



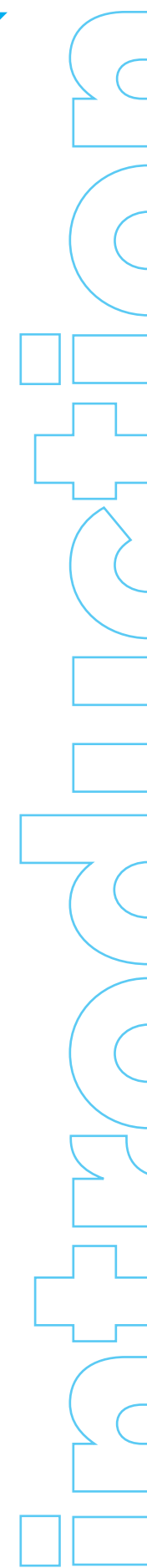
Actes de l'atelier de formation

"Réduction des risques
urbains en Haïti"

MIEUX PRENDRE EN COMPTE LE RISQUE NATUREL DANS L'URBANISATION ET L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE



République d'Haïti



Mieux prendre en compte les risques naturels dans l'urbanisation du territoire revêt aujourd'hui en Haïti d'une importance capitale. Les événements récents et malheureusement récurrents réaffirment encore trop souvent la nécessité de mieux prévenir et gérer ce type de risque pour en amoindrir les conséquences sur les personnes et les biens. En Haïti, une urbanisation souvent en pleine expansion, et pas toujours suffisamment maîtrisée, a tendance à accroître la vulnérabilité des habitants, des bâtiments et des équipements publics ou privés.

Pour mieux appréhender, prévenir et gérer ces risques, il est nécessaire de mieux les comprendre. Qualification des aléas, modélisation, cartographie, planification territoriale : les deux jours d'informations, organisés par le PNUD avec le soutien du bureau d'Aide Humanitaire de la Commission Européenne (ECHO-Haïti) et du gouvernement Britannique (UK-DFID) du 1^{er} au 4 décembre 2014 ont permis un tour d'horizon des méthodes scientifiques et/ou technologiques aujourd'hui à notre disposition pour mieux caractériser, surveiller, et prévenir les risques naturels.

Ces 4 jours d'information hautement technique étaient ouverts à un public large, rassemblant des acteurs de niveaux de compétence et de spécialités très hétérogènes. L'objectif était de susciter une prise de conscience auprès de ces acteurs de l'aménagement et de la gestion du territoire haïtien : la compréhension et la caractérisation précise des risques naturel est le préalable indispensable à leur prévention. Des cycles de formation plus approfondis et plus longs, portant sur les méthodes, les démarches, les outils scientifiques disponibles, devront prendre place ultérieurement.

Géologues, sismologues, sismotectoniciens, géomorphologues, hydrologues, hydrauliciens, architectes, urbanistes... : 12 experts nationaux et internationaux ont animé ces conférences sous forme de 3 modules riches d'échanges de points de vue, d'expériences et d'idées. Le présent document s'en veut le reflet.



Le forum « Prévention et gestion des risques naturels » a rassemblé, du 1^{er} au 2 décembre 2014, près de 500 participants entre Port au Prince (Hôtel Montana) et Cap Haïtien (Hôtel Roi Christophe).
Merci de la contribution de tous les intervenants et les participants pour ce temps riche en termes d'information et d'échanges. Merci au soutien d'ECHO et du Gouvernement Britannique (DFID) qui a permis l'organisation de ces journées.





Sommaire



Session 1 – Qualification des aléas sismiques

Lundi 1^{er} décembre 2014 à Port au Prince et Jeudi 3 décembre 2014 au Cap Haïtien

Cette première session a d'abord permis de dresser un portrait des risques naturels en Haïti. C'est ensuite différentes méthodes et outils de caractérisation du risque sismique qui ont été présentés : sismotectonique, mesure des bruits de fonds, micro-zonage sismiques... Les présentations ont aussi permis d'exposer plusieurs exemples d'application concrets.

Session 1

Module 1	Héritage géologique et risques naturels en Haïti <i>Roberte MONPLAISIR</i>	p 6
Module 2	L'utilisation de l'approche sismotectonique dans le domaine de l'évaluation de l'aléa sismique <i>Ara AVAGYAN - Samira PHILIP</i>	p 10
Module 3	Apport des mesures des bruits de fond pour la connaissance et la réduction du risque sismique <i>Bertrand GUILLIER - Jean-Luc CHATELAIN</i>	p 13
Module 4	Risque sismique et micro-zonage sismique en Haïti <i>Claude PREPETIT</i>	p 17

Session 2 – Qualification des aléas inondations et mouvements de terrain

Mardi 2 décembre 2014, matin à Port au Prince et Jeudi 4 décembre 2014 au Cap Haïtien

Cette seconde session, consacrée aux risques d'inondation et aux mouvements de terrain, a permis de présenter des méthodes de caractérisation et de modélisation des risques hydrauliques : hydro-géomorphologie, hydrologie, hydraulique, outils et démarches de prévention... Des outils comme la modélisation hydraulique ou la mise en œuvre de Plan de Prévention des Risques d'Inondation ont été exposés sur la base de retours d'expériences concrets. Une première introduction aux mouvements de terrain a été présentée aux côtés de moyens de caractérisation de ce risque.

Session 2

Module 5	Modélisation hydrologique et hydraulique et risque inondation <i>Francis MARTIGNAC</i>	p 20
Module 6	Gestion des bassins versants et prévention des inondations <i>Philippe DEBAR</i>	p 24
Module 7	Les mouvements de terrain : diversité des phénomènes et caractérisation du risque <i>Albert COLAS</i>	p 28

Session 3 – Gestion globale du risque et prise en compte dans l'urbanisme

Mardi 2 décembre 2014, après midi à Port au Prince et Jeudi 4 décembre 2014 au Cap Haïtien

Cette session exposait des démarches territoriales permettant de mieux les prendre en compte dans l'urbanisation et la gestion du territoire :

- Mise en place de zonages : définition de zones constructibles ou non, règles et prescriptions d'urbanisme fonction du niveau et de la nature des risques naturels,
- Mesures de prévention et de protection incombant aux instances publiques et/ou aux propriétaires privés (règles de construction, aménagements de réduction de la vulnérabilité...) permettant de réduire les conséquences du risque sur les personnes et les biens.

Session 3

Module 8	Retour d'expérience sur la prise en compte des mouvements de terrain dans l'aménagement du territoire <i>Françoise BESSET</i>	p 31
Module 9	Aménagements urbains en zones inondables <i>Gérard ETTORRE</i>	p 34



Héritage géologique et risques naturels en Haïti



EN RÉSUMÉ

Haïti - comme tous les autres pays - est confrontée en permanence à des risques majeurs : risques naturels (géologiques et hydro-météorologiques) et risques technologiques (liés aux activités humaines). Le séisme meurtrier du 12 janvier 2010 est venu rappeler - si besoin était - la grande vulnérabilité d'Haïti. Ce module présente le contexte géologique haïtien et les risques naturels qui y sont directement liés.

Les risques qui seront envisagés ici (séismes, inondations, mouvements de terrain) sont tous liés, directement ou indirectement, à la géologie. La connaissance des mécanismes de ces risques passe forcément par une bonne connaissance de la géologie du pays.

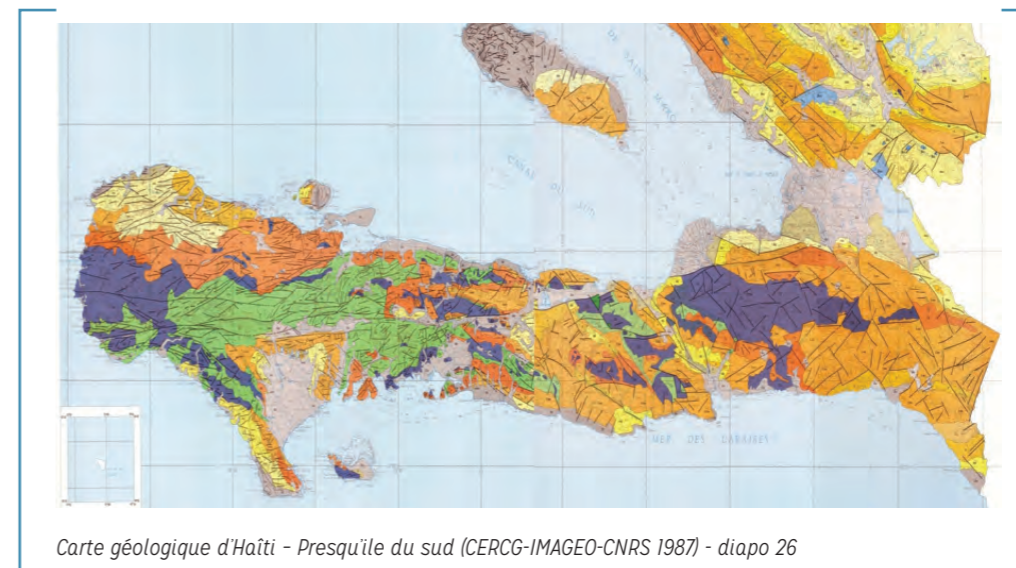
HAÏTI : UNE ÎLE COMPOSÉE DE DEUX ENSEMBLES GÉOLOGIQUES SUD ET NORD

La géologie d'Haïti est abordée à partir des deux grands ensembles qui composent le pays :

La Presqu'île du Sud comporte 2 massifs : le Massif de la Selle et le Massif de la Hotte, tous deux de direction générale Est-Ouest. Les terrains qu'on y retrouve vont du quaternaire au Crétacé inférieur. Ce sont en gros :

- des alluvions et des cônes d'épandage fluviaux : dans les plaines de Léogane et des Cayes par exemple et des calcaires infralittoraux
- des turbidites, des calcaires argileux, des pélites, des calcaires stratifiés (Formations Marigot, Glace, Béloc, Macaya...)
- des basaltes tholéitiques (en séquences dans la Formation Dumisseau) et en affleurements massifs dans le Massif de la Hotte qui constituent - peut-être - le soubassement de la Presqu'île du Sud.

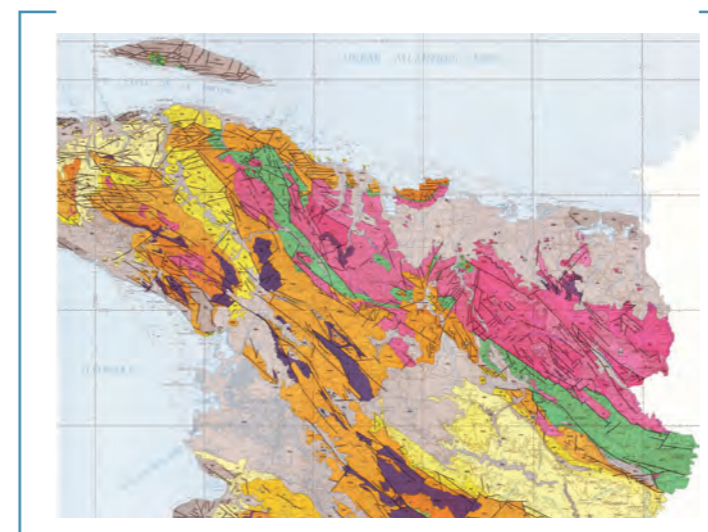
Toutes ces roches sont très diaclasées et parfois même broyées. Car elles sont affectées par tout un système de failles dont le principal est **le grand décrochement senestre qui traverse la Presqu'île du Sud de Pétionville jusqu'à Tiburon**. Ce grand décrochement (Enriquillo Plantain Garden Fault dans la littérature) a été tenu responsable dans un premier temps de la rupture du 12 janvier 2010. La faille responsable - Faille de Léogane - n'est en définitive que le prolongement ESE de la Faille des Trois Baies identifiée en mer dès 1986.



