798 378
Pérou	33	798	3 026 364	50 000
Philippines	113	2 169	23 988 789	3 511 882
République centrafricaine	14	16	170 396	-
Rép.démocratique du Congo	21	358	265 960	15 000
République dominicaine	21	780	216 280	97 725
Rwanda	10	132	64 061	9
Sénégal	15	80	1 180 211	50 979
Seychelles	2	5	5 672	1 700
Soudan	30	758	4 346 457	533 200
Soudan du Sud	4	146	738 000	-
Sri Lanka	44	826	10 951 003	925 130
St Lucie	2	6	21 984	-
St Vincent et Grenadines	3	15	17 897	108 000
Suriname	2	5	31 548	-
Syrie	1	6	-	-
Tanzanie	29	673	615 999	3 790
Tchad	15	258	1 389 544	11 000
Territoires palestiniens	4	5	14 500	-
Thaïlande	60	2 734	46 742 347	442 99 762
Togo	11	72	591 600	-
Tunisie	6	82	185 508	242 800
Turquie	29	503	1 713 820	2 180 500
Vietnam	67	4 513	23 429 563	3 746 227
Zambie	16	60	4 349 008	20 700
Zimbabwe	12	298	345 522	296 500

## Annexe 3 – Les concepts-clés de genèse de l'aléa inondation

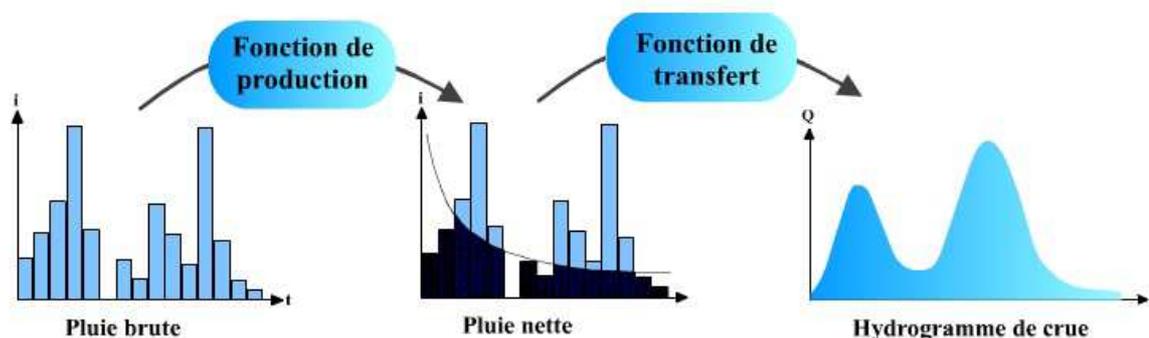
---

L'hydrologie est un des facteurs clés influençant l'aléa inondation. On distingue différents types d'approche de l'hydrologie. Une première approche est l'**hydrologie déterministe** : il s'agit d'analyser les processus hydrologiques en utilisant une approche déterministe, pour étudier les réponses des systèmes hydrologiques en agissant sur divers paramètres (tels que l'occupation des sols et la topographie par exemple). Une deuxième approche est l'**hydrologie statistique** qui s'appuie sur l'analyse statistique des données acquises issues des stations de mesure de hauteurs converties en débits, par différentes méthodes. La précision des résultats de cette approche statistique dépend de plusieurs facteurs, principalement :

- La qualité de méthode de conversion des hauteurs en débits (on utilise souvent des courbes de tarage, qui donnent des lois de conversion hauteur débits, mais qui sont plus ou moins bien calibrées) ;
- La taille de la chronique des données mesurées. Plus on dispose de données anciennes, plus les extrapolations statistiques pourront être considérées comme fiables.

En hydrologie déterministe utilisée surtout pour les petits bassins versants de taille inférieure à 200 km<sup>2</sup>, la réponse hydrologique d'un bassin versant donné peut s'étudier à partir de l'analyse de la **transformation pluie-débit** afin de déterminer l'**hydrogramme de crue**, c'est-à-dire l'évolution du débit à l'exutoire du bassin versant en fonction du temps. Une des complexités provient de la distribution spatiale des pluies, souvent méconnue, mais dont la connaissance est essentielle pour évaluer les bons volumes qui ont été précipités. Cette transformation s'effectue en appliquant successivement deux fonctions (Figure 14) :

- La fonction de production : celle-ci permet de convertir la pluie brute en pluie nette. Elle est spécifique à un bassin versant donné et intègre notamment les caractéristiques d'occupation de sol et de végétation et les conditions météorologiques (voir chapitre 0) ;
- La fonction de transfert : elle permet de convertir la pluie nette en débit à l'exutoire et intègre les caractéristiques physiques, topologiques, géologiques et météorologiques (voir chapitre 0).

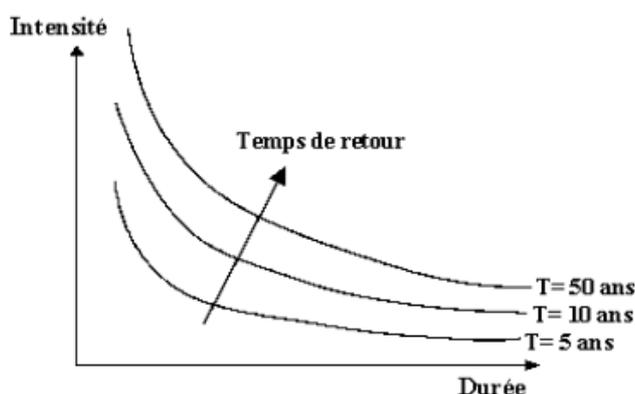


**Figure 15 : Transformation Pluie-Débit : fonction de production et fonction de transfert (adapté de Musy 2005)**

Une fois que l'eau a rejoint un cours d'eau, les écoulements sont régis essentiellement par la morphologie du cours d'eau et par des mécanismes d'hydraulique (voir chapitre 0).

#### *De la pluviométrie aux ruissellements (fonction de production)*

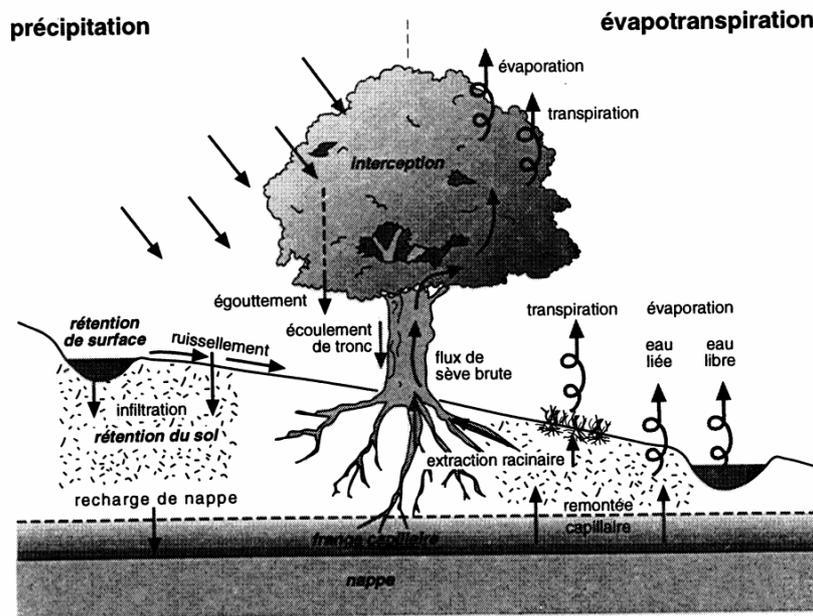
L'analyse des précipitations est complexe du fait de leurs variations spatio-temporelles (dues par exemple au déplacement de la perturbation ou aux modifications des conditions de température ou de pression). Les principaux paramètres étudiés sont la **hauteur d'eau** ou **lame d'eau** tombée sur une unité de surface, et l'**intensité**, c'est-à-dire la hauteur d'eau tombée par unité de temps. La variation de l'intensité en un point donné au cours du temps peut se représenter graphiquement sous la forme d'un **hyétogramme**.



**Figure 16 : Représentation des courbes IDF (Musy, 2005)**

L'analyse statistique des données de précipitations permet d'établir des **courbes Intensité-Durée-Fréquence**, plus souvent appelées **courbes IDF** (Figure 15). Elles permettent d'illustrer graphiquement et de manière synthétique les connaissances pluviométriques d'un point donné en établissant les relations entre les intensités, les durées et les fréquences des pluies. Elles

sont utilisées en particulier pour estimer des débits pour un type de pluie donné, et pour dimensionner des ouvrages.



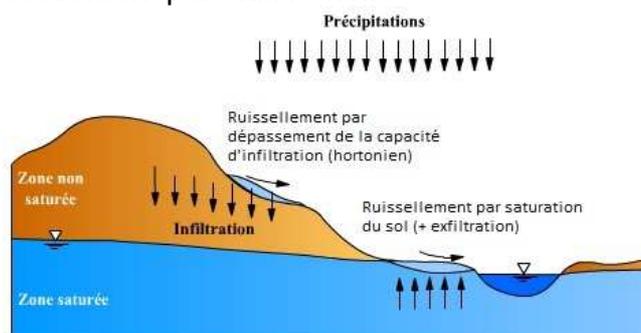
**Figure 17 : Les processus hydrologiques (Ambroise, 1998, p. p 26)**

Plusieurs processus hydrologiques interviennent dans la **réponse hydrologique** d'un territoire, c'est-à-dire la manière dont il réagit lorsqu'il est soumis à une précipitation (Figure 16) :

- L'interception et l'évapotranspiration : ces deux processus sont étroitement liés (**Musy, 1998**), et sont influencés par des facteurs similaires (température, pression, humidité de l'air, rayonnement solaire, type de végétal, densité, couverture végétale, durée, intensité et hauteur de pluie). Les eaux interceptées ou évaporées ne participent pas aux écoulements ;
- L'infiltration et la percolation : le processus d'infiltration varie au cours d'un évènement pluvieux en fonction de l'intensité de la pluie et de la capacité d'infiltration du sol (ces deux facteurs étant variable dans le temps) : lorsque l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration, une partie de l'eau ne s'infiltré pas et s'accumule en surface. Elle peut alors s'évacue par gravité à la surface du sol : il s'agit du ruissellement. Celui-ci s'oppose donc directement au processus d'infiltration.
- Les écoulements, dont le ruissellement : parmi les différents types d'écoulement, le ruissellement est celui contribuant majoritairement à l'aléa inondation. Dans la littérature, on distingue trois types de ruissellement, illustrés sur la Figure 17 : (**Musy, 2005**) (**Armand, 2009**) (**Mounirou, 2012**)
  - o Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration. Ce type de ruissellement intervient en particulier dans des bassins

versants faiblement végétalisés, soumis à des climats semi-arides ou arides avec des intensités pluviométriques élevées (**Armand, 2009**);

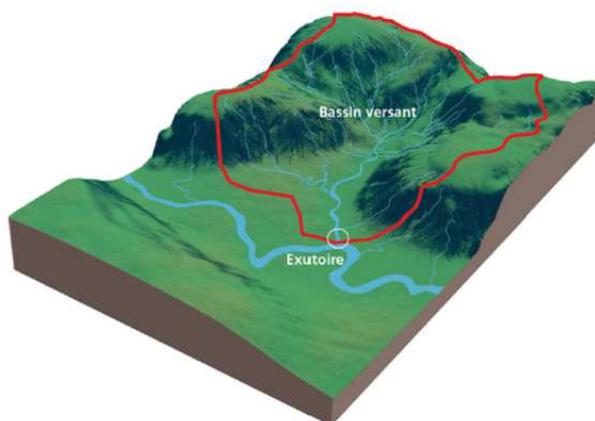
- Ruissellement par saturation du sol. Ce type de ruissellement intervient en particulier pour des pluies de faible intensité s'abattant sur un sol préalablement imbibé, notamment en raison de la présence d'une nappe phréatique à proximité de la surface ou après des pluies de longue durée. (**Mounirou, 2012**)
- Ruissellement par exfiltration.



**Figure 18 : Types de ruissellement (adapté de Musy 2005)**

*La concentration des écoulements au sein d'un bassin versant (fonction de transfert)*

Sur un **bassin versant** donné, les écoulements s'effectuent le long du réseau hydrographique propre au bassin versant et tendent vers la concentration des eaux à l'**exutoire**, c'est-à-dire le point le plus bas du bassin versant en aval (Figure 18). (Musy, 2005)

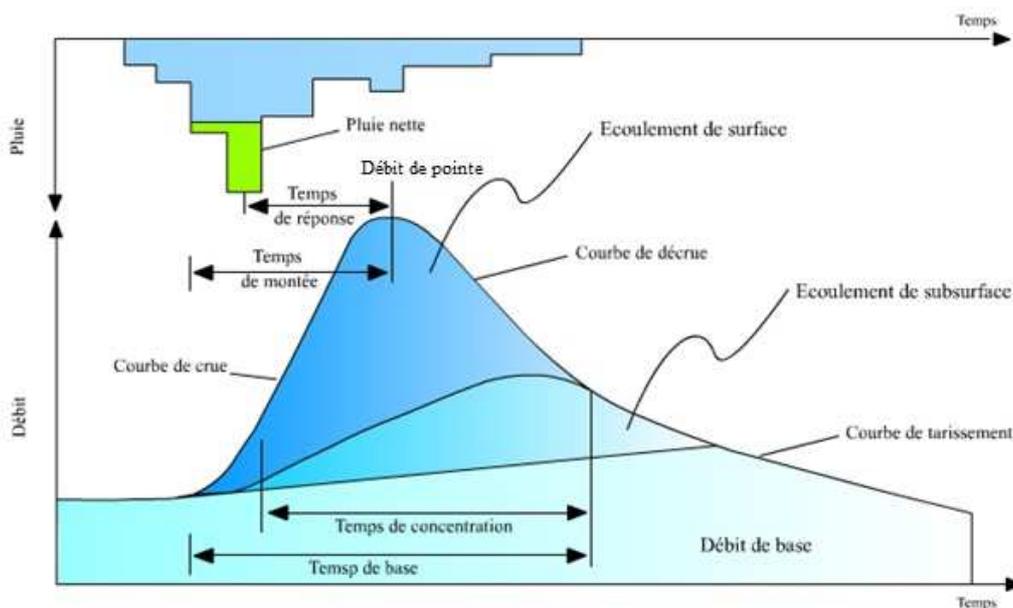


**Figure 19 : Illustration d'un bassin versant et de son exutoire (MEDDE France, Les inondations - Dossier d'information, 2004)**

L'hydrogramme de crue résume la réponse hydrologique d'un bassin versant donné pour un évènement pluvieux donné. Cette réponse dépend notamment de la **topographie du bassin versant** (plus les pentes sont

importantes, et plus la réponse hydrologique sera rapide – hydrogramme en forme de cloche) et **l'occupation des sols** (plus le bassin est urbanisé et plus les écoulements seront rapides, à l'inverse, la végétation tend à ralentir les écoulements et favoriser le processus d'infiltration).

