

RAPPORT

*Comment saisir les opérations de renouvellement urbain
pour réduire la vulnérabilité des territoires inondables
face au risque d'inondation ?*

- Principes techniques d'aménagement -

Février 2015



SOMMAIRE

Le mot de la présidente	p. 4
Le projet du CEPRI	p. 6
LE RENOUVELLEMENT URBAIN, UNE OPPORTUNITÉ POUR BÂTIR DES TERRITOIRES MIEUX ADAPTÉS AUX RISQUES D'INONDATION	p. 7
I. LES PRINCIPES TECHNIQUES D'AMÉNAGEMENT	p. 15
Principe 1 : inclure un système de protection dans l'aménagement urbain	p. 18
Principe 2 : donner ou redonner plus de place à l'eau	p. 37
Principe 3 : localiser les activités et les infrastructures urbaines	p. 52
Principe 4 : concevoir des bâtiments adaptés à l'inondation	p. 65
Principe 5 : assurer le maintien du fonctionnement des réseaux techniques	p. 82
Principe 6 : créer des "espaces intelligents" pour la gestion de crise et la reconstruction	p. 95
II. VERS UNE STRATÉGIE POUR L'AMÉNAGEMENT DURABLE DES TERRITOIRES EXPOSÉS	p. 109
Quelle adaptabilité des principes ?	p. 110
1. L'adaptation à tous les territoires	p. 110
2. L'adaptation au changement climatique	p. 111
Comment mettre en œuvre ces principes ?	p. 112
1. La recherche d'une combinaison entre les principes	p. 112
2. Les piliers qui fondent la mise en œuvre des principes	p. 115
Résumé des principes	p. 121
Pour conclure	p. 122
Sources	p. 124

REMERCIEMENTS

Le CEPRI remercie l'ensemble des personnes et des structures ayant contribué à faire émerger sa réflexion sur le sujet depuis le début de ses travaux en 2008, et en particulier lors de la rédaction de ce rapport :

Barker Robert et Dron Amy (architectes urbanistes, Royaume-Uni), Barrier Jean-Yves (architecte, France), Barrière Hélène (ville de Toulouse), Bichat Jean-Marc (architecte, France), Billard Marien et Lamouroux Elodie (Établissement public d'aménagement Orly Rungis Seine Amont, EPA-ORSA), Boer Florian (architecte urbaniste, Pays-Bas), Calas Cécile, Kengne-Deffo Céline et Delaloy Catherine (Communauté urbaine de Bordeaux), le CETE Sud-Ouest, Daniel-Lacombe Éric (architecte, France), Chorin Gwenaëlle (architecte, France), Chenesseau Marielle (Communauté d'agglomération Orléans Val de Loire), De Graaf-van Dinther Rutger (consultant, Pays-Bas), Gelet Stéphane et Durant Robin (ville d'Orléans), Gersonius Berry (ville de Dordrecht, Pays-Bas), Grether Paul-Armand (architecte, France), Hubé Dominique et Truffer Julie (Agglopolys, Communauté d'agglomération de Blois), Lecroart Paul et Faytre Ludovic (Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France), van Leeuwen Joep (ville de Rotterdam, Pays-Bas), Mitroff Ann-Marie (GroundworkUSA & Groundwork Hudson Valley, États-Unis), Nijssen Pim (consultant, Pays-Bas), ONEMA, Plotka Emilia (Royal Institute of British Architects, Royaume-Uni), Réau Philippe (Communauté d'agglomération Le Grand Périgueux), Rivière Barbara (ville de Saint-Pierre-des-Corps), Ouahsine Samy (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, France), Salagnac Jean-Luc (Centre scientifique et technique du bâtiment), Valette Jean-Pierre (architecte, France), les services déconcentrés de l'État de la région Centre (DREAL), du Loiret (DDT 45) et du Loir-et-Cher (DDT 41), Stam Ankie (architecte, Pays-Bas), Webler Heinrich (consultant, Allemagne), Zarate Paola (architecte, France).

LE MOT DE LA PRÉSIDENTE

La terminologie “d’urbanisme résilient” est souvent utilisée par facilité, par commodité pour désigner un mode d’aménagement de la ville qui serait globalement compatible avec le risque d’inondation, sans en saisir précisément les contours. Elle s’appuie sur un certain nombre d’exemples de villes européennes (Hambourg, Mayence, Rotterdam, Francfort, Nimègue...) ou françaises (Rennes, Strasbourg, Vitry-sur-Seine...) qui semblent indiquer que le respect de certains principes d’aménagement en zone inondable peut conduire à rendre les quartiers nouveaux ou rénovés plus adaptés au risque. Les aspects techniques, économiques, réglementaires de ces expérimentations sont ainsi en cours de défrichage. Mais le constat est clair : les tentatives de réflexion d’ensemble sur la mise en œuvre d’une urbanisation tenant compte efficacement du risque d’inondation peinent à émerger.

Reconstruire ou renouveler la ville en zone inondable est un sujet délicat, sur lequel les divergences de points de vue des acteurs sont nombreuses et s’expriment avec force. Le débat, toujours le même depuis des années, s’appuie sur des postures morales qui semblent irréconciliables : les uns portent avec vigueur la protection des personnes et des biens, brandissant la nécessité d’éviter les constructions en zone inondable, les autres soutiennent la cause de l’existence même des territoires exposés qui, pour vivre et répondre aux attentes de leur population, ont besoin de faire évoluer les zones inondables. Du débat moral au débat caricatural et à la crispation, il n’y a bien souvent qu’un pas. Les oppositions État/collectivités en la matière, souvent mises en avant, sont probablement trop simplistes. L’État, d’une part, et les collectivités, d’autre part, ne forment pas deux blocs homogènes. En outre, au-delà de l’État et des collectivités, les assureurs et les acteurs privés de l’aménagement jouent également leur partition propre. De cette multiplicité d’intérêts résulte un paysage complexe dans lequel domine, bien souvent, l’absence de consensus.

Pourtant, nous n’avons guère d’autre choix que de bâtir ce consensus sur la manière de renouveler les villes en zone inondable. D’abord, parce que notre héritage est lourd. 17 millions d’habitants vivent aujourd’hui dans des territoires inondables vulnérables, plus ou moins bien protégés par des ouvrages hydrauliques dont l’état d’entretien n’est pas toujours suffisant. Ensuite, parce que le renouvellement urbain en zone inondable est légal sur de nombreux territoires, et parce que les lois Grenelle y encouragent implicitement un mouvement de densification.

Le défi est grand et les obstacles redoutables. Dans un contexte miné par les incertitudes pesant sur l’avenir des collectivités territoriales et de leurs compétences, par les restrictions budgétaires et les urgences économiques et sociales, la problématique de la prise en compte du risque d’inondation dans le renouvellement urbain peut sembler floue, lointaine et en tout état de cause non prioritaire. Les dispositifs publics susceptibles de prendre le relais d’une volonté politique locale parfois insuffisante n’apportent pas aujourd’hui les réponses escomptées. L’outil Plan de prévention des risques (PPR), en particulier, demeure sectoriel, partiel, agissant sur la base d’un zonage à une échelle parcellaire qui ne permet pas d’approche cohérente à l’échelle d’un projet urbain, laissant ainsi les villes s’exposer davantage sans s’adapter réellement au risque. S’y ajoutent deux difficultés techniques non négligeables : le cloisonnement des compétences techniques en matière d’urbanisme, d’aménagement du territoire et d’hydraulique, d’une part, et l’absence de standards, de référentiel concer-

nant la manière la plus efficace de prendre en compte le risque d'inondation dans l'aménagement du territoire, d'autre part.

Bâtir un consensus dans ce contexte difficile est un chemin de longue haleine que nous devons emprunter malgré tout résolument. Car l'adaptation des territoires au risque d'inondation ne saurait émerger "naturellement" sans une implication poussée des autorités publiques, concentrant leurs efforts sur des espaces déjà en cours de recomposition. Notre objectif commun devrait être de saisir l'opportunité de grandes opérations de renouvellement urbain pour proposer des projets de territoire mieux adaptés au risque. Ceci suppose de l'innovation dans les démarches d'urbanisme et une transformation du regard des décideurs sur l'opportunité et non uniquement la contrainte que représente la prise en compte du risque dans l'aménagement du territoire.

Malgré les difficultés, des opérations pilotes tendent à voir le jour. Piloté par la Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature (DGALN) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), l'Atelier national "Territoires en mutation exposés au risque" en est l'illustration la plus récente et l'une des plus prometteuse. Mais il faut aujourd'hui aller plus loin, plus vite, saisir les occasions qui nous sont offertes, travailler ensemble, décloisonner, construire les bases de ce qui fonderait un territoire moins vulnérable et ne pas laisser se dérouler un processus d'aménagement qui rend nos territoires toujours plus vulnérables. Nous devons accompagner, rapprocher, apaiser et réconcilier les différentes approches en apportant de nouvelles façons de renouveler les villes.

Ce rapport a vocation à constituer l'une des pierres de ce vaste édifice encore à construire. Il s'inscrit dans la logique de la mise en œuvre de la directive inondation et de la Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI) qui mettent au cœur de la prévention du risque la question de l'aménagement du territoire.

Avec ce rapport, nous avons conscience d'avancer sur un fil. Les écueils sont immenses si nous nous écartons de cette voie médiane qui vise à offrir un avenir aux territoires inondables, moins vulnérables face au risque. Nous devons donc tenir ce cap et mobiliser toutes les énergies possibles autour de celui-ci. C'est à cet objectif que le CEPRI s'attachera dans les temps qui viennent.

Marie-France Beaufile,
Présidente du CEPRI
Sénatrice d'Indre-et-Loire,
maire de Saint-Pierre-des-Corps

LE PROJET DU CEPRI

Comment intégrer le risque d'inondation dans l'aménagement de zones en renouvellement urbain au sein de nos villes actuelles ? C'est à cette question que le CEPRI propose de répondre à travers un travail de deux années et demie.

Celui-ci s'appuie sur l'analyse d'une **bibliographie internationale** riche, de **projets opérationnels** réalisés ou en cours de réflexion, au sein de villes françaises et internationales comme Bordeaux, Mayence, Hambourg, Saint-Pierre-des-Corps, Rotterdam, Romorantin-Lanthenay, Francfort, Angers, Vitry-sur-Seine, Dordrecht, Séoul, Périgueux, Nimègue, Andernach, Rennes, Amsterdam, Yonkers, Blois, Hackbridge, Tokyo, Toulouse...

Il se fonde également sur des échanges et rencontres avec des **professionnels de l'urbanisme et de la construction**, des **chercheurs** européens impliqués dans la réflexion sur la question de la "ville résiliente" à l'inondation et des **collectivités** engagées dans des opérations d'aménagement sur leur territoire.

À partir de ces nombreux exemples et entretiens, le CEPRI a extrait des principes d'aménagement permettant de guider les professionnels de l'urbanisme et de la construction dans leur conception de quartiers en renouvellement urbain situés en zone inondable. L'objectif est de construire des "ponts" entre les acteurs de l'eau et ceux de l'aménagement du territoire, afin de favoriser un rapprochement entre ces deux mondes souvent cloisonnés. Il n'a pas vocation à donner une "combinaison gagnante" de plusieurs principes, reproductible sur tous les territoires.

Cette matière relativement théorique vise à **ouvrir des perspectives nouvelles, à faire réfléchir, à innover, à créer. Elle tend à proposer des alternatives crédibles aux collectivités et à leurs partenaires** sur les différents principes existant et participant à la construction d'une ville adaptée au risque d'inondation. Le choix de la combinaison entre ces principes qui définit une stratégie d'aménagement, reste du ressort des décideurs locaux et/ou nationaux en fonction du contexte particulier du territoire.

Quelques précisions sur les types d'inondation considérés dans ce rapport

Bien souvent, les professionnels de la construction et de l'urbanisme prennent en compte le risque d'inondation à travers des aménagements permettant de limiter et réduire le ruissellement pluvial. Il s'agit d'un type d'inondation spécifique, l'inondation par ruissellement pluvial, qui peut survenir en milieu urbain (dû aux nombreuses surfaces imperméabilisées) ou rural (absence de haies, topographie, etc.). Divers aménagements, bien connus des architectes et urbanistes, existent pour réduire le risque au niveau de la parcelle (toitures végétalisées, etc.) ou à l'échelle d'un quartier (noues, bassins de rétention, etc.) afin de limiter ce risque. Une bibliographie très riche existe déjà sur le sujet. A contrario, concernant les autres types de risque d'inondation, par débordements de cours d'eau ou submersion marine notamment, les solutions constructives ou aménagements adaptés à ces types d'inondations sont plus rares et moins bien identifiées par les acteurs de l'aménagement. C'est pour cette raison que les aménagements permettant de limiter le risque de ruissellement pluvial ne sont pas abordés dans ce rapport, afin de concentrer la réflexion sur des solutions nouvelles et complémentaires aux pratiques familières des professionnels de l'aménagement en matière de ruissellement.

*Pour plus d'informations, se référer au guide du CEPRI, **Gérer les inondations par ruissellement pluvial - Guide de sensibilisation** (octobre 2014).*

**LE RENOUVELLEMENT
URBAIN, UNE OPPORTUNITÉ
POUR BÂTIR
DES TERRITOIRES MIEUX
ADAPTÉS AUX RISQUES
D'INONDATION**

• LE RENOUVELLEMENT URBAIN DANS LE CADRE LÉGISLATIF FRANÇAIS

“Une ville qui ne change pas et qui se fige devient une ville morte¹.” Le renouvellement urbain caractérise l'évolution d'une ville et apporte une réponse à la limitation de l'étalement urbain en visant à reconstruire la ville sur la ville ; “[...] il n'est pas scandaleux de vouloir utiliser les possibilités de développement urbain qui existent à l'intérieur des espaces déjà urbanisés avant de chercher à les étendre, même si c'est plus difficile. Ceci conduit à une utilisation optimale de l'espace conforme au principe du développement durable et le coût global à terme pour la collectivité n'est pas nécessairement plus élevé².” La loi Solidarité et Renouvellement urbain (SRU) du 13 décembre 2000 a introduit ce concept dans les pratiques urbaines. Le but était de donner un cadre juridique à un projet politique de revalorisation de secteurs dégradés ou vétustes dans les villes, en mettant en œuvre plusieurs principes (mixité sociale, diversification des fonctions urbaines, maîtrise des déplacements, utilisation optimale de l'espace...). Pour financer ces programmes de restructuration de quartiers en difficulté, un établissement public industriel et commercial spécifique, l'ANRU (Agence nationale pour la rénovation urbaine), a été créé en 2004.

Les projets de renouvellement urbain s'attachent à trouver une solution pour les quartiers ou secteurs de villes laissés à l'abandon ou parfois mal rénovés. Dans ces secteurs, on constate généralement un cercle vicieux de dégradation de l'état des bâtiments, de son climat social, de son tissu économique (départ des petits commerces par exemple). Outre le renouvellement des bâtiments eux-mêmes, cette mutation du quartier s'accompagne bien souvent d'un renouvellement social, économique, voire culturel qui permet à la ville d'évoluer dans son ensemble³.

Mais parler de renouvellement urbain ne se limite pas à considérer uniquement les nouveaux projets de reconstruction de bâtiments et peuvent toucher d'autres types d'infrastructures et de composantes urbaines (les transports et autres réseaux, le développement économique et social, etc.). Une opération de renouvellement urbain relève donc d'un véritable projet urbain. Il ne s'agit pas de “remplacer” à l'identique une partie de la ville, un quartier ou un bâtiment. Bien au contraire, il s'agit de rénover en transformant pour faire face à de nouveaux enjeux⁴. On peut compter parmi ceux-ci la prise en compte du changement climatique. Celle des risques d'inondation n'est pas nouvelle, mais apparaît clairement comme une priorité sur certains territoires urbanisés, classés Territoires à risques importants d'inondation (TRI)⁵ depuis fin 2012. Les TRI correspondent aux zones urbaines, concentrant un nombre d'habitants et d'activités économiques important exposés au risque. Sur ces territoires jugés prioritaires pour effectuer des actions de prévention, les opérations de renouvellement urbain ne pourront s'exonérer de la prise en compte du risque d'inondation, si ce n'était toutefois pas encore le cas. Par ailleurs, sur les territoires non désignés TRI, l'importance de considérer les risques d'inondation au sein des opérations de renouvellement urbain n'en est pas moins grande. L'inondation a des impacts sur l'ensemble des dynamiques urbaines (habitats, réseaux, environnement, patrimoines, activités économiques, etc.) qui doivent nécessairement être appréhendés lors de la conception d'un projet de renouvellement urbain qui inclut toutes ces composantes.

1 - Caisse des dépôts et consignations (CDC), Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU), *Réussir le renouvellement urbain, 15 maillons clefs pour la chaîne de mise en œuvre des projets*, novembre 2001.

2 - Henri Jacquot, “Origines, enjeux et encadrement juridique des politiques de renouvellement urbain”, *Droit et politiques de renouvellement urbain, Cahier du Gridauih n° 10*, 2004.

3 - CDC, FNAU, (2001).

4 - *Idem*.

5 - 122 TRI ont été identifiés en France, sur la base de l'Évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI), mentionnée dans la Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (LENE dite loi Grenelle II), transposant la directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007, relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.

• POURQUOI ABORDER LA QUESTION DE L'URBANISATION EN ZONE INONDABLE, EN PARTICULIER DANS LES ZONES DE RENOUVELLEMENT URBAIN ?

La gestion des risques d'inondation vise à ne pas soumettre des populations à un risque important, afin de préserver les vies humaines. En France, la Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI), présentée officiellement le 10 juillet 2014 par la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, rappelle cet objectif prioritaire pour les autorités publiques : "La priorité nationale est de limiter au maximum le risque de pertes de vies humaines en développant la prévision, l'alerte, la mise en sécurité et la formation aux comportements qui sauvent. La prévention la plus efficace pour limiter les dommages liés aux inondations reste, bien évidemment, d'éviter l'urbanisation en zone inondable." Pour autant, au sein des cœurs de ville, des zones aujourd'hui inondables voient leur urbanisation croître, en raison notamment de l'objectif de densification imposé par les lois Grenelle. Si elle représente une alternative à une politique parfois systématique de protection par des digues, l'adaptation de l'urbanisation dans les zones urbaines nécessite cependant d'être intégrée dès la conception des projets.

1. Parce qu'il existe déjà des logements, des quartiers, voire des villes entièrement construits dans des zones inondables et qu'il s'en construit encore aujourd'hui en toute légalité.

C'est un état de fait, lié à l'histoire de nos villes. Celles-ci se sont majoritairement développées le long des littoraux et des cours d'eau, pour des raisons économiques, de transport fluvial et maritime, ainsi que d'attractivité de ces territoires (développement du tourisme balnéaire à partir du milieu du XIX^e siècle notamment). Aujourd'hui, les bords des cours d'eau et de la mer sont non seulement gages d'un cadre de vie agréable, mais également synonymes de plaines alluvionnaires fertiles et cultivables, de développement industriel, de transport fluvial, qui se traduit par un prix parfois très élevé du foncier sur ces zones. En raison de leur proximité avec l'eau, le risque d'inondation n'est cependant pas à exclure.



Paris (France). Crédit : ville de Paris.

Compte tenu de ces enjeux fonciers importants, la construction sur ces zones a été permise et encadrée par le législateur (loi montagne⁶, loi littoral⁷, loi Barnier⁸,...). On dénombre plus de 100 000 logements ayant été construits en zone inondable (par débordement de cours d'eau) de 1999 à 2006, dans les communes de plus de 10 000 habitants, c'est-à-dire sur 424 communes⁹. La construction dans certaines zones inondables est donc autorisée sous réserve du respect de certaines conditions, ce qui explique l'installation de milliers de logements, d'activités économiques et d'équipements publics chaque année dans des zones inondables.

Néanmoins, les prescriptions actuelles permettant d'encadrer ces développements urbains dans des zones soumises au risque d'inondation s'avèrent insuffisantes au regard des événements récents qui ont marqué le territoire français (tempête Xynthia et inondations dans le Var en 2010 notamment). Les Plans de prévention des risques naturels (PPR), notamment, sont souvent présentés comme des outils d'aménagement à part entière, alors qu'ils ne sont que des servitudes d'utilité publique. Ils agissent de manière sectorielle et partielle, sur la base d'un zonage à une échelle parcellaire qui ne permet pas d'approche cohérente à l'échelle d'un projet urbain. Ils ont principalement pour objet le contrôle de l'extension urbaine, pas celui de la restructuration urbaine. Les prescriptions qu'ils imposent aux projets d'urbanisme autorisés en zone inondable ne sont souvent pas de nature à produire des propositions d'aménagement adaptées au risque d'inondation. Pourtant, ce sont avec ces outils que de nombreuses villes renouvellent aujourd'hui certains de leurs quartiers situés en zone inondable.

2. Parce qu'aujourd'hui la densification en zone inondable est implicitement encouragée.

L'objectif de densification des lois Grenelle pose le problème de l'avenir des villes, qui doivent limiter leur étalement. Or, bien souvent, les terrains qui restent encore à urbaniser au sein des villes sont inondables. Dans les centres urbains denses, le renouvellement urbain apparaît comme une solution privilégiée pour redynamiser des secteurs anciens ou dégradés. Mais que faire de ces zones lorsqu'il s'agit de zones inondables ? Qu'en faire lorsqu'il s'agit de friches urbaines en mutation, avec parfois un passé industriel impliquant des opérations coûteuses de dépollution¹⁰ ? Ce sont également bien souvent des terrains ayant une valeur foncière importante et très attractifs car situés en bord de mer ou de cours d'eau. Ils s'inscrivent dans un tissu urbain parfois déjà dense où peuvent cohabiter équipements publics, entreprises, logements, etc. Dans ces zones inondables disponibles pour des opérations de renouvellement urbain, le choix de construire soulève diverses questions : quels types de constructions, pour quels coûts et quelle acceptabilité sociale ?

Par ailleurs, l'objectif de densification pousse les villes à urbaniser les secteurs les mieux desservis en réseaux. Afin de garantir une utilisation économe de l'espace et d'éviter l'étalement urbain, la Loi portant engagement national pour l'environnement (LENE) a adapté les règles d'urbanisme concernant le Plan local d'urbanisme (PLU), en lui permettant d'inscrire l'obligation de densifier dans son règlement¹¹. L'urbanisation de ces secteurs est donc encouragée, bien qu'ils soient parfois situés en zone inondable.

3. Parce que le tout-protection n'a pas fait ses preuves jusqu'à présent.

Fondée sur l'idée première qu'il est souhaitable et possible d'empêcher l'eau des fleuves et des mers de pénétrer sur des territoires exploitables et valorisables, la protection s'est développée et largement répandue depuis plusieurs siècles en Europe et dans le monde

6 - Loi n° 85-30 du 9 janvier 1985 relative au développement et à la protection de la montagne.

7 - Loi n° 86-2 du 3 janvier 1986 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral.

8 - Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement.

9 - Service de l'observation et des statistiques (SOeS), "Croissance du nombre de logements en zones inondables", "Le point sur" n° 6, février 2009.

10 - Jacquot H. (2004). Il définit les friches urbaines comme des territoires en mutation qui sont en attente d'une nouvelle affectation.

11 - "Dans des secteurs situés à proximité des transports collectifs, existants ou programmés, [Le règlement peut, en matière de caractéristiques architecturale, urbaine et écologique] imposer dans des secteurs qu'il délimite une densité minimale de constructions" (article L.123-1-5-III-3° du Code de l'urbanisme).

(digues, barrages, ouvrages divers de rétention des eaux). Après avoir vécu l'une des plus graves inondations de leur histoire en février 1953 avec près de 1 830 personnes décédées, les Pays-Bas décident la mise en place du premier Plan Delta. Ce dernier organise le renforcement du système de protection du pays à travers un vaste programme de travaux étalé sur plus de 25 ans. D'autres villes comme Francfort, Londres, Oslo, Cologne, Vienne ou Paris, possèdent chacune des dispositifs leur permettant de se soustraire aux épisodes d'inondation, ayant des probabilités de survenance allant de 1/100 par an à 1/10 000 par an¹². Forte d'un patrimoine important avec près de 9 000 kilomètres de digues, la France compte ainsi parmi les pays européens les plus "endigués" et consacre encore aujourd'hui l'essentiel de ses budgets dédiés à la gestion des inondations, à la construction, au renforcement et au rehaussement de digues (70 %)¹³.

Cette stratégie historique de gestion du risque, fortement ancrée dans les territoires, le paysage et les politiques de gestion européens, est loin d'être anodine, car elle entretient une utopie : celle de se croire préservé, d'avoir mis fin aux aléas naturels et de ne pas être tenu de se préparer au pire. Or, la tempête de 1953 aux Pays-Bas, l'ouragan Katrina aux USA en 2005 ou encore la tempête Xynthia de 2010 en France ébrèchent cette croyance du tout-protection comme une solution durable pour limiter les conséquences des inondations sur nos territoires.

La situation française ne serait pas si préoccupante si le territoire français était protégé dans des conditions comparables à certains de nos voisins européens. Or, nous sommes bien loin des objectifs du Plan Delta aux Pays-Bas, qui visent un renforcement des digues pouvant aller jusqu'à protéger certains secteurs spécifiques contre un événement ayant une probabilité de 1/100 000 de se produire chaque année. La directive européenne (2007) pose cependant le constat suivant : un événement centennal doit désormais être considéré comme moyen et non pas rare, alors qu'il constitue bien souvent un objectif idéal à atteindre pour les ouvrages de protection français. La solution paraît donc davantage à devoir être recherchée dans l'adaptation du territoire à l'inondation plutôt que dans la politique du "tout-protection" qui a largement montré ses failles.

4. Parce que mal aménager en zone inondable a quelque chose d'irréversible.

Le renouvellement urbain en zone inondable pose aujourd'hui question, parce qu'il présente une opportunité d'ouvrir la réflexion sur l'aménagement en zone inondable au sein des villes. L'histoire récente de La Nouvelle-Orléans (USA) est celle d'une cité considérablement exposée, au sein de laquelle l'oubli des événements du passé et la confiance excessive dans un système de protection, par ailleurs relativement délaissé, ont conduit à concevoir un développement urbain d'une extrême vulnérabilité. Cet épisode a également conduit à de nouvelles certitudes dans le monde de la gestion des risques d'inondation. Ainsi, une ville qui serait construite sans tenir compte du risque d'inondation auquel elle est exposée, quel que soit le système technique chargé de la protéger, ne saurait être qualifiée de durable.

Par ailleurs, plusieurs études montrent qu'il est extrêmement difficile de tenter d'adapter les maisons existantes au risque potentiel d'inondation¹⁴. Des freins d'ordre financier, politique, social et même psychologique traduisent une réalité encore difficilement partagée : un aménagement du territoire hasardeux du point de vue du risque d'inondation a quelque chose d'irréversible, et ce d'autant plus que le territoire est fortement protégé par des ouvrages de protection contre les inondations. Il est donc vital pour les villes d'aujourd'hui et de demain de ne pas refaire les mêmes erreurs et de s'interroger sur les possibilités d'urbanisations innovantes dans les zones inondables en renouvellement urbain.

12 - OCDE, *Étude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation – La Seine en Ile-de-France*, 2014.

13 - Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, *Bilan de l'activité de la CMI et des instances locales - Juillet 2011 à mai 2013*, 2013.

14 - CEPRI, *Un logement "zéro dommage" face au risque d'inondation est-il possible ?*, novembre 2009.

5. Parce que le changement climatique amène nos villes à s'interroger sur leur capacité à faire face à des événements extrêmes susceptibles de se multiplier.

Face aux évolutions actuelles et futures, les villes doivent interroger les formes urbaines qu'elles souhaitent développer. Le changement climatique représente un facteur important qui peut servir de catalyseur pour inciter les villes à s'adapter aux modifications de leur environnement. Cela est vrai pour le littoral, particulièrement menacé par la montée du niveau de la mer. Le 5^e rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures prévoit "une hausse du niveau des mers, tous scénarios confondus, située entre 29 et 82 centimètres d'ici la fin du XXI^e siècle (2081-2100)", ce qui reviendrait à impacter directement une personne sur 10 dans le monde¹⁵.

Mais cela l'est également, avec davantage d'incertitudes, pour les autres territoires soumis au risque d'inondation. Les chercheurs estiment que les précipitations augmenteront d'ici la fin du XXI^e siècle, provoquant des événements météorologiques extrêmes plus intenses, telles que des pluies diluviennes et probablement des ouragans plus fréquents.

Les évolutions liées au changement climatique peuvent se traduire de différentes manières dans l'aménagement des territoires urbains. La question de la localisation de certaines constructions, tout comme celle des usages, se pose notamment aux aménageurs. À quels usages pourront servir les aménagements futurs ? Ces usages sont-ils susceptibles d'évoluer ? Dans ce cas, la construction sera-t-elle adaptée à cette évolution ? L'exemple de la délocalisation de quelques activités le long de certains littoraux constitue l'une des réponses apportées face au phénomène d'érosion des côtes et à la montée du niveau des océans.

La notion d'adaptabilité des aménagements est primordiale dans ce contexte : les projets situés dans des zones en renouvellement urbain doivent pouvoir s'adapter aux évolutions d'un territoire impacté par le changement climatique.

• COMMENT Y RÉPONDRE ? QUELLE MÉTHODE RETENIR ?

1. Sortir de l'échelle de la parcelle pour raisonner à l'échelle de la ville

Si des outils existent pour tenter de prévenir le risque d'inondation à l'échelle de la parcelle et du bâtiment, cette approche ne tient pas compte des interactions multiples qui existent au sein d'une ville et qui se trouvent impactées au moment d'une inondation, rendant la gestion de crise et la post-crise complexes. Un bâtiment, qu'il s'agisse d'un logement, d'un établissement recevant du public ou d'une entreprise, bénéficie de nombreux réseaux (eau potable, assainissement, électricité, télécommunications, voies d'accès...) et ne peut donc fonctionner sans interactions avec son environnement urbain. À une autre échelle, celle du quartier, le raisonnement est similaire : le quartier est interconnecté avec les autres quartiers, les services publics, les routes et les multiples réseaux assurant le fonctionnement du système urbain. Le fonctionnement d'une ville s'apparente à celui d'un vaste écosystème dans lequel tout s'interpénètre : individus, bâtiments, réseaux de communication, de transport et d'énergie. Une inondation n'impactera pas uniquement le bâtiment ou le quartier, mais peut également avoir des conséquences directes et indirectes sur l'ensemble de la ville, voire au-delà. L'échelle de la ville dans son ensemble paraît donc pertinente pour réfléchir à un renouvellement urbain intelligent dans les zones inondables. Cela n'empêche toutefois pas la réalisation simultanée de projets intégrant le risque d'inondation à différentes échelles (bâtiment, quartier, ensemble de quartiers, ville, conurbation).

15 - IPCC, *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change (5^e rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures)*, 2014.

La planification urbaine, qui in fine conduit à définir le droit des sols (dont la compétence revient aux élus), organise les choix et la localisation du développement, le fonctionnement des quartiers entre eux. Mais l'aménagement s'envisage bien au-delà de la seule zone inondable, c'est la raison pour laquelle la concertation avec l'ensemble des acteurs doit également s'opérer à des échelles géographiques différentes et que l'échelle du bassin versant semble aussi opportune pour amorcer certaines réflexions.

Sans démarche à une échelle large, l'addition d'actions, aussi utiles soient-elles, ne produit pas d'effets suffisants. Les dispositions d'urbanisme, en tant que cadre d'action en amont de mesures locales, est un préalable nécessaire pour donner de la cohérence aux diverses actions locales publiques ou privées.

2. Intégrer des principes au sein de la réflexion

Cette prise en compte de l'inondation au sein de zones urbanisées peut s'appuyer sur des techniques d'aménagement diverses. À travers l'étude d'aménagements (partiellement) réalisés tels que le quartier Matra à Romorantin-Lanthenay, les quais à Bordeaux, le site Job à Toulouse ou bien en cours de conception comme le quartier Stadswerven à Dordrecht (Pays-Bas), le quartier Felnex à Hackbridge (banlieue de Londres) ou celui de l'aéroport de Rotterdam (Pays-Bas), des principes ont ainsi pu être identifiés. Il s'agit d'intégrer l'inondation en tant que composante d'un projet au sein d'une stratégie d'aménagement définie par les acteurs du projet : du maître d'ouvrage au concepteur, jusqu'au constructeur et au bénéficiaire de cet aménagement. Ces principes ne sauraient être exhaustifs et peuvent concerner l'intégration d'un système de protection dans l'aménagement urbain, le fait de redonner davantage de place à l'eau ou localiser les activités urbaines en fonction de leur vulnérabilité par exemple.

3. Multiplier les compétences

La prise en compte du risque d'inondation dans une réflexion globale d'aménagement, nécessite de s'appuyer sur l'ensemble des compétences disponibles pour apporter une réponse adaptée à la réalité du risque sur le secteur concerné. Cela concerne à la fois les acteurs de l'aménagement, mais également les acteurs de l'eau, de la prévention des risques, afin de considérer l'inondation de façon complète. Il ne s'agit pas seulement d'avoir une connaissance fine de l'aléa, du phénomène d'inondation sur la zone, mais également de connaître la stratégie de gestion de crise prévue pour ce secteur, en lien ou non avec les autres secteurs de la ville. La phase de l'après-inondation (post-crise, retour à un fonctionnement normal du territoire) doit également être intégrée dès la phase de conception du projet, afin d'anticiper les éventuels axes de déplacement prioritaires par exemple.

L'enjeu est de réunir ces différents acteurs autour d'un projet commun et de faire œuvre de pédagogie pour que chacun puisse s'appropriier les questions liées à la prise en compte du risque et apporter des solutions propres à son domaine de compétence.

• L'URBANISATION ADAPTÉE AU RISQUE : UNE SOLUTION MIRACLE ?

Certaines zones inondables sont aujourd'hui "gelées", tandis que d'autres voient leur urbanisation croître sans précaution particulière, la plupart du temps en dépit de la connaissance existante sur le risque d'inondation. Il n'est pas raisonnable de continuer à renouveler le tissu urbain dans des zones inondables aujourd'hui sans prendre en compte le risque

d'inondation de manière significative. Ce territoire sera un jour en crise et devra faire face pour faciliter un retour à la normale le plus rapide possible.

Entre l'option du "gel" et celle du "laisser-faire", une troisième voie se dégage, en tentant d'introduire l'idée que l'aménagement dans des zones inondables peut s'appuyer sur des façons différentes d'appréhender le risque dans les projets de renouvellement urbain, dans une logique d'adaptation de la ville à son environnement, et non l'inverse.

Cette notion d'adaptation s'inscrit de plus en plus au cœur de l'évolution de nos villes pour répondre à la problématique du changement climatique et à celle d'un développement durable. C'est d'ailleurs le sens de l'évolution de nos sociétés introduit aux niveaux international et européen, à travers le cadre d'action de Hyogo (2005) et de la directive inondation (2007). Cette dernière réserve une place de choix à l'adaptation du territoire, en insistant sur la nécessité de réduire les conséquences négatives des inondations sur la santé humaine, l'économie, l'environnement et le patrimoine culturel. Certains pays ont progressivement répondu à cet objectif par une forme de gestion du risque davantage basée sur l'adaptation des territoires (Pays-Bas, Royaume-Uni, Allemagne, France). Malgré l'engouement suscité par l'idée de passer d'une politique de "lutter contre" à une approche du "vivre avec" les inondations, l'adaptation des territoires au risque demeure encore un défi considérable.

Si elle est encore loin de représenter une solution miracle, l'adaptation au risque d'inondation est assurément gage de progrès. Les grandes opérations de renouvellement urbain représentent des opportunités à saisir pour proposer des projets de territoire adaptés au risque. Ceci suppose de l'innovation dans les démarches d'urbanisme et une transformation du regard des décideurs sur l'opportunité que représente la prise en compte du risque dans l'aménagement d'une ville, et non la seule contrainte.

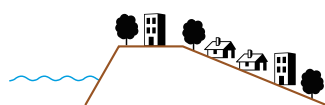
I. LES PRINCIPES TECHNIQUES D'AMÉNAGEMENT

À partir de l'étude de projets réalisés ou en cours de conception, différents principes ont été identifiés pour guider la réflexion des collectivités et des professionnels de l'aménagement lors de projets de renouvellement urbain en zones inondables.

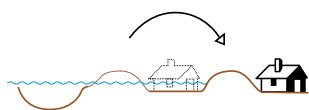
Ces principes proposent des solutions techniques ou organisationnelles. Ils ont vocation à répondre aux grands objectifs de la prévention des inondations, définis notamment dans la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation : "augmenter la sécurité des populations exposées ; stabiliser à court terme et réduire, à moyen terme, le coût des dommages liés à l'inondation ; raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés. Pour atteindre ces grands objectifs, la stratégie nationale vise à l'appropriation du risque inondation par tous les acteurs afin de conjuguer tous les leviers d'action de la gestion des inondations et ainsi limiter au maximum les dommages."

Un autre objectif auquel ces principes tentent de répondre concerne le rapprochement entre la ville et le risque, c'est-à-dire le fait d'accepter la présence du risque d'inondation au sein des villes, de vivre "avec" l'inondation, qui s'inscrit dans le mouvement d'un "retour de la nature en ville" au sein de nombreux projets d'urbanisme actuels.

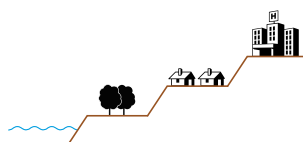
Six grands principes d'aménagement ont pu être identifiés, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité.



• **Principe 1 : inclure un système de protection dans l'aménagement urbain.** Il vise à présenter un certain nombre d'aménagements conciliant ouvrages de protection (digues) et densification de l'espace urbain à travers des dispositifs innovants tels que les super-digues par exemple.



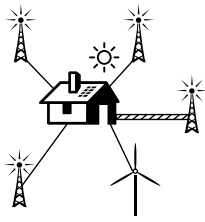
• **Principe 2 : donner ou redonner plus de place à l'eau.** Il s'attache à réduire l'aléa inondation au sein des villes, ou du moins à ne pas l'aggraver, en proposant un panel d'exemples donnant ou redonnant sa place à l'eau dans les centres urbains denses.



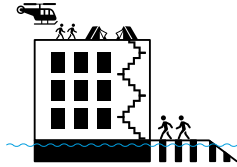
• **Principe 3 : localiser les activités et les infrastructures urbaines.** Il propose de réfléchir à l'implantation d'activités et infrastructures faisant partie du système urbain, en tenant compte de leur caractère vulnérable par rapport au risque d'inondation.



• **Principe 4 : concevoir des bâtiments adaptés à l'inondation.** Il consiste à imaginer des procédés constructifs permettant d'adapter un bâtiment (logement, bâtiment public, locaux d'entreprise, etc.), voire une infrastructure, à la présence du risque d'inondation dans une zone en renouvellement urbain.



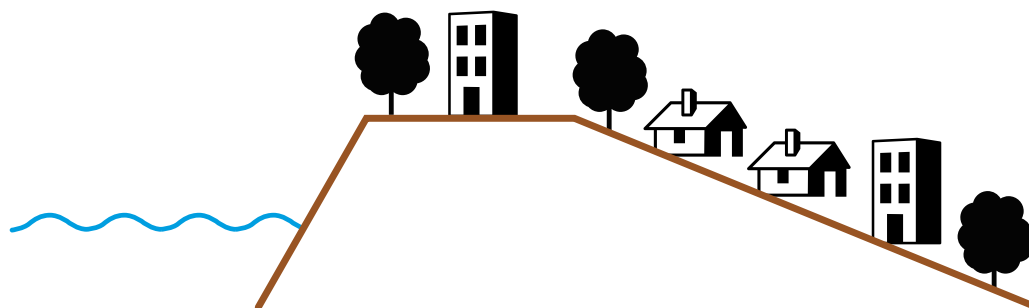
• **Principe 5 : assurer le maintien du fonctionnement des réseaux techniques.** Il considère la question des interdépendances au sein d'une ville. Pour fonctionner, une ville a des besoins qui se matérialisent par la présence d'un certain nombre de réseaux (besoin d'être alimentée en énergie, de permettre la circulation de la population qui y vit ou qui y travaille, etc.).



• **Principe 6 : créer des espaces intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction.** Il s'appuie sur le concept de multifonctionnalité pour concevoir des lieux ayant un usage en période normale et pouvant basculer vers un autre usage en cas d'inondation. La particularité de ce principe est d'envisager ces multiples usages avant la conception du bâtiment ou de l'infrastructure afin d'adapter ces derniers à la présence du risque d'inondation.

Dans leur mise en œuvre, ces principes peuvent présenter un certain nombre d'avantages ou d'inconvénients sur le plan technique, économique, social, politique, juridique et paysager. Ces derniers ne sont pas présentés de manière exhaustive, mais permettent d'apporter un éclairage sur la traduction concrète de ces principes au niveau opérationnel.

1. INCLURE UN SYSTÈME DE PROTECTION DANS L'AMÉNAGEMENT URBAIN : PRINCIPE 1



Source : CEPRI.

1. Objectifs

Protéger un quartier contre les inondations peut être une action permanente ou temporaire. Parmi les systèmes permanents, les digues, qu'elles soient maritimes ou fluviales, sont les dispositifs les plus fréquemment construits.

Elles sont définies comme des ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions (art. L. 566-12-1 du Code de l'environnement¹⁶). Tout ouvrage entrant dans ce champ est défini par deux éléments : la zone qu'il protège des risques d'inondation et de submersion et le niveau de protection apporté (art. L. 562-8-1 du Code de l'environnement). Une digue est destinée à empêcher l'eau de venir, pas à la stocker. Elle crée temporairement une différence de niveau d'eau entre deux parties d'une même zone inondable. Cette différence crée une "charge hydraulique" qui soumet l'ouvrage à des forces contre lesquelles il doit être correctement dimensionné pour résister.

Certains ouvrages peuvent parfois faire obstacle et retenir l'inondation. Ils jouent donc le rôle d'une digue, sans en avoir le nom, ni avoir été conçus et dimensionnés pour résister correctement à la poussée de l'eau et donc remplir concrètement ce rôle de protection des personnes et des biens. Par exemple, des protections routières (en terre, en maçonnerie ou autre), des protections acoustiques en bordure d'une route ou autoroute qui couronnent le sommet d'un remblai faisant office de digue ou traversant une vallée inondable, des parapets routiers, des produits de curage, des produits d'extraction disposés autour des carrières d'extraction de granulats ou autour de sites industriels en zone inondable...

Malgré l'existence d'obligations réglementaires accrues depuis 2007 en France, on constate que les digues n'apportent pas toujours les garanties de sécurité attendues. Divers événements récents ayant provoqué des ruptures de digues démontrent que ces ouvrages sont fragiles, a fortiori lorsqu'ils ne font pas l'objet d'un entretien ni d'une surveillance rigoureux.