Carte géologique d'Haïti - Presqu'île du sud (CERCG-IMAGEO-CNRS 1987) - diapo 26

La Presqu'île du Sud est séparée du Nord d'Haïti par la Plaine du Cul-de-Sac, vaste dépression de plusieurs milliers de mètres d'épaisseur de sédiments. Cette plaine « contient » la capitale du pays : Port-au-Prince, qui associée à ses environs forment la plus grande agglomération du pays avec plus de 3.5 millions d'habitants (estimation 2014). Dans la plaine du Cul-de-Sac se trouve aussi le principal étang du pays : le lac Azuei.

Le Nord d'Haïti se compose d'une alternance de massifs montagneux globalement orientés Nord Ouest/ Sud-Est et de plaines alluviales. Du sud au nord, on retrouve ainsi : La Chaîne des Matheux et les Montagnes du Trou d'Eau - la Plaine et la Vallée de l'Artibonite - la Chaîne des Cahos, les Montagnes Noires et les Monts de Terre Neuve - le Plateau Central - le Massif du Nord - la Plaine du Nord.



Carte géologique d'Haïti Presqu'île du Nord (CERCG-IMAGEO-CNRS 1987) diapo 25



INTERVENANTE

Roberte Momplaisir

Géologue - Professeur universitaire FDS/UEH
roberte.momplaisir@laposte.net

Après un doctorat en géologie structurale à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 1986), Roberte Momplaisir a fait partie de l'INAREM dès sa fondation.

En 1981, elle intègre le Ministère des Mines et des Ressources Énergétiques et établit notamment dans ce cadre la carte géologique d'Haïti. Elle est le principal auteur du «Rapport National sur l'Environnement et le Développement» présenté par le Gouvernement Constitutionnel à Rio en juin 1992.

Professeur de géologie, de géographie physique et de géomorphologie à la Faculté des Sciences de l'Université d'État d'Haïti, elle travaille depuis 1997 en tant que chef de Projet à BETA Ingénieurs-Conseils. Elle a participé notamment à l'élaboration des termes de référence des études de réhabilitation des principaux axes routiers ainsi qu'à de nombreuses études environnementales.



Toutes les familles de roches se retrouvent dans cette partie nord d'Haïti (roches magmatiques plutoniques, roches magmatiques volcaniques, roches métamorphiques, roches sédimentaires). Parmi les plus significatives, on retiendra :

- les argiles gréseuses de la Formation La Crête (bassin de Gros-Morne)
- les marnes, grès, de la Formation Madame Joie (Plateau Central)
- les calcaires massifs et les conglomérats de la Formation de Plaisance
- les basaltes et andésites de la Formation Pérodin
- les andésites, les dacites, les rhyolites, les rhyodacites, les intrusions granitiques, les microgranites du Massif du Nord ainsi que d'épaisses séries de volcano-sédimentaires.

Tous ces ensembles sont aussi très déformés sinon intensément broyés. On retrouve des plis d'assez grande amplitude. Mais **la tectonique est largement dominée par deux grands systèmes de failles : la Faille Septentrionale** dont l'activité a causé des séismes majeurs dans le passé et **le système des Failles transhaitiennes NW-SE** qui borde au sud la Chaîne des Matheux et qui ne semble avoir été le siège jusqu'à présent que de petits séismes.

QUELS SONT LES RAPPORTS ENTRE CETTE GÉOLOGIE ET LES RISQUES MAJEURS ?



RISQUE SISMIQUE

Le séisme résultant d'un mouvement au niveau d'une faille, la sismicité historique d'Haïti montre bien que les 3 systèmes de failles cités plus haut sont bien les responsables des différents séismes enregistrés au cours des siècles.

Le séisme du 12 janvier 2010 a eu des conséquences extrêmement graves (source R. Monplaisir) - diapo 46



RISQUE INONDATION

Les inondations résultent soit de précipitations anormalement abondantes entraînant des débordements des cours d'eau, soit de remontées de nappes, soit de conjonction entre tempêtes, élévation du niveau de la mer (submersion marine). Elles sont considérées comme risques atmosphériques.

Mais en Haïti, les fortes pentes, les roches broyées par la tectonique, l'érosion des versants dénudés, constituent des facteurs aggravants pendant les saisons pluvieuses.

Montées des eaux au niveau du lac Azuéli (source R. Monplaisir) - diapo 74

RISQUE MOUVEMENTS DE TERRAIN

Les mouvements de terrain peuvent être lents (reptation, glissements lents) ou brutaux (glissements rapides, coulées boueuses, éboulements/chutes de blocs). Ces phénomènes sont étroitement associés à la nature de la roche et à la morphologie des versants et donc à la géologie. Même s'ils sont d'origine gravitaire, ces phénomènes peuvent être aggravés par la géodynamique interne de la terre - dont les séismes, qui contribuent à leur amplification.

Risque de glissement à Barrière Bouteille (source R. Monplaisir) - diapo 84



Le séisme du 12 janvier 2010 est venu tristement rappeler la violence des phénomènes naturels et le manque de préparation du territoire Haïtien pour y faire face

L'utilisation de l'approche sismotectonique dans le domaine de l'évaluation de l'aléa sismique

EN RÉSUMÉ

Pour combler à ce manque d'informations nécessaire pour une bonne compréhension du risque sismique, la sismotectonique couplé à la paléo-sismologie se révèle indispensables pour une meilleure connaissance de cet aléa et limiter ces effets dévastateurs sur le territoire Haïtien.

Ce module de formation présentait certaines avancées de la science de l'aléa sismique et ses premières applications en Haïti, notamment au travers de l'utilisation de la sismotectonique dans l'étude du risque sismique

LES SÉISMES

Les catastrophes naturelles font hélas régulièrement les gros titres de l'actualité. Les bilans sur le long terme indiquent toutefois que **les séismes n'occupent pas toujours le premier rang et peuvent être dépassés par les inondations, les cyclones et même les sécheresses**. Mais dans l'histoire de l'humanité, les hommes ont été particulièrement sensibles aux séismes, le sol, repère stable et immuable, se mettant soudainement à bouger sans qu'on en décèle la cause.

Aussi, les tremblements de terre ont pris une place importante dans de nombreuses mythologies et religions. Ils occupent encore une place à part parmi les risques majeurs. Si les inondations se produisent près des cours d'eaux et les éruptions sur les volcans et sont donc relativement prévisibles, **la localisation des séismes et leur prévision restent encore un domaine plein d'incertitudes**.

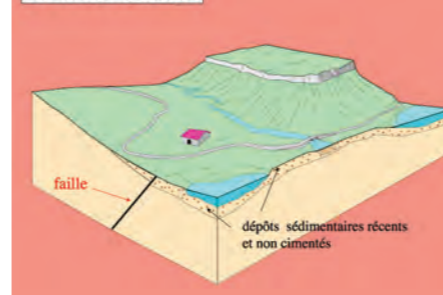
LA SISMOLOGIE : ENJEUX ET MÉTHODES

Les débuts de leur étude scientifique remontent à la seconde moitié du XIX^e siècle et les connaissances sur ce phénomène naturel ont énormément progressé depuis. **En Haïti, les données de sismicité historique sont très limitées** (post XVIII^e siècle) et ceux de la sismicité instrumentale sont quasi-inexistantes (réseaux sismique national très récent et encore non fonctionnel).

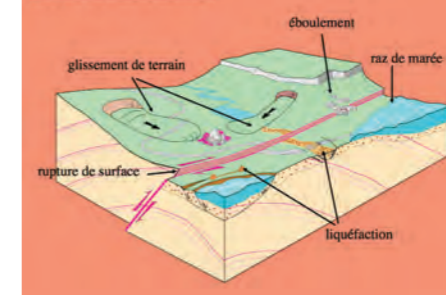
Ce module présentait l'ensemble des méthodes actuelles d'étude des tremblements de terre et du risque sismique. Il était consacré aux méthodes facilement applicables en Haïti, qui concourent à mieux connaître la sismicité et ses conséquences à travers des synthèses sismotectoniques.

Dans une première partie, **les causes des séismes** étaient présentées sous leurs aspects sismologiques et géologiques. On décrit tout particulièrement leurs effets permanents directs (ruptures de surfaces, modifications topographiques) et indirects (glissements de terrain, éboulements, liquéfaction, tsunamis).

avant le séisme



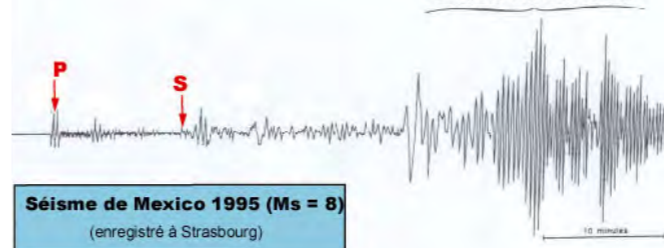
après le séisme



Les séismes induisent des conséquences directes et indirectes - diapo 13 et 14

Une deuxième partie présentait **les différentes méthodes d'études** qui concourent à l'heure actuelle à mieux connaître la sismicité et ses conséquences. Elles se complètent, chacune d'entre elles portant sur des périodes de temps différentes, depuis les données sismologiques actuelles (*sismicité instrumentale*) ou d'un passé récent (*sismicité historique*), jusqu'à des informations sur les effets de séismes bien antérieurs.

Ondes de Surface



Séisme de Mexico 1995 (Ms = 8)
(enregistré à Strasbourg)

Exemple de sismogramme (ou séismogramme) Séisme de Mexico, 1995

A la *néotectonique* (étude des déformations de terrains quaternaires), sont venues s'ajouter des disciplines nouvelles : l'archéosismicité qui examine les constructions anciennes pour y déceler les effets de séismes anciens et les prémices de la construction parasismique et la *paléosismicité* qui recherche les preuves géologiques de séismes, en particulier par l'exécution de tranchées. La collaboration entre sismologues et géologues pour réaliser des synthèses *sismotectoniques* avec toutes les données ainsi recueillies s'effectue aussi lors des interventions sur le terrain après un séisme.