La Figure 19 présente un exemple d'hydrogramme de crue d'un bassin versant en réponse à une précipitation. L'hydrogramme de crue se décompose de deux principales parties : **la crue** (correspondant au temps où le débit augmente jusqu'à atteindre le débit maximal : le débit de pointe) et **la décrue** (où le débit à l'exutoire commence à diminuer jusqu'à retrouver le débit initial). La crue se propage de l'amont à l'aval du cours d'eau, créant ainsi une **onde de crue**. Les différents temps identifiés sur la Figure sont définis dans le lexique du rapport. Notons en particulier **le temps de concentration**, qui correspond au temps nécessaire à une particule d'eau tombée sur la partie du bassin versant la plus éloignée hydrologiquement à atteindre l'exutoire.



**Figure 20 : Exemple de hyétogramme et d'hydrogramme en réponse à un évènement pluvieux (Musy, 2005)**

Les grands bassins versants (grands fleuves) sont associés à des temps de concentration longs (semaines), tandis que les petits bassins versants de régions montagneuses répondent à la pluie en quelques heures. Les bassins versants urbains, aux surfaces généralement fortement imperméabilisées (peu d'effet temporisateur de l'infiltration), répondent en quelques dizaines de minutes.

## *Les écoulements au sein d'un cours d'eau – notion d'hydraulique et de morphologie fluviale*

### Hydraulique fluviale

Une fois l'eau ayant atteint la rivière, les mécanismes entrant en jeu sont du ressort de l'hydraulique fluviale. Il est important de distinguer la différence entre la notion d'inondation et de crue. Comme mentionné précédemment, l'inondation correspond à une submersion temporaire de terres normalement hors d'eau. La crue quant à elle correspond à l'augmentation du débit d'une rivière (MEDDE France, 2004). Ainsi une crue n'engendre pas systématiquement d'inondation. A l'inverse, **l'étiage** se définit comme la période de basses eaux pendant laquelle le débit d'un cours d'eau atteint son minimum (MEDDE France, 2004).

L'eau peut s'écouler suivant différents régimes d'écoulement : (Degoutte, 2012)

- Régime permanent pour lequel le débit est constant dans le temps (adapté par exemple pour des écoulements en rivière à l'étiage ou en régime moyen).
- Régime transitoire pour lequel le débit varie en fonction du temps : l'écoulement d'une rivière en crue s'attache typiquement à un régime transitoire.

**L'hydraulique fluviale joue un rôle d'autant plus important vis-à-vis de l'aléa inondation que le bassin versant est grand.** Lorsque la pente est forte, et lorsque le champ d'inondation est réduit, la crue se propage sans s'amortir, et la relation (Q-y) reste univoque (onde cinématique). Lorsque la pente est faible, la crue s'amortit et la relation (Q-y) n'est pas univoque (onde diffusive). L'amortissement d'une crue souligne le rôle bénéfique des champs d'inondation. Les digues ou les remblais en lit majeur ont pour effet de supprimer ces amortissements. En l'ignorant, on transforme une onde diffusive en onde cinématique. Les conséquences peuvent en être très graves pour les riverains à l'aval.

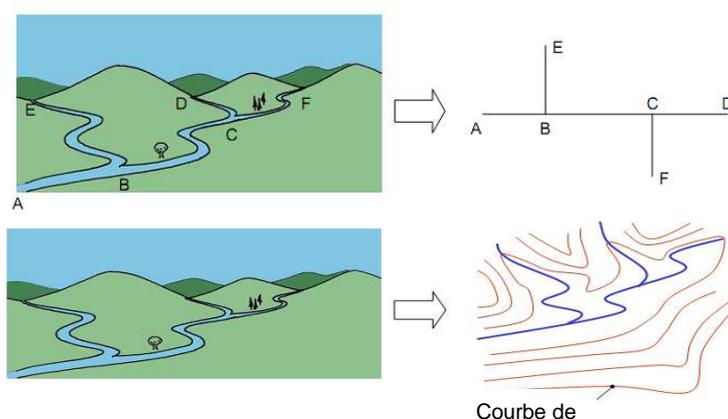
### Modélisation hydraulique

Les modèles hydrauliques (tels que Infoworks, Mike Urban, Mike flood, HydraRiv, HydraNet, Canoe) servent à principalement à **simuler une réalité fictive** (qui n'est pas encore arrivée, y compris pour **tester les effets d'un nouvel aménagement**) ou à **comprendre le fonctionnement hydraulique d'une réalité passée telle qu'une crue**. Ils permettent de calculer des valeurs de débits, de vitesses et hauteurs d'eau, et de volumes débordés (sortant d'un système de drain fermé, ou circulant dans le lit majeur d'un cours d'eau) à

chaque pas de temps, et aux différents « nœuds » du réseau hydrographique modélisé, pour un évènement hydrologique particulier.

Il existe des modèles dits modèles 1D (1 dimension modélisée) qui sont ceux le plus habituellement utilisés car plus simples à mettre en œuvre (et nécessitant moins de données géométriques et topographiques) que les modèles 2D (2 dimensions modélisées) (Figure 20). Les spécificités de chaque type de modèle sont détaillées dans l'annexe 2 de ce rapport.

Pour être fiables, les modèles demandent à être « calés » par exemple à partir de l'historique des mesures des débits ou des hauteurs d'eau, et des « laisses de crues ».

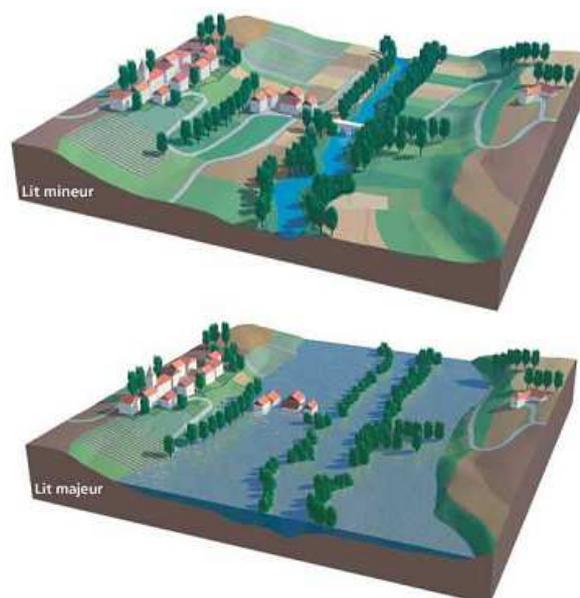


**Figure 21 : Illustration d'un modèle 1D (en haut) et d'un modèle 2D (en bas) (Guinot, 2003)**

### Morphologie fluviale

Une crue peut atteindre différents niveaux d'importance en fonction de la hauteur d'eau atteinte. Une rivière est constituée de plusieurs types de lit (Figure 21) : le **lit mineur** et le **lit majeur**. Dans le lit majeur, on distingue deux types de zones : (MEDDE France, 2004)

- Les zones d'écoulement situées au voisinage du lit mineur, présentant un risque important en raison de la force du courant ;
- Les zones d'expansion des crues où les vitesses sont faibles et qui permettent de réduire les débits à l'aval et d'allonger la durée des écoulements (**Bassin de la Sarthe Amont, 2007**).



**Figure 22 : Les différents lits d'une rivière (MEDDE France, Les inondations - Dossier d'information, 2004)**

Lors de crues, les débris transportés par les eaux sont susceptibles de s'agréger jusqu'à former un obstacle obstruant l'écoulement de l'eau : il s'agit du phénomène d'**embâcle** (MEDDE France, 2004). La **débâcle** désigne la rupture brutale de ces bouchons naturels.

## Annexe 4 – Différentes approches opérationnelles de la gestion intégrée du risque d'inondation

---

Plusieurs approches opérationnelles tendant vers la gestion intégrée du risque d'inondation ont été mises en place, essentiellement dans les pays développés. Les prochains paragraphes présentent les principales approches mises en place, qui présentent chacune leur intérêt propre vis-à-vis du risque d'inondation.

L'expérience a montré la difficulté de trouver des modèles opérationnels qui peuvent fonctionner sur la population et les institutions concernées. En effet, l'application sur le terrain du concept de gestion intégrée des inondations n'est pas toujours conforme à la stratégie prévue « sur le papier ». Pour y arriver, il est nécessaire de renforcer la culture du risque jusqu'à ce que les acteurs concernés prennent conscience de l'importance de traiter ces questions, et ce, tout particulièrement dans les pays en voie de développement. Ainsi **la motivation des parties prenantes est, dans les faits, plus importante que la manière dont est définie la gestion intégrée du risque d'inondation.**

### *L'approche internationale du Cadre de Sendai*

A l'échelle internationale, **le cadre de Sendai pour la Réduction du risque de catastrophe** (3ème conférence mondiale sur la réduction des risques et catastrophes tenue au Japon à Sendai en mars 2015) constitue **la référence en termes de stratégie de réduction des risques de catastrophes** au sens large, ce qui inclut en premier lieu le risque d'inondation. (UNISDR, Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophes 2015-2030, 2015)

Son objectif est **de prévenir les facteurs nouveaux** qui font peser un risque de catastrophe et **réduire les risques existants** au moyen de mesures intégrées et globales dans les domaines économique, structurel, juridique, social, culturel, environnemental, technologique, politique, institutionnel, de la santé et de l'éducation qui préviennent et réduisent l'exposition aux aléas et la vulnérabilité aux catastrophes, améliorent la préparation à l'intervention en cas de catastrophe et aux activités de relèvement, et renforcent ainsi la résilience.

Le Cadre de Sendai définit quatre priorités d'actions, nécessaires pour cibler les actions réalisées au sein ou entre différents secteurs par les Etats contributeurs aux niveaux local, national, régional et global. Ces priorités d'actions sont :

- **Priorité 1 - Comprendre le risque de catastrophe** : Les politiques de gestion des risques de catastrophe devraient être fondées sur la compréhension des risques de catastrophe dans toutes leurs dimensions : la vulnérabilité, les capacités et l'exposition des personnes et des biens, les caractéristiques des aléas et l'environnement.
- **Priorité 2 – Renforcer la gouvernance des risques de catastrophes pour mieux les gérer** : un tel renforcement favorise la collaboration et les partenariats entre mécanismes et institutions en vue de la mise en œuvre des instruments pertinents au regard de la réduction des risques de catastrophe et du développement durable.
- **Priorité 3 – Investir dans la réduction des risques aux fins de la résilience** : l'investissement public et privé au moyen de mesures structurelles et non structurelles est essentiel pour renforcer la résilience économique, sociale, sanitaire et culturelle des personnes, collectivités, pays et de leurs biens, et de préserver l'environnement.
- **Priorité 4 – Renforcer l'état de préparation aux catastrophes** pour intervenir de manière efficace et pour « reconstruire en mieux durant la phase de relèvement, de remise en état et de reconstruction

*L'approche des « 3P » : Prévision, Prévention, Protection*

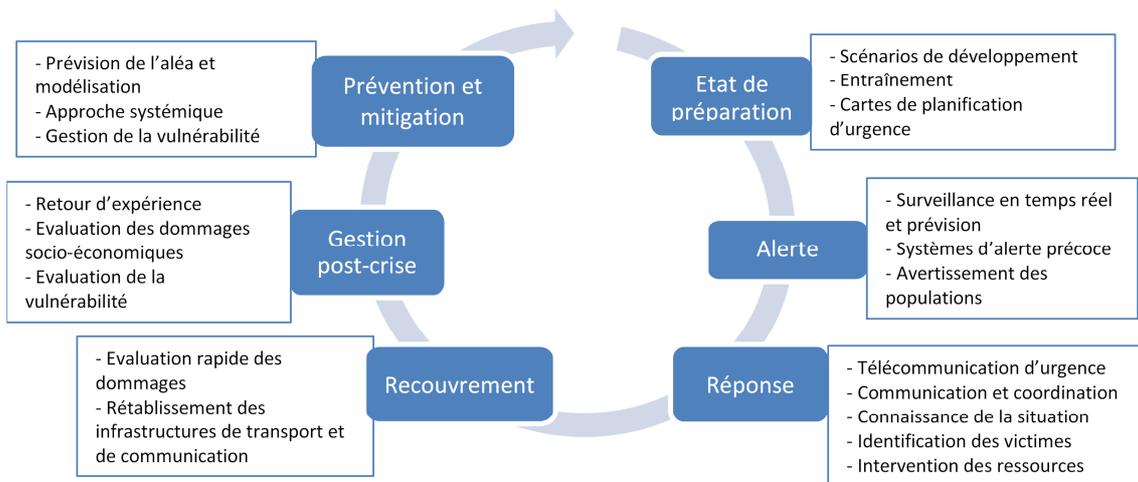
L'approche globale « Prévision, Prévention, Protection », appelé également « 3P », présente l'intérêt d'être facile à appliquer, dès le stade du démarrage de la prise en compte du risque d'inondation. Ce triptyque fait référence à : (Doussin, 2009)

- « **Prévision** : pour mieux prévoir la survenue des inondations, leurs conséquences, leur gestion. Ce volet inclut les outils de prévisions météorologiques et de mesures hydrologiques, mais aussi les moyens d'alerte et de diffusion de l'information préalable à la crise vers les personnes et les organismes exposés. Ce volet doit faciliter la réaction à la survenue d'une inondation.
- **Prévention** : organiser la vie des territoires inondables en fonction du risque pour diminuer la vulnérabilité des territoires et enjeux exposés. La prévention regroupe les actions visant à mieux connaître les zones inondables,

à diffuser l'information et promouvoir la sensibilisation des riverains, à limiter l'urbanisation en zone inondable, à réduire la vulnérabilité des enjeux exposés, à entretenir le lit et les ouvrages existants, à préserver les zones d'expansion de crue et gérer l'occupation du sol afin d'éviter un accroissement des écoulements, etc. La prévention c'est aussi la préparation à l'événement et à la gestion de crise permettant de retourner à un fonctionnement normal des réseaux et des structures. Ce volet doit permettre d'éviter qu'une inondation forte ne se transforme en catastrophe.