Par ailleurs, ces ouvrages nécessitent une emprise foncière importante, d'autant plus coûteuse dans les zones urbaines denses où ces terrains représentent une perte d'espace pour l'aménagement de la ville (pouvant toutefois être compensé par la réalisation d'espaces verts en crête de digue, piste cyclable, etc.).

16 - Loi n° 2014-58 du 27 janvier 2014 (art. 56 à 59) de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (dite Loi métropole).

Enfin, un autre élément non négligeable est l'impact paysager de ces ouvrages, qui peuvent cacher la vue sur l'eau (rivière, fleuve ou mer) aux habitants d'un quartier endigué. Un autre impact par ricochet pourrait être l'absence de culture du risque d'inondation causée par l'absence de vue sur l'eau.

Pour pallier ces inconvénients, des solutions d'aménagement peuvent être proposées pour les zones de renouvellement urbain protégées par des digues :

- le concept de super-digue ;
- la notion de digue multifonctionnelle ;
- les dispositifs mobiles de protection.

2. Types d'aménagements possibles

a) Le concept de super-digue : une réponse à la fragilité des digues ?

Bien qu'étant peu expérimenté pour le moment, ce concept vise à apporter une réponse à la problématique des ruptures de digues. Il consiste à relever le niveau du sol derrière une digue jusqu'à atteindre la crête de cette dernière, sur une distance suffisante pour que la pente du nouveau terrain aménagé soit faible (3 % par exemple).

Concrètement, cela signifie que, sur une surface définie à l'arrière de la digue (quelques centaines de mètres par exemple), les anciennes constructions sont détruites ; de la terre en quantité suffisante est ajoutée le long de la digue existante pour former le nouveau terrain en pente douce ; puis de nouvelles constructions sont réalisées sur ce terrain légèrement pentu. Ce dernier peut être aménagé sous forme de terrasses pour éviter que la pente ne soit compensée sur tous les bâtiments.

D'un point de vue technique, la super-levée évite la rupture potentielle de la digue sur le tronçon concerné. La digue est renforcée, voire transformée, et cela représente une garantie de sécurité au regard du risque de rupture. Par contre, ce procédé n'empêche pas la zone urbanisée derrière d'être inondée en cas de surverse de la digue.



Schéma d'une super digue. Source : CEPRI.

Ce genre d'opération allie à la fois gestion du risque d'inondation, en conservant l'ouvrage de protection, et aménagement du territoire. Il implique, pour la ville qui décide de le mettre en œuvre, une réflexion réelle sur les formes urbaines qui seront implantées sur ce nouveau terrain. Cela représente donc une occasion de repenser l'urbanisation dans des zones soumises au risque d'inondation, notamment l'intégration d'espaces récréatifs plus vastes et plus nombreux, les types de bâtiments, les services ou activités...

Ce type d'aménagement nécessite néanmoins un foncier relativement important dans des zones urbaines parfois très denses, ce qui représente une première difficulté à sa mise en œuvre. Par ailleurs, modifier fondamentalement le terrain derrière un ouvrage de protection a des conséquences non négligeables pour les habitants vivant à proximité (relogement temporaire pendant l'aménagement du terrain ainsi que la construction des nouveaux logements, voire expropriation).

Exemple de projet d'urbanisation réalisé à l'arrière d'une digue en zone urbaine : le site Job dans le quartier des Sept Deniers à Toulouse (France)

Le site doit son nom à l'ancienne usine de papier à cigarette Job, installée sur une surface d'environ 5 ha, devenu une friche industrielle à la liquidation judiciaire de l'usine en 2001. Après la démolition de l'usine en 2003, la ville de Toulouse a établi un schéma d'aménagement pour la reconversion du site. Un promoteur immobilier a acheté les terrains afin de réaliser la construction de bâtiments résidentiels. Seule une partie de l'ancienne usine, le bâtiment "l'Amiral", a été rachetée par la ville afin de conserver, pour mémoire, un élément du patrimoine industriel du site (devenu un équipement public répondant aux prescriptions du PPRI, l'"l'Espace Garonne", en 2011).

Au regard du risque d'inondation, la ville de Toulouse a 15 % de son territoire soumis aux débordements de la Garonne, dont les crues sont rapides. La dernière crue importante date de février 2000, mais la crue historique d'une ampleur exceptionnelle remonte à 1875, avec des conséquences désastreuses (plus de 200 morts, 1 140 maisons détruites entre autres). Les digues qui ont été construites afin de protéger la ville dans les années 1950, appartenant aujourd'hui en majeure partie à l'État, font l'objet d'un programme de travaux d'entretien et de confortement à travers un Plan submersion rapide (PSR). Le quartier des Sept Deniers est également protégé par deux types de digue (un mur poids en béton et une digue en terre revêtue de parements en béton) d'une hauteur de 6 à 11 m.

Lors de la réflexion sur le projet d'aménagement du site Job au début des années 2000, le PPR était en cours d'élaboration (prescrit en 2002 et approuvé en 2011). Le site était qualifié de très vulnérable par rapport au risque de rupture de digues : aléa très fort avec 3,5 m de hauteur d'eau et une vitesse de 4 m/s en cas de rupture de digue. Il a été déclaré "zone à enjeux stratégiques" et a fait l'objet d'une réflexion intéressante entre la ville de Toulouse, l'État et le GIE privé (Groupement d'intérêt économique rassemblant l'aménageur et les promoteurs pendant la durée de l'opération). L'objectif des "zones stratégiques" est de permettre le renouvellement urbain dans des secteurs fortement exposés au risque d'inondation, à condition de réduire le risque par renforcement de la digue et de mettre en œuvre de mesures de prévention adaptées.

Conformément au règlement spécifique du PPRi (approuvé en décembre 2011), les principes constructifs suivants ont été imposés sur le site :

- diminuer le risque de rupture de la digue des Sept Deniers par un renforcement de celle-ci ;*
- définir les aléas résiduels liés à d'éventuelles ruptures de digues à proximité du site ;*
- construire des bâtiments adaptés au risque d'inondation.*

Des études ont montré qu'il était possible de construire des bâtiments surélevés ayant un premier niveau habitable au-dessus des plus hautes eaux connues (PHEC), tout en remblayant l'espace laissé entre ces bâtiments et la digue. Ce remblai accolé à la digue sur une longueur de 260 m descend ensuite en pente douce pour rejoindre le niveau du terrain naturel en arrière de la digue. Il s'apparente au concept de super-digue, car il a pour finalité de diminuer le risque de rupture. Il a été financé par le GIE pour un montant de 600 000 euros HT.



Quartier des Sept Deniers à Toulouse. Crédit : ville de Toulouse

Les bâtiments ont un premier niveau habitable situé au-dessus de la cote atteinte en 1875 + 50 cm. Ils ont été construits en béton armé et les divers ouvrages enterrés ont été conçus pour prendre en compte la saturation en eau du remblai en cas de crue de la Garonne. Leurs rez-de-chaussée sont des parkings inondables, légèrement enterrés par rapport à la voirie.

À l'issue de l'opération d'aménagement, 642 logements ayant une vue sur le fleuve ont été réalisés (dont 25 % de logements sociaux, 50 % en accession à la propriété, 25 % de location), faisant ainsi passer la population

du quartier des Sept Deniers de 5 000 à plus de 7 000 habitants. Le remblaiement a permis de créer des logements de grand standing ayant un accès direct à des espaces récréatifs aménagés sur le sommet de la digue (pistes cyclables, chemins de promenade...), rendant le site très attractif.

Source : ville de Toulouse et CETE Sud-Ouest.

Exemple de la super-digue le long de la rivière Arakawa à Tokyo (Japon)

Envisagée depuis 1987, la construction d'une super-digue le long de la rivière Arakawa (environ 58 km) a été autorisée en 2001 avant d'être abandonnée en 2010 (coûts trop importants). Le ministère du Territoire, des Infrastructures et des Transports a complètement revu sa politique en août 2011. Les super-digues ne seront réalisées que dans les zones situées en dessous du niveau de la mer ou les zones densément peuplées au sein de grandes agglomérations, dans lesquelles les dommages pour les personnes et les biens seraient conséquents en cas d'inondation.

Le procédé consiste à rehausser le niveau du terrain naturel à l'arrière des digues actuelles, sur une longueur de 300 mètres environ, les digues ayant en moyenne une hauteur de 10 mètres. Cela revient à créer une sorte de quai en pente douce (3 %). Ce procédé permettrait de réduire très fortement le risque de rupture de la digue en cas d'inondations brutales et violentes (lié aux typhons lors de la saison des pluies), lors d'inondations lentes par submersion de la digue ou encore en cas de séismes.

Cette technique vise à permettre une urbanisation plus sécurisée sur la digue et dont l'environnement (cadre de vie) est plus agréable. Les espaces entre le sommet de la digue et les premières constructions seront probablement destinés à un usage récréatif : promenade, détente, etc. D'un point de vue paysager, les habitants verront la rivière Arakawa depuis leur logement, ce qui n'était pas le cas avant la construction de la super-digue. Ce type d'aménagement rapproche donc les habitants de la rivière et peut contribuer à renforcer la culture du risque au sein de la population.

D'un point de vue opérationnel, l'expropriation des habitants propriétaires de maisons individuelles n'est pas envisagée. Les gens seront relogés pendant la durée des travaux et conserveront leur(s) titre(s) de propriété. Leur hébergement temporaire sera financé par les autorités publiques (dont le ministère du Territoire, des Infrastructures et des Transports japonais). C'est en partie pour cette raison que le projet ambitieux de 1987 a été revu en 2011, aucune analyse coûts/bénéfices n'ayant été réalisée à l'époque.

Pour le moment, les autorités s'interrogent notamment sur la possibilité de concevoir ces super-digues comme des lieux privilégiés en cas de crise pour l'évacuation des populations riveraines.

Source : Super Levees Guidebook, Arakawa-Karyu River Office, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Tokyo, Japan, 2007.

b) Le concept de digue multifonctionnelle : une réponse au manque d'espace disponible et au coût d'entretien des ouvrages traditionnels ?

Ce concept vise à répondre à la problématique du foncier disponible dans les zones de renouvellement urbain, en particulier dans les cas de zones urbaines densément peuplées.

Il ne s'agit pas d'un concept nouveau : dans la pratique, on observe déjà de nombreux cas de digues multifonctionnelles parfois anciennes (routes, voies piétonnes, chemins, voies de chemin de fer, habitations faisant office de digues...). Ces ouvrages sont des digues dont la structure est utilisée pour une autre fonction, ce qui peut permettre de gagner de l'espace dans les villes. Plusieurs types de digues multifonctionnelles existent ou peuvent être envisagés.

- La conception de digues multifonctionnelles à partir de murs de protection

Les murs de protection sont des dispositifs permanents et leur hauteur est variable en fonction de la crue de référence. Ils peuvent être différenciés par rapport à leur structure de soutènement : mur de soutènement élancé, mur poids, mur en forme de "L" ou avec talon et fortification¹⁷.

17 - Stalenberg Bianca, Design of floodproof urban riverfronts, Delft University of Technology, 2010.



Mur de protection contre les crues du Rhin, à Leutesdorf (Allemagne). Crédit : CEPRI.

À partir de cet ouvrage conçu pour remplir une fonction de protection contre les inondations, on peut envisager d'autres usages dans le corps de l'ouvrage lui-même (voiries, réseaux) et à l'extérieur de l'ouvrage (espaces publics, jardins récréatifs, etc.).

Exemples de projets de digues multifonctionnelles de la société Delta Design, à Rotterdam et à Shanghai, intitulés "Live Love Levee – un projet de planification pour une sécurité face au risque d'inondation grâce à un développement de la ville durable" (Pays-Bas, Chine)

L'idée maîtresse du projet est d'aménager des digues aujourd'hui existantes au sein des villes de Rotterdam et Shanghai, densément peuplées et en manque de foncier disponible. Ces villes situées dans des zones de delta sont protégées par des digues, qui seront renforcées et surélevées dans le cadre du projet pour un évènement de fréquence 1/10 000 ans. Dans les zones dépourvues de digues, de nouveaux ouvrages multifonctionnels seront envisagés. Il s'agira de digues bâtiments, comportant des voiries souterraines, des parkings ainsi que des réseaux enterrés.

Pour la ville de Rotterdam, aménager des digues fonctionnelles est clairement une réponse au manque d'espace disponible pour continuer à attirer les habitants au sud de la ville et renforcer la protection des quartiers nord. Des maisons flottantes sont également prévues devant la digue multifonctionnelle.

Dans le cas de Shanghai, la ville a la possibilité de s'étendre sur l'océan sous la forme d'un polder. Les digues actuelles seront redimensionnées pour augmenter la sécurité de la ville. Toutefois, en raison de l'amplitude de la marée, le projet de Shanghai ne propose pas de maisons flottantes.

Source : Van der Meer B., Van Emmerik T.H.M., Dalebout T.H., Man W.Y., Mi Z., Tien S., Live Love Levee, Project plan for flood safety with sustainable delta city development, Delta Design, disponible sur : <http://www.engineersonline.nl/download/Poster%20Live%20Love%20Levee.pdf>

Exemple du projet Boompjes City Balcony à Rotterdam, De Urbanisten (Pays-Bas)

Le projet “Boompjes City Balcony” développé par le bureau d’architectes urbanistes De Urbanisten en 2009-2010 est conçu pour augmenter le niveau de protection existant de la ville de Rotterdam, notamment à cause des effets du changement climatique. La conception d’une digue multifonctionnelle le long de la Meuse répond à la préoccupation de la ville pour l’augmentation du niveau de la mer, Rotterdam étant située dans une zone estuarienne.

L’aménagement dans le corps de la digue intègre un tunnel pour les voitures et à l’extérieur un grand espace public terrassé permettant une “reconnexion” entre la ville et la Meuse.



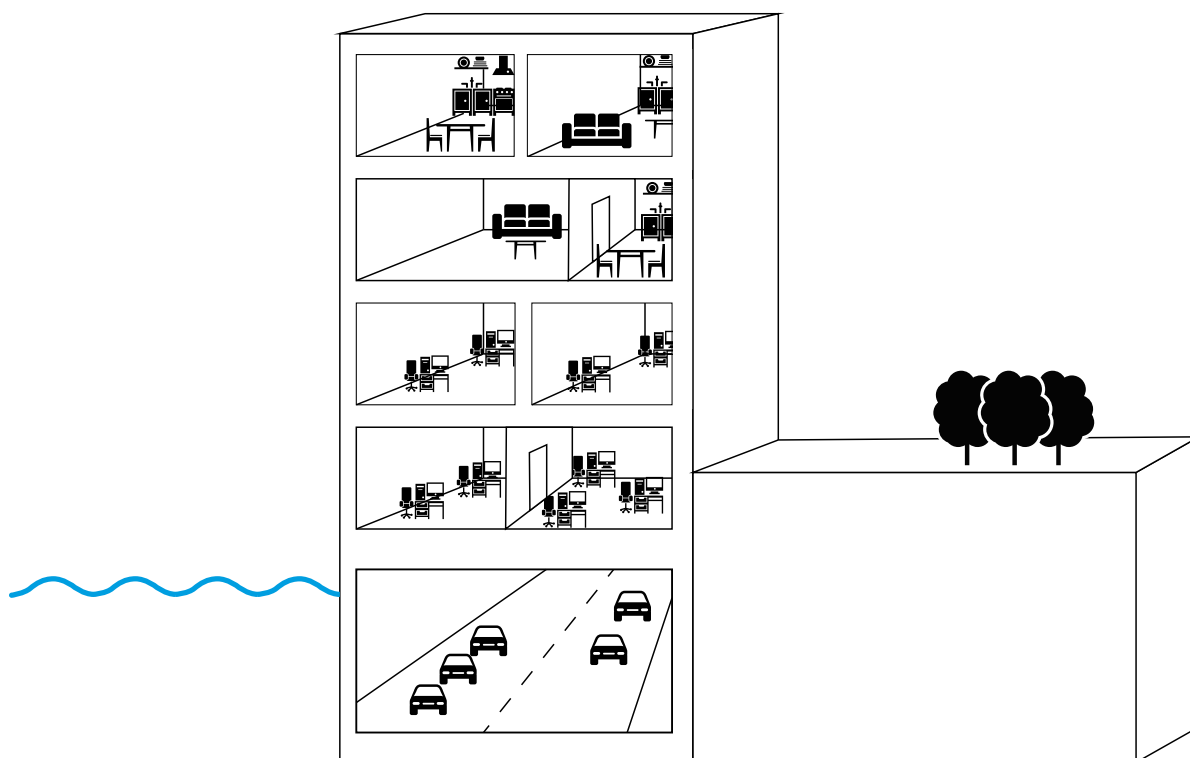
Proposition de digue multifonctionnelle. Crédit : De Urbanisten.

Sur cette vue en 3D, on peut voir que la digue a été intégrée dans le paysage urbain. N’est visible que le quai aménagé sous la forme d’un espace public (parc) en pente douce. À l’intérieur de la digue, un tunnel est construit pour permettre le passage des véhicules. Une plate-forme flottante est aussi proposée comme une sorte d’expansion du quai vers le fleuve.

Source : www.urbanisten.nl

- La conception de digues multifonctionnelles à partir de bâtiments ayant d’autres fonctions

Ce sont des ouvrages qui ont la fonction de protéger une zone urbaine donnée, parce qu’ils ont la résistance et la robustesse d’une digue. Comme le mur de protection “en L”, ils ont des fonctions différentes à l’extérieur et à l’intérieur du bâtiment. L’avantage de ce dispositif est sa capacité d’évolution verticale dans le temps, ce qui représente une piste intéressante pour l’adaptation au changement climatique notamment.



Exemple de digue multifonctionnelle. Source : CEPRI.

La capacité d'évolution du dispositif permet non seulement de renouveler les relations entre les habitants et l'eau mais aussi de créer différentes dynamiques temporelles en fonction de l'usage du bâtiment.

Grâce à son adaptabilité, ce dispositif n'a pas besoin d'être remplacé par une autre structure car ses fondations ont été surdimensionnées et ses premiers étages sont "hermétiques". Cette base structurelle est capable de résister à des forces horizontales importantes (pressions hydrostatique et hydrodynamique), ainsi qu'aux forces verticales liées à l'extension du bâtiment. L'ouvrage doit être en bon état pour pouvoir assumer les différentes fonctions pour lesquelles il a été conçu, ce qui suppose un entretien et une surveillance pérennes.

Exemple du centre-ville ancien de la ville de Dordrecht (Pays-Bas)



La Voorstraat dike à Dordrecht. Crédit : ville de Dordrecht.

Dordrecht est l'une des villes les plus anciennes des Pays-Bas. Une des caractéristiques de son centre historique est d'être protégé par une digue, la "Voorstraat dike", recouverte de constructions imposantes. Cette digue a été renforcée grâce à la mise en place de dispositifs mobiles de protection entre les bâtiments. Des pieux implantés devant les bâtiments constitutifs de la digue jouent le rôle de "sentinelles" en cas d'inondation.



Les "sentinelles" de l'inondation le long de la Voorstraat dike. Crédit : ville de Dordrecht.

Source : Gersonius B., Flood risk management strategy Dordrecht, présentation à Rotterdam en mars 2014, dans le cadre du Programme européen de la plate-forme d'observation des projets et stratégies urbaines (POPSU), PUCA, DGALN, MEDDE.

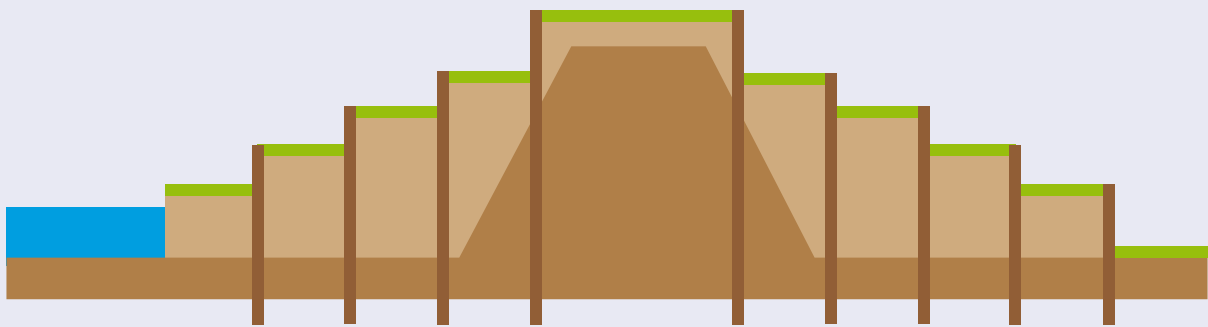
- La conception de digues multifonctionnelles à partir d'un remodelage du terrain

Cette technique peut être utilisée dans le cadre d'une stratégie d'aménagement tenant compte de digues existantes. L'idée est d'augmenter la hauteur de la digue et d'assurer sa robustesse face à des charges horizontales à travers des éléments verticaux. Il est possible de compenser les coûts de l'aménagement de ces dispositifs et leur entretien grâce à l'implantation d'espaces publics, de voiries, de bâtiments comprenant des logements et diverses activités.

Exemple du projet de "digue terrasse" multifonctionnelle, The Hilledijk, à Rotterdam, 2014 (Pays-Bas)

Ce dispositif est conçu comme une superposition de différentes terrasses. Des "feuilles" métalliques (sortes de palplanches) sont enfoncées dans le sol pour former des plans verticaux. Ces plaques verticales servent à améliorer la stabilité de la digue et à augmenter la durée d'infiltration. L'espace entre les plaques est stabilisé pour créer une terrasse, la digue est ainsi composée de plusieurs terrasses à des niveaux différents.

Sur ces différents niveaux peuvent être implantés des routes, des bâtiments, des espaces verts, des parkings, des bassins pour le stockage de l'eau par exemple. Comme la digue terrasse n'a pas de pente, la totalité de sa surface peut être utilisée pour en tirer pleinement parti. Le principe de la levée terrasse semble relativement transposable au cas de digues existantes ou nouvelles.



Coupe schématique de la "digue terrasse The Hilledijk" à Rotterdam.

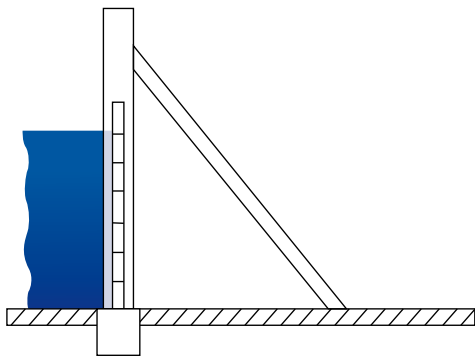
Source: www.rotterdamclimateinitiative.nl

c) Les dispositifs mobiles de protection : le maintien d'un lien entre le territoire et l'eau ?

La construction d'une digue n'est pas envisageable dans toutes les situations et a un impact paysager certain, ce qui dénature parfois l'identité d'un quartier, voire d'une ville.

Pour répondre à cette problématique, les systèmes de protection mobiles peuvent être intéressants. Ils remplissent la même fonction qu'une digue permanente et peuvent être de plusieurs types différents : structures verticales, barrières flexibles, structures en forme de dièdres, barrages poids, sacs absorbants¹⁸. Mais ces différents systèmes ne sont utiles que si l'on a le temps de les installer et si l'inondation ne dure pas trop longtemps. Autrement dit, dans les secteurs où la montée des eaux est rapide et le délai d'alerte court, ainsi que dans les cas où la durée de l'inondation est longue (des défauts d'étanchéité peuvent apparaître), ces dispositifs sont moins pertinents. Disposés pour permettre de lutter contre un débordement ou une submersion, ils peuvent également se révéler inefficaces en cas de remontées de nappe ou de refoulement des réseaux générant une inondation.

- Les structures verticales (murs)



Source : Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpech P., Axes J.-M. CSTB - Impacts des inondations sur le cadre bâti et ses usagers, rapport final, juillet 2014, 46 p.

Il existe différentes structures : portes, barrières et murs temporaires, etc. Les barrières peuvent être situées à l'entrée des lotissements ou à l'entrée des quartiers directement sur les rues, les murs temporaires sont situés le long du cours d'eau ou du littoral pour assurer la protection des quais.

On emploie le terme de "batardeaux" pour désigner des structures combinées qui associent des structures temporaires amovibles (planches hermétiques) et des structures permanentes (structures d'appui pour les planches).

À noter : les éléments ci-dessous n'ont pas fait l'objet d'une analyse de fiabilité de la part du CEPRI. Ils sont destinés à présenter des pistes pour les collectivités et leurs partenaires, qui peuvent se référer au projet SMARTeST qui a effectué cette analyse¹⁹.

18 - Ashley R., Garvin S., Pasche E., Vassilopoulos A., Zevenbergen C., *Advances in urban flood management*, Hardback, February 2007.

19 - SMARTeST (SMARt Resilient Technologies, Systems and Tools), www.floodresilience.eu

Exemple du dispositif de protection mixte de la ville d'Andernach (Allemagne)

Andernach est l'une des villes les plus anciennes d'Allemagne, située au cœur de la vallée du Rhin, où vivent environ 30 000 habitants. La ville est régulièrement soumise aux crues du Rhin, dont la plus dévastatrice date de 1995.

Après avoir fait une analyse coûts/bénéfices, il est apparu plus intéressant pour la commune de construire un système de protection contre les crues du Rhin, tout en sauvegardant le paysage urbain et la vue sur le Rhin depuis la ville. En effet, située sur la route de la vallée du Rhin extrêmement fréquentée tout au long de l'année par de nombreux touristes, la ville ne souhaitait pas cacher la vue sur le Rhin ou dénaturer le centre-ville historique en construisant un mur permanent de plusieurs mètres de hauteur. Elle ne voulait pas non plus abandonner ses espaces verts en bordure du fleuve au profit d'une digue.

Le système de protection mis en place par la ville d'Andernach est donc constitué de deux parties sur une longueur de 700 m : l'une est permanente et constituée d'un muret dont les fondations font 6 m de profondeur, l'autre est mobile sous la forme de batardeaux. Le système, monté en 8 h en cas d'alerte, est testé une fois par an, mais n'a jamais été éprouvé en conditions réelles. Le matériel est stocké dans un local étanche situé à proximité du muret de protection où se trouve également la station de pompage en cas d'inondation de la ville. Les travaux ont commencé en 2004 et ont coûté 1,75 million d'euros, dont 90 % ont été financés par le Land de Rhénanie-Palatinat.

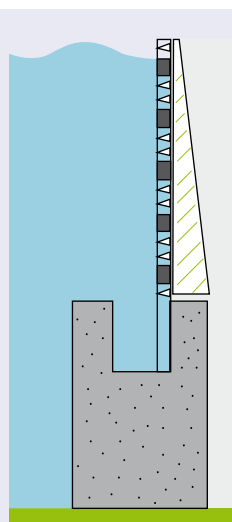


Système de protection à Andernach (Allemagne). Crédit : CEPRI.

De tels systèmes de protection temporaires s'ancrent sur des éléments permanents relativement discrets permettant leur fixation au moment adéquat.

Pour être efficaces, ces systèmes doivent être utilisés régulièrement, entretenus et stockés dans des conditions permettant leur bonne conservation et leur utilisation rapide. L'étanchéité des batardeaux étant la plupart du temps assurée par des joints en caoutchouc, leur état doit être fréquemment vérifié (éviter la rouille et la moisissure des joints).

L'aspect opérationnel est également important : le personnel chargé de monter ces dispositifs doit être formé et avoir pratiqué le montage et démontage des batardeaux pour limiter le temps d'installation. Il faut également s'assurer que le personnel connaissant ces procédures soit présent et disponible le jour où l'installation du dispositif se présentera.

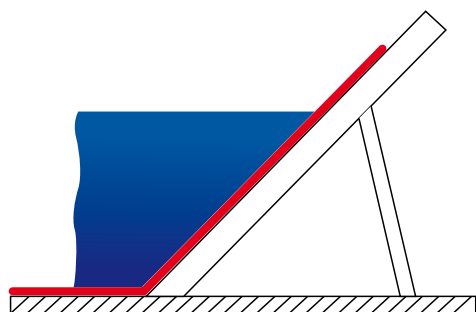


Exemple des structures pliantes

Ces dispositifs sont ancrés dans le sol de manière permanente et sont dépliés en cas d'inondation pour protéger une zone. Leur intérêt est d'être parfaitement intégré au paysage urbain hors période d'inondation et d'avoir besoin de très peu de matériel pour être installés, contrairement aux batardeaux. Par contre, ils doivent servir régulièrement pour vérifier l'efficacité du mécanisme.

Source : Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpech P., Axes J.-M. CSTB (2014).

- Les structures en forme de dièdres (non verticales)

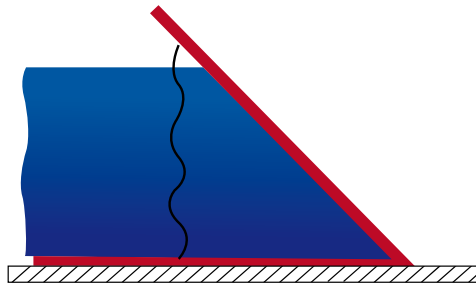


Source : Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpech P., Axes J.-M. CSTB (2014).

Ces systèmes de protection sont constitués de dièdres assemblés (formes géométriques issues de la rencontre entre deux plans). Une partie du mécanisme est en contact avec le sol, l'autre partie, qui sera en contact avec l'eau, vient s'appuyer dessus (cf. schéma ci-contre). La pression de l'eau pousse la structure sur le sol, ce qui suppose que ces systèmes soient installés sur des sols lisses.

L'avantage de ce système est qu'il ne nécessite pas une fixation permanente, ce qui permet de le démonter une fois l'inondation terminée. Ses performances sont cependant plus modestes qu'un système de mur vertical car sa hauteur dépasse rarement 1 m.

- Les barrières flexibles (sous pression de l'eau)



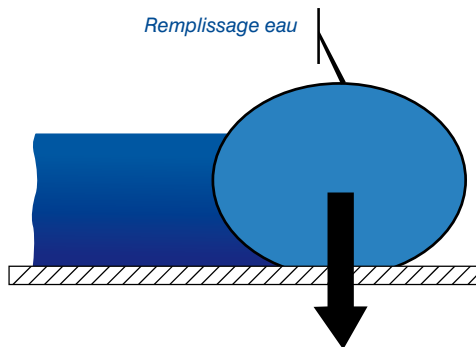
Source : Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpéch P., Axes J.-M. CSTB (2014).

Le principe de ces barrières est leur mise en place grâce à la force de l'eau, comme un parachute. Elles ne s'ouvrent qu'à partir du moment où l'eau arrive. Plus la hauteur de l'eau augmente, plus la barrière s'ouvre. Il est important d'avoir un système de poids permettant à la membrane en contact avec le sol d'adhérer correctement afin de garantir l'étanchéité et la stabilité du système. Les barrières peuvent être reliées entre elles afin d'obtenir la longueur souhaitée. La hauteur peut aller jusqu'à 2 m.

Exemple de barrière flexible

Les hauteurs d'eau peuvent être limitées, mais l'intérêt de ce dispositif est de favoriser le passage de véhicules pour la gestion de crise, par exemple, une fois installé. De même que les probabilités de vol du matériel sont limitées puisque le dispositif est installé au dernier moment et fait l'objet d'une surveillance pendant la durée de l'inondation.

- Les barrages poids



Source : Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpéch P., Axes J.-M. CSTB (2014).

Le principe consiste à remplir des volumes (tubes, réservoirs) de sable ou d'eau afin de réaliser une digue temporaire grâce au poids de ces volumes "lestés". Ces volumes peuvent être ajoutés les uns aux autres afin d'obtenir la longueur adéquate. La hauteur d'eau maximum est de 1 m et dépend du frottement sur le sol de ces volumes remplis.

Lorsqu'il s'agit de structures en forme de tube, généralement remplies d'eau, deux tubes adjacents peuvent être connectés pour éviter à l'ensemble de la digue ainsi constituée de rouler sur le sol.

Concernant les réservoirs, ceux-ci sont constitués d'une structure métallique et d'une enveloppe géotextile. Ils peuvent être remplis d'eau ou de sable

(2 m³). C'est le poids de l'ensemble qui assure la résistance mécanique à la pression de l'eau.

Exemple des réservoirs d'eau

Il s'agit de caissons généralement en bois, acier ou aluminium revêtus d'une toile en textile. Une fois leur installation effectuée, ils sont remplis de sable ou d'eau afin de constituer une "digue" étanche en cas d'inondation.

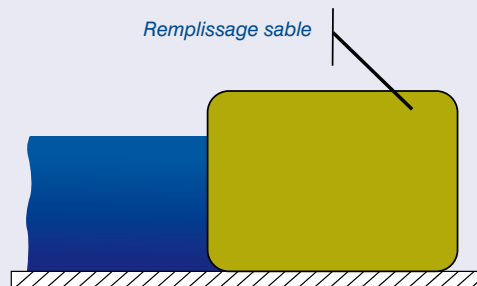
Ce sont des systèmes utiles pour des hauteurs d'eau allant jusqu'à un mètre uniquement. Leur utilisation n'est donc pas possible dans n'importe quels secteurs, ni pour n'importe quels aléas.

Par ailleurs, ils nécessitent une machinerie lourde pour leur enlèvement une fois l'inondation terminée. De plus, la toile utilisée pour le revêtement des caissons n'est pas biodégradable, ce qui représente un coût environnemental supplémentaire lorsqu'il s'agit de la changer (elle n'est pas réutilisable).

Exemple des barrages anti-inondation (gonflables)

Ce sont des éléments de protection temporaires mis en place au moment de la crise. Ces dispositifs sont modulables et polyvalents, utilisables pour des niveaux d'eau ne dépassant pas 2 m sur une longueur limitée. La mise en œuvre se fait par un gonflage préalable à l'air à l'aide d'un gonfleur thermique, en fonction des modèles.

Exemple des sacs de sable



Source : Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpéch P., Axes J.-M. CSTB (2014).

Les sacs de sable sont des dispositifs temporaires traditionnels qui, une fois empilés, permettent d'empêcher l'eau de s'écouler dans la zone que l'on souhaite protéger. Les sacs de sable, autrefois constitués de toile de jute, sont aujourd'hui principalement fabriqués en matière synthétique et peuvent contenir un volume moyen de 0,5 m³. Le matériau de remplissage le plus commun est le sable, mais en général, tous les matériaux peuvent être utilisés. Si les sacs de sable ne peuvent cependant garantir l'étanchéité, ils représentent une solution d'urgence pour pallier l'arrivée de l'eau et doivent être couplés avec l'installation de pompes en arrière du "mur de sacs" pour éviter les fuites trop importantes.

Ils ne peuvent cependant pas contenir une hauteur d'eau importante. Ils doivent être installés avec un certain savoir-faire pour être efficaces, ce qui n'est pas toujours le cas lorsque l'on fait appel à des bénévoles. Par ailleurs, leur déplacement après une inondation nécessite une logistique lourde et coûteuse.

- Les sacs absorbants

À la différence des sacs de sable, les sacs absorbants n'ont pas besoin d'être remplis avec du sable. Il s'agit de sacs en géotextile qui contiennent des polymères (macromolécules) ayant une très grande capacité d'absorption de l'eau. Ils peuvent être empilés afin de former une digue.

Ils peuvent néanmoins présenter certains inconvénients. Ils ne peuvent être utilisés que pour des inondations avec de faibles hauteurs d'eau et ne peuvent servir qu'une fois. Ils deviennent donc des déchets dont le recyclage n'est pas toujours possible en fonction des matériaux employés pour leur fabrication²⁰.

3. La mise en œuvre du principe

Sur le plan technique

Les différents concepts visant à inclure un système de protection dans l'aménagement urbain présentent des avantages techniques. La **super-digue** apporte une meilleure résistance de la digue, elle évite le phénomène de rupture brutale de celle-ci et ses impacts potentiellement dramatiques et dévastateurs pour les secteurs situés à l'arrière de l'ouvrage. Cela ne signifie pas pour autant que la zone située à l'arrière de la digue ne sera pas inondée. La digue peut toujours être surversée si la crue dépasse celle pour laquelle la digue a été dimensionnée. Par ailleurs, l'innovation réside moins dans le procédé technique (remblayer une zone située à l'arrière d'une digue) que dans le développement d'une synergie entre différentes fonctions (protection, habitation, emploi, services et espaces publics,...) et le fait

20 - Ashley R., Garvin S., Pasche E., Vassilopoulos A., Zevenbergen C.(2007).

d'avoir un espace d'une certaine qualité au regard des coûts de construction et de gestion de la super-digue. Cela peut représenter un défi pour certaines villes.

Un autre défi concerne les surfaces foncières importantes nécessaires (plusieurs centaines de mètres à l'arrière de la digue) et les volumes de terre conséquents pour rehausser le niveau du sol.

Enfin, une des difficultés majeures de ce type d'aménagement est la continuité de la super-digue. Il peut s'avérer extrêmement coûteux pour une ville d'une superficie importante de réaliser une super-digue tout le long du cours d'eau qui la traverse, ou le long du littoral. La ville de Tokyo a notamment été contrainte d'abandonner son projet initial de super-digues sur 58 km au regard des coûts trop importants générés par le projet. Par contre, ne construire des super-digues que sur certains secteurs urbains pose la question du risque répercuté ou non sur les quartiers voisins, ou situés en aval, et de son aggravation potentielle. Si la rupture de la digue peut être évitée sur les secteurs où une super-digue a été réalisée, elle existe potentiellement toujours pour les secteurs non aménagés en super-digue qui se trouvent à proximité et pour les secteurs situés à l'aval (le long d'un cours d'eau notamment). **Cet aménagement nécessite donc des études hydrauliques précises pour évaluer l'impact d'une super-digue sur les autres quartiers soumis au risque d'inondation.**

Concernant la **digue multifonctionnelle**, en termes de réduction de l'aléa, tout dépend si la digue est neuve ou si l'aménagement est réalisé à partir d'une digue existante. Si la digue existe déjà, cela n'aura pas d'impact sur l'aléa, contrairement à la construction d'un nouvel ouvrage. Ce type d'aménagement n'est pas nouveau et a déjà fait ses preuves dans de nombreux secteurs, notamment les zones d'estuaires et de deltas. Les maisons digues, les routes digue, les voies ferrées faisant parfois office de digues sont des ouvrages multifonctionnels. Ce procédé permet d'utiliser les espaces fonciers rares dans les grands centres urbains denses pour concilier à la fois densification urbaine et protection face au risque d'inondation. Les intérêts multiples générés par les différents usages de l'ouvrage peuvent contribuer à renforcer l'attention portée au bon entretien de la digue et donc sa pérennité. Cela nécessite cependant d'avoir une définition précise des niveaux pour lesquels la digue peut résister, être surversée ou rompre, ainsi qu'une bonne connaissance de l'aléa inondation sur le secteur concerné. Ce sont des procédés intégrés dans des projets essentiellement développés aux Pays-Bas aujourd'hui.

Les difficultés techniques peuvent résider dans les types d'infrastructures que l'on souhaite intégrer dans l'ouvrage de protection, ainsi que la nature de celui-ci. Par exemple, certains projets envisagent de construire des tunnels dans le corps de la digue pour abriter des voies de circulation pour les véhicules, des espaces verts étant aménagés sur la crête de la digue afin de valoriser l'ouvrage d'un point de vue paysager. **La capacité de résistance d'un tel ouvrage doit cependant être précisément évaluée.**

Enfin, **les dispositifs mobiles de protection** présentent un certain nombre d'inconvénients techniques. Leur installation peut prendre un certain temps, le délai d'alerte doit donc être suffisant pour pouvoir mettre en place les installations nécessaires. Ils sont prévus pour résister à des hauteurs d'eau spécifiques, généralement peu élevées au-delà desquelles ils ne servent plus à rien. Certains dispositifs ne sont donc pas adaptés pour des hauteurs d'eau importantes (sacs de sables, réservoirs d'eau/sable). Ils ne sont pas pertinents en cas de crue rapide et ne sont efficaces que pour des crues à montée lente. Paradoxalement, bien que ces systèmes empêchent l'eau de rentrer au sein d'un secteur urbain, leur étanchéité peut se révéler insuffisante dans certaines situations (exemple des inondations de longue durée où l'eau reste longtemps avant de se retirer). Il faut parfois prévoir des systèmes de

pompage autonomes pour vidanger l'eau qui aura tout de même pénétré à l'intérieur du secteur protégé.

Comme pour les digues non mobiles, des défaillances sont possibles et représentent un danger potentiel en cas de rupture brutale du dispositif. En outre, leur mise en place nécessite des moyens humains et matériels parfois conséquents. Par exemple, l'enlèvement des sacs de sable, des réservoirs ou des sacs absorbants une fois immergés nécessite une machinerie lourde. Leur installation requiert un certain savoir-faire qui peut vite se perdre lorsque le matériel n'est pas régulièrement testé ou utilisé en conditions réelles. Sa mise en œuvre suppose par ailleurs que le personnel formé et chargé de cette mission soit disponible à temps en cas d'alerte, ce qui n'est pas toujours le cas. Le stockage du matériel peut également poser problème s'il n'est pas connu du personnel chargé d'installer les dispositifs et s'il ne se trouve pas à proximité du lieu d'installation afin d'éviter la perte de temps liée au transport au moment de la mise en place.

Pour assurer leur mise en place effective, ces protections mobiles doivent être intégrées dans une organisation spécifique au moment de la gestion de crise. Ce qui suppose d'avoir testé ces dispositifs au préalable au cours d'exercices par exemple.

Sur le plan économique

La **super-digue** constitue un type d'aménagement très coûteux par rapport à une digue traditionnelle : démolition de bâtiments existants, acquisition éventuelle de terrains, transport de nombreux volumes de terres, constructions potentiellement adaptées au risque d'inondation (en cas de surverse de la digue). Cependant, le renforcement de la sécurité de l'ouvrage, grâce à son aménagement en super-digue, peut favoriser la conception d'une ville dense sur la super-digue et amortir les coûts. De même que les coûts d'entretien de la digue peuvent être compensés par les constructions réalisées sur la super-digue, et les activités qu'elle peut accueillir. Une analyse coûts/bénéfices semble néanmoins indispensable pour évaluer ces amortissements supposés.

Comme dans le cas de la super-digue, la **digue multifonctionnelle** doit faire l'objet d'une analyse coûts/bénéfices au cas par cas. La multifonctionnalité représente un avantage économique en tant que tel. Mais dans le cas d'un ouvrage de protection qui contiendrait plusieurs usages, il est nécessaire d'évaluer les coûts que représentent l'addition de fonctions (habitations, voiries enterrées par exemple) au moment de la construction de la digue multifonctionnelle ou en termes de renforcement et d'entretien permanent de l'ouvrage pour abriter ces fonctions.