Samira Philip

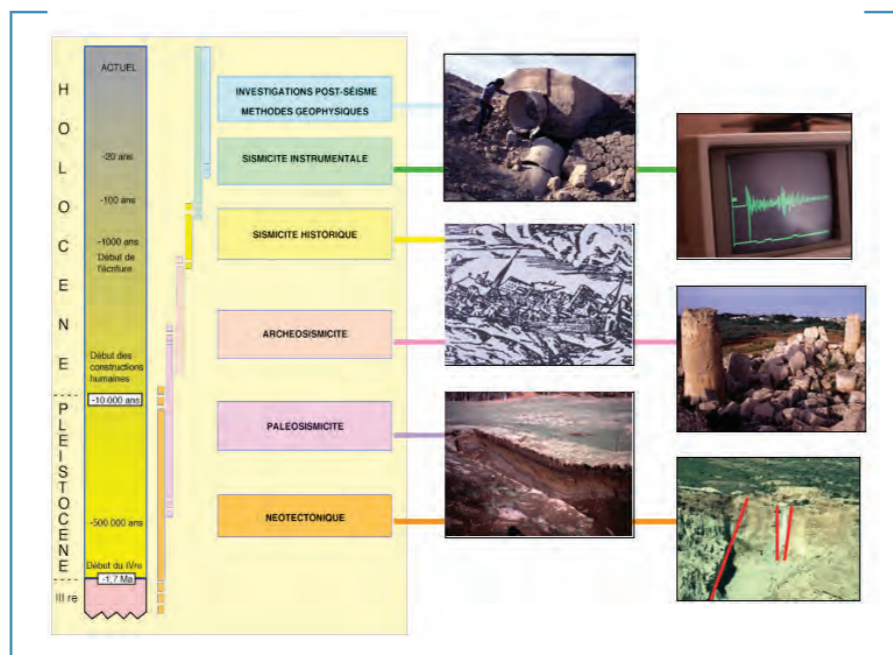
Conseillère technique Unité risques et désastre - PNUD
samira.philip@undp.org

Après un doctorat en Sismotectonique et risque sismique et un DESS Risques géologiques, Imageries de Surface et de Sub-surface et Cartographie à Montpellier, Samira Philip-Rebai compte plus de 20 ans d'expérience partagée entre le secteur privé, la recherche et l'enseignement. Elle a notamment dirigé les Pôles Cartographie et Gestion des Risques Naturels au sein de deux firmes (Ginger puis IMSRN) et y a mené de nombreuses études en lien avec l'élaboration des Plans de Prévention des Risque - PPR, de Plans Communaux de Sauvegarde - PCS, la formation des acteurs du risque, des zonages réglementaires...

Elle a également participé à de nombreux projets de lutte et d'anticipation contre les risques naturels en France et à l'étranger (Arménie, Maroc, Suisse, Haïti). Elle maîtrise les différentes étapes de la chaîne du risque, depuis l'évaluation de l'aléa, jusqu'à l'aide à la gestion de crise (élaboration de Plans Communaux de Sauvegarde (PCS), formation des acteurs du risque et coordination d'exercices de crise multirisques) en passant par la réalisation de scénarios de risques, du zonage réglementaire et la mitigation des risques (Elaboration de Plans de Préventions Risques Naturels (PPR)).



Les méthodes sismotechniques utilisées varient suivant les périodes géologiques - diapo 93



Enfin une troisième partie présentait **les utilisations de la sismotectonique dans le domaine du risque sismique**. Les notions de failles actives et les moyens de qualification et de cartographie des failles actives. Pour la prévision comme pour la prévention, l'identification des failles actives et donc des sources sismiques sont indispensables pour le zonage sismotectonique qui est nécessaire à différentes échelles. A celle d'une commune, le microzonage qui fait appel aussi à d'autres données, en particulier géotechnique et sismologique.



Spitak, Arménie, 1988, M:6.9

Apport des mesures des bruits de fond pour la connaissance et la réduction du risque sismique



EN RÉSUMÉ

Le séisme ne tue pas, ce sont les bâtiments et les glissements de terrains qu'il provoque qui tuent. Ce module présente différentes méthodes de mesure du Bruit De Fond ambiant (BDF) comme méthode de détermination des paramètres dynamiques des sols et des bâtiments, permettant de mieux évaluer la vulnérabilité.

LES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Pour les études de sols ou de bâtiments, il existe de nombreuses méthodes plus ou moins onéreuses, plus ou moins difficiles à mettre en œuvre, avec un temps acquisition des données plus ou moins long. Actuellement, une méthode basée sur l'enregistrement *in situ* de bruit de fond ambiant (BDF) s'avère une très bonne alternative pour la détermination des paramètres dynamiques du sol (évaluation de l'amplification des ondes sismiques [rapport H/V], détermination des vitesses de ondes de cisaillement V_s dans le sol [en profondeur] par inversion de données de surface) mais aussi des paramètres dynamiques des structures bâties (fréquences fondamentales, amortissements et déformées modales).

Rappelons **deux choses essentielles pour l'évaluation du risque sismique** :

- **Le séisme ne tue pas, ce sont les bâtiments qui tuent.** Leur capacité à résister à un séisme est donc un élément critique qui doit être beaucoup plus pris en compte.
- **Il n'y a pas de bon ou de mauvais sol** (en dehors de la liquéfaction), il y a une mauvaise correspondance entre sol et bâtiment, correspondance qui peut d'autant plus fragiliser le bâtiment vis-à-vis d'un séisme potentiel.

Finalement, on comprend intuitivement, que si le sol et le bâti ont chacun une fréquence de vibration propre, tout rapport entre ces deux fréquences peut être un facteur de vulnérabilité plus ou moins aggravant. **Lors d'un séisme, un bâtiment se trouve « surexposé » à des vibrations** sa fréquence fondamentale, saturant la structure en énergie à cette fréquence. Le bâtiment ne peut alors « évacuer » cette énergie qu'en se déstructurant de manière plus ou moins forte, par une baisse de sa fréquence fondamentale.

Si le bâtiment entre alors dans une fenêtre de fréquence proche de celle du « sol », il est contraint de continuer sa déstructuration, jusqu'à sortir de tout apport énergétique correspondant à son fonctionnement. Bien entendu, **passé en dessous d'un certain seuil de la fréquence fondamentale, le bâtiment va s'effondrer** : le seuil actuellement admis est de l'ordre de 60%.



Bertrand Guiller

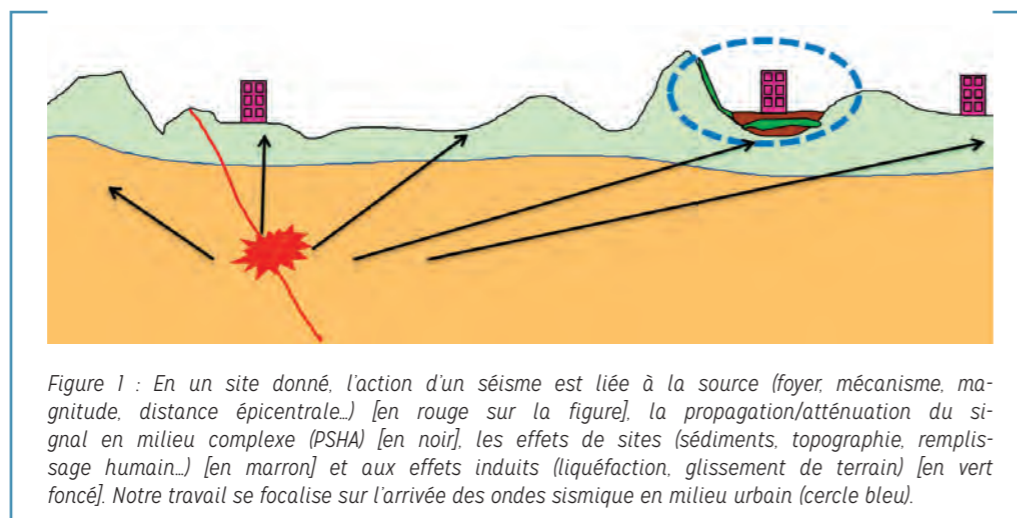
Chercheur à l'IRD, ISTERre, Grenoble, France
bertrand.guillier@ird.fr

En 1991, il valide sa thèse : «Dépliage automatique de strates plissées et faillées. Application à l'équilibrage de structures naturelles ». Après un poste à l'Institut Français des Pétroles puis à l'Institut Français d'Etudes Andines, il développe ses activités de recherche à l'IRD, à travers différents projets en France et à l'étranger (Bolivie, Equateur, Algérie, Pérou). Spécialiste de la tectonophysique dans un premier temps, il intervient plus spécifiquement sur la sismotectonique depuis une dizaine d'années. Il s'investit aujourd'hui dans l'évaluation de l'aléa et du risque sismique dans le cadre de nombreux projets de recherche appliquée.

Jean-Luc Chatelain

Chercheur à l'IRD, ISTERre, Grenoble, France
jean-luc.chatelain@ird.fr

Après une thèse portant sur la sismicité en zone de collision continentale dans la région Hindu-Kush Pamir et une HDR intitulée «De la microsismicité à la Sismologie Sociale», Jean-Luc Chatelain a dirigé de nombreux projets de recherche sur la sismotectonique en France et à l'étranger (USA, Argentine, Equateur, Algérie...). Ses recherches portent depuis plus de 10 ans sur le bruit vibratoire ambiant. Il est l'auteur de 5 ouvrages ainsi que de nombreux articles scientifiques.



LE BRUIT DE FOND AMBIANT : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

Un enregistrement sismique continu - hors crise sismique, répliques... - **comporte plus de 99% de signal « incohérent »** et moins de 1% de signaux provenant de séismes et cela en zone sismique. Reste que **cette très forte majorité de signaux « incohérents »**, non utilisables en sismologie traditionnelle, **contient de l'information sur les milieux traversés**. Le BDF en un point est la somme des vibrations produites par toutes les sollicitations, autres qu'un séisme, se propageant dans le sol. Ce signal peut être divisé en trois gammes de fréquence :

- **basse fréquence** (< 0.5 Hz) : ondes liées aux conditions climatiques à grande échelle (tempêtes, houle océanique)
- **moyenne fréquence** (entre 0.5 et f_{f1} à 2 Hz, limite supérieure variable) : ondes liées aux conditions climatiques locales (vent, pluie, vagues...)
- **haute fréquence** (supérieur f_{f1}-2 Hz) : ondes d'origine humaine (machines, piétons, voitures...), majoritairement produites en ville.

Des différentes ondes sismiques (volume [ondes P et S] ou surface [ondes de Rayleigh et Love]), **ce sont les ondes de surface qui nous intéressent le plus**.

LE BRUIT DE FOND AMBIANT : SOLS

Plusieurs types d'étude peuvent être menées sur les sols : **des études mono-station** (méthode H/V ou Nakamura) **ou multi-stations** (réseau d'antenne).

Etudes mono-station : le principe de la méthode dite « H/V » est que si on enregistre les ondes incidentes sur un site rocheux, le contenu spectral global contient toutes les fréquences (on parle d'un bruit « blanc »). Mais si les ondes traversent des structures superficielles (bassins sédimentaires, couches de surface...), une fréquence correspondant à la longueur d'onde de l'épaisseur des sédiments traversés est alors amplifiée (effet de site) par un simple phénomène de résonance des ondes sismiques. Un traitement du signal enregistré sur un site,

à l'aide de transformées de Fourier (FFT), permet d'identifier un éventuel effet de site par la définition d'une fréquence de résonance (Figure 2A). Si de nombreuses mesures sont faites, il est possible de cartographier ces effets de site et de faire des cartes de microzonage (Figure 2B) voire de nanozonage (implantation d'usine, structures sensibles...).