- **Protection** : afin de protéger les enjeux et les personnes par des ouvrages de proximité (digues contenant les crues) ou éloignés (ouvrages visant à ralentir et retenir les écoulements en amont des zones exposées, etc.)». Cette approche intègre donc également sur les infrastructures à proprement parler, en complément des mesures non-structurelles.

### L'approche cyclique de gestion des catastrophes



**Figure 23 : Le cycle de gestion des catastrophes, adapté de l'OCDE, 2009**

Une manière, classique en Europe, d'appréhender de la gestion du risque d'inondation consiste à prendre en compte, dans une approche cyclique, l'ensemble des activités, programmes ou mesures pouvant être mis en place avant (prévention, mitigation, état de préparation), pendant (alerte, réponse) ou après une catastrophe (recouvrement, gestion post-crise, et de nouveau prévention et mitigation) : c'est **le cycle de gestion des catastrophes** (Figure 22) (OCDE, 2009).

Cette approche présente l'avantage d'intégrer la temporalité du risque de catastrophe et la répétition des événements. Elle fait néanmoins l'objet de quelques contestations, certains la jugeant trop simple ou estimant que la vision cyclique n'est pas totalement complète ou adaptée à la gestion des risques de catastrophes. Elle donne néanmoins un cadre intéressant et initiateur d'une démarche intégrée de gestion du risque d'inondation, dans la mesure où elle interpelle l'ensemble de ses grandes composantes.

*Une approche couplée entre la Gestion Intégrée de la Ressource en Eau (GIRE) et la prise en compte du risque d'inondation*

La Gestion Intégrée de la Ressource en Eau (GIRE) est fondée sur une vision globale qui tient compte de la dynamique des ressources en eau au sein des espaces naturels que sont les bassins hydrographiques ou les aquifères. Elle s'appuie sur une implication de l'ensemble des acteurs du domaine de l'eau dans un nouveau cadre de gestion, permettant de concilier au mieux les différents usages pour le développement continu d'une région ou d'un pays, tout en préservant les besoins des générations futures. Elle intègre donc les préoccupations de la gestion durable de la ressource, l'équilibre entre la demande en eau et la ressource disponible, la définition de priorités et de règles acceptées parce que co-construites pour gérer les différents usages de l'eau et leur potentiels conflits.

Il est particulièrement intéressant **de coupler la GIRE à une approche de gestion intégrée du risque d'inondation dans les pays soumis à un stress hydrique**. La GIRE considère la gestion des risques inondation comme une composante de la gestion de l'eau puisque les aménagements ou les modes de gestion de l'eau influent sur la vulnérabilité au risque d'inondation. La GIRE implique une approche transversale de la gestion de l'eau dans son territoire hydrologique de référence, le bassin versant, et dans ses interactions avec les politiques sectorielles (eau, énergies, agriculture et pêche, industrie, tourisme, etc.). La gestion de l'eau s'appuie sur une approche participative impliquant usagers, planificateurs et décideurs politiques à tous les niveaux, en partant de la gestion locale pour aller vers la gestion globale : ainsi elle implique une solidarité amont-aval à l'échelle du bassin versant. Elle tient compte du fait que la ressource en eau est inégalement répartie sur le territoire et dans le temps, et qu'un accès « équitable » à l'eau selon les usages implique un mode de gestion concerté et collectif.

Selon la nature des ressources en eau, eaux superficielles ou eaux souterraines, la gestion intégrée permet de prendre en compte tous les aspects liés au risque d'inondation :

- la réduction des risques de crues par des ouvrages structurels de rétention, stockage, de ralentissement ou de protection en amont, ou l'aménagement des zones d'expansion de crue dans les zones rurales en amont des zones urbaines ;
- la gestion des eaux pluviales en milieu urbain : ouvrages structurels pour le réseau d'eaux pluviales, aménagement d'exutoires, ouvrages de stockage des eaux de pluies qui peuvent ensuite être réutilisées pour des activités humaines en dehors de la consommation d'eau potable (lavage, cuisine, abreuvement du bétail, etc.) ;
- la protection des réseaux d'adduction d'eau potable et des réservoirs, pour éviter les contaminations en cas d'inondation ;
- la collecte des eaux usées (assainissement) et les ouvrages (usages, dalots sous les ponts) : prise en compte du risque d'inondation pour le dimensionnement des ouvrages ;
- et les modes de gestion de la rivière : gestion alternative des écoulements, gestion pluviale à la parcelle, zone d'expansion de crues, stratégie de transit.
- La gestion des eaux souterraines contribue à prévenir l'affaissement des sols, ce qui atténue le risque d'inondation en plaine et protège les bâtiments et les infrastructures des risques d'écroulement dus à l'affaissement des sols.

## Annexe 5 – Les méthodes de dimensionnement des ouvrages de protection contre les inondations

---

Quel que soit l'ouvrage de protection envisagé, les méthodes de dimensionnement passent par plusieurs étapes présentées dans cette annexe. La première étape consiste à choisir la période de retour de l'événement pour lequel on souhaite se protéger, ou choisir l'événement pour lequel on souhaite se protéger. Dans ce dernier cas, on essaye en général d'évaluer la période de retour de cet événement. Ensuite, selon la connaissance de l'aléa au droit où on souhaite construire l'ouvrage, les méthodes de dimensionnement passent par l'usage des outils suivants :

- ***Pour les bassins versants ou sous-bassins versants inférieurs à 200 ha*** : on utilise une pluie de projet, construite le plus souvent avec la connaissance des coefficients de Montana, ou, si elles existent, en utilisant les courbes IDF. Ensuite, à l'aide d'un modèle simple de transformation pluie-débit, on calcule les débits de pointe aux exutoires, et les volumes débordés. Ceci permet de dimensionner les ouvrages de drainage ou de stockage nécessaires pour drainer les débits de pointe, ou stocker les volumes pour limiter le débit de pointe à l'exutoire. Si un événement pluviométrique et ses conséquences sont connues, on peut vérifier tout particulièrement le coefficient d'imperméabilisation du modèle et mieux caler le modèle si besoin. C'est en effet le coefficient d'imperméabilisation qui conditionne le plus fortement les résultats du modèle. La cartographie du bassin versant est donc très importante, mais en l'absence de cartographie, c'est un travail de terrain et des connaissances en pédologie qui permettront d'évaluer un bon coefficient d'imperméabilisation. Même lorsqu'il n'y a pas de données de pluies, il y a dans presque tous les pays des coefficients de Montana qui permettent de calculer des pluies de projet. Ces coefficients de Montana peuvent parfois dater des années 60, car ils ont pour beaucoup été calculés dans les pays où l'ORSTOM était implanté. Au pire, il y a des informations sur la pluviométrie générale du pays, et un expert aguerri sera capable d'extrapoler des coefficients de Montana assez représentatifs, et prendra une marge de sécurité pour avoir au moins l'évaluation d'un événement décennal ;
- ***Pour les bassins versants compris entre 200 ha, et quelques dizaines de milliers d'hectares*** : tout ce qui a été dit précédemment s'applique, mais il faut en plus construire un modèle de propagation hydraulique permettant de simuler des écoulements à surface libre et en canalisation. Ces modèles simulent les variations de débits, les volumes débordés ou stockés aux différents « nœuds » du réseau

hydrographique naturel ou artificiel, tel que les réseaux de canaux et de drainage. La construction d'un modèle hydraulique, si elle est réalisée pour simuler les écoulements dans un réseau existant, nécessite la connaissance de la géométrie et la pente des ouvrages. Là encore, une visite de terrain permettra de vérifier l'existence et l'état des ouvrages pour évaluer leur rugosité, vérifier le cas échéant leur pente et leur section réelle (c'est-à-dire par exemple leur niveau d'envasement, ou l'existence d'infrastructures linéaires les traversant et réduisant ainsi leur section hydraulique). Le calage du modèle hydrologique se fait sur les mêmes bases que pour le cas de petits bassins versants, et le calage du modèle de propagation hydraulique se fait a priori à partir de constats de zones inondées et de la connaissance des pluies ayant provoquées ces inondations. Les résultats du modèle hydraulique sont conditionnés par la justesse des géométries et des pentes des ouvrages, ainsi que par l'estimation d'un coefficient de rugosité des parois du réseau hydraulique, appelé également coefficient de Strickler. Etant donné que le modèle est susceptible de simuler des événements qui conduisent à des mises en charge et à des débordements, le calage du modèle nécessite d'évaluer les volumes débordés. Donc une bonne connaissance de la topographie des zones inondées est un plus, car elle permet de mieux évaluer les volumes inondés (c'est-à-dire les volumes qui sortent du système hydrographique). Une des difficultés consiste à savoir où et comment se réinjectent les volumes débordés dans le système. L'hypothèse la plus souvent retenue est de réinjecter dans le réseau les volumes débordés au droit du point où ces volumes ont débordé.

- ***Pour les bassins versants de plus de 300 km<sup>2</sup> qui sont drainés par un réseau hydrographique naturel, et en général par un cours d'eau pérenne*** : on utilise des données de débits (ou de hauteur transformées en débits) mesurées aux stations hydrologiques existantes. La plupart des stations ne sont en fait qu'une simple échelle relevée chaque jour ou parfois moins souvent par un agent qui note sur un registre la hauteur qu'il lit sur cette échelle. On cale le modèle sur les débits enregistrés à ces stations. Néanmoins, pour estimer des événements extrêmes, pour lesquels les séries hydrologiques sont trop courtes pour être précises, on peut coupler une approche hydrologique statistique avec une approche pluie-débit afin de déterminer un événement qui servira à tester les zones inondables et tester les effets d'ouvrages pour réduire ces zones inondables.

Une fois les outils de simulation construits, il est bon de chercher plusieurs solutions et d'évaluer, avec les outils construits, la plus efficace d'entre elles. A efficacité égale, la solution à mettre en place sera retenue sur la base des facteurs suivants : son coût, ses risques de défaillance, son coût d'entretien, l'espace foncier éventuellement utilisé, et/ou l'impact qu'elle a sur l'urbanisation et le paysage.

## Annexe 6 – Les différents types de radar utilisés pour la prévision météorologique

---

Il existe plusieurs types de radar, en fonction de la fréquence électromagnétique choisie. Nous retiendrons trois types de radars principalement utilisés dans le domaine météorologique : (MétéoFrance s.d.)

- **le radar à bande X (fréquence élevée)** : il s'agit des radars de nouvelle génération. Son coût est plus faible que les autres types de radars. Le principal inconvénient est la forte atténuation subit par le signal, qui peut engendrer par exemple une absence de détection d'une bande orageuse, située derrière une autre bande orageuse ;
- **le radar à bande S (fréquence faible)**: il permet de détecter d'intenses précipitations (averses), mais il dispose d'un écho faible, c'est-à-dire qu'il est plus difficile de détecter le signal rétrodiffusé par les gouttes de pluie ;
- **le radar à bande C (fréquence moyenne)**. Selon MétéoFrance, il peut offrir un bon compromis entre les deux autres types de fréquences.

## Annexe 7 – Les différents modèles de systèmes assurantiels

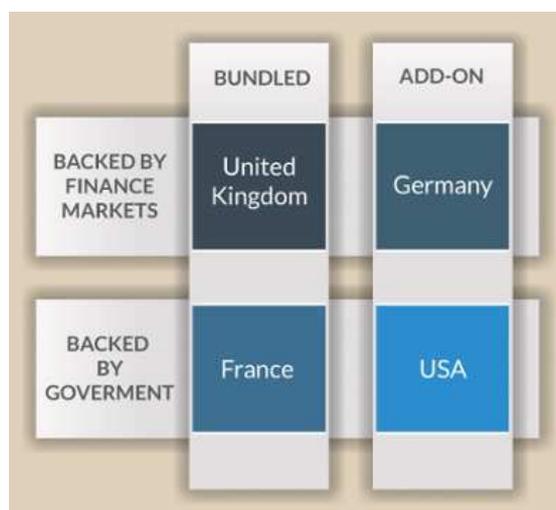
La concentration de vies humaines, de richesses et d'activité économique, dans des zones exposées aux risques naturels a suscité l'instauration de mécanismes pour réduire les conséquences dommageables de leur survenance. Parmi ceux-ci, l'assurance joue un rôle central. Pour accepter de continuer à s'installer dans les zones les plus propices au développement économique, il apparaît donc essentiel que la population bénéficie d'une protection convenable pour un coût soutenable et accessible.

Pour les pays possédant un système assurantiel, il existe quatre grands types de système (Maddox, 2014) :

- **les systèmes inclusifs privés et publics**
- **les systèmes optionnels privés et publics**

La mise en place d'un système ou d'un autre est souvent fonction de l'histoire du pays.

Le système inclusif privé est celui en place en Angleterre, en Hongrie, en Chine. C'est un système efficace où le risque d'inondation est systématiquement inclus dans toutes les polices d'assurance permettant de maintenir un coût relativement bas compte-tenu de l'assiette globale.



**Figure 24 : les différents types d'assurance contre les inondations (Maddox, 2014)**

Le système inclusif public est assez similaire sauf que l'Etat gère la couverture obligatoire et le fonds mutualiste. Ce système est très sécurisé pour les

assureurs. Ce système est incitatif pour les pouvoirs publics afin d'œuvrer en matière de gestion de l'occupation des sols afin que les indemnisations ne s'envolent pas. Par contre, il déresponsabiliserait les citoyens et dans une certaine mesure les assureurs.