Quant aux **dispositifs mobiles de protection**, les coûts de maintenance et de remplacement du matériel abîmé ou défectueux peuvent être non négligeables. Ces dispositifs doivent servir régulièrement pour que l'investissement soit rentable pour la collectivité. Les matériaux sont susceptibles de s'altérer au cours du temps s'ils ne sont pas utilisés. Ils semblent cependant moins onéreux que les dispositifs permanents de protection (coûts d'entretien, de travaux si besoin, de surveillance permanente de l'ouvrage, etc.). Une autre contrainte pour les dispositifs temporaires dont une partie peut demeurer de façon permanente est le vol des matériaux lors du stockage ou de l'installation (par exemple, les vis en inox protégeant des trous dans lesquels viennent se fixer les poteaux supportant les batardeaux en aluminium, voire les batardeaux eux-mêmes lorsqu'ils sont installés quelques jours avant la crue).

Sur le plan social

Les **dispositifs mobiles de protection** représentent une solution instinctive de gestion de l'inondation, perçue par la population comme une action permettant de faire face au

risque. Elle est donc perçue positivement au moment de la crise par la population. Toutefois, il s'agit d'un sentiment de protection et de sécurité limité à la capacité de résistance de ces dispositifs. La mise en place de mesures structurelles s'accompagne de mesures organisationnelles. La population doit en être informée.

A contrario, un aménagement récréatif sur une **digue multifonctionnelle** rend l'ouvrage moins visible aux yeux de la population. La fonction de protection de la digue semble effacée aux yeux des habitants. Or, cet ouvrage remplit bien une fonction de protection parmi les autres usages qui lui sont associés. Il paraît donc important de sensibiliser la population à la présence d'une digue multifonctionnelle en ville, car cela participe au développement d'une culture du risque sur un territoire.

Sur le plan juridique

Qu'il s'agisse de **super-digue** ou de **digue multifonctionnelle**, les difficultés soulevées résident à la fois dans la multiplicité des acteurs susceptibles d'intervenir (propriétaire de la digue, gestionnaire, promoteur, etc.), qui peut être réglée par la signature de conventions clairement établies entre les protagonistes, et à la fois dans la mise en œuvre de la réglementation actuelle relative à la gestion des digues. Il est parfois délicat d'identifier un responsable du bon entretien et de la surveillance de certains ouvrages. Une répartition claire des compétences entre les différents protagonistes intervenant sur la digue est donc nécessaire.

On peut également se poser la question des procédures administratives relativement complexes en cas d'acquisition amiable ou d'expropriation des habitations ou locaux construits derrière une digue, dans le but d'aménager celle-ci en super-digue. La ville de Tokyo avait envisagé, dans le cadre de son projet de super-digue, de reloger les habitants propriétaires d'habitations individuelles pendant la durée des travaux. Ils conservaient leur(s) titre(s) de propriété et leur hébergement temporaire était financé par les autorités publiques (mais le coût était trop important sur un linéaire de 58 km et le projet a dû être réduit).

Dans le cas des **dispositifs mobiles de protection**, ceux-ci permettent d'apporter une réponse à la question de la protection du patrimoine urbain vis-à-vis du risque d'inondation. Ils représentent une alternative intéressante à la digue "traditionnelle" afin de préserver de l'inondation certains sites au patrimoine remarquable dans les villes, sans pour autant dénaturer le paysage urbain existant (présence de la mer ou d'un cours d'eau à proximité) et entrer en contradiction avec la législation les protégeant. C'est le cas notamment des Zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP²¹), des immeubles inscrits ou classés au titre des monuments historiques, des secteurs sauvegardés.

Sur le plan paysager

La réalisation de **super-digues** le long d'un cours d'eau ou du littoral peut permettre de créer des espaces publics ayant une grande valeur paysagère. Surélevés par rapport à l'eau, ils offrent un point de vue sur le cours d'eau ou la mer qui peut être mis en valeur dans le cadre de la trame verte et bleue par exemple (développement d'espaces verts récréatifs, voies vertes, etc.). Cela rend notamment ces espaces très attractifs et constituent un atout d'un point de vue paysager.

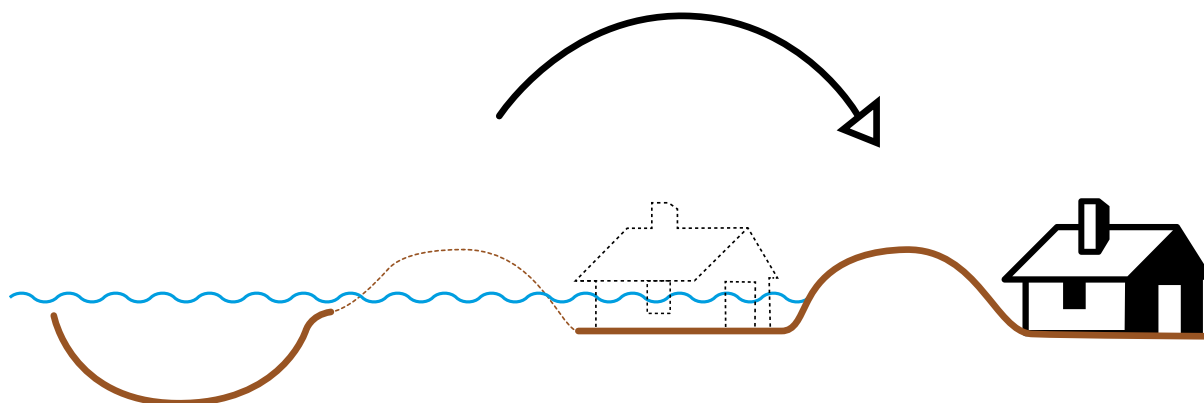
Les **digues multifonctionnelles** permettent également d'envisager une urbanisation spécifique au site choisi : aménagements récréatifs ou avec un paysage urbain nouveau (nouveaux types de constructions de part et d'autre de la digue), transformation de la ville en lien avec le fleuve ou la mer par exemple.

Les **dispositifs mobiles de protection** représentent une alternative adaptée dans les zones urbaines ayant un patrimoine historique important. Cela peut même être un choix

21 - Devenues Aires de mise en valeur de l'architecture et du patrimoine (AVAP) depuis l'entrée en vigueur de la LENE du 12 juillet 2010.

plébiscité par la population pour conserver une vue sur le cours d'eau ou la mer en période normale, contrairement à une digue permanente qui les priverait d'un tel paysage. À Andernach (Allemagne) par exemple, c'est ce qui a conditionné le choix d'un dispositif de protection mixte : un muret permanent sur lequel peuvent être montés des batardeaux en période de crue du Rhin. Les habitants ne voulaient pas d'une digue de plusieurs mètres de hauteur qui dénaturerait le paysage, en particulier pour les nombreux touristes séjournant dans la vallée du Rhin durant la période estivale.

2. DONNER OU REDONNER PLUS DE PLACE À L'EAU : PRINCIPE 2



Source : CEPRI.

1. Objectifs

Lorsqu'une rivière est en crue, elle se répand naturellement sur des espaces plus vastes que ceux qu'elle occupe ordinairement. Ces espaces inondables permettent un écoulement et un stockage temporaire de l'eau qui assure un écrêtement de la crue, c'est-à-dire une atténuation du phénomène. Ces espaces sont en règle générale d'autant plus efficaces sur la réduction de l'aléa qu'ils ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement de l'eau.

L'urbanisation en bord de cours d'eau ou le long des littoraux a souvent empiété sur des zones d'expansion naturelle de l'eau. Le plus souvent, les aménagements réalisés n'ont pas tenu compte du fait qu'ils se trouvaient dans le lit majeur d'un cours d'eau ou dans une zone potentiellement inondée par la mer. Certains aménagements font obstacle au passage de l'eau, aggravant ainsi le phénomène et donc les conséquences de l'inondation. Le premier objectif du principe d'aménagement "donner ou redonner plus de place à l'eau" consiste à minima à préserver les écoulements naturels de l'eau sur le secteur. Le but est de concilier la présence naturelle de l'eau dans ces secteurs avec les aménagements futurs.

Par ailleurs, les lits des cours d'eau et les littoraux ont souvent fait l'objet de travaux de recalibrage (canalisation), de redimensionnement ou de lutte contre la submersion (digues et barrages), limitant et modifiant ainsi la capacité d'expansion de l'eau. La couverture des rivières en milieu urbain par des voiries ou la canalisation des cours d'eau en ville, par exemple, constituent également des obstacles à l'écoulement naturel de l'eau. Le deuxième objectif de ce principe consiste à faciliter, parfois artificiellement, l'écoulement de l'eau afin de réduire l'aléa, en redonnant plus d'espace à l'eau. Il s'agit de modifier les ouvrages, voire de les démolir dans certains cas, afin de réduire les paramètres de l'inondation (hauteurs d'eau, vitesse d'écoulement notamment) sur un secteur concerné par un projet d'aménagement.

2. Types d'aménagements possibles

a) Les aménagements permettant de préserver les écoulements de l'eau, sans aggraver ni réduire l'aléa

La préservation des écoulements naturels de l'eau en zone de renouvellement urbain passe par deux voies possibles : laisser l'espace vierge de toute construction ou, au contraire, construire dans cette zone, en respectant le principe de la transparence hydraulique.

- L'aménagement sans construction de bâtiments

Dans les zones en renouvellement urbain situées en zone inondable, pour préserver l'expansion des crues en cas d'inondation lorsqu'il n'existe pas d'ouvrages de protection, on peut envisager la solution où aucun bâtiment n'est réalisé. La zone ne présente aucune construction faisant obstacle à l'eau en cas d'inondation et peut être intégrée dans le tissu urbanisé sous la forme d'un parc ou d'un espace récréatif par exemple, ne nécessitant pas ou très peu d'infrastructures. C'est généralement la réponse apportée dans les zones d'aléa fort ou très fort des Plans de prévention des risques naturels (PPRN).

Rappel sur les dispositions des Plans de prévention des risques naturels propres aux zones exposées aux risques d'inondation (France)

Ces plans ont pour but "de délimiter les zones exposées aux risques, en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru, d'y interdire tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles, notamment afin de ne pas aggraver le risque pour les vies humaines, pourraient y être autorisés, prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités [...]" (article L.562-1 du Code de l'environnement). D'après la circulaire du 24 avril 1996 relative aux dispositions applicables au bâti et ouvrages existants en zones inondables, il s'agit des zones inconstructibles, dans lesquelles il est possible de faire des travaux sur l'existant, mais pas de constructions neuves, de logements notamment. L'objectif est de maintenir la capacité d'écoulement et d'expansion des crues dans ces zones, en interdisant "dans les zones d'aléa le plus fort, toute augmentation d'emprise au sol des bâtiments (à l'exception de celles visant à la création des locaux à usage sanitaire, technique ou de loisirs indispensables) ainsi que les clôtures dont la conception constituerait un obstacle à la libre circulation des eaux".

Les extensions sont limitées en tenant compte de la situation locale et des adaptations peuvent être apportées :

- "dans les zones d'expansion des crues, pour tenir compte des usages directement liés aux terrains inondables ; c'est le cas des usages agricoles et de ceux directement liés à la voie d'eau lorsque ces activités ne peuvent s'exercer sur des terrains moins exposés ;

- dans les autres zones inondables, pour les centres urbains ; ceux-ci se caractérisent notamment par leur histoire, une occupation du sol de fait importante, une continuité bâtie et la mixité des usages entre logements, commerces et services".

La délimitation dans les PPRN de zones dites inconstructibles doit être gérée de manière "raisonnable", c'est-à-dire que "dans ces zones, les mesures d'interdiction ou de contrôle strict ne doivent pas [...] conduire à remettre en cause la possibilité pour leurs occupants actuels de mener une vie ou des activités normales, si elles sont compatibles avec les objectifs de sécurité recherchés". Ainsi peuvent être envisagées certaines infrastructures (desserte), des constructions nécessaires au maintien de certaines activités (agricoles, terrains de sport, loisirs liés à l'eau), des équipements portuaires, des écluses ²², etc. Par contre, dans les zones soumises à des risques d'inondation torrentielles, ces aménagements ne sont pas autorisés de même que les équipements susceptibles d'accueillir du public et les équipements touristiques (camping).

22 - Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Guide méthodologique des Plans de prévention des risques naturels (PPRN), Risques d'inondation, Paris, 1999.

Exemple de l'aménagement des berges de l'Isle à Périgueux (France)

Situé au cœur de l'agglomération entre Trélissac et Marsac-sur-l'Isle, cet aménagement des berges est venu prolonger une première voie verte de 2,2 km réalisée en 1995 le long de la rivière (l'Isle), la "voie des stades". Inaugurée en octobre 2006, ce projet de voie verte a tenu compte du Plan de prévention des risques de l'Isle approuvé en 2000, qui classait le secteur du projet en zone rouge inconstructible. Afin de rendre le bord de la rivière attractif pour la population permanente et saisonnière, l'agglomération a réalisé un parcours reliant l'agglomération de Périgueux d'est en ouest sur une emprise moyenne de 10 m et sur une distance de 15 km incluant la voie des stades. Il comprend divers aménagements prenant en compte le risque d'inondation : mobilier urbain en pierre reconstituée résistant à l'eau, haies et buissons implantés parallèlement au sens du courant, arbres espacés de 7 m minimum (éviter les embâcles), installations électriques des sanitaires surélevées par rapport à la crue centennale, piste cyclable située au niveau des prairies existantes pour favoriser l'évacuation de l'eau en cas de crue de l'Isle, dont le revêtement n'est pas du béton (problème des joints nécessaires incompatibles avec l'usage de rollers) mais un enrobé lisse. La voie est éclairée et les bornes sont conçues pour être immergées. Des passerelles transparentes d'un point de vue hydraulique ont également été implantées parallèlement au sens du courant avec des garde-corps ajourés pour éviter l'accumulation de branches en cas de crue.



Réalisation d'une passerelle pour piétons et cyclistes le long des berges de la rivière Isle à Périgueux. Crédit : Denis Nidos.



Voie verte. Crédit : Denis Nidos.

Cet aménagement tient compte de l'expansion des crues de l'Isle en laissant de l'espace à l'eau, tout en s'inscrivant au cœur d'une agglomération. Il constitue un véritable atout pour la ville d'un point de vue paysager, des transports (piste cyclable reliant l'agglomération d'est en ouest) et de l'attractivité de la ville d'un point de vue touristique.

**Sources : Certu, Prise en compte des risques naturels, 10 monographies, 2012 ;
Communauté d'agglomération Le Grand Périgueux.**

Exemple de l'aménagement des quais en rive gauche à Bordeaux (France)

La ville de Bordeaux est soumise à un risque d'inondation fluvio-maritime lié à la présence de la Garonne et de son estuaire où se rejoignent Dordogne et Garonne. L'influence de la mer prédomine ; les grandes crues de la Garonne ont surtout eu des conséquences importantes à cause des paramètres maritimes défavorables (fort coefficient de marée, surcote maritime, dépression, vent). Par exemple, la tempête de 1999, qui était un événement maritime, a provoqué l'élévation du niveau de la Garonne le plus important sur la période 1879-2003.

La ville est attractive et présente de forts enjeux en termes de pression foncière. Elle est protégée par des digues sur certains secteurs (rive droite) et des quais (rive gauche). À l'origine du projet d'aménagement des quais de la ville en rive gauche de la Garonne, prévaut l'idée de renouer avec un passé centré sur le fleuve. En effet, avant la Seconde Guerre mondiale, Bordeaux était le 4^e port de France et a prospéré grâce au commerce fluvial. L'objectif est donc d'assurer une certaine continuité avec le passé portuaire de Bordeaux et de renforcer l'interface entre le fleuve et le centre-ville.



Le miroir d'eau sur les quais à Bordeaux.
Crédit : Bordeaux Métropole.



Les quais de la rive gauche de la Garonne à Bordeaux.
Crédit : Bordeaux Métropole.

Le projet a débuté en 1999 et s'est achevé en mai 2009, pour un montant de 110 millions d'euros (TTC, hors maîtrise d'œuvre). Il concerne un secteur situé dans une zone urbaine dense proche du centre-ville, le long du méandre de la Garonne. D'une superficie d'environ 36 ha, le secteur des quais a été aménagé en cinq parties :

- quai Sainte-Croix/cours Alsace-Lorraine : parc avec des espaces de jeux, des allées bordées d'arbres, des équipements sportifs légers (terrains de basket, volley, patinoire), de loisirs (kiosque à musique) ;

- cours Alsace-Lorraine/quinconces : au niveau de la place de la Bourse, le lien entre l'eau et la ville a été symbolisé par une fontaine conçue comme une place inondable en face du palais Jacques Gabriel. Son fonctionnement est à l'image des marées. L'eau est stockée dans un grand bassin de 800 m³ sous une dalle en granit, puis réinjectée jusqu'à ce que la surface du bassin se recouvre d'une couche de 2 cm d'eau. Les vannes sont alors fermées pour une durée d'une demi-heure environ afin que l'eau donne l'effet d'un miroir. Des jets d'eau sont situés de part et d'autre du bassin, permettant un rafraîchissement l'été. Des jardins ornés de plantes aquatiques, des platebandes avec des plantes fauchées régulièrement agrémentent cette partie des quais. Un ponton flottant au bord de l'eau pour l'amarrage des bateaux procure également une vue différente sur le fleuve pour les promeneurs ;

- quinconces/cours Xavier Arnoz : pelouses d'agrément en pente douce permettant un usage récréatif, de détente, au bord du fleuve. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fleuve, on trouve des espaces piétonniers, le boulevard routier, le tram ;

- cours Xavier Arnozan/cours du Médoc : espace de convivialité avec des infrastructures de loisirs (marché, roller-park, guinguettes, jeux d'enfants) et des massifs de végétation et de nombreux arbres. Côté fleuve, le long de la promenade sur berges, un muret bas a été aménagé pour servir de banc aux promeneurs (le circuit de promenade le long des quais mesure 10 m de large) ;
- cours du Médoc/bassin à flots : quelques hangars ont été conservés et réhabilités pour abriter des activités culturelles, des activités commerciales (jardineries, activités vitivinicoles) et des activités tertiaires à l'exemple de l'installation du siège social de C Discount.

Le projet a nécessité la destruction d'une grande partie des hangars et du port afin de dégager la vue sur les bâtiments du XVIII^e siècle classés monuments historiques pour la plupart. Il répond à une demande sociale forte en termes de qualité de vie et valorise l'espace ainsi mis à disposition de la population. Les aménagements réalisés sont compatibles avec une inondation temporaire (en cas de crue exceptionnelle supérieure à la centennale). L'eau devient ainsi un atout pour la ville et le "vide" de ces espaces, qui met en valeur les monuments, tient également une place particulière.

Source : Certu, *Prise en compte des risques naturels, 10 monographies, 2012 ; la Communauté urbaine de Bordeaux (la Cub).*

- L'aménagement avec construction de bâtiments respectant le principe de la transparence hydraulique

Au sein de certaines villes, les zones urbanisées inondables faisant l'objet d'un projet de renouvellement urbain sont la plupart du temps destinées à accueillir de nouvelles constructions pour garantir une offre de logements et/ou de services. Dans ce cas, garantir l'espace pour l'eau en cas d'inondation consiste à concevoir des aménagements qui soient parfaitement transparents d'un point de vue hydraulique. Cela peut se caractériser par des méthodes constructives telles que la conception de structures inondées volontairement (parkings), la compensation des déblais et remblais réalisés, etc.

Le principe de la transparence hydraulique (France)

La notion de transparence hydraulique se rapporte au premier objectif du principe "donner ou redonner plus de place à l'eau". Il est issu de la loi sur l'eau de 1992, complétée par un arsenal réglementaire d'où est notamment issue une nomenclature permettant de soumettre à diverses procédures (déclaration ou autorisation) l'installation d'ouvrages, installations ou travaux ayant une incidence sur l'écoulement de l'eau.

Article 4 de l'arrêté du 27 juillet 2006 :

"[...] La transparence hydraulique est demandée afin de **ne pas réduire les capacités naturelles d'expansion des crues dans le lit majeur, de ne pas aggraver les conséquences des inondations et de ne pas constituer de danger pour la sécurité publique** en cas de crue.

Les installations, ouvrages ou remblais doivent être conçus ou implantés de façon à **réduire au maximum la perte de capacité de stockage des eaux de crue, l'augmentation du débit à l'aval de leur implantation, la surélévation de la ligne d'eau ou l'augmentation de l'emprise des zones inondables à l'amont de leur implantation.**

Afin qu'ils ne constituent pas de danger pour la sécurité publique, ils ne doivent **en aucun cas engendrer une surélévation de la ligne d'eau en amont de leur implantation** susceptible d'entraîner leur rupture. Ils ne devront ni faire office de barrage ni de digue, sauf à être conçus, entretenus et surveillés comme tels. [...]."

Dans le cadre de projets d'aménagement situés en zone inondable, lorsque des remblais sont envisagés, ils doivent faire l'objet d'une autorisation au titre de la loi sur l'eau. Lors de l'instruction par les services de l'État, il est souvent proposé au maître de l'ouvrage d'inclure des mesures compensatoires visant à limiter ou supprimer les impacts de ces remblais sur l'écoulement de l'eau. En fonction de leurs caractéristiques, les remblais peuvent jouer un rôle non négligeable sur la capacité d'expansion des crues d'un cours d'eau et ne répondent plus au principe de transparence hydraulique définie dans l'arrêté du 27 juillet 2006.

Exemple du quartier Matra à Romorantin-Lanthenay (France)



Immeubles d'habitat collectif dans le quartier Matra.
Crédit : Éric Daniel-Lacombe, architecte.

Pour des projets d'aménagement dans des zones inondables urbanisées, comme c'est le cas à Romorantin-Lanthenay, les autorisations de remblaiement pour une opération de renouvellement urbain en centre-ville peuvent être délivrées avec des mesures compensatoires afin de préserver le principe de transparence hydraulique. Ce dernier ne concerne pas seulement le fait de ne pas augmenter la hauteur d'eau dans la zone, mais également le fait de ne pas réduire la surface d'expansion ou la capacité de stockage des crues.

Les mesures compensatoires ont pour but de faire en sorte que le volume total compensé corresponde à l'ensemble ou à une partie du volume soustrait à la zone d'expansion de crue, soit en "volume" (compenser m^3 par m^3 , les volumes d'eau ôtés à la zone d'expansion de crue), ou bien "cote pour cote" (un déblai est positionné à la même altitude que le remblai, de façon à ce que la compensation soit progressive et également répartie en fonction de l'occurrence de l'évènement).

Dans le projet de Romorantin-Lanthenay, un exemple de compensation correspond aux parkings situés au rez-de-chaussée des immeubles d'habitat collectif, qui ont été conçus pour être inondés en cas de crue centennale, afin de ne pas représenter un obstacle à l'écoulement de l'eau.



Crédit : Éric Daniel-Lacombe, architecte.
Source : Éric Daniel-Lacombe.

b) Les aménagements permettant de donner plus de place à l'eau en réduisant l'aléa

Cet objectif suppose qu'il existe des obstacles à l'écoulement de l'eau qui seront : soit relocalisés pour redonner plus d'espace à l'eau, soit détruits et remplacés par de nouveaux aménagements ne faisant plus obstacle à l'eau. Ce type d'aménagement permet une atténuation du phénomène d'inondation.

- La relocalisation d'ouvrages faisant obstacle à l'eau

Le premier type d'aménagement permettant de redonner plus d'espace à l'eau peut être la relocalisation des ouvrages qui représentent un obstacle à l'expansion de la mer ou des crues dans le lit majeur d'un cours d'eau. Un exemple est le recul des systèmes d'endiguement. Celui-ci permet de laisser plus de place à l'eau, qu'il s'agisse d'un cours d'eau ou de la mer.

Exemple de réalisation d'un canal de décharge grâce au recul des digues : le projet d'aménagement hydraulique à Nimègue en rive droite de la rivière Waal, delta du Rhin (Pays-Bas)

Dans le cadre du programme néerlandais "Room for the River" ("Ruimte voor de rivier"), le ministère de l'Infrastructure et de l'Environnement des Pays-Bas et la ville de Nimègue ont envisagé de remodeler le territoire pour prévenir le risque d'inondation lié aux crues de la Waal. En raison du développement historique de la ville, le lit de la rivière à proximité de Nimègue a été réduit à une largeur de 450 m, alors qu'il mesure 1 000 m de large en amont et en aval, créant ainsi un goulot d'étranglement et augmentant le risque de rupture de digue et d'inondation. Le but du projet est d'agrandir la capacité de décharge de la rivière et de lui donner plus d'espace. Dans cette optique, deux types d'aménagements seront réalisés :

- la relocalisation d'une digue : actuellement, la digue située en rive droite de la rivière protège le village de Lent (village faisant partie de la commune de Nimègue, situé en rive droite de la Waal). La digue va être déplacée de 350 m à l'intérieur des terres pour créer une capacité de décharge de la rivière plus importante. Cela a pour conséquence d'organiser le déplacement de 50 foyers, quelques fermes et commerces (expropriations) ;

- la création d'un canal : un nouveau canal va être créé simultanément pour permettre à l'eau de s'écouler toute l'année. Le creusement de la berge fera émerger une île entre le lit principal de la Waal et le canal, qui sera vouée à des usages récréatifs mais aussi urbains.



1. Localisation d'origine de la digue (en vert) protégeant le village de Lent.



2. Un tronçon de la digue est relocalisé à l'arrière des terres.



3. Création du bras de décharge de la rivière et des îles allongées au centre de la rivière.



4. Construction des ponts franchissant la rivière et se raccordant aux nouvelles îles.

Étapes du projet d'aménagement. Crédit : ville de Nijmègue.

Une fois le projet réalisé, la hauteur d'eau dans le lit principal de la Waal devrait être réduite de 35 cm en cas d'évènement majeur. Le second objectif du projet était d'améliorer la qualité des espaces et l'environnement. Par conséquent, et pour compenser les inconvénients liés à cette intervention drastique, deux nouveaux ponts seront construits pour relier les deux parties de la ville avec l'île (le centre de Nijmègue et le village de Lent). Cela a contribué à l'acceptation politique du projet.

Une partie du projet consiste également à intégrer au sein de cet ensemble urbain le nouveau quartier résidentiel déjà conçu sur la rive nord, qui inclut la construction d'un "front de fleuve" attractif. L'île créée constitue une jonction entre les deux rives, un point de rencontre récréatif pour les habitants des deux parties de la ville.



Avant la création du canal de décharge. Crédit : ville de Nijmègue.



Après la création du canal de décharge. Crédit : ville de Nijmègue.

Source : ville de Nijmègue, www.nijmegen.nl/ruimtevoordewaal

- La suppression des ouvrages faisant obstacle à l'eau

Un autre type d'aménagement destiné à redonner plus de place à l'eau en ville peut consister à détruire les ouvrages existants et les remplacer par de nouveaux procédés compatibles avec cet objectif. Plusieurs exemples existent : création de canaux secondaires, destruction d'infrastructures urbaines, décaissement des berges, etc.

Exemple de réalisation d'un canal de décharge et le nivellement des berges : le projet d'aménagement des berges de la rivière Maine à Angers, par l'équipe Grether (France)

Le projet tel qu'il figure dans ce rapport a été établi en 2012-2013 par l'équipe Grether-Phytolab. Aujourd'hui, cette même équipe travaille à un projet revu dans ses fondements et dans son périmètre et qui tient compte de nouvelles orientations municipales avec notamment la conservation à terme de la voie départementale qui longe les berges rive gauche. Les dispositions envisagées sont en cours de révision.

Sur un espace de 320 ha le long de la Maine, la ville d'Angers souhaitait développer un programme d'aménagement sur le long terme (d'ici 30 ans) qui permette de répondre à trois objectifs : requalifier la voie rapide, développer le quartier Saint-Serge, valoriser la trame verte et bleue entre la confluence et les basses vallées angevines. L'équipe Grether, qui a été retenue à la suite d'un concours lancé par la ville, a proposé dans son projet, de recréer un lien entre les deux rives pour permettre aux habitants de se réapproprier la rivière. Pour répondre aux objectifs concernant le quartier Saint-Serge et la trame verte et bleue, les architectes ont imaginé la création d'un bras de rivière, creusé au niveau du quartier Saint-Serge ce qui représente environ 300 000 m³ de terre.



Projet 2013, création d'un bras de rivière.
Crédit : ateliers Grether.

Pour laisser plus de place à la rivière, il a également été envisagé de supprimer la voie rapide actuelle protégée par une digue et d'aménager les berges différemment : les bords de Maine à proximité du centre-ville seraient aménagés en "quais" situés à différents niveaux (terrasses), sous la forme de "plissés" sur une longueur d'environ 3 km.



Le projet de quais (2013). Crédit : ateliers Grether.

Les parapets actuels jouant le rôle de digues, la transformation de la voie rapide en quais de différents niveaux permettrait à l'eau de la Maine de s'étendre et aux habitants de continuer à se promener le long des berges, en fonction de la hauteur de l'eau atteinte en cas de crue. Le niveau des quais le plus élevé correspond à celui des Plus hautes eaux connues (PHEC).

En ce qui concerne le quartier Saint-Serge situé au nord de l'agglomération et sur lequel sont implantées de nombreuses entreprises, il est prévu d'y construire des habitations situées au-dessus des PHEC et de surélever les principales voies d'accès à ce quartier (de 0,5 m) pour permettre une circulation des populations en cas de crue centennale de la Maine.

Source : ateliers Grether, architectes.

D'autres types d'aménagements peuvent être réalisés, comme la destruction d'ouvrages suivie d'une transformation de l'espace urbain pour "accueillir" davantage l'eau en ville. Parmi les projets réalisés, on peut citer les exemples de la rivière Cheonggyecheon, un affluent du fleuve Han, à Séoul (Corée du Sud), et celui de la rivière Saw Mill à Yonkers (USA). Il existe des exemples de projets de réouverture ou remise à ciel ouvert de rivières aujourd'hui "busées" en France, comme la Verse (Oise), la Bièvre (Val-de-Marne), la Sambre (Nord), l'Yzeron (Rhône).



Exemple de remise à ciel ouvert d'un cours d'eau en milieu urbain. Source : © Graphies - Onema.

La démolition d'ouvrages urbains pour redonner de l'espace à la rivière en ville : l'exemple de la rivière Cheonggyecheon, à Séoul (Corée du Sud)

Après la guerre de Corée, la ville de Séoul s'étant modernisée et la rivière Cheonggyecheon posant des problèmes de salubrité, celle-ci fut recouverte par une voie rapide en 1968. Au bout de plusieurs années, et en raison d'un trafic routier important, la structure de la voie devint défaillante. En 2002, les travaux d'entretien et de remise en état s'avérant extrêmement coûteux, la municipalité de Séoul décida de réhabiliter la rivière en détruisant la voie rapide. Débute un vaste projet de renouvellement urbain autour de la rivière, de nouveau à l'air libre, consistant à créer un quartier d'affaires centré sur les nouvelles technologies de l'information, les affaires internationales et l'économie numérique, autour d'un espace récréatif d'environ 6 km le long de la rivière en plein cœur d'une ville de plus de 10 millions d'habitants. Les travaux furent achevés rapidement et le secteur fut ouvert au public en 2005. La réhabilitation de la rivière est conçue pour faire face à des événements rares (période de retour de 200 ans).



Avant destruction de la voie (2001).
Crédit : Seoul Metropolitan Government.



Après destruction de la voie express Cheonggyecheon (2005) et réhabilitation de la rivière. Crédit : Victor Said (IAU Ile-de-France).

Dès sa présentation par la municipalité en 2003, le projet a suscité de vives réactions. Sur le plan économique : le projet a été estimé à environ 260 millions d'euros, a eu un impact non négligeable sur de nombreux petits commerces existant le long de la voie rapide qui ont disparu avec la réhabilitation de la rivière. D'un point de vue social, le trafic a considérablement augmenté sur l'autoroute entourant la ville. Et concernant les aspects environnementaux, afin de permettre à la rivière Cheonggyecheon de s'écouler continuellement à Séoul, l'alimentation en eau de la rivière s'effectue par pompage dans d'autres cours d'eau, dont le fleuve Han, ce qui a suscité de vives controverses.

Source : Lecroart P., Séoul, Cheonggyecheon Expressway, in *La ville après l'autoroute : études de cas*, Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France (IAU IdF), Paris, août 2013 ; Young Soogil Dr., *Korea's Green Growth Projctcs: case studies*, disponible sur : www.un.org/en/ga/second/65/docs/syoung.pdf

Ce type d'aménagement consiste à réserver une partie de l'espace urbain à la rivière, en tenant compte des risques d'inondation associés. Les opérations de déconstruction d'ouvrages urbains, de type voiries, au sein des villes sont de plus en plus plébiscitées, même si elles peuvent se révéler coûteuses d'un point de vue financier et politique. Les travaux nécessaires à la démolition puis réaménagement du lit et des berges de la rivière nécessitent un financement conséquent, ce qui suppose la participation d'acteurs publics et parfois privés. Or, quels que soient les financeurs de tels projets, le programme d'aménagement qui est associé à ce type de transformation de l'espace urbain doit pouvoir apporter une compensation certaine par rapport au montant des travaux nécessaires. Cela peut se concrétiser par la réalisation de logements, d'activités commerciales, d'espaces publics, dans un espace toutefois contraint, puisque le principe consiste à consacrer une part importante de ce secteur au cours d'eau.

La démolition d'ouvrages urbains pour redonner de l'espace à la rivière en ville : l'exemple de la rivière Saw Mill, à Yonkers (USA)

La ville de Yonkers, située dans l'État de New York (au nord de la ville de New York), s'est lancée dans un projet de revalorisation de sa rivière qui a duré une dizaine d'années. La rivière Saw Mill est un affluent de l'Hudson et se jette dans ce fleuve à Yonkers.

L'une des dernières sections de la rivière remise à ciel ouvert dans le centre-ville de Yonkers, le quartier Larkin Plaza, avait été recouverte par une canalisation dans les années 1920 pour des questions d'hygiène et de prévention des inondations. La rivière continuait de s'écouler de manière souterraine et demeurait donc invisible pour la population.

Au début des années 1990, une étude fédérale a révélé qu'il était possible de remettre la rivière à ciel ouvert à Larkin Plaza. L'organisation à but non lucratif Groundwork Hudson Valley a été créée en 2000, avec notamment ce projet de "réouverture" de la rivière, parmi d'autres actions. Elle a commencé à organiser des réunions avec les habitants pour recueillir leurs idées. Elle a été rejointe par un autre organisme, Scenic Hudson, qui a contribué à promouvoir le projet, ainsi que par l'État (gouverneur) qui a également apporté son soutien financier. Une enveloppe de 3,1 milliards de dollars avait été promise pour un réaménagement privé, visant à inclure la réouverture d'une autre section de la rivière. Mais cela fut abandonné en raison du ralentissement de l'économie. La ville, désireuse de stimuler le redéveloppement de l'économie nécessaire à Yonkers, décida d'aller de l'avant avec un projet à 19 millions de dollars à Larkin Plaza. La destruction de la canalisation se déroula en décembre 2010 et le parc ouvrit en septembre 2012.



La rivière Saw Mill après sa remise à ciel ouvert à Larkin Plaza, Yonkers. Crédit : Groundwork Hudson Valley.

Outre l'objectif de valorisation du potentiel écologique de la rivière (protéger les espèces de poissons existantes et sensibiliser le public, favoriser le développement de la ripisylve et améliorer la qualité de l'eau), le but de ce projet est de redynamiser la ville, de lui redonner une image positive grâce à la présence de la rivière. Yonkers ne figure pas parmi les banlieues aisées de New York et était autrefois une ville industrielle, peu attractive en termes d'emplois. Les dirigeants de la ville se sont donc lancés dans un défi de taille : reconquérir de l'espace pour la rivière en plein cœur de la ville afin de transformer le centre-ville en pôle attractif avec des commerces, des logements et des espaces de promenade le long de la rivière. Cette modification du paysage urbain devrait permettre d'attirer de nouveaux habitants et de contribuer ainsi à une relance de l'économie locale. La ville de Yonkers soutient pleinement ce projet de remise à ciel ouvert de la rivière, d'autant plus qu'elle améliore la situation économique de la ville ainsi que son environnement. La remise à ciel ouvert de nouvelles sections de la rivière se poursuit, avec notamment de nouvelles phases de chantier dont l'une a commencé en mars 2014 et une autre en octobre 2014.

Sources : Groundwork Hudson Valley ; www.sawmillrivercoalition.org ; www.yonkersny.gov

3. La mise en œuvre du principe

Sur le plan technique

Quel que soit l'aménagement retenu sur un secteur inondable, concilier les écoulements présents sur le secteur avec les aménagements prévus ou réduire l'aléa, il est bénéfique pour un projet de laisser au maximum de la place à l'eau.

Dans le cas des **aménagements conservant les écoulements** sur la zone du projet, laisser de la place à l'eau vise à limiter les obstacles à l'écoulement, ce qui permet, outre la non-aggravation du phénomène, de réduire le charriage d'objets au moment de l'inondation, et donc les dommages potentiels.

Les **aménagements destinés à réduire l'aléa**, comme la création d'un bras de décharge, d'un agrandissement du lit mineur ou la destruction d'ouvrages urbains (canalisations souterraines par exemple), permettent d'atténuer l'intensité d'une inondation pour une fréquence donnée (diminution de la hauteur et de la vitesse de l'eau). Ces aménagements augmentent la capacité d'écoulement et peuvent aussi contribuer à rendre l'évacuation de l'eau plus rapide sur la zone.

Toutefois, dans le cas d'un cours d'eau, les impacts hydrauliques potentiels sur l'amont et l'aval nécessitent une étude d'impact approfondie au préalable.

Sur le plan économique

Dans la plupart des cas, aménager une ancienne friche industrielle dans des secteurs en renouvellement urbain sous la forme d'un espace récréatif peut s'avérer coûteux, notamment au regard de la dépollution du site.

Pour autant, la valorisation récréative de ces espaces donnant plus de place à l'eau (réduction de l'aléa, substitution de nouveaux aménagements aux ouvrages faisant obstacle à l'eau) peut aussi permettre à une économie spécifique de se développer : des petits commerces de loisirs, de restauration, etc. Une économie touristique peut également voir le jour. Dans l'exemple de Yonkers (USA), la remise à ciel ouvert de la rivière a servi de catalyseur pour redynamiser le centre-ville et constitue aujourd'hui un pôle économique attractif au cœur de la ville.

Sur le plan social

Qu'il s'agisse d'aménagements permettant de donner plus de place à l'eau en réduisant l'aléa ou non, la conception d'espaces récréatifs dans les zones en renouvellement urbain (parcs, base de loisirs, parcours de promenade le long du cours d'eau comme à Séoul) permet de créer des espaces publics multifonctionnels vecteurs de lien social. La demande des habitants en faveur d'espaces urbains procurant une qualité de vie élevée est forte aujourd'hui. L'aménagement d'espaces situés en bord de cours d'eau qui ne peuvent être urbanisés pour créer de l'habitat doit donc être réfléchi pour répondre à cette demande. Ce sont bien souvent des zones attractives, situées en centre-ville dans des zones urbaines denses, qui peuvent aussi renforcer l'image de marque d'une ville et son attractivité. La prise en compte du risque dans ces zones peut représenter un atout pour le développement d'espaces publics particuliers. Les habitants se réapproprient la rivière, ce qui peut également contribuer à renforcer la culture du risque localement.

Cela peut néanmoins poser des difficultés en termes de foncier disponible et donner lieu à des procédures compliquées à gérer d'un point de vue social, notamment lorsqu'il est décidé de remplacer des espaces construits par des espaces récréatifs (acquisitions amiables, expropriations). Dans le cas de la création d'un canal secondaire, gagner de l'espace pour l'eau sur la ville peut signifier détruire des bâtiments ou infrastructures et poser d'autres questionnements (Comment reloger les habitants ? Faut-il reconstruire ailleurs ?). Dans ce cas, d'autres inconvénients tels que les problèmes de sécurité publique liés à la procédure d'expropriation peuvent apparaître (avant la phase de démolition, squats possibles et insécurité pour les habitants qui ne sont pas encore partis).

Sur le plan politique

Il peut être compliqué pour un élu de justifier sa décision d'inonder volontairement des sites pour pouvoir redonner plus de place à la rivière. Cela paraît d'autant plus difficile si des acquisitions amiables voire des expropriations sont envisagées. Cela nécessite une volonté politique forte et pérenne, car cela signifie aussi n'envisager aucune construction sur ces zones souvent très prisées d'acquéreurs potentiels.

En cas de substitution de nouveaux aménagements aux ouvrages faisant obstacle à l'eau (remise à ciel ouvert de rivière par exemple), la décision n'est pas neutre et demande un engagement fort des élus d'une ville pour assumer un tel projet. Il est cependant déterminant pour afficher un changement de cap en faveur d'un développement plus durable des villes, ce qui peut représenter une plus-value politique, comme ce fut le cas pour le maire de Séoul. Les échos médiatiques de la réouverture de la rivière Cheonggyecheon ont joué un rôle essentiel dans l'élection de M. Mung-Bak Lee à la mairie de Séoul en 2002 et lors de sa victoire à l'élection présidentielle de 2006.

Sur le plan juridique

La création d'un canal secondaire et la remise à ciel ouvert de rivière dans les centres urbains denses représentent une occasion intéressante de répondre à la législation actuelle découlant des lois Grenelle (trames verte et bleue) et plus généralement des principes du développement durable des villes. Cela procure également des gains écologiques contribuant à améliorer la qualité de vie des habitants (développement de la biodiversité floristique et faunistique).

Cependant, cela représente aussi des procédures lourdes d'un point de vue administratif : éventuels achats, acquisitions amiables des terrains voire expropriations, dépollutions des sols, etc. Dans l'exemple de Séoul, la destruction de l'ancienne voie rapide a permis de

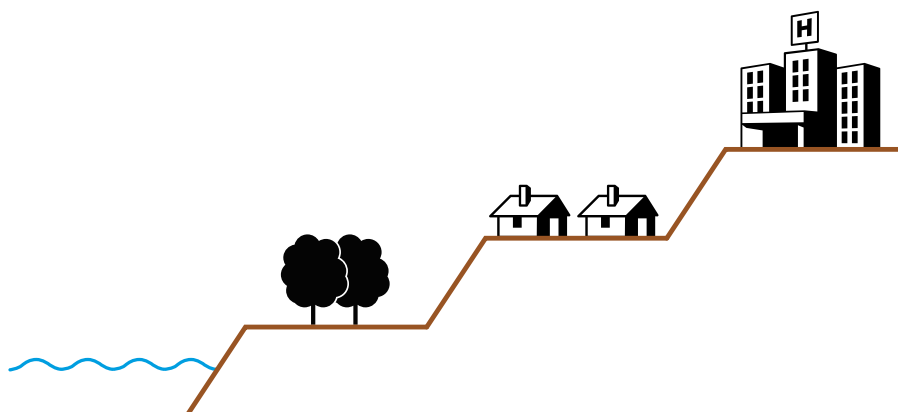
réduire l'usage de la voiture en ville. Les habitants se sont reportés sur le métro et ont modifié leurs habitudes de déplacement, ce qui a eu pour conséquence de diminuer la pollution en ville, en allant dans le sens d'une réduction des émissions de gaz à effets de serre. Cela a également eu pour effet de diminuer les nuisances sonores générées par la voie express et a permis de développer des usages compatibles avec ce nouveau cadre de vie (logements, quartiers d'affaires).