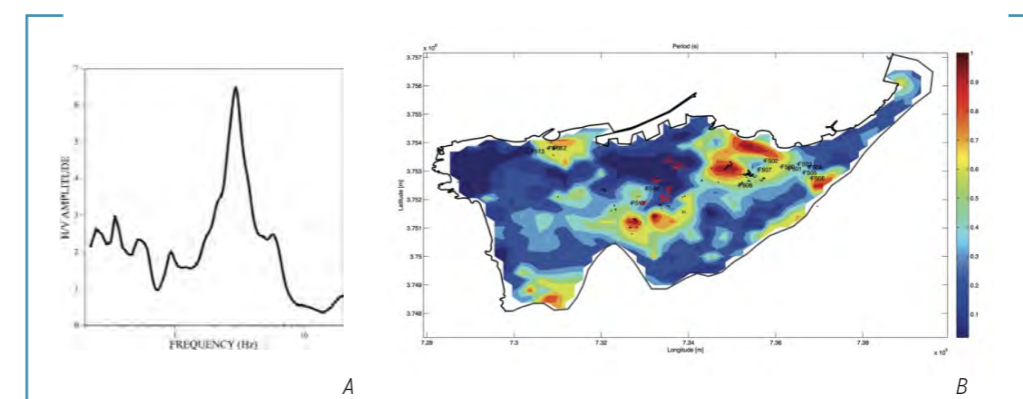


Figure 2 : Utilisation du BDF pour la détermination des effets de site. 2A : courbe H/V typique avec un net pic vers 3 Hz (et écart-type en pointillé) 2B : carte de microzonage de Beyrouth (Liban, Brax 2014).

Etudes multi-station : cette méthode basée sur l'enregistrement de BDF simultanément avec plusieurs capteurs permet de déterminer les vitesses des ondes S en surface et en profondeur (inversion), permettant alors d'imager la structure du sous-sol.

LE BRUIT DE FOND AMBIANT : BÂTIMENTS

Le manque d'informations (plans, matériaux de construction...) sur les bâtiments existants ne permet pas de déterminer facilement et rapidement les caractéristiques de ces structures. Cependant, **à partir d'enregistrements de BDF dans les structures, on peut facilement obtenir leurs caractéristiques dynamiques** (fréquences propres, déformées modales et amortissements). Les différentes fréquences (dont la fondamentale) sont obtenues par FFT d'un enregistrement de BDF au sommet du bâtiment et l'interprétation des courbes obtenues (Figure 3 ; on peut aussi identifier le type de mouvement : torsion, flexion...), et alors calculer l'amortissement de chaque fréquence identifiée (mesures mono-station).

En plaçant un capteur par niveau de la structure étudiée, il est possible de visualiser la répartition de l'énergie de chaque fréquence à chaque niveau et donc d'**identifier des ruptures anormales de cette répartition énergétique**.

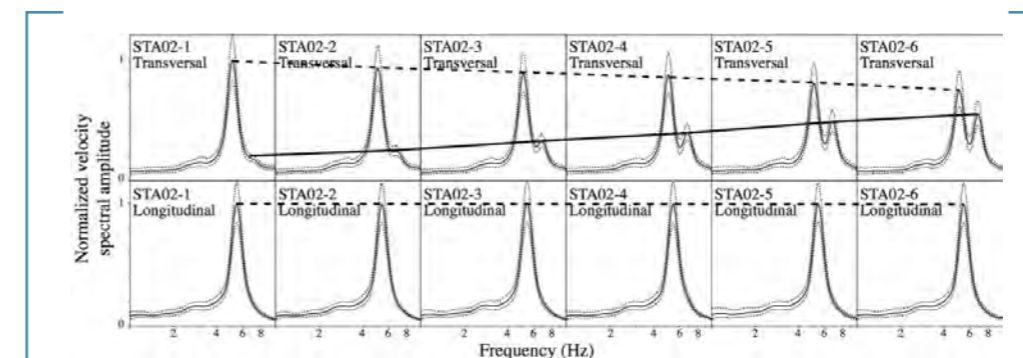


Figure 3 : Utilisation du BDF pour la détermination des fréquences fondamentales (longitudinales et transversales) d'un bâtiment en béton armé de 5 étages.

À SAVOIR

Les mesures en bâtiment permettent d'évaluer l'état de ce bâtiment par rapport à des normes fixées (normes parasismiques) mais aussi d'évaluer les bâtiments après l'occurrence d'un séisme, ainsi que de suivre son vieillissement.



Les méthodes utilisant le bruit de fond sont **très performantes pour la détermination des paramètres dynamiques du sol et des bâtiments**. Elles sont comparables aux autres méthodes pour la précision des résultats, mais leur coût est bien moins élevé. Cela permet d'apporter des éléments importants pour l'aide à la décision, par la réalisation de microzonages permettant d'imager le comportement du sol, et donc d'en déduire le type de bâtiment que l'on peut construire. D'autre part, une **bonne connaissance du sol et du bâti permet d'évaluer les dégâts potentiels en cas de séisme**. En outre, ces méthodes permettent d'affiner considérablement les codes parasismiques, les codes de bonne conduite de construction (population), et d'optimiser les plans de contingence et de prévention.



Le séisme ne tue pas, ce sont les bâtiments qui tuent.

Risque sismique et microzonage sismique en Haïti



EN RÉSUMÉ

Le microzonage sismique est un outil de caractérisation du risque sismique apporte une connaissance du terrain et de son comportement en cas de séisme, précieuses pour mettre en œuvre une politique préventive d'aménagement du territoire.

Appliqué récemment à l'agglomération de Port-au-Prince, cette méthode montre qu'il est possible de caractériser le risque sismique de manière précise, pour mieux le prévenir.

DÉFINITIONS

Le **risque sismique** se définit comme la combinaison de l'**aléa** (probabilité d'occurrence d'un séisme en un lieu, un temps et une intensité donnés) et de la **vulnérabilité des enjeux** (impacts de l'aléa sur la population, le bâti, les infrastructures, l'environnement, etc.).

Risque sismique = Aléa sismique + Vulnérabilité

Nous verrons ci-dessous comment ces deux dimensions se caractérisent et comment elles se manifestent en Haïti.

L'aléa ou la menace sismique, pour une région donnée, est la combinaison du potentiel sismique (Où ? Quelle taille ? Quand ?) et de la propagation des ondes sismiques.

La vulnérabilité est caractérisée par le degré d'exposition des villes par rapport aux failles actives, la densité de la population dans les villes exposées, la mauvaise qualité du bâti, l'impréparation de la population et des Institutions de l'Etat face aux séismes.

L'ALÉA SISMIQUE EN HAÏTI

Le **potentiel sismique dans la Caraïbe** est caractérisé par :

- Une (petite) plaque tectonique entourée de 4 (grandes) plaques
- Les frontières entre la plaque Caraïbe et ses voisines sont marquées par des zones sismiques
- Hispaniola est cisailée et comprimée à une vitesse de 2 cm/an => accumulation de contraintes
- Ces contraintes se libèrent épisodiquement par des ruptures = séismes
- A l'Ouest d'Hispaniola, ce sont le système de failles nord-septentrionale d'Hispaniola et le système de failles d'Enriquillo-Plantain-Garden qui limitent les plaques Nord-Américaine et Caraïbes, ces deux systèmes structurent aussi le fossé de Cayman.

Plusieurs séismes majeurs ont frappé l'île d'Hispaniola au cours des derniers siècles.

Ces séismes sont essentiellement concentrés au nord, le long du système de failles septentrionales. Il s'agit notamment du séisme du 7 mai 1842, de magnitude estimée à 8, qui a sévèrement affecté le nord du pays ; au sud, le long du système de failles d'Enriquillo puis du fossé de Muertos. Il s'agit notamment des séismes du 9 novembre 1701, du 18 octobre 1751, du 3 juin 1770, du 8 avril 1860 et du 12 janvier 2010.



Claude Prépétit

Géologue, coordonnateur de l'UTS et du Microzonage sismique, au sein du Bureau des Mines et de l'Energie. Professeur à GOC Université claudeprepetit@hotmail.com

Après l'obtention d'un diplôme d'ingénieur civil à la faculté des sciences de Port au Prince et de géologie à l'ENS des Mines de Paris, il a travaillé 10 ans à l'INAREM (Ministère des mines et des ressources énergétiques) en tant que géologue prospecteur (programme PNUD), puis en tant que Chef de service Géologie.

Il a ensuite été directeur de la Géologie et des Mines au Bureau des Mines et de l'Energie pendant 5 ans, avant d'intégrer la Direction générale. Après le séisme de 2010, il a été nommé Coordonnateur de l'Unité Technique de Sismologie (UTS) d'Haïti.

En 2012, il lui a été décerné le Prix d'Excellence 2012 Scientifique de l'année par le GRAHN-Monde..

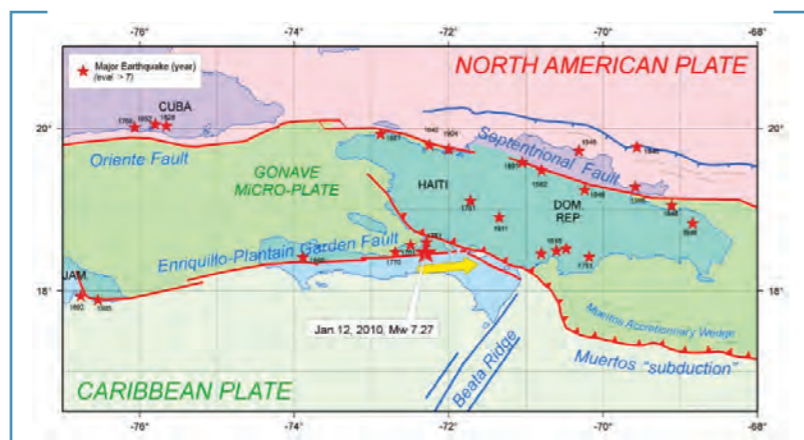


LA VULNÉRABILITÉ DES ENJEUX EN HAÏTI

Le séisme du 12 janvier 2010 est venu rappeler de façon dramatique et brutale la menace trop longtemps sous-estimée de la forte exposition du territoire d'Haïti au risque sismique. Les dégâts considérables observés et le nombre très élevé de victimes sont liés à la conjonction de deux facteurs : la puissance du séisme au niveau du segment de faille qui a rompu et la forte vulnérabilité des bâtiments exposés.

Mais, viennent aussi s'ajouter des facteurs aggravants liés à la nature même des sols et du sous-sol qui amplifient le potentiel destructeur du séisme sur certains sites avec localement des concentrations de dommages importants. Dans le cadre de la reconstruction des zones détruites et des aménagements futurs en périphérie de Port-au-Prince, il est impérieux de réduire la vulnérabilité sismique des zones urbaines fortement exposées aux séismes futurs.

Failles actives et sismicité historique en Haïti



LE MICRO ZONAGE SISMIQUE : DÉFINITION ET APPLICATIONS

Pour cela, **la connaissance des terrains et de leur comportement en cas de séisme est un préalable indispensable. Le microzonage sismique répond à ce besoin** en déterminant une catégorisation des sites en fonction de leur niveau de danger et en identifiant les zones où des effets de site importants sont susceptibles de survenir. Destiné aux décideurs, aux aménageurs, aux constructeurs, aux ingénieurs structure, aux architectes mais aussi au public, **le microzonage sismique a un caractère opérationnel, très appliqué**, utilisable aussi bien pour la reconstruction des zones détruites du territoire haïtien que pour la mise en place d'une politique préventive d'aménagement du territoire, prenant en compte les risques naturels.

Le microzonage sismique est un outil de connaissance de l'aléa à l'échelle d'une commune ou d'une agglomération urbaine. Dans les actions de réduction du risque, le microzonage sismique est à la fois :

- un outil de **prévention** pour orienter l'urbanisation et réduire la vulnérabilité
- un outil de **prévision** dans la mesure où il cible les zones les plus dangereuses ; c'est en cela un outil utile pour la planification des secours
- un outil d'**information** et de sensibilisation des populations sur les risques.