Le système optionnel privé est présent dans de nombreux pays : Allemagne, Autriche, Afrique du Sud, etc. Le problème de ce système réside dans la faiblesse de son assiette, le nombre de souscrivants étant faible, les primes d'assurances sont élevées ne permettant pas d'inciter à l'assurance contre ce risque.

Le système optionnel public est celui des Etats-Unis où un fonds est géré par les autorités : National Flood Insurance Program. La difficulté réside dans la pression politique pour maintenir des primes plus basses que les primes actuarielles entraînant un déficit de capital. D'autre part, ce système n'incite pas les autorités publiques à actualiser les cartes décrivant le risque.

### *Description des systèmes assurantiels en Europe*

La description du système assurantiel qui suit s'appuie notamment sur le dossier thématique produit par l'Institut des Risques majeurs (IRMA) de Grenoble qui a comparé le système français à celui d'autres pays européens en 2007 (IRMA, Les arrêtés de catastrophes naturelles en Rhône-Alpes).

- **La France**

Le système d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles est entré en vigueur en France avec la loi 82-600 du 13 juillet 1982, aujourd'hui codifiée dans le code des assurances (articles L125-1 à L125-6). Il repose sur le principe de la solidarité nationale par la mise en place d'une cotisation additionnelle obligatoire de toute personne ayant souscrit un **contrat d'assurance multirisques habitation**. Cette cotisation additionnelle de tous les assurés permet l'extension de la garantie contre les effets des catastrophes naturelles dans le cas où l'état de catastrophe a été constaté par un arrêté interministériel. Cette reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle se fonde sur l'intensité « anormale » du phénomène naturel à l'origine des dégâts.

Les arrêtés Cat-Nat représentent un des critères importants permettant de juger de la vulnérabilité des territoires face au risque naturel face aux risques. Ils posent aussi la question de ce qu'est une catastrophe naturelle pour une société à partir du moment où une commune peut être reconnue CAT-NAT pour

une crue décennale (fréquence de retour de 10 ans) plusieurs fois de suite et de manière rapprochée.

- ***La Grande Bretagne***

Le régime britannique repose sur quatre grandes caractéristiques :

- les indemnisations sont effectuées par des assureurs privés, dans le cadre d'un marché libre et concurrentiel.
- le secteur des assurances couvre à peu près tous les risques de catastrophes naturelles, y compris la sécheresse, mais ceci au prix de contrats facilement résiliables, de clients très volatils, de primes très modulées et de certaines exclusions pour cause de risque excessif.
- les pouvoirs publics britanniques n'interviennent ni dans l'assurance, ni dans la réassurance des catastrophes naturelles. Ils n'accordent pratiquement pas d'aides financières sur fonds publics aux victimes lorsqu'une catastrophe se produit
- En revanche, ils mènent, sous plusieurs formes, une politique assez active de prévention.

Ce système explique que la détermination des risques relève de chacun des propriétaires qui doit mandater une entreprise afin de faire expertiser le risque auquel il est soumis

- ***L'Espagne***

Le régime espagnol est caractérisé par une forte intervention de l'Etat en matière de catastrophes naturelles, à travers le « Consorcio de compensación de seguros », organisme public d'assurance (mais non pas de réassurance). Celui-ci détient un monopole en matière d'assurances des principaux risques naturels. Il bénéficie d'une garantie illimitée de l'Etat (qui n'a cependant jamais eu à être mise en œuvre). Comme en France, le dispositif repose sur le principe de la mutualisation généralisée, qui implique l'obligation d'assurance et la non-modulation des primes selon le niveau de risque. Contrairement à la France, le régime espagnol comporte même, depuis 2004, une absence de franchise dans les indemnisations multirisques habitations et automobiles. Par ailleurs l'Espagne mène une politique de prévention des risques naturels, composante de sa politique d'aménagement du territoire et de protection de l'environnement.

- **L'Allemagne**

Le régime allemand se caractérise par :

- un système d'assurance libre : les conditions de couverture sont libres en termes de tarification, de franchises, de modulation des primes et des indemnisations en fonction des risques couverts, ce qui entraîne un taux d'assurance effective relativement faible et des cas d'exclusion de fait assez nombreux. Les risques de sécheresse ne sont jamais assurés et aucune couverture pour ces risques n'existe.
- la non-intervention de l'Etat, Bund et Länder.

Cependant, lorsque l'ampleur des sinistres est importante, les finances publiques interviennent de façon massive. Le cas le plus significatif de cette intervention a été celui des inondations de l'Elbe en 2002 qui ont déclenché des aides publiques de l'ordre de 7,1 milliards euros.

L'Allemagne met en place une politique assez active de prévention des risques naturels, notamment en ce qui concerne les inondations.

- **La Suisse**

Le régime suisse est caractérisé par la coexistence d'un modèle d'assurance privé et d'un modèle d'assurance public, fondé, dans 19 cantons, sur le monopole local d'établissements cantonaux d'assurance (ECA). L'assurance contre les dommages dus à des événements naturels constitue aujourd'hui une extension obligatoire des contrats d'assurance incendie. Les assureurs privés sont regroupés au sein du Pool suisse pour la couverture des dommages causés par les forces de la nature. Ce pool institue une double solidarité entre les assureurs et les assurés. Les ECA ont mis en place un système de mutualisation du risque comportant plusieurs niveaux de réassurance :

- l'Union Intercantonale de Réassurance (UIR) s'apparente à un organisme de réassurance offrant des conditions privilégiées.
- lorsque le total des sinistres dus aux éléments naturels atteint un certain montant, le fonds CIREN (Communauté Intercantonale de Risques Eléments Naturels) prend en charge l'excédent de sinistres au-delà de ce plafond.

Par ailleurs, la Suisse mène une politique de prévention des catastrophes naturelles particulièrement élaborée. Cette politique combine une forte implication des pouvoirs publics (aménagement du territoire, urbanisme, réduction du risque, normes de construction) et un rôle actif des assureurs.

## Annexe 8 – Analyses détaillées des territoires à risques

### Dakar (Sénégal)

#### ❖ **Présentation générale**

Dakar est la capitale du Sénégal, un pays de l’Afrique de l’Ouest bordé à l’ouest par l’Océan Atlantique, au nord par la Mauritanie, l’est par la Mali et au sud par la Guinée-Bissau et la Guinée. Alors que Dakar n’occupe que 0,3% du territoire national, la ville concentre plus de 20% de la population ainsi que la majorité des activités économiques et des services publics (GFDRR, 2014).

**Tableau 3 : Données générales sur le Sénégal et Dakar**

Type d’information	Valeur	Date	Source
Population du Sénégal	14,1 Millions d’habitants	2014	Site Prevention Web
Population de Dakar	3,1 millions d’habitants <i>(soit 23% de la population du pays)</i>	2013	Agence nationale de la statistique et de la démographie
Densité de la population	73,4 hab/km <sup>2</sup>	2014	Site Prevention Web
Classement PNUD	163/187	2013	Rapport PNUD 2014 (classement datant de 2013)

#### ❖ **Caractérisation de l’aléa à Dakar**

##### **Les régimes climatique et pluviométrique**

La région de Dakar est localisée dans la partie centrale du Sénégal (au niveau de la presqu’île du Cap Vert) entre, au nord un climat désertique et chaud, et au sud un climat de type tropical. Le climat est ponctué par deux saisons principales:

- une saison des pluies, appelée aussi hivernage, s’étendant de juin à octobre (période d’été) ;
- une saison sèche, de novembre à mai (période d’hiver).

La région de Dakar présente un microclimat de type côtier influencé par les alizés maritimes (novembre à juin) et la saison des pluies. Les précipitations sont générées par l’alizé issu de l’anticyclone de Sainte Hélène. Les hauteurs

de pluie annuelles à Dakar sont généralement comprises entre 400-500mm. Le mois d'août est particulièrement pluvieux (BRL Ingénierie, 2015).

### Les facteurs aggravants l'aléa

Les principaux facteurs engendrant une aggravation de l'aléa sont :

- **le relèvement de la nappe phréatique** de Thiaroye (localisée près de la ville de Pikine) dû essentiellement à (i) la diminution de l'exploitation de la nappe en raison des concentrations élevées en nitrate rendant l'eau impropre à la consommation, et à (ii) l'infiltration des eaux pluviales à l'hivernage et des eaux usées (**Gouvernement du Sénégal, 2010**) ;
- **les impacts du changement climatique** en termes :
  - o de précipitations : les modélisations sur les précipitations pour l'Afrique de l'Ouest sont incertaines aussi bien sur l'amplitude du changement que sur le type de changement (hausse/baisse), malgré l'observation à partir des années 1970 d'une baisse globale des précipitations et d'une diminution de la durée de l'hivernage. Plusieurs modèles climatiques globaux du CMIP5 indiquent une augmentation des précipitations au cœur de la saison des pluies, et un retard dans le démarrage de la saison des pluies. Mais les modèles climatiques régionaux sont susceptibles de modifier ces indications. Les modèles régionaux suggèrent en revanche une augmentation du nombre d'évènements pluvieux extrêmes au Sahel entre mai et juillet (**GIEC, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of the working group II to the Fifth Assessment Report of IPCC, 2014, pp. p 1209-1211**) (**Gouvernement du Sénégal, 2010**).
  - o de niveau de la mer et d'érosion côtière : dans son dernier rapport, le GIEC estime que le niveau de la mer devrait continuer de monter au cours du 21<sup>ème</sup> siècle et même s'accélérer. L'érosion côtière, commencé depuis les années 1980, est essentiellement dû à la montée de la mer, mais également aux activités humaines (extraction de sable, constructions sur la côte). L'érosion est susceptible d'augmenter le risque d'inondation côtière sur Dakar (**GIEC, 2014, p. p 1140**).

### ❖ **Caractérisation des enjeux et des vulnérabilités à Dakar**

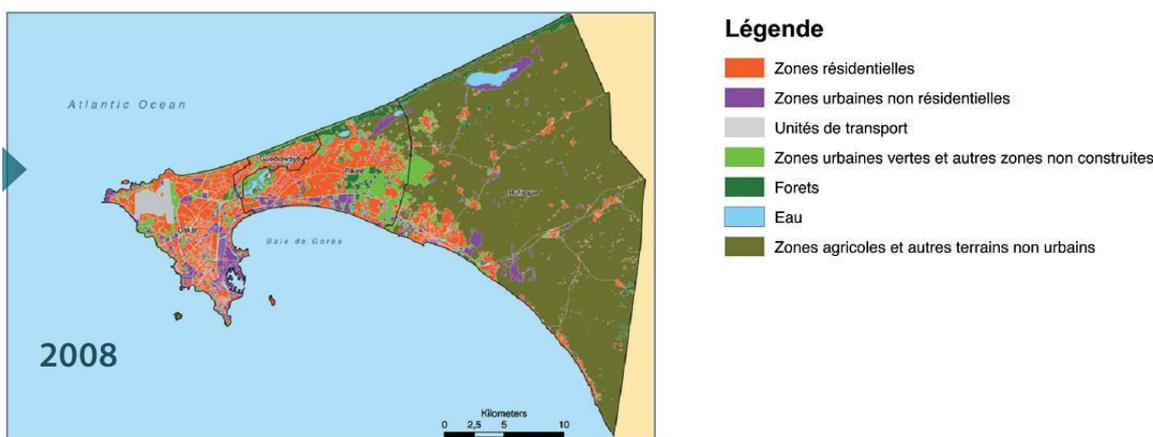
#### **Caractéristiques de l'urbanisme**

La région de Dakar se compose de 3 grandes zones :

- **une zone urbaine** localisée à l'extrémité de la presqu'île du Cap Vert. Cette zone est caractérisée par un enclavement physique et une concentration d'activités (port, ministères, administrations, ambassades, banques, industries d'import-export, etc.) ;
- **une zone périurbaine** correspondant aux communes de Pikine et de Guédiawaye. Cette zone est essentiellement résidentielle mais présente

également quelques zones d'activités. Elle est caractérisée par une absence de structuration urbaine (multiplication des lotissements, y compris dans les zones de grande insalubrité et/ou dans les zones exposées au risque d'inondation, destruction des biens publics tels que le sable côtier et les espaces verts).

- **une zone rurale** correspondant à la commune de Rufisque. Elle est composée essentiellement de terres agricoles.



**Figure 25 : Occupation des sols de la région de Dakar (IAGU, 2009)**

### Facteurs aggravant les vulnérabilités

Les principaux facteurs aggravant les vulnérabilités sont :

- **le développement de l'urbanisation** qui entraîne, en plus d'une artificialisation des sols, une obstruction des voies naturelles d'écoulement des eaux pluviales. Par exemple, l'autoroute traversant la région de Dakar fait office de digue en raison du manque de buses permettant l'écoulement des eaux ;
- **le niveau de vie des populations touchées.** Dans la région de Dakar, les populations installées dans les zones inondables sont constituées essentiellement de ménages pauvres. La sécheresse entre les années 1970 et 1990 a entraîné un fort exode rural vers Dakar, principal pôle d'attraction économique, et un assèchement des sols dans le quartier des Niayes à Pikine. Pour pallier au manque d'espace, les populations se sont installées dans les zones nouvellement asséchées (mais situées dans les zones de dépression). Près de 40% des nouvelles installations ont été réalisées dans des zones potentiellement très exposées à un risque d'inondation, d'érosion côtière ou de montée du niveau de la mer. Ce processus d'urbanisation a échappé au contrôle et à la régulation des autorités. *(IAGU, 2009) (Diongue, 2014)*
- **le manque de maîtrise de l'occupation des sols.** les Plans d'Urbanisme prévoient des zones « non aedificandi », pour préserver de toute urbanisation les points les plus bas, susceptibles de s'inonder le plus facilement pendant la période d'hivernage. Mais dans les faits, ces zones présentant de nombreux avantages pour les populations (zones

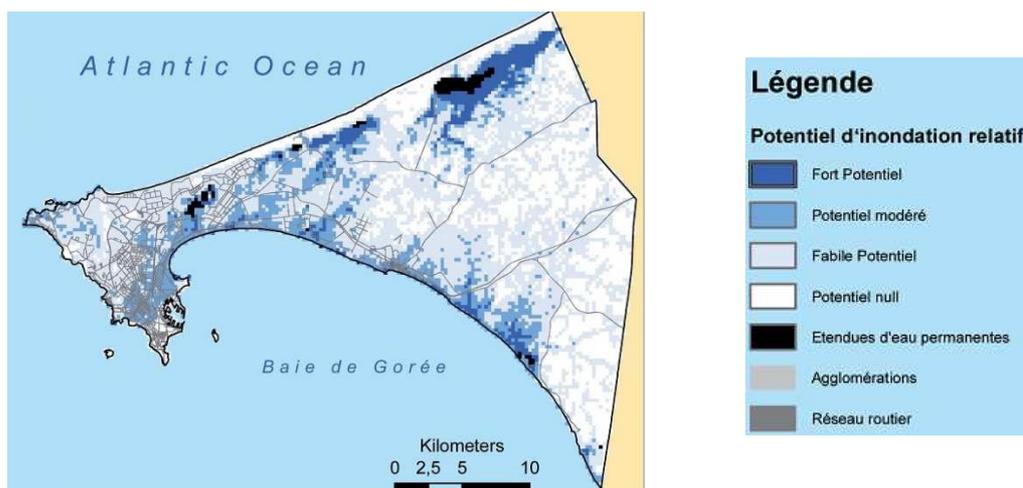
vierges de toute urbanisation, proches des centres villes, planes, etc.) se transforment en habitat irrégulier.