Sur le plan paysager

Les différents types d'aménagement permettent de laisser libre court à l'inventivité des paysagistes afin de transformer les zones urbaines. Ils s'inscrivent pleinement dans le courant actuel visant à davantage intégrer la nature en ville, à "vivre avec l'eau", à travers des configurations rappelant la présence de l'eau en ville (via une végétation adaptée au caractère inondable des lieux, etc.). Le développement d'un espace récréatif et paysager peut s'intégrer au sein d'un espace urbain densifié, en offrant une "respiration" en plein cœur de ville. Par exemple, la création d'un canal secondaire constitue un aménagement séduisant du point de vue paysager, qui transforme de manière assez radicale le paysage urbain d'une ville.

La conception paysagère peut jouer un rôle fondamental pour contribuer à faire accepter la présence du risque d'inondation en ville. En valorisant la présence de l'eau en ville lors d'une remise à ciel ouvert d'un cours d'eau par exemple, les aménagements paysagers peuvent même avoir des répercussions sur la culture du risque. L'eau est présente et rappelle à la population qu'elle pourra envahir davantage l'espace urbain en cas d'inondation.

3. LOCALISER LES ACTIVITÉS ET LES INFRASTRUCTURES URBAINES : PRINCIPE 3



Source : CEPRI.

1. Objectifs

Ce principe vise à définir le lieu d'implantation d'une infrastructure ou d'une activité en fonction de la vulnérabilité qu'elle génère pour le territoire en cas d'inondation.

Les infrastructures et activités existant au sein d'une ville sont diverses : logements, commerces, industries, infrastructures de transports, établissements de santé, bureaux de police, écoles, stations d'épuration, etc. Elles peuvent présenter des degrés de vulnérabilité différents par rapport au risque d'inondation, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas toutes la même propension à subir des dommages, ni les mêmes difficultés à surmonter en cas d'inondation.

Par ailleurs, elles ne sont pas toutes d'importance équivalente pour le fonctionnement du territoire. Certains équipements publics comme les infrastructures de transports, les réseaux d'électricité, d'eau potable ou d'assainissement par exemple sont indispensables au fonctionnement de la ville en période normale et certains le sont également en cas d'inondation. On peut penser également aux établissements de santé tels que les hôpitaux qui nécessitent de pouvoir fonctionner de manière permanente, en période normale comme lors d'une inondation. Ces établissements, tout comme les postes de police, les casernes de pompiers et les autres services d'urgence, peuvent être considérés comme étant plus générateurs de vulnérabilité que les autres pour une ville, en raison de leur importance pendant une catastrophe et lors de la phase de retour à la normale²³.

Avant de réfléchir à une localisation de ces activités, il est nécessaire de cerner en quoi elles sont génératrices ou non de vulnérabilité pour le territoire en cas d'inondation. Cette étape peut prendre la forme d'un diagnostic complet des infrastructures et activités présentes sur le territoire, dans le but d'identifier celles dont les fonctions seraient les plus atteintes en cas d'inondation et de quelle manière cela pourrait causer une paralysie éventuelle du territoire au moment de la phase du redémarrage de la ville.

23 - Royal Institute of British Architects (RIBA), *Climate Change Toolkit, Designing for Flood Risk*, 2009.

a) Activités et infrastructures susceptibles de rendre la ville vulnérable en cas d'inondation

Sans prétendre à l'exhaustivité, il est possible de lister un certain nombre de biens, services et activités présents dans les zones urbaines inondables. On parle généralement d'"enjeux" pour désigner la population résidente, les logements, les activités économiques, les services publics (centres de secours, bâtiments administratifs, hôpitaux, écoles, infrastructures sportives...) et les réseaux (électricité, eau, assainissement, voiries, voies de chemin de fer, autres types de transports, télécommunications...).

Certaines activités et infrastructures sont susceptibles de générer une vulnérabilité importante pour le territoire si elles sont impactées par une inondation. Ces catégories ne sont pas exhaustives, de même que les infrastructures associées²⁴.

Infrastructures et activités génératrices de vulnérabilité pour le territoire	
Infrastructures susceptibles de générer des dommages aux personnes	Logements (en particulier ceux sans niveau refuge au-dessus des PHEC), hôpitaux, cliniques, établissements psychiatriques, unités de soins de longue durée, centres d'hébergement et de réadaptation sociale, établissements d'hébergement et d'accueil pour adultes et enfants handicapés, établissements d'hébergement pour les personnes âgées, foyers, prisons, etc.
Infrastructures et activités nécessaires à la gestion de crise (secours)	Casernes de pompiers, mairies, préfetures
Infrastructures et activités nécessaires à la sécurité (défense, maintien de l'ordre, économie)	Gendarmeries, commissariats de police
Infrastructures et activités nécessaires à l'information	Plates-formes de communications
Infrastructures et activités nécessaires à l'assistance aux victimes (assistance médicale, hébergement, ravitaillement, soins)	Hôpitaux, SAMU, cliniques, maisons médicalisées, etc. Centres de distribution d'alimentation (supermarchés, magasins)
Infrastructures et activités nécessaires au fonctionnement des réseaux	Entreprises de travaux publics, entreprises de transport, centres d'exploitation routiers, stations d'épuration, routes, réseau EDF, réseau GDF, réseaux de télécommunications, gares, aéroports, réseaux de bus, de métro, de tramways, etc.
Infrastructures et activités nécessaires au soutien à l'économie	Centres financiers, banques
Infrastructures susceptibles de générer du sur-endommagement (pollutions, épidémies, sur-endommagement matériel)	Industries et zones de stockage diverses, stations-service, dépôts pétroliers, réservoirs de gaz, cuves à gaz, stations d'épuration, usines de traitement d'eau, activités agricoles, jardineries, piscines, industries phytosanitaires, déchetteries, zoo, élevages, concessionnaires, autres installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE, dont celles classées Seveso), etc.
Infrastructures nécessaires à la reconstruction (réhabilitation de bâtiments)	Centres d'exploitation routiers (réhabilitation des routes), décharges/déchetteries et entreprises liées (bennes/nettoyage), entreprises de nettoyage, laboratoires, artisans du bâtiment (électriciens, plombiers, maçons, couvreurs, chauffagistes, vitriers, menuisiers, charpentiers, entreprises du BTP, etc.), magasins de bricolage, entreprises fournisseuses de matériaux, etc.
Infrastructures nécessaires pour assurer le retour à une situation normale (reprise de la vie sociale, économique, administrative)	Entreprises, Trésor public, banques, centres d'approvisionnement alimentaire (grandes surfaces/petits commerçants), centres médicaux de proximité (médecins/pharmacies), bureaux des services sociaux, tribunaux, établissements d'enseignement (écoles, collèges, lycées), crèches, autres services publics (bureaux de poste, espace vert, CAF...), etc.

24 - Cette liste s'inspire des groupes de fonctions essentielles proposés par le groupe de travail piloté par Crochet Émilie (MIOMCTI/DSC), représentants du MEDDTL (DGPR, DHUP, CGPC) et membres du Groupe d'études et de propositions pour la prévention du risque sismique en France (GEPP), *Recommandations pour le recensement et la classification des bâtiments, équipements, installations et ponts de catégorie d'importance IV*, disponible sur : http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/guide_classe_d_vf_allegee.pdf

Le projet de recherche européen FloodProBE identifie également un certain nombre d'infrastructures critiques en cas de d'inondation, in Escarameia M., Stone K., Van M., Zevenbergen C., Morris M., *Guidance based on findings from the EU-funded Projet FloodProBE (version datant d'octobre 2013)*.



Déchetterie, agglomération d'Orléans (France).
Crédit : Communauté d'agglomération Orléans Val de Loire.



Gare de Saint-Pierre-des-Corps (France). Crédit : CEPRI.

Parmi ces activités et infrastructures susceptibles de générer une vulnérabilité au niveau du fonctionnement de la ville, certaines peuvent être caractérisées de “critiques”. La directive du 8 décembre 2008, concernant le recensement des infrastructures critiques européennes, définit les infrastructures critiques comme “un point, système ou partie de celui-ci, situé dans les États membres, qui est indispensable au maintien des fonctions vitales de la société, de la santé, de la sûreté, de la sécurité et du bien-être économique ou social des citoyens et dont l’arrêt ou la destruction aurait un impact significatif dans un État membre du fait de la défaillance de ces fonctions”²⁵. Cela signifie que leur atteinte en cas d’inondation se révélerait extrêmement problématique pour la ville, voire pour les territoires voisins.

La directive identifie plus particulièrement les secteurs de l’énergie (électricité, pétrole, gaz) et celui des transports (routier, ferroviaire, aérien, par voie navigable, maritime). Les autres services destinés au public comme l’assainissement, la production ou distribution d’eau pour la consommation humaine, ainsi que les réseaux de communications électroniques ouverts au public, sont par ailleurs identifiés comme infrastructures critiques en France, par le Code de la sécurité intérieure (article L.732-1).

On peut également ajouter les établissements de santé, les casernes de pompiers et gendarmeries, les centres décisionnels pour la gestion de crise (mairies, préfectures).

L’identification d’un certain nombre d’activités et infrastructures appartenant au système urbain montre qu’il existe une grande variété d’enjeux potentiellement présents au sein des villes et que la fonction qu’ils remplissent peut être lourdement atteinte en cas d’inondation, représentant ainsi un handicap pour le territoire.

La deuxième étape du diagnostic consiste à identifier les différentes stratégies de localisation possibles pour chaque activité.

25 - Directive 2008/114/CE du Conseil du 8 décembre 2008 concernant le recensement des infrastructures européennes ainsi que l’évaluation de la nécessité d’améliorer leur protection.

b) Les différentes stratégies possibles de localisation des activités

Localiser les activités en fonction de la vulnérabilité qu'elles sont susceptibles de générer peut recouvrir plusieurs stratégies qui dépendront des activités elles-mêmes. Pour certaines activités, le choix est limité. C'est le cas des activités dont la proximité de l'eau est indispensable à leur fonctionnement (ex. : des infrastructures portuaires, des activités liées à la pêche, au tourisme, etc.). Pourtant, elles peuvent rendre le territoire très vulnérable. C'est le cas notamment des centrales nucléaires et des stations d'épuration.

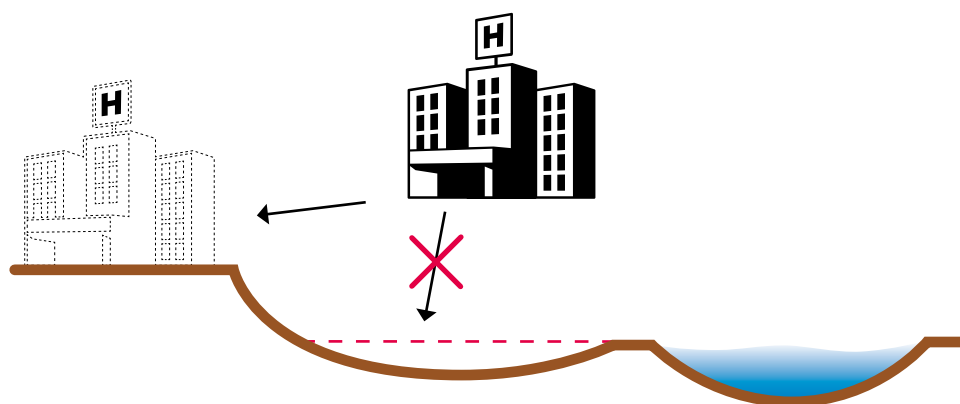
Pour des activités les plus génératrices de vulnérabilité, il peut être envisagé de les déplacer à un autre endroit au sein de la zone inondable dans les espaces les moins fréquemment inondés et dans les zones où les paramètres du phénomène sont les moins intenses.

Les choix de localisation des infrastructures et activités peuvent être orientés dans une certaine direction. Par exemple, en France, la circulaire du 14 août 2013 mentionne que les bâtiments publics nécessaires à la gestion de crise, au maintien de l'ordre et à la sécurité civile "devront dans la mesure du possible être implantés en dehors de l'enveloppe de l'évènement extrême"²⁶. Il s'agit des casernes de pompiers, des gendarmeries, des équipements de santé (hôpitaux, cliniques, maisons médicalisées), établissements accueillant des personnes à faible mobilité (maisons de retraites, établissements pour personnes handicapées...). Il en est de même pour les infrastructures structurantes telles que les transports (lignes à grande vitesse, etc).

2. Types d'aménagements possibles

Répartir les usages sur le territoire d'une ville concernée par des types d'inondation spécifiques, en fonction de leur capacité à générer de la vulnérabilité par rapport à ces risques, peut être effectué de deux façons différentes : sur le plan horizontal et sur le plan vertical.

a) Localisation des usages sur le plan horizontal



Source : CEPRI.

C'est le type d'aménagement qui semble être le plus évident à mettre en œuvre. Dans le contexte du renouvellement urbain, ce type d'aménagement consiste à implanter les activités en fonction de la variation des caractéristiques de l'aléa sur la zone (hauteur d'eau, durée d'immersion, fréquence) et en tenant compte de leur capacité à générer de la vulnérabilité pour la ville. Leur localisation dépendra donc précisément de la connaissance de l'aléa sur les zones inondables et leurs caractéristiques.

26 - Circulaire du 14 août 2013 relative à l'élaboration des plans de gestion des risques d'inondation et à l'utilisation des cartes de risques pour les territoires à risque important d'inondation. Cette circulaire précise le contenu des cartes des surfaces inondables élaborées dans le cadre de la transposition de la directive inondation.

Exemple des préconisations du Planning Policy Statement 25 (Royaume-Uni)

Le "Planning Policy Statement 25 (PPS25): Development and Flood Risk" (Déclaration sur la politique de planification : développement et risque d'inondation) fait partie de la politique nationale britannique de gestion des risques d'inondation. Il identifie différents niveaux de zones inondables allant de 1 à 3b ainsi que divers usages, allant du moins vulnérable à l'inondation au plus vulnérable. Puis il constitue un tableau ou matrice composé des différents niveaux d'aléas et de la classification des usages plus ou moins vulnérables, qui indique pour quels usages le développement est approprié dans une zone (bleu), pour quels usages le développement doit rester exceptionnel dans une zone (orange) et pour quels usages le développement ne doit pas être admis (rouge).

Tableau 1 : implantation d'activités dans les zones inondables en fonction de leur degré de vulnérabilité

Le PPS25 définit 4 types de zones inondables en fonction de la fréquence des inondations :

- zone 1 : occurrence 0,1 % par an (1/1 000 ans) pour une inondation fluviale ;
- zone 2 : occurrence comprise entre 0,1 et 1 % par an (1/100 ans) pour une inondation fluviale et 0,5 % par an (1/200) pour une submersion marine ;
- zone 3a : occurrence supérieure à 1 % par an pour une inondation fluviale et supérieure à 0,5 % par an pour une submersion marine ;
- zone 3b : occurrence supérieure à 5 % par an (1/20 ans) pour une inondation fluviale ou bien les zones d'expansion des crues.

Vulnerability	Land use	Risk:			
		Zone 1	Zone 2	Zone 3a	Zone 3b
Water-compatible development	Water infrastructure and pumping stations	●	●	●	●
	Sewage infrastructure and pumping stations	●	●	●	●
	Sand and gravel workings	●	●	●	●
	Docks, marines and wharves	●	●	●	●
	MOD defence installations	●	●	●	●
	Shipbuilding, fish processing	●	●	●	●
	Amenity open space, outdoor recreation	●	●	●	●
	Less vulnerable	Buildings; shops, professional, restaurants, storage, distribution, assembly and leisure	●	●	●
Land and buildings for agriculture and forestry		●	●	●	●
Waste treatment plant		●	●	●	●
Minerals		●	●	●	●
Water treatment and sewage plants		●	●	●	●
More vulnerable	Hospitals, health and educational;	●	●	●	●
	Residential institutions and dwellings	●	●	●	●
	Hotels and nightclubs	●	●	●	●
	Landfill sites and hazardous waste	●	●	●	●
	Holiday caravans and camping	●	●	●	●
Highly vulnerable	Emergency services and command centres	●	●	●	●
	Emergency dispersal points	●	●	●	●
	Basement dwellings, permanent caravans	●	●	●	●
	Installations of hazardous substances	●	●	●	●
Essential infrastructure	Essential transport and evacuation routes	●	●	●	●
	Strategic utility infrastructure, power stations and primary substations	●	●	●	●

● Development appropriate ● Exception test required ● Development should not be permitted

Figure 10 Flood risk vulnerability and flood zone compatibility taken from PPS25

À l'issue de ce tableau, on remarque que certains usages ont besoin de l'eau (Water-compatible development) : les activités liées à la pêche, les activités d'extraction de sable, les gravières, les ports, les espaces récréatifs au bord de l'eau. Ce sont donc les activités qui ont besoin de l'eau et aussi les activités les moins vulnérables qui peuvent être implantées dans toutes les zones. Pourtant, certaines peuvent être considérées comme fortement génératrices de vulnérabilité d'un point de vue stratégique (stations de pompage, ports et marinas).

Le tableau ci-dessous liste les différents usages possibles (pas uniquement en milieu urbain puisque figurent l'agriculture et la pêche, la forêt, l'extraction minière...) et leur compatibilité avec l'inondation en fonction de différents niveaux d'aléas. Les plus vulnérables sont les habitations et lieux d'hébergement (hôtels, chambres d'hôtes), les réseaux de production d'énergie, d'eau potable et d'assainissement, les institutions, les établissements publics (de santé, de soins, écoles, services d'urgence).

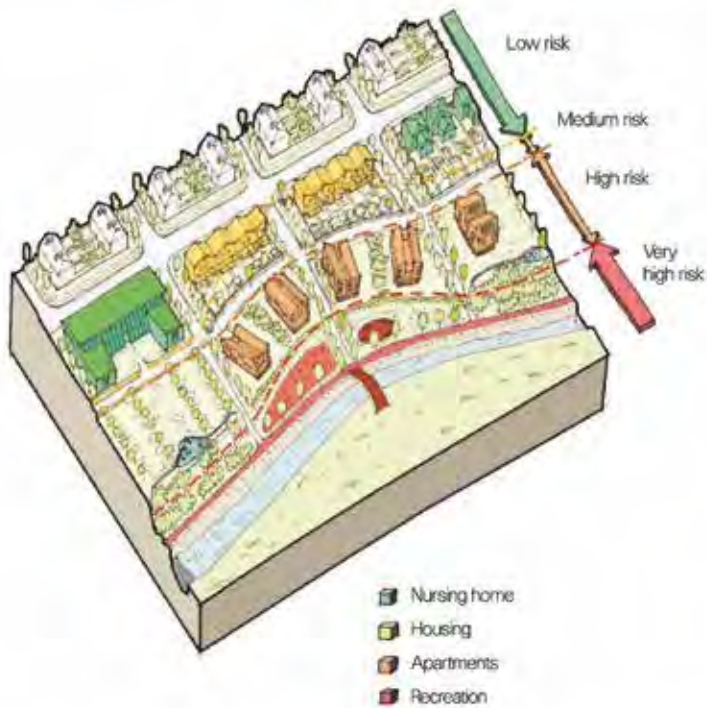
Figure 11 Land use ready reckoner

Land use category	Risk:			
	Low	Medium	High	Very high
Agriculture and fisheries	●	●	●	●
Forestry	●	●	●	●
Utilities and infrastructure – renewable energy production and distribution	●	●	●	●
Recreation and leisure – outdoor amenity and open spaces	●	●	●	●
Defence	●	●	●	●
Transport – car parks, vehicle storage, goods and freight handling	●	●	●	●
Minerals (extraction)	●	●	●	●
Utilities and infrastructure – refuse disposal	●	●	●	●
Industry and business – storage and wholesale distribution	●	●	●	●
Industry and business – manufacturing	●	●	●	●
Industry and business – offices	●	●	●	●
Recreation and leisure – indoor	●	●	●	●
Retail	●	●	●	●
Transport – tracks, ways, terminals and interchanges	●	●	●	●
Residential – hotels, boarding and guesthouses	●	●	●	●
Residential – dwellings	●	●	●	●
Utilities and infrastructure – energy production and distribution, water storage and treatment	●	●	●	●
Residential – residential institutions	●	●	●	●
Community services – medical, healthcare, education, and community (emergency) services	●	●	●	●

● Suitable use ● Requires mitigation ● Requires defence and mitigation ● Avoid use

Le tableau souligne également le fait que certains usages ne peuvent être viables dans des zones à risque que si des mesures d'adaptation au risque d'inondation sont prises (campings, hôpitaux, hôtels, infrastructures de transport nécessaires pour l'évacuation des populations, services d'urgence). Ce tableau constitue une base d'analyse qui doit cependant être adaptée au contexte spécifique de la ville concernée par le risque.

Le PPS25 a été remplacé depuis 2009 par le National Planning Policy Framework qui s'appuie sur un certain nombre de fondements du PPS25.



Illustrative Scheme – Land Use Planning

The illustration shows how the spatial arrangement of the scheme has, to a large degree, worked with the lie of the land.

Robust recreational uses have been located in the most hazardous part of the site adjacent to the water course, whilst land levels have been adjusted to create a low risk area of the site for a nursing home with very vulnerable occupants. In adjusting the topography of the site care has been taken to retain at least the same level of storage capacity of flood water as the initial assessment identified. Ideally this capacity should be increased.

In the area of high risk apartment buildings with control and mitigation are proposed and in the area of medium flood risk housing with mitigation.

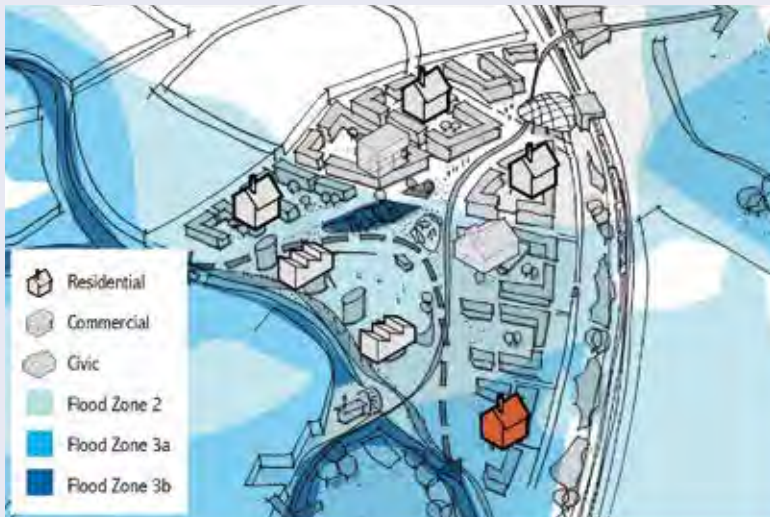
Figure 12 Land use planning responds to the risk

Source : Royal Institute of British Architects (RIBA) [2009].

Exemple du projet d'aménagement du quartier Felnex à Hackbridge (Royaume-Uni)

Le site pilote Felnex est un ancien site industriel abandonné de 13 hectares faisant partie du projet de développement de la ville d'Hackbridge (banlieue de Londres). Sur le site est envisagée l'implantation de plusieurs usages : habitations (1 800 logements prévus), commerces (7 450 m² de surfaces commerciales), services (2 500 m² pour des services de santé, d'éducation, autres services publics).

La localisation des différentes activités du quartier sur le plan horizontal est envisagée, conformément aux préconisations du PPS25, et adaptée au contexte spécifique du risque de débordement de la Wandle à Hackbridge. Celui-ci se caractérise, malgré les incertitudes sur les données existantes, par une montée des eaux rapide et un retrait des eaux tout aussi rapide ; la submersion peut durer entre 4 h et 10 h en moyenne. La hauteur d'eau est faible (estimée à 0,9 m pour une crue centennale prenant en compte le changement climatique) et la vitesse également. Malgré une hauteur d'eau, une vitesse et une durée faibles, le laps de temps entre la survenue de précipitations et une inondation peut être très court. Pour les logements, il est prévu de réserver la densité de population la plus importante aux zones exposées à un risque peu fréquent de débordement de la Wandle, d'occurrence comprise entre 1/100 et 1/1 000 ans, avec des hauteurs d'eau proches de 0,5 m (zone 2). Dans la zone 1 (en blanc), se trouve la gare qui, conformément au PPS25, constitue un usage générateur de vulnérabilité importante et se situe donc dans la zone non soumise au risque de débordement de la Wandle.



Source : © Baca Architects. Le dessin ci-contre représente un plan schématique du quartier inondé par le débordement de la rivière Wandle.

Source : Baca Architects, BRE and Fulcrum Consulting, Halcrow Group Ltd, Cyril Sweet and LDA Design (2009).

Pour des activités fortement génératrices de vulnérabilité, il peut être envisagé de les sortir de la zone inondable, de les délocaliser. Ce choix peut s'accompagner de procédures assez lourdes, comme l'acquisition amiable voire l'expropriation pour cause d'utilité publique, s'il s'agit de délocaliser des logements à partir d'une zone considérée comme extrêmement dangereuse pour ce type d'usage.

Exemple du déversoir de la Bouillie, à Blois (France)

Le déversoir de la Bouillie est un ouvrage ancien (XVII^e siècle) construit en rive gauche de la Loire face à l'agglomération de Blois. Destiné à permettre l'écoulement de la Loire en crue dans une zone préférentielle, il a pour but de limiter la surcharge du pont Jacques Gabriel (300 m au niveau du centre-ville de Blois) et d'éviter l'inondation du quartier de Blois-Vienne, situé en rive gauche de la Loire.

Ce type d'ouvrage a pour fonction première de laisser de l'espace à la Loire en crue. La zone concernée présente une certaine dangerosité car elle serait soumise à des hauteurs d'eau importantes (jusqu'à 3 m) et une vitesse supérieure à 2 m/s. Or, ce secteur a été urbanisé depuis la fin du XIX^e siècle et comptait environ 150 maisons en 2000, des installations temporaires de gens du voyage itinérants ou sédentarisés, des entreprises, des équipements et services, jardins ouvriers et prairies d'élevage. Une étude réalisée en 2000 a constaté que ces constructions présentaient une vulnérabilité certaine et importante (la hauteur de l'eau dépasserait 2 m, 3 h après le début du fonctionnement du déversoir de la Bouillie). Face au montant des travaux nécessaires pour réaliser de nouvelles digues destinées à protéger les habitations (estimés à 25 millions d'euros), la Communauté d'agglomération de Blois (Agglopolys) a entrepris l'acquisition amiable des 143 maisons début 2003, dans le but de les démolir et redonner au site sa vocation initiale de zone d'expansion des crues de la Loire.

Une Zone d'aménagement différé (ZAD) a été instaurée au bénéfice de la Communauté d'agglomération de Blois, positionnant la collectivité en tant qu'acquéreur prioritaire dans toutes les transactions. Cette procédure de rachat des habitations a été financée par l'État (40 %), la Région Centre (40 %), le département du Loir-et-Cher (10 %) et l'Agglopolys (10 %) de 2003 à 2005. À partir de 2005, le Fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM ou fonds Barnier) a pris le relais du CPER, permettant un financement des acquisitions de foncier bâti et des démolitions de près de 100 %. Le foncier non bâti reste, quant à lui, financé par la Région Centre (40 %), le Conseil général (10 %) et Agglopolys (50 %).



Déversoir de la Bouillie, aux franges du quartier endigué de Blois-Vienne, 2006.

Crédit : Agglopolys.

Cette initiative a nécessité un positionnement politique fort et ambitieux, tant sur les plans financier que politique et social. Plusieurs coûts non prévus à l'origine vinrent s'ajouter au montant des rachats de maisons : coût d'entretien des terrains démolis pour éviter la prolifération de la végétation ; murage des maisons en attente de démolition, financement du gardiennage du site après le départ des habitants et avant les démolitions pour éviter les squats, actes de vandalisme et autres problèmes de sécurité.

Dix ans après la première acquisition, le bilan est plutôt positif puisque 123 biens ont été acquis (sur les 143 propriétaires recensés au début de l'opération), soit 86 % de l'opération réalisée.

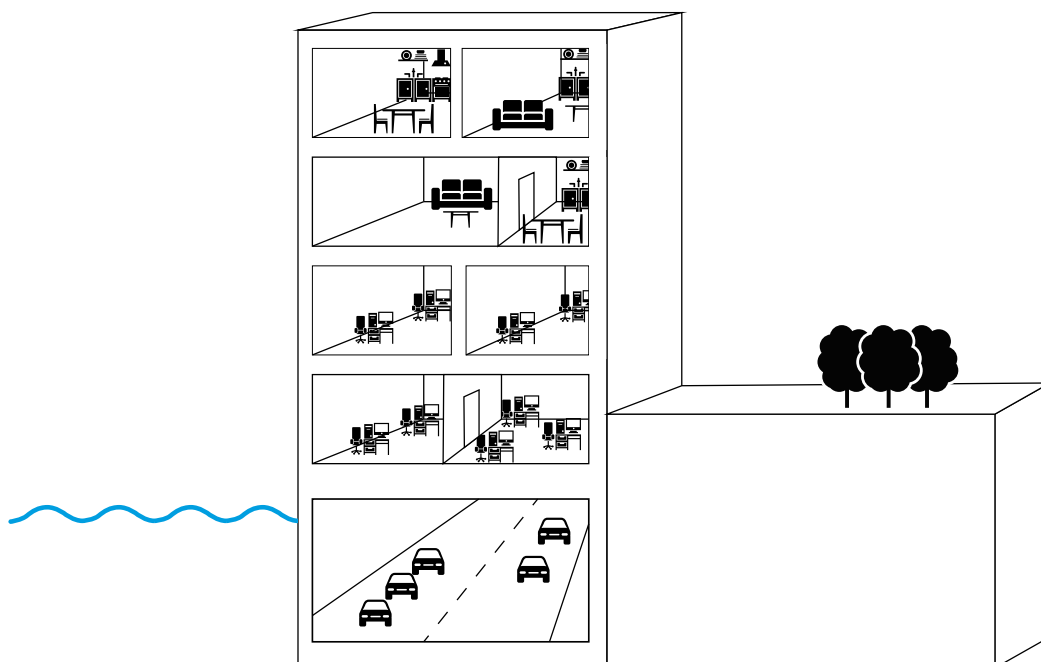
Toutefois, ces acquisitions ne se sont pas faites sans difficultés, notamment sociales. Face à l'annonce de la volonté de l'Agglopolys de racheter les maisons, certains habitants ont créé une association contestant la procédure et manifestant une incrédulité face au risque d'inondation. L'accompagnement humain proposé dès 2005 et les aides financières complémentaires (aide au relogement portée par le CIAS, la mise en place des indemnités complémentaires en 2008) ont sans doute permis à cette opération de se réaliser.

Depuis la démolition des constructions qui devrait s'achever en 2018 (fin de la ZAD), de nouveaux usages compatibles avec la présence du risque d'inondation sont recherchés pour cette zone. Il s'agit d'une porte d'entrée de l'agglomération blésoise, qui présente un potentiel intéressant en termes d'espaces récréatifs à proximité de la ville. Ainsi, des projets de jardins ouvriers "modernisés", de promenade aménagée, de circulations et aménagements "doux" améliorant l'entrée de la ville sont en cours de réflexion.

Sources : Agglopolys ; Valette Jean-Pierre, Loire, Blois, Reconquête du bras de décharge du déversoir de "la Bouillie", Symposium européen, problèmes actuels de la protection contre les inondations, Paris-Orléans, mars 2012 ; Morisseau Grégory, Le quartier périurbain de la Bouillie (Blois), Les nouveaux paysages du risque, janvier 2012, disponible sur : www.projetsdepaysage.fr

b) Localisation des usages sur le plan vertical

Le principe, là encore, est de positionner les usages présentant une forte vulnérabilité dans les zones d'aléa d'intensité et de fréquence moindres. Sur le plan vertical, répartir les usages en fonction de leur vulnérabilité consiste à placer les usages les uns au-dessus des autres, au-dessus des plus hautes eaux potentielles. Un exemple de ce type d'aménagement pourrait être celui d'un immeuble dans lequel seraient superposés les usages, de façon à ce que ceux qui sont les moins vulnérables soient à la base de l'immeuble (sous-sol ou rez-de-chaussée). Ceux qui seraient un peu plus vulnérables seraient installés au-dessus et ainsi de suite jusqu'aux plus vulnérables situés dans la partie supérieure du bâtiment.



Exemple de digue multifonctionnelle. Source : CEPRI

Exemple du projet de recherche “Urban Riverfronts”, université technologique de Delft (Pays-Bas)²⁷

Le concept des systèmes de protection “adaptables” développé dans ce projet cherche à intégrer différents usages au sein d’une même structure multifonctionnelle. Il réfléchit à un aménagement des rives/berges en milieu urbain qui soit le plus optimisé possible compte tenu du peu d’espaces disponibles. Le dispositif de protection, rendu discret et intégré dans le paysage urbain, n’est pas contradictoire avec les usages des habitants et n’est pas perçu comme une dégradation de l’espace urbain, mais plutôt comme une contribution à la qualité urbaine des berges. Les différentes fonctions (logements, bureaux, magasins, restaurants, parc, voiries, espaces de stationnement, espaces piétonniers) sont envisagées de manière verticale, au sein d’une même structure multifonctionnelle dans un souci de rentabilisation de l’espace urbain. La représentation ci-dessus montre que les logements et les magasins sont situés au-dessus du niveau des plus hautes eaux en cas d’inondation. Les espaces de stationnement pour les véhicules et les routes sont en dessous du niveau des plus hautes eaux, et seront donc inondés. Le choix de considérer les logements et les magasins comme plus vulnérables que les routes et parkings a conditionné la localisation des activités dans cet exemple.

Source : www.urbanriverfronts.com

3. La mise en œuvre du principe

Sur le plan technique

Concernant la **localisation sur le plan horizontal**, ce principe présente des limites, notamment au regard de la disponibilité du foncier dans les zones urbaines denses. Certains projets envisagent le remodelage de quartiers sous la forme de terrasses permettant presque d’envisager une localisation à la fois verticale et horizontale. Le premier niveau se trouve

27 - Ce site s’inscrit dans le cadre d’un doctorat intitulé “Conception de rives urbaines adaptées au risque d’inondation” conduit par la section ingénierie hydraulique à l’université technologique de Delft (Pays-Bas). Le but de ce travail de recherche est de trouver des solutions pour l’amélioration des systèmes de protection et le redéveloppement des rives au sein des espaces publics urbains.

à proximité de l'eau, le deuxième est une terrasse surélevée, en recul par rapport à l'eau, le troisième niveau se trouve sur une nouvelle terrasse encore plus éloignée de l'eau, etc. Les activités les plus vulnérables peuvent être implantées sur la troisième terrasse, c'est-à-dire la plus élevée (localisation verticale) et la plus éloignée de la zone inondable (localisation horizontale). Mais ce type de projet très coûteux nécessite un foncier conséquent et rarement disponible dans les centres urbains denses.

Une deuxième limite concerne le remodelage éventuellement nécessaire des terrains sous la forme de déblais ou remblais pour mettre à l'abri du risque d'inondation certaines activités.

Une troisième limite tient au fait qu'il n'est pas toujours possible de déplacer des infrastructures très vulnérables, comme les gares ou les aéroports par exemple, sans atteindre un coût excessif pour la collectivité. Ces limites démontrent qu'il est important de tenir compte de l'environnement existant d'une ville, car il n'est pas toujours possible de bouleverser l'aménagement de tout un quartier (usages habituels, paysage, etc.).

Anciennes réflexions sur le secteur des Ardoines à Vitry-sur-Seine (2009)

Exemple de réflexions prônant la création de terrasses parallèles au cours d'eau, avec des usages différents. Étaient proposés : sur les "berges", des espaces publics aux usages récréatifs, sur la "terrasse", des bâtiments à usage de logements et de bureaux et sur la "plate-forme", des bâtiments à caractère industriel et de grands équipements "stratégiques" à l'échelle francilienne. Aujourd'hui, le projet d'aménagement ne propose plus de remodelage du terrain sous la forme de terrasses, en tant que réponse au risque de débordement de la Seine sur ce secteur, parce que cela nécessitait de remodeler le territoire intégralement, sans souplesse de phasage. La réflexion porte désormais sur une vision plus opérationnelle et intéressante du point de vue hydraulique, la mise hors d'eau des axes structurants pour assurer la résilience de l'ensemble du quartier, l'accessibilité à la zone non inondée et la protection des réseaux.

Source : Établissement public d'aménagement - Orly Rungis Seine Amont (EPA-ORSA).

La localisation des infrastructures et activités sur le plan horizontal nécessite également de disposer d'une bonne connaissance des zones inondables, des plus hautes eaux connues (PHEC), des phénomènes d'inondations sur la zone concernée en général.

Lorsque toutes ces limites sont bien appréhendées, la mise en œuvre de ce principe permet de réduire les conséquences potentielles des inondations. En fonction des choix opérés, il permet également de renforcer la sécurité des personnes, en soustrayant par exemple les zones de logements aux zones inondables où l'aléa peut présenter une vitesse importante.

Concernant la **localisation sur le plan vertical**, elle peut paraître plus aisée sur des constructions neuves plutôt que sur du bâti existant. Il est néanmoins possible dans certains cas d'ajouter un étage ou plusieurs à un bâtiment ou de transformer les niveaux situés au-dessus des PHEC pour des usages différents. Par exemple, réserver l'usage des rez-de-chaussée à des commerces, des locaux associatifs, des salles d'exposition ou autres, en évitant les usages d'habitation et de soins médicaux par exemple. La compatibilité des usages s'anticipe au moment de l'opération de renouvellement urbain. Si, par exemple, des infrastructures médicales sont prévues dans l'opération, selon le principe de localisation sur le plan vertical, elles devraient être situées au-dessus des PHEC. Elles doivent cependant rester accessibles en cas d'inondation et lors de la post-crise, ce qui nécessite d'envisager des accès permanents, y compris en cas d'inondation. Cela implique également que les usages du rez-de-

chaussée soient compatibles avec la fonction médicale située au-dessus des PHEC (nuisances sonores possibles).

Sur le plan économique

D'un point de vue économique, modifier la **localisation de certaines infrastructures et activités sur le plan horizontal** représente un coût non négligeable pour la collectivité. Mais il est nécessaire de comparer ce coût avec celui des dommages potentiels évités à ces infrastructures et activités en cas d'inondation. Les coûts peuvent également être importants, lorsqu'il est nécessaire d'acquérir des terrains fonciers supplémentaires pour réaliser un aménagement de type horizontal ou bien lorsqu'il s'agit de déplacer des infrastructures importantes, ce qui peut impliquer des démolitions et reconstructions de plusieurs bâtiments (hôpitaux, casernes de pompiers, réseaux électriques par exemple). Les contraintes économiques semblent moins importantes concernant la **localisation sur le plan vertical**. Elle nécessite moins de foncier et les coûts peuvent être réduits grâce à la multifonctionnalité des bâtiments qui peuvent abriter plusieurs usages en période normale et en cas de crise lorsqu'ils ont été conçus comme tels.

Sur le plan politique

La difficulté dans l'application de ce principe réside dans le choix effectué quant à la localisation des usages sur un plan horizontal ou vertical. Elle pose la question des justifications politiques de ce choix effectué par les autorités vis-à-vis des différents acteurs du système urbain (habitants, entrepreneurs, gestionnaires de réseaux, industriels, associations, etc.). Arbitrer entre plusieurs fonctions (par exemple entreprises, logements sociaux, établissements publics de santé...) dans le but de déterminer laquelle est la plus vulnérable par rapport aux autres, et doit donc être préservée ou inondée, n'est pas évident et demande donc une volonté politique certaine. Hiérarchiser des fonctions constitue un exercice difficile.

Sur le plan juridique

Que ce soit en termes d'acquisitions de terrains fonciers nécessaires, de procédures de dépollution (si le terrain qui contenait une ancienne industrie polluante devient un jardin public par exemple), de demandes de changement de destination ou d'affectation et d'usages d'un bâtiment (transformer d'anciens logements en bureaux par exemple), de procédures d'acquisition amiable voire d'expropriations, les démarches sont longues et coûteuses dans le cas de la localisation horizontale. Par ailleurs, dans le cas d'une localisation horizontale ou verticale, la réglementation environnementale, notamment celle relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), peut limiter les possibilités d'implantation de certaines activités.

Sur le plan paysager

Le changement d'implantation de certains bâtiments constitue une occasion pour remodeler le paysage urbain et lui apporter de nouvelles formes dans le but de répondre aux principes du développement durable notamment. Implanter des bâtiments consacrés à des activités nouvelles dans certains secteurs de la ville peut toutefois bouleverser des paysages urbains existants, difficiles à recréer ailleurs.

4. CONCEVOIR DES BÂTIMENTS ADAPTÉS À L'INONDATION : PRINCIPE 4



Source : CEPRI.

1. Objectifs

Le but de ce principe est d'identifier des procédés architecturaux adaptés à l'inondation dans les zones de renouvellement urbain, permettant de construire des bâtiments adaptés au sein de zones inondables.

Il existe plusieurs manières de rendre un bâtiment adapté à l'inondation. Elles renvoient à des stratégies qui traduisent une prise de position radicale vis-à-vis de l'arrivée de l'eau : soit on se met hors d'atteinte de l'eau (stratégie "éviter"), soit on empêche l'eau d'entrer (stratégie "résister"), soit on laisse l'eau rentrer (stratégie "céder").

Ces stratégies correspondent à une vision anglo-saxonne axée sur la manière de faire, sur les moyens à mettre en œuvre. Elle est en cela différente de celle que l'on retrouve habituellement en France, laquelle se base plutôt sur des objectifs à atteindre : améliorer la sécurité des personnes, limiter les délais de retour à la normale, réduire les coûts de réparation. Vision anglo-saxonne et approche française sont bien entendu complémentaires l'une de l'autre.

Les trois stratégies identifiées répondent à des objectifs différents²⁸. Chacune de ces stratégies présente un panel de solutions constructives testées dans le cadre de divers projets achevés ou en cours de réalisation. Le choix de la stratégie est conditionné par des facteurs tels que le type d'inondation concernant la zone ainsi que ses caractéristiques (fréquence, hauteur d'eau, vitesse). Dans les zones de fort courant notamment, il n'existe aujourd'hui pas de procédés spécifiques permettant de construire de manière adaptée avec les techniques habituelles. D'autres facteurs influencent également le choix de la stratégie comme l'emplacement du secteur au sein de la ville (centre-ville, périphérie, quartier spécifique) et les aménagements prévus (logements, bureaux, espaces verts, bâtiments publics, etc.).

Une fois la stratégie choisie, reste le choix des procédés constructifs retenus. Ceux-ci peuvent être appliqués à des bâtiments collectifs ou individuels. Les types d'aménagement présentés ci-dessous ne sauraient toutefois être exhaustifs.

28 - CEPRI, Un logement "zéro dommage" face au risque d'inondation est-il possible ?, novembre 2009.