À SAVOIR

Dans un contexte d'aléa fort, la construction parasismique est une nécessité si on souhaite une réduction significative du risque sismique en Haïti.

Plus particulièrement, le microzonage sismique permet :

- la fourniture de paramètres techniques de mouvements du sol pour les bureaux d'étude et maîtres d'ouvrage
- une aide à la mise en oeuvre des règles parasismiques
- la fourniture de données de base pour la réalisation de Plans de Prévention des Risques et de Scénarios de Risque sismique
- de définir un cadre de réflexion pour l'aménagement urbain
- une utilisation en support de communication et de sensibilisation pour l'information préventive.

UN EXEMPLE : LE MICROZONAGE SISMIQUE DE L'AGGLOMÉRATION DE PORT-AU-PRINCE

Le microzonage sismique de Port-au-Prince couvre la zone urbaine de Port-au-Prince sur environ 80 km². Les communes concernées par cette étude réalisée par le consortium BME/LNBTP/BRGM sont Port-au-Prince, Delmas, Pétiion-Ville, Tabarre et Cité Soleil. Un rapport de synthèse accompagne les cartes disponibles sur les sites internet ci-contre.



Mesure de sismicité mise en œuvre dans le cadre de l'étude « Microzonage sismique » à Port au Prince

Les résultats de l'étude ont abouti aux conclusions suivantes :

- L'aléa sismique est un **aléa fort sur toute l'agglomération de Port-au-Prince** quel que soit le site :
 - Aléa régional plus élevé vers Pétiion-Ville que vers Cité Soleil
 - Mouvements de terrains et effets de sites topographiques plus importants dans les zones à topographie agitée du Sud de Port-au-Prince
 - Failles actives plus présentes au Sud
 - Sols plus mauvais sur le littoral, Fort National...
 - Aléa liquéfaction élevé sur le littoral
- Le rocher affleurant (classe 0) n'est présent que sur la bordure sud de la zone d'étude sur les communes de Port-au-Prince et de Pétiion-Ville. 6 autres classes de sols sont définies.
- De fortes amplifications sont possibles pour les immeubles souples ou de grande hauteur sur les sols de la classe 2. A l'inverse sur les sols de classes 5 et 6, les bâtiments rigides ou de faible hauteur, subiront une agression plus forte.

RÉFÉRENCES

L'étude microzonage sismique de Port-au-Prince mise en œuvre par le consortium BME/LNBTP/BRGM est disponible sur :

- www.mtptc.gouv.ht
- www.lnbtp.gouv.ht
- www.bme.gouv.ht



Modélisation hydrologique et hydraulique et risque d'inondation



EN RÉSUMÉ

La caractérisation de l'aléa inondation bénéficie aujourd'hui d'apports théoriques et numériques permettant de les modéliser de manière de plus en plus précise. Les modèles hydrauliques sont aujourd'hui assez précis pour établir des acrets de risque précises, mais aussi tester les impacts de différents aménagements.

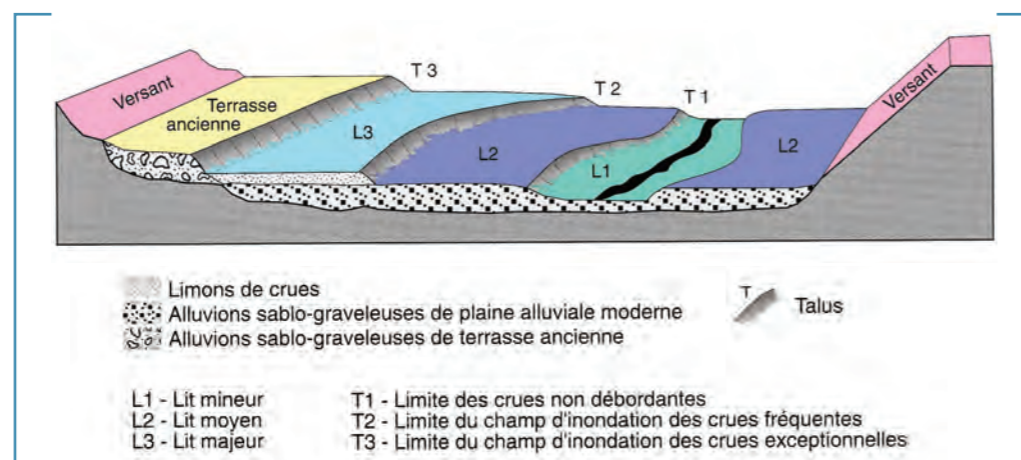
La caractérisation de l'aléa « inondation » pourrait se résumer à la définition de la ligne d'eau de la crue de référence qui est pour un PPRi (Plan de Prévention du Risque d'Inondation) la plus grande crue connue si celle-ci est de période de retour supérieure ou égale à la centennale. A défaut, c'est la crue centennale.

DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MODÉLISATION

Plusieurs approches permettent d'atteindre cette caractérisation de l'aléa inondation pour la définition des zones inondables : **la méthode hydrogéomorphologique** qui définit plutôt une emprise maximale, et **la modélisation hydraulique** pour la définition d'une emprise pour une fréquence donnée. Ces 2 approches peuvent (et sont souvent) combinées.

L'approche hydrogéomorphologique apporte des Informations sur la connaissance du risque inondation et est un moyen de vérification des limites de zones inondables. L'estimation de la hauteur d'eau pour la cartographie de l'aléa reste correcte sur certains secteurs, mais hasardeuse sur d'autres. Par contre, l'estimation de la vitesse d'écoulement est assez difficile voire illusoire sans calculs hydrauliques, même sommaires, à partir de la topographie disponible.

La modélisation mathématique, quant à elle, apporte une certaine précision pour la cartographie ou l'influence d'ouvrages et une bonne précision pour le calage d'ouvrages de protection grâce à une connaissance précise des niveaux d'eau (hauteurs), des vitesses d'écoulement, et ce pour différentes crues (10, 50, 100 ans...) et en tous points du secteur d'étude.



EN PRATIQUE : LES PREMIÈRES ÉTAPES DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE

Le déroulement d'une modélisation hydraulique débute par la collecte des données bibliographiques (études historiques, monographies, cartographies, documents d'urbanisme, articles de presse, sites web...), hydroclimatologiques (stations pluviométriques et hydrométriques, système d'annonce de crues, etc. - En Haïti, il existe a priori 71 stations), et topographiques (anciennes études hydrauliques ou autres, urbanisme, projets immobiliers, etc.).

Toute modélisation se commence sur le terrain pour s'imprégner du contexte hydraulique.

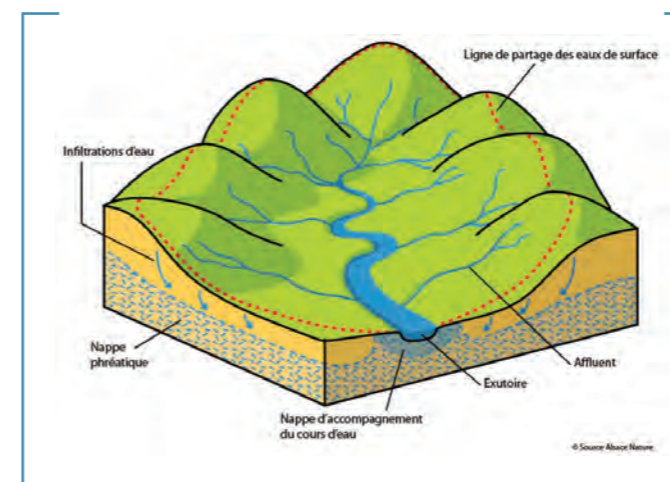
Cette analyse de terrain en complément de celle effectuée par l'hydrogéomorphologue se concentre sur la configuration générale (cours principal, secondaires) et l'historique des crues les plus récentes. Elle permet d'appréhender les éléments géomorphologiques du lit majeur (zones de débordement, chenaux d'écoulement préférentiels, talus, points d'attaque de courant et de sortie, végétation, occupation du sol, etc.) et les éléments structurants de l'espace (remblais, digues, seuils, ponts, points de contraintes hydrauliques, travaux et ouvrages ayant un impact hydraulique, obstacles à l'écoulement, busages, etc.).

Cette analyse est complétée par une enquête de terrain à destination des riverains

(recueil des témoignages sur les conditions d'écoulement : entrées, itinéraires et sorties des écoulements, hauteurs, vitesses, obstacles... lors des crues et sur des repères de crues non répertoriés) et des communes afin de connaître les projets d'aménagement susceptibles de modifier les enjeux en zone inondable ou les conditions d'écoulement des cours d'eau.

LA CARACTÉRISATION DES ÉCOULEMENTS

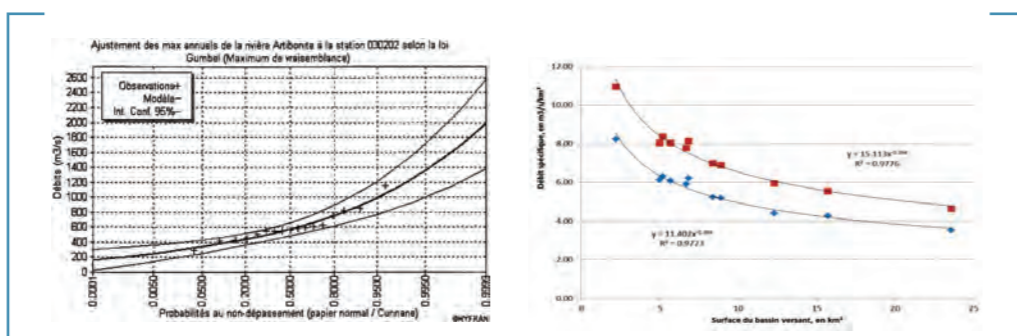
Si les hauteurs d'eau intéressent les riverains, les débits intéressent les ingénieurs. En conséquence, l'hydrologue calcule les débits, l'hydraulicien les fait couler. L'hydrologie de crue consiste en l'estimation des débits de période de retour T (ce débit a une chance sur T de se produire dans l'année).





Diverses méthodes permettent d'estimer les débits de crue : traitement statistique de chroniques de mesures s'il existe une station sur le bassin versant, formules empiriques classiques (CRUPEDIX, SOCOSE, rationnelle, SCS...), courbes enveloppes (Francou-Rodier, PMP-PMF...), corrélation avec BV voisins ($q=f(SBV)$), modélisation hydrologique (HEC-HMS, MIKE BASIN), modèle pluie-débit (GRADEX par ex).

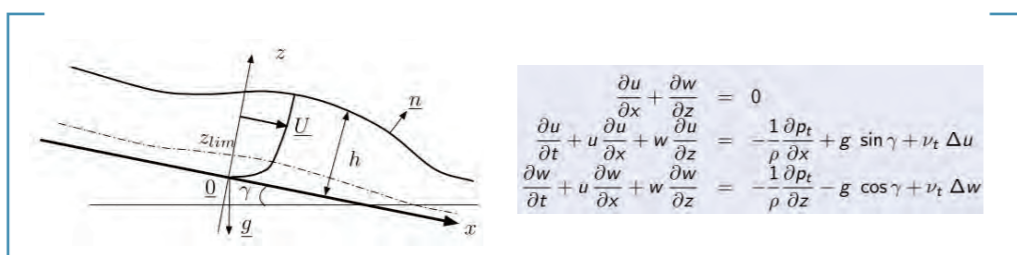
Lois de Gumbel, modèles pluie-débit, courbes-enveloppe... les méthodes d'estimation des débits de crue sont nombreuses



La modélisation hydraulique des écoulements consiste en la résolution des équations de Saint-Venant dans un canal prismatique (ou plusieurs). La configuration géométrique est issue de données topographiques par levés terrestres (théodolite ou GPS de précision) point par point et par la technique LIDAR (avion ou drone) sur de grandes surfaces. On établit des profils en travers de la rivière à modéliser dont l'implantation optimale est définie par l'analyse hydraulique sur la base de profils encadrant les ouvrages en travers ou des singularités locales (confluence, élargissement ou rétrécissement).