- **le manque de coopération entre les institutions.**

#### ❖ **Synthèse sur le risque, les inondations passées et leurs conséquences à Dakar**

##### **Typologie d'inondation à Dakar**

Les inondations touchant Dakar sont essentiellement de type ruissellement urbain, mais les effets du changement climatique font craindre une augmentation du risque de submersion. Le risque d'inondation (Figure 25) provient de la conjonction des multiples conditions (le cumul et l'intensité des précipitations, durant l'hivernage, le relèvement de la nappe phréatique de Thiaroye, l'insuffisance des infrastructures de drainage, l'insuffisance des réseaux d'assainissement, l'aménagement urbain non contrôlé, l'occupation des zones de dépression, le déboisement, etc.).



**Figure 26 : Potentiel d'inondation dans la région de Dakar (IAGU, 2009)**

##### **Les inondations passées et leurs impacts**

Les événements majeurs de ces dernières années au Sénégal sont résumés dans le Tableau 4. Selon le Rapport d'évaluation des besoins post-catastrophes réalisé par le Gouvernement du Sénégal (2010), le montant des dommages causés par les inondations à l'échelle du pays entre 1980 et 2009 (inclus) s'élève à 142 Millions USD et ont touché 900 000 personnes.

Les principaux impacts des inondations sont :

- **Economiques** : dégradation des bâtiments (dont les habitations), arrêt des activités (agriculture, postes de santé, éducation, marchés locaux, etc.) ;

- **Sociaux** : dégradation du cadre et des conditions de vie (par exemple, la perte de l'utilisation des toilettes) et des liens entre les habitants (génération de conflits entre voisins, accroissement de l'insécurité, etc.) ;
- **Sanitaires** : apparition de maladies (choléra, typhoïde, paludisme, diarrhée, dermatose, maladies respiratoires, etc.) en raison des eaux stagnantes favorisant la prolifération de moustiques. Augmentation du risque d'électrocution en raison de la précarité des installations électriques. Insécurité alimentaire. Les inondations semblent être également susceptibles de polluer les ressources en eau potable (forages autour de la région de Dakar), néanmoins peu d'informations sont disponibles à ce sujet.

**Tableau 4 : Synthèse des évènements majeurs de ces dernières années au Sénégal**

Date	Conséquences de l'évènement	Source
2009	Cette inondation a touché entre 485 000 à 507 000 personnes sur le Sénégal. Les dégâts sont estimés à 104 Millions USD sur le Sénégal, touchant principalement le logement (49%), la santé (14%), l'agriculture (11%), l'éducation (7%) et le transport (10%). La région de Dakar est la zone la plus touchées par l'inondation. Près de 360 000 personnes ont été affectées : 11% de la population régionale a été touchée et 44% de la population de la ville de Pikine a été directement affectée. Les dégâts ont été estimés à 82 millions USD rien que pour la zone périurbaine de Dakar (dont 33 millions USD pour les logements).	(GFDRR, Sénégal: Inondations urbaines. Le Relèvement et la Reconstruction à partir de 2009, 2014)

#### ❖ **Gouvernance et politiques/stratégies de gestion au Sénégal**

Une grande diversité d'acteurs (ministères, structures publiques, parapubliques ou privées, collectivités locales, société civile, etc.) sont impliqués dans le risque d'inondation au Sénégal (ces acteurs sont présentés en Annexe 1). Les rôles et les missions de chacun ne sont pas toujours clairement établis, amenant à un possible empiètement entre leurs périmètres d'action et leurs compétences. Cette diversité est également source de manque de coopération et de coordination à l'échelle nationale et même locale.

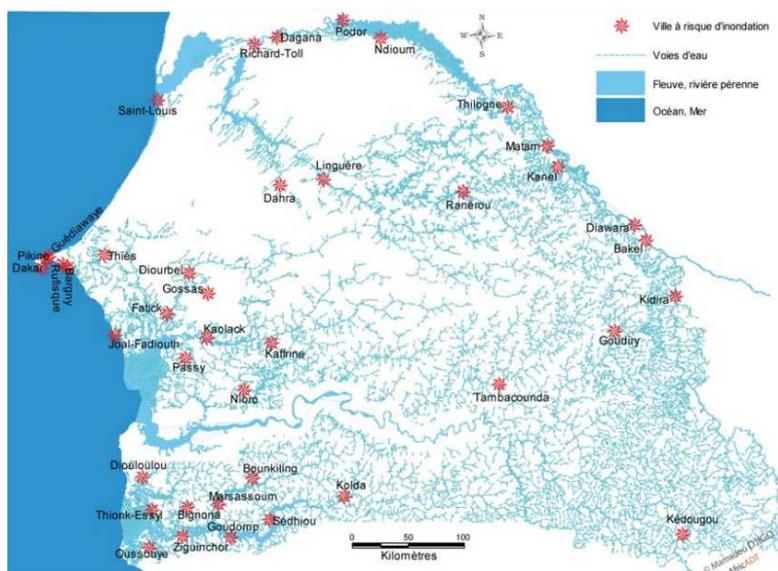
Le Sénégal fait partie des 187 Etats ayant adopté le nouveau cadre international de Sendai, en mars dernier. Avant cela, le pays avait participé à l'évaluation du cadre d'actions de Hyogo. Concernant la stratégie nationale de gestion des inondations, le Sénégal s'est engagé vers une politique de relèvement et de gestion durable des inondations suite aux inondations de 2009, avec en particulier l'élaboration de : (GFDRR, Sénégal: Inondations urbaines. Le Relèvement et la Reconstruction à partir de 2009, 2014)

- **PDNA (Post Disaster Needs Assessment)** : il s'agit d'un programme d'évaluation des dommages, des pertes et des besoins, réalisé à la suite des inondations de 2009, dont l'objectif était d'aboutir à un plan d'action stratégique de relèvement et de reconstruction à court, moyen et long termes ;
- **PROGEP (Projet de Gestion des Eaux Pluviales et d'adaptation au changement climatique)** : ce plan, d'une durée de 5 ans, vise à réduire les inondations par une approche intégrée et durable. Il prévoit notamment la construction d'infrastructures d'évacuation des eaux pluviales dans la région de Dakar ;
- **PDGI (Plan Décennal de Gestion des Inondations)** : lancé à la suite des inondations de 2012, ce plan vise à renforcer de manière significative la politique de gestion des inondations et identifie 10 décisions stratégiques (comprenant notamment l'implication des collectivités locales, l'amélioration de la coordination interministérielle).

Aujourd'hui, le Sénégal affiche la gestion des inondations comme une priorité nationale.

#### ❖ *Ouverture sur d'autres territoires au Sénégal*

La région de Dakar n'est pas la seule zone du Sénégal touchée par les inondations (Figure 26). Ainsi des zones urbaines sont concernées par un risque d'inondation fluviale comme par exemple Saint-Louis, Matam (situées au nord du Sénégal, et sujettes au débordement du fleuve Sénégal), et Kédougou (située sud-est et concernée par le débordement du fleuve Gambie). D'autres sont plutôt concernées par des problématiques de ruissellement urbain comme par exemple Kaolack et Fatick. Enfin le Delta du Saloum et Saint-Louis sont exposés à un risque d'inondation côtière. (Gouvernement du Sénégal, 2010)



**Figure 27 : Villes du Sénégal exposées au risque d'inondation (UNISDR, 2013)**

*Port-Louis (Maurice)*❖ **Présentation générale de Maurice et de Port Louis**

Port Louis est la capitale de la République de Maurice. Cette dernière se compose de l'île principale, Maurice, et de plusieurs îles périphériques (dont la plus grande est Rodrigues) pour une superficie totale de 2 040 km<sup>2</sup>. Elle est située dans le sud-est de l'Océan Indien, à proximité du Tropique du Capricorne. Avec une population de 135 000 habitants en 2014 (CIA, 2015), Port Louis représente environ 10% de la population de Maurice.

**Tableau 5 : Données générales sur Maurice**

Type d'information	Valeur	Date	Source
Population de Maurice	1,3 Millions d'habitants	2014	Site Prevention Web
Population de Port Louis	135 000 habitants	2013	CIA World Factbook
Densité de la population	638,6 hab/km <sup>2</sup>	2014	Site Prevention Web
Classement PNUD	63/187	2013	Rapport PNUD 2014 (classement datant de 2013)

❖ **Caractérisation de l'aléa à Maurice et à Port Louis****Les régimes climatique et pluviométrique**

Maurice dispose d'un climat tropical influencé par des vents du sud-est. La température annuelle moyenne de l'île s'élève à 22°C, et un ensoleillement quotidien de 7 à 8h en moyenne sur l'année. Port Louis, la capitale, bénéficie d'hivers particulièrement doux et présente une température moyenne annuelle de 23°C.

Le climat est ponctué par deux saisons principales :

- l'hiver sec et relativement chaud (de mai à octobre; octobre étant le mois le plus sec)
- l'été chaud et humide (novembre à avril, février étant le mois le plus humide), il s'agit de la saison des cyclones.

La répartition spatiale des précipitations est influencée par les vents (venant du sud-est) et par la topographie de l'île (des montagnes entourant le plateau central de l'île). Ainsi les montagnes protègent les régions du nord et nord-est, relativement plus sèches que le sud et le plateau central. Les cumuls annuels

de pluie varient entre 600mm (ouest), 900mm (au nord), 1300-1400mm (au sud et à l'est) et jusqu'à 4000mm (dans le plateau central). L'intensité d'une pluie « normale » est répartie de la même manière que les cumuls annuels de pluie, avec environ 30mm/h sur la côte et 50 mm/h au niveau du plateau central. (ICLEI, 2012)

### Les facteurs aggravants l'aléa

Les principaux facteurs engendrant une aggravation de l'aléa sont :

- **les pratiques agricoles.** On assiste à une augmentation des surfaces abandonnées (due à la diminution des surfaces cultivées en canne à sucre dont une partie seulement est convertie vers d'autres cultures), engendrant une érosion et une augmentation du ruissellement, et par conséquent une augmentation du risque d'inondation en aval. En outre, l'état des sols après la récolte de la canne à sucre (entre juillet et décembre) tend également à augmenter l'érosion et le ruissellement. **(Hunink & Droogers, 2013)**
- **les impacts du changement climatique** en termes : **(ICLEI, 2012) (Ministère de l'Environnement de Maurice, 2012) (McSweeney, New, & Lizcano, 2012)**
  - o De précipitations : d'après les modèles globaux (GCM), les précipitations devraient globalement diminuer. La période de transition entre l'été et l'hiver devrait se rallonger. Il est probable que les gros événements pluvieux soient plus intenses et plus fréquents, entraînant des inondations plus fréquemment.
  - o De cyclones : l'intensité des cyclones devrait augmenter
  - o De niveau de la mer : celui-ci augmenterait plus vite ces dernières années. Le service météorologique de Maurice a estimé une augmentation de 3,8mm/an en moyenne du niveau de la mer au cours des 5 dernières années (comparé à une moyenne de 2,1mm/an sur les 22 dernières années).
  - o De température de la mer : l'augmentation de la température de la mer fragilise les coraux, ce qui réduit la protection des côtes (moins d'atténuation des vagues), et donc participe à l'érosion côtière.

### ❖ **Caractérisation des enjeux et des vulnérabilités à Maurice et à Port Louis**

#### Caractéristiques de l'urbanisme

Port Louis est le centre administratif et économique du pays ainsi que le principal pôle commercial (avec notamment le seul port de l'île). La ville concentre les bureaux des principales entreprises, et différentes activités de manufacture. La ville se caractérise par une forte densité due à une importante urbanisation (Port Louis représentant un pôle d'attraction) couplée au manque d'espace disponible. L'urbanisation a également eu lieu sur les voies naturelles d'écoulement des eaux. (UN-Habitat, 2011)

Les quartiers les plus pauvres (bidonvilles notamment) se sont développés sur les flancs des montagnes environnantes. Dans ces quartiers, les habitants n'ont pas toujours accès aux services essentiels : eau potable, assainissement et électricité. (UN-Habitat, 2011)

### **Facteurs aggravant les vulnérabilités**

Les principaux facteurs aggravant les vulnérabilités sont :

- Les habitations sommaires des quartiers les plus pauvres situés à flanc de montagnes, notamment sur la Tourelle du Tamarin où les pentes excèdent 20% et où des constructions ont été cautionnées voire approuvées par les autorités ;
- Le faux sentiment de sécurité engendré par le niveau de développement de la ville. En effet, le développement de l'île tend à une imperméabilisation des sols (urbanisation), une diminution du couvert végétal, (ces deux facteurs engendrant une augmentation des eaux de ruissellement), une augmentation des enjeux situés dans les zones exposées au risque d'inondation, ainsi qu'une diminution de la culture du risque des populations (**Asconit, 2013**). Ce phénomène a été illustré lors de l'inondation éclair de 2013, engendrant la mort d'une dizaine de personnes dans un passage souterrain reliant le front de mer au centre historique de la capitale.

### **❖ Synthèse sur le risque, les inondations passées et leurs conséquences**

#### **Typologie d'inondation à Port Louis**

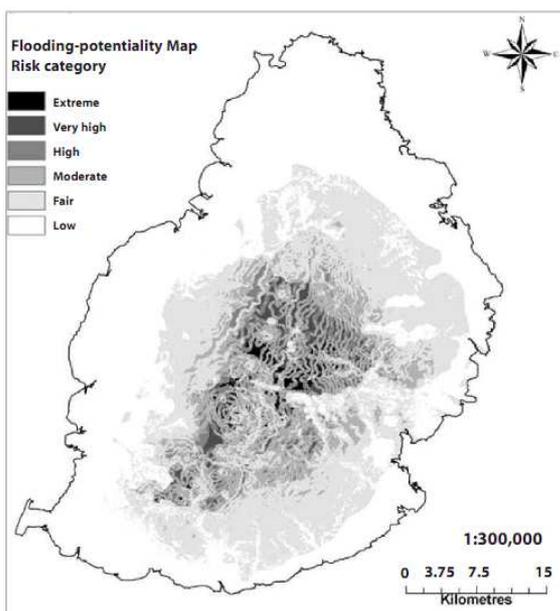
La ville de Port Louis est principalement soumise à un risque **d'inondation éclair**. Le risque d'inondation (illustré à l'échelle de l'île Maurice sur la Figure 27) provient de la conjonction des multiples conditions dont en particulier les fortes précipitations, les pentes fortes des montagnes entourant la ville (Figure 28), le développement humain sur les voies naturelles d'écoulement de l'eau et l'insuffisance du réseau d'évacuation des eaux (y compris insuffisance de son entretien).

#### **Les inondations passées et leurs impacts**

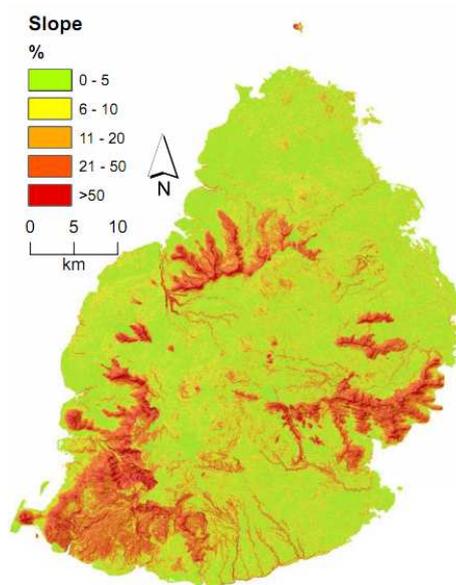
L'évènement majeur de ces dernières années à Port Louis a eu lieu en mars 2013. Des pluies torrentielles se sont abattues sur la capitale: plus de 150 mm d'eau sont tombés en l'espace de 2 heures. Cette inondation éclair a entraîné la mort de 11 personnes. Aucune évaluation des dommages n'a été réalisée.

Les principaux impacts des inondations à Port Louis sont : (ICLEI, 2012)

- **Economiques** : interruption des activités du port (le seul de l'île Maurice), dégradation des bâtiments et d'infrastructures (routières notamment) dues aux forts débits des eaux de ruissellement et aux débris convoyés ;
- **Sanitaires** : contamination possible des sources d'eau potable.



**Figure 28 : Cartographie du potentiel d'inondation sur l'île Maurice (Fagoonee, 2005)**



**Figure 29 : Penthes sur l'île (Hunink & Droogers, 2013)**

#### ❖ **Gouvernance et politiques/stratégies de gestion à Maurice**

Maurice fait partie des 187 Etats ayant adopté le nouveau cadre international de Sendai, en mars dernier. Selon l'UNISDR (2015), avant 2013, les catastrophes ont été traitées de manière ponctuelle par des structures opérant uniquement lorsque les catastrophes étaient sur le point de frapper ou une fois qu'elles avaient eu lieu. A l'heure actuelle les principales instances pour la gestion des risques de catastrophes sont : (UNISDR, 2015)

- Le National Disaster Risk Reduction and Management Centre (NDRRMC) qui a été établi en 2013 (et opérationnel depuis octobre 2013). Il s'agit de la principale institution de Maurice pour la planification, l'organisation, la coordination et la surveillance des activités de gestion et de réduction du risque de catastrophes, à tous les niveaux. Il est placé sous l'autorité du Premier Ministre. Cette structure est notamment responsable du développement et de la mise jour d'un système d'information complet et intégré de gestion des catastrophes, ainsi que d'une base de données, comprenant les informations sur les risques, et les vulnérabilités, les données d'évaluation des risques et une cartographie nationale des risques sur SIG ;
- Le National Risk Reduction and Management (NDRRM) Council qui a été mis en place en attendant la promulgation du nouveau cadre de la politique générale sur les risques. Il a une composition similaire à l'ancien comité CCNDC (Central Cyclone and Other Natural Disasters

- Committee) et se concentre sur l'état de préparation et la réponse post-catastrophe ;
- Le Local Disaster Risk Reduction and Management Committee mis en place dans chaque conseil municipal ou conseil de district pour gérer la réduction des risques de catastrophes à l'échelle locale.

### *Beyrouth (Liban)*

#### ❖ **Présentation générale du Liban et de Beyrouth**

Le Liban est un pays du Proche-Orient, situé sur la côte orientale de la Mer Méditerranée. Le Liban partage ses frontières avec la Syrie (au nord et à l'est) et Israël (au sud). Beyrouth est la capitale et la ville la plus peuplée du pays : elle représente près de 50% de la population du pays. La ville est située sur un cap rocheux, bordant la Méditerranée et à proximité de la chaîne de montagne du mont Liban. Beyrouth est le centre administratif et politique du Liban, mais elle constitue également le cœur économique du pays. A titre illustratif, le port de Beyrouth fait transiter 75% du PIB du Liban (Croix Rouge, 2013).

**Tableau 6 : Données générales sur le Liban et Beyrouth**

Type d'information	Valeur	Date	Source
Population du Liban	4,5 Millions d'habitants	2014	Site Prevention Web
Population de Beyrouth	2,2 Millions d'habitants (soit près de 50% de la population du pays)	2015	CIA World Factbook
Densité de la population du Brésil	437 hab/km <sup>2</sup>	2014	Site Prevention Web
Classement PNUD	65/187	2013	Rapport PNUD 2014 (classement datant de 2013)

#### ❖ **Caractérisation de l'aléa à Beyrouth**

##### **Les régimes climatique et pluviométrique**

Beyrouth dispose d'un climat méditerranéen (climat Csa dans la classification de Köppen-Geiger), ponctué par deux saisons : (BBC Weather, 2011)

- Un été chaud et sec entre mai et septembre, avec des températures maximales moyennes supérieures à 30°C, et des précipitations mensuelles moyennes inférieures à 20mm.

- Un hiver doux et humide entre octobre et avril, durant laquelle sont concentrées la majorité des précipitations (entre 50mm et 200mm par mois). La température minimale moyenne s'élève à 10°C (en janvier et février).

La pluviométrie moyenne annuelle à Beyrouth s'élève à près de 900mm, les mois les plus pluvieux étant décembre et janvier (environ 200mm par mois). En revanche, durant les mois estivaux il ne pleut quasiment jamais. (BBC Weather, 2011)

### **Les facteurs aggravants l'aléa**

Les principaux facteurs engendrant une aggravation de l'aléa sont :

- L'obstruction des infrastructures de drainage et des voies d'écoulement des eaux par les déchets. En raison du manque de système de collecte des déchets, les habitants de Beyrouth ont pris l'habitude de jeter leurs déchets dans la rivière. Ceux-ci sont transportés dans le système de drainage de la capitale, s'accumulent jusqu'à former des barrages obstruant l'écoulement des eaux et engendrant des inondations en surface (refoulement des réseaux). Ainsi, en janvier 2013, ce phénomène a entraîné l'inondation d'une route principale dans le quartier Karantina à l'est de Beyrouth (**Redd, 2013**).
- les effets du changement climatique, sur les précipitations mais également l'élévation du niveau de la mer. Le modèle climatique PRECIS a permis de mettre en évidence les projections suivantes pour le Liban : (**Minsitère de l'Environnement du Liban**)
  - o une hausse des températures de 1°C à horizon 2040 et de 3,5°C en 2090 sur les côtes (dans les terres, cette hausse devrait être davantage marquée)
  - o une diminution des précipitations annuelles de l'ordre de 10 à 20% d'ici à 2040, et de 45% environ d'ici 2090
  - o une prolongation de la durée moyenne des périodes de sécheresse de 9 à 18 jours d'ici à 2090
  - o une diminution de 40 à 70% de la couverture de neige pour une augmentation respective de 2°C à 4°C de la température. Ceci devrait influencer les régimes des rivières et la recharge des nappes phréatiques

### **❖ Caractérisation des enjeux et des vulnérabilités**

#### **Caractéristiques de l'urbanisme**

L'urbanisme de Beyrouth a été fortement marqué par les différents conflits au cours des dernières décennies. Autrefois organisée autour d'un centre-ville fort et de différents cercles concentriques dans les quartiers périphériques, la ville est complètement réorganisée au cours de la guerre civile qui a eu lieu entre 1975 et 1990. Cette guerre a eu pour conséquence la destruction du centre-ville et la division de la ville en quartiers communautaires : la ville a été séparée par

une ligne de démarcation, appelée ligne verte, séparant les quartiers musulmans à l'ouest essentiellement sunnite), des quartiers chrétiens à l'est. Les musulmans chiites s'installent quant à eux majoritairement dans la banlieue sud de Beyrouth. (Kastrissianakis, 2012)

A la fin de la guerre, le gouvernement lance un programme de reconstruction de la ville en mai 1991. Mais celui-ci est mal accepté par la population qui y voit une confusion entre l'intérêt public et l'intérêt privé, ainsi qu'un manque de respect de la propriété privée (l'Etat impose de nombreuses expulsions sans une politique de relogement jugée satisfaisante). En 2006, un nouveau conflit (avec Israël) entraîne de nouveaux la destruction de nombreux quartiers et infrastructures, suivie d'une nouvelle phase de reconstruction. (Kastrissianakis, 2012) (Wikipédia, 2016)

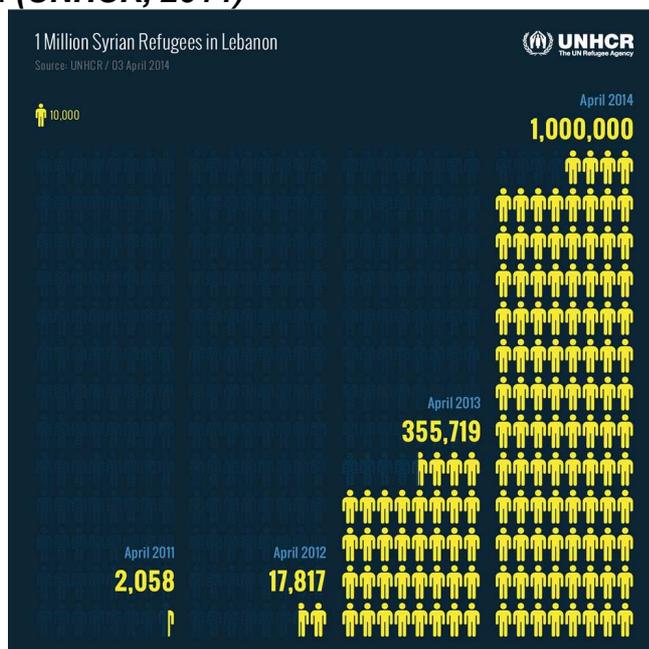
Enfin, au cours des dernières années, la crise syrienne a entraîné d'importants flux de réfugiés vers le Liban, et Beyrouth notamment, contribuant à augmenter la pression en termes de logement et de perspectives d'emploi (Wikipédia, 2016). D'après l'UNHCR (2015), **le Liban avait accueilli près de 1,2 millions de réfugiés en mars 2015, dont plus de 32 000 sur la seule ville de Beyrouth.**

### **Facteurs aggravant les vulnérabilités**

Les principaux facteurs aggravant les vulnérabilités à Beyrouth sont :

- **La concentration de l'urbanisation** en bordure de côte et dans les zones d'expansion de crue, entraînant une imperméabilisation des sols et une augmentation des ruissellements. En complément, selon M. Farajalla, Professeur en hydrologie et Ressource en eau à l'Université Américaine de Beyrouth, la construction d'habitations sur les berges des rivières au cours des dernières années limite l'écoulement des eaux lors d'une crue et crée l'effet d'un barrage, ce qui entraîne une montée du niveau des eaux en amont (**Redd, 2013**).
- **Les flux des réfugiés ayant fuyant les conflits** (en particulier syriens). Le nombre de réfugiés syriens a augmenté de façon exponentielle au cours des dernières années de la guerre civile en Syrie. En 2014, les réfugiés représentaient près de 20% de la population libanaise. Ces populations sont particulièrement exposées : les réfugiés ont de plus en plus de mal à trouver (ou à pouvoir payer) un logement convenable et s'installent souvent dans des habitations précaires (comme des tentes et des garages). De plus, le Liban a du mal à répondre à cette pression exercée par les réfugiés : le pays a connu d'importants chocs économiques en raison du conflit syrien, se traduisant par une baisse du commerce et du tourisme, et une augmentation des dépenses publiques pour répondre à la demande en constante augmentation des services de santé, d'éducation et des services essentiels comme l'eau,

l'assainissement et l'électricité. La Banque Mondiale a estimé que la guerre en Syrie avait coûté 2,5 milliards \$US au Liban au cours de l'année 2013. **(UNHCR, 2014)**



**Figure 30 : Augmentation du flux de réfugiés syriens au Liban (UNHCR, 2014)**

- **La forte urbanisation en zone côtière**, exposant la population à l'élévation du niveau de la mer. D'après la Croix Rouge, 50% de la population de la ville est localisée à proximité directe de la côte **(Croix Rouge, 2013)**.
- **Le risque sanitaire lié aux déchets transportés par les eaux**. Au cours de l'année 2015, le problème des déchets à Beyrouth a été exacerbé. En effet, à la suite de la récente fermeture de la principale déchetterie de la ville (en raison de sa saturation) et sans alternative proposée par le gouvernement, les détritrus se sont amassés dans les rues avant la saison des pluies. Au-delà du risque d'aggravation de l'aléa précédemment présenté, ce phénomène pose également un risque sanitaire accru. Tout d'abord, la contamination des eaux par les déchets peut entraîner des épidémies, de choléra notamment. Et contaminer la ressource en eau (au Liban, l'usage de puits privés est répandu). **(Owens, 2015)**
- **L'insuffisance de la maintenance des infrastructures de drainage**. Selon M. Farajalla, la maintenance des ouvrages de drainage n'est pas suffisamment régulière pour fournir une protection face au risque d'inondation. De plus, on assiste à un manque de contrôle de la bonne exécution de la maintenance, en raison du faible nombre de personnel disponible. **(Redd, 2013)**

❖ **Synthèse sur le risque, les inondations passées et leurs conséquences**

Beyrouth est essentiellement affectée par des inondations de type **crue éclair**, et plus généralement de **ruissellement urbain**. En outre, la ville est exposée au risque de tremblement de terre pouvant entraîner la formation de **tsunamis**.

Récemment, en octobre 2015, d'importantes pluies ont entraîné une inondation dans les rues de la capitale libanaise, déjà ensevelie sous les déchets, à la suite de la fermeture de la déchetterie de la ville. Ces déchets ont été transportés dans les rues, créant de véritables flux de déchets solides dans la capitale (Figure 30).



**Figure 31 : Flux de déchets dans les rues de Beyrouth lors de l'inondation d'octobre 2015 (Osseiran, 2015)**

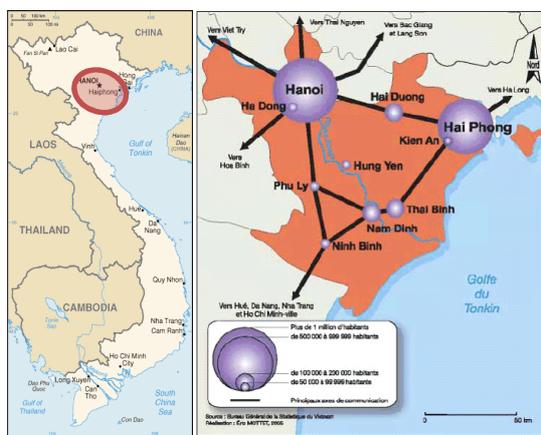
❖ **Gouvernance et politiques/stratégies de gestion**

Depuis quelques années, le Liban cherche à devenir le premier pays de la région arabe à mettre en place une stratégie nationale globale pour la gestion des risques de catastrophes. L'unité de gestion des risques de catastrophes du PNUD à la présidence du Conseil des Ministres a lancé le 25 novembre 2015, en collaboration avec le Centre National de Recherche scientifique du Liban (CNRS), le projet « évaluation du Risque d'inondation au Liban et cartographie ». Ce projet a pour but d'évaluer les risques d'inondation dans les différents bassins versants du Liban, et de développer une méthodologie complète pour déterminer les risques afin de protéger les vies et les biens, soutenir la gestion de crise et renforcer la culture du risque auprès de la population. (UNISDR, 2013) (UNDP, 2015)

### Le Delta du Fleuve Rouge (Vietnam)

#### ❖ Présentation générale du delta du fleuve Rouge et du Vietnam

Le delta du Fleuve rouge est située au nord-ouest du Vietnam et comprend deux des plus grandes villes du pays : la capitale Hanoi (3,6 millions d’habitants) et Hai Phong (1,1 millions d’habitants) (Figure 31). Cette région d’une superficie de plus de 10 000 km<sup>2</sup>, comptabilise une population d’environ 15 millions d’habitants (soit 17% de la population du pays) et présente une des densités les plus importantes de la planète avec plus de 1 500 hab/ km<sup>2</sup> (Sueur, 2011).



**Figure 32 : Localisation et carte du delta du Fleuve Rouge, adapté du CIA World Factbook et de Sueur 2011**

**Tableau 7 : Données générales sur le Vietnam et le Delta du Fleuve Rouge**

Type d'information	Valeur	Date	Source
Population du Vietnam	89,7 Millions d'habitants	2014	Site Prevention Web
Population du Delta du fleuve Rouge	Environ 15 Millions d'habitants (soit environ 17% de la population du pays)	2010 - 2011	Rapport d'information au Sénat Français rédigé par Sueur en 2011: « Villes du futur, futur des villes: quel avenir pour les villes du monde? »
Densité de la population au Vietnam	289 hab/ km <sup>2</sup>	2014	Site Prevention Web
PIB/ hab	2 052 SUS/hab	2014	Site Banque Mondiale

## ❖ **Caractérisation de l'aléa dans le delta du Fleuve Rouge**

### **Les régimes climatique et pluviométrique**

Le Vietnam dispose d'un climat tropical avec moussons, avec des différences entre le nord et sud (ce dernier par exemple ne présentant pas de saison hivernale). Le climat du nord du pays est ponctué par deux saisons principales :

- l'hiver doux et sec (d'octobre à avril) avec des températures en journée ;
- l'été chaud et humide (de mai à septembre ; juillet et août étant les mois les plus pluvieux).

Dans la région du delta du Fleuve Rouge, la température moyenne annuelle s'élève à environ 23°C, avec en hiver (janvier) environ 16°C et en été (juillet) environ 29°C. La répartition des précipitations est relativement homogène à l'échelle du delta avec un cumul annuel d'environ 1 600mm, dont plus de 80% se concentre entre mai et octobre. (Thanh Pham, 2008)

### **Les facteurs aggravants l'aléa**

Les principaux facteurs engendrant une aggravation de l'aléa sont : (ADRC, 2005) (GFDRR, 2011)

- **la déforestation en amont de la région du delta** entraînant une augmentation du ruissellement (en volume et en débit) et par conséquence une augmentation du risque d'inondation éclair ;
- **l'augmentation de dépôts de sédiments** ayant pour conséquence une élévation du lit mineur du fleuve ;
- **les impacts du changement climatique** en termes de :
  - Précipitations : les précipitations durant la saison des pluies devraient augmenter conduisant à une augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des inondations. Les événements pluvieux extrêmes devraient augmenter en termes de fréquence et de quantité d'eau précipitée, en particulier dans le nord du pays;
  - Cyclones et typhons : les modèles climatiques globaux ne simulent pas suffisamment bien les phénomènes de cyclones pour fournir des conclusions précises quant à leur évolution pour le Vietnam (en termes de fréquence, d'intensité ou de direction). Néanmoins d'un point de vue qualitatif, les cyclones pourraient devenir plus intenses dans la mesure où la température à la surface de l'eau devrait augmenter ;
  - Niveau de la mer : qui devrait augmenter de 28cm à 33cm à horizon 2050. A horizon 2100, environ 5% du territoire du Vietnam devrait être exposé au risque d'inondation en raison de la montée du niveau de la mer.

### ❖ **Caractérisation des enjeux et des vulnérabilités**

#### **Caractéristiques de l'urbanisme**

Le delta du Fleuve Rouge est représentatif d'une nouvelle forme de développement urbain, sans exemple antérieur. Il est caractérisé par la présence simultanée de zones agricoles, de zones industrielles et de zones urbaines denses et des zones résidentielles. Le géographe T. McGee a appelé ce phénomène « desakota » (issue des termes indonésiens « desa », le village, et « kota », la ville). Ce type d'urbanisme se caractérise par: (GFDRR, 2011)

- la présence d'une population agricole dense et intégrée dans la société urbaine et l'économie;
- le développement simultané des activités agricoles et industrielles;
- un réseau très dense de villes rendant la délimitation des villes difficile;
- une facilité de mobilité vers les grands centres urbains grâce à des modes de transport peu onéreux comme les motos, les voitures, les bus et les camions.

#### **Facteurs aggravant les vulnérabilités**

Les principaux facteurs aggravant les vulnérabilités sont :

- **La concentration des enjeux** (humains – avec une densité très importante – et économique – activités agricoles et industrielles faisant de la région le centre économique du nord du Vietnam) dans des zones de basse altitude et, de fait, exposées au risque d'inondation ;
- **La dégradation du système de digues existant** (*Hansson & Ekenberg, 2002*).

### ❖ **Synthèse sur le risque dans le delta du Fleuve Rouge : les inondations passées et leurs conséquences**

#### **Typologie d'inondation dans le delta du Fleuve Rouge**

Le delta du Fleuve Rouge est soumis à plusieurs types d'inondation, dont essentiellement :

- Les crues fluviales ayant lieu essentiellement en juillet et août, au moment de la saison des pluies. Les débits du Fleuve Rouge varient entre environ 400 m<sup>3</sup>/s en saison sèche et 30 000m<sup>3</sup>/s lors de la saison des pluies (*Sueur, 2011*). Ces inondations sont particulièrement dangereuses pour les hommes notamment parce que : (*Fontenelle, 2006*)
  - o elles sont multiples : elles peuvent survenir à tout moment lors de la saison des pluies) ;
  - o elles sont fortes et relativement rapides en raison de la conjonction de fortes précipitations en amont de son bassin versant et de son faible temps de concentration;
- La conjonction de crue fluviale et de submersion marine en particulier lors des cyclones tropicaux engendrant d'une part de fortes précipitations

(crue du fleuve) et d'autre part de fortes marées empêchant l'évacuation des eaux vers la mer et entraînant une inondation des zones côtières.

### **Les inondations passées et leurs impacts**

Les dernières crues majeures du Fleuve Rouge ont eu lieu en 1945 et en 1971. D'une période de retour estimé à 100 ans, les deux événements ont entraîné de nombreux dégâts et marqué la mémoire collective de la population locale dans la mesure où même les zones supposées protégées ont été touchées. En effet, ces deux crues ont entraîné la formation de brèches et de ruptures de certaines digues. (Gilard, 2006) Il ne semble pas exister de bilans des dommages engendrés par ces crues.

Au-delà de ces événements exceptionnels, des crues se produisent régulièrement dans cette région, mais aucune d'elles ne semble avoir dépassé le niveau de protection actuel fourni par les digues. (Gilard, 2006)

### **❖ La stratégie de gestion du risque d'inondation dans le delta du Fleuve Rouge**

La stratégie de gestion des inondations dans le delta du Fleuve Rouge s'est longtemps traduite par la mise en œuvre **de mesures purement structurelles**. Ainsi le delta présente à l'heure actuelle un réseau d'environ 3 000 km de digues pour protéger les zones exposées à une crue fluviale, et d'environ 1 500 km de digues côtières pour atténuer les effets des fortes vagues lors d'événements extrêmes comme les cyclones tropicaux (Sueur, 2011). Deux réservoirs, d'une capacité totale de 5,4 milliards m<sup>3</sup>, ont été créés pour réduire le risque d'inondation dans les zones en aval du Fleuve Rouge. En outre, des systèmes de déversoirs d'urgence vers des zones préalablement identifiées, ont été mis en place pour protéger les digues et réduire le risque de leur rupture.

La stratégie actuelle de gestion du risque d'inondation semble également intégrer des mesures non structurelles, comme notamment la reforestation (et la protection des forêts) en amont de Hanoi, l'amélioration de l'état de préparation, le renforcement des institutions. (ADRC, 2005) (Banque Mondiale, 2009)

*Sao Paulo (Brésil)*❖ **Présentation générale du Brésil et de Sao Paulo**

Sao Paulo est située dans au sud-est du Brésil, à proximité de la côte Atlantique. La Région métropolitaine de São Paulo (RMSP) compte près de 20 millions d'habitants, soit près de 10% de la population totale du pays. La RMSP comprend la ville de São Paulo et 39 autres municipalités, qui occupent un territoire de près de 8 000 kilomètres carrés, dont 2 000 hautement urbanisés. Il s'agit de l'une des concentrations urbaines et industrielles les plus importantes d'Amérique Latine. La zone urbanisée occupe une grande partie du cours supérieur de la Tieté. La ville elle-même compte 11 millions d'habitants (Revista, 2013).

**Tableau 8 : Données générales sur le Brésil et Sao Paulo**

Type d'information	Valeur	Date	Source
Population du Brésil	200 Millions d'habitants	2014	Site Prevention Web
Population de Sao Paulo (région métropolitaine)	21 Millions d'habitants (soit près de 10% de la population du pays)	2015	CIA World Factbook
Densité de la population du Brésil	24,0 hab/km <sup>2</sup>	2014	Site Prevention Web
Classement PNUD	79/187	2013	Rapport PNUD 2014 (classement datant de 2013)

❖ **Caractérisation de l'aléa à Sao Paulo****Les régimes climatique et pluviométrique**

La ville de Sao Paulo est située à environ 750m au-dessus du niveau de la mer. Cette altitude influence le climat de la ville. Celle-ci bénéficie d'un climat subtropical avec une température moyenne annuelle journalière de 19,2°C (variant entre 22,5° en février – été – et 16°C en juillet - hiver). Les précipitations annuelles s'élèvent à environ 1 450 mm, les mois les plus pluvieux en moyenne étant décembre, janvier et février (INMET, 2015). Le climat est ponctué par une saison humide d'octobre à mars concentrant la majorité des précipitations (>200mm/mois de décembre à février) et une saison plus sèche d'avril à septembre (<100mm/mois).

## Les facteurs aggravants l'aléa

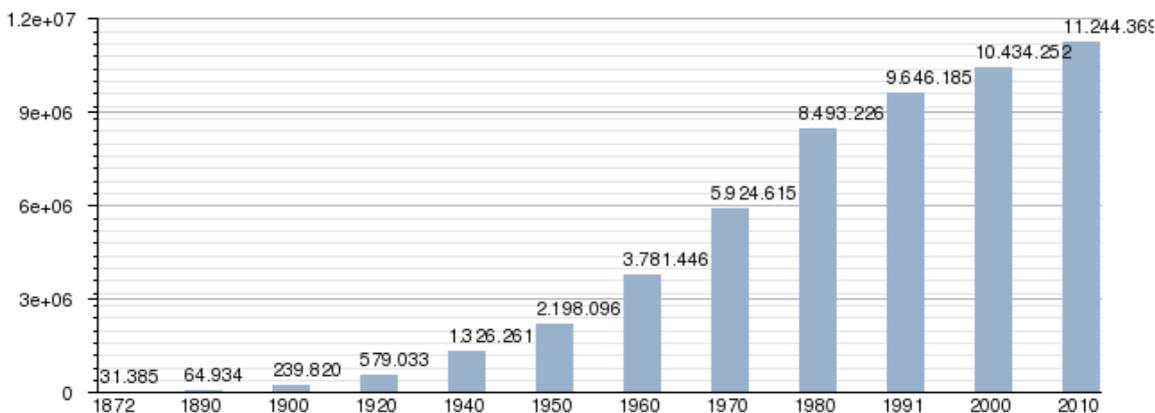
Les principaux facteurs engendrant une aggravation de l'aléa sont :

- **les effets du changement climatique**, en termes de précipitations avec, à horizon 2050-2060 : (*Banque Mondiale, 2012*)
  - o une augmentation très probable du cumul annuel de pluie ;
  - o une augmentation probable des événements pluvieux intenses, engendrant une augmentation des risques d'inondation dans la ville.
- **L'obstruction des voies d'écoulement des eaux due aux déchets** (irrégularités dans la collecte des déchets et à la présence de plus de 300 décharges clandestines dans la ville), bien que plus de 95% des habitations dispose d'un système de collecte des déchets. (*Banque Mondiale, 2012*)

### ❖ Caractérisation des enjeux et des vulnérabilités

#### Caractéristiques de l'urbanisme

La forte croissance démographique (Figure 32) et industrielle des cinquante dernières années a créé un déséquilibre entre l'approvisionnement et la demande d'eau, entraînant de graves problèmes de pollution. En outre, l'imperméabilité croissante des sols et l'urbanisation sauvage provoquent des inondations. (Revista, 2013)



**Figure 33 : Evolution démographique de Sao Paulo (Wikipédia)**

Sao Polo a connu durant la deuxième moitié du XXe siècle une urbanisation extrêmement rapide à l'image de l'ensemble du Brésil : en 1950, 2/3 des habitants habitent dans les campagnes, en 1980 c'est 65 % de la population qui habite dans la ville. En 2013, 85 % de la population brésilienne est urbaine.

La croissance urbaine a été marquée par un développement très important des favelas : entre 1972 et 1980, la part de la population vivant dans les bidonvilles

a été multipliée par dix pour atteindre approximativement 880 000 personnes (Sachs, 1981)



**Figure 34 : Photographie illustration le paysage urbain de Sao Paulo**

### **Facteurs aggravant les vulnérabilités**

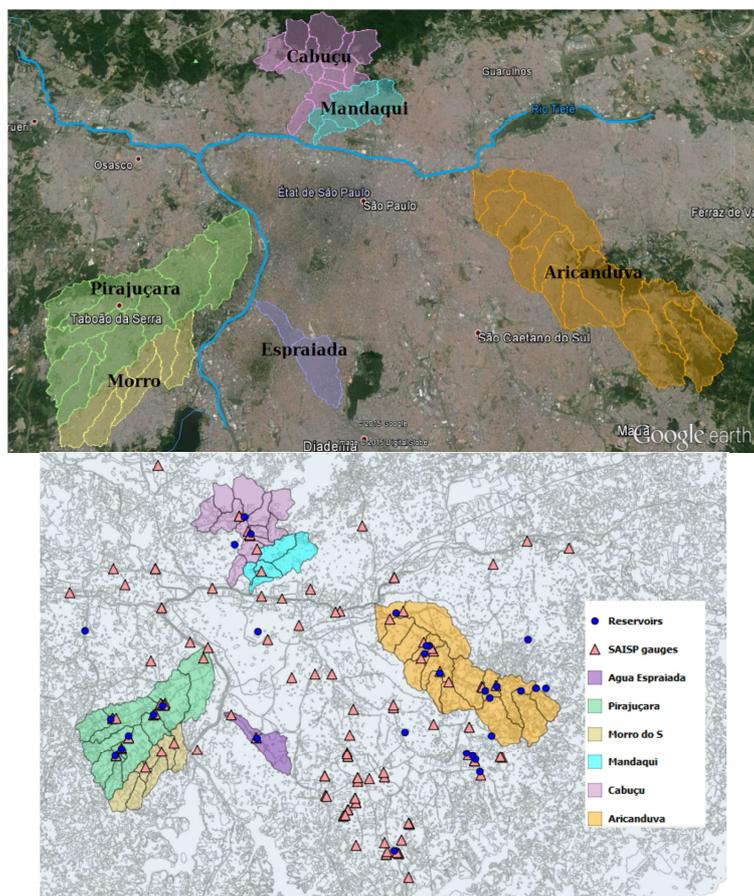
Les principaux facteurs aggravant les vulnérabilités à Sao Paulo sont :

- **le développement de l'urbanisation** qui entraîne notamment une imperméabilisation des sols, la canalisation des cours d'eau et la création ou le renforcement de zones de concentration des ruissellements. Selon des études récentes, ces modifications du bassin versant ont tendance à augmenter le débit de pointe de ruissellement et à modifier les temps de retour des débits d'inondation (**Simas, Rodrigues, & Sant'Anna Neto, 2015**);
- **L'occupation de zones exposées au risque d'inondation**, avec par exemple la construction de bâtiments à proximité du lit mineur des rivières (**Oliveira, et al., 2014**). De plus, en raison des inégalités économiques, les populations les plus pauvres sont souvent contraintes à s'installer dans des zones non bâties susceptibles d'être inondées : la Banque Mondiale (**2012**) estime que 20% des bidonvilles (favelas) et des zones d'habitation informelle de Sao Paulo sont localisés dans des zones inondables ;
- **le niveau de vie des populations touchées dans les favelas** : celles-ci manquent de moyens pour se protéger des inondations (habitats sommaires) et pour s'adapter rapidement à des changements de conditions de vie, en particulier à la suite d'évènements pluvieux extrêmes (**Banque Mondiale, 2012**) ;
- la saturation du système de drainage (**Oliveira, et al., 2014**).

### **❖ Synthèse sur le risque d'inondation à Sao Paulo, les inondations passées et leurs conséquences**

Les inondations touchant Sao Paulo sont essentiellement de type **ruissellement urbain**, et de type **crue éclair des cours d'eau urbanisés**. Le risque de glissement de terrain existe aussi principalement dans les quartiers des favelas qui se sont développées sur des terrains en pentes. Récemment, en Janvier 2011 des pluies torrentielles ont fait une dizaine de morts à Sao Paulo victimes principalement de glissement de terrains. Le débordement de plusieurs rivières coupant la circulation a provoqué d'immenses embouteillages

paralysant l'activité économique de la ville et mis en péril les automobilistes qui ont dû abandonner leur véhicule à moitié submergé.



**Figure 35 : Carte satellite de la ville de Sao Paulo (source : Google) et principaux bassins versants surveillés par le Système d'Alertes d'Inondations à São Paulo (SAISP/FCTH)**

#### ❖ *Gouvernance et politiques/stratégies de gestion à Sao Paulo*

En raison des problèmes causés par les pluies, a été créé en 1995, le centre de gestion des situations d'urgence dans la ville de São Paulo (CGE-SP) qui opère en coordination avec la société d'ingénierie de la circulation (CET). Ces deux organismes destinataires du Système d'Alertes d'Inondations à São Paulo (SAISP) sont en charge des interventions terrains (fermeture des voies et tunnels menacés d'inondations, gestion des alertes et des secours aux populations).

Le FCTh (Fundação do Centro Tecnológico e Hidráulica) gère le SAISP (Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo), le système d'alerte aux inondations de São Paulo. C'est un système d'alerte basé sur le suivi en temps réel des précipitations (données sol et radar) et des niveaux d'eau des rivières

et canaux. Le FCTh opère un radar météo en bande S à Salesopolis (à 75 km à l'Est du centre-ville de Sao Paulo). Il fournit en temps réel des informations sur la situation en cours et sur les zones potentiellement inondable, en fonction de niveaux critiques et d'alertes prédéfinis. Ces alertes sont basées sur les niveaux d'eau observés. En outre, deux types de modélisation sont aujourd'hui intégrés dans le système opérationnel SAISP :

- Un système d'alerte en fonction de seuils de précipitations pour les petits bassins versants ;
- Une modélisation hydrologique et hydraulique des bassins versants prioritaires.

En 2016, à travers une collaboration Franco Brésilienne, un nouveau radar météorologique en bande-X va être installé dans le centre de Sao Paulo et apportera une plus grande précision de mesure et doit permettre d'accroître l'efficacité des alertes inondations.

Un autre défi est d'étendre le nombre de bassins urbains surveillé, à travers une modélisation hydrologique et hydraulique adapté au temps de réactions rapide aux précipitations (de 30 minutes à quelques heures) et à la complexité du réseau (ex : nombreux bassins de rétention).

## Précédentes publications de la collection

---

<b>Notes techniques n°1</b>	Panorama des inégalités hommes – femmes dans le monde (Juin 2015)
<b>Notes techniques n°2</b>	La Commission du Mékong face à un tournant – Quelle place pour l'aide française (Septembre 2015)
<b>Notes techniques n°3</b>	Quelle efficacité environnementale de la certification pêche et aquaculture « durable » ? (Septembre 2015)
<b>Notes techniques n°4</b>	Vérité des prix ou socialisation de la couverture des coûts ? (Octobre 2015)
<b>Notes techniques n°5</b>	Accompagnement technique et renforcement des capacités : leçons de l'expérience (Octobre 2015)
<b>Technical Reports No 6</b>	Actors and networks of agroecology in the Greater Mekong Subregion (October 2015)
<b>Technical Reports No.7</b>	Creating Alliances to Accelerate Commercially Viable Sanitation (November 2015)
<b>Notes techniques n°8</b>	La recherche française sur l'éducation dans les pays en développement : un état des lieux (Novembre 2015)
<b>Technical Reports No.9</b>	Facilitating green skills and jobs in developing countries
<b>Notes techniques n°10</b>	Étude sur le développement de l'entrepreneuriat social à Madagascar

<b>Notes techniques n°11</b>	Ecole et Santé de la reproduction Une recherche-action dans les départements du Littoral et de l'Atlantique au Bénin (nov. 2014 – juil. 2015)
<b>Notes techniques n°12</b>	Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique : potentiels et défis
<b>Notes techniques n°13</b>	Améliorer la prise en compte de la nutrition dans les projets de développement rural et de santé
<b>Notes techniques n°14</b>	Villes et stratégies climatiques : cinq cas d'études
<b>Notes techniques n°15</b>	Jeunesses sahéniennes : dynamiques d'exclusion, moyen d'insertion
<b>Technical Reports No.16</b>	Supporting Access to and Retention in Employment for Women by Enhancing Child Care Services in Turkey
<b>Notes techniques n°17</b>	Méthode de suivi de l'impact climat des investissements (MRV) appliquée aux projets agricoles et forestiers des Banques Nationales de Développement
<b>Notes techniques n°18</b>	Gestion des ressources en eau souterraines comme biens communs
<b>Notes techniques n°19</b>	Eau des villes, assainissement et précarités – des réalités contrastées à Ouagadougou (Burkina Faso) et Niamey (Niger)
<b>Technical Reports No.20</b>	The effectiveness of an environmental credit line in Egypt: Synergies between market incentive and binding regulations
<b>Notes techniques n°21</b>	Développement rural à co-bénéfices - Gouvernance, suivi, certification

<b>Notes techniques n°22</b>	Dynamiques des systèmes agraires et devenirs de l'agriculture familiale en Guinée
<b>Notes techniques n°23</b>	Évaluation de la politique d'aménagement du territoire en Tunisie de 1995 à 2010
<b>Notes techniques n°24</b>	Cocoa farmers' agricultural practices and livelihoods in Côte d'Ivoire
<b>Notes techniques n°25</b>	Vulnérabilité sociophysique aux inondations au Sénégal
<b>Technical reports No.25</b>	Socio-physical Vulnerability to Flooding in Senegal
<b>Notes techniques n°26</b>	Revenus et trajectoires agricoles en Afrique d'ici 2050 : vers un trop-plein d'agriculteurs ?
<b>Notes techniques n°27</b>	Comprendre le processus d'installation des jeunes en agriculture pour mieux l'accompagner - Grille d'analyse et premiers résultats
<b>Notes techniques n°28</b>	Les dynamiques d'inclusion / exclusion de la jeunesse en zone MED
<b>Notes techniques n°29</b>	Quelle compétitivité de la Côte d'Ivoire, du Sénégal et de la Tunisie ? - Un état des lieux à partir des nouvelles données de l'Observatoire de la Compétitivité Durable
<b>Notes techniques n°30</b>	Urgences et crises sanitaires dans les pays à ressources limitées : de la préparation à la réponse
<b>Notes techniques n°31</b>	Capitalisation des actions de formation-insertion des jeunes conduites par les organisations non gouvernementales

- Notes techniques n°32** L'accès et le maintien des femmes à l'emploi de qualité au Maroc, en Tunisie et en Turquie
- Notes techniques n°33** Le financement participatif et l'aide publique au développement : état des lieux et recommandations
- Technical Reports No.34** Outlooks for flare reduction in Nigeria

## Qu'est-ce que l'AFD ?

---

L'Agence Française de Développement (AFD), institution financière publique qui met en œuvre la politique définie par le gouvernement français, agit pour combattre la pauvreté et favoriser le développement durable.

Présente sur quatre continents à travers un réseau de 75 bureaux, l'AFD finance et accompagne des projets qui améliorent les conditions de vie des populations, soutiennent la croissance économique et protègent la planète.

En 2016, l'AFD a consacré 9,4 milliards d'euros au financement de projets dans les pays en développement et en faveur des Outre-mer.

Agence Française de Développement  
5 rue Roland Barthes – 75598 Paris cedex 12  
Tél : +33 1 53 44 48 86 – [www.afd.fr](http://www.afd.fr)