2. Types d'aménagements possibles

a) La stratégie "éviter"

La stratégie "éviter", qui consiste à mettre le bâtiment hors d'atteinte de l'eau en le surélevant, est jugée la plus pertinente sur le plan technique dès lors que l'on s'adresse à de la construction neuve, individuelle ou collective. La raison en est simple. Cette stratégie permet de supprimer la totalité des dommages directs potentiels sur le bâtiment. Le logement n'est pas touché, tout au moins ses parties habitées, même s'il peut être isolé et inhabitable temporairement (inondation des voies d'accès routiers, interruption des réseaux d'énergie, de télécommunication...). Ce faisant, il ne subit pas ou peu de dégradations matérielles et offre à ses habitants des possibilités de réintégration rapide après une crue. La réponse technique apportée varie évidemment suivant les situations et en particulier suivant la hauteur d'eau potentiellement présente : création d'un vide sanitaire, pilotis, remblais, premier niveau habitable sur sous-sol ou garage non enterré par exemple.

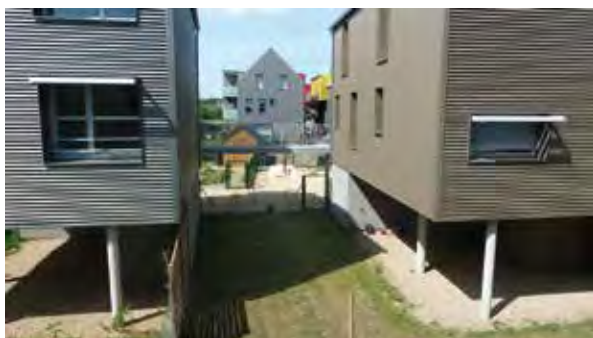
Il est important de souligner, toutefois, que ce type de construction ne permet pas nécessairement aux habitants de rester vivre sans difficulté dans leur logement pendant la durée de la crue (les réseaux de communication, d'énergie, d'eau potable, d'assainissement alimentant le logement peuvent être interrompus du fait de l'inondation et rendre les conditions de vie extrêmement précaires lorsque la crue dure plusieurs jours). C'est suivant cette stratégie de "l'évitement" que sont conçus les quartiers ou futurs quartiers de Hambourg, Francfort, Mayence (Allemagne) et que se profile la reconstruction de La Nouvelle-Orléans (USA), après la catastrophe de 2005 où plus de 200 000 maisons ont été détruites. C'est également dans cette stratégie que l'on classera les maisons amphibies et flottantes dont les installations les plus marquantes ont été réalisées aux Pays-Bas.

Elle invite, à n'en pas douter, à une petite révolution des modes de constructions classiques dans le cas du logement individuel.

- Les bâtiments surélevés

- **La construction sur pilotis.** Il s'agit d'un dispositif souvent cité, car c'est aussi l'un des plus emblématiques de la construction en zone potentiellement inondable. Ce procédé consiste à surélever le premier niveau habitable sur une structure montée sur pilotis, ce qui favorise l'écoulement de l'eau (sous le plancher habitable) et la transparence hydraulique. Ce procédé est adapté à la construction de maisons individuelles, mais aussi de complexes d'habitations (logements collectifs) en zone inondable.

Une des contraintes posées par ce type de dispositifs est l'usage des espaces situés au niveau des pilotis, sous le premier niveau de plancher habitable. Le vide laissé par cet espace doit le rester en cas d'inondation.



Exemples de maisons individuelles et immeuble sur pilotis à Saint-Pierre-des-Corps. Crédit : CEPRI.

Exemple des constructions neuves sur pilotis suite au passage de l'ouragan Katrina en 2005 (USA)

Environ 200 maisons sur pilotis ont été construites dans le quartier Lower Ninth Ward de La Nouvelle-Orléans. En général, la structure des maisons est composée de deux parties :

- une structure de base, avec des fondations ancrées à l'aide de pieux et sur des pilotis en béton pour résister à la pression de l'eau. Ce rez-de-chaussée situé entre les pilotis et sous la maison est utilisé partiellement ou en totalité comme parking ;*
- au-dessus de cette structure, la partie habitable peut être construite avec différents matériaux (métal, bois ou brique par exemple).*

Source : Fernandez Vanessa, Architectures de l'urgence, l'ouragan Katrina et ses conséquences à La Nouvelle-Orléans, présentation du 27 septembre 2011, École nationale supérieure d'architecture de Paris-Belleville.

Exemple du projet urbain du Grand Paris, "Vivre le fleuve", atelier Castro Denisoff Casi /Nexity, 2010 (France)

Ce projet a pour objectif d'urbaniser les bords de la Seine pour rapprocher les habitants du fleuve. Des bâtiments construits sur pilotis ont été imaginés pour créer un nouveau paysage urbain, "une nouvelle façade fluviale". Les habitants ont ainsi une vue directe sur le paysage de la Seine depuis leur maison.

Pour pallier la difficulté des usages possibles sous les habitations construites sur pilotis, le projet propose l'intégration de cet espace à l'espace public. Une promenade est envisagée sous les pilotis le long de la berge.



Exemple de logements sur pilotis dans le cadre du projet urbain du Grand Paris. Crédit : Gwénaelle Chorin, atelier Castro Denisoff & Associés / Silvia Casi.

Source : atelier Castro Denisoff Casi, Nexity, Vivre le fleuve, 2010.

Exemple du projet Stilthouses Polder, Waterstudio, 2009 (Pays-Bas)

Ces bâtiments font partie du projet *Het Nieuwe water* à Naaldwijk aux Pays-Bas. L'objectif principal du projet est de construire environ 1 200 habitations adaptées aux inondations fréquentes, situées dans un "réservoir" d'eau de 75 000 m³. L'un des types de bâtiments adaptés retenus est le "stilthouse", une maison sur pilotis située à proximité d'un barrage et de digues. Ces maisons sont construites dans une zone qui a vocation à servir de bassin de rétention en cas d'inondation. Une passerelle permet de relier les bâtiments entre eux et de relier les bâtiments avec le sommet de la digue, pour permettre un accès permanent à la digue pour les habitants, en période normale et en cas d'inondation.



Exemple de maisons du projet Stilthouses Polder. Crédit : architecte Koen Olthuis - Waterstudio.nl.

Source : Waterstudio, disponible sur : www.waterstudio.nl

Exemple du quartier Westhafen à Francfort (Allemagne)

Le quartier Westhafen est la reconversion d'une ancienne friche industrielle portuaire au cœur de la capitale économique européenne que représente la ville de Francfort. Cette dernière compte une densité moyenne de 80 hab./km².

Situé à l'ouest de la ville, le long de la rivière Main, il s'agit d'un quartier mixte, composé de logements et de bureaux. Les terrains ont été cédés par la ville en 1998 et le quartier est achevé depuis 2005. C'est un lieu très attractif, car proche de la gare et du quartier des affaires.

Les logements sont implantés parallèlement à la Main et les bureaux de part et d'autre de la marina (bassin ouvert sur la rivière), perpendiculairement à la rivière. Un café a été construit à l'extrémité est du bassin. Des passerelles situées aux deux extrémités du bassin permettent de relier la partie nord et la partie sud du quartier.



Le quartier Westhafen à Francfort. Crédit : CEPRI.

Les quais situés le long de la Main ont été surélevés car le niveau du terrain naturel est plus bas que le reste de la ville. Le procédé constructif employé est la construction sur pilotis. Le premier niveau habitable se trouve à la même cote que le quai opposé, soit la cote de la crue centennale.

Il ne serait pas envisagé par la ville de Francfort de faire évacuer la population de manière préventive.

Des parkings ont été aménagés en dessous du premier niveau habitable et peuvent être inondés pour une crue d'occurrence vingtennale (la présence de batardeaux a toutefois été prévue). À l'intérieur de ces parkings, on remarque que les réseaux électriques ont été surélevés et descendent du plafond. Ils devraient continuer à fonctionner en cas de crue, ce qui répond à une autre stratégie ("céder").

Source : CEPRI.

Si la construction sur pilotis présente des atouts techniques, elle doit cependant être adaptée à la réalité du territoire, notamment lorsque celui-ci est soumis à d'autres risques naturels (risque sismique par exemple) avec lesquels les pilotis ne sont pas toujours compatibles d'un point de vue technique.

D'un point de vue social, elle pose également un certain nombre de problèmes : quel usage sera associé aux espaces situés sous les pilotis ? Ces derniers ne risquent-ils pas d'être comblés afin de créer un garage, voire un nouveau niveau habitable au rez-de-chaussée ?

Un autre élément à considérer est la qualification de ces espaces situés sous les pilotis : s'agit-il toujours d'espaces privés à partir du moment où des promeneurs par exemple peuvent y accéder ? La frontière entre espace privé et espace public n'est pas toujours évidente en pratique.

- **La construction sur tertre ou remblai.** Cette solution est efficace mais paraît plus adaptée aux zones rurales, avec une densité faible, plutôt qu'aux zones urbaines où le foncier disponible nécessaire à ce type de construction est peu abondant. Toutefois, il peut se

révéler intéressant pour construire des logements collectifs. Par contre, ce procédé n'est pas neutre d'un point de vue hydraulique, car la transparence n'existe plus. Des compensations sont donc nécessaires.

- **La construction surélevée.** Cela consiste à remplacer un tertre par un vide sanitaire ou un parking par exemple, afin de surélever le premier niveau de plancher habitable. S'il s'agit d'un vide sanitaire non enterré, il pourra être entretenu plus facilement.

- Les bâtiments flottants



Maison flottante à Amsterdam. Crédit : CEPRI.

Cette typologie de bâtiment est surtout développée aux Pays-Bas et au Royaume-Uni, en réponse à la problématique de la rareté du foncier constructible. Elle existe néanmoins en France sous la forme des bateaux logements.

D'un point de vue technique, la construction de maisons ou bâtiments flottants (en dehors du cas des bateaux logements) dépend du système constructif de la plate-forme flottante.



Restaurant flottant à Amsterdam. Crédit : CEPRI.

Cette plate-forme peut être constituée d'une coque en béton armé avec un noyau en polystyrène expansé (PSE)²⁹. Les plates-formes ayant une surface importante sont souvent construites en une seule pièce ou constituées de plusieurs parties transportées indépendamment puis assemblées sur place, pour en faciliter le transport. Les plates-formes sont plutôt lourdes avec un centre de gravité bas pour assurer la sécurité des usagers et les matériaux employés pour la structure du bâtiment sont légers (bois, métal). Ce type de construction fait l'objet de recherches afin de développer de nouveaux procédés permettant de soutenir des structures plus lourdes tout en réduisant le nombre de matériaux afin de rendre la construction de tels bâtiments plus économique³⁰.

29 - Type de polystyrène utilisé pour les emballages.

30 - Floatec, Des maisons flottantes en cas de montée des eaux, novembre 2011.

Exemple The Floating Exhibition Pavilion à Rotterdam, 2010 (Pays-Bas)



Crédit Deltasync.

C'est un exemple intéressant de lieu public ayant une structure en polystyrène dense avec une surface importante. Ces trois petits dômes transparents flottent en permanence à Rotterdam, dans le port "Rijnhaven". Ce sont des pavillons d'exposition qui mettent en valeur le principe de la construction flottante, économe en énergies et adaptée à une variation du niveau de l'eau liée au changement climatique.

Source : Deltasync.

- Les bâtiments amphibies

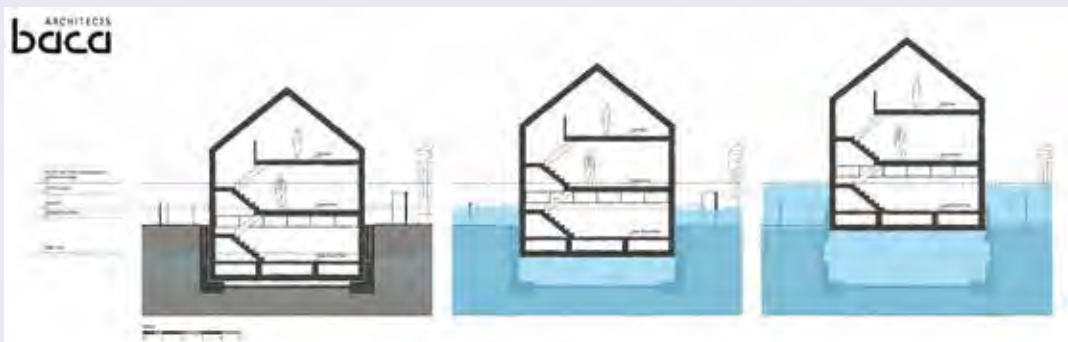
Ces bâtiments sont conçus de la même façon que les bateaux à ancrage ; ils montent ou descendent selon la variation du niveau de l'eau le long de colonnes de guidage (ducs-d'Albe), empêchant ainsi le bâtiment de dériver. En période normale, le bâtiment repose sur le sol. En cas d'inondation, il flotte sur l'eau le long des ducs-d'Albe. Il ne flotte donc pas de manière permanente. Les flotteurs de la plate-forme principale du bâtiment peuvent être en divers matériaux : béton, plastique, composite ciment verre, acier, etc.

Ce type de construction ne semble pas adapté à des zones de fort courant. Les bâtiments sont souvent construits sur de petites surfaces, car ils ne peuvent supporter qu'un poids limité pour assurer la flottabilité de l'ensemble de la structure, ce qui est un atout pour l'urbanisation dans les zones urbaines denses.

Pour assurer son bon fonctionnement ainsi que du point de vue de sa rentabilité financière (technique très coûteuse), il est nécessaire que le bâtiment amphibie soit régulièrement soumis à une inondation. Il n'est donc pas recommandé dans les zones peu fréquemment inondées et paraît approprié dans les zones estuariennes où le niveau de l'eau varie au gré des marées, caractérisant une montée progressive et lente de l'eau.

Cependant, des incertitudes demeurent concernant notamment les effets sur la stabilité du bâtiment au moment où l'eau se retire, lorsque des sédiments et déchets divers se sont accumulés en dessous lors d'une inondation.

Exemple d'une maison amphibie au bord de la Tamise, la maison Formosa, Baca Architects (Royaume-Uni), 2014



Principe de la maison amphibie qui monte le long de sa structure fixe en flottant sur l'eau en cas d'inondation.

Crédit : © Baca Architects.

Ce type de bâtiment, dont les fondations sont assez profondes, repose sur le sol en période normale. Chaque fois que se produit une inondation, il monte le long de sa structure fixe en flottant sur l'eau, en fonction de la hauteur atteinte par l'eau. Cette habitation dite "amphibie" a été conçue par le cabinet Baca Architects et il s'agit de la première maison de ce type au Royaume-Uni. Elle a été prévue pour s'élever jusqu'à une hauteur de 2,5m, ce qui va bien au-delà des niveaux d'eau connus en cas d'inondation aujourd'hui dans la région. Il est prévu que les habitants puissent emménager dès la fin 2014.



Dessin d'une maison amphibie avant et pendant une inondation.
Crédit : © Baca Architects.

Source : Baca Architects.

Exemple des premières propositions développées par Baca Architects pour le quartier Stadswerven à Dordrecht (Pays-Bas)

Le projet se caractérise par la situation du quartier Stadswerven, en dehors du système d'endiguement de Dordrecht, dans une ancienne friche portuaire reconvertie en quartier d'habitations. Dans leur proposition d'origine, les architectes ont envisagé trois types de logements au sein de ce nouveau quartier soumis à des risques d'inondation liés aux zones estuariennes : flottants, amphibies et résilients. Les logements flottants seront constamment sur l'eau, tandis que les logements amphibies ne flotteront qu'en cas de crue vingtennale. Les logements résilients ne seraient touchés qu'en cas de crue millénaire.



Proposition pour le quartier Stadswerven.
Crédit : © Baca Architects.



Maisons flottantes



Maisons amphibies



Maisons résilientes

Source : Baca Architects

www.baca.uk.com/index.php/living-on-water/dordrecht

Exemple de projets de maisons amphibies à Bangkok (Thaïlande)

La maison est construite sur une plate-forme reposant sur des flotteurs enterrés sous la maison en période normale. En cas d'inondation, la maison flotte et est maintenue dans l'axe vertical grâce à des colonnes de glissement. Le bâtiment fait également l'objet d'une réflexion sur la récupération des eaux pluviales, l'installation de panneaux solaires pour rendre l'habitation autonome d'un point de vue énergétique et d'alimentation en eau potable.

Source : Alter Lloyd, Amphibious House Design Goes With The Flow, Rises With Floods, disponible sur : www.treehugger.com/sustainable-product-design/amphibious-house-design-goes-with-the-flow-rises-with-floods.html

b) La stratégie "résister"

La stratégie "résister", qui consiste à retarder voire empêcher la pénétration de l'eau dans le bâtiment par la mise en place de dispositifs temporaires (obturation des ouvertures, batardeaux, barrières mobiles, sacs de sable) ou permanents (occultation des voies pénétrantes, murets, etc.), présente l'intérêt de maintenir l'intérieur du bâtiment au sec dans une certaine mesure. Elle s'adapte aux logements existants (et demeure compatible avec le cas des logements neufs). Elle permet, sous certaines conditions, de réduire considérablement les dommages potentiels, même si une pénétration partielle d'eau et d'humidité dans le logement ne peut être totalement exclue et même si la salissure des murs extérieurs et leur imprégnation éventuelle par des hydrocarbures restent des éventualités à ne pas négliger. Elle constitue la stratégie probablement la mieux admise et la plus intuitive pour les populations dont le réflexe à la montée des eaux consiste bien souvent à ériger des sacs de sable devant les ouvertures de porte. Pour efficace qu'elle soit, la mise en œuvre des dispositifs visant à "résister" à l'inondation doit être toutefois réservée à certaines circonstances précises et entourée de multiples précautions :

- la hauteur d'eau maximale de la crue au-dessus du plancher doit être inférieure à 1 mètre (au-delà, les pressions exercées sur les parois du bâtiment peuvent créer des désordres sur la structure) ;
- la durée de la crue doit être limitée (moins de 48 heures) car on ne peut indéfiniment empêcher l'eau de pénétrer dans un bâtiment, quels que soient les modes d'obturation employés ;
- le délai d'alerte (c'est-à-dire le délai compris entre l'annonce de l'arrivée de l'eau et sa survenue effective) doit être suffisant (supérieur à quelques heures) afin de pouvoir mettre en place les dispositifs d'occultations temporaires. Lorsque l'alerte est donnée, la mise en place des batardeaux et des dispositifs d'occultation temporaires doit pouvoir être réalisée à n'importe quel moment de l'année, de la semaine, du jour et de la nuit. Cela suppose donc d'être présent physiquement et de connaître le lieu de stockage de ces dispositifs et de savoir les monter ;
- les systèmes d'obturation temporaires (type batardeaux) ne peuvent être efficacement mis en œuvre que s'ils sont utilisés relativement fréquemment (zones de crues fréquentes), où un véritable savoir-faire de ce type de systèmes peut s'installer durablement ;
- un système de pompage autonome (sur le plan de l'alimentation électrique) doit être prévu à l'intérieur du bâtiment pour assurer la vidange régulière de l'eau qui aura malgré tout pénétré.

Les nombreuses conditions qui entourent l'efficacité de cette stratégie la rendent inadaptée voire dangereuse dans un certain nombre de cas, car elle incite les habitants à demeurer dans leur logement pendant la crue. "Résister" n'est raisonnable que pour des crues de faible hauteur (moins d'un mètre) et de courte durée (moins de 48 heures). Au-delà, le risque de défaillance des dispositifs d'obturation est à craindre et les personnes présentes à l'intérieur du bâtiment peuvent être mises en péril. Que la hauteur d'eau dépasse celle des batardeaux et les occupants se retrouvent pris au piège d'un bâtiment entouré d'eau qui se met à se remplir.

Cependant, certains projets intègrent cette stratégie dès la phase de conception de bâtiments nouveaux, en privilégiant des rez-de-chaussée étanches, sous forme de "caisson" notamment. Envisager des bâtiments capables de résister à l'inondation avec des matériaux et des structures adaptées à l'immersion de manière permanente apporte une certaine alternative aux limites évoquées ci-dessus, telles que la nécessité d'un savoir-faire pour monter les dispositifs temporaires ou la présence de personnel disponible au moment de l'alerte.

Projet Iseldoks à Doetinchem, De Urbanisten (Pays-Bas)

Ce projet de restructuration urbaine dans la ville de Doetinchem vise à transformer une ancienne zone industrielle en un quartier qui comptera environ 420 nouveaux logements.

Un canal est envisagé au cœur du quartier pour créer un bras secondaire du fleuve. Une partie des logements sera donc construite sur une île et il est prévu que leur rez-de-chaussée et sous-sol soient hermétiques à l'eau, c'est-à-dire conçus comme des "caissons étanches".



Coupe du futur canal en période normale.



Coupe du futur canal en cas de crue annuelle.



Coupe du futur canal en cas de crue décennale.

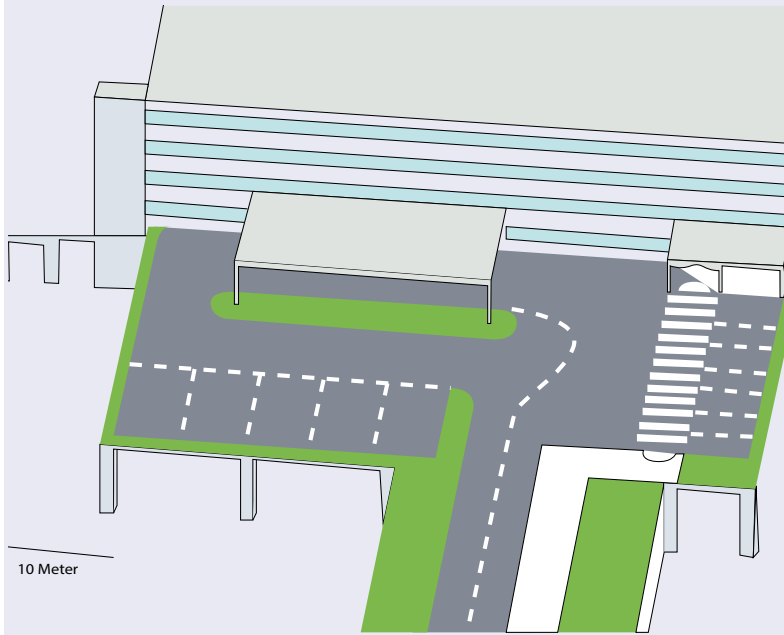


Coupe du futur canal en cas de crue millénaire.

Crédit : De Urbanisten.

Source : www.urbanisten.nl

Projet d'hôpital à Rotterdam Deltasync (Pays-Bas)



Projet d'hôpital, accès aux urgences sur pilotis.
Crédit : Deltasync.

Sources : De Graaf Rutger, *Flood proofing hotspot buildings for water resilient cities*, DeltaSync BV & Rotterdam University of Applied Sciences, présentation le 10 juillet 2012.

L'objectif de ce projet est de construire un nouvel hôpital au sein de la zone endiguée de l'aéroport de Rotterdam. Ce nouveau bâtiment se situera donc dans la zone inondable, à proximité d'habitations exposées au risque d'inondation.

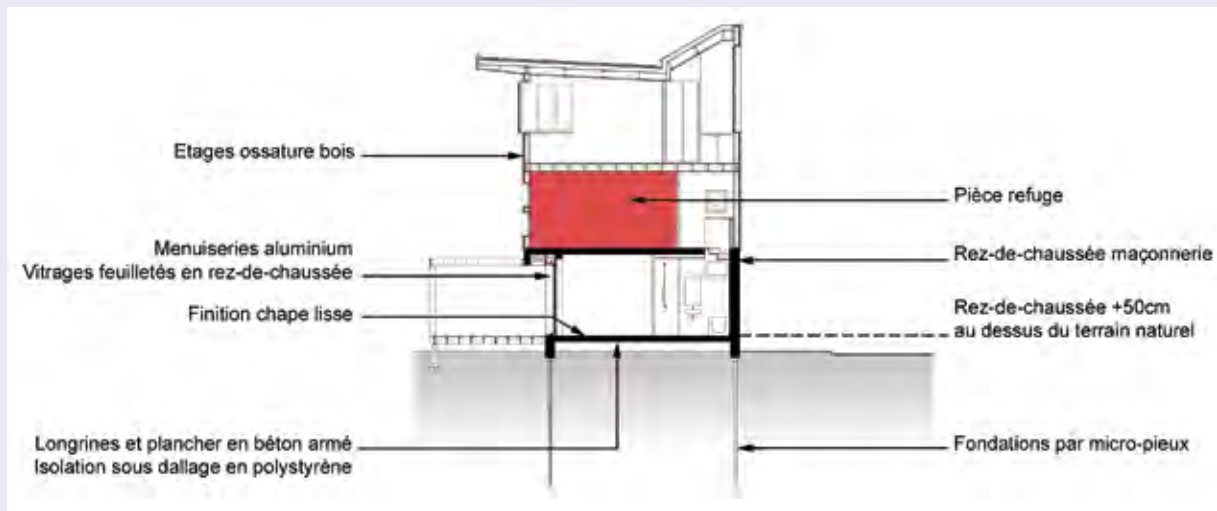
Bien qu'il existe un système de protection de la zone (une digue entoure le terrain), le projet prévoit de construire l'hôpital avec un rez-de-chaussée hermétique et des accès sur pilotis pour rendre la construction résiliente aux inondations, en cas de rupture de la digue. Dans cette situation, seul l'accès aux urgences réalisé sur pilotis sera possible et permettra aux habitants de rejoindre l'hôpital.

c) La stratégie "céder"

Dans certaines circonstances, il est inenvisageable de surélever le logement au-dessus de l'eau (stratégie "éviter") et il devient impossible d'empêcher l'eau d'entrer dans le bâtiment (stratégie "résister"). La seule solution qui demeure alors est de "céder", c'est-à-dire de laisser l'eau pénétrer dans le bâtiment et de prendre en contrepartie toutes les dispositions nécessaires à la limitation de l'endommagement et à la réduction du délai de retour à la normale. Cette stratégie de dernier recours, qui consiste à "céder" à l'eau, est la seule possible dès lors qu'il s'agit d'un logement existant, exposé à des hauteurs d'eau de plus d'un mètre ou d'une durée supérieure à 48 heures. Pour des logements neufs, cette stratégie est envisageable à condition de prendre en compte la surélévation des équipements électriques ou électroménagers, l'utilisation de matériaux les moins altérables possibles ou facilement remplaçables, la restauration des ouvrages du bâtiment et des abords extérieurs, etc. Elle laisse des dommages résiduels parfois importants, d'autant plus que les caractéristiques de l'inondation sont sévères.

Exemple de logement répondant à la stratégie “céder” à Saint-Pierre-des-Corps (France)

À Saint-Pierre-des-Corps, la totalité de la commune est soumise aux crues de la Loire et au risque de rupture du système d'endiguement. La dernière inondation date de 1856, avec une hauteur d'eau de deux mètres sur une bonne partie de la commune, excepté sur le plateau ferroviaire qui est surélevé. Du fait que le territoire de la commune est quasiment 100 % en zone inondable et compte tenu des besoins en logements, la municipalité envisage la question de l'exposition des populations au risque en réfléchissant aux conditions dans lesquelles les gens peuvent habiter dans le val de Loire. L'exemple du logement ci-dessous a été conçu par l'architecte Jean-Yves Barrier et se révèle intéressant dans la mesure où il intègre la stratégie “céder” à l'inondation et envisage même le logement comme un lieu de refuge pendant la phase de gestion de crise et la reconstruction.

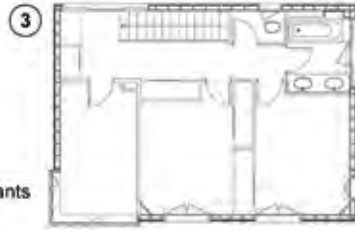


Crédit : Jean-Yves Barrier, architecte.

Le logement est conçu sur 3 niveaux : un rez-de-chaussée construit à 50 cm au-dessus du terrain naturel (prescription figurant dans le PPRi), conçu pour être inondé en cas de hauteur d'eau plus importante, avec des techniques et matériaux compatibles avec la présence de l'eau : menuiseries (tours des fenêtres) en aluminium, béton lissé, maçonnerie, fondations en micro-pieux, suppression des cloisons endommageables et création d'un style “loft”. Le deuxième niveau, ou premier étage, est suffisamment surélevé pour ne pas être inondé et est considéré comme une pièce refuge en cas d'inondation. Les matériaux utilisés peuvent être diversifiés et complémentaires par rapport à ceux du rez-de-chaussée (bois par exemple). Le troisième niveau, ou deuxième étage, contient les chambres des enfants, salle d'eau, etc. Le choix des matériaux est également plus large pour ce niveau non inondable.

Les usages à l'intérieur du bâtiment sont intéressants : il est prévu que les parents habitent le rez-de-chaussée et les enfants le deuxième étage. L'étage intermédiaire apparaît comme étant multifonctionnel : il peut servir de salle de jeux et d'espace commun en période normale, ainsi que de lieu de refuge pour les parents, en cas d'inondation du rez-de-chaussée.

DEUXIEME ETAGE
Niveau haut logements Enfants
1/200e



③ Etage en ossature bois.

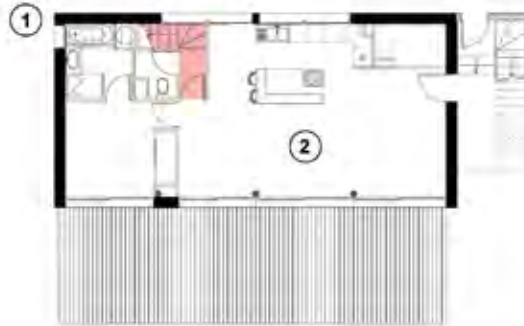
PREMIER ETAGE
Niveau bas logement Enfants
1/200e



③ Etage en ossature bois.

④ Pièce refuge, accessible par l'intérieur, directement depuis le logement en rez-de-chaussée.

REZ-DE-CHAUSSEE
Logement Parents
1/200e



① Rez-de-chaussée en maçonnerie. Utilisation de matériaux imputrescibles sol chape ciment lissé, menuiseries aluminium... etc.

② Cloisonnements minimum au rez-de-chaussée, réalisés en plaques de plâtre hydrofuges pour les pièces humides.

Source : Jean-Yves Barrier, architecte.

Référentiel de travaux de prévention du risque d'inondation dans l'habitat existant, ministère de l'Égalité des territoires et du Logement, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, juin 2012.



Crédit : ministère de l'Égalité des territoires et du Logement, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.



Ce travail, mené sous l'égide de deux ministères et associant de nombreux experts et professionnels du secteur de la construction, valorise les travaux préalables menés par le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et le CEPRI dans le domaine de la réduction de la vulnérabilité des logements existants en cas d'inondation. Ce référentiel technique national de mesures de prévention du risque inondation sur l'habitat existant est à destination principale des professionnels du bâtiment et de l'aménagement. Il ne constitue pas une norme et n'a aucune portée réglementaire. Il a vocation à éclairer les professionnels de la conception et de la construction de l'habitat dans leur sélection de mesures pour orienter le maître de l'ouvrage des travaux.

La réalisation de ce référentiel a reposé sur une liste existante de 45 mesures d'adaptations techniques qui avaient été identifiées par un groupe de travail animé par le CEPRI de 2008 à 2009, dont certaines sont applicables dans le cadre de la stratégie "céder". Le document présente une liste de travaux visant à réduire les dommages au logement existant en cas d'inondation, à améliorer la sécurité des résidents et à diminuer les délais de retour au logement.

Il est composé de 18 fiches travaux à visée pragmatique. Un outil de sélection des fiches est proposé à l'utilisateur lui permettant de retenir facilement celles étant les plus adaptées au contexte qu'il rencontre. Cinq études de cas sont présentées en fin d'ouvrages afin de faciliter la compréhension du référentiel. Il regroupe l'essentiel des informations techniques et réglementaires utiles aux professionnels et fournit également des informations de pertinence économique pour la plupart des mesures.

Source : ministère de l'Égalité des territoires et du Logement, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Référentiel de travaux de prévention du risque d'inondation dans l'habitat existant, juin 2012, disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Referentiel-de-travaux-de.html>

3. La mise en œuvre du principe

Sur le plan technique

Les stratégies d'adaptation au risque ne peuvent être indifféremment appliquées à toutes les situations. Un logement soumis à 50 cm d'eau pendant quelques heures n'appelle pas une stratégie technique identique à un logement exposé à plus de 1,5 mètre d'eau pendant une semaine. Chacune des stratégies présente des particularités qui rendent leur mise en application concrète plus ou moins compatible selon les situations rencontrées.

Dans les quartiers en renouvellement urbain, il est envisageable de mettre en œuvre la stratégie "éviter" en surélevant les bâtiments. Mais il est également possible de concevoir des bâtiments générant peu de dommages en recourant aux stratégies "céder" et "résister". Il existe cependant un dénominateur commun à l'ensemble des trois stratégies : aucune d'elle n'est adaptée aux zones potentielles de courant fort (zone de rupture d'ouvrage de protection, zone préférentielle de drainage des vals et de transport d'objets flottants...). Dans de telles zones, la recherche d'une réduction des dommages susceptibles d'être subis par les logements rendrait nécessaire la mobilisation de techniques constructives extrêmement lourdes et coûteuses si elles devaient être généralisées. Or, il s'agit de techniques qui ne sont pas majoritairement employées aujourd'hui par les constructeurs et qui n'auraient pas de sens économiquement.

Il existe également un manque de filières et de données sur les matériaux. La sélection des mesures techniques pertinentes doit aussi se faire en fonction des filières de construction et de rénovation déjà existantes. Si certaines mesures ne sont pas mises en place aujourd'hui en France, contrairement à d'autres pays européens, cela peut s'expliquer par une absence de marchés et d'entreprises spécialisées susceptibles de les mettre en œuvre.

En outre, le choix de matériaux adaptés à l'immersion prolongée peut s'avérer difficile à l'heure actuelle. Les études sur le comportement des matériaux au contact de l'eau ne sont pas basées sur des conditions aussi sévères (au niveau de la durée d'immersion en particulier) que celles correspondant à des inondations de plaine. Pour les professionnels de la construction, "l'eau est l'ennemi du bâtiment". Le problème de la résistance du bâtiment à l'eau ne se pose donc pas : le bâtiment doit en principe être construit hors d'atteinte de l'eau.

Sur le plan économique

En termes de rentabilité économique, la stratégie "éviter" semble plus rentable que "résister", elle-même plus rentable que "céder". Toutefois, cela dépend de la fréquence de l'inondation. Recourir à la stratégie "céder" est justifié d'un point de vue économique lorsque les inondations sont fréquentes, voire très fréquentes (inférieures à 1/25 ans). Concernant la stratégie "résister", celle-ci est rentable pour des crues relativement fréquentes (inférieures à 1/100 et 1/50 ans). Enfin, la stratégie "éviter" semble être la plus rentable économiquement pour les zones soumises à des crues relativement peu fréquentes (de probabilité 1/400 ans, et plus)³¹.

Par ailleurs, adapter des bâtiments destinés à un usage collectif sera également plus rentable que pour un usage individuel (amortissement des surcoûts). Le renouvellement d'un quartier ou la reconversion d'une friche industrielle permet d'envisager des bâtiments adaptés dont les surcoûts pourront être intégrés au projet dans son ensemble. Ce type de projet constitue l'occasion de se poser la question de la construction d'infrastructures tenant compte du risque d'inondation en fonction de l'aléa connu sur le secteur.

31 - CEPRI (2009).

Concernant la rentabilité d'un projet proposant des bâtiments adaptés au risque au sein d'une zone endiguée, la question reste posée. Est-il rentable d'adapter un logement si les dispositifs de protection "effacent" les effets de crues fréquentes, qui rendraient justement une des trois stratégies rentable en l'absence de digues ? L'exemple de Rotterdam démontre avec force que, même derrière des digues protégeant l'agglomération pour des événements rares (1/10 000 ans), des projets proposant des bâtiments publics adaptés (hôpitaux) sont envisagés, pour pallier le risque éventuel d'une rupture de digue.

Sur le plan social

Si l'adaptation des logements est plutôt positive du point de vue de l'intérêt général, il existe pourtant de nombreux freins sociaux. On observe en effet une certaine réticence chez la population à adapter les logements au risque d'inondation. Plusieurs arguments sont avancés, notamment le fait que cela ne fasse pas partie de notre culture (par exemple les logements flottants sont peu développés en France par rapport aux Pays-Bas) ou bien la pression psychologique que peut représenter le fait de vivre dans un logement adapté qui rappelle sans cesse à ses occupants la présence du risque³².

Par ailleurs, pour répondre à la problématique de la densification dans les zones de renouvellement urbain, ce sont souvent des projets de logements collectifs qui sont proposés. Or, en France, c'est la maison individuelle, voire de plain-pied dans certaines régions, qui est plébiscitée. Celle-ci est difficilement compatible avec les objectifs actuels de développement des centres urbains denses et peut générer une vulnérabilité du territoire importante (a fortiori si aucun niveau refuge n'existe). Un changement d'ordre culturel est donc nécessaire pour orienter la demande sociale dans un sens nouveau.

Sur le plan politique

L'adaptation d'un bâtiment n'est pas possible dans tous les cas de figure (zones de courant fort par exemple). Et lorsque l'adaptation est possible techniquement, elle peut être délicate à justifier politiquement. Par exemple, il peut être difficile politiquement d'encourager l'adaptation des logements dans des zones qui ont fait l'objet de travaux de protection récents (digues). Cela pourrait laisser penser aux habitants que les protections n'ont pas été dimensionnées convenablement, ce qui politiquement est une posture délicate à tenir.

Sur le plan juridique

On constate que les outils réglementaires actuels du droit de l'urbanisme ou de la construction et de l'habitation prennent en compte le risque d'inondation. Toutefois, ils apparaissent insuffisants pour inciter à une évolution des pratiques actuelles vers des formes architecturales adaptées au risque. Ils sont même incompatibles entre eux dans certaines situations : normes concernant les personnes à mobilité réduite, prévention des inondations, performance énergétique des bâtiments, construction parasismique... ce qui nécessite de bien les connaître et de les appliquer de manière adéquate.

Parallèlement, les outils relevant du domaine de l'assurance n'incitent pas les individus et les pouvoirs publics à agir de manière plus responsable qu'ils ne le font aujourd'hui, concernant l'adaptation du bâti en zone inondable. Dans les zones couvertes par un PPRN, des prescriptions peuvent être imposées aux particuliers et pouvoirs publics pour réduire la vulnérabilité des bâtiments par exemple. Cependant, lorsque ces travaux sont réalisés, cela n'a aucune conséquence sur le montant de la surprime ou de la franchise dans le cadre du système d'indemnisation basé sur la garantie catastrophes naturelles.

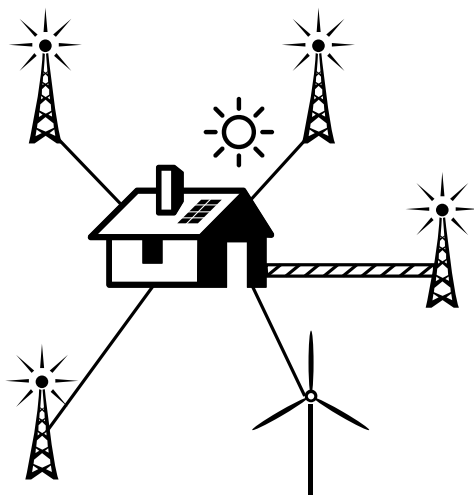
32 - DEFRA at al., *Developing the evidence base for flood resistance and resilience* (2008).

Autrement dit, l'adaptation du bâti nécessite aujourd'hui une volonté politique forte, ce qui signifie aussi un engagement plus important alors que les outils pour la mettre en œuvre sont parfois insuffisants.

Sur le plan paysager

D'un autre point de vue, l'adaptation des logements modifie le paysage urbain, ce qui peut être positif ou négatif en fonction des choix retenus et de la sensibilité de chacun. Toutefois, cela représente un véritable atout pour aller vers un renouvellement urbain au sens propre : la ville se reconstruit sur elle-même et propose une nouvelle image à ses habitants. Tenir compte de l'inondation implique de "vivre avec" l'eau. Cela peut inclure une modification de l'identité urbaine, mais stimule assurément la créativité des architectes et urbanistes. Le volet paysager peut même représenter un moyen d'atténuer les réticences culturelles et psychologiques évoquées plus haut s'il parvient à proposer un équilibre entre les attentes de la population et les projets architecturaux adaptés à la présence du risque d'inondation.

5. ASSURER LE MAINTIEN DU FONCTIONNEMENT DES RÉSEAUX TECHNIQUES : PRINCIPE 5



Source : CEPRI.

1. Objectifs

Les réseaux occupent une place particulière dans le système urbain. En reliant les différentes composantes du système, les réseaux techniques constituent une partie fondamentale pour le fonctionnement de la ville. Ils supportent les flux des différents services essentiels pour les personnes, les activités et les institutions : transports urbains, fourniture d'énergies (électricité, gaz...), alimentation en eau potable, assainissement, évacuation des eaux pluviales, télécommunications, etc. Cette diversité est nécessaire au fonctionnement de la ville en période normale et le demeure en période d'inondation, comme lors du retour à une situation normale, pour permettre aux installations et services de la ville de continuer à fonctionner. La continuité du service public remplie par ces réseaux est également une obligation pour leurs gestionnaires³³.

La notion de continuité du service public

Les citoyens ont des besoins reconnus et permanents. Le service public doit donc fonctionner de manière régulière, sans interruption. C'est un service minimal en toute circonstance. Si le fonctionnement régulier des services n'est pas assuré, la responsabilité des autorités administratives pourra être engagée.

En cas d'inondation, la personne en charge du service public doit donc assurer la continuité du service sauf en cas de force majeure (événement qui est indépendant du service, qui n'était pas prévisible et qui est irrésistible) ou de circonstances exceptionnelles (l'autorité administrative décide d'interrompre le service pour des motifs d'intérêt général, ces mesures restant proportionnelles à la gravité de la situation). En règle générale donc, toute personne qui exploite ou participe au bon fonctionnement d'un service qui répond à un intérêt général doit le faire sans interruption dudit service.

Source : CEPRI, Bâtir un plan de continuité d'activité d'un service public, Les collectivités face au risque d'inondation, avril 2011.

33 - Article L732-1 du Code de la sécurité intérieure : "Les exploitants d'un service, destiné au public, d'assainissement, de production ou de distribution d'eau pour la consommation humaine, d'électricité ou de gaz, ainsi que les opérateurs des réseaux de communications électroniques ouverts au public prévoient les mesures nécessaires au maintien de la satisfaction des besoins prioritaires de la population lors des situations de crise [...]."