On ne peut parler des équations qui régissent les écoulements sans évoquer **Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant** (aout 1797 - février 1886 en France), Fils de Jean Barré de Saint-Venant, officier à Haïti et de Marie-Thérèse Joséphe Laborie (née à Cap-Haïtien en 1769). Les équations de Barré de Saint-Venant constituent un système d'équations différentielles partielles hyperboliques qui décrit l'écoulement d'un fluide en contact avec une surface par la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Les équations de Barré de Saint-Venant



LES MODÈLES NUMÉRIQUES HYDRAULIQUES

La modélisation restant une affaire de spécialiste, **un modèle hydraulique peut être filaire ou unidimensionnel**, écoulement dans un chenal simple ou dans un lit majeur d'inondation (1D) **ou un modèle multidirectionnels**, plaines d'inondation, modèles maritimes (2D). Une modélisation 2D est plus précise mais plus coûteuse à mettre en œuvre. Entre ces deux

modèles, une modélisation 1D maillé (ou pseudo-2D) peut concerner les écoulements multidirectionnels sur des champs d'inondation ou des déversements sur les berges ou sur les digues...) en associant des modèles 1D.

Les logiciels de modélisation hydraulique (gratuit ou pas) sont nombreux. On citera HEC-RAS (US Army Corps of Engineers), USA, MASCARET (EDF, CETMEF) France, MIKE 1D&2D (Danish Hydraulics Institute), SIC (IRSTEA France), ISIS (WALLINGFORD Software et HALCROW, Royaume uni), RUBAR3 (IRSTEA France), TELEMAT 2D, etc.

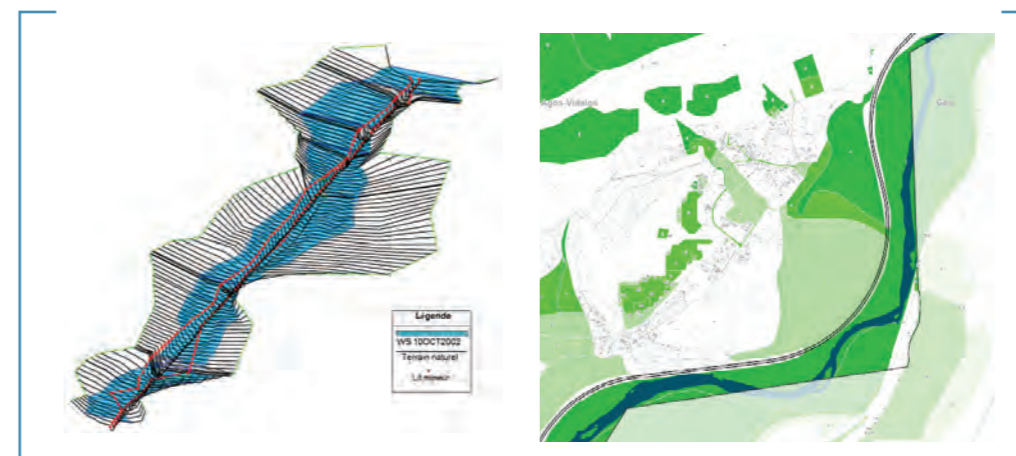
Le montage du modèle hydraulique 1D consiste à **intégrer tous les profils bathymétriques complétés en lit majeur actif ainsi que les ouvrages** en travers (ponts, seuils) et longitudinaux (digues). Le modèle peut être filaire en général et, sur certains secteurs, maillé et ramifié afin de tenir compte de tous les apports et de tous les chenaux activés par les débordements (gouttières morphologiques, voiries...). Le montage d'un modèle 2D consiste à mailler le secteur à modéliser en liant tous les points du modèle numérique de terrain.

CALAGE ET EXPLOITATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES

La phase de calage d'un modèle hydraulique consiste à régler les paramètres hydrauliques pour obtenir aux endroits voulus des hauteurs d'eau (résultats de la simulation) proches de celles observées sur le terrain et ceci pour un débit connu, hauteurs issues de l'enquête de crue et de l'analyse hydraulique.

Une fois le modèle choisi, monté et calé, il ne reste plus qu'à l'exploiter, c'est-à-dire, simuler divers débits tels que crue de plein bord, crue de différentes périodes de retour (biennale, décennale et centennale) afin de calculer les lignes d'eau en tous points du secteur modélisé.

Les lignes d'eau calculées et notamment celle de la crue de référence permettent de **dresser la cartographie des aléas** par comparaison des niveaux d'eau et des niveaux de terrain pour définir la hauteur d'eau en tout point. On dresse ensuite des isobathes (ligne qui joint les points de même hauteur) par tranches de hauteurs : de 0 à 0.5 m, de 0.5 à 1.0 m et plus de 1.0 m. pour compléter la carte des hauteurs, on superpose les vitesses moyennes par l'intermédiaire de flèches donnant l'intensité (0 à 0.5 m/s et plus de 0.5 m/s) et la direction.



Des exemples de cartes d'aléa inondation, obtenues grâce à l'exploitation de modèles numériques

Gestion des bassins versants et prévention des inondations

EN RÉSUMÉ

Les inondations correspondent à des débordements des cours d'eau et/ou à des phénomènes de ruissellements de surface. Elles peuvent avoir des conséquences très graves, potentiellement aggravées par des facteurs naturels ou anthropiques tels que l'imperméabilisation des sols, l'urbanisation des zones inondables, etc.

Aujourd'hui, des méthodes fiables permettent de les caractériser de manière précise et de développer des outils (dont la modélisation) permettant de mieux les prévenir.

LE BASSIN VERSANT

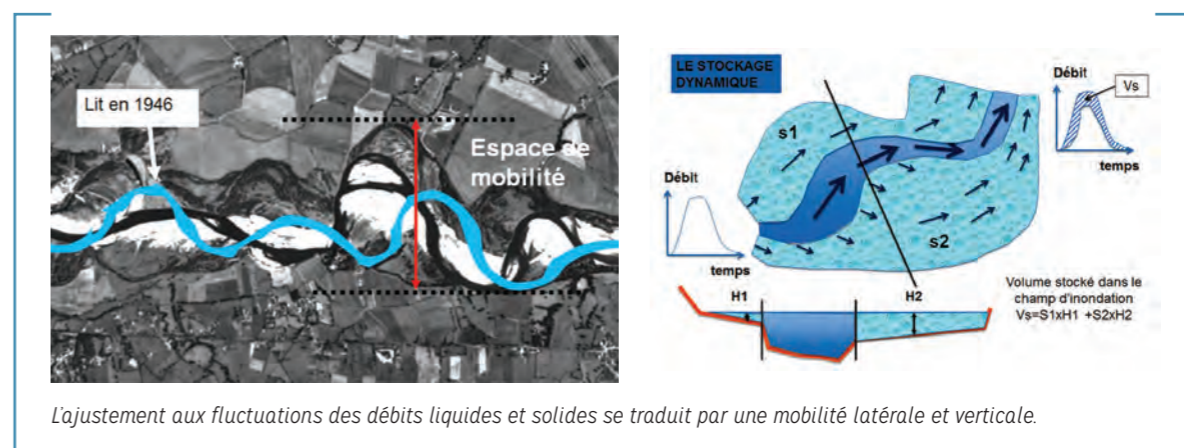
Le bassin versant se définit comme « l'ensemble des pentes inclinées vers un même cours d'eau et y déversant leurs eaux de ruissellement », et représente l'ensemble d'un territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents. Son contour est délimité par la ligne de partage des eaux, reliant les différents sommets et déterminant la direction des écoulements.

Il est caractérisé par un certain nombre de paramètres : sa surface (mesurée en hectares), la longueur du cours d'eau, la pente, mesurée en m/m ou en %, et le « temps de concentration » (temps mis par une goutte d'eau pour parcourir la longueur du bassin).

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte pour la gestion des inondations :

- **La pluviométrie** : elle se mesure en mm, à l'aide d'un pluviographe ; la courbe hauteur d'eau/temps obtenue est un « hyetogramme ». La durée des précipitations permet d'apprécier leur intensité (hauteur d'eau/durée).
- **Le ruissellement** : il correspond aux précipitations, diminuées des pertes (infiltrations, évaporation...), et dépend de la pente, de la végétation, du réseau de drainage.
- **Le réseau hydrographique** : il comprend un cours d'eau principal et ses affluents ; on distingue le lit mineur, où s'écoulent ordinairement les eaux, et le lit majeur (ou « Zone d'Expansion des Crues ») où s'épandent les eaux en cas de crue. La forme d'un cours d'eau dépend de son âge (profil en « V » pour les rivières jeunes (torrents), en « U » avec champs d'inondation bien développés pour les plus anciennes (rivières de plaine)).
- **Le débit** : exprimé en m³/s (ou l/s), c'est la mesure du volume d'eau passant en un temps donné dans une section donnée d'un cours d'eau ; l'enregistrement des hauteurs d'eau en fonction du temps est appelé limnigramme, celui des débits hydrogramme. Un cours d'eau se caractérise par 3 valeurs de débit : le débit moyen interannuel appelé « module », le débit de crue, le débit d'étiage (période de basses eaux).
- **Notions d'hydraulique** : l'hydraulique étudie, pour un débit donné, les conditions dans lesquelles s'évacuent les eaux (hauteur et vitesse). Dans un canal de section et de pentes constantes, l'eau s'écoule avec une hauteur et une vitesse constantes (conditions « normales »). En cas de crue, l'eau s'écoule dans le champ majeur ou Zone d'Expansion des Crues, « ZEC », c'est-à-dire la zone inondable.

- **L'érosion et le transport solide** : le ruissellement et l'érosion (des versants et des berges) entraînent des matériaux qui seront transportés par le cours d'eau ; c'est ce que l'on appelle « débit solide » (Q_s).
- **L'espace de mobilité** : On appelle « espace de mobilité » les espaces à l'intérieur desquels les cours d'eau sont amenés à se déplacer latéralement : il faut éviter d'y implanter des aménagements, qui seront menacés à terme.



L'ajustement aux fluctuations des débits liquides et solides se traduit par une mobilité latérale et verticale.

LES INONDATIONS

On distingue les inondations par débordement des cours d'eau au moment des crues, de celles provoquées par le ruissellement, à l'occasion de fortes pluies (ruissellement pluvial). Pour une détermination précise de l'aléa inondation, il est nécessaire d'en mesurer les caractéristiques physiques : emprise, hauteur d'eau, vitesse d'écoulement... Plusieurs méthodes existent :

- **L'aléa peut être évalué grâce à l'hydrogéomorphologie** : étude de la formation et du fonctionnement des plaines alluviales, par prise en compte de plusieurs critères (morphologie, sédimentologie, occupation du sol, traces d'inondations anciennes). Plusieurs méthodes (photo-interprétation, observations de terrain) permettent de cartographier la zone inondable des cours d'eau importants, mais pas d'établir des quantifications (hauteurs, vitesse).
- **L'aléa peut également se déterminer grâce à la modélisation mathématique (1D ou 2D)**, ensemble d'équations permettant de représenter les écoulements (non applicable en milieu urbain).