En cas d'inondation, l'endommagement des réseaux peut se manifester de différentes manières : soit une partie seulement du réseau est atteinte (ex. : une station d'épuration touchée impacte tout le réseau d'assainissement), soit l'ensemble du réseau est impacté (ex. : les routes sont impraticables). La difficulté réside bien souvent dans le fait que les réseaux sont interdépendants au sein d'un système urbain et l'endommagement de l'un aura des répercussions sur le fonctionnement des autres. Par exemple, un transformateur électrique emporté par une inondation ne peut plus alimenter en énergie une usine de traitement d'eau potable, ni les stations de relevage (permettant l'intervention des pompiers en cas d'incendie), ni les usines de traitement des déchets...

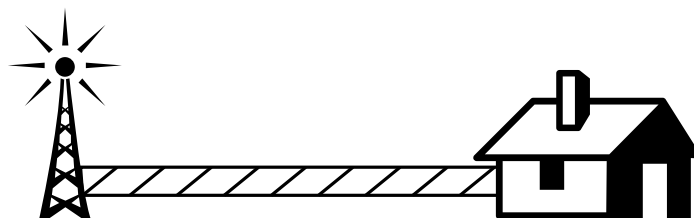
L'atteinte des réseaux a également des conséquences indirectes en cas d'inondation. Le fonctionnement des réseaux ne pouvant plus être maintenu comme en période normale, cela contribue à aggraver les effets de l'inondation. Par exemple, le non-fonctionnement du réseau d'assainissement en cas d'atteinte de la station d'épuration par l'inondation provoque un rejet des eaux usées en dehors du système habituel, ce qui peut causer des pollutions, contribuer à créer un risque sanitaire important.

Si les réseaux sont interdépendants, ils ont également la particularité de mailler le territoire d'une ville. Ainsi, en cas d'inondation, la ville dans son ensemble risque d'être impactée, même si l'inondation ne concerne qu'une faible partie de son territoire. Par exemple, lors des inondations à Prague en 2002, le métro a été sévèrement touché et n'a pu être remis en service qu'au bout de 6 mois. Cela a eu des conséquences non négligeables sur l'ensemble de la ville, privant les usagers habituels de leur mode de transports et ayant donc une incidence sur les déplacements domicile-travail, la fréquentation touristique, etc. Les dommages ont été estimés à 240 millions d'euros³⁴.

La vulnérabilité des réseaux à l'inondation a donc des répercussions très importantes sur le fonctionnement d'une ville. Celle-ci pourra être impactée dans son fonctionnement au moment de l'inondation, mais également après. Le délai de retour à une situation normale sera d'autant plus long que les réseaux ne pourront plus assurer les services nécessaires aux services essentiels (alimentation des établissements de santé en énergies et eau potable ; infrastructures de transports opérationnelles permettant l'évacuation des personnes fragiles et l'approvisionnement de la population réfugiée en nourriture, médicaments et autres, par exemple). La capacité des réseaux à supporter l'inondation et reprendre un fonctionnement normal après la crise dépend de plusieurs critères.

- La résistance ou robustesse des réseaux.

La capacité fonctionnelle de ces réseaux est liée à leur résistance physique à l'inondation : résistance des canalisations à la pression, l'étanchéité de certaines installations (postes et transformateurs électriques notamment), gaines de câbles étanches, etc. ;

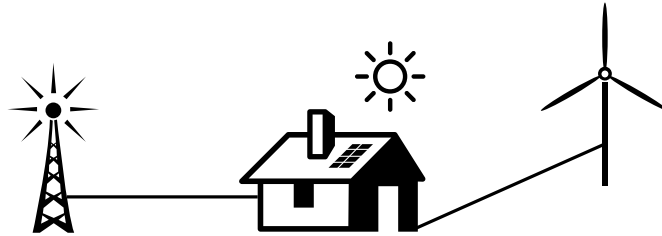


La robustesse des réseaux. Source : CEPRI.

³⁴ - Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations, Paris, novembre 2005.

- La diversification.

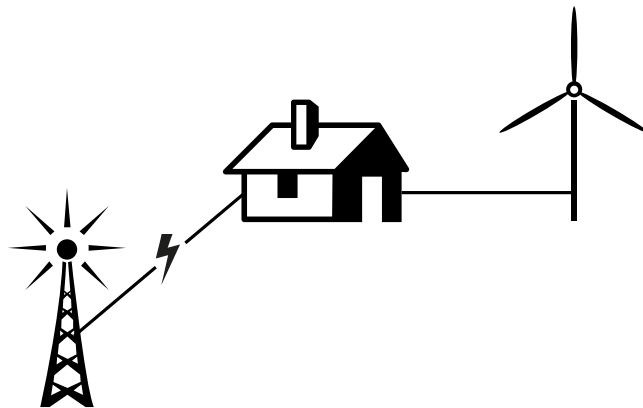
Il s'agit d'avoir plusieurs types de sources différentes pour un même réseau afin d'assurer une certaine dispersion du risque et d'avoir des possibilités de substitution. Par exemple, concernant les réseaux d'énergie, implanter des éoliennes, recourir aux panneaux solaires, à la biomasse, etc. Le but est de ne pas être dépendant d'une seule source afin de pouvoir compter sur plusieurs types d'alimentation en cas d'atteinte à l'un d'entre eux par l'inondation ;



La diversification des réseaux. Source : CEPRI.

- L'autonomie.

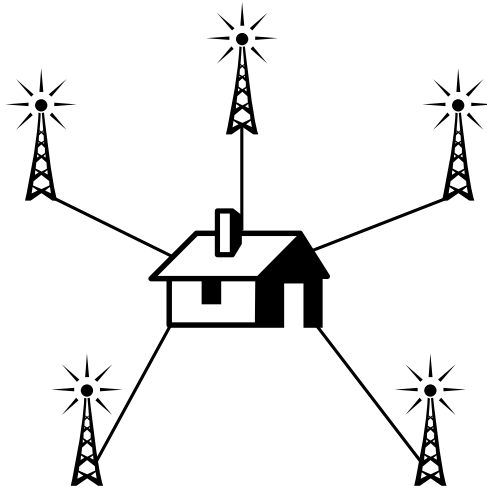
Cela concerne la capacité d'un réseau à pouvoir fonctionner, sans dépendre de son environnement immédiat. Une atteinte à un transformateur électrique par exemple aura moins d'impact sur le fonctionnement des services hospitaliers d'un établissement de santé si ceux-ci sont équipés de panneaux solaires ou autres, etc. ;



L'autonomie des réseaux. Source : CEPRI.

- Le maillage du territoire.

Il consiste à implanter, à plusieurs endroits sur le territoire, des sources du même type de réseau pour permettre une interconnexion de ces réseaux. Par exemple, pour l'eau potable, cela implique de ne pas avoir seulement un point d'alimentation pour l'ensemble de la ville. Plusieurs points d'alimentation pourraient être répartis sur l'ensemble de la ville, à la fois dans les zones soumises à une inondation potentielle et dans les zones non inondables. Cela peut aussi être le doublement d'un réseau afin de le sécuriser.



Le maillage des réseaux. Source : CEPRI.

Certains réseaux, du fait de leur fonction essentielle pour l'alimentation des autres, apparaissent plus critiques que d'autres : les réseaux d'énergies et les réseaux de transports. C'est pourquoi ils ont été retenus pour illustrer ce principe, qui présente moins des types d'aménagement particulier qu'une organisation fonctionnelle des réseaux basée sur les quatre critères énumérés.

2. Types d'organisations fonctionnelles

a) Réseaux d'énergies

Cette catégorie est l'une des plus importantes dans le schéma d'interdépendance des réseaux techniques en général. Les réseaux d'énergies (d'électricité en particulier) sont indispensables au fonctionnement d'autres réseaux (télécommunications, transports...) et par conséquent primordiaux pour les systèmes urbains dans lesquels nous vivons³⁵. Il est donc indispensable d'intégrer dans l'aménagement de la ville des solutions pour éviter une perturbation du service, problématique pour la ville en cas d'inondation et même après un tel évènement.

- La robustesse des réseaux d'énergies

Diverses mesures peuvent être mises en œuvre pour protéger la continuité de la production énergétique, comme surélever les transformateurs électriques par exemple. La robustesse des réseaux de distribution d'énergie situés généralement en sous-sol doit également être prise en compte, d'autant plus que, dans les quartiers nouveaux, la résilience de ces réseaux à l'inondation peut être intégrée dès la phase de conception du projet de construction.

35 - Le contrat de service public entre l'État et EDF du 24 octobre 2005, prévu par l'article 1^{er} de la loi du 9 août 2004 n° 2004-803 relative au service public de l'électricité et du gaz et aux entreprises électriques et gazières, contient l'un des engagements suivant : "Garantir, d'ici 2015, en cas de panne importante suite à un aléa climatique, la ré-alimentation dans les 12 heures qui suivent la fin de l'aléa climatique de sites accessibles à la population."

Une des préconisations concernant la sécurisation du réseau électrique face aux inondations du Rhône est le renforcement mécanique de la chaîne d'alimentation (moyenne tension, basse tension) ou en un renforcement mécanique basse tension associé à la préparation de la mise en place d'un groupe électrogène. En basse tension, la technique la plus fréquemment utilisée sera le remplacement des fils nus par des câbles isolés torsadés³⁶.

- La diversification des réseaux d'énergies

La création de nouvelles sources d'énergies dans le but de réduire la dépendance à l'énergie fossile ou nucléaire (et la facture énergétique) se révèle intéressante dans le cadre de la réduction de la vulnérabilité des villes à l'inondation. Plus les sources d'énergies seront diversifiées et autonomes les unes par rapport aux autres, plus la résistance globale de la ville sera renforcée en permettant aux activités dépendantes de l'électricité de continuer à fonctionner pendant et après la crise.

Il existe aujourd'hui une grande variété de techniques existantes ou en cours d'expérimentation : éolienne et hydrolienne, géothermique, hydraulique, biomasse, solaire thermique, photovoltaïque, hydroélectricité, gaz provenant de déchets urbains solides (décharges), biogaz, gaz provenant des stations d'épuration, cogénération... Cette diversité permet d'envisager des quartiers aux sources d'énergies multiples permettant de pallier les défaillances de certaines qui seraient difficilement compatibles avec l'inondation.

Quelques exemples

- *L'énergie solaire* : pendant l'inondation, la production d'électricité peut être assurée grâce à la situation des panneaux photovoltaïques au-dessus des plus hautes eaux connues (par exemple sur les toitures des bâtiments). Les équipements complémentaires (onduleur, batterie d'accumulateurs, etc.) doivent aussi être situés au-dessus des PHEC.

- *L'énergie éolienne* : l'énergie est produite par le vent grâce à un dispositif aérogénérateur (éolienne ou moulin à vent). Le "centre de production" de cette énergie doit faire l'objet de mesures d'adaptation à l'inondation, s'il se trouve dans une zone à risque, pour renforcer la robustesse du système.

- *L'énergie hydroélectrique* : les centrales produisant de l'énergie hydroélectrique ("micro-hydro", petite centrale pouvant produire jusqu'à 100 kW) utilisent l'écoulement naturel des cours d'eau. Ces dispositifs peuvent donc fonctionner en période normale comme en période de post-inondation, a priori de façon continue. Ces installations peuvent fournir de l'électricité à une maison isolée ou une petite communauté ou sont parfois reliées à des réseaux de distribution d'électricité de plus grande ampleur.

Source : Baca Architects, BRE and Fulcrum Consulting, Halcrow Group Ltd, Cyril Sweet and LDA Design (2009).

36 - DIREN Rhône-Alpes, Démarche de réduction de la vulnérabilité des réseaux aux inondations du Rhône, Fiches-Actions, 2008.

Exemple du projet d'aménagement du quartier Felnex à Hackbridge (Royaume-Uni)

Ce projet vise à implanter, sur un ancien site industriel de 13 hectares, un complexe de logements, commerces, installations publiques prenant en compte les principes du développement durable ("zéro carbone", trames verte et bleue...). Ces nouvelles constructions seront alimentées par des sources d'énergies renouvelables : panneaux photovoltaïques, biomasse, pompes à chaleur et mini-centrale hydroélectrique de production de moins de 100 kW. La particularité du projet réside dans le fait que ces installations ont vocation à fonctionner pendant l'inondation et lors de la phase du retour à une situation normale. En effet, les types d'énergies renouvelables ont été choisis en fonction de leur compatibilité avec le risque d'inondation, puisqu'ils sont situés dans la zone inondable et devront fonctionner de manière autonome en cas de débordement de la rivière Wandle ; la durée d'immersion étant estimée à moins d'une journée, avec des hauteurs d'eau relativement faibles (de 0,5 m à 0,9 m en prenant en compte le changement climatique).



Situation des dispositifs de production d'énergies renouvelables. En jaune : des panneaux solaires ; en pointillés : le réseau des pompes à chaleur (GSHPs - Ground Source Heat Pump Systems) ; en rouge : la mini-centrale hydroélectrique. Crédit : © Baca Architects.



En cas d'inondation d'occurrence centennale, le quartier sera alimenté en électricité grâce aux panneaux photovoltaïques situés sur les toits inclinés des bâtiments et la mini-centrale hydroélectrique (à droite) qui continuera à fonctionner. Source : © Baca Architects.

Source : Baca Architects, BRE and Fulcrum Consulting, Halcrow Group Ltd, Cyril Sweet and LDA Design (2009).

Cette diversification des sources d'énergie permet de répondre à plusieurs objectifs : elle favorise la réduction de la vulnérabilité d'un seul type de réseau en cas d'inondation et répond également aux objectifs du développement durable : limiter les émissions de gaz à effets de serre et la facture énergétique, en réduisant la dépendance aux énergies fossiles et en favorisant le développement d'énergies renouvelables.

- L'autonomie des réseaux d'énergies

Pour préserver une certaine autonomie en cas de panne d'alimentation électrique provoquée par des inondations, les groupes électrogènes sont souvent utilisés, mais leur dépendance en carburants est aussi une contrainte, qui limite son usage à court terme.

Groupe EDF, Document de référence 2010³⁷ (France)

“Lors des inondations dans le Var le 15 juin 2010, qui ont provoqué des avaries sur les réseaux de transport et de distribution, privant d'électricité plus de 200 000 clients, ERDF a mobilisé 500 agents dont 130 agents de la FIRE venus d'autres régions. 500 groupes électrogènes de forte puissance ont été déployés avec des moyens logistiques considérables, représentant au total 2 000 tonnes de matériel. ERDF a rétabli l'alimentation de tous les clients en moins de trois jours. Des travaux très importants ont été réalisés pour retrouver la fiabilité des équipements de réseau.”

Exemple du projet d'aménagement de l'aéroport Rotterdam-The Hague Emergency Airport à Rotterdam (Pays-Bas)

Ce projet s'inscrit dans le programme de recherche européen FloodProbe et vise à proposer des solutions pour réduire les coûts de dommages aux installations vitales (hot spot), en cas d'inondation, que sont les aéroports notamment. Dans cet exemple, l'aéroport déjà existant a pour but d'être aménagé de manière à devenir un lieu de refuge en cas d'inondation. Celui-ci est envisagé, malgré un système de protection ambitieux, en cas de rupture des digues ceinturant le site, dont l'une sert également d'autoroute. Cet ambitieux projet, en cours de réflexion pour le moment, envisage d'implanter des éoliennes à côté de l'autoroute (sur la digue) et prévoit également un dispositif de valorisation énergétique des déchets générés sur le site. En effet, en cas d'inondation, l'aéroport aura vocation à accueillir les populations des quartiers voisins (environ 50 000 personnes) et devra être en capacité d'être autonome énergétiquement.

Source : Deltasync ; De Graaf Rutger, présentation le 10 juillet 2012 ; Minnema P.A., Anema K.A., Jacobs J., Zevenbergen C., De Graaf R.E., Rotterdam-The Hague Emergency Airport, in Comprehensive Flood Risk Management Research for Policy and Practice, Klijn and Schweckendiek, 2012 ; Minnema P.A., Anema K.A., Jacobs J., Zevenbergen C., De Graaf R.E., Rotterdam-The Hague Emergency Airport, 2013.

- Le maillage des réseaux d'énergies

Les réseaux d'énergies ont pour objectif d'assurer la desserte complète d'une ville à travers un maillage du territoire urbain. Le principe consiste à interconnecter les réseaux entre eux. En cas d'inondation, ce maillage permet ainsi d'éviter des coupures en alimentation électrique de longue durée.

37 - EDF Groupe, Document de référence 2010, disponible sur : http://medias.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Finance/Publications/Annee/2011/ddr2010/EDF_DDR2010_final_vf.pdf

b) Réseaux de transports

Les réseaux de transports et de mobilité urbaine représentent également une composante essentielle du système urbain, en permettant les déplacements des habitants via les routes, les voies piétonnes et trottoirs, les pistes cyclables, les lignes de chemin de fer, lignes de métro (enterrées) et tramway, les déplacements fluviaux ou maritimes (navettes), les aéroports. De nombreux services peuvent être associés à ces réseaux : transports en commun (dont les transports scolaires), ramassage des déchets, etc.

En cas d'inondation, l'objectif est d'assurer la continuité de ces services et la mobilité des habitants pendant et après l'évènement. Ces réseaux sont nécessaires en période de crise pour permettre aux habitants d'évacuer la zone sinistrée si besoin, de permettre l'intervention des services de secours et les ravitaillements en nourriture, matériel, médicaments ou autres. Durant la phase de retour à une situation normale, il est primordial que les gens puissent revenir chez eux, transporter des matériaux pour les travaux éventuels, emporter leurs déchets, etc.

- La robustesse des réseaux de transports

Des types d'aménagement particulier peuvent être identifiés pour permettre de maintenir une certaine mobilité : la surélévation des axes stratégiques (routiers, ferrés), afin de les rendre inaccessibles à l'eau. Il s'agit le plus souvent de construire de nouvelles voies routières ou piétonnes de telle sorte que celles-ci soient hors d'eau en cas d'inondation, à l'aide de remblais, passerelles, coursives, etc. La construction de remblais est néanmoins soumise à la loi sur l'eau avec, le plus souvent, une obligation de transparence hydraulique, évitant que les remblais jouent le rôle de digues.

Le projet du quartier Zollhafen à Mayence (Allemagne)



GmbH Mainz. Port de Mayence avant travaux. Crédit : Zollhafen. Crédit : Zollhafen GmbH Mainz.

Ce projet est consacré à la réhabilitation de friches industrialo-portuaires en plein centre de la ville de Mayence, sur une superficie de 30 ha le long du Rhin. Depuis le déménagement du port en 2010, il est prévu d'y construire des bâtiments résidentiels (1 400 logements), des bureaux (4 000 emplois), une marina, des espaces verts, afin d'accueillir environ 2 500 habitants. L'ensemble

du secteur est soumis au risque d'inondation par débordement du Rhin et la ville de Mayence est protégée par des digues dimensionnées pour un aléa ayant une occurrence de 1/200. Le quartier Zollhafen ne se trouvant pas derrière le système d'endiguement, les constructions seront adaptées au risque d'inondation. Concernant les voiries, il est prévu de surélever la voirie principale qui dessert le quartier, au-dessus de la crue bicentennale. Cela permettra de garantir une accessibilité du quartier en cas d'inondation pour les véhicules de secours notamment. Les voiries secondaires seront réalisées à un niveau inférieur (niveau du sol actuel). En cas de crue plus importante, des voies d'évacuation sécurisées ont été identifiées par la ville de Mayence : les routes seront marquées par une signalétique particulière afin d'indiquer lesquelles seront praticables. La ville a élaboré un plan pour les services techniques et médicaux indiquant ces routes et la signalétique employée.



Projet d'aménagement du quartier Zollhafen à Mayence. Crédit : Zollhafen GmbH Mainz.

Source : Zollhafen GmbH Mainz ; Webler Heinrich, Reconversion du Zollhafen Mayence, un développement résilient aux inondations, présentation à Mayence, novembre 2013 ; Redeker Cornelia, Zollhafen Mainz Bauherrenhandbuch Modellprojekt Hochwassergepasstes Bauen, juillet 2010.

Toutefois, la surélévation peut présenter des défaillances le jour où l'inondation est plus importante que l'évènement pour lequel la voie a été surélevée. C'est pourquoi, il peut être intéressant de penser la question des réseaux de transports comme celle des réseaux d'énergies via la diversification.

- La diversification des réseaux de transports

Plus les modes de transports seront divers, moins la population sera dépendante d'un seul mode de transport (le plus souvent la voiture). "La mobilité résulte en définitive des interrelations entre l'offre de transport, la localisation de l'habitat et la répartition spatiale des activités [...]. Au-delà de la réorganisation spatiale, la mobilité durable s'illustre par une offre de transports organisée et diversifiée³⁸."

Il est d'autant plus important de penser la diversification des transports comme une question importante en cas d'inondation de la ville, et durant la phase de retour à la normale, car les routes peuvent être endommagées et leur reconstruction peut prendre du temps, ce qui nécessite pour les habitants de se reporter sur d'autres modes de transports. De même que la perte ou l'endommagement de son véhicule au moment de l'inondation incitera à se reporter sur un autre mode de transport ou au covoiturage par exemple.

38 - Comité 21, Comité français pour le développement durable, Vers un nouveau modèle urbain. Du quartier à la ville durable, Victoires Éditions, 2011.

Le métro de New York après le passage de l'ouragan Sandy en novembre 2012 (USA)

Suite au passage de l'ouragan Sandy à New York en novembre 2012, le métro a été inondé, l'eau ayant pénétré dans le réseau par les bouches d'accès et le chantier de Ground Zero. La ville a été déclarée en "état d'urgence transports" et a demandé à la compagnie gestionnaire du réseau métro et bus de renoncer à sa tarification pour permettre de limiter les embouteillages sur les routes deux jours après l'évènement. En période normale, le réseau accueille plus de 5 millions de voyageurs par jour et dessert une zone où vivent 2/3 des habitants de l'État de New York. Plusieurs lignes et stations de métro ayant été endommagées et malgré la réouverture de certaines d'entre elles au bout d'une semaine, les transports étaient complètement saturés du fait de la fréquence et de la vitesse réduite des rames. Le coût total des dommages sur le réseau métropolitain a été estimé à environ 5 milliards d'euros³⁹.

Cet objectif de diversification des réseaux de transports favorisant le redémarrage du système urbain après une inondation s'inscrit pleinement dans l'objectif de développement durable prôné dans les lois Grenelle, visant à faire évoluer les pratiques de mobilité (diversification et utilisation de moyens de transport durables et sécurisés).

Exemple du projet d'aménagement du quartier Felnax à Hackbridge (Royaume-Uni)

Au sein de ce quartier seront construits 1 800 logements, 7 450 m² de surfaces commerciales, des services (2 500 m² pour des services de santé, d'éducation, autres services publics). Un des objectifs de l'aménagement du quartier est de réduire la dépendance à la voiture, soit un véhicule pour 20 personnes. L'idée est d'introduire un "car club" (location de véhicules) pour réduire les places de parking et ainsi consacrer ces surfaces à des espaces récréatifs, de loisirs. Il est également envisagé de créer des voies piétonnes et des pistes cyclables pour favoriser une interconnexion "douce" entre les espaces de loisirs.



Centre-ville : espace partagé entre les véhicules, les piétons, les cyclistes.

Espace multifonctionnel : parkings, marchés, manifestations publiques, équipements sportifs.

Diversification des réseaux de transports en lien avec la création d'espaces de loisirs multifonctionnels. Crédit : © Baca Architects.

Sources : Baca Architects, BRE and Fulcrum Consulting, Halcrow Group Ltd, Cyril Sweet and LDA Design (2009).

39 - Haut Comité français pour la défense civile (HCFDC), Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN), Retour d'expérience suite à l'ouragan Sandy sur la côte est des États-Unis, juillet 2013.

Les réseaux de transport sont multifonctionnels par essence : les voies de circulation permettent par exemple plusieurs usages (transport de marchandises, trajets domicile-travail, loisirs, circulation de véhicules motorisés ou non, itinéraires d'évacuation...). En cas d'inondation, ils constituent un volet primordial de la gestion de crise, puis du retour à la normale, puisqu'ils permettent aux services de secours de circuler, d'évacuer des personnes fragiles ou blessées, de ravitailler la zone sinistrée en matériel, nourriture, etc.

- L'autonomie des réseaux de transports



Ce critère appliqué aux réseaux de transports signifie que la mobilité des habitants en cas d'inondation doit pouvoir continuer d'être assurée. Ce critère rejoint celui de la diversification : plus les types de mobilité seront divers, plus la capacité des personnes à pouvoir se déplacer par elles-mêmes sera favorisée. L'exemple des passerelles permet de répondre à ce besoin d'autonomie en cas de crise. C'est un critère essentiel en cas de crise pour permettre aux habitants d'un quartier qui doivent évacuer de le faire par eux-mêmes sans attendre une intervention des services de secours par exemple. L'autonomie en matière de déplacements s'inscrit ainsi dans le cadre posé par la loi de 2004 plaçant le citoyen comme un acteur à part entière de sa propre sécurité en cas d'inondation⁴⁰.

Marina au sein du quartier Westhafen à Francfort (Allemagne). Crédit : CEPRI.

- Le maillage des réseaux de transports

Pour le réseau routier par exemple, "l'utilisation du maillage consiste à mettre en place des déviations permettant de desservir les principaux points du territoire concernés par les inondations. La déviation de la circulation est organisée par les différentes communes en tenant compte du réseau routier global et des mesures prises par les communes avoisinantes, afin d'éviter des ruptures d'itinéraires"⁴¹. À Hambourg, la réflexion sur le maillage des réseaux de transports a été intégrée dans le cadre du projet HafenCity, où plusieurs itinéraires possibles d'évacuation depuis l'île ont été envisagés.

Exemple des ponts "Kibbelstegbrücke" à Hambourg (Allemagne)

Cet ensemble d'ouvrages d'art s'inscrit dans le projet de réhabilitation d'une partie du port de Hambourg, le projet HafenCity. Ce quartier de 157 ha, situé face au centre-ville, est aujourd'hui en cours de réalisation. Il est destiné à accueillir 12 000 nouveaux habitants au sein de 5 800 unités d'habitations et 45 000 emplois.

Située dans le delta de l'Elbe, non loin de la mer du Nord, la ville (qui est aussi un État à part entière de la République fédérale d'Allemagne) est fortement soumise aux risques d'inondation. L'aménagement résilient de ce nouveau quartier a la particularité de présenter des infrastructures situées au-dessus des plus hautes eaux : toutes les nouvelles routes sont surélevées de 7,5 jusqu'à 8,3 m au-dessus du niveau de la mer. De nouveaux ponts prenant en compte cette problématique ont été construits et les anciens ont été rénovés et surélevés. Une seule exception concerne une voie permettant de relier le nouveau quartier au quartier historique de Speicherstadt.

⁴⁰ - "La sécurité civile est l'affaire de tous. Tout citoyen y concourt par son comportement." Loi n° 2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile.

⁴¹ - Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations, Paris, novembre 2005.

L'exemple du système de ponts "Kibbelstegbrücke" est original, car il a été conçu pour demeurer fonctionnel en période de crise. En période normale, il permet aux piétons et cyclistes de circuler entre la ville et le quartier HafenCity. En cas d'inondation, il permet l'accès au quartier des véhicules de secours et les habitants du quartier peuvent également l'emprunter pour se rendre au point le plus haut du centre-ville.

Cet ensemble de ponts de 220 m de long est constitué de six ponts piétonniers en acier soudé. Il s'agit d'une conception similaire à celle des ponts historiques en acier du quartier Speicherstadt, conservant ainsi le style architectural du quartier ancien. Les ponts sont recouverts sur leurs 4,3 m de large de planches en bois. Ils ont été achevés en 2002, pour un coût s'élevant à 5,3 millions d'euros.

Source : HafenCity Hamburg, Essentials Quarters Projects, octobre 2011, disponible sur : http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12981/pdf/zusammengefasst_Internet_Projekte_engl_final.pdf

3. La mise en œuvre du principe

Sur le plan technique

De nombreux procédés de production d'énergies existent aujourd'hui et certains peuvent être compatibles avec la présence de l'inondation, voire bénéficier de la présence de l'eau pour leur fonctionnement (hydroélectricité par exemple). Cependant, il peut être compliqué d'implanter certaines installations dans les centres urbains denses (éoliennes notamment), d'où l'intérêt de considérer cette question dès la conception d'un projet de renouvellement urbain en zone inondable. De même, l'autonomie des réseaux d'énergies (en particulier électrique) constitue un principe encore difficile à mettre en pratique aujourd'hui.

Sur le plan économique

La diversification des **réseaux d'énergies** permet de réduire la vulnérabilité de l'ensemble du réseau et cela a un impact sur le montant des dommages potentiels causés par une inondation. Le fait de diversifier les sources d'énergies a également des répercussions sur le délai de retour à la normale et sur les coûts générés pour la ville au moment de sa reconstruction.

Cela permet également de réduire la facture énergétique, en répondant aux objectifs du développement durable (économies d'énergies, bâtiments moins gourmands en énergies fossiles, complémentarité des sources d'énergies alternatives). La diversité des réseaux d'énergies permet aussi de rendre le système énergétique plus apte à affronter la volatilité des prix des énergies (le prix des énergies fossiles entraînant celui des énergies renouvelables). Répondre à ces deux objectifs au sein d'un seul projet de renouvellement urbain permet de réduire les coûts de l'adaptation du quartier au risque d'inondation et de la facture énergétique, imposée par la législation actuelle.

Concernant les **réseaux de transports**, ceux-ci sont multifonctionnels par essence. Les voiries, par exemple, permettent des usages divers quelle que soit la période (normale, crise, post-crise). Concevoir ces réseaux de manière à ce qu'ils puissent continuer à assurer la mobilité des personnes en cas d'inondation et après celle-ci présente des avantages économiques pour la ville dans son ensemble. Certains procédés peuvent coûter cher au moment de leur réalisation (la surélévation de voiries, l'implantation de passerelles flottantes ou suré-

levées sur plusieurs centaines de mètres, la réalisation de pistes cyclables sur plusieurs kilomètres...). Pour autant, c'est l'ensemble de ces aménagements qui contribuera à réduire la vulnérabilité de la ville et le temps de retour à la normale suite à une inondation de manière significative.

Sur le plan politique

Assurer le fonctionnement des **réseaux d'énergies** répond à un besoin de la population qui vit dans la zone inondée, qui peut ainsi bénéficier de réseaux autonomes en cas de crise et surtout après la crise. Plus globalement, l'atteinte aux réseaux pouvant avoir un impact sur la ville dans son ensemble, cette réponse concerne l'ensemble de la population et vise l'intérêt général. Le fait de concevoir une diversification des réseaux répond aussi à une demande de la population en faveur d'un engagement des pouvoirs publics dans le développement durable et l'innovation technologique au service de la réduction de la dépendance aux énergies traditionnelles (fossiles, nucléaires notamment). Le fait de concevoir une diversification des réseaux de transports répond aussi à une demande de la population en faveur d'un engagement des pouvoirs publics dans le développement de mobilités durables (voies piétonnes, pistes cyclables par exemple).

Cela suppose de concevoir l'aménagement d'une ville différemment, en pensant la question des réseaux comme une priorité en cas de crise et indispensable pour permettre à la ville de rebondir après une inondation. La difficulté est d'envisager tous ces réseaux en interdépendance les uns par rapport aux autres et devant pouvoir continuer à fonctionner en permanence. Cela nécessite d'associer les différents gestionnaires de réseaux, ce qui peut représenter une difficulté, ces professionnels n'ayant pas forcément l'habitude de travailler ensemble sur la question de la résilience des réseaux face au risque d'inondation.

Sur le plan juridique

L'implantation de certains types d'énergies peut poser quelques complications d'ordre administratif, par exemple, la délivrance d'un permis de construire pour de petites éoliennes en milieu urbain est-elle compatible avec le classement au titre des monuments historiques de certains sites ?

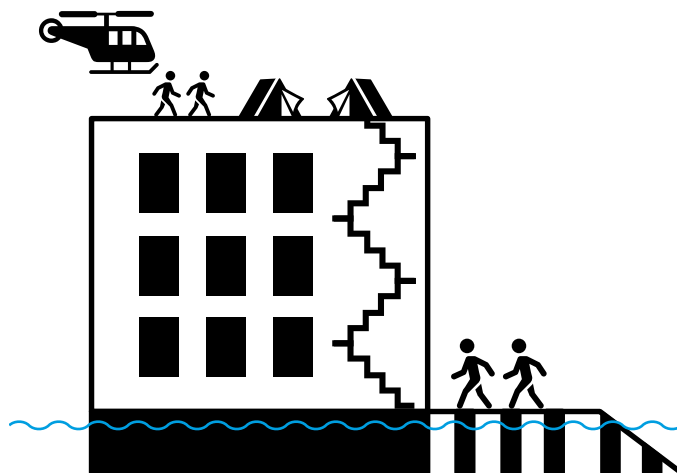
Lorsque le procédé de la surélévation est utilisé pour les routes par exemple (remblais), le principe de transparence hydraulique et les procédures découlant de la loi sur l'eau peuvent parfois compliquer la conception de ce type de réseau. Une compensation peut être intégrée au projet en fonction des autres infrastructures ou constructions prévues sur le site (par exemple compensation du remblai effectué par un déblai de même volume, etc.).

Sur le plan paysager

La conception de réseaux d'énergies résistants, diversifiés, autonomes, maillant le territoire d'un site en renouvellement urbain, pose la question de l'intégration paysagère de ces réseaux. Certains types d'énergies peuvent modifier le paysage urbain d'une ville ou d'un quartier (centrale hydroélectrique, éolienne...). Cela constitue une occasion de penser l'aménagement de ces réseaux aussi comme une composante de l'espace urbain qui peut être visible, ou non, aux yeux de la population.

De même, la conception d'un réseau de transport diversifié modifie les modes de déplacements des habitants au sein de la ville. Cela peut constituer une occasion de créer un paysage urbain nouveau, différent, visant à harmoniser les divers types de mobilités au sein d'un même espace urbain.

6. CRÉER DES “ESPACES INTELLIGENTS” POUR LA GESTION DE CRISE ET LA RECONSTRUCTION : PRINCIPE 6



Source : CEPRI.

1. Objectifs

Ce principe a pour objectif de faciliter la gestion de crise et le retour à la normale d'une ville soumise à des risques d'inondation. Il consiste à installer en zone inondable, au plus près des populations sinistrées, des structures permettant l'accueil des populations pendant la crise et le redémarrage du territoire impacté le plus rapidement possible après une inondation. Le qualificatif "intelligent" implique que ces infrastructures ont une fonction principale en période normale et sont capables de basculer vers une ou plusieurs fonctions de gestion de crise en cas d'inondation, et même lors du retour à une situation normale.

Ce principe se fonde sur le fait que lorsqu'un ordre d'évacuation est donné en cas d'inondation, on ne peut pas compter sur le fait que 100 % des habitants d'une ville soumise au risque d'inondation soient partis à temps. Soit parce qu'ils ne suivent pas l'ordre d'évacuer et préfèrent rester chez eux, parfois même au détriment de leur propre sécurité, soit parce qu'ils n'ont pas eu le temps d'évacuer avant l'arrivée de l'inondation. C'est notamment le cas de l'évacuation dite horizontale, qui consiste à faire partir de la zone inondable la population y résidant. Les habitants de ces secteurs à risque se dirigeront donc vers des lieux situés en dehors de la zone inondable pour y séjourner jusqu'à ce que les conditions de sécurité soient à nouveau réunies pour leur permettre de revenir chez eux (en fonction de la durée d'immersion, accessibilité de la zone sinistrée, etc.).

Aux États-Unis, lors de l'ouragan Sandy en octobre 2012, malgré l'ordre d'évacuation donné, "certaines personnes (environ 15 %) situées dans une zone à risque important ont refusé de quitter leur logement, pensant que l'ouragan et l'alerte étaient surdimensionnés. La majorité des maisons de retraite n'ont pas pu évacuer à cause de la date trop tardive de l'ordre d'évacuation⁴²."

L'évacuation verticale, qui consiste à faire monter les habitants au-dessus du niveau des plus hautes eaux, représente une piste pour pallier ces inconvénients. Cela signifie que les gens peuvent monter à l'étage de leur logement si celui-ci est au-dessus des plus hautes eaux

⁴² - Haut Comité français pour la défense civile (HCFDC), Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) [2013].

ou bien les autorités peuvent leur demander de rejoindre un lieu situé à proximité de leur logement, dans la zone inondable, leur permettant d'être au-dessus des plus hautes eaux (immeuble par exemple).

Si ce type d'évacuation peut permettre aux habitants d'une zone inondable de trouver un lieu d'accueil au sein de la zone inondable, encore faut-il que ce lieu d'accueil soit adapté à la fois à un usage en période de crise et de reconstruction, mais également à une immersion plus ou moins prolongée en fonction des caractéristiques de l'inondation.

Certes, l'utilisation de lieux d'accueil pour l'hébergement temporaire des habitants d'un ou plusieurs quartiers, lors d'une inondation et durant la phase de retour à une situation normale, n'est pas nouvelle. Les communes ont souvent mis à disposition de populations en détresse, de manière préventive ou totalement improvisée, leurs écoles, collèges, lycées, gymnases ou infrastructures sportives. Ce sont d'ailleurs les lieux les plus souvent répertoriés dans les Plans communaux ou intercommunaux de sauvegarde (PCS) pour servir de refuge en cas d'inondation. Mais, bien souvent, ces infrastructures d'accueil ne sont pas suffisamment adaptées à leur fonction de refuge.

L'exemple de la gestion de crise lors de l'ouragan Katrina à La Nouvelle-Orléans (USA).

L'ouragan Katrina atteint le secteur de La Nouvelle-Orléans le lundi 29 août 2005. Environ 77 000 personnes n'ont pas évacué la ville au moment où l'inondation se produit. Une partie d'entre elles se réfugie au stade de football du Superdome prévu par les autorités comme "refuge de dernier recours" (pour les personnes n'ayant pu évacuer à temps). Plus de 35 000 personnes s'y entassent au plus fort de la crise. D'autres rejoignent spontanément le Convention Center, lieu élevé et proche de la zone inondée mais qui, lui, n'avait pas été prévu comme refuge. Ce site accueille jusqu'à 23 000 personnes. Enfin, entre 6 000 et 7 000 personnes rejoignent la partie surélevée d'une autoroute pour se mettre à l'abri des eaux.

Si le Superdome a été aménagé a minima et équipé en eau et nourriture pour accueillir une partie de la population pendant deux ou trois jours, il n'a pas été prévu pour accueillir plusieurs dizaines de milliers de personnes pendant une semaine. Les conditions de vie sanitaires et de sécurité se dégradent rapidement, générant une grave crise humanitaire, alors que le stade commence également à être inondé.

Source : CEPRI, L'évacuation massive des populations, Les territoires face à l'inondation, mai 2014.

Ces lieux sont destinés à accueillir la population pendant une période qui se limite le plus souvent à la durée de l'inondation et n'ont pas été conçus pour héberger des gens plus longtemps ou pour des usages différents (soins médicaux, lieux de stockage de matériels divers...). C'est donc l'improvisation de la fonction de refuge en cas d'inondation qui pose problème dans les deux cas, a fortiori dans le cas de l'évacuation verticale où le bâtiment doit également être adapté à une immersion plus ou moins longue due à une inondation.

Ce principe consistant à mettre en place des lieux de refuge adaptés dans des zones de renouvellement urbain inondables tente d'apporter une réponse lorsque l'évacuation horizontale n'est pas envisageable.

Il pallie la vulnérabilité de certains quartiers inondables déjà construits dans lesquels l'adaptation des logements existants n'est pas possible pour diverses raisons (surcoûts trop élevés, maisons anciennes, valeur patrimoniale des constructions et du quartier qui ne permet pas la surélévation d'un étage par exemple, etc.). Pour réduire la vulnérabilité des personnes vivant dans ces zones sans toucher au bâti existant, il peut être envisagé d'implanter

dans ces quartiers vulnérables de nouveaux bâtiments, adaptés à l'inondation et conçus pour accueillir la population de ces quartiers en cas de crise.

Cela peut sembler aller à l'encontre du principe visant à localiser les biens et activités en fonction de leur vulnérabilité, pour lequel il est préférable de ne pas implanter certaines infrastructures particulièrement vulnérables ou du moins indispensables au fonctionnement d'une ville dans les zones inondables. Dans le cadre de ce principe, il s'agit de concevoir uniquement des lieux, espaces ou infrastructures adaptés au risque d'inondation dans le quartier concerné, afin d'apporter une solution pour réduire la vulnérabilité d'un quartier déjà construit. Ces lieux sont pensés et conçus pour être inondés. Dans les secteurs de la ville où les bâtiments existants ne peuvent pas être adaptés à l'inondation, ce type d'infrastructure peut être implanté pour répondre à un objectif de solidarité. Les habitants pourront utiliser ce lieu au moment de la crise voire de la post-crise pour reconstruire le quartier, bien que leur logement n'ait pas été adapté à l'inondation par exemple.



Réflexion sur l'implantation d'un hôpital adapté aux inondations, capable d'accueillir une partie de la population vivant à proximité en cas d'inondation, à Rotterdam. Crédit : Deltasync.

2. Types d'aménagements possibles

a) Le concept de refuge adapté ("smart shelter")

En règle générale, les bâtiments servant de refuge n'ont pas été conçus pour assurer cette fonction et l'hébergement des populations en période d'inondation s'effectue souvent dans des lieux d'accueil qui ne sont pas toujours adaptés à ce besoin d'urgence. Des standards ont été développés, essentiellement en Amérique du Nord, pour la conception de lieux d'hébergement temporaire qui ont vocation à assurer cette fonction.

Les standards de certaines institutions d'Amérique du Nord (USA, Canada)

Plusieurs critères à prendre en compte pour concevoir un lieu de refuge efficace pour accueillir des populations en cas de crise ont été développés par le gouvernement du Canada et la Federal Emergency Management Agency (FEMA, USA), un organisme du gouvernement fédéral américain responsable de la gestion de crise. Parmi ceux-ci, on peut noter :

- **le critère démographique et social** : il faut prendre en compte la densité de population d'un quartier à évacuer et ses caractéristiques sociales (langues étrangères à considérer pour faciliter la communication), ses religions (besoins spécifiques), les catégories d'âge et de sexe, la taille des ménages et le fait qu'ils possèdent un véhicule ou non, le taux de criminalité du quartier (les vols et le vandalisme doivent faire partie de la stratégie de mise en sécurité de la population lors d'une évacuation). Certaines catégories d'habitants peuvent compliquer l'évacuation (caractéristiques physiques et mentales des habitants, les consommateurs de drogues et alcool, etc.)⁴³ ;

- **le critère environnemental** : il concerne à la fois les pollutions éventuelles auxquelles peuvent être exposés les habitants au moment de l'évacuation (itinéraires d'évacuation, lieux de refuge) et les conditions météorologiques de l'évacuation (épisode de grand froid, neige...) qui peuvent avoir des conséquences importantes sur les choix des itinéraires d'évacuation et des lieux de refuge⁴⁴ ;

- **la durée de l'hébergement temporaire** : il peut s'agir d'un séjour de quelques jours à une semaine (court terme) ou d'un séjour se prolongeant jusqu'à la phase de retour à la normale, de quelques semaines (long terme)⁴⁵ ;

- **la capacité d'accueil minimale** : selon la durée de l'hébergement, la Croix-Rouge américaine recommande de prévoir des surfaces minimales pour accueillir les réfugiés pendant et après une crise allant de 1,86 m² par personne pour un séjour à court terme à 3,72 m² par personne pour un séjour à long terme⁴⁶ ;

- **la surface utile pour la fonction d'abri d'urgence dans les bâtiments multifonctionnels** : le code américain (ICC-500, 2008⁴⁷) indique plusieurs calculs possibles pour définir la surface utile d'un bâtiment servant d'abri d'urgence. Par exemple, les cinémas ayant une surface utile de 50 % (meubler fixe important) sont moins intéressants que les lycées (65 % de surface utile), eux-mêmes ayant une surface utile moins importante que les salles de conférences (85 % de l'aire brute du plancher dans le cas des espaces ouverts avec des meubles non fixés).

Une méthode alternative pour le calcul de la surface de plancher utile est de calculer la surface en soustrayant de la superficie brute de plancher les cloisons et les murs, les colonnes, les objets fixes ou mobiles (meubles, matériel ou autre objet) qui dans des conditions normales ne peuvent pas être supprimés ;

- **la surface utile pour le stockage de l'équipement de survie** : il correspond à environ 10 % de la surface utile totale du bâtiment⁴⁸. Dès la conception du bâtiment, il faut prévoir les espaces destinés au stockage des lits, des denrées alimentaires (de longue durée, du type boîtes de conserves, nourriture lyophilisée, etc.), eau en bouteilles, médicaments, etc. On peut considérer les hôtels comme des abris d'urgence, puisqu'ils ont déjà l'équipement de base (lits et nourriture stockés pour les clients). Mais ils sont rarement conçus de manière adaptée à l'inondation ;

43 - Beaulieu P., Ph. D., Marchand J.-F., MUP, Guide de planification stratégique des opérations d'évacuation en milieu hautement urbanisé, Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile, gouvernement du Canada, 2001.

44 - CEPRI, L'évacuation massive des populations, Les territoires face à l'inondation, mai 2014.

45 - Federal Emergency Management Agency (FEMA), Risk Management Series- Design Guide for Improving Critical Facility Safety from Flooding and High Winds, January 2007.

46 - Blom E.T., Zevenbergen C., Gersonius B., Van Son E., Smart shelter strategies - cost-effective-flood preparedness, in Comprehensive Flood Risk Management Research for Policy and Practice, Klijn and Schweckendiek, 2012.

47 - International Code Council (ICC) and the National Storm Shelter Association (NSSA), Standard for the Design and Construction of Storm Shelters, ICC 500-2008, août 2008.

48 - Blom E.T., Zevenbergen C., Gersonius B., Van Son E. (2012).

- les usages du lieu de refuge : le lieu de refuge peut avoir d'autres usages, hors période d'inondation, qui doivent néanmoins être compatibles avec la fonction de refuge. Par exemple, un bâtiment conçu comme un abri d'urgence et ayant la fonction de collègue en période normale posera moins de difficultés en période d'inondation qu'un bâtiment intégrant une piscine municipale en période normale, qui ne pourra a priori pas remplir sa fonction de refuge sécurisé en cas de crise, bien que la surface couverte soit importante.

Des chercheurs européens ont développé un concept complémentaire, celui de "smart shelter"⁴⁹ (refuge adapté). Celui-ci consiste à envisager l'adaptation à l'inondation d'un bâtiment existant, ayant déjà un usage identifié en période normale, ou la construction d'un nouveau bâtiment conçu de manière adaptée à l'inondation et à plusieurs usages différents dont celui de refuge potentiel.

La notion de multifonctionnalité est au cœur de ce concept : un bâtiment est conçu ou adapté pour répondre à des usages qui diffèrent dans le temps (période d'inondation/période normale) et dans l'espace (accessibilité permanente ou autonomie en cas d'inondation). Elle permet également de justifier les coûts liés à l'adaptation de ce type de bâtiment, estimés à environ 22 % de plus qu'un bâtiment n'ayant pas cette fonction de refuge⁵⁰. Le fait d'avoir plusieurs usages permet au bâtiment adapté d'être utilisé de manière permanente et donc, dans une certaine mesure, de rentabiliser les coûts liés à sa construction et à son entretien courant. Le bâtiment doit donc être conçu dès le départ comme un lieu d'hébergement potentiel en cas d'inondation. Situé dans la zone inondable, il doit donc également être adapté à l'inondation. Il peut s'agir d'un bâtiment déjà existant ou bien d'un bâtiment neuf qui serait adapté à l'inondation.

L'inconvénient d'un bâtiment déjà existant, adapté pour servir de lieu de refuge dans une zone inondable, est sa capacité d'accueil, qui peut être plus faible qu'un bâtiment neuf conçu pour accueillir un nombre de personnes connu dès sa conception. Il semble donc préférable d'envisager la construction de bâtiments neufs ayant intégré leur usage de refuge dès la conception.

On peut considérer plusieurs typologies architecturales : le bâtiment surélevé (sur pilotis, sur remblais, sur parkings inondables par exemple) et le bâtiment avec un rez-de-chaussée hermétique. Les bâtiments flottants et amphibies peuvent être exclus, car ils ont souvent une surface réduite, difficilement compatible avec une fonction de refuge. Le bâtiment devra répondre à un certain nombre de contraintes posées par sa situation en zone inondable : les forces hydrostatiques, les forces hydrodynamiques (la vitesse, les vagues, la turbulence), l'impact des déchets emportés par l'inondation, les érosions localisées...

L'adaptation d'un bâtiment ayant une vocation de refuge est essentielle dans un quartier vulnérable au risque d'inondation et comprend également l'adaptation des réseaux qui lui permettent de continuer à fonctionner et de demeurer accessible en cas d'inondation⁵¹. La conception du bâtiment peut par exemple prévoir l'indépendance fonctionnelle des réseaux techniques : alimentation en eau potable, assainissement, énergie électrique, télécommunications (surtout dans le cas des abris d'urgence pour un accueil à plus long terme). La dimension multifonctionnelle est importante dans la conception d'un tel bâtiment et de ses réseaux car elle permet de répondre à plusieurs objectifs. Par exemple, la présence de panneaux solaires peut couvrir une partie, voire la totalité, des besoins en électricité pendant une crise et contribue également à réduire la dépendance aux réseaux publics de distribution d'électricité en période normale, ce qui rend le fonctionnement du bâtiment globalement moins vulnérable.

49 - La notion de "smart shelter" a fait l'objet de nombreux articles dans le cadre du projet européen de recherche FloodProBE (Technologies for Flood Protection of the Built Environment, 2009-2013), financé par la Commission européenne. Son objectif est le développement de technologies et d'outils visant à améliorer la résilience des zones urbaines contre les inondations. Le projet aborde les thèmes de recherche du programme-cadre 7 (ENV.2009.3.1.5.1), in Escarameia M., Stone K., Van M., Zevenbergen C., Morris M. (octobre 2013).

50 - Blom E.T., Zevenbergen C., Gersonius B., Van Son E. (2012). La FEMA estime quant à elle les surcoûts entre 1 et 8 % par rapport à un bâtiment ayant un usage normal.

51 - Se reporter aux principes concernant l'adaptation des bâtiments et celui concernant l'adaptation des réseaux au risque d'inondation.

Exemple du projet du quartier Felnex à Hackbridge (Royaume-Uni)

À Hackbridge, une ville située au sud de Londres, le quartier Felnex est un ancien site industriel abandonné de 13 hectares.

Parmi les bâtiments nouveaux envisagés, une école est prévue au centre du quartier. La zone dans laquelle se situera l'école est aujourd'hui soumise à aléa peu fréquent de 1/1 000 ans, qui selon l'Environment Agency devrait être considéré comme un aléa centennal en prenant en compte le changement climatique. La construction de bâtiments résidentiels est autorisée dans cette zone s'ils sont adaptés. Il est donc prévu que l'école soit adaptée au risque d'inondation, selon la stratégie "éviter" (située au-dessus des plus hautes eaux, soit environ 0,9 m). Elle pourra servir de refuge pour accueillir la population du quartier en cas d'inondation.

L'intérêt du projet réside dans le fait d'implanter cette école dans la zone inondable, en lien avec le centre de production énergétique situé à proximité. Elle pourra servir de refuge mais aussi de point central pour la gestion du système de production d'énergie, le ravitaillement, la gestion de crise et l'information à la population du quartier en cas d'inondation.



Le point correspond à la situation centrale de l'école dans le futur quartier. Crédit : © Baca Architects.

Sources : Baca Architects, BRE and Fulcrum Consulting, Halcrow Group Ltd, Cyril Sweet and LDA Design (2009).

b) La notion de services essentiels implantés en zone inondable

Les infrastructures vitales, ou “hot spot”, sont des bâtiments qui sont essentiels dans le fonctionnement d’une zone urbaine. Ils sont d’autant plus importants qu’ils sont et doivent demeurer en interrelation constante avec le système urbain pour le faire fonctionner⁵².

Des chercheurs européens ont identifié des bâtiments et infrastructures en fonction de l’échelle de leur fonctionnement⁵³ :

- régionale ou plus largement : les aéroports, les gares, les lieux de stockage d’énergies (centrales nucléaires...), les réseaux de communication, les lieux de distribution d’alimentation, les hôpitaux spécialisés ou régionaux, les centres financiers (banques centrales, Bourse),
- communale ou intercommunale : les stations de métro, les réseaux électriques (centrales EDF...), les réseaux de communication, les lieux de traitement de l’eau potable, les stations d’épuration, les hôpitaux, les banques,
- locale, du quartier : les arrêts de bus, les postes et transformateurs électriques, les bureaux et postes de police, les casernes de pompiers, les agences des banques, les cliniques.

Ces infrastructures sont indispensables en période normale pour assurer le bon fonctionnement d’une ville. En période d’inondation, elles conservent leur importance, qui se trouve même accrue par les besoins de la population au moment de la post-crise : soutien et protection par les services de secours, soins par les services de santé, besoins vitaux en eau et nourriture, sans compter les réseaux électriques qui permettent de maintenir le fonctionnement de services de soins spécialisés par exemple.

Pour continuer à fonctionner en cas d’inondation, elles doivent faire l’objet d’une adaptation ou bien d’une délocalisation. Mais au sein d’un tissu urbain dense, il n’est pas toujours possible de délocaliser toutes les infrastructures vitales en dehors des zones inondables. Les projets de renouvellement urbain situés en zone inondable peuvent représenter une opportunité pour réfléchir à l’implantation au plus près des populations sinistrées, d’infrastructures spécifiques conçues de manière adaptée à l’inondation dans ces zones soumises au risque.

La question des coûts, à la fois de construction d’une infrastructure adaptée dans une zone inondable, et de son entretien pour que le bâtiment adapté puisse continuer à fonctionner de manière efficace le jour où l’inondation se produit, est centrale. Pourtant, bien qu’il semble difficile de réduire ces coûts, la notion de multifonctionnalité permet d’envisager une réduction des coûts de la gestion d’une inondation, dans la mesure où l’adaptation du bâtiment et les usages multiples qui peuvent en être faits peuvent réduire les coûts liés à une évacuation notamment.

Envisager différents usages pour des bâtiments qui sont considérés comme “vitaux” pour une ville est une hypothèse qui s’inscrit dans la continuité du concept de “smart shelter”. On peut concevoir un bâtiment ayant une fonction vitale pour la ville, adapté à l’inondation, et envisager que ce bâtiment assurera une ou plusieurs autres fonctions utiles en cas d’inondation, comme la fonction de refuge par exemple.

52 - United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), *Rendre les villes plus résilientes, Manuel à l’usage des dirigeants des gouvernements locaux*, 2012.

53 - Escarameia M., Stone K., Van M., Zevenbergen C., Morris M. (octobre 2013).

Construire en zone inondable pour réduire la vulnérabilité de l'existant, un paradoxe ?

Exemple de la réflexion menée par la Ville d'Orléans sur le site du Val Ouest, 2014 (France)

Le site du Val Ouest se situe en rive gauche de la Loire, dans le val d'Orléans. Sa situation à la fois proche du centre-ville et à mi-chemin entre Loire et Loiret (affluent) lui confère une attractivité certaine. Il est envisagé d'y implanter des logements (entre 300 et 500 logements), des activités, des équipements publics, des espaces verts et des formes d'agriculture urbaine.

Le site est exposé au débordement de la Loire en cas de crue ayant une période de retour d'environ 170 ans (mais le niveau de sûreté actuel des digues issu de l'étude de dangers des digues souligne un risque d'inondation par défaillance dès la crue 70 ans), notamment en cas de rupture des digues protégeant l'ensemble du Val d'Orléans (la dernière inondation majeure du val datant de 1866). Pour faire face à ce risque, les autorités locales ont notamment mis en place un plan d'évacuation massive des 60 000 personnes résidant dans le val.

En cas d'inondation, le site pourrait ainsi être impacté par des hauteurs d'eau comprises entre 1 et 2,5 m, incompatibles avec une urbanisation traditionnelle. Il est prévu d'implanter des logements, locaux d'activités et équipements publics dans les secteurs où les hauteurs d'eau et les vitesses potentielles sont modérées. L'immersion durera cependant plusieurs jours (une semaine environ).

En lien avec les services de l'Etat, la ville a engagé une réflexion pour définir une urbanisation sur ce secteur qui soit adaptée au risque d'inondation, et qui permette également de réduire la vulnérabilité des constructions existantes à proximité du site. La conception du quartier ne se limite donc pas au périmètre du projet lui-même, mais prend en compte la vulnérabilité des habitations environnantes, plus vulnérables.



Répartition des 200 habitations de plain-pied entourant le site dans un rayon de 1km autour du site. Un bâtiment spécifique pourrait servir de site stratégique lors du retour à la normale pour ces populations, dont le logement ne comporte pas d'espace hors d'eau en cas d'inondation. Source : AEI, SAFEGE, Cabinet de Castelnau ; Ville d'Orléans.

Une des réponses apportées consiste à proposer une infrastructure publique multifonctionnelle, construite au cœur du quartier sur un des points hauts du site, et reliée aux autres constructions du quartier par un réseau de passerelles permettant de desservir l'ensemble des sites en cas d'inondation. Il pourra s'agir d'un établissement scolaire qui remplira sa fonction éducative en période normale. En période de crise, cette infrastructure proposera des fonctions complémentaires, comme par exemple l'accueil de personnes dans l'attente de leur évacuation. Durant la post crise, cette forme de construction pourra favoriser une réinstallation rapide sur le site de ses habitants. Les réseaux de la ville étant fortement sinistrés, il pourra offrir un accès privilégié aux réseaux vitaux, un ravitaillement ainsi que l'offre de soins médicaux si nécessaire, permettant ainsi le retour des personnes dans le secteur sinistré.

Le principe de cette conception s'appuie sur l'expérience d'épisodes majeurs d'inondation au cours desquels il a souvent été constaté que l'ordre d'évacuer n'était pas suivi par une partie de la population. Cette conception urbaine permettra d'offrir un abri temporaire de dernier recours aux populations des habitations voisines vulnérables, qui auraient refusé d'évacuer à temps malgré les injonctions des forces de l'ordre, et se retrouvant ainsi prises au piège dans leur habitation de plain-pied.

Sa conception architecturale et les réseaux permettant d'assurer son fonctionnement, seront pensés pour permettre d'assurer ces fonctions multiples pendant la phase d'évacuation et pendant le retour à une situation normale. Il est donc prévu d'adapter le bâtiment en le surélevant au-dessus des plus hautes eaux connues, à l'instar de l'ensemble des logements prévus, et de le relier aux autres constructions du quartier, par un réseau de passerelles situées également au-dessus des plus hautes eaux connues. Il servira à la fois pour les habitants du quartier et pour ceux des quartiers situés à proximité. Une réflexion a également été menée sur l'usage des rez-de-chaussée rendus "transparent" aux inondations.

La ville n'exclut pas la possibilité d'implanter d'autres bâtiments multifonctionnels et adaptés à l'inondation dans le val, afin de mailler le territoire de plusieurs points proposant des services essentiels pour la gestion de crise et post-crise.

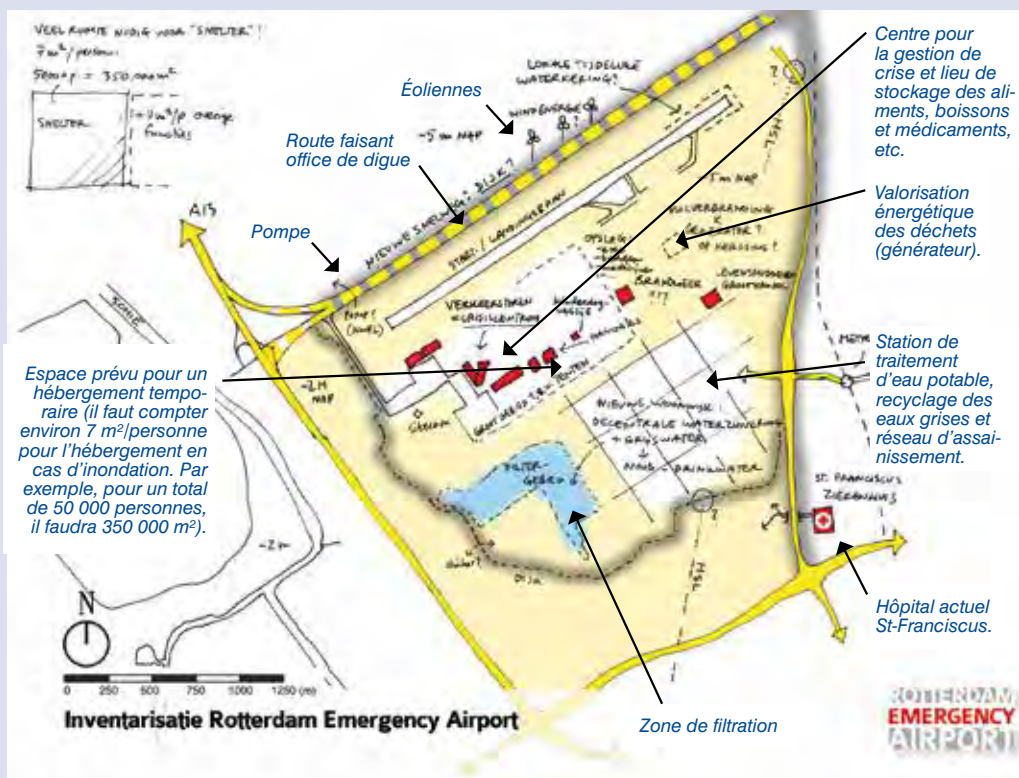


Proposition d'aménagement sur le site du Val Ouest, sous la forme d'un bâtiment multifonctionnel (lycée, collège, crèche), utile lors de la phase de la post-crise notamment, surélevé et relié aux autres constructions par un réseau de passerelles.

Source : AEI, SAFEGE, Cabinet de Castelnau ; Ville d'Orléans. Crédit : ville d'Orléans.

Exemple du projet d'aménagement de l'aéroport Rotterdam-The Hague Emergency Airport à Rotterdam (Pays-Bas)

Ce projet s'inscrit dans le projet de recherche européen FloodProBE⁵⁴. Il a deux objectifs : renforcer le niveau de protection des digues présentes autour de l'aéroport actuel et considérer cette infrastructure comme un lieu d'hébergement d'urgence en cas d'inondation causée par la rupture de ces digues pour les habitants des quartiers voisins. La multifonctionnalité de l'aéroport est envisagée sous la forme d'une adaptation des bâtiments actuels à de nouvelles fonctions : les pistes et autres surfaces non construites pourront accueillir des tentes pour loger les habitants évacués, certains bâtiments et les halls pourront servir de lieux de stockage du matériel nécessaire en cas de crise (boissons, nourriture, médicaments, etc.). Le projet a également identifié des dispositifs internes pour assurer la continuité des réseaux techniques. Pour faciliter la gestion de la crise, certaines infrastructures propres à l'aéroport peuvent être utilisées en période normale et en période d'urgence sans changer d'usage, comme par exemple la tour de contrôle, les hangars, la pépinière et une caserne de pompiers.



Dessin du projet d'aménagement de l'aéroport. Crédit : Deltasync.

Dans cet exemple, il s'agit d'adapter une infrastructure d'une grande importance en cas de crise puisqu'elle permet de réceptionner le matériel nécessaire à la gestion de crise, de maintenir un lien vers l'extérieur, d'envoyer également du matériel vers d'autres zones sinistrées. L'adaptation d'une infrastructure déjà existante est envisagée dans le but de pouvoir servir à d'autres usages (stockage de matériel, nourriture, médicaments, hébergement temporaires de populations des quartiers alentour, autonomie énergétique...). Ce projet est intéressant dans le sens où il envisage une telle adaptation, malgré un niveau de protection des digues très élevé (1/ 10 000 ans) pour les quartiers environnants susceptibles d'y trouver refuge.

Sources : De Graaf Rutger, présentation le 10 juillet 2012 ; Minnema P.A., Anema K.A., Jacobs J., Zevenbergen C., De Graaf R.E. (2013).

54 - Se référer à la note n° 49.

Exemple d'un projet d'hôpital à Rotterdam (Pays-Bas)

Ce projet est directement lié à celui de l'aéroport de Rotterdam déjà présenté. L'objectif de ce projet d'hôpital est d'apporter une réponse aux besoins en matière de soins et d'hébergement d'urgence pendant la période de crise, qui ne pourront être suffisamment pris en charge par l'hôpital Saint-Franciscus existant à proximité de l'aéroport The Hague. Il est donc envisagé de construire un nouvel hôpital au sein de la zone endiguée de l'aéroport pour subvenir aux besoins en soins médicaux en cas de crise et d'avoir également la fonction d'hébergement d'urgence pour la population des quartiers voisins.



Dessin du bâtiment au rez-de-chaussée étanche. Crédit : Deltasync.

Ce nouveau bâtiment se situera donc dans la zone inondable, à proximité d'habitations exposées au risque d'inondation. Bien qu'il existe un système de protection de la zone (une digue entoure le terrain), le projet prévoit de construire l'hôpital avec un rez-de-chaussée hermétique et des accès aux urgences sur pilotis, pour rendre la construction résiliente aux inondations en cas de rupture de la digue. Dans cette situation, seul l'accès aux urgences réalisé sur pilotis sera possible et permettra aux habitants de rejoindre l'hôpital.



Dessin des espaces extérieurs multifonctionnels du projet d'hôpital. Crédit : Deltasync.

La particularité de ce projet est de concevoir l'hôpital avec des espaces multifonctionnels à l'intérieur. Des espaces verts à l'air libre sont prévus dans l'enceinte de l'hôpital pour un usage récréatif et pourront servir à planter des tentes en cas d'inondation pour accueillir des réfugiés.

Les salles de consultation à l'intérieur du bâtiment pourront également servir de chambres pour loger temporairement les habitants réfugiés en cas d'inondation.

Cet exemple est assez novateur car il envisage d'implanter volontairement une infrastructure telle qu'un hôpital dans une zone inondable, ce qui peut sembler contradictoire avec la logique de localisation des usages qui préconise de ne pas implanter les usages les plus vulnérables en zone inondable (a fortiori dans des zones soumises au risque de rupture de digues). Pour autant, l'adaptation de ce bâtiment permet de conserver sa fonction de soins permanente en cas d'inondation et d'envisager d'autres usages pour assurer la sauvegarde des habitants des quartiers voisins. L'hôpital remplit donc un objectif de solidarité avec les quartiers voisins et contribue d'une certaine manière à réduire la vulnérabilité de ces quartiers en permettant une évacuation verticale.



Dessin des salles de consultation multifonctionnelles du projet d'hôpital. Crédit : Deltasync.

Sources : De Graaf Rutger, présentation le 10 juillet 2012 ; Minnema P.A., Anema K.A., Jacobs J., Zevenbergen C., De Graaf R.E. (2013).

La construction en zone inondable de bâtiments ou infrastructures abritant des services parfois indispensables au redémarrage du territoire après une inondation (aéroport ou hôpital par exemple) est un choix engagé en direction de la réduction de la vulnérabilité d'un quartier, pour lequel des mesures d'adaptation sur le bâti ou les réseaux existants ne sont pas possibles ou trop coûteuses. Cela sous-entend que ces nouvelles constructions seront adaptées au risque d'inondation et multifonctionnelles pour pouvoir être utiles et surtout rentables en l'absence d'inondation. Cela suppose, dès leur conception, de considérer la multiplicité des usages qu'elles abriteront. Dans ce cadre, la question des réseaux est fondamentale. Le bâtiment ou le lieu doit pouvoir continuer à fonctionner en cas d'inondation. Pour cela, il doit être, soit autonome énergétiquement, soit alimenté en période d'inondation par un réseau extérieur résistant, et surtout accessible (pour les secours, les services nécessaires au moment de la post-crise). S'il s'agit de services nécessitant un accès au niveau du rez-de-chaussée, comme le service des urgences dans les hôpitaux par exemple, il faudra envisager l'adaptation de ces accès (surélévation notamment).

Cette phase de conception est donc extrêmement importante et mêle à la fois une réflexion sur les formes urbaines et architecturales du quartier, sur les usages des futurs bâtiments et la réflexion sur la compatibilité ou non de ces formes et usages avec la gestion de crise et la phase de reconstruction de la ville après une inondation.

Il ne s'agit donc pas réellement d'un paradoxe. Certes, on envisage de construire de nouveaux bâtiments/infrastructures en zone inondable, mais ces aménagements sont conçus dès le départ pour pouvoir continuer à fonctionner en cas d'inondation, afin de réduire la vulnérabilité de l'existant qui, lui, n'est pas adapté à l'inondation.

3. La mise en œuvre du principe

Sur le plan technique

Il est indispensable de se poser la question de l'adaptation d'un bâtiment ayant des fonctions particulières en période d'inondation, et durant la post-crise, dès sa conception (principe 4). Il faudra également s'assurer de la pérennité de son fonctionnement par des réseaux non vulnérables (principe 5).

Sur le plan économique

En premier lieu, des bâtiments ou espaces intelligents sont destinés à servir en cas d'évacuation verticale, afin de limiter les coûts liés à une évacuation horizontale. Chacune de ces évacuations pose un certain nombre de problèmes. Dans le cas de l'évacuation horizontale, il existe des coûts importants à la fois financiers et psychologiques. Organiser une évacuation nécessite du matériel, des moyens humains et cause du stress et des traumatismes non négligeables aux habitants qui ne souhaitent pas quitter leur habitation et se demandent où ils vont aller. L'évacuation verticale représente une piste pour pallier ces inconvénients, dans la mesure où les coûts financiers et psychologiques peuvent être réduits. S'ils sont orientés vers une infrastructure proche qui demeure à proximité de leur logement, cela réduit également le sentiment de panique généré par le fait de ne pas savoir où aller en cas d'alerte⁵⁵. En étant adaptés à l'inondation, les bâtiments ou espaces intelligents permettent de réduire les dommages potentiels sur la ville, et donc les coûts d'une inondation.

Par ailleurs, construire un lieu de refuge multifonctionnel adapté coûterait 22 % plus cher qu'un bâtiment non conçu pour servir de refuge⁵⁶. À ce coût, il faut ajouter l'adaptation des réseaux reliés au bâtiment (routes, voies d'accès, réseaux électriques,...). Il nécessite éga-

55 - Blom E.T., Zevenbergen C., Gersonius B., Van Son E. (2012).

56 - Se référer à la note n° 50.

lement un entretien courant pour pouvoir être utilisé à tout moment pour sa fonction prévue en cas d'inondation. Cet entretien n'est pas spécifique à la fonction de refuge, il concerne aussi la fonction habituelle du bâtiment. C'est donc la multifonctionnalité du bâtiment qui permet de le rendre rentable sur le long terme.

Sur le plan social

Le but de ces constructions est de réduire les pertes en vies humaines, en diminuant la vulnérabilité physique et psychologique des populations vivant dans des zones soumises à un risque d'inondation.

Il serait préférable d'avoir plusieurs bâtiments ou espaces intelligents dans une ville étendue pour disposer d'un maillage au sein de la zone à risque. Ceci a pour avantage de permettre à la population de rejoindre un lieu de refuge à temps ou de disposer d'un lieu à partir duquel la reconstruction au sein de la zone sinistrée peut s'effectuer (point de ravitaillement en matériel, nourriture, soins médicaux, conseil et appui administratif, écoute psychologique, etc.). Les gens connaissent déjà le bâtiment grâce à sa fonction permanente et savent qu'il peut également servir de refuge en cas d'urgence, et cela rend la stratégie d'évacuation d'autant plus efficace.

Cela traduit également une solidarité pour l'ensemble de la ville : les populations qui ne pourront pas évacuer de manière horizontale pourront bénéficier d'un lieu d'accueil pendant et après une inondation au sein de la zone inondée. Mais ces espaces conçus pour ces fonctions spécifiques bénéficieront également, au moment de la phase de reconstruction, aux habitants voisins de la zone sinistrée.

Il existe cependant un risque que les habitants vivant à proximité et se sentant protégés par la présence de cette infrastructure n'évacuent pas, bien qu'on leur en ait donné l'ordre en cas d'inondation imminente.

Sur le plan politique

Envisager des espaces intelligents pour la crise et la post-crise constitue une réponse à la demande des habitants d'un quartier vulnérable, pour lequel il n'est pas possible de construire des ouvrages de protection ou d'adapter les logements existants.

Pour atténuer le fait que les gens risquent de ne pas évacuer en raison de la proximité d'un tel lieu, il est nécessaire de ne pas insister sur la multifonctionnalité d'un espace intelligent. Il doit pouvoir servir en période normale comme en cas d'inondation, mais cette dernière fonction doit paraître évidente, au moment de la crise, à la population vivant à proximité et susceptible de l'utiliser sans qu'il soit nécessaire d'en faire la publicité.

Pour autant, si cette communication n'existe pas, les habitants de quartiers vulnérables dans lesquels aucun aménagement de ce type n'est prévu pourront évoquer le fait que les autorités ne font rien pour eux. Cette question politique sous-tend donc la définition d'un projet réfléchi d'implantation d'espaces intelligents au sein d'une zone vulnérable au risque d'inondation.

Sur le plan juridique

Planter un bâtiment multifonctionnel adapté dans une zone déjà construite n'est pas toujours compatible avec la réglementation existante. Par ailleurs, certaines fonctions font l'objet de législations qui ne sont pas toujours compatibles entre elles. Par exemple, envisager l'implantation d'un hôpital à proximité d'un aéroport, comme dans le cas de Rotterdam, paraît difficilement réalisable en France (réglementation environnementale sur les nuisances sonores notamment). Cela pose la question de la compatibilité entre un établissement de

soins nécessitant un environnement relativement calme et un aéroport, compte tenu des nuisances sonores générées par ce dernier en période normale et en période de crise.

Une autre difficulté est liée aux plans de prévention des risques actuels qui définissent des servitudes relatives à des zones constructibles ou inconstructibles. Au regard de l'aléa connu sur un secteur en renouvellement urbain, il pourrait être envisagé de donner la possibilité aux pouvoirs publics de réfléchir à l'implantation d'un lieu intelligent (et des réseaux associés à son fonctionnement et ses accès), dans ce secteur inondable déclaré inconstructible, dans le but de réduire la vulnérabilité de tout le secteur considéré, voire au-delà. Cela revient à apporter la preuve que le secteur peut accueillir certains aménagements très spécifiques, conçus pour être inondés, qui apportent un service à la population tel qu'il réduit la vulnérabilité de celle-ci en cas d'inondation. Or, les outils juridiques actuels (dont les PPR) n'autorisent pas toujours la réalisation de tels projets.

Sur le plan paysager

L'inscription d'un espace ou bâtiment intelligent dans un tissu urbanisé n'est pas anodine et concourt à son acceptation et son utilisation par la population. L'intégration des réseaux permettant de garantir l'autonomie du bâtiment dans le paysage urbain est également très importante de ce point de vue. L'inscription d'un tel bâtiment dans le paysage urbain doit donc trouver un équilibre entre le fait de rappeler sans cesse à la population qu'elle vit dans une zone inondable et la sensibiliser suffisamment au risque d'inondation. Tout dépendra de l'accompagnement politique et de la communication sur le risque qui seront réalisés parallèlement à ces aménagements.

II. VERS UNE STRATÉGIE POUR L'AMÉNAGEMENT DURABLE DES TERRITOIRES EXPOSÉS

Les six principes d'aménagement identifiés apportent une réponse technique à la question de l'aménagement dans les zones en renouvellement urbain inondables.

D'un point de vue général, et avant de s'intéresser à leur mise en œuvre concrète, il est nécessaire de s'interroger sur leur capacité d'adaptation. Les projets présentés pour les illustrer sont-ils "reproductibles" partout ? Les principes peuvent-ils être mis en œuvre sur tous les territoires ? Sont-ils capables de créer des aménagements évolutifs pour répondre au changement climatique ?

QUELLE ADAPTABILITÉ DES PRINCIPES ?

1 - L'adaptation à tous les territoires

L'adaptation des principes à tous les territoires suppose qu'ils puissent être mis en œuvre quel que soit le type d'aléa inondation (débordement de cours d'eau, submersion marine, crues torrentielles, ruissellement pluvial, coulées de boues...). Transposer des solutions techniques envisagées dans certains secteurs sur des zones qui semblent présenter les mêmes caractéristiques est tentant. Pour autant, tous les principes ainsi que tous les types d'aménagements proposés ici ne peuvent pas être appliqués sur tous les territoires.

Le principe visant à concevoir des bâtiments adaptés à l'inondation ne peut pas être mis en œuvre dans les zones de forte vitesse potentielle du courant de l'eau. Les procédés de construction actuels ne le permettent pas. Les trois stratégies "éviter", "céder" et "résister" ne peuvent donc pas être adaptées à tous les secteurs.

Le principe consistant à localiser les activités et infrastructures en fonction de leur vulnérabilité peut être utilisé dans bon nombre de situations, où un secteur en renouvellement urbain est soumis à la submersion marine ou au débordement de cours d'eau à partir du moment où la connaissance sur le risque d'inondation existe.

Le principe intégrant des systèmes de protection dans les espaces urbanisés peut s'appliquer dans des zones soumises au débordement de cours d'eau et à la submersion marine. Tout dépend si un système de protection existe déjà ou non.

Le principe laissant plus d'espace à l'eau, en particulier les aménagements visant à agrandir le lit du cours d'eau, ne peut pas forcément être instauré dans les zones où les lits majeurs sont très étroits, comme dans les villes situées en secteurs montagneux.

Les principes assurant le fonctionnement des réseaux et la création de lieux intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction semblent pouvoir être mis en œuvre sur tous les territoires.

Les indications données ici sont très générales. Une analyse fine du contexte local est toujours nécessaire.



*L'agglomération parisienne et la région Ile-de-France concentrent de nombreuses zones en renouvellement urbain le long de la Seine.
Crédit : ville de Paris.*

2 - L'adaptation au changement climatique

Cela pose la question de la capacité des principes à évoluer et à s'adapter aux changements futurs. De ce point de vue, certains principes présentent une souplesse plus grande que d'autres.

Les principes visant à réduire l'aléa (celui intégrant un système de protection dans l'espace urbain et celui laissant plus de place à l'eau) sont mis en œuvre en considérant un aléa de référence. Même si ce dernier présente une occurrence très faible, il est possible qu'il soit un jour dépassé et que l'aménagement réalisé ne soit donc plus efficace. Les digues multifonctionnelles présentent un atout dans le sens où elles peuvent abriter des fonctions évolutives ; par exemple, ajouter un bâtiment sur une digue existante, qui prolongera la digue en hauteur, ou bien rajouter un étage au bâtiment existant faisant office de digue.

C'est également le cas pour le principe visant à concevoir des bâtiments adaptés : si la stratégie "éviter" est retenue et qu'il s'agit de surélever les bâtiments au-dessus des PHEC, la cote choisie pourra un jour être dépassée par un événement plus important. Par contre, les autres techniques telles que la construction flottante ou amphibie semblent davantage s'adapter à un changement de niveau d'eau. Ces procédés déjà utilisés dans les zones estuariennes où le niveau de l'eau varie en fonction des marées démontrent que ce principe peut être adapté à de nouveaux environnements.

Le principe visant à localiser les activités et infrastructures en fonction de leur vulnérabilité peut également être adapté à de nouveaux contextes. Dans le cas du changement climatique et du recul progressif du trait de côte sur certains littoraux, il peut se caractériser par une délocalisation partielle ou totale de certaines activités (localisation horizontale). Mais il peut également signifier une modification des usages au sein d'une même infrastructure (localisation verticale), comme par exemple transformer des logements situés au rez-de-chaussée en bureaux, en commerces ou en locaux associatifs (moins vulnérables).

Une question demeure en suspens concernant l'adaptation des réseaux, souvent dimensionnés pour résister à un aléa de référence. Leur adaptation doit donc être réfléchie dès la phase de conception, qu'il s'agisse d'un renforcement de leur robustesse, d'un maillage plus répandu, d'une autonomie efficace ou d'une diversification plus importante.

Cela pose également la question de la capacité des réseaux à être adaptés à éventuellement d'autres aléas (ruissellements plus importants, tempêtes...).

COMMENT METTRE EN ŒUVRE CES PRINCIPES ?

La mise en œuvre de ces six principes va notamment, mais pas seulement, dépendre des caractéristiques du risque sur le territoire concerné par un projet et se fonder sur une stratégie d'aménagement particulière.

Cette stratégie se concrétise par la combinaison de certains principes qui peuvent être complémentaires dans leur mise en œuvre ou non. Elle s'appuie également sur un certain nombre de "piliers" à intégrer dans la réflexion au moment du choix des principes.

1. La recherche d'une combinaison entre les principes

Chaque principe a été présenté indépendamment des autres. Pour autant, les six principes peuvent entrer en interaction à partir du moment où une stratégie d'aménagement est retenue sur un site. Sont-ils tous compatibles les uns avec les autres au moment de leur mise en œuvre ? La réponse n'est pas évidente. Il ne semble pas y avoir de combinaison idéale entre les principes et adaptée à tous les territoires en renouvellement urbain dans les zones inondables. Il est préférable d'adapter ces principes au cas par cas, au regard de l'aléa connu sur un territoire, et de les mettre en adéquation avec l'échelle du projet concerné. Certains principes présentent néanmoins une certaine complémentarité par rapport à d'autres, soit dans leurs objectifs, soit d'un point de vue technique ou encore d'un point de vue économique.

L'échelle de l'aménagement

S'il apparaît possible de concilier plusieurs principes à l'échelle d'une ville, il peut sembler parfois difficile de combiner ces mêmes principes à l'échelle d'un quartier.

Par exemple, la stratégie retenue par certaines villes, comme Dordrecht ou Francfort, consiste à combiner les principes suivants : inclure un système de protection dans l'aménagement urbain et concevoir des bâtiments adaptés à l'inondation. Elles envisagent de renforcer les digues protégeant le centre historique de la ville d'une part et de concevoir des quartiers adaptés à l'inondation d'autre part (constructions sur pilotis, amphibies ou flottantes). Généralement, ces derniers ne sont pas protégés par des ouvrages de protection et sont souvent d'anciennes friches portuaires reconverties en quartiers résidentiels ou d'affaires. Il s'agit bien de quartiers distincts au sein de la même ville qui ne mettent pas en œuvre les mêmes principes.

Il est donc envisageable de concilier plusieurs principes pour une même ville, mais à l'échelle du quartier certains principes peuvent devenir incompatibles pour des raisons techniques ou financières notamment. Par exemple, adapter des logements derrière des digues qu'il est prévu de renforcer peut s'avérer trop coûteux pour la collectivité et celle-ci peut décider de choisir entre l'un ou l'autre de ces principes.



Premières propositions pour le quartier Stadswerven à Dordrecht (Pays-Bas). Source : © Baca Architects.

Des objectifs communs

Les principes visant à laisser de l'espace pour l'eau et intégrer un système de protection dans l'espace urbain répondent à un objectif commun, celui de réduire l'aléa. Les principes concernant la localisation des usages, le maintien du fonctionnement des réseaux, l'adaptation des bâtiments et la construction de lieux intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction permettent de réduire les conséquences d'une inondation.

Par ailleurs, le principe visant à créer des espaces intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction peut combiner à lui seul plusieurs des autres principes. Si un lieu de refuge adapté à l'inondation est envisagé, il peut mettre en œuvre les principes "concevoir des bâtiments adaptés à l'inondation" et "assurer le maintien du fonctionnement des réseaux techniques". Ces trois principes répondent à l'objectif de réduction de la vulnérabilité de la zone urbaine concernée et peuvent même contribuer à réduire la vulnérabilité de secteurs voisins.

Cela ne suppose pas de choisir entre ces différents objectifs. En fonction de l'échelle du projet retenue, il est possible d'avoir plusieurs objectifs et de ce fait de combiner plusieurs principes pour y répondre.

Une compatibilité technique

La plupart des principes peuvent être mis en œuvre simultanément et sont complémentaires d'un point de vue technique. Par exemple, le quartier Matra à Romorantin intègre à la fois le principe visant à laisser de l'espace pour l'eau, celui sur l'adaptation des bâtiments à l'inondation et celui sur le maintien du fonctionnement des réseaux techniques (surélévation des bâtiments et des voiries).

La compatibilité entre certains principes est plus complexe lorsque l'on rentre dans le détail de la mise en œuvre des principes à travers les types d'aménagements possibles. Par exemple, concernant le principe laissant plus d'espace pour l'eau, si le projet vise à ne pas aggraver l'aléa actuel, en ne réalisant aucun aménagement sur un secteur, il est difficilement compatible avec le principe intégrant un système de protection qui consiste justement à empêcher l'eau d'inonder ce même secteur. Le choix du principe laissant plus d'espace pour l'eau n'est pas toujours possible lorsqu'il existe déjà des ouvrages de protection sur un secteur et que ces ouvrages sont conservés pour remplir un objectif de protection de la ville. Les deux principes paraissent donc opposés dans leur réalisation technique.

Pourtant, si l'on considère d'autres types d'aménagement, ils peuvent devenir compatibles. Par exemple, pour appliquer le principe laissant plus d'espace pour l'eau, on peut

reculer les digues existantes afin d'élargir le lit du cours d'eau. Cela implique donc de construire des digues un peu plus loin, en les intégrant éventuellement dans un projet de super-digue ou de digue multifonctionnelle compatible avec le premier principe.

Concernant le principe sur le maintien du fonctionnement des réseaux techniques, le renforcement de la robustesse de certains réseaux, comme la surélévation des routes par exemple, peut sembler entrer en contradiction avec le principe laissant plus de place à l'eau. Certains procédés peuvent permettre de combiner ces principes. Dans l'exemple de la ZAC des Papeteries à Rennes, la route qui dessert les différents immeubles construits le long de la Vilaine est surélevée. Elle a été remblayée avec les déblais ayant permis de réaliser des parkings enterrés qui seront inondés volontairement en cas d'inondation, favorisant la transparence hydraulique. Cet aménagement permet donc par un équilibre entre déblais et remblais de répondre à la fois aux deux principes.

Deux autres principes peuvent paraître contradictoires : celui visant à créer des espaces intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction et celui consistant à localiser les usages en fonction de leur vulnérabilité. Le concept de "hot spot" s'appuie justement sur l'implantation, dans les zones à risque, d'infrastructures vitales pour la ville qui seront donc au plus près des populations sinistrées. Cela peut sembler aller à l'encontre du principe visant à localiser les biens et activités en fonction de leur vulnérabilité, pour lequel il est préférable de ne pas implanter certaines infrastructures particulièrement vulnérables pour le territoire ou indispensables au fonctionnement d'une ville dans les zones inondables. Pour autant, la création de lieux intelligents implique la conception de lieux, espaces ou infrastructures adaptés au risque d'inondation connu sur le quartier concerné afin notamment d'apporter une solution pour réduire la vulnérabilité d'un quartier déjà construit. C'est notamment l'objectif du projet concernant l'aménagement de l'aéroport de Rotterdam, qui implante volontairement un nouvel hôpital dans l'enceinte de l'aéroport endigué. Cet hôpital est adapté à l'inondation (rez-de-chaussée sous la forme d'un caisson étanche, accès aux urgences surélevé) et prévu pour accueillir la population des quartiers alentour en cas de crise, ce qui contribue à réduire la vulnérabilité des enjeux déjà existants dans ce secteur inondable de Rotterdam.

Techniquement, une autre combinaison de principes est envisageable pour tenter de réduire la vulnérabilité de quartiers existants dans certaines villes, celle de la super-digue et de la création d'espaces intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction. Elle ne figure dans aucun des exemples mentionnés. Il s'agirait davantage de réfléchir à la transformation de secteurs endigués pour lesquels la création d'une super-digue semble possible, afin de résoudre le risque de rupture de l'ouvrage. Puis, grâce à l'implantation de lieux adaptés pour la gestion de crise et la reconstruction, il serait possible d'accueillir sur cette plate-forme (super-digue) et dans ces lieux adaptés à un fonctionnement en mode dégradé les populations vulnérables des quartiers voisins non adaptés au risque d'inondation, de manière temporaire.

Un gain économique à affiner ?

Des principes semblent difficilement compatibles dans leur mise en œuvre d'un point de vue économique. En particulier, le principe intégrant un système de protection dans l'espace urbain et le principe concernant la conception de bâtiments adaptés à l'inondation. Il peut paraître difficile, dans un contexte où une ville est gestionnaire d'un système de protec-

tion, de consacrer des dépenses importantes à la gestion de ce système et en même temps de financer l'adaptation de logements. Ces deux actions sont compatibles techniquement. L'adaptation des logements prend le relais de la digue qui rompt. Mais comment justifier politiquement et économiquement la protection d'un secteur qui risque tout de même d'être inondé et devrait donc être adapté en fonction d'un risque dit "résiduel" ? Les Pays-Bas ont tranché dans le sens de la protection. Pourtant, certains projets, comme celui de l'aéroport de Rotterdam, démontrent que des réflexions émergent sur la combinaison de ces deux principes, qui pourtant paraissent difficilement compatibles économiquement.

À l'échelle d'une ville, il n'est pas toujours possible de réduire la vulnérabilité en adaptant les bâtiments existants à un coût acceptable pour la collectivité. Le principe visant à créer des espaces intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction peut représenter une alternative. Dans les secteurs en renouvellement urbain où ce type de lieux peut être imaginé, son adaptation au risque d'inondation et le maintien de son fonctionnement en cas d'inondation et lors de la post-crise pourraient permettre de réduire la vulnérabilité du quartier. L'implantation d'un tel lieu au cœur d'une zone inondable pourrait même réduire la vulnérabilité de quartiers voisins, pour lesquels aucune adaptation à l'inondation n'est envisagée à court terme. Cela pourrait contribuer à réduire les coûts globaux d'une inondation. Par exemple, dans le cas de la ZAC des Blancheries à Montbéliard, un parking pouvant accueillir 407 places sur 4 niveaux a été conçu sous la forme d'un silo. En cas d'inondation, ce parking pourrait accueillir les habitants du quartier voisin, voire d'autres quartiers, afin de réduire la vulnérabilité d'une partie de la ville.

2. Les piliers qui fondent la mise en œuvre des principes

Quelle que soit la combinaison retenue, il est important de considérer ces différents "piliers" qui encadrent la mise en œuvre des principes sur une zone en renouvellement urbain inondable. Il s'agit de fondements sur lesquels la stratégie d'aménagement doit se baser pour tenter d'apporter une réponse efficace du point de vue du risque d'inondation.

Rechercher la multifonctionnalité

Si ce concept est habituellement utilisé pour qualifier un objet remplissant à lui seul plusieurs fonctions, la multifonctionnalité des principes revêt ici une dimension de temporalité. Les différentes fonctions d'un aménagement concerneront plusieurs périodes distinctes :

- la "période normale" ; un aménagement a une fonction quotidienne, au sein d'un contexte urbain déterminé. C'est le cas par exemple d'une école qui sert à accueillir des enfants dans un but éducatif ;
- la "période d'inondation" ; le même aménagement peut avoir une fonction différente de celle de la période normale, en l'occurrence l'école peut devenir un lieu d'hébergement et de refuge temporaire pour les personnes sinistrées ;
- la "reconstruction" ou "retour à la période normale" ; par exemple, parallèlement à la reprise de sa fonction d'éducation des enfants, l'école peut abriter du matériel nécessaire au nettoyage après l'inondation, réserver des salles pour organiser les démarches administratives des personnes sinistrées, servir éventuellement d'habitat transitoire pour les personnes en attente de relogement, etc.

Cette dimension est fondamentale pour l'aménagement des zones urbaines inondables. Elle permet à la fois d'intégrer un aménagement destiné à la gestion du risque et à la fois de répondre à un besoin urbain, au sein du développement de la ville. Par exemple, si un quar-

tier a besoin d'une nouvelle école, pourquoi ne pas envisager aussi l'utilisation de celle-ci en cas d'inondation, et même après ? La multifonctionnalité permet d'avoir une approche réellement innovante sur l'intégration de nouveaux aménagements prenant en compte l'inondation au sein de l'espace urbain.

Elle participe également au développement d'une certaine culture du risque dans la ville : par exemple, une digue aménagée en jardin public traduit le fait que l'on vit en présence du risque au sein de la ville (la digue est là pour nous rappeler ce risque). La digue fait ainsi partie du "domaine public urbain", c'est-à-dire que les habitants s'approprient cet espace public. Elle constitue une base pour le développement urbain (insertion de nouveaux usages et synergie entre la ville et l'eau) et crée de la valeur foncière (exemple de la superdigue qui permet un développement urbain).



Projet Boompjes City Balcony à Rotterdam (Pays-Bas) avec une digue multifonctionnelle. Source : De Urbanisten.

Cette intégration de différents usages propres à une même infrastructure permet également de répondre à la question du coût des aménagements spécifiques à la prévention des inondations. Concevoir un bâtiment n'ayant pas qu'un seul usage mais plusieurs peut permettre de rentabiliser sa construction à moyen voire long terme. Cela peut représenter une piste intéressante dans un contexte de crise économique où la réduction des fonds publics conditionne les projets urbains. Par contre, à court terme, les coûts liés à l'adaptation de l'infrastructure à l'inondation peuvent être importants et représenter un surcoût par rapport à une infrastructure non adaptée. Par ailleurs, certaines questions demeurent en suspens : est-il possible de construire des bâtiments multifonctionnels partout, au regard des documents d'urbanisme notamment ? Comment entretenir dans la durée les différentes fonctions d'une infrastructure multifonctionnelle ? Qui en assure l'entretien et la gestion ?

En étant conçu à moyen/long terme, un aménagement multifonctionnel traduit bien la notion d'adaptation et de développement réellement durable des villes, en combinant une fonction principale (qui sera aussi la plus utilisée) et une ou des fonctions secondaires (en cas de crise), utiles pour un voire plusieurs quartiers. L'adaptation d'une infrastructure déjà existante à d'autres fonctions risque de rendre l'opération très onéreuse, même si celle-ci reste possible. C'est pourquoi la multifonctionnalité de l'aménagement doit être intégrée dès la conception du projet afin d'amortir les surcoûts éventuels. L'exemple de l'hôpital de Rotterdam dans l'enceinte de l'aéroport traduit bien cette réflexion menée en amont de la construction de l'équipement public : il pourra servir d'hôpital en période normale, de lieu

d'hébergement, de stockage de matériel et d'hôpital à la fois en période de crise et lors de la post-crise.

Pour concevoir un bâtiment multifonctionnel adapté au risque d'inondation, on peut réfléchir de deux façons. Soit on conçoit un bâtiment qui répond à des objectifs autres que la réduction de la vulnérabilité au risque inondation (alimentation en énergies renouvelables, faible consommation énergétique, récupération des eaux pluviales, etc.), qui concourent eux-mêmes à réduire la vulnérabilité du bâtiment au risque d'inondation (diversification des sources d'énergies, maillage,... ce qui correspond au principe sur le maintien du fonctionnement des réseaux). Soit on suit le raisonnement inverse : on envisage un bâtiment adapté au risque d'inondation d'emblée et on l'adapte ensuite à d'autres fonctions. Le but est de multiplier les bénéfices apportés par le bâtiment afin de réduire les coûts au maximum et de proposer de nouvelles façons de concevoir les aménagements, avec une pluralité d'objectifs et de fonctions possibles.



Faciliter l'autonomie, le maillage, la robustesse et la diversification

Ces quatre éléments sous-tendent notamment l'implantation des réseaux au sein du système urbain afin de garantir la continuité de leur fonctionnement et de celui de la ville en période normale, en période de crise et au moment du retour à une situation normale. La capacité d'une ville à rebondir suite à une inondation s'appuie sur ces réseaux. Cela ne signifie pas forcément que ces réseaux conserveront un fonctionnement constant en cas de perturbations causées par une inondation. Leur activité pourra basculer en mode "dégradé" et ne concerner que les services prioritaires à conserver durant la crise et la post-crise.

Système de pompage enterré en cas de crue du Rhin à Andernach (Allemagne). Crédit : CEPRI.

Tendre vers un développement durable

L'approche "durable" vise à intégrer les piliers du développement durable, définis depuis la fin des années 1980, que sont l'efficacité économique, l'équité sociale et la qualité environnementale. Elle a été consacrée dans les différentes lois Grenelle et s'illustre aujourd'hui dans l'urbanisme, notamment via des initiatives comme les quartiers durables et la démarche ÉcoCité⁵⁷. "Le quartier durable est un lieu d'expérimentation où s'incarne un nouvel urbanisme [...]. Cette approche invite les collectivités à tester de nouvelles solutions, dans le domaine de la construction, des énergies locales, du lien avec la nature et en favorisant la mixité des fonctions⁵⁸."

Ce concept vise à concevoir sur le long terme des villes de façon différente. Il s'illustre aujourd'hui à travers les projets œuvrant pour une meilleure intégration de "la nature en ville", la concrétisation des trames verte et bleue, le développement de modes de transports "doux" (piéton, cyclable). À ce titre, les principes visant à laisser de l'espace pour l'eau et assurer le maintien du fonctionnement des réseaux s'inscrivent pleinement dans ce cadre. Par exemple, la création d'espaces récréatifs inondables, la remise à ciel ouvert des cours d'eau peuvent aussi contribuer à la réduction des îlots de chaleur urbains, visés dans les Plans Climat Énergie des villes.

De même, concernant les réseaux de transports, on peut recenser divers types de mobilités permettant aux habitants de quitter une zone inondable puis d'y revenir (moyens de

⁵⁷ - Un appel à projet ÉcoQuartier a été lancé conjointement avec la démarche ÉcoCité, dans le cadre du Plan ville durable lancé en octobre 2008 par le MEEDDM.

⁵⁸ - Cyria Emelianoff, maître de conférence à l'université du Maine, citée dans : Charlot A., *Du quartier à la ville durable, vers un nouveau modèle urbain*, Victoire Éditions, 2012.

transports collectifs, véhicule personnel, vélo, marche,...). Diversifier l'offre de transports en période normale permet de familiariser la population avec des modes de déplacements divers, qu'ils pourraient aussi utiliser en cas de crise et lors du retour à une situation normale. L'objectif est de permettre aux habitants de se reporter sur un autre mode de déplacement, de façon autonome, si leur moyen de transport habituel est inopérant en cas d'inondation. Cela participe à l'adaptation d'une ville dans son ensemble au risque d'inondation et répond aux objectifs du développement durable.

Dans ce contexte, le développement de la ville en lien avec le risque d'inondation participe à un mouvement général d'adaptation de la ville au changement, notamment climatique. Il s'agit de permettre à la ville de s'adapter à une situation d'inondation, mais aussi à une situation de reconstruction après son passage. Tout ceci demande une très forte innovation à laquelle les principes identifiés tentent de répondre, tant sur les formes urbaines et partis pris d'aménager que sur l'organisation urbaine, l'implantation et la robustesse des réseaux, les modes de construction à privilégier et celui des infrastructures et services à éviter dans les zones les plus exposées par exemple.

Renforcer la culture du risque d'inondation

Avoir une certaine culture du risque, c'est d'abord avoir une connaissance et une culture du territoire et de ses composantes, dont font partie l'eau, une rivière ou la mer. De nombreux projets émergent aujourd'hui en insistant sur l'intégration de l'eau en ville. Cette tendance vise aussi à considérer les effets liés à la présence de l'eau en ville, tels que les risques d'inondation, et à accepter cette réalité.

Or, bien souvent, la culture du risque fait défaut au sein de nombreux projets en zone inondable. Par exemple, dans la région Ile-de-France, environ 95 % des bâtiments localisés en zone inondable accueillant des logements individuels ou collectifs ne sont pas adaptés à l'inondation⁵⁹. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette absence : l'oubli (on a urbanisé en oubliant les inondations passées), le déni (on refuse l'inondation dans la ville), la mémoire "en trompe-l'œil" (on cherche à calquer les impacts d'inondations passées sur un contexte et une urbanisation actuels très différents). Le système d'indemnisation en cas d'inondation reconnue "catastrophe naturelle" peut également jouer un rôle dans la faible intégration de la culture du risque dans les projets d'aménagement.



La "maison de l'eau" à Francfort, le long de la rivière Main (Allemagne). Crédit : CEPRI.



Le parc en forme de flèche, dans le quartier Matra à Romorantin-Lanthenay, indique le sens du courant de la rivière Sauldre s'écoulant au sud du quartier. Crédit : Eric Daniel-Lacombe.

59 - Faytre L., Logement : quelle exposition du parc francilien en zone inondable ? Note rapide n° 634, Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France, décembre 2013.

Pour autant, la culture du risque demeure un pilier de l'adaptation des villes à l'inondation. Elle implique cependant plusieurs choses : une compréhension du phénomène d'inondation, une connaissance de la vulnérabilité de la ville par rapport aux impacts de l'inondation et une implication forte des acteurs participant à un projet de renouvellement urbain en zone inondable (du maître de l'ouvrage aux concepteurs, constructeurs, opérateurs, services instructeurs, gestionnaires de réseaux, vendeurs jusqu'aux acquéreurs et à la population). Cette culture du risque peut s'exprimer à travers divers projets d'aménagement en France et à l'étranger : de la forme des parcs urbains parallèles au sens d'écoulement du cours d'eau (Romorantin-Lanthenay) à la réflexion sur les itinéraires et lieux d'évacuation possibles depuis les habitations par des passerelles (Vitry-sur-Seine, Orléans), en passant par le choix de dispositifs de protection amovibles pour garder un "contact" avec le fleuve en période normale (Andernach en Allemagne), par exemple.

Préserver l'équité territoriale

La stratégie qui met en œuvre un ou plusieurs principes au sein d'un système urbain émane d'une décision politique. Celle-ci ne peut faire abstraction des inéquités territoriales générées par le choix d'un principe sur un secteur de la ville au détriment d'autres secteurs. Autrement dit, si le principe qui consiste à concevoir et construire des bâtiments adaptés à l'inondation est mis en œuvre dans un quartier, comment justifier auprès de la population résidant dans les quartiers voisins également soumis au risque d'inondation qu'ils n'en bénéficieront pas ?

Un autre exemple est celui de la mise en œuvre du principe consistant à inclure un système de protection dans l'aménagement urbain à travers une super-digue. Si cet aménagement n'est pas réalisé pour l'ensemble des secteurs urbanisés situés en bordure de cours d'eau ou de mer, mais limité à un quartier, quelles seront les répercussions sur les quartiers voisins, notamment en termes d'aléa ?

Pour répondre à cette dimension de solidarité territoriale, la notion d'échelle est importante. À quelle échelle met-on en œuvre les principes et quelles répercussions cela aura-t-il sur le système urbain dans son ensemble ? Une piste de réponse peut être apportée à travers le principe visant à créer des "espaces intelligents" pour la gestion de crise et la reconstruction. À travers la réalisation de ces espaces, le principe a pour but de réduire la vulnérabilité du quartier dans lequel il est implanté et peut même aller jusqu'à réduire celle de quartiers environnants. Dans l'exemple du projet concernant l'aéroport de Rotterdam, l'adaptation de cette infrastructure a pour but d'accueillir les habitants des quartiers voisins pour favoriser leur évacuation en dehors de la zone inondée. Cela représente une solution pour réduire la vulnérabilité de quartiers aujourd'hui déjà construits et regroupant une population importante. Cela apporte également un début de réponse au problème des personnes qui refusent d'évacuer lors d'une évacuation horizontale.

Intégrer la gestion de crise dans la conception des projets urbains

Les secteurs en renouvellement urbain qui prennent en compte l'inondation signifient qu'ils conçoivent une vie dans le quartier qui sera différente en période normale et en période d'inondation. Une situation de crise comme une inondation modifie le fonctionnement du quartier. Cela peut être bref ou long, arrive avec certitude dans les zones inondables et doit donc être appréhendé comme tel au moment de la conception du quartier. Cette situation est intrinsèquement liée à la stratégie déployée par les autorités publiques pour faire évacuer la population ou non. Cela implique donc une réflexion préalable à la conception du quartier sur ce qui sera décidé au moment de la crise. La conception du quartier ne saurait être la

même si les gens doivent évacuer (ce qui nécessite de réfléchir aux axes de circulation, aux itinéraires prioritaires) ou s'ils restent chez eux le temps de l'inondation. Ce dernier cas justifierait l'aménagement de réseaux fonctionnels en cas d'inondation, favorisant l'autonomie des bâtiments comme le propose le projet du quartier Felnex à Hackbridge (Royaume-Uni). Dans ce projet, la diversification des sources d'énergie (éolienne, panneaux solaires, centrale micro-hydroélectrique) et la faible durée de l'inondation permettraient aux personnes de rester chez elles pendant l'évènement.

La stratégie de gestion de crise de la ville va également conditionner l'implantation de lieux de refuge ou de lieux intelligents pour la gestion de crise et la reconstruction.

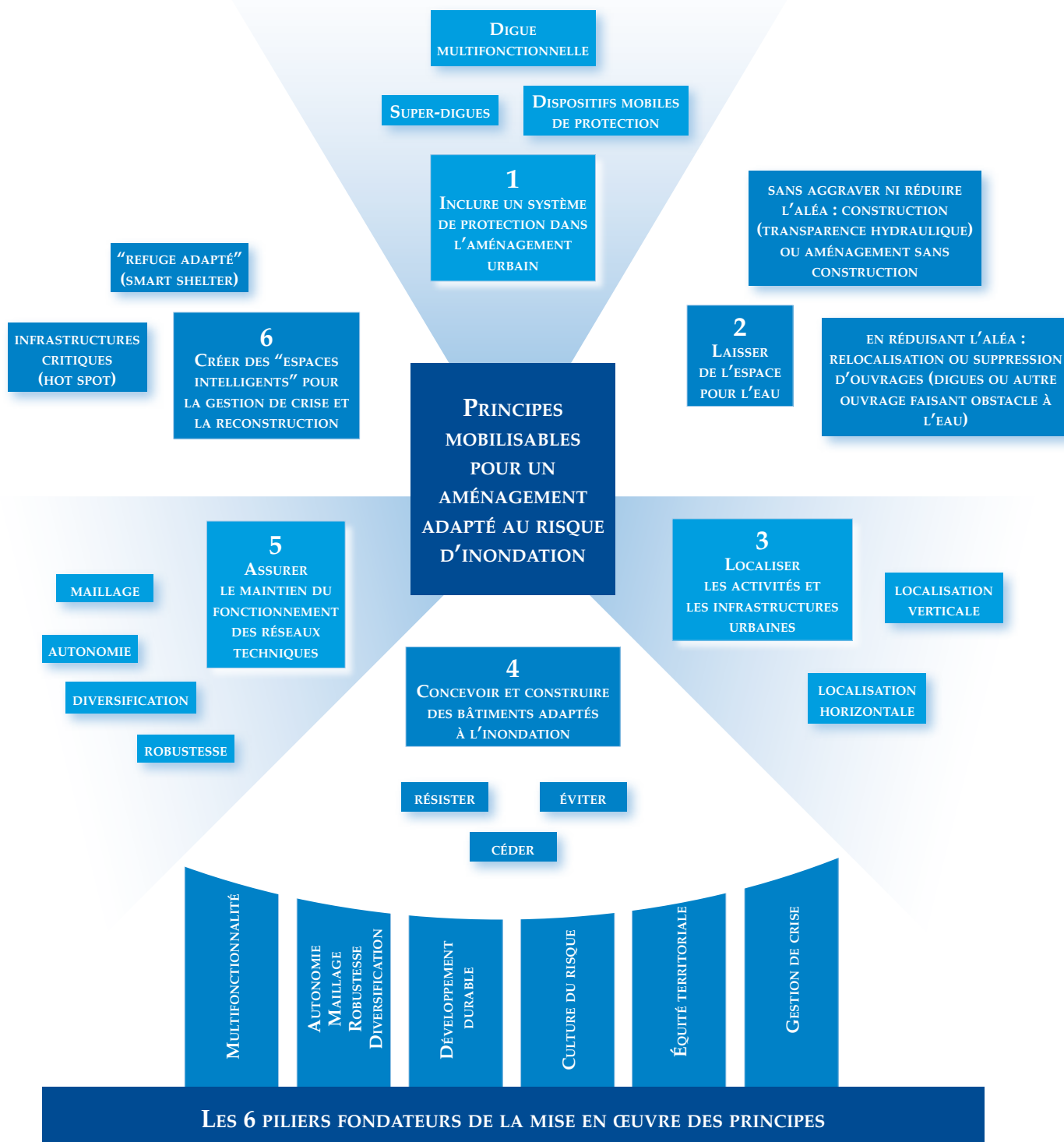
L'accessibilité du quartier est aussi fortement liée à la gestion de crise. Par exemple, à Hambourg, le nouveau quartier Hafencity a été construit sur une île et relié au reste de la ville par un système de ponts permettant à la fois de circuler en période normale, mais également en cas d'inondation du quartier. Les habitants du quartier peuvent ainsi rejoindre des zones sécurisées du reste de la ville en cas d'inondation, via ces infrastructures. Ils peuvent par la suite revenir dans leur quartier grâce à cet accès non endommagé par l'inondation, ce qui facilite aussi le ravitaillement du quartier au moment du retour à une situation normale. Le dimensionnement des ponts et les matériaux ont également été envisagés pour permettre le passage de véhicules de secours au moment de la crise.



Passerelle permettant de relier le quartier Westhafen au centre-ville de Francfort (Allemagne). Crédit : CEPRI.

Pour résumer, les principes d'aménagement sont mis en œuvre au sein d'une stratégie d'aménagement propre à un territoire spécifique. Au regard des évolutions de ce territoire et du programme d'aménagement prévu, certains principes seront plus pertinents que d'autres. Pour autant, en fonction du choix effectué parmi les principes, il est nécessaire de vérifier que la stratégie réponde bien aux "piliers" que sont : la multifonctionnalité, l'autonomie/maillage/robustesse/diversification, le développement durable, la culture du territoire liée à l'eau et au risque d'inondation, l'équité territoriale et la gestion de crise.

RÉSUMÉ DES PRINCIPES



POUR CONCLURE

De nombreux projets, en France et dans le monde, émergent, en renforçant la présence de l'eau dans les zones urbaines. Ils s'appuient sur une tendance actuelle visant à réconcilier l'homme avec la nature, qui n'est plus de l'ordre de l'utopie. L'intégration du risque d'inondation dans les projets d'aménagement est bien une réalité aujourd'hui et c'est au cœur de cette mouvance que s'inscrit ce rapport.

L'identification de ces six principes d'aménagement ouvre des perspectives intéressantes, à travers des projets innovants en Europe et dans le monde. Cette liste de principes ne saurait être exhaustive, la diversité des exemples et des pays où ces concepts sont expérimentés et mis en œuvre peut laisser penser qu'il en existe certainement d'autres.

La mise en œuvre de ces principes semble toutefois poser quelques limites et mérite encore un certain nombre d'approfondissements, notamment du point de vue économique afin de mieux identifier les éléments de surcoûts éventuels dans certains cas. Il apparaît également que ces principes doivent être appréhendés différemment en fonction des territoires. D'autres freins, comme le foncier disponible pour réaliser certains aménagements ou les questions de responsabilités associées à la maîtrise foncière (propriété et gestion de super-digues, expropriations en cas de recul de l'urbanisation pour laisser plus d'espace à l'eau, etc.), expliquent également le faible nombre de projets sur le territoire français. Mais ces limites sont surtout liées à leur manque d'expérimentation et à la nouveauté de leur utilisation par les professionnels de l'aménagement. Ces principes doivent faire leurs preuves sur le terrain.

Néanmoins, les mettre entre les mains des aménageurs ne suffit pas. Les réflexions actuelles engagées sur l'aménagement du territoire amènent à de vrais changements de paradigmes si l'on veut donner plus de durabilité à un territoire actuellement très vulnérable à l'inondation. Il est nécessaire d'aller plus loin que la réglementation actuelle, dont les outils sont insuffisants pour mettre en œuvre ces principes. Par exemple, le PPR actuel est limité pour réduire la vulnérabilité de certains secteurs qui restent légalement constructibles et parfois gèle le développement de zones construites très vulnérables, sans leur laisser la possibilité de se reconverter vers quelque chose de moins vulnérable. Peut-être la réflexion amorcée constitue-t-elle une occasion de revoir par exemple la philosophie des PPR et d'envisager le renouvellement urbain dans certaines zones actuelles déjà construites qui présentent une grande vulnérabilité, a fortiori si rien n'est fait dans ces zones. La question mérite d'être posée dans certaines zones très exposées : peut-être que la discussion avec l'ensemble des acteurs permettrait de trouver une solution pour réduire la vulnérabilité de ces secteurs à travers certains des principes présentés ici. Toutefois, la mise en œuvre des principes ne pourra pas se faire à l'échelle du PPR, qui reste la parcelle, ce qui montre les limites de cet outil.

Attention, toutefois, aux malentendus, il ne s'agit pas ici de faire l'apologie de la construction en zone inondable dans les secteurs aujourd'hui non urbanisés. Notre réflexion s'inscrit bien dans le cadre des principes du droit de l'urbanisme visant à réduire l'étalement urbain et favoriser la densification. Elle se cantonne à l'aménagement des zones urbaines denses, en renouvellement urbain, pour lesquelles des aménagements futurs verront le jour. Elle vise ainsi à prôner l'adaptation des projets à l'inondation, en considérant que tout aménagement en zone inondable devrait non seulement ne pas augmenter la vulnérabilité des

territoires exposés, mais aller jusqu'à réduire la vulnérabilité des quartiers voisins dans une optique de solidarité face au risque. Renverser la perception habituelle qui consiste à geler le développement urbain, faire accepter l'idée que le renouvellement urbain dans certaines zones inondables permet de réduire la vulnérabilité de zones déjà très sinistrées, tels sont les enjeux de ce rapport.

La suite de ce travail pourrait se concentrer sur des méthodologies guidant l'aménagement dans ces zones. Le 10 juillet 2014, la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie présentait officiellement la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation, avec pour ambition d'adapter l'urbanisation dans les zones inondables et d'assouplir les documents d'urbanisme afin de concevoir autrement l'habitation. Un grand concours international d'architecture ayant pour thème l'innovation et l'intégration du risque d'inondation dans les opérations de requalification urbaine a été annoncé dans ce cadre.

L'achèvement des travaux de l'Atelier national "Territoires en mutation exposés aux risques" fin 2014 devrait également permettre de dégager des pistes de mise en œuvre opérationnelle sur des territoires fortement exposés aux inondations comme Saint-Pierre-des-Corps (Indre-et-Loire), le val de Fensch (Moselle) et la vallée de l'Orne (Meurthe et Moselle), la vallée de l'Argens (Var) et la vallée de l'Oise, entre Creil et Compiègne (Oise).

Les collectivités disposent donc d'un large panel de références pour se lancer dans l'adaptation de leur territoire au risque d'inondation. Ne doutons pas que la mise en œuvre des futures stratégies locales de gestion du risque d'inondation constituera une occasion d'aborder ces questions avec l'ensemble des acteurs concernés et permettra à moyen terme de réduire la vulnérabilité de nos territoires. Les territoires doivent s'engager dans une démarche stratégique globale incluant les réflexions sur un aménagement durable et adapté au risque d'inondation.

SOURCES

Alter Lloyd, *Amphibious House Design Goes With The Flow, Rises With Floods*, (consulté le 14/08/2014), disponible sur : www.treehugger.com/sustainable-product-design/amphibious-house-design-goes-with-the-flow-rises-with-floods.html

Ashley R., Garvin S., Pasche E., Vassilopoulos A., Zevenbergen C., *Advances in urban flood management*, Hardback, February 2007.

Atelier Castro Denisoff Casi, Nexity, *Vivre le fleuve*, 2010.

Baca Architects, BRE and Fulcrum Consulting, Halcrow Group Ltd, Cyril Sweet and LDA Design, *The LIFE Project, The Life-Project, Long-term Initiatives for Flood-risk Environments*, Bre Press, 2009.

Bax & Willems (UFM-samenvatting), UFM Dordrecht-partners (UFM-werkpakketten), Gemeente Dordrecht (MARE), Frits Baarda (Hoogwater wandelroute Dordrecht), VIV Communicatie (eindredactie Dordrecht werkt aan hoogwaterbeheer), *Dordrecht werkt aan hoogwaterbeheer*, Urban Flood Management MARE project Hoogwater wandelroute Dordrecht, novembre 2009.

Beaulieu P., Ph. D., Marchand J.-F., MUP, *Guide de planification stratégique des opérations d'évacuation en milieu hautement urbanisé*, Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile, gouvernement du Canada, 2001.

Blom E.T., Zevenbergen C., Gersonius B., Van Son E., *Smart shelter strategies –cost-effective-flood preparedness*, in *Comprehensive Flood Risk Management Research for Policy and Practice*, Klijn and Schweckendiek, 2012.

Caisse des dépôts et consignations (CDC), Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU), *Réussir le renouvellement urbain, 15 maillons clefs pour la chaîne de mise en œuvre des projets*, novembre 2001.

CEMAGREF, *Le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations, Guide des aménagements associant l'épandage des crues dans le lit majeur et leur écrêtement dans de petits ouvrages*, septembre 2004.

CEPRI, *Gérer les inondations par ruissellement pluvial - Guide de sensibilisation*, octobre 2014.

CEPRI, *L'évacuation massive des populations, Les territoires face à l'inondation*, mai 2014.

CEPRI, *Bâtir un plan de continuité d'activité d'un service public, Les collectivités face au risque d'inondation*, avril 2011.

CEPRI, *Un logement "zéro dommage" face au risque d'inondation est-il possible ?*, novembre 2009.

CEPRI, UMR 6173 CNRS/Université de Tours Citeres (Cité Territoire Environnement Société), *Méthodoloire, Développement d'une méthodologie de mise en perspective des dommages économiques à l'échelle du bassin fluvial de la Loire*, 2010.

Certu, *Prise en compte des risques naturels, 10 monographies*, 2012.

Charlot A., *Du quartier à la ville durable, vers un nouveau modèle urbain*, Victoire Éditions, 2012.

Comité 21, Comité français pour le développement durable, *Vers un nouveau modèle urbain. Du quartier à la ville durable*, Victoires Éditions, 2011.

Crochet E. (MIOMCTI/DSC), représentants du MEDDTL (DGPR, DHUP, CGPC) et membres du Groupe d'études et de propositions pour la prévention du risque sismique en France (GEPP), *Recommandations pour le recensement et la classification des bâtiments, équipements, ins-*

tallations et ponts de catégorie d'importance IV, disponible sur : http://www.planseisme.fr/IMG/pdf/guide_classe_d_vf_allegee.pdf

CSTB, *Bâtiments amphibies et autres solutions pour construire en zone inondable*, 2006.

DEFRA at al., *Developing the evidence base for flood resistance and resilience*, 2008.

DIREN Rhône-Alpes, *Démarche de réduction de la vulnérabilité des réseaux aux inondations du Rhône, Fiches-Actions*, 2008.

EDF Groupe, *Document de référence 2010*, disponible sur : http://medias.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Finance/Publications/Annee/2011/ddr2010/EDF_DDR2010_final_vf.pdf

Escarameia M., Stone K., Van M., Zevenbergen C., Morris M., *Guidance based on findings from the EU-funded Projet FloodProBE (Technologies for the Cost-effective Flood Protection of the Built Environment)*, disponible sur : <http://www.floodprobe.eu> (version datant d'octobre 2013).

Faytre L., *Logement : quelle exposition du parc francilien en zone inondable ? Note rapide n° 634*, Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France, décembre 2013.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Vertical Evacuation from Tsunamis: A Guide for Community Officials*, juin 2009.

Floatec, *Des maisons flottantes en cas de montée des eaux*, novembre 2011, disponible sur : http://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/good-practices/eu/760_fr.htm (consulté le 14/08/2014).

Gemeente Dordrecht, Ontwikkelingscombinatie De Werven BV, Paul van Beek landschappen BNT, AWG architecten cvba, *Masterplan Stadsverven, nieuwe stedelijkheid voor Dordrecht*, 2009.

Gersonius B., Kelder E.T.G., Anema K., Van Herk S. and Zevenbergen C. *Adaptation measures and pathways for flood risk in Dordrecht. 6th International conference on flood management*, September 2014, Sao Paulo, Brazil.

HafenCity Hamburg, *Essentials Quarters Projects*, octobre 2011, disponible sur : http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12981/pdf/zusammengefasst_Internet_Projekte_engl_final.pdf

Haut Comité français pour la défense civile (HCFDC), Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN), *Retour d'expérience suite à l'ouragan Sandy sur la côte est des États-Unis*, juillet 2013.

Hinborch M., *Flood defence town centre Dordrecht - Master thesis*, December 2010.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change (5^e rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures)*, 2014.

International Code Council (ICC) and the National Storm Shelter Association (NSSA), *Standard for the Design and Construction of Storm Shelters, ICC 500-2008*, août 2008.

Jacquot H., *Origines, enjeux et encadrement juridique des politiques de renouvellement urbain, Droit et politiques de renouvellement urbain, Cahier du Gridauh n° 10*, 2004.

Lecroart P., *Séoul, Cheonggyecheon Expressway*, in *La Ville après l'autoroute : études de cas*, Institut d'aménagement et d'urbanisme d'Ile-de-France (IAU IdF), Paris, août 2013.

Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, *Guide méthodologique des Plans de prévention des risques naturels (PPR), Risques d'inondation*, Paris, 1999.

Ministère de l'Écologie et du Développement durable, *Réduire la vulnérabilité des réseaux urbains aux inondations*, Paris, novembre 2005.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, *Bilan de l'activité de la CMI et des instances locales - Juillet 2011 à mai 2013*, 2013.

Ministère de l'Égalité des territoires et du Logement, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Référentiel de travaux de prévention du risque d'inondation dans l'habitat existant, juin 2012, disponible sur : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Referentiel-de-travaux-de.html>

Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Arakawa-Karyu River Office, Super Levees Guidebook, Tokyo, Japan, 2007.

Minnema P.A., Anema K.A., Jacobs J., Zevenbergen C., De Graaf R.E., Rotterdam-The Hague Emergency Airport, 2013.

Minnema P.A., Anema K.A., Jacobs J., Zevenbergen C., De Graaf R.E., Rotterdam-The Hague Emergency Airport, in Comprehensive Flood Risk Management Research for Policy and Practice, Klijn and Schweckendiek, 2012.

Morisseau G., Le quartier périurbain de la Bouillie (Blois), Les nouveaux paysages du risque, janvier 2012, disponible sur : www.projetsdepaysage.fr

OCDE, Étude de l'OCDE sur la gestion des risques d'inondation – La Seine en Ile-de-France, 2014.

ONEMA, La remise à ciel ouvert d'un cours d'eau, disponible sur : www.onema.fr

Petit O., Développement durable et territoires, revue en ligne, (consulté le 14/08/2014), disponible sur : www.developpementdurable.revues.org

Redeker C., Zollhafen Mainz Bauherrenhandbuch Modellprojekt Hochwasserangepasstes Bauen, juillet 2010.

Royal Institute of British Architects (RIBA), Climate Change Toolkit, Designing for Flood Risk, 2009.

Salagnac J.-L. (coord.), Marchand D., Florence C., Delpech P., Axes J.-M. CSTB, Impacts des inondations sur le cadre bâti et ses usagers, rapport final, juillet 2014, 46 p.

Scott K., The UK's first amphibious house to be built on the banks of the Thames, disponible sur : www.wired.co.uk (consulté le 14/08/2014).

Service de l'observation et des statistiques (SOeS), Croissance du nombre de logements en zones inondables, Le point sur n° 6, février 2009.

Stalenberg B., Design of floodproof urban riverfronts, disponible sur : www.urbanriverfronts.com (consulté le 14/08/2014).

Stalenberg B., Vrijling J.K., Adaptable Flood Defences, 2006.

Terrin J.-J. (sous la direction), Villes inondables, prévention, adaptation, résilience, éditions Parenthèses, décembre 2014.

Toubin M., Lhomme S., Diab Y., Serre D., Laganier R., La résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ?, Développement durable et territoires, vol. 3, n° 1, mai 2012, disponible sur : www.developpementdurable.revues.org

United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), Rendre les villes plus résilientes – Manuel à l'usage des dirigeants des gouvernements locaux, 2012.

Valette J.-P., Loire, Blois, Reconquête du bras de décharge du déversoir de "la Bouillie", Symposium européen, problèmes actuels de la protection contre les inondations, Paris-Orléans, mars 2012.

Van der Meer B., Van Emmerik T.H.M., Dalebout T.H., Man W.Y., Mi Z., Tien S., Live Love Levee, Project plan for flood safety with sustainable delta city development, Delta Design, disponible sur : <http://www.engineersonline.nl/download/Poster%20Live%20Love%20Levee.pdf> (consulté le 14/08/2014).

Veerbeek W., Gersonius B., Zevenbergen C., Puyan N., Billah M.M.M., Fransen R., Proceedings of workpackage 3: resilient building and planning, Urban flood management Dordrecht, August 2008.

Watson D., Design for flooding & resilience to climate change, disponible sur : http://www.vita-nuova.net/resources/journal/VN_Webnar_02-25-11.pdf (consulté le 14/08/2014).

Young Soogil Dr., Korea's Green Growth Projets: case studies, disponible sur : www.un.org/en/ga/second/65/docs/syoung.pdf (consulté le 14/08/2014).

Zevenbergen C., Cashman A., Evelpidou N., Pasche E., Garvin S., Ashley R., Urban flood management, CRC Press, September 2010.

Sites consultés

American Society of Civil Engineers, (consulté le 14/08/2014), www.asce.org

Baca Architects, www.baca.uk.com (consulté le 14/08/2014).

Communauté urbaine de Bordeaux, www.lacub.fr (consulté le 14/08/2014).

Conseil général de la Dordogne, www.cg24.f (consulté le 14/08/2014).

Deltasync, www.deltasync.nl (consulté le 14/08/2014).

De Urbanisten, www.urbanisten.nl (consulté le 14/08/2014).

FloodProBE, Technologies for Flood Protection of the Built Environment, (consulté le 14/08/2014), www.floodprobe.eu

GMP Architekten, <http://www.gmp-architekten.com/projects/kibbelsteg-bridges.html> (consulté le 06/08/2014).

Municipality of Dordrecht, <http://cms.dordrecht.nl/stadswervennw/nieuws> (consulté le 14/08/2014).

Projets de paysages, www.projetsdepaysage.fr (consulté le 14/08/2014).

Rotterdam Climate Initiative, www.rotterdamclimateinitiative.nl (consulté le 14/08/2014).

Ruimte voor de Waal Nijmegen, <http://www.ruimtevoordewaal.nl/en/room-for-the-river/> (consulté le 14/08/2014).

Saw Mill River Coalition, www.sawmillrivercoalition.org (consulté le 14/08/2014).

SMARTeST, SMARt Resilient Technologies, Systems and Tools, (consulté le 14/08/2014), disponible sur : www.floodresilience.eu

The Hague Airport, www.denhaag.nl/en/residents/to/Shuttle-service-to-Rotterdam-The-Hague-Airport.htm (consulté le 14/08/2014).

Urban Omnibus, <http://urbanomnibus.net/2013/11/daylighting-rivers-in-search-of-hidden-treasure> (consulté le 14/08/2014).

Waterstudio, www.waterstudio.nl (consulté le 14/08/2014)

Présentations

De Graaf Rutger, *Flood proofing hotspot buildings for water resilient cities*, DeltaSync BV & Rotterdam University of Applied Sciences, juillet 2012.

Fernandez Vanessa, *Architectures de l'urgence, l'ouragan Katrina et ses conséquences* à La Nouvelle-Orléans, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville, septembre 2011.

Gersonius B., *Adapting urban areas and infrastructures to changing flood risk: Dutch MLS concept*, présentation dans le cadre du FloodResilienceGroup, Unesco-IHE.

Gersonius B., *Flood risk management strategy Dordrecht*, Rotterdam, mars 2014, dans le cadre du Programme européen de la plate-forme d'observation des projets et stratégies urbaines (POPSU), PUCA, DGALN, MEDDE.

Hoss F., Jonkman S.N., Maaskant B., *A comprehensive assessment of multilayered safety in Flood risk management – The dordrecht case study*, septembre 2011.

Hulsebosch M., *Multi Level Safety Dordrecht*, Trondheim, mai 2011.

Minnema Peter, *Innovatieve ontwerpen*, septembre 2012.

Webler Heinrich, *Reconversion du Zollhafen à Mayence, un développement résilient aux inondations*, Mayence, novembre 2013.

Avec le soutien