Des facteurs aggravants existent. **L'urbanisation**, en créant des surfaces imperméables, entraîne l'augmentation des coefficients de ruissellement. La mise en œuvre de **réseaux de drainage** a pour principal effet une augmentation des débits et leur concentration à l'exutoire des conduites. Elle pose des problèmes importants lorsqu'elle se développe dans les champs majeurs des cours d'eau : augmentation des débits vers l'aval créant une menace pour les biens et les personnes.

À SAVOIR

La modélisation hydraulique des bassins versants bénéficie aujourd'hui d'avancées théoriques, technologiques et numériques permettant des modélisations très précises.



Certaines pratiques culturelles peuvent également accroître le risque d'inondation : le déboisement (réduction des pertes dues à l'évapotranspiration), la suppression des haies (accélération du ruissellement). Les perturbations du transport solides, comme celle créées par **le prélèvement de matériaux** (gravières) sont également à éviter (facteurs d'érosion verticale ou latérale).

LA PROTECTION CONTRE LES CRUES

La réduction du risque d'inondation peut se faire par la réduction de l'aléa (mesures de protection = travaux au niveau du cours d'eau), ou par celle de la vulnérabilité (mesures de prévention). On distingue les mesures « non structurales » (réglementation, organisation, prévention) des mesures « structurales » consistant en travaux sur les cours d'eau.

MESURES STRUCTURELLES

1/ Actions agissant sur le ruissellement

En milieu urbain, il existe une grande diversité d'ouvrages destinés à retenir et ralentir le ruissellement : chaussées à structure réservoir, fossés et noues, tranchées, puits d'infiltration, bassins de retenue, toitures-terrasses. En milieu rural, dans le même but, on peut réaménager des parcelles agricoles (réhabilitation de haies...), réaliser des fossés de grande capacité, des buses de collecte sous les routes et les digues, et augmenter la rugosité par des végétalisations. Une réglementation précise peut encadrer les actions affectant le ruissellement.

2/ Actions agissant sur le fonctionnement des cours d'eau

Il existe 2 types de travaux :

Type 1 : Les travaux qui adaptent la rivière aux débits comme le curage (enlèvement mécanique des atterrissements), l'augmentation de la section d'écoulement (« recalibrage »), la protection des espaces proches du cours d'eau par endiguement ou remblaiement (proscrit dans les zones d'expansion des crues), la création de chenaux secondaires destinées à évacuer les eaux des crues (« coupures sèches »).

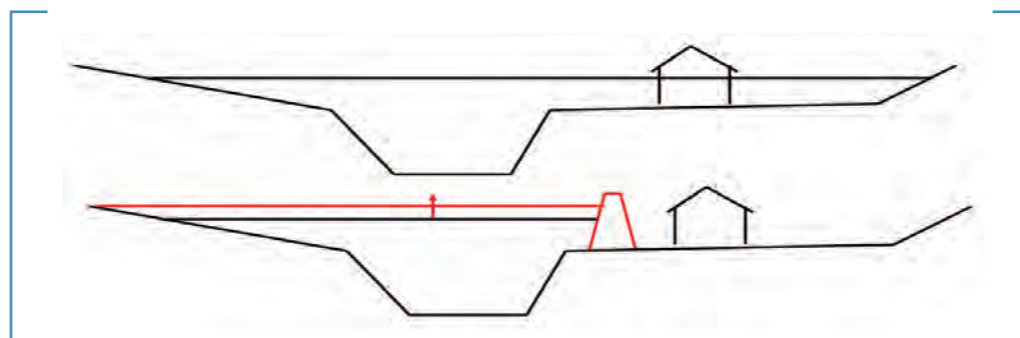


Schéma de principe d'un endiguement

Type 2 : Les travaux qui adaptent le débit aux capacités d'évacuation du cours d'eau : l'aménagement le plus connu est le barrage, mais on peut également réaliser des actions de « sur-inondation » (augmentation des hauteurs de submersion dans des zones sans enjeux).

MESURES NON STRUCTURELLES

On peut agir sur la vulnérabilité en mettant en oeuvre des actions auprès des individus, des entreprises, des structures publiques visant à la protection des biens et des personnes. Il est possible aussi de mettre en place des mesures réglementaires, telles que les zonages d'urbanisation liés aux PPRI (Plan de Prévention du Risque d'Inondation) ou des « Déclaration d'Intérêt Général » (DIG), permet au maître d'ouvrage public d'intervenir sur des propriétés privées lorsque des travaux d'importance doivent être mis en oeuvre.



Une digue de protection est une mesure structurale permettant de protéger certains enjeux

Les mouvements de terrain : diversité des phénomènes et caractérisation du risque

EN RÉSUMÉ

Les mouvements de terrain désignent l'ensemble des déplacements en masse de matériaux rocheux à la surface de la terre. Bien que parfois associés à des phénomènes sismiques, qui trouvent leur source dans les profondeurs de l'écorce terrestre, leur origine se situe à la proximité de la surface. Parfois anodins et sans danger, ils peuvent aussi être des aléas majeurs entraînant d'importants et spectaculaires dégâts, et faire de nombreuses victimes.

LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Ce sont des phénomènes complexes et multifformes si bien qu'ils sont souvent présentés comme une fatalité, mais qu'une expertise rigoureuse permet cependant de mieux comprendre dans leurs limites spatiales et temporelles.

Les glissements de terrain sont **des mouvements obliques de matériaux** sur les versants, sur **des surfaces de glissement circulaires** (glissements rotationnels) ou planes (glissements translationnels). Dans certains cas, le glissement entraîne **une liquéfaction** des matériaux et leur écoulement (**glissements-coulées**). De vitesses et de tailles variables, ils sont potentiellement dangereux pour les personnes et pour les biens.

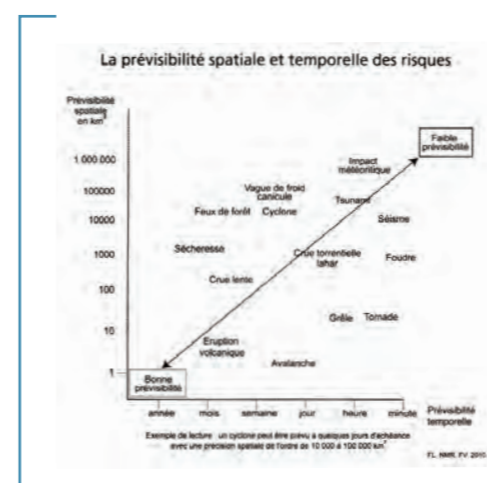
En dehors de certaines formes de glissements translationnels et de coulées rapides, **les glissements de terrains sont souvent précédés de signes avant-coureurs** et les facteurs de prédisposition sont bien identifiables. Il en résulte une assez bonne prévisibilité spatiale qui permet la cartographie précise des zones à risques et la mise en place de mesures de surveillance et de protection. Malgré une marge d'incertitude, c'est sans doute pour ce type de mouvement de terrains que l'expertise s'avère-la plus efficace et pertinente.



Divers types de mouvements de terrain PPT p11 et p56

DE NOMBREUX CRITÈRES D'ÉVALUATION DU RISQUE

L'expertise des mouvements de terrain commence généralement par **la prévision spatiale et la cartographie de l'aléa car la prévision temporelle**, liée à de très nombreux facteurs aléatoires (météorologiques, hydrogéologiques, anthropiques...) est **très difficile**. Les cartes de susceptibilité à l'aléa, qui mettent en évidence les facteurs de prédisposition, sont le plus souvent réalisées à des échelles moyennes si bien qu'elles ont plus une fonction informative que prévisionnelle. Les cartes d'aléas, réalisées à plus grande échelle, visent quant à elles à localiser plus précisément l'aléa et éventuellement à le mettre sous surveillance.



La prévisibilité des risques naturels dépend de leur degré de prévisibilité spatiale et leur prévisibilité temporelle p5 du PPT

Une fois cartographiés, **les mouvements de terrain font l'objet d'une quantification qui s'appuie essentiellement :**

- **Sur la vitesse potentielle de déplacement**, qui est déterminante pour la dangerosité car elle peut surprendre les personnes.
- **Sur la masse des matériaux**, elle-même associée à la profondeur du mouvement, qui conditionne surtout les dommages potentiels et les possibilités de remédiation structurelle de l'aléa.
- **Sur la probabilité** de réalisation de l'événement dangereux qui passe par l'analyse des multiples facteurs de déclenchement.

Associée à la cartographie des enjeux et des vulnérabilités structurelles et fonctionnelles, **la cartographie de l'aléa, permet la réalisation de cartes de risques directs et indirects destinées à prévenir le risque**. Le risque mouvement de terrain est plus ou moins grand selon le type de mouvement.



À SAVOIR



Du fait de la difficulté à prévoir ou anticiper la survenue des mouvements de terrain, leur cartographie (zonages) reste un des outils de prévention les plus sûrs.

UNE GRANDE DIVERSITÉ DE MOUVEMENTS

Les mouvements verticaux du sol sont très divers par leur profondeur, qui peut aller de quelques centimètres pour les gonflements des argiles à plusieurs centaines de mètres pour les effondrements de cavités souterraines, et par la vitesse de leur déclenchement qui peut être instantanée ou à peine perceptible.

Ils sont à l'origine d'importants dégâts matériels mais font assez peu de victimes. Leur délimitation est très difficile et souvent couteuse si bien que le travail d'expertise se limite le plus souvent à des cartes de susceptibilité à l'aléa et à l'information des populations d'autant que des mesures efficaces, en particulier des normes architecturales, peuvent parfois être mises en place quand la profondeur est réduite.

Les écoulements hyperconcentrés sont des mouvements d'une masse de matériaux fortement humectés ayant pris la consistance plastique. Souvent associés à d'autres phénomènes, les écoulements sont assez facilement localisables dans l'espace mais plus imprévisibles dans le temps.

Souvent rapides, ils font régulièrement des victimes et posent de gros problèmes de coupures de réseaux. Les possibilités de prévention donnent toute pertinence à leur étude.

Les zones menacées par les chutes de blocs, sont facilement identifiables mais très difficiles à délimiter avec précision, de plus l'incertitude temporelle rend la prévision très délicate.

Du fait de leur vitesse élevée, les chutes de blocs sont des menaces importantes tant pour les personnes que pour les biens, par contre des mesures de protection relativement efficaces peuvent être envisagées. L'importance des enjeux exposés sera déterminante pour la mise en place de ces protections.

	VITESSE	PREVISION		DOMMAGES		PROTECTION
		SPATIALE	TEMPORELLE	PERSONNES	BIENS	
GONFLEMENTS	-	-	-	--	++	++
AFFAISSEMENTS	-	-	0	--	++	-
EFFONDREMENTS	++	-	--	++	++	--
GLISSEMENTS R	+/-	+	+	+	++	-
GLISSEMENTS T.	+	+	-	++	+	-
GLISSEMENTS C.	+/-	++	++	+	++	+
COULEES	+	++	+	-	+	+
BLOCS	++	+	-	++	+	+

La nature des mouvements de terrain détermine leur niveau d'impact et les capacités que l'on a à les prévenir ou s'en protéger

La diversité et la complexité des mouvements de terrain nécessitent donc une analyse au cas par cas. L'expertise n'est pas une garantie absolue contre les catastrophes mais permet la mise en place de mesures de surveillance, de protection et d'aménagement raisonné du territoire de manière à réduire considérablement le risque, elle est donc indispensable à toutes les régions menacées par les aléas naturels.

Retour d'expérience sur la prise en compte des mouvements de terrain dans l'aménagement du territoire



EN RÉSUMÉ

Face à la fréquence des sinistres dus aux mouvements de terrain, le département de l'Hérault a mis en œuvre une méthode originale de caractérisation et de cartographie de ce type de risque à l'échelle de son territoire. La base de donnée et les cartes créées permettent de mieux anticiper les risques dans les politiques d'aménagement du territoire.

LE DÉPARTEMENT DE L'HÉRAUT, UN CONTEXTE GÉOLOGIQUE PARTICULIER

Du point de vue géologique, le département de l'Hérault (sud de la France) se caractérise par une diversité exceptionnelle : des terrains de tous âges y sont présents, du Précambrien à nos jours, ainsi qu'une grande variété de faciès.

Cette variété lithologique entraîne, dans les différentes zones du département, des susceptibilités différentes vis-à-vis des mouvements de terrain : glissements de terrain au niveau des marnes (Trias, Oxfordien...), effondrements de cavités et chutes de blocs au niveau des roches sédimentaires fracturées (grès triasiques, dolomies, calcaires jurassiques...), mouvements différentiels au niveau de certains types d'argiles (Eocène). Ces aléas, seuls ou combinés, sont causes de risques non négligeables pour les infrastructures et les constructions, voire pour la population.

La construction des routes et des collèges étant, de par la loi, dévolues aux Conseils généraux¹, et ceux-ci assumant en outre un rôle d'aide aux communes, il était important que le Conseil général de l'Hérault se dote d'un outil permettant de prendre en compte, en amont de toute décision, la présence d'aléas « mouvements de terrain ».



Un glissement de terrain ayant provoqué la destruction d'une route dans l'Hérault (France)



INTERVENANT

Françoise Besset

Géologue en charge des carrières, des risques naturels et de la protection du patrimoine géologique au Conseil général de l'Hérault (France)
fbesset@cg34.fr

Diplômée d'un Doctorat en Géologie, Françoise Besset a d'abord travaillé en tant qu'ingénieure à la société Bas-Rhône Languedoc pour laquelle elle a mené des études des sites de retenues collinaires et de barrages écrêteurs de crues.

Depuis 1991, elle est géologue au sein du Conseil Général de l'Hérault et intervient à ce titre sur les démarches d'acquisition de connaissance, de portée à connaissance et de prévention des risques naturels.

¹ Echelon administratif correspondant au Département



À SAVOIR



Le recensement et la cartographie de ces sinistres a permis la constitution d'une base de données exploitée par le Conseil général et les Communes pour adapter leurs politiques d'aménagement du territoire (voir ci-dessous).

LA MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

Après avoir défini le type d'outil qui nous serait nécessaire, nous avons fait réaliser une étude, qui a donné lieu à l'élaboration d'une méthodologie inédite :

Tout d'abord, **une analyse multi-critères du territoire** a été réalisée : on a retenu des critères pouvant influencer l'apparition de mouvements de terrain, tels que la lithologie, la pente (MNT²), la pluviosité, la fracturation, la morphologie (interprétation de photos aériennes), l'hydrologie (position du toit des nappes)...

Les données cartographiques relatives à ces critères ont ensuite été superposées au niveau d'une « zone test » connue pour être fréquemment affectée par des mouvements de terrain : le « bassin de risques » du Lodévois (11 communes). La superposition des données dans un SIG, a permis, pour chacun des phénomènes considérés, **d'identifier des zones « prédisposées » à ce type d'aléa.**

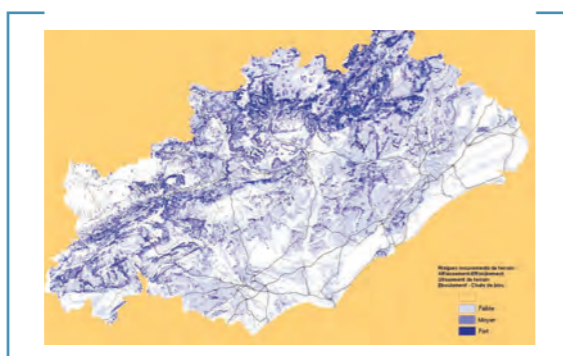
Parallèlement, **un recensement**, le plus exhaustif possible, **des sinistres intervenus dans le département** a été effectué (bibliographie, archives communales, études diverses, données des services routiers, enquêtes auprès de la population...).

Les différentes données recueillies ont été regroupées dans une « Base de Données », regroupant environ 500 évènements ; chaque sinistre fait l'objet d'une fiche contenant un certain nombre d'informations (localisation, type de mouvement, date d'occurrence, formation géologique affectée, facteur déclenchant, réactivation éventuelle...) ainsi que des photographies et schémas interprétatifs.

LA PHASE D'EXTRAPOLATION AU NIVEAU DE L'ENSEMBLE DU DÉPARTEMENT

Les positions des désordres recensés ont ensuite été reportées sur le modèle cartographique, au niveau de la « zone test » : on a pu constater une excellente corrélation entre les zones d'aléas issues de la modélisation et les sinistres historiques, ce qui **montre la fiabilité de la méthodologie : celle-ci a donc été extrapolée à l'ensemble du territoire départemental.**

Trois cartes d'aléas ont été dressées au niveau du département (chute de blocs, effondrement de cavités/affaissements, glissements de terrain/coulées), ainsi qu'une carte de synthèse où les zones susceptibles aux 3 types d'aléas sont regroupées.



Carte regroupant les zones de mouvements de terrain potentiels du département

² Modèle Numérique de Terrain, modélisation numérique de la topographie des sols

Concernant les politiques départementales d'aménagement du territoire, et notamment la construction de routes, cet outil permet d'envisager des tracés le long desquels les voies ne seront pas, à priori, menacées par des mouvements de terrain importants, mais également d'établir la programmation des travaux de sécurisation à entreprendre, en hiérarchisant les aléas présents.

Actuellement, **la liste des sinistres recensés à travers le département est consultable sur un applicatif internet** : à chaque commune concernée par un (ou plusieurs) sinistre(s), correspond une fiche renseignée : type de mouvement (glissement, chute de blocs...), localisation, date d'occurrence, phénomène déclenchant, dégâts occasionnés, réactivation éventuelle...

Nouveau Site				
AGEL	1242			26/01/2012
AGEL	1241			26/01/2012
BRISSAC	1176	De nombreux dièdres et blocs en surplomb menacent de tomber sur la route.		30/10/2005
BRISSAC	1177	Les glissements/éboulement affectent les calcaires très fracturés et très altérés en argile.		30/10/2005
CASTELNAU-DE-GUERS	1178	De nombreux glissements de terrain affectent la pellicule de marnes altérées sur tout le versant NW du village. Plusieurs centaines de mètres d'enrochement massif confortent les talus et les arrachements récents.		30/10/2005
CAUSSE-DE-LA-SELLE	1179	Chute de blocs récurrente depuis le versant surplombant la route ou depuis les tabliers d'ébouils d'ébouils actifs qui atteignent la route.		30/10/2005
CAZILHAC	1182	Erosion de la berge droite de l'Hérault ayant entraîné une dégradation du canal hydraulique en contrebas de la RD25. Le canal a été restauré en deux endroits sur une quinzaine de mètres en béton armé.		30/10/2005
CAZILHAC	1181	Des phénomènes de retrait gonflement semblent également affecter le site.		30/10/2005

La base de données et accessible en ligne sur le site internet du Conseil général de l'Hérault

Au niveau d'un territoire où l'existence d'aléas (qu'il s'agisse de mouvements de terrain ou d'autres phénomènes) est avérée, **la planification raisonnée de l'aménagement de ce territoire nécessite la connaissance de ces aléas et leur localisation.**

La cartographie de ceux-ci, indispensable, est réalisable grâce à la méthodologie élaborée dans l'Hérault, qui présente l'avantage d'être reproductible sur tout autre territoire.



Aménagements urbains en zone inondable

EN RÉSUMÉ

Ce module présentait l'ensemble des enjeux et des méthodes associées à la prise en compte du risque naturel dans l'aménagement du territoire. Un focus spécifique a été fait sur l'aléa inondation et sur la manière dont il est possible d'adapter urbanisme, règles d'aménagement du territoire et règles de construction, pour mieux prendre en compte cet aléa.

La première partie présentait des éclairages sur le risque inondation par rapport à l'aménagement urbain, la seconde des réflexions sur les moyens et techniques d'aménagements urbains en zone inondable :

RISQUE D'INONDATION ET AMÉNAGEMENT URBAIN : LES ENJEUX

- La prise en compte du risque Inondation dans les documents d'urbanisme
- Un lien indispensable entre les documents d'urbanisme et le PPRI
- Quels conseils attendre des architectes urbanistes environnementalistes ?
- Les outils de l'urbanisme opérationnel pour améliorer la gestion du risque inondation
- Un outil règlementaire à la mesure du risque inondation : Le PPRI
- Prise en compte du risque inondation dans le bâti

MOYENS ET TECHNIQUES D'AMENAGEMENT ET D'URBANISME

- Etude des archives et des anciens documents - Devoir de mémoire
- Adapter le système constructif à la problématique risques multicritères
- Prise en compte de l'interdépendance des risques naturels
- Mitigation Espaces publics et Espaces privatif (diagnostic, travaux de consolidation, espaces refuges)
- Informations et aides à la décision des décideurs
- Communication et information des populations pour une ré-appropriation du cadre bâti et du cadre de vie



Quelques exemples de constructions prenant en compte le risque naturel



Gérard Ettore

Architecte DPLG, responsable de l'agence AAGE
aage@club.fr

Responsable de l'agence AAGE depuis 25 ans. Gérard Ettore est architecte DPLG spécialisé dans l'aménagement du territoire et la gestion des risques naturels. Responsable de l'antenne Gard Inondation des

Architectes de l'urgence en septembre 2002, il a porté de nombreuses études de gestion des risques naturels multicritère : séisme, mouvement de terrain, inondation, tsunami...

Pour en savoir plus

Les supports (Power Point) des présentations de la formation sont disponibles sur le site du PNUD :

www.ht.undp.org

Guide méthodologique national pour la prise en compte du risque naturel en Haïti

Ce guide est en cours de production et sera disponible dans les semaines à venir. Il sera composé d'un guide méthodologique complet, à destination des professionnels du risque et d'un guide « allégé », à destination d'un public plus large. Vous serez informés de sa parution.

Contact

Samira Philip

Conseillère technique - Unité risques et désastres
Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD)

MINUSTAH, Log Base, Zone 5, Préfab 19
Blvd T. Louverture & Clercine 18, BP 557 - Port-au-Prince, Haiti, HT6111
Mail : samira.philip@undp.org - Tél : (+509) 48 92 99 01
Website: www.ht.undp.org



République d'Haïti

MIEUX PRENDRE EN COMPTE LE RISQUE NATUREL DANS L'URBANISATION ET L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE