



SIRSEG : SIMULATION DU RISQUE SISMIQUE ET DE SES ENJEUX A GRENoble SIMULATION OF SEISMIC RISK AND ISSUES IN GRENOBLE

Programme **RDT**
Rapport Scientifique

Cartier Stéphane
Cornou Cécile
Élise Beck
Boudis Mahfoud
Davoine Paule-Annick
Guéguen Philipe
Saillard Yves
Vallette Cloé

TABLE DES MATIÈRES

Introduction

PARTIE I : Une démarche, un terrain

-5-

I/ Partager des compétences complémentaires.....	6
<i>A/ Comment appliquer les progrès scientifiques à la sécurité sismique ?</i>	
<i>B/ Aider à la décision par une réflexion d'équipe</i>	
<i>C/ Les propositions de l'équipe SIRSEG</i>	
II/ Concentrer les informations sur bâtiments scolaires grenoblois.....	10
<i>A/ Les écoles : un choix stratégique</i>	
<i>B/ Grenoble : un espace documenté</i>	

PARTIE II : Renforcer les informations existantes

-13-

I/ Estimation de l'aléa sismique local : Caractérisation géophysique et simulation du mouvement fort.....	14
<i>A/ Validité du modèle numérique de Grenoble</i>	
<i>B/ Simulation du mouvement fort</i>	
<i>C/ Cartographie des milieux superficiels</i>	
<i>D/ Nuancer les apports pratiques</i>	
II/ Inventaire sismique : évaluer la probabilité de dommages.....	20
<i>A/ Le logiciel ISIBAT, un outil pratique</i>	
<i>B/ Derrière l'outil ISIBAT, la méthode VULNERALP</i>	
<i>C/ Limites et précaution d'emploi</i>	
<i>D/ Intégration des résultats de l'inventaire ISIBAT au logiciel SIRSEG</i>	
III/ L'analyse coût / avantage : un domaine exploratoire.....	23
<i>A/ L'approche des Etats-Unis d'Amérique</i>	
<i>B/ L'approche Helvète</i>	
<i>C/ L'approche française</i>	
<i>D/ Comparaison des méthodes</i>	

PARTIE III : Géo-visualisation des informations et prototype de logiciel

-34-

I/ La Géo-visualisation : rassembler les informations.....	35
<i>A/ Contexte et objectif</i>	
<i>B/ Démarche de travail et synthèse des informations existantes</i>	
<i>C/ Analyse des besoins et spécifications de l'outil à réaliser</i>	
<i>D/ Modélisation des données</i>	
<i>E/ Propositions de logiciels</i>	
<i>F/ Implémentation</i>	
<i>G/ Application de géo-visualisation générée pour l'analyse du risque sismique</i>	
II/ Le prototype de logiciel : un outil pour décider.....	46
<i>A/ Le modèle</i>	
<i>B/ L'outil de simulation</i>	
<i>C/ L'interface grenobloise</i>	
<i>D/ Limites de conception et précaution d'usage</i>	

Conclusions.....	53
-------------------------	-----------

Bibliographie.....	58
---------------------------	-----------

LISTES DES FIGURES :

Figure 1 : Schéma d'organisation du programme.....	9
Figure 2 : Répartition des dommages du séisme de l'Aquila.....	10
Figure 3 : École de Poggio Pienze.....	11
Figure 4 : (a) Fréquences des pics H/V déduit des données réelles (panel de gauche) et des données simulées (panel de droite). (b) Amplitude des pics H/V déduit des données réelles (panel de gauche) et des données simulées (panel de droite). (c) Différence relative entre fréquence des pics H/V estimées à partir des données réelles (Fr) et des données simulées (Fs). Les points blancs indique la localisation des sites considérés.....	15
Figure 5 : Localisation des sites et de la rupture.....	16
Figure 6 : Exemple de sismogrammes simulés.....	16
Figure 7 : Spectres en accélération simulés à différents sites et spectres.....	17
Figure 8 : Exemple de données de forage géologique ou géotechnique.....	18
Figure 9 : Répartition des différents types de structures géologiques superficielles.....	18
Figure 10 : Distribution des vitesses de phase des ondes de Rayleigh.....	19
Figure 11 : Inventaire sismique simplifié et indice de vulnérabilité.....	22
Figure 12 : Les composants du coûts de réhabilitation.....	24
Figure 13 : Éléments de calcul du coût de sauvetage.....	27
Figure 14 : Éléments de calcul du coût des renforcements.....	29
Figure 15 : Éléments de calcul du coût du neuf.....	29
Figure 16 : Critères de pertinence du renforcement.....	30
Figure 17 : Récapitulatif des trois méthodes de calcul.....	30
Figure 18 : Points forts et points faibles des trois méthodes de calcul.....	31
Figure 19 : Récapitulatif de l'ensemble des données existantes et localisation.....	36
Figure 20 : Cas d'utilisation pour la consultation des données liées au risque sismique.....	37
Figure 21 : Cas d'utilisation pour la consultation spatiale.....	37
Figure 22 : Modélisation des données spatiales.....	38
Figure 23 : Modélisation des données liées à la vulnérabilité physique.....	39
Figure 24 : Modélisation des données liées à l'aléa.....	40
Figure 25 : Modélisation des données liées à la vulnérabilité sociale.....	40
Figure 26 : Interface de visualisation générée par GenGhis.....	41
Figure 27 : Architecture de GhenGhis.....	42
Figure 28 : Modèles de données sous AROM-ST.....	43
Figure 29 : Interface utilisateur permettant l'intégration des modèles de données et de présentation dans GenGHIS et la génération de l'interface de géo-visualisation dédiée.....	43
Figure 30 : Interface permettant l'instanciation du modèle de données.....	44
Figure 31 : Géo-visualisation du risque sismique à Grenoble.....	45
Figure 32 : Géo-visualisation de l'aléa sismique à Grenoble.....	45
Figure 33 : Géo-visualisation de la vulnérabilité sismique à Grenoble.....	45
Figure 34 : Schéma générale de décision budgétaire des moyens de prévention.....	47
Figure 35 : Interface du prototype de logiciel de simulation.....	49
Figure 36 : Environnement spatial de Grenoble représenté par le monde NetLogo.....	50

Introduction

En l'état des connaissances scientifiques (RISkue, SISMODT, ISIBAT, GEMGEP, VULNERALP) et des besoins urbains, trois piliers structurent la sécurité sismique :

- La connaissance des failles et des effets de site
- La maîtrise de l'architecture des bâtiments et les diagnostics de vulnérabilité du bâti
- L'amélioration des comportements de survie.

Or, la complexité et l'hétérogénéité des informations sur la sécurité sismique (aléa, vulnérabilité sociale, vulnérabilité du bâti) entravent leur intégration par les décideurs publics ou privés (maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvres, régulateurs, planificateurs, contrôleurs, assureurs, usagers, etc.) (Cartier et Colbeau-Justin, 2010).

Ces constats incitent à :

- Cibler les informations déterminantes dans le domaine de la sécurité sismique,
- Proposer des méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité du bâti simples et reproductibles,
- Tester des critères d'amélioration (physiques, économiques, organisationnels),
- Simplifier l'accès à l'information pour les acteurs concernés par la sécurité sismique.

Les informations disponibles concernant les écoles de Grenoble offrent une exemplarité méthodologique nationale pour améliorer et diffuser la connaissance du risque sismique et des éventuelles solutions de mitigation progressive.

La recherche pluridisciplinaire SIRSEG financée par le programme « Risque, Décisions, Territoires » du MEEDD offre deux atouts majeurs. Le premier est technique : proposer un outil de géo-visualisation des informations et un prototype de logiciel d'aide à la décision économique en matière de sécurité sismique aux gestionnaires immobiliers, ici du patrimoine scolaire municipal. Le second est organisationnel : intégrer des méthodes et résultats issus de disciplines complémentaires (sociologie, économie, géographie, géophysique, géologie, géomatique) au service de diagnostics sismiques urbains. Trois parties composent ce rapport scientifique :

- La première explique le choix d'appliquer cette recherche au cas particulier de la sécurité sismique des écoles grenobloises.
- La partie II croise des données aléa/vulnérabilité.
- La partie III présente l'outil de géo-visualisation et le prototype de logiciel d'aide à la décision.

Chaque partie guide la création de bases de données complémentaires. Elle argumente les choix méthodologiques et exprime les limites scientifiques, techniques, humaines et légales éprouvées lors de cette expérimentation.

Mots clés : France, aléa sismique alpin, règles d'urbanisme, diagnostic, évaluation financière

PARTIE I :

Une démarche, un terrain

I/ Associer des compétences pour dessiner une démarche commune

A. Des progrès scientifiques à la sécurité sismique : quelles applications pratiques ?

Le risque sismique défie les responsabilités des propriétaires, des compagnies d'assurance, des fournisseurs d'informations (bureaux d'études, scientifiques), des administrations locales et des gouvernants. Or, l'innovation scientifique et technologique appelle à l'organisation locale de règles spécifiques à l'échelle du site urbain. Ceci modifie fondamentalement le fragile équilibre des contraintes urbaines entre compétences de sécurité, investissement budgétaire, occupation spatiale et projection temporelles. Cette évolution des connaissances déplace les pertes et les gains des acteurs en interdépendance - gain de temps, gain d'espace, gain financier, gain de sécurité - . Ces progrès scientifiques concernent plusieurs éléments : l'échelle du zonage sismique, les mécanismes d'amplification sismique locale, la propagation sol-structure, l'évaluation de vulnérabilité du bâti existant, l'identification des compétences de sécurité, l'analyse coût-avantage des renforcements parasismiques. En conséquence, trois pistes d'amélioration de la sécurité parasismique urbaine sont explorées.

Cohérence des choix de zonage sismique

La cohérence entre échelles de zonage sismique reste difficile à assurer. En effet, chaque acteur compose avec les prescriptions réglementaires forfaitaires et les connaissances locales du site géologique et de la situation urbaine. Le zonage sismique national déterministe, fondé sur un inventaire historique des secousses et géographique des failles, est concurrencé par l'apparition de zonages probabilistes définis selon les méthodologies européennes EC8 et le développement des microzonages urbains, éventuellement intégrés aux plans d'urbanisme (PPRS) ou à des zooms parcellaires spécifiques aux projets d'aménagement. La multiplication des références pose des soucis de légitimité et de responsabilité. Dans la pratique, les écarts spatiaux et techniques des zonages sismiques provoquent des différences de prescriptions et des ambiguïtés inacceptables au regard des responsabilités des acteurs privés et publics. Il est donc nécessaire de spécifier leur nature, leur vocation et leurs tolérances d'usage : cartes d'aléa ou zones réglementaires, indications ou obligations, exactitudes ou aires forfaitaires.

L'inclusion des contraintes sismiques à l'urbanisme

Les vallées alluviales représentent un exemple d'amplification spécifique de l'aléa. Leur urbanisation et industrialisation augmentent potentiellement leur vulnérabilité. Face à ce constat, il s'agit d'adapter l'urbanisme aux contraintes géologiques locales. Or, les règles nationales peuvent être inadaptées à ces spécificités. La question est alors de définir les critères de modulation des règles. Dans cette perspective, le microzonage permet d'améliorer la sécurité locale en fonction des estimations scientifiques. Il détermine les plans d'urbanisme, les règles d'usage du territoire, la précision des contraintes pour les propriétaires fonciers, les constructeurs, les autorités municipales et les administrations. Mais, si le microzonage peut représenter une opportunité professionnelle pour les ingénieurs, les équipes scientifiques et des élus innovants, il est impératif de savoir quelles institutions sont légalement en mesure de le prescrire et d'écrire ses guides méthodologiques.

De la protection abstraite au ciblage selon la vulnérabilité des enjeux

Pour proportionner la sécurité à l'importance des enjeux, la réglementation française catégorise les bâtiments en « classes parasismiques » en fonction de leurs usages. Cette logique des enjeux à protéger, notamment défendue par les Pascale Metzger (Metzger, 2006), oblige ensuite les propriétaires à s'interroger sur les critères et priorités d'investissement parmi les édifices rangés dans une même classe parasismique. Par analogie, il est possible de

transposer les classes parasismiques officielles à des catégories de véhicules terrestres. Ainsi, la classe parasismique A correspond aux voitures ordinaires, la classe B aux véhicules de des entreprises de services, la classe C aux poids lourd et la classe D aux bus. Mécaniquement, dès leur conception, les dispositifs de freinage de ces véhicules n'ont pas le même niveau de capacité. Économiquement, les coûts de protection ne sont pas supportés de la même manière pour les véhicules des particuliers et pour les véhicules professionnels, plus utilisés, dont la rentabilité permet de financer les systèmes de freinage. Socialement, les implications en termes de sécurité conduisent à graduer le niveau d'exigences en proportion des dommages probables. Les niveaux de sécurité, identifiés par des diagnostics (contrôle technique), doivent être pensés distinctement pour chaque catégorie/classe de véhicule. Néanmoins, l'amélioration des dispositifs de sécurité (freins) pour un véhicule ne permet pas de changer spontanément de catégorie/classe d'usage. Par contre toute reconversion d'usage exigerait une vérification des freins en fonction de la nouvelle classe d'usage. Ainsi, les efforts d'investissement dans la sécurité, programmés dans l'amélioration d'une catégorie, c'est-à-dire d'un ensemble de véhicule, peuvent supposer des priorités selon la hiérarchie établie par les diagnostics. Dans le cas d'un bâtiment, son usage, sa valeur symbolique, son degré de vulnérabilité structurelle, ses contraintes géologiques locales, ses mitoyennetés vicinales sont autant d'éléments à intégrer lors des programmes d'investissements dans la sécurité sismique. Cette spécification des contraintes peut amener à développer des référentiels locaux intégrés dans le cahier des charges, par exemple l'obligation d'isolateurs parasismiques des lycées martiniquais.

B. Une réflexion d'équipe autour de l'aide à la décision

Même si elle est souhaitable, l'application des innovations scientifiques dans les sphères professionnelles, politiques et sociales, n'est pas neutre. Elle suppose de penser les dispositifs de valorisation sociale et d'application pratique. En effet, si ces dispositifs légaux, techniques, humains et pratiques ne sont pas proposés, la sécurité sismique stagne, voire régresse (vétusté, croissance de vulnérabilité urbaine, techniques architecturales inadaptées au site, contrefaçons nocives, défaillances criminelles), en dépit du développement des caractérisations sismiques locales, des diagnostics de vulnérabilité et d'une gamme des solutions techniques. Face à ce paradoxe, l'équipe SIRSEG propose une réflexion autour de l'aide à la décision dont le préalable est la compréhension des problèmes, besoins et atouts des acteurs concernés.

La capacité de protection des usagers des bâtiments est variable. Leur responsabilisation et leur formation aux comportements de survie peuvent compenser le manque de sécurité. Les usagers peuvent aussi constituer des groupes de pression pour influencer l'amélioration technique de la sécurité, l'investissement dans l'entretien du patrimoine, le contrôle de l'application des normes parasismiques. Néanmoins, par sa tutelle sur la sécurité, l'État est censé être le premier à garantir la protection parasismique des investissements privés ou publics par la régulation et le contrôle. Dans les faits, les réglementations parasismiques nationales (PS92) comportent peu d'interdictions formelles ou de sanctions spécifiques. Le terme même de « contrôle » recouvre des réalités distinctes. Le contrôle est sous la responsabilité de plusieurs autorités publiques (municipales, administrations de l'habitat et l'équipement, ministères, assemblée nationale, directives européennes, tribunaux) et professionnelles (maîtres d'ouvrages, entrepreneurs maîtres d'œuvres, bureaux d'études et de contrôle technique, syndicats professionnels, chambres consulaires, experts agréés auprès des tribunaux, assureurs). Il s'inscrit dans des codes hétérogènes qui portent sur la construction, l'urbanisme, l'environnement, la sécurité publique, la santé, les responsabilités commerciales, etc. Il se décline sous différents modes (cahier des charges, code de construction, sélection et

agréments des compétences professionnelles, standard de qualité et de sécurité, audit professionnel, contrôle public, flexibilité des codes en proportion de la sécurité démontrée). Il porte sur des aspects divers tant documentaires (permis de construction, obligations architecturales, codes de construction, modalités de calcul de résistance et classification des ouvrages) que matériels (qualité des matériaux, réalisation sur chantier, vérification des compétences des opérateurs). L'attente de clarté des autorités, propriétaires et usagers oblige les tuteurs collectifs (administratifs, judiciaires, assuranciers, groupes de régulation sectoriels,) à statuer sur des normes. Or, la superposition inajustée des paramètres à prendre en compte (connaissances scientifiques, indications techniques, règles locales et nationales, décrets, lois, directives européennes ou encore standards internationaux de certification, responsabilités, budgets de sécurité) complexifie la tâche des propriétaires de bâtiments. Ces derniers négocient des financements et des délais de mise aux normes, hiérarchisent la priorité des interventions, vérifient la compatibilité entre sécurité sismique et critères connexes (inscription au patrimoine historique), déterminent un objectif de sécurité en fonction des moyens disponibles et évaluent la qualité des fournisseurs. Constructeurs ou contrôleurs, ces professionnels exigent des normes précises pour calibrer leurs responsabilités, les prix, les besoins en ressources humaines et en informations techniques.

Pour éviter des démarches forfaitaires inadaptées aux contraintes locales ou moduler leur coût de sécurité selon la situation, les acteurs cherchent comment :

- Adapter les constructions au site (propriétaires, consultants, contrôleurs, compagnies d'assurance).
- Adapter les villes aux contraintes environnementales (urbanistes, décideurs).
- Améliorer la sécurité par les normes publiques en maintenant un coût raisonnable.
- Former au microzonage.
- Réguler le partage des informations géotechniques.
- Éclaircir les responsabilités et obligations d'information de vulnérabilité.
- Créer des langages communs entre experts.
- Moduler les contrats d'assurances.

Ces questionnements sont à l'origine de démarches scientifiques et d'innovations publiques par exemple à Grenoble (Cartier et Colbeau-Justin, 2010), au Havre (Gralepois, 2008) et dans la région du Piémont en Italie (Cartier et Peltier, 2009 ; Cartier, 2007). À Grenoble, les spécialistes de l'interface sol-structure s'attachent à produire des prédictions locales des mouvements forts à l'échelle parcellaire qui intégreraient les amplifications sédimentaires, la variation des contraintes géologiques locales, le choix de critères simples (rochers ou sédiments) ou l'adaptation spécifique pour chaque bâtiment. Dans le Piémont, le service de l'ARPA rassemble sous sa tutelle l'instruction du zonage sismique, la planification urbaine et l'inspection des permis de construire et des bâtiments. Enfin, l'agglomération du Havre innove en exigeant les études de sol pour délivrer les permis de construire, même sans clarification légale.

C. Les propositions de l'équipe SIRSEG

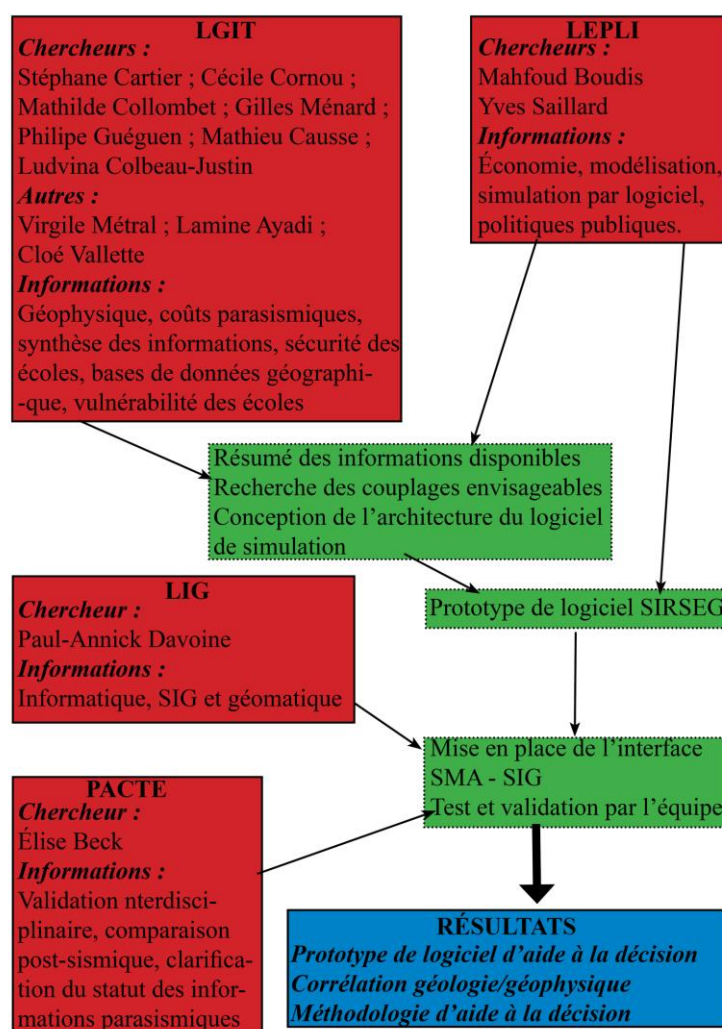
Concrètement, intégrer les informations locales disponibles permet de réduire la vulnérabilité urbaine en connectant la maîtrise territoriale (zonage national, microzonage) et la maîtrise sectorielle de la construction (type d'architecture, usage du bâtiment, composition des matériaux, date de construction, durée envisagée d'utilisation, diagnostics de vulnérabilité). En termes scientifiques, cette jonction correspond à la définition des spectres de résistance parasismique qui intègrent la localisation sismique, les contraintes de sol et le type de structure. En termes d'usage, elle est inscrite dans les codes et réglementations et influencée

par les progrès scientifiques, les corps d'ingénieur ainsi que les lobbies professionnels. Dans la pratique, les acteurs composent avec la sécurité, l'investissement et les responsabilités alors que la définition de critères locaux constitue un défi pour les règles nationales, universelles et forfaitaires. Afin de faciliter leur tâche, il s'agit d'améliorer la traduction des connaissances scientifiques en règles de décision en travaillant sur :

- L'écart entre les méthodes disponibles -et instables- de microzonage et les obligations légales (instruction de PPRS).
- L'absence de méthodologie d'analyse coût / avantage standard des coûts de renforcement parasismique applicable au cas français.
- La sensibilisation des acteurs privés ou institutionnels aux conséquences des positions forfaitaires pro-sécurité, souvent « conservatoires » mais contestables dans leurs modalités d'application (zonage déterministe, zonage probabiliste, prescriptions de renforcement parasismique incluses dans les PPRS).
- La confusion persistante sur les responsabilités professionnelles en matière de sécurité parasismique.
- Le flou des dénominations, les déformations de sens, les unités de compte et la logique de la grammaire parasismique.
- La formalisation de logiques d'investissement dans la sécurité

En conséquence, il s'agit de proposer des critères de gestion de la sécurité sismique qui intègrent les informations telluriques et les caractéristiques urbaines. Il est donc nécessaire de mieux caractériser l'aléa sismique (failles actives / propagation et amplification du site) ; les diagnostics de vulnérabilité des édifices (cas spécifiques, statistiques, et probabilité) ; la connaissance de l'exposition (démographie et économie) afin de fixer des informations selon les échelles d'interventions (nationale, régionale, urbaines, municipales, quartiers, propriétés foncières et immobilières, édifices). L'effort de proposition de l'équipe pluridisciplinaire SIRSEG réunit plusieurs laboratoires grenoblois :

Figure 1 :
Schéma d'organisation
du programme



II/ Associer des informations sur un terrain commun : les bâtiments scolaires grenoblois

A/ Les écoles : un choix stratégique

Améliorer la sécurité sismique urbaine nécessite d'en comprendre la complexité à partir des informations disponibles (rarement données) sur l'aléa et les vulnérabilités des édifices existants. En conséquence, dans cette exploration, le travail d'équipe est concentré sur les bâtiments scolaires publics. En effet, ces bâtiments sont exemplaires, autant pour les institutions que pour les propriétaires immobiliers privés ou les citoyens pour simplifier l'accès à l'information.

Lieux-clés pour les communautés, les écoles constituent des défis en termes de diagnostic de vulnérabilité à cause de leurs asymétries architecturales : couloirs, préaux, baies vitrées ou encore enfilade de classes fragilisent jusqu'aux dommages sismiques irréversibles. Les retours d'expérience post-sismiques (Taiwan 1999 ; Turquie 1999, Italie 2002 ; Algérie 2003 ; Chine 2008) confirment ces éléments.

Consciente de l'utilité de ces retours d'expérience, pour comprendre les pathologies sismiques, les contraintes organisationnelles, les limites d'application des codes parasismiques et la relativité des interprétations scientifiques, l'équipe SIRSEG, représentée par Élise Beck, a participé du 18 au 24 avril 2009 à la mission d'observation post-sismique suite au séisme de L'Aquila (Italie) du 6 avril 2009. Ce travail a permis :

- De procéder à un retour d'expérience dans un contexte tectonique, culturel et de morphologie urbaine comparable à la France.
- De caler les suppositions et hypothèses directement sur des éléments factuels et des situations concrètes.
- D'améliorer les protocoles d'observation interdisciplinaire (sociologue, géologues, ingénieurs structures, géographe, sismologue).

Les écoles ont fait partie des bâtiments expertisés en premier lieu. Les fiches d'inspection suivent une méthode italienne. Elles conduisent à définir six niveaux de dommage (voir encadré). Dans cette expertise, les écoles sont très bien représentées parmi les bâtiments les mieux préservés (59 % en classe A) même si près de 20 % restent inutilisables

	bâtiments Privés	bâtiments publics	hôpitaux	casernes	écoles	bâtiments Industriels
A	52,5%	54,4%	42,6%	68,9%	59,0%	57,6%
B	12,8%	15,6%	33,3%	22,6%	27,6%	17,4%
C	2,7%	3,9%	11,1%	2,8%	2,3%	3,9%
D	0,9%	1,3%	1,9%	0,0%	2,5%	1,2%
E	25,9%	21,3%	11,1%	5,6%	16,7%	15,5%
F	5,1%	3,5%	0,0%	0,0%	1,9%	4,6%

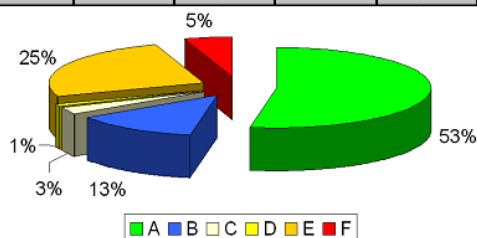


Figure 2 : Répartition des dommages du séisme de l'Aquila en fonction des types de bâtiments. Source : AFPS

A : structure immédiatement habitable ou utilisable
B : structure temporairement inhabitable (totalement ou en partie), mais habitable avec réalisation de mesures d'urgence
C : structure partiellement inhabitable au regard du risque élevé d'effondrement,
D : structure temporairement inhabitable mais à revoir d'une façon plus approfondie
E : structure inhabitable au regard du risque d'effondrement de la structure elle-même,

Parmi les 682 écoles de la région touchée par le séisme de L'Aquila, 127 seront détruites pour être reconstruites et 218 nécessitent des travaux pour redevenir fonctionnelles.



Figure 3: École de Poggio Pienze
Source : AFPS

La haute portée symbolique et sociale des écoles s'illustre par la rapidité avec laquelle les autorités italiennes mettent en place des écoles pour les enfants logés sous les tentes des camps de réfugiés. Dès le 16 avril 2009, soit à peine dix jours après le séisme, des classes ouvrent sous tentes.

Ces observations nous confortent dans notre choix et nourrissent les conclusions d'un précédent programme de recherche sur la protection parasismique des écoles (Cartier et Colbeau-Justin, 2010) concernant : l'identification des critères de décision en matière de sécurité sismique, la chaîne des responsabilités, le rapport entre propriétaires des bâtiments et usagers.

B/ Grenoble : un espace documenté

Porté par des laboratoires grenoblois, le projet SIRSEG s'intéresse à sa ville, s'inscrivant ainsi dans une logique d'acteurs locaux. Les avancées apportées sur l'affinement des connaissances du terrain grenoblois seront détaillées dans la partie II. Néanmoins, l'inscription historique de la vulnérabilité de la cité éclaire en quoi notre recherche s'inscrit au cœur des problématiques urbaines.

Des variations du lit du Drac à la propagation des ondes sismiques

Les limites historiques de la ville de Grenoble sont régulièrement repoussées (enceinte romaine, seconde enceinte construite en 1673, fortifications Haxo terminées en 1837, modification des enceintes ouest/nord en 1879). Le déplacement de ces frontières est marqué, par des travaux progressifs d'endiguement du Drac. Protection des personnes et des biens face aux crues torrentielles, ces digues permettent l'urbanisation graduelle des terrains. La géologie de ces fonds de vallées alluviales longtemps marécageux, aujourd'hui urbanisés, est déterminée par leur ancienne fonction de lit de cours d'eau et de zone d'épandage des crues. Or, leur nature géologique détermine la vitesse de propagation des ondes sismiques. Comprendre l'histoire de la relation des grenoblois au Drac aide à définir l'aléa sismique.

Tendances démographiques urbaines et construction des écoles primaires

À la fin du 19^e siècle, la croissance urbaine et la scolarisation obligatoire multiplient et densifient les sites scolaires. On peut définir quatre vagues successives de construction des bâtiments scolaires à Grenoble¹, sachant qu'un groupe scolaire peut regrouper plusieurs bâtiments de différentes époques. Chaque bâtiment hérite de politiques de construction, de modes d'aménagement urbain et de styles architecturaux propres à son époque.

1870 - 1914 : Des bâtiments scolaires symboles de l'école laïque et républicaine

À Grenoble, le 19^e siècle est marqué par une augmentation de la population –de 40 000

¹ Pour le détail des dates de construction, agrandissement et rénovation des écoles grenobloises, se référer à l'annexe n° 1

habitants en 1870 à 80 000 en 1914 – et par une industrialisation rapide. Associée à la croissance absolue du nombre d'enfants à scolariser, la politique nationale de laïcisation de l'enseignement conduit à la construction de nombreux bâtiments scolaires sur tout le territoire français. Ces derniers sont de qualité. En effet, au vue de la construction en masse, l'État a mis en place des règles de construction alors que les mairies et ministères, étant donné la portée symbolique de chaque bâtiment, investissent lourdement. À Grenoble, deux écoles sont construites à cette époque.

1918 – 1945 : Des écoles en béton armé

Entre 1918 et 1945, la population de Grenoble passe de 80 000 à 100 000 habitants et la ville s'étend au Sud. Cette expansion s'accompagne de la construction de bâtiments publics, dont 18 écoles. L'entre-deux-guerres, caractérisé par les prémisses des programmes d'aménagements urbains, correspond au règne de l'utilisation du béton armé dans les projets privés et publics de construction.

1945-1975 : table rase de l'architecture urbaine et scolaire

Entre 1945 et 1975, la croissance de l'agglomération grenobloise s'accélère. De grands ensembles sont construits en périphérie. À partir de 1960, les ZUP (Zone à Urbaniser en Priorité) sont définies sur les terrains libres au sud de Grenoble alors que partout ailleurs dans la cité, la logique d'urbanisation consiste à détruire puis à reconstruire les édifices en utilisant de nouveaux matériaux. Les 41 écoles édifiées durant cette période sont construites de manière « classique » (couloirs et classes en latéral, escalier à chaque extrémité).

1975 à 2009 : le ralentissement

Après 1975, le territoire de la commune de Grenoble est saturé. Quatre écoles sont construites à la fin des années 1970 en périphérie et six autres jusqu'à nos jours, aucune dans le centre en stagnation démographique et en vieillissement. En termes de parc scolaire, la municipalité investit majoritairement dans le réajustement, l'ajout de blocs, la rénovation et la maintenance.

PARTIE II :

Renforcer les informations existantes

I/ Estimation de l'aléa sismique local : Caractérisation géophysique et simulation du mouvement fort

Typique des vallées alluviales alpines (Cotton, programme européen Sismoalp), le sous-sol grenoblois présente une configuration très particulière, avec sa cuvette en Y, confinée entre Belledonne, Chartreuse et Vercors, remplie d'alluvions postglaciaires très épais. Cette structure encaissée amplifie et prolonge le mouvement sismique par « effets de site ». Depuis une quinzaine d'années, des financements locaux (Pôle Grenoblois sur les Risques Naturels, Conseil Général), régionaux (Contrat de Plan Etat-Région), nationaux (IRSN, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, CNRS/INSU, ANR) ou européens (Interreg IIIB) ont permis de caractériser et mesurer ces effets de site (Hatzfeld et al., 1998 ; Dietrich et al., 1999 ; Lebrun et al., 2001 ; Cornou et al., 2003 ; Dietrich et al., 2003 ; Guéguen et al., 2007 ; Chaljub et al., 2006), de préciser la structure et les paramètres mécaniques du bassin grenoblois (Vallon, 1999 ; Nicoud et al., 2002 ; Cornou, 2002 ; Tadenuma, 2003 ; Foray et al., 2005 ; Ménard et al., 2009 ; Jerram et al., 2009 ; Dietrich et al., 2009 ; Guéguen et al., 2009), d'installer des instruments permanents de surveillance (stations sismologiques en surface et en profondeur, Réseau Accélérométrique Permanent), de prédire le mouvement sismique (Causse et al., 2009 ; Chaljub et al., 2009 ; Tsuno et al., 2008).

Les objectifs de ce volet sont d'évaluer la réponse sismique de la vallée de Grenoble et de définir des zones d'aléa homogènes, à partir des données existantes (expériences temporaires passées, données du Réseau Accélérométrique Permanent) et de la simulation du mouvement fort. Ces simulations aboutissent à une cartographie des spectres de réponse associés aux zones d'aléa homogène, qui est intégrée à la base de géo-visualisation (cf. partie III) et peuvent servir d'information primaire pour le prototype de logiciel d'aide à la décision. Les travaux complémentaires, réalisés dans le cadre de SIRSEG, de l'ANR QSHA (2005-2008) et du Pôle Grenoblois des Risques Naturels (2007), permettent de :

- 1) valider le modèle numérique de Grenoble utilisé pour la simulation numérique jusqu'à 1 Hz du mouvement fort ;
- 2) simuler le mouvement fort au sein de l'agglomération de Grenoble pour un séisme de magnitude 5.5 localisé à environ 15 km de Grenoble (Laffrey)
- 3) caractériser les milieux superficiels d'un point de vue géophysique et géologique.

A/ Validité du modèle numérique de Grenoble

Notre approche compare les fréquences de résonance du site et les vitesses de phase des ondes de Rayleigh obtenues par analyse du bruit de fond sismique réellement enregistré et du bruit de fond sismique simulé pour le modèle 3D de vitesses de Grenoble. Pour cela, les données de bruit de fond acquises ces 15 dernières années ont été retraitées (Lebrun et al., 2001 ; Guéguen et al., 2007, Scherbaum et al., 1999 ; Bettig et al., 2001, Cornou et al., 2003 ; Chaljub et al., 2006, Hobiger, 2005). Le bruit de fond sismique a été simulé dans la bande de fréquences [0.2 1.1 Hz] en considérant une distribution de sources aléatoires disposées en surface et un algorithme de différences finies pour le calcul de la propagation d'ondes (Cornou, 2008). La corrélation entre fréquences de résonance et vitesses de phase mesurées et calculées est très satisfaisante (cf. Figure 4 pour les fréquences de résonance) et souligne la fiabilité du modèle 3D de vitesses de Grenoble pour la simulation du mouvement fort à basse fréquence (< 1 Hz).

B/ Simulation du mouvement fort

La méthode de simulation développée pour des prédictions large-bande du mouvement sismique dans la gamme [0.1 30 Hz] est basée sur une méthode hybride combinant simulations numériques 3D par éléments spectraux à basse fréquence (< 1 Hz) et fonctions de Green empiriques à haute fréquence (> 1 Hz). Le couplage entre les simulations numériques et les FGE résulte en un ensemble de fonctions de Green hybrides (FGH). Ces FGH sont ensuite sommées selon un nouvel algorithme, basé sur un modèle cinématique de k-2. La variabilité du mouvement sismique est estimée en déterminant un ensemble de combinaisons de paramètres de la source, obtenu à partir de lois de distribution déterminées *a priori*. Ces combinaisons permettent de générer une population de spectres de réponse à partir desquels sont calculés la valeur médiane du mouvement sismique et son écart-type. Cette méthode a été appliquée afin de simuler un séisme de magnitude 5.5 à Laffrey, scénario de séisme pour lequel nous disposons des fonctions de Green empiriques enregistrées lors d'une expérience sismologique temporaire réalisée dans le bassin grenoblois en 2005 (Chaljub et al., 2006). Les Figures 5, 6 et 7 montrent la localisation des sites considérés dans l'agglomération et de la faille considérée (Figure 5), des exemples de signaux simulés (Figure 6) et les spectres en accélération correspondants (Figure 7). La comparaison avec les spectres réglementaires EC8 montre que la réglementation est conservatrice pour le mouvement au rocher tandis que des spectres spécifiques à la vallée de Grenoble devraient être pris en compte.

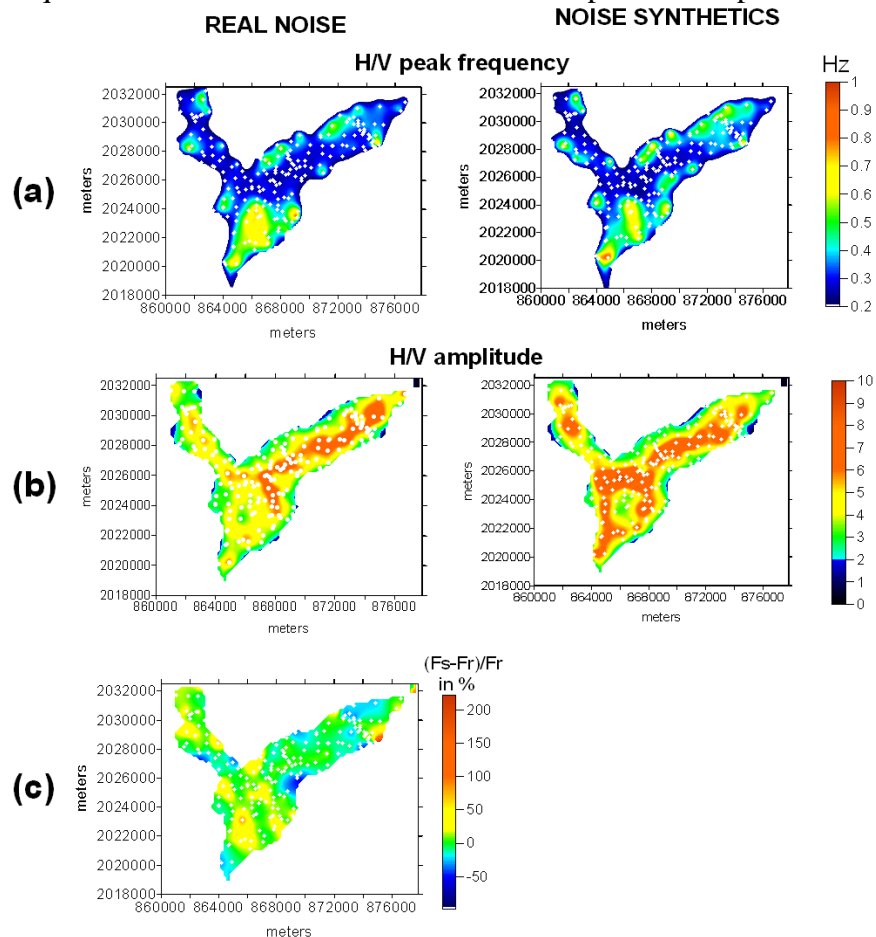


Figure 4 : (a) Fréquences des pics H/V déduit des données réelles (panel de gauche) et des données simulées (panel de droite). (b) Amplitude des pics H/V déduit des données réelles (panel de gauche) et des données simulées (panel de droite). (c) Différence relative entre fréquence des pics H/V estimées à partir des données réelles (Fr) et des données simulées (Fs). Les points blancs indique la localisation des sites considérés. Source : Cornou et al., 2008

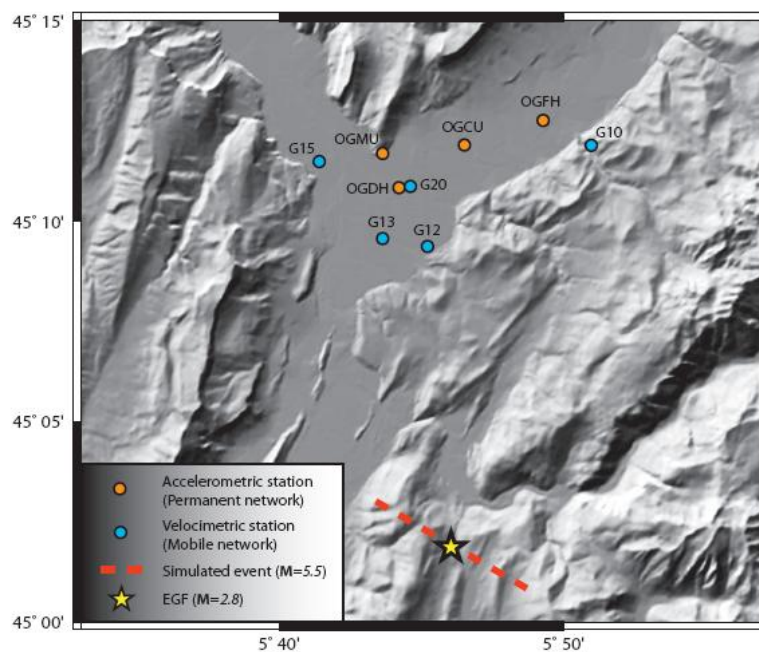


Figure 5 : Localisation des sites et de la rupture. Source : Causse et al., 2008

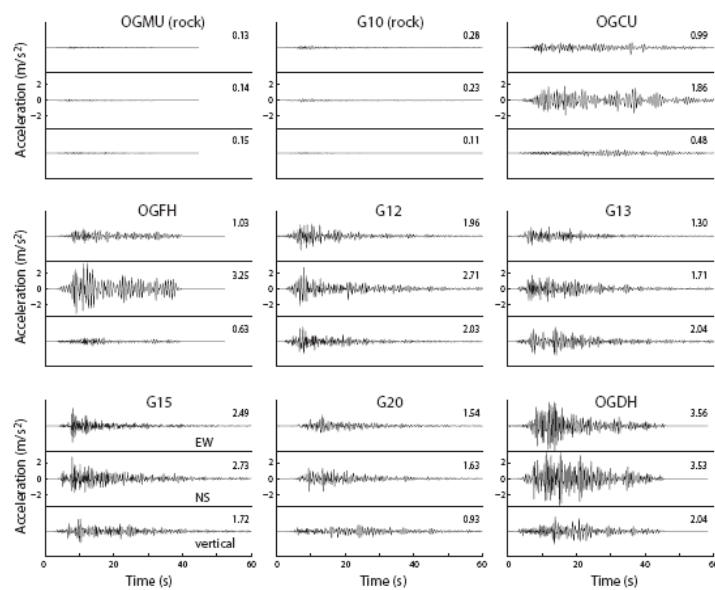


Figure 6 : Exemple de sismogrammes (composante EW) simulés

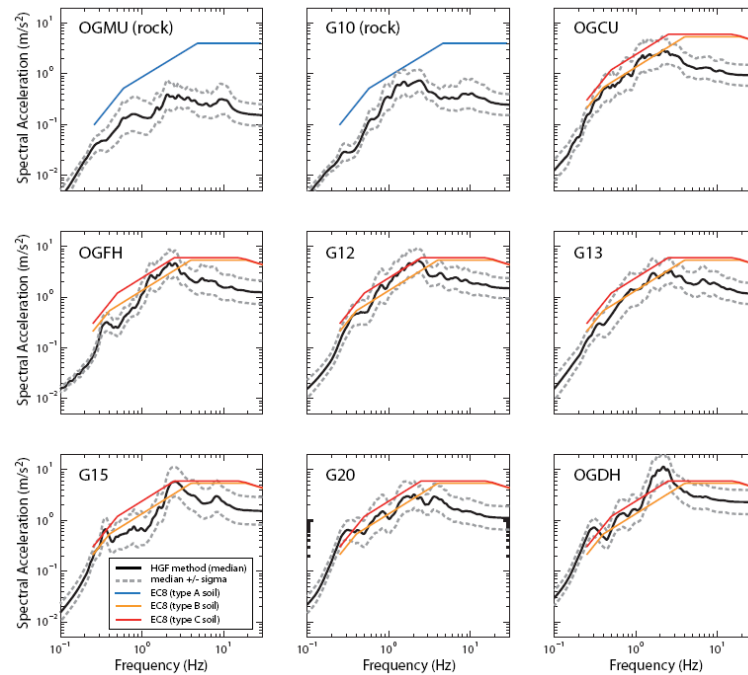


Figure 7 : Spectres en accélération (médiane et écart-type) simulés à différents sites et spectres réglementaires EC8.

C/ Cartographie des milieux superficiels

Les prédictions numériques à haute fréquence (> 1 Hz) nécessitent une bonne connaissance des milieux superficiels. Des campagnes de sismique en ondes de surface du BRGM en 2003 ont mesuré les vitesses d'ondes S dans les 40 premiers mètres du remplissage sédimentaires. Ce travail a été complété par une compilation des sondages géotechniques (Tadenuma, 2003 ; Guéguen et al., 2009). Notamment dans le cadre de ce projet, des mesures de sismique active en ondes de surface (MASW) ont été réalisées dans le bassin de Grenoble (Tsuno et al., 2008) afin de compléter les données déjà acquises par le BRGM pour mieux cartographier les milieux superficiels. Par ailleurs, un important travail de dépouillement de l'ensemble des données de forages géologiques, dont la figure 6 donne un exemple, a été entrepris sur Grenoble centre par Marielle Collombet et Gilles Ménard. 606 forages sur les 3584 disponibles ont ainsi été dépouillés et reportés sous SIG. Ces dépouillements précisent trois types principaux de formations géologiques : graviers à l'ouest, matériaux fins (argiles, limons, tourbes) reposant sur des graviers à l'est et une zone intermédiaire constituée d'environ 4 mètres de gravier intercalés dans des matériaux fins (Figure 8). Enfin, plus à l'Est, au niveau du Campus universitaire de Saint Martin d'Hères-Gières situé dans un méandre de l'Isère, on observe des structures de sols très variables spatialement, avec généralement des graviers (entre 7 et 10 m) reposant sur des matériaux fins. L'organisation et la nature de ces dépôts superficiels sont dominées par l'influence de l'Isère.

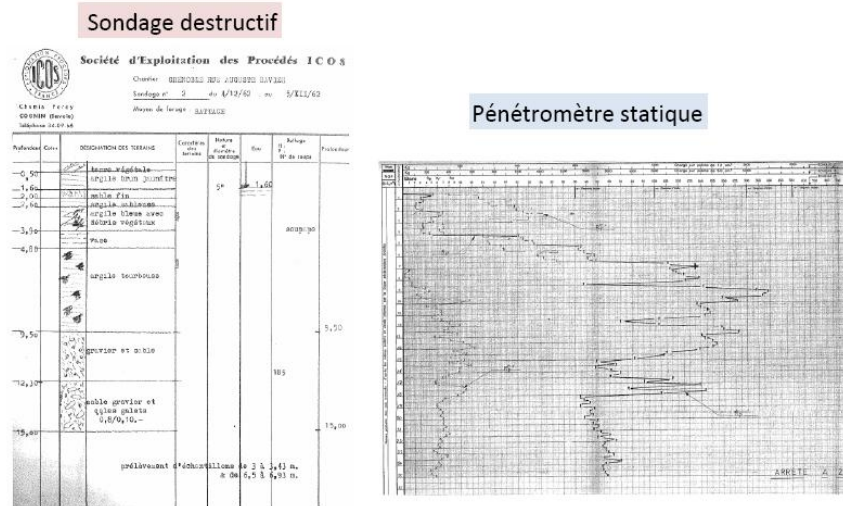


Figure 8 : Exemple de données de forage géologique ou géotechnique utilisé dans SIRSEG

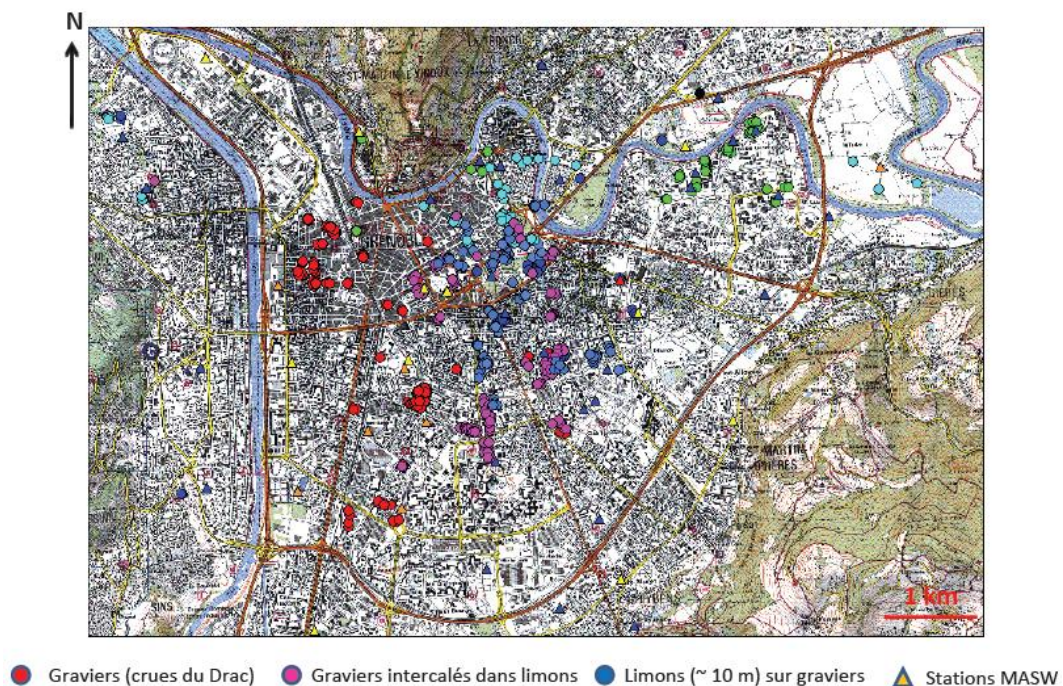


Figure 9 : Répartition des différents types de structures géologiques superficielles rencontrées dans l'agglomération de Grenoble.

La répartition spatiale de ces formations est en bonne cohérence avec l'histoire géologique connue des formations superficielles : les graviers observés à l'ouest du bassin de Grenoble (points rouge sur la Figure 9) marquent l'ancien cours du Drac – fleuve à fort débit ayant déposé des matériaux à forte granulosité -, tandis que les limons fins observés à l'est correspondent aux matériaux déposés notamment par l'Isère.

L'analyse des données de sismique active en ondes de surface (Tsuno et al., 2008) montre une variabilité spatiale des milieux superficiels (Figure 10) corrélée avec la variabilité spatiale des formations géologiques superficielles: les plus fortes vitesses observées en surface correspondent aux graviers tandis que les plus faibles vitesses correspondent aux matériaux mous.

Corrélation avec la vitesse de phase des ondes de Rayleigh

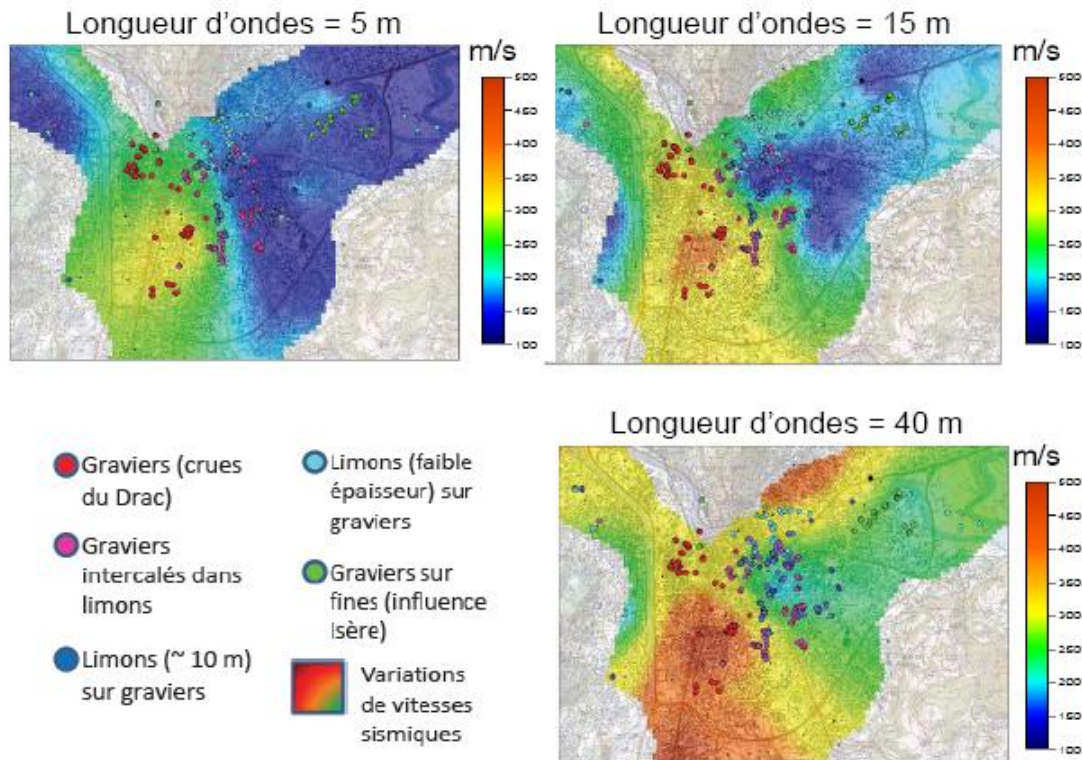


Figure 10 : Distribution des vitesses de phase des ondes de Rayleigh (mode fondamental) pour différentes longueurs d'ondes.

D/ Nuancer les apports pratiques

La bonne corrélation entre les informations géologiques et géophysiques pour la ville de Grenoble ouvre la voie à une meilleure prévention parasismique à l'échelle urbaine. En effet, dans une visée PPRS, cette corrélation autorise une estimation de contraintes de site à l'échelle de l'îlot grâce aux informations géologiques extraites de forages existants. Ce « raccourci » scientifique représente une économie de temps et d'argent pour les services d'urbanisme des collectivités publiques. Néanmoins, cerner finement l'aléa avec des données existantes suppose de résoudre leur disponibilité légale, puisque certaines sont publiques et d'autres privées. Débloquer ce type de situation dépasse les compétences des chercheurs impliqués.

D'autre part, perfectionner le scénario d'aléa sismique est utile pour estimer les dommages, mais suppose de disposer d'outils pour calibrer une échelle d'intensité en lien avec les estimations d'accélération faites à Grenoble. La conversion pour passer de la magnitude à l'intensité a un impact très fort sur le réalisme de l'endommagement probable. Parmi les formules de conversion, celle de l'EMS 98 appliquée dans le prototype de logiciel reste discutable, mais sert actuellement de référence en France.

II/ Inventaire sismique : évaluation de probabilité de dommages

A/ Le logiciel ISIBAT, un outil pratique

Le logiciel ISIBAT exploite et représente des informations collectées lors d'un inventaire sismique. Il offre un premier palier d'aide à la gestion de la vulnérabilité sismique :

- Attribution d'un indice de vulnérabilité, calée sur des observations issues de la méthode VULNERALP 1.0 et 1.1.
- Représentation des dommages en équivalence avec le dommage moyen D , selon l'échelle européenne macrosismique (EMS 98, 2001), référence de calage des typologies de bâtiments de VULNERALP.

Dans une logique de cohérence inter programmes, le logiciel ISIBAT a été testé sur les bâtiments scolaires municipaux grenoblois par les services techniques municipaux. Après un bref rappel des fondements de la méthode VULNERALP, nous signalerons les limites inhérentes à l'outil d'évaluation de la vulnérabilité et les nécessaires précautions d'utilisation.

B/ De VULNERALP à ISIBAT

Afin d'être appliquées à un grand nombre de bâtiments, les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique du bâti existant briguent la justesse au moindre coût. Pour répondre à ces deux critères, le LGIT (GEMGEP et RiskUE) développe la méthode VULNERALP d'évaluation de la vulnérabilité du bâti français. Les similitudes entre le bâti existant français et italien incitent à s'inspirer des développements italiens (GNDT, 1993 ; Seismocare, 1998). Pour être validée, VULNERALP est comparée à une méthode plus sophistiquée, RiskUE, via l'évaluation de 3420 bâtiments niçois (1868 en maçonnerie et 1552 en béton armé). Cette comparaison montre qu'entre les deux méthodes, les variations sont inférieures à un degré de l'échelle de dommage EMS 98. La pertinence de VULNERALP réside dans la simplicité de ses paramètres et donc la justesse d'évaluation par l'enquêteur novice. Les sept paramètres structuraux retenus sont : matériau de construction, irrégularité en évolution en et en plan, la forme du toit, la position de la structure, l'époque de construction et la nature de la fondation². Un score de vulnérabilité est affecté à chaque critère en fonction de la méthode GNDT (1993) et la somme pondérée de ces scores nous donne un indice de vulnérabilité I_v par structure. Même incomplète, cette méthode reste congruente pour évaluer la vulnérabilité à échelle urbaine grâce à sa construction en entonnoir qui mobilise des moyens croissants au fur et à mesure que le nombre de bâtiments diminue et que les besoins de précision augmentent. Dès le premier niveau de son application, elle hiérarchise les bâtiments les plus vulnérables. Ces résultats permettent de réduire les coûts en identifiant les bâtiments les plus vulnérables sur lesquels programmer des approches plus sophistiquées de diagnostic sismique (RiskUE, VULNERALP). Pour passer de la vulnérabilité à un dommage moyen d en fonction d'un scénario sismique, on applique la formule suivante (avec les limites qu'elle implique, évoquées en I/ de la partie II) via l'intensité I (Echelle Macrosismique Européenne EMS 98) :

$$d = 0,5 + 0,45 \arctan (0,55 (I - 10,2 + 0,05 I_v)) ; 0 < d < 1$$

C/ Limites et précaution d'emploi

Cette méthode VULNERALP ne se substitue en aucun cas à un diagnostic. Son utilisation et celle du logiciel ISIBAT associé imposent des précautions. Elle correspond à une évaluation de probabilité de dommages basée sur des analyses statistiques d'observations post-sismiques. Dans la pratique, les observations post-sismiques fournissent des moyennes statistiques

² Les paramètres d'évaluation de la méthode VULNERALP sont détaillés dans la fiche d'inventaire directement remise aux enquêteurs, consultable en annexe 1.

d'endommagement associant une intensité de séisme à des particularités structurales de bâtiments. La méthode VULNERALP et le logiciel ISIBAT permettent donc d'élaborer, non pas des diagnostics de vulnérabilité de bâtiment à l'unité, mais un inventaire intelligent de la vulnérabilité sismique d'un parc immobilier. Seule une auscultation parasismique aboutit à l'évaluation absolue d'un bâtiment. L'évaluation de probabilité de dommage VULNERALP a une valeur relative en fonction d'analyses statistiques et de l'état du reste du parc immobilier.

Afin d'apporter des critères de décision, l'utilisation de VULNERALP dans une analyse coût/avantage suppose d'intégrer le coût des études de diagnostic.

D/ Intégration des résultats de l'inventaire ISIBAT au logiciel SIRSEG

Les valeurs moyennes et l'intervalle des valeurs les plus probables, soit un indice de vulnérabilité a été calculé sur un échantillon d'écoles sélectionnées (73) parmi l'ensemble des écoles de Grenoble pour leurs caractéristiques représentatives de l'ensemble du parc scolaire. Nous présentons dans le tableau ci-dessous un exemple d'inventaire sismique pour un secteur associé au calcul d'indice de vulnérabilité³. En effet, les bâtiments scolaires, dont la ville est propriétaire, sont répartis en 6 secteurs géographiques. Les indices de vulnérabilité par école ont été intégrés au prototype de logiciel SIRSEG dont les fonctions seront détaillées en partie III.

³ Le détail complet des résultats de l'inventaire sismique élaboré par l'équipe municipale sur les écoles grenobloises grâce au logiciel ISIBAT et des indices de vulnérabilité sont disponibles en annexe n° 1.

École	Création	Ajout de bâtiment	Rénovation, modification	Nombre de bâtiments	Matériaux	Nombre d'étages	Toiture	Typologie	Observations	Indice de vulnérabilité
Ampère maternelle	1954	Non	Restructuration 2002	3	béton armé	30% en R+1 70% en RDC	toiture pentée : tuiles sur charpente	3	partie centrale en R+1 avec RDC de chaque côté	29
Ampère élémentaire	1954	Non	maintenance : (conformité électrique, second œuvre) 2003 à 2005	4	béton armé	40% en R+2 60% en RDC	toiture pentée : tuiles sur charpente	3	1 bâtiment central en R+2 pour l'école 3 bâtiments en RDC dont chaufferie, restau scolaire non compris : logement de fonction R+1	29
Berriat maternelle	1920 - 1930	Oui 1994	Réaménagement 1978	2	maçonnerie	70% en R+1 30% en RDC	toiture pentée : tuiles sur charpente	5	extension en RDC non compris : bâtiments restaurant et gymnase	26
Berriat élémentaire	Avant 1930 ?	Oui 1954/1994	Maintenance - 2005 travaux ascenseur - 2006	3	maçonnerie	R+2	toiture pentée : tuiles sur charpente pour bâtiment d'origine	6	2e bâtiment : ancien toiture tuiles 1950 3e : extension construite 1994	26
Macé maternelle	1925-1935		maintenance : réfection toiture 2004	1	béton armé	R+2	toiture pentée : tuiles sur charpente métallique	1	Comprenant maimonide	29
Macé élémentaire	1925-1935		maintenance : réfection toiture 2004	2	béton armé	R+2	toiture pentée : tuiles sur charpente métallique	1	2e bâtiment comprenant l'école maimonide	29
Vallier maternelle	1962	Non	maintenance : second œuvre 2001 à 2005	2	béton armé	60% en R+1 40% en RDC	toiture pentée : tuiles sur charpente toiture terrasse	3	bâtiment principal en R+1 bâtiment RDC de la même époque?	26
Vallier élémentaire	1962	Non	maintenance : second œuvre- 2001 à 2005 réaménagement - 1986	1	béton armé	R+2	toiture pentée : tuiles sur charpente	3	structure poteaux-poutres avec façades rideaux non compris : logement de fonction	26
Buffon maternelle	1950	Non	maintenance : second œuvre, menuiseries – 2001 à 2005	2	béton armé	80% en RDC 20% en R+1	toiture pentée : tuiles sur charpente	Autre	bâtiments comprenant appartement de fonction à l'étage	31
Diderot maternelle	1950 ?	Non	maintenance : second œuvre création classes (cloisons) 2005	2	béton armé	90% en RDC 10% en R+1	toiture pentée : tuiles sur charpente	Autre	bâtiments comprenant restaurant scolaire et logement de fonction (en R+1)	31
Chorier groupe scolaire	Avant 1945	Oui 1997 à 1998	restructuration 1995	6	maçonnerie	25% en R+2 75% en R+1	toiture pentée : tuiles (75%) et ardoises sur charpente bois	6	extensions de chaque côté 1997-1998 : restaurant et salle de repos	26

Figure 11 : Inventaire sismique simplifié et indice de vulnérabilité pour les écoles grenobloises du secteur 1.
Source : Simplifié de Guéguen, 2008.

III/ L'analyse coût / avantage : un domaine exploratoire

Le rapport entre coût et avantage de sécurité est déterminant pour fixer les obligations de protection parasismique. Or, l'analyse coût/avantage de l'application des codes antisismiques est rudimentaire, voire embryonnaire. Deux étudiants, Virgile Métral (2008) en géographie et Lamine Ayadi (2009) en économie ont synthétisé les informations disponibles, afin d'examiner le coût des techniques parasismiques pour les écoles de Grenoble. Leurs travaux cumulés permettent de disposer d'un état de l'art en matière de calcul d'éventuels surcoûts à partir de bibliographie et d'enquêtes auprès de professionnels du bâtiment (maîtres d'ouvrages, ingénieurs, architectes, administrations).

Il est établi que l'intégration initiale de technologies parasismiques dès le design architectural garantit un coût de construction normal. Cependant, le manque d'information et d'évaluation réelle nécessite d'écrire les composants de l'équation économique du coût parasismique afin de simplifier des choix essentiels et de révéler des choix sociaux. L'estimation des coûts de renforcement doit permettre une comparaison entre constructions neuves et protections des constructions anciennes. Néanmoins, elle suppose de pouvoir intégrer des informations disponibles à propos de l'aléa, des diagnostics de bâtiments et des investissements. Il s'agit de trouver des critères simples pour organiser la protection des bâtiments, choisir les niveaux de sécurité et annoncer les coûts.

Les investigations menées par Lamine Ayadi comparent plusieurs méthodes internationales et tentent de tester leur application au contexte français. À cette fin, une étape de collecte de données budgétaires auprès de la municipalité de Grenoble, du Conseil Général de l'Isère et du Ministère de l'Équipement permet de cibler les informations disponibles pour les bâtiments scolaires pour spécifier les budgets consacrés à leur sécurité et leur entretien. Enfin, ces informations fondent des scénarios de financement de la sécurité sismique des bâtiments. Il s'agit d'examiner comment ces critères orientent les décisions politiques selon le cadre normatif légitime. Dans une situation d'incertitude majeure, l'arbitrage entre objectifs de sécurité et nécessités financières collectives constitue un cas représentatif des dilemmes publics face aux risques. L'examen des diverses hypothèses permet d'envisager différentes modalités de financement de la sécurité parasismique scolaire municipale (fiscalité, subventions étatiques, endettement, dons privés, amendes, etc.).

A/ L'approche des Etats-Unis d'Amérique

Aux Etats-Unis, les méthodologies de diagnostics parasismiques développées par la FEMA (Federal Emergency Management Agency, 1994) intègrent le choix d'un niveau de sécurité qui distingue la survie des occupants (normal) et l'usage immédiat du bâtiment (continuité stratégique). Une check liste comprend le zonage sismique, l'aire géologique et l'usage du bâtiment, y compris son intérêt historique et patrimonial. Les informations et les inspections de bâtiments relèvent le nombre d'étages, la date de construction, la dimension en plan, le type de structure, la résistance aux forces latérales, le type de fondation et les éléments additionnels. Ceci permet de calculer les forces, les spectres d'accélération, les périodes fondamentales et les effets de site. Cette méthode élaborée par la FEMA développe un modèle coût/avantage et un logiciel d'application associé pour calculer le coût type de renforcement. Elle estime le coût de réhabilitation par région pour décider en fonction de la protection sismique dans sa dimension socio-économique.

Définition des coûts

Le « coût typique » est le coût nécessaire pour la réhabilitation parasismique de l'ensemble des constructions classées dans la base de données selon des critères spécifiques. L'unité du

coût est le dollar par surface habitable. Deux catégories de coût sont définies pour développer une base de données des coûts de réhabilitation :

1. Les coûts directs (voir figure n° 12) : travaux de réhabilitation payé par le bénéficiaire : coûts de construction directs payés à l'entrepreneur et coûts hors construction payés à d'autres prestataires.
2. Les coûts indirects (difficiles à mesurer) : pertes de revenus et coûts d'opportunité.

Coûts de construction	Coûts hors construction	Coûts indirects
Sismique - Renforcement de la structure, matériaux de construction et main d'œuvre (frais généraux entrepreneur et profits inclus) - Autres travaux de réhabilitation structurels - Démolition et restauration - Réparer les dommages Non sismiques - Amélioration du réseau - Améliorations de l'accès aux handicapés - Enlèvement de matières dangereuses	- Gestion de projet - Frais de conception d'architecture et d'ingénierie - Relocation - Frais de tests de matériaux, contrôles et permis	- Financement - interruption occupant / relocalisation - augmentation des loyers - changement de valeur de la propriété - perte de recettes pendant la construction - variation du stock de logements - impacts sociaux - administration du programme - impact fiscal / augmentation du coût des services à la communauté

Figure 12 : les composants du coût de réhabilitation
Source: FEMA 1994 (156, 157, 173, 174, 227, 228)

Les principaux facteurs influençant le coût direct sont la sismicité, l'objectif de performance, la structure, la classe d'occupation, l'emplacement de la construction, le nombre d'étages, l'âge de la construction, et les conditions d'occupation.

Méthode de calcul du coût type :

La FEMA définit trois options, :

1. Groupe de constructions, surface, année pour laquelle le coût type est calculé.
2. Option 1 + séismicité de la zone et objectif de performance souhaitable.
3. Option 2 + âge de la construction, nombre d'étage, nature de l'occupation (bureau ou encore résidence), conditions d'occupation (vacant ou utilisée durant la réhabilitation).

Les informations introduites permettront à l'utilisateur d'obtenir une estimation pertinente du coût type calculé en se référant à une base de données préétablie.

Construire une base des données des coûts :

Le processus de collecte des données est développé pour être le plus objectif possible. Une feuille de travail est conçue pour la collecte des données sur les constructions. Dans le cas où des informations sont indisponibles, la fiche sera mise de côté jusqu'à être complétée. Étapes de construction de la base de données :

- a) Identification des sources : contact d'ingénieurs et d'experts des travaux de réhabilitation sismique par un groupe de conseillers.

- b) Intégrer les données de l'ancienne base de données de 1988 jugées acceptables.
- c) Collecte des nouvelles données sur les projets réalisés par des ingénieurs et des spécialistes en réhabilitation sismique à l'aide des « feuilles de travail ».
- d) Contrôle des données collectées pour s'assurer de leur qualité et de leur pertinence en fonction de : la date de l'étude ou de la construction (Avant 1973=1, Entre 1973 et 1987=2, Après 1987=3) ; la source et la certitude des coûts (bon, assez bon, faible) ; la consistance des données (exhaustivité, objectivité).
- e) Saisie des feuilles de travail dans la base de données après vérification.

Des mesures correctives sont appliquées aux informations concernant les édifices datant d'avant 1993 : Facteur de correction de l'année de construction ou d'étude (actualisation du coût en fonction des coûts moyens de construction de 20 villes) ; facteur d'emplacement (coûts moyens calculés sur 250 régions des États-Unis et du Canada et comparés avec la région centrale dite « Missouri »). Le facteur de correction de l'année de construction ou d'étude est multiplié par le facteur d'emplacement afin d'obtenir un indice de correction. Tous les coûts de construction sont multipliés par l'indice approprié pour rapprocher le coût de construction des autres régions à celui de du coût moyen de Missouri de 1993.

Option 1 de calcul du coût typique

L'estimation du coût typique peut être obtenue par la multiplication des valeurs d'un ensemble de critères. Chaque critère représente un ou plusieurs variables qui peuvent affecter le coût. La valeur de chaque critère est obtenue de la base de données des coûts calculés pour l'ensemble des constructions traitées. L'utilisateur peut sélectionner une méthode d'estimation du coût typique entre trois options. Le coût typique structurel est calculé avec la formule suivante :

$$C = C1 \ C2 \ CL \ CT$$

C1 : coût moyen par groupe et type de construction permettant d'améliorer la performance sismique (dollars/M2 de surface habitable).

C2 : facteur d'ajustement de la surface calculé en fonction du groupe de construction et de la surface (total surface habitable).

CL : facteur d'ajustement de l'emplacement calculé pour chaque région en fonction des coûts moyens de construction des villes de la région (indice par région).

CT : facteur d'ajustement du temps calculé en référence à la base de données des coûts de 1993 actualisé selon le taux d'inflation (indice par année).

Un taux de confiance est proposé à l'utilisateur en fonction du nombre de constructions incluses dans le calcul du coût typique. Le taux de confiance exprime le degré d'incertitude relative aux calculs de la valeur du coût basé sur un faible nombre de constructions. Pour les options 2 et 3, le même processus est adopté en introduisant d'autres critères dans le calcul du coût typique.

Les limites de la méthode

Les constructions peuvent avoir des exigences de réhabilitation différentes. De plus, les résultats des travaux réalisés montrent que l'estimation du coût donne un large degré d'incertitude. Cette incertitude existe si la base de données contient des informations de réhabilitation sismique de plusieurs constructions appartenant à un seul groupe, et fournies par un seul bureau d'ingénierie. Dans le cas où le nombre de constructions de type spécifique

augmente, l'incertitude relative au coût diminue et permet une estimation plus précise. Enfin, pour une meilleure estimation du coût de réhabilitation sismique, il reste recommandé de consulter un ingénieur de structure afin d'évaluer la performance de la structure et les spécificités de la construction.

B/L'approche Helvète

En Suisse, l'analyse des coûts du renforcement développée par l'OFEV (Office Fédéral de l'Environnement) intègre le bénéfice de la vie sauvée comme un investissement positif qui doit être proportionnel à la réduction globale du risque. Le devoir est alors de garantir la sécurité de l'investissement en tenant compte de l'éventuel coût d'une mortalité. Les variables comprennent l'investissement de sécurité, la durée d'usage du bâtiment, le facteur d'escompte, et l'occupation du bâtiment.

Pour classer les constructions en 4 groupes par ordre de priorité jusqu'à l'estimation du coût de sécurité, la méthode de « Vérification de la sécurité sismique des bâtiments existants » comprend trois étapes :

1. Évaluation de la sécurité parasismique à l'aide d'indicateurs de risque (Duvernay, 2005) : Le diagnostic de sécurité de l'ouvrage fournit des critères d'évaluation pour calculer un score de risque et classer les ouvrages en 4 niveaux afin de hiérarchiser les interventions :

(RZPS) Indicateur du risque = (AZPS) Ampleur des dommages * (WZ) Proba effondrement

2. Analyse détaillée des ouvrages à risque élevé (Duvernay, 2006) par des experts en génie parasismique à l'aide de questionnaires et de calcul d'ingénieur simple. Cette étape a pour objectif :

- a) D'acquérir les informations concernant le site et la structure porteuse.
- b) De déterminer s'il est admissible de soumettre le bâtiment à une analyse simplifiée selon la méthode des forces de remplacement.
- c) D'effectuer une évaluation visuelle du bâtiment si cela n'a pas encore été fait.
- d) De répondre aux questions pertinentes et détaillées afin de repérer, puis d'évaluer les éventuels défauts.
- e) D'effectuer une analyse simplifiée selon la méthode des forces de remplacement.

3. Évaluation du risque et des coûts de renforcement basée sur le cahier technique 2018 pour vérifier la sécurité sismique des bâtiments existants :

- a) Appréciation de l'état des bâtiments par calcul avancé basé sur les forces et sur la déformation de la structure porteuse. Le calcul du facteur de conformité α_{eff} permet une appréciation numérique de la sécurité structurelle en utilisant la méthode basée sur les forces. Le risque individuel est acceptable si $\alpha_{eff} > \alpha_{min}$ (Classe de bâtiments I et II : $\alpha_{min} = 0,25$ / Classe de bâtiments III : $\alpha_{min} = 0,40$)
- b) Estimation des coûts et de l'efficacité des interventions sur les bâtiments existants (Lestuzzi, 2009) :

La notion helvétique du risque intègre de nouvelles notions :

- Risque individuel : probabilité moyenne qu'une personne décède suite à un séisme.
- Risque individuel acceptable: valeur déterminée en comparaison avec d'autres risques et avec le niveau de risque minimum exigée. Cette estimation est effectuée sur l'hypothèse qu'une personne se trouve en permanence dans le bâtiment considéré.

Généralement, la probabilité de décès proposés par les spécialistes varie entre 10-3 et 10-5 par années. Pour risques dits naturels, les valeurs comprises entre 10-4 et 10-5 par année sont considérées comme acceptables.

D'autres éléments sont introduits (classes de vulnérabilité, taux d'occupation, probabilité d'endommagement) afin d'établir une courbe matérialisant la relation entre le risque individuel et le facteur de conformité.

- Appréciation de l'efficacité des mesures de protection sismique en fonction des coûts de sauvetage RKm. Elle prend en considération les coûts imputables à la sécurité actualisés et la réduction du risque obtenue (vies sauvées/an).
- Si les coûts de sauvetage se montent à moins de 10 millions de francs par vie sauvée, la mesure de protection est considérée comme proportionnée.
- Si les coûts de sauvetage se montent à moins de 100 millions de francs par vie sauvée, la mesure de protection est considérée comme raisonnablement exigible.

La formule de calcul est la suivante (Duvernay, 2005) :

$$RKm = SKm / \Delta Rm \text{ [francs/an]}$$

Eléments	Formule	Détail
SKm : Les coûts imputables à la sécurité	$SKm = DF * SIKm$ (Francs/an)	DF : le facteur d'escompte $DF = [i(1+i)^n] / [(1+i)^n - 1] (1/an)$ n: Durée d'utilisation restante i : Taux d'escompte 2% par an doit être appliqué.
		SIKm : montant investi pour la sécurité. Il comprend tous les montants imputables à la protection parasismique.
ΔRm : la réduction du risque est la différence du risque collectif aux personnes entre la situation initiale et la situation après réalisation des mesures de protection parasismique.	$\Delta Rm = \Delta RF . PB$ (vie sauvées/an)	ΔRF : différence entre les facteurs de risque $PB = (Bi . hi . di . wi)$ Taux d'occupation moyennée sur une année Bi : nombre de personne Hi : nombre d'heures par jour d'occupation Di : nombre de jours par semaine d'occupation wi : nombre de semaines par ans d'occupation

Figure 13 : Éléments du calcul du coût de sauvetage
Source : GEOTER, 2009.

L'indicateur SIKm (montant investi pour la sécurité) représente le montant à dépenser pour la mise aux normes parasismiques des constructions.

Exemple (Bruchez, 2004)

$\alpha_{eff} = 0,268$ en transversal, $\alpha_{eff} = 0,255$ en longitude

Des mesures de sécurité ne sont pas indispensables sauf au cas où les coûts d'intervention sont proportionnés. Le facteur de conformité admissible est de 0,80.

Le coût des travaux raisonnable exigible est égal : $SIKm = (Rkm . \Delta RF . PB) / DF$

Avec

DF : 0,029 facteur d'escompte pour un taux annuel de 2% sur 60 ans

ΔRF : $8,9 \cdot 10^{-6}$ la différence du facteur de risque entre $\alpha = 0,25$ et $\alpha = 0,8$

PB : 55 le facteur d'occupation pour 11 salles de classe.

Rkm : 10 000 000 de francs par vie sauvée pour $\alpha > 0,25$

$$SIK_m = (10\,000\,000 \cdot 8,9 \cdot 10^{-6} \cdot 55) / 0,029 = 168\,000 \text{ francs}$$

Le coût raisonnablement exigible pour assainir la structure dans ce cas est égal à 168 000 francs. Par contre, si $\alpha < 0,25$ le coût d'une vie sauvée est rapporté à 100 000 000 de francs et le coût raisonnable exigible sera multiplié par dix.

C/ L'approche française

Une étude récente sur le diagnostic technico-économique du renforcement sismique de 619 écoles publiques en Martinique élaborée par le groupement GEOTER a pour objectif de :

1. Classer les écoles selon la vulnérabilité et la faisabilité du renforcement :

Groupe 1 : constructions à faible risque. Elle ne nécessite pas des interventions de renforcement.

Groupe 2 : construction n'appartenant pas aux groupes 1 ou 3.

Groupe 3 : construction à haut risque, le renforcement est jugé non pertinent.

2. Déterminer les coûts et délais de travaux de renforcement et de reconstruction afin de faciliter le choix des décideurs.

Méthodologie d'estimation des coûts

La méthode repose sur l'évaluation de la présomption de vulnérabilité par la méthode indicielle. Cette dernière repose sur un diagnostic visuel basé sur l'analyse d'un ensemble de critères de vulnérabilité quantifié par un indice de vulnérabilité. Les facteurs traités concernent : l'implantation du bâtiment et son environnement, le type de structure, la forme du plan, la forme en élévation, l'élément de contreventement, la zone critique, les fondations, le règlement parasismique appliqué. L'indice de présomption de vulnérabilité est la somme des notes attribuées à chacun des facteurs de vulnérabilité. Le résultat obtenu fait l'objet de vérifications à plusieurs niveaux afin d'obtenir des appréciations objectives (inspecteur, superviseur, contrôle par sondage aléatoire et statistique).

Évaluation de la pertinence des renforcements pour les constructions du groupe 2

L'objectif est d'atteindre le niveau de résistance déterminé par les règles PS92. Si cet objectif est inatteignable, on cherche à améliorer la capacité initiale de la construction. Le mode de renforcement est alors déterminé en fonction des contraintes d'exploitation et de celles du génie parasismique. L'estimation des coûts de renforcement au m^2 habitable a été évaluée statistiquement en exploitant la base de données empirique du groupe GÉOTER. L'utilisation des indicateurs statistiques permet d'obtenir une estimation rapprochée des coûts avec une incertitude de moins de 20%. L'estimation des coûts des travaux de renforcement est une corrélation entre les coûts au m^2 (estimés sur la base de coûts de construction neuf et de travaux de renforcement réalisés au Martinique entre 2005 et 2008) et les principaux facteurs (indice de vulnérabilité, type de structure, année de construction, nombre de niveaux, surface à traiter). Les coûts de renforcement correspondent aux travaux directs sur les constructions, d'autres coûts sont exclus :

- Coût de délocalisation ou interruption de l'activité durant les Travaux
- Remise aux normes imposées par la réglementation

- Plus value sur les équipement existants remplacés par de nouveaux plus onéreux.
- Remise aux normes actuelles de confort et de fonctionnalité.
- Charges foncières
- Études architecturales

Les coûts sont évalués avec une incertitude de +/- 20%, en plus d'une majoration de 1 à 1,2 en fonction de la localisation géographique pour tenir compte de la facilité d'accès et de délocalisation.

Calcul du coût du renforcement de l'existant

Le coût unitaire du renforcement par m² SHOB Cr peut être calculé par la formule suivante :

$$Cr = Cro (n ; lv) \cdot kn \cdot kr \cdot g \cdot a$$

Cro (n ; lv) : coût de base en € HT au m ² SHOB	n : nombre de niveaux lv : indice de présomption de vulnérabilité
kn : coefficient lié à la nature du bâtiment	Les critères de base sont : - Type de bâtiments : fonction d'enseignement (salles de classes, garderies, dortoirs), ou autres bâtiments (restaurant, gymnases, préaux) - Surface et date de construction.
Kr : coefficient de complexité de réalisation des Travaux sur le terrain.	Normal ou facile : kr = 1 Difficile : kr = 1,10
g : coefficient géographique intra Martinique	
a : coefficient d'actualisation des prix	(base juillet- décembre 2008 = 1,026)

Figure 14 : Éléments de calcul des coûts de renforcement

Source : GEOTER, 2009.

Calcul du Coût des constructions neuves

Le coût unitaire du neuf par m² SHOB, € HT (Martinique valeur 12/2008) est calculé avec la formule suivante :

$$Cn = Cno \cdot kf \cdot kl \cdot ks \cdot g \cdot a$$

Cno : prix de base en Martinique 07/2008	Une moyenne de 1375 € HT par m ² pour une fonction d'enseignement
Kf coefficient de fonction	Enseignement et dortoirs : 1, Local technique : 1,20, Autres : 1,50
Kl : coefficient de nombre de niveaux	N =1 : kl = 1,25/N =2 : kl = 1,50/ N = 3 : kl = 1.00/ N >=4 : kl = 0,89
Ks : coefficient de classe de sol PS92	
g et a	Idem pour le renforcement

Figure 15 : Éléments de calcul du coût du neuf

Source : GEOTER, 2009.

Pour les préaux et coursives le produit de (Cno . kf . kl) est considéré fixe, soit 700 € HT / m²
Le coût de démolition est inclut dans le coût de reconstruction, il est évalué à 145 € HT / m² SHOB.

Classification selon la pertinence technico économique du renforcement

Deux critères sont utilisés pour déterminer la pertinence du renforcement. Un critère technique, soit la corrélation entre l'indice de vulnérabilité et le niveau de protection atteint par le renforcement par rapport à celui du neuf. Un critère économique qui permet de comparer le coût de renforcement au coût de reconstruction calculé par les méthodes précédentes. En croisant ces deux critères, on obtient un diagramme pour estimer la pertinence du renforcement.

Critères	Travaux pertinents	Travaux non pertinents
Indicateur technique	Entre 80% et 100%	Entre 0% et 80%
Indicateur économique	Entre 0% et 60%	Entre 60% et 100%
Interprétation	La protection atteint au minimum 80% par rapport au neuf et les coûts de renforcement restent inférieurs à 60%.	La protection atteint est éloignée par rapport au neuf et les coûts de renforcement sont supérieurs à 60%.

Figure 16 : Critères de pertinence du renforcement
Source : GEOTER, 2009.

D/ Comparaison des méthodes

Suisse	USA	France
Coût de sauvetage	Coût typique	Coût de renforcement
$RK_m = SK_m / \Delta R_m$ Francs/an	$C = C1 \ C2 \ CL \ CT$ \$/m2 habitable	$Cr = Cro (n ; lv) \cdot kn \cdot kr \cdot g \cdot a$ €/ m2 SHOB
$SK_m = DF * SIK_m$ (Francs/an) DF : facteur d'escompte $DF = [i (1+i)^n] / [(1+i)^n - 1]$ (1/an) n: Durée d'utilisation restante i : Taux d'escompte 2% par an. SIK _m : montant investi pour la sécurité. $\Delta R_m = \Delta R_F \cdot PB$ (vie sauvées/an) ΔR _F : différence entre les facteurs de risque $PB = (Bi \cdot hi \cdot di \cdot wi)$ Taux d'occupation moyen par an Bi : nombre de personne Hi : nombre d'heures par jour d'occupation Di : nombre de jours par semaine d'occupation wi : nombre de semaines par an d'occupation	C1 : coût moyen (dollars/M2 de surface habitable) C2 : facteur d'ajustement de la surface (total surface habitable) CL : facteur d'ajustement de l'emplacement (indice par région) CT : facteur d'ajustement du temps (indice par année)	Cro (n ; lv) : coût de base en € HT au m2 SHOB kn : coefficient lié a la nature du bâtiment. Kr : coefficient de complexité de la réalisation des Travaux sur le terrain. g : coefficient géographique intra Martinique a : coefficient d'actualisation des prix (base 2008 = 1,026)

Figure 17 : Récapitulatif des trois méthodes de calcul

Chacune de ces méthodes est incertaine. En effet, l'estimation du coût obtenue est approximative et une estimation exacte n'est possible qu'à travers une étude propre à chaque construction. Cette relativité rejoint la prudence des évaluations de vulnérabilité architecturale par scores et inscriptions dans une valeur statistique typique.

Malgré leurs différences (vocabulaire et unités de mesure spécifiques), certains aspects rassemblent les différentes méthodes. Ainsi, logique commune aux approches américaine et française, la comptabilité analytique calcule un prix de revient type ensuite ajusté par imputations rationnelles de critères supplémentaires (jusqu'au coût d'acheminement des matériaux en Martinique). À l'inverse, l'approche Suisse tend vers une réflexion probabiliste en rapportant le coût raisonnable de renforcement à l'état de la construction et au bénéfice de sécurité.

Méthodes	Points forts	Points faibles
Suisse	Introduit des facteurs pertinents: - La durée d'utilisation restante - Le taux d'occupation, - Un taux d'escompte raisonnable,	- Coût de réalisation important - Limitée sur un bâtiment - Non accessible
Américaine	- Analytique et simple - Accessible sur internet et sans l'intervention des spécialistes - Coût de réalisation faible	- Ne prend pas en considération l'état du bâti dans le calcul du coût,
Française	Analytique et simple	- Non accessible - Coût de réalisation important

Figure 18 : Points forts et points faibles des trois méthodes de calcul

Il est délicat de se prononcer sur la méthode la plus pertinente pour calculer un coût qui soit représentatif et proche de la réalité. Pour cela, il s'agirait d'appliquer ces trois méthodes de manière comparée sur un même échantillon de construction. Néanmoins, nous pouvons avancer que le coût de renforcement est fonction de deux éléments principaux :

- Direct (relatif à la construction) : vulnérabilité, type, occupation, coût des matériaux et de la main d'œuvre, objectif du renforcement.
- Indirect (relatif à l'environnement) : risque encouru, emplacement, ...

Toutes ces variables influencent le coût de renforcement sans que les résultats obtenus ne soient satisfaisants face au risque encouru. Deux contraintes sont envisageables : un coût de renforcement important et un niveau de sécurité non conforme. Pour cela, les méthodes présentées ci-dessus nous offrent des pistes de réflexion évoquées ci-dessous.

En tout état de cause, pour choisir entre renforcement et démolition, la méthode de calcul de la FEMA intègre explicitement une vigilance à d'autres facteurs de coûts, y compris « non sismiques », comme l'amélioration des réseaux, des accès handicapés, des isolations ou de la substitution des matériaux dangereux (amiante). Suivre la législation ne permet qu'un examen restreint au seul danger d'effondrement mortel du bâtiment. Toutefois, en cas d'insuffisances constatées, dans l'attente d'une amélioration structurelle, mieux vaut aussi investir dans des protections palliatives peu coûteuses comme l'amélioration des conditions d'évacuation et la formation des usagers (Cartier et Colbeau-Justin, 2010). Établir des diagnostics complets

représente la première étape d'une démarche collective qui hiérarchise les besoins et détermine des échéanciers en jouant d'une gamme de solutions complémentaires.

Les stratégies d'investissement dans la sécurité peuvent être considérées comme un bien commun, *a fortiori* pour un patrimoine public comme les écoles. Néanmoins, alors que le calcul du coût des sinistres est systématiquement mis en avant après un événement dommageable, celui de la prévention du risque, ici relative au renforcement sismique de l'existant, est très peu abordé par les professionnels et les pouvoirs publics en France. De plus, les travaux d'enquête auprès de la ville de Grenoble n'ont portés leurs fruits qu'en partie. Les précisions sur le choix de l'échelle de financement intégré au prototype de logiciel d'aide à la décision sera évoqué en partie III. D'une manière générale, les contraintes de financement limitent le champ d'intervention des pouvoirs publics. Les risques sont connus, mais les efforts de prévention dépendent de la volonté des acteurs et des moyens financiers consentis actuellement pour préserver une ressource patrimoniale. Dans un champ de recherche connexe au notre, Christian Gollier (2005), pour raisonner la rentabilité patrimoniale des investissements environnementaux, introduit deux dimensions dans le calcul coût/avantages :

- L'acceptabilité du risque collectif qui amène à fixer un objectif de sécurité patrimoniale de référence.
- Le facteur temps qui suggère un amortissement intergénérationnel retranscrit par le choix du taux d'actualisation ; à 4% pour les investissements rapidement rentables et à 2% pour les bénéfices intergénérationnels.

La méthode Suisse est la seule à intégrer ces deux dimensions. En effet, le risque acceptable y est déterminé par l'analyse de la courbe de mortalité annuelle afin de déduire un taux acceptable. Le temps lui est introduit à travers un facteur d'escompte calculé en référence à la durée restante et au taux d'actualisation. Avec cette logique, la méthode suisse introduit des éléments pertinents dans le calcul du coût des interventions sur le bâti. Elle fixe elle aussi à 2% le taux d'actualisation admissible pour des investissements patrimoniaux intergénérationnels comme la sécurité parasismique des écoles. Ce choix permet de reconsidérer le retour sur investissement des équipements publics non plus selon leur rentabilité rapide mais plutôt sur leur amortissement de long terme. Plutôt taboue en France, l'introduction d'un facteur comme la valeur fiduciaire de la vie sauvée, équivalente au coût forfaitaire d'un mort, permet de représenter les gains probables directs liés à l'amélioration de la sécurité scolaire. Inscrite dans une rationalité assurancielle, cette approche oblige le décideur à exprimer des valeurs de perte statistiquement tolérable et des objectifs de sécurité incontournables.

En définitive, on peut considérer que la sécurité d'un bâtiment comprend son taux d'occupation, le nombre d'années d'utilisation, l'investissement dans le patrimoine et sa maintenance, croisés à la probabilité d'un aléa destructif ou péjoratif. À ce titre, l'argent investi est une addition du capital et de la maintenance, multipliée par le nombre d'année et l'accélération sismique. Pour un patrimoine immobilier, l'investissement de sécurité correspond alors à l'addition de 4 niveaux de sécurité (classes de vulnérabilité) où la valeur du patrimoine totalise le nombre de bâtiments en sécurité I plus le nombre bâtiments en sécurité II, + nsIII, +nsIV ; soit :

Sécurité Patrimoine = n bâtiments en sécurité I + nII + n III + nIV.

Il est possible d'envisager le financement du budget des travaux de prévention sismique à long terme en trois étapes :

- Estimation du budget total de mise aux normes parasismiques d'un territoire et la durée du projet ;
- Mise en place du budget annuel ;
- Prévision de sources de financement.

Ces éventuelles sources de financement sont :

- Des taxes de prévention sismique pour alimenter un budget annuel de prévention (détail de la taxe assujettie à la durée du programme de renforcement)
- Des subventions de l'Etat
- Des subventions des organismes nationaux et internationaux
- Des dons privés et des entreprises
- Un endettement à long terme assumé progressivement par les générations protégées
- Des amendes aux maîtres d'ouvrages négligents.

PARTIE III :

**Géo-visualisation des informations
et logiciel d'aide à la décision**

I/ La Géo-visualisation : un outil pour rassembler les informations

A/ Contexte et objectif

Les données existantes pour caractériser les facettes du risque sismique à Grenoble sont dispersées, hétérogènes et de formats différents. De plus, la représentation spatiale de ces informations conditionne une meilleure connaissance territoriale des risques par les acteurs : diffusion, appropriation et zonages administratifs bénéficient du renouvellement constant des formats cartographiques (SIG) et de la planification de l'urbanisme (PPRS), par exemple par des microzonages sismiques dans les vallées alpines sédimentaires (Cartier, 2007).

Nous proposons d'intégrer l'ensemble des données nécessaires à l'évaluation du risque sismique (aléa, vulnérabilité physique et vulnérabilité sociale) au sein d'une même « base de données spatialisées » pour faciliter leur réutilisation. Toutefois, les SIG classiques sont peu adaptés pour traiter des données multi-scalaires, multi-format, multi-sources et peu structurées, voire incomplètes. Cette création s'inscrit dans une problématique de développement des systèmes d'information dédiés aux risques naturels (SIRN). Leur conception et réalisation sont confrontées aux caractéristiques des informations, aux fonctionnalités espérées, à la diversité des utilisateurs, aux différences de perception et de compréhension ; aspects difficilement résolus par les SIG « classiques ». La complexité thématique des données incite à recourir aux outils de géo-visualisation pour intégrer les fonctionnalités des SIG et proposer une visualisation multimédia animée, interactive, dynamique.

Enfin, dès sa conception, l'outil est évolutif, adaptable à différents environnements géographiques, à des formats informatiques hétérogènes et interopérable. Pour cette raison, le LIG développe son propre environnement informatique suite aux travaux de conception et au développement de SIRN.

B/ De la démarche de travail et résumé des informations existantes

Pour disposer d'un jeu de données assez vaste, la démarche de conceptualisation et réalisation suivante est appliquée aux informations sur la perception du risque sismique dans les logements grenoblois issues de l'enquête Vulneralp :

- 1) Identification et analyse des données liées aux risques sismiques
- 2) Analyse des besoins et spécifications fonctionnelles de l'outil
- 3) Modélisation des données
- 4) Propositions logicielles
- 5) Implémentation

	Nom des données	Format	Source	Attribut ou spatial
Zone d'aléa	Contour	Mid-mif	LGIT	Spatial
Aléa	Fréquence d'accélération		LGIT	Attribut
	Vibration du sol		LGIT	Attribut
Bâtiment classe D	Localisation	Mid-mif	LGIT	Spatial
Vulnérabilité physique	Forme du terrain	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Date de construction	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Nb etages	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Type de toiture	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Type de construction	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Type de bâtiment	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Présence de rocher	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Forme du plan	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Forme d'élévation	Mid-mif	LGIT	Attribut
Vulnérabilité sociale	CP	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Ville	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Quartier	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Type de logement	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Profession	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Experience	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Niveau de connaissance	Mid-mif	LGIT	Attribut
	Comportement	Mid-mif	LGIT	Attribut
Rues	Contour	Mid-mif	LIG, plan des rues	Spatial
Quartier	Contour	Mid-mif	LGIT	Spatial
Ilots iris	Contour	Mid-mif	LIG	Spatial
Réseaux	Contour		BD Topo	Spatial
Trafic grands axes			Ville de Grenoble	Spatial
Barrages	Localisation		CTPBOH (Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques)	Spatial
	Nom	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Hauteur	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Tps d'atteinte	xls	LIG, IRMA	Attribut
Industrie à risque	Localisation		DRIRE (Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement)	Spatial
	Nom	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Commune	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Date création	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Activité	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Produit concerné	xls	LIG, IRMA	Attribut
	Risque	xls	LIG, IRMA	Attribut

Figure 19 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des données existantes et localisation

Ce récapitulatif permet de structurer les données existantes en trois sous-ensembles :

- Aléa
- Vulnérabilité physique
- Vulnérabilité sociale

C/ Analyse des besoins et spécifications de l'outil à réaliser

L'approche UML (standard de modélisation pour la conception et la réalisation de SI) permet d'analyser les besoins et d'identifier les spécificités nécessaires. La consultation des données apparaît d'autant plus complexe que les utilisateurs sont variés : scientifiques issus de disciplines différentes, techniciens ou décideurs. Les schémas suivants représentent les cas d'utilisation de la base et les principales données spatiales à intégrer :

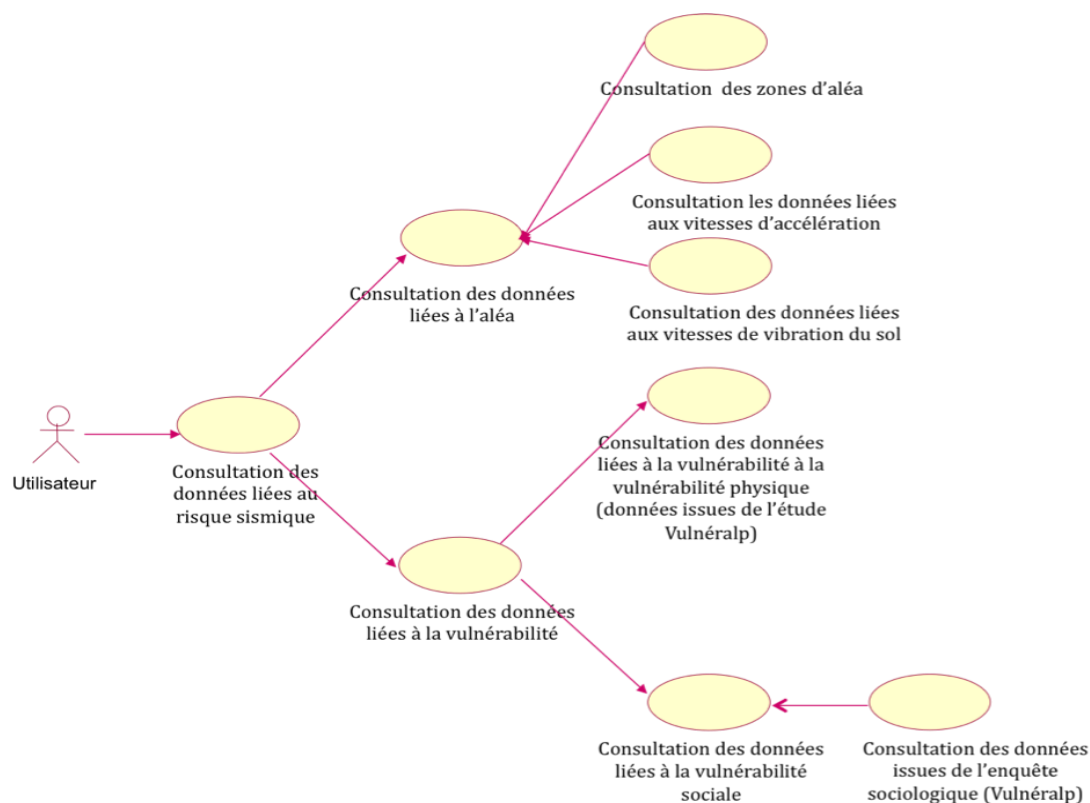


Figure 20 : Cas d'utilisation pour la consultation des données liées au risque sismique

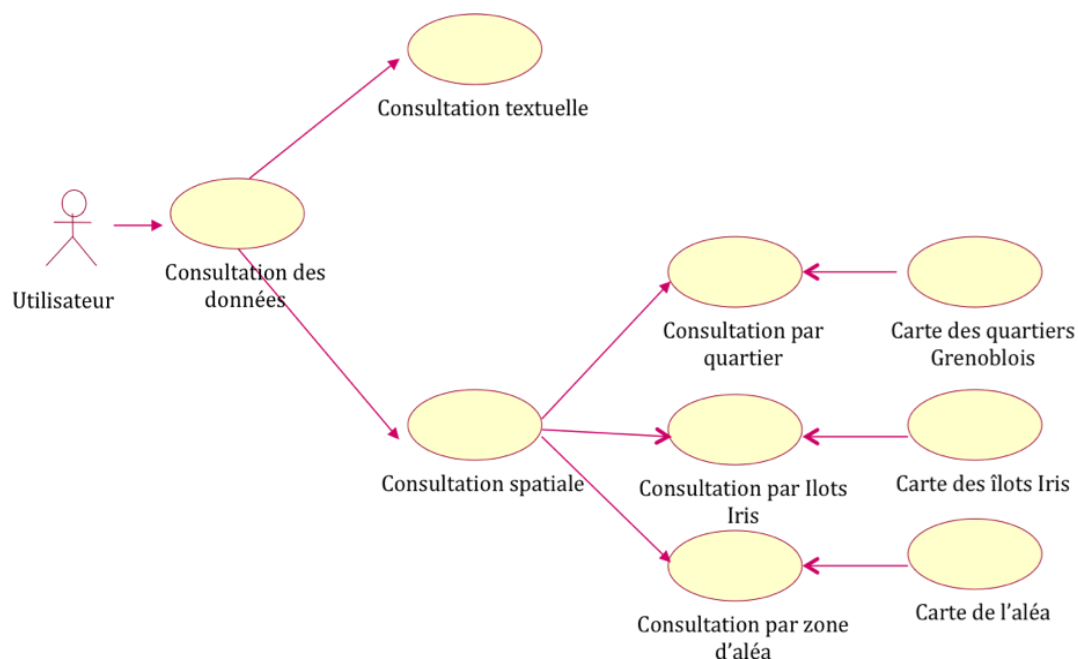


Figure 21 : Cas d'utilisation pour la consultation spatiale

D/ Modélisation des données

Dans un premier temps, une modélisation conceptuelle des données assure une certaine indépendance vis-à-vis des choix logiciels et architecturaux afin de rendre l'outil facilement adaptable. La complexité des données manipulées incite à structurer la modélisation en 4 sous-ensembles :

- Le sous-ensemble ***Spatial*** représente les différents niveaux d'observation géographique et intègre une approche multi-scalaire.
- Le sous-ensemble ***Alea***
- Le sous-ensemble ***Vulnérabilité sociale***
- Le sous-ensemble ***Vulnérabilité physique***

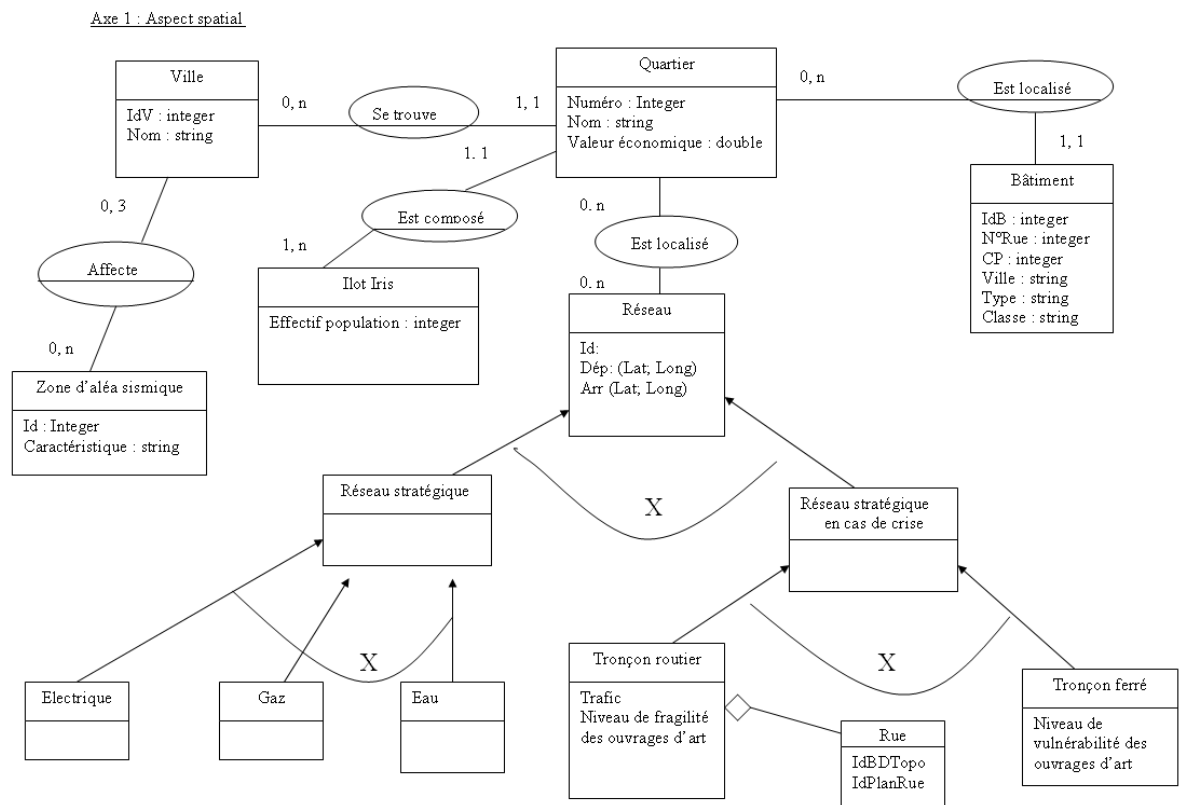
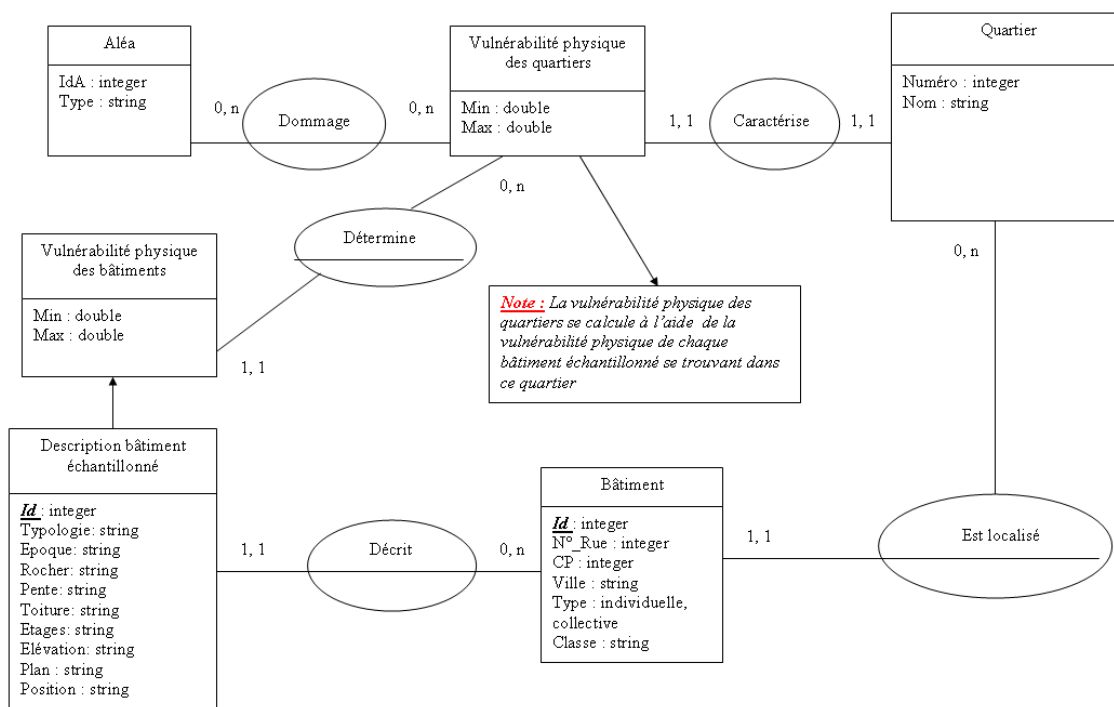


Figure 22 : Modélisation des données spatiales

Axe 3 : Vulnérabilité physique



Axe 2 : Bâtiment

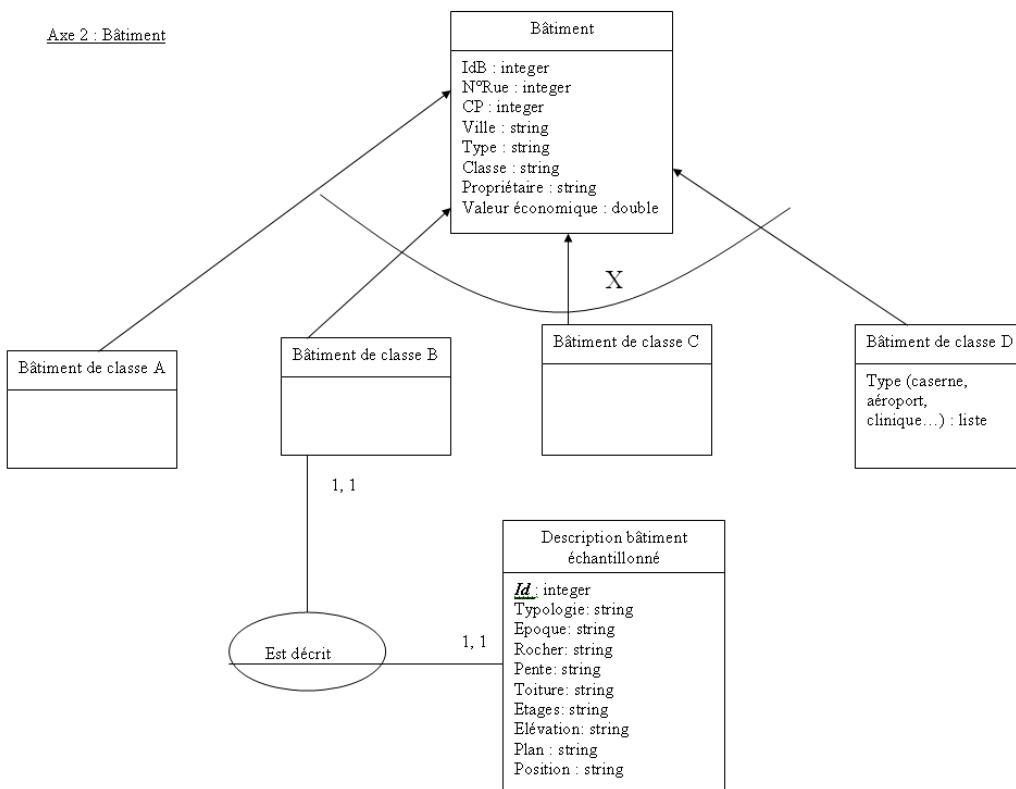


Figure 23 : Modélisation des données liées à la vulnérabilité physique

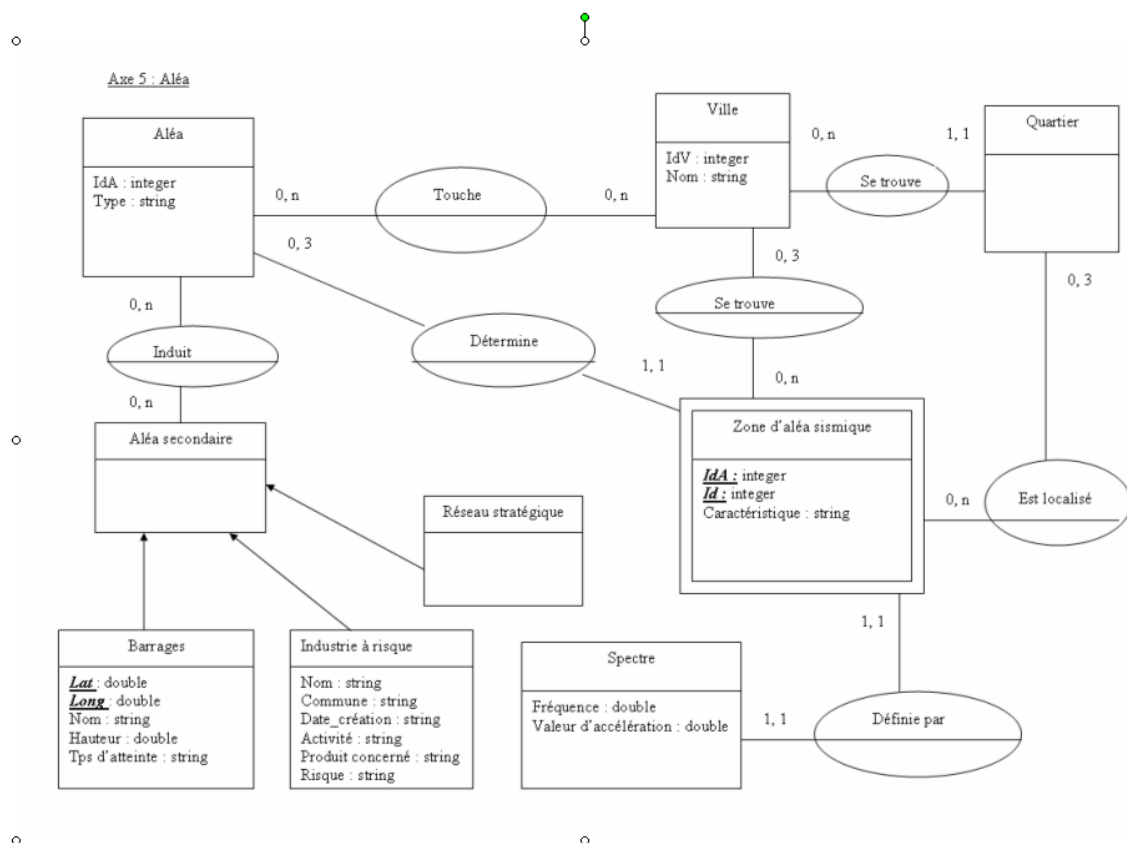


Figure 24 : Modélisation des données liées à l'aléa

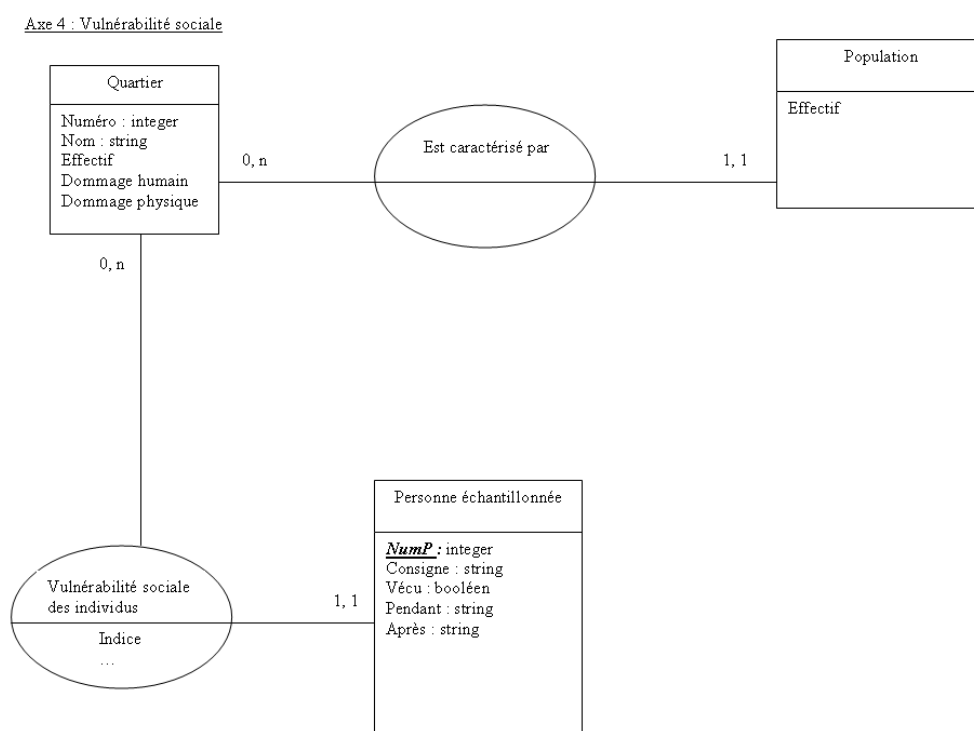


Figure 25 : Modélisation des données liées à la vulnérabilité sociale

E/ Propositions de logiciels

Fortes des expériences de développement de Système d'Information dédié aux Risques Naturels (SIRN), l'équipe STEAMER du LIG développe un environnement informatique spécifique favorable à la reproductibilité et l'adaptation selon les besoins des utilisateurs.

Le développement d'un environnement de conception et de génération de Systèmes d'Information dédiés aux Risques Naturels (SIRN) facilite l'incorporation des données spatiales, attributaires mais aussi temporelles et multimédias. Cet environnement, nommé GENGHIS, permet la création d'un SIRN spécifique en prenant en charge toutes les étapes : la modélisation et l'instanciation des données, la conception et la création d'une interface de géo-visualisation multidimensionnelle. L'interface générée permet :

- La visualisation de données matricielles et vectorielles liées à leur contexte spatial, temporel et thématique.
- La production de cartes interactives et multimédias.
- L'interrogation des données via des requêtes spatiales, thématiques et si nécessaire temporelles.

L'originalité des interfaces générées sous GenGHIS repose sur la formulation visuelle des requêtes et la consultation des résultats à travers plusieurs fenêtres interconnectées et spécifiques à chaque dimension de l'information intégrée dans le SIRN.

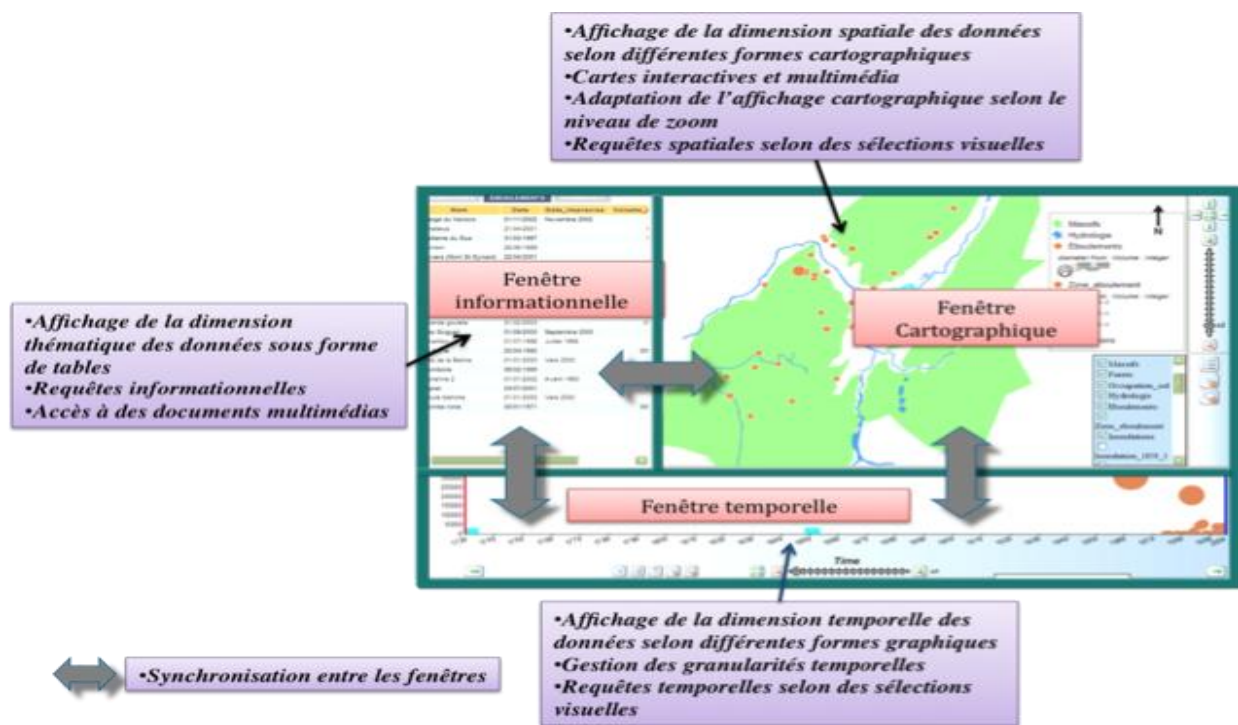


Figure 26 : Interface de visualisation générée par GenGHIS.

Deux modules composent GenGhis :

1. Le module de génération d'applications, chargé de guider l'utilisateur de la conception à la génération d'un SIRN.
2. Le module d'application destiné au « type client léger » qui consulte et visualise les données avec un navigateur Internet.

L'assistant et le générateur reposent sur une application de « type client lourd » développée en Java à l'aide des composants graphiques de SWING. Le SIRN généré repose sur les

technologies JavaScript pour l'interactivité, SVG pour la représentation des formes vectorielles du composant cartographique et le langage HTML pour l'affichage de la fenêtre attributaire.

Un navigateur WEB effectue la visualisation. Les données sont stockées dans une base de connaissances spatio-temporelle (AROM-ST) développée au sein l'équipe STEAMER du LIG.

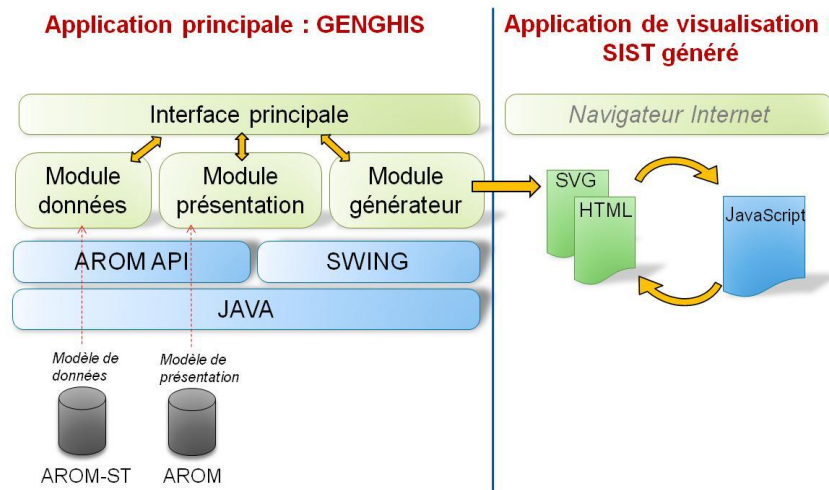


Figure 27 : Architecture de GenGHIS.

GenGHIS est doté d'un assistant (Wizard) qui guide l'utilisateur à travers la conception et la réalisation de son propre système d'information spatio-temporelle, selon trois étapes successives:

1. L'édition et l'instanciation du modèle de données spécifique au domaine d'application choisi.
2. L'édition du modèle de visualisation pour concevoir et réaliser sa propre interface en spécifiant les fenêtres structurant l'interface, définissant les couches géographiques et temporelles liées au modèle de données et spécifiant les styles graphiques associés.
3. La génération du SIS

f/ Implémentation

L'implémentation de l'outil s'est déroulée suivant trois étapes :

- La traduction du modèle conceptuel de données en format AROM-ST
- L'instanciation du modèle de données
- La spécification du modèle de présentation

La figure ci-dessous représente la traduction du modèle conceptuel de données (MCD) en AROM-ST afin de permettre son intégration dans GenGHIS.

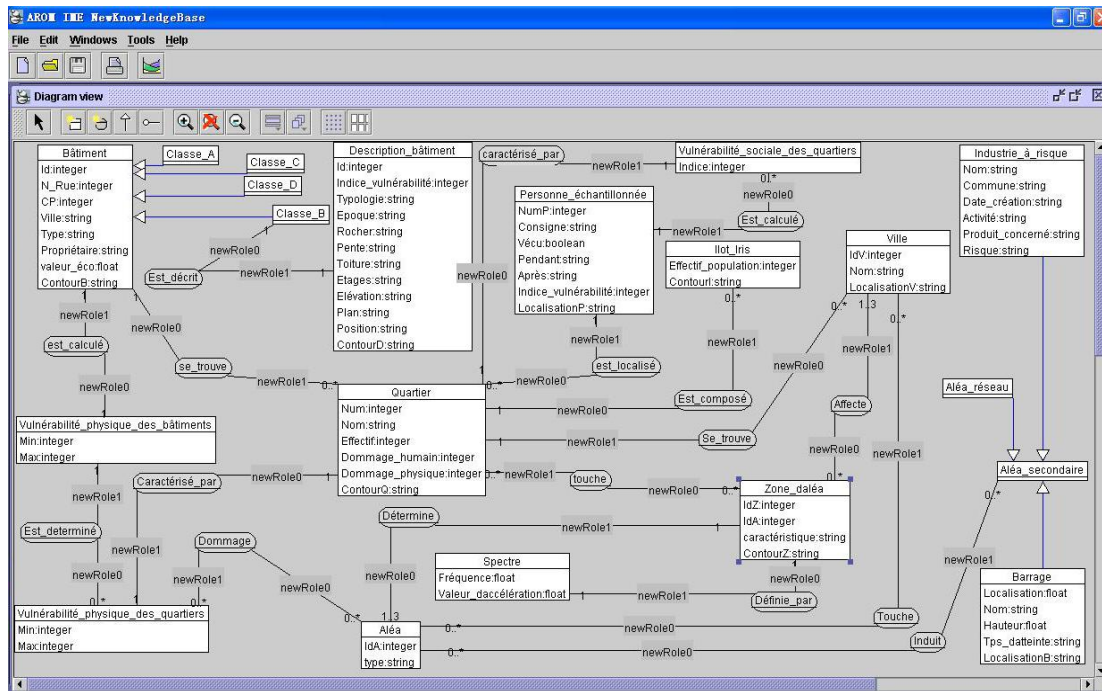


Figure 28 : Modèle de données sous AROM-ST

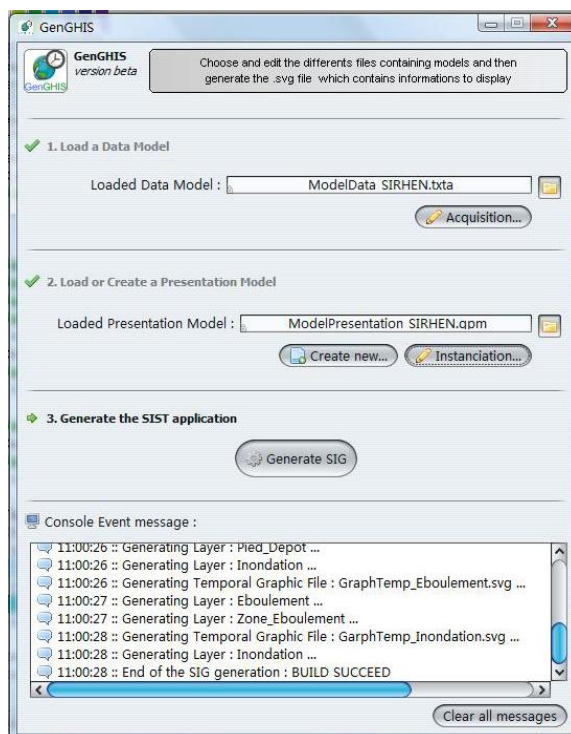


Figure 30 : Interface utilisateur permettant l'intégration des modèles de données et de présentation dans GenGHIS et la génération de l'interface de géo-visualisation dédiée.

L'interface dédiée facilite l'instanciation du modèle directement sous GenGHIS (figure 30).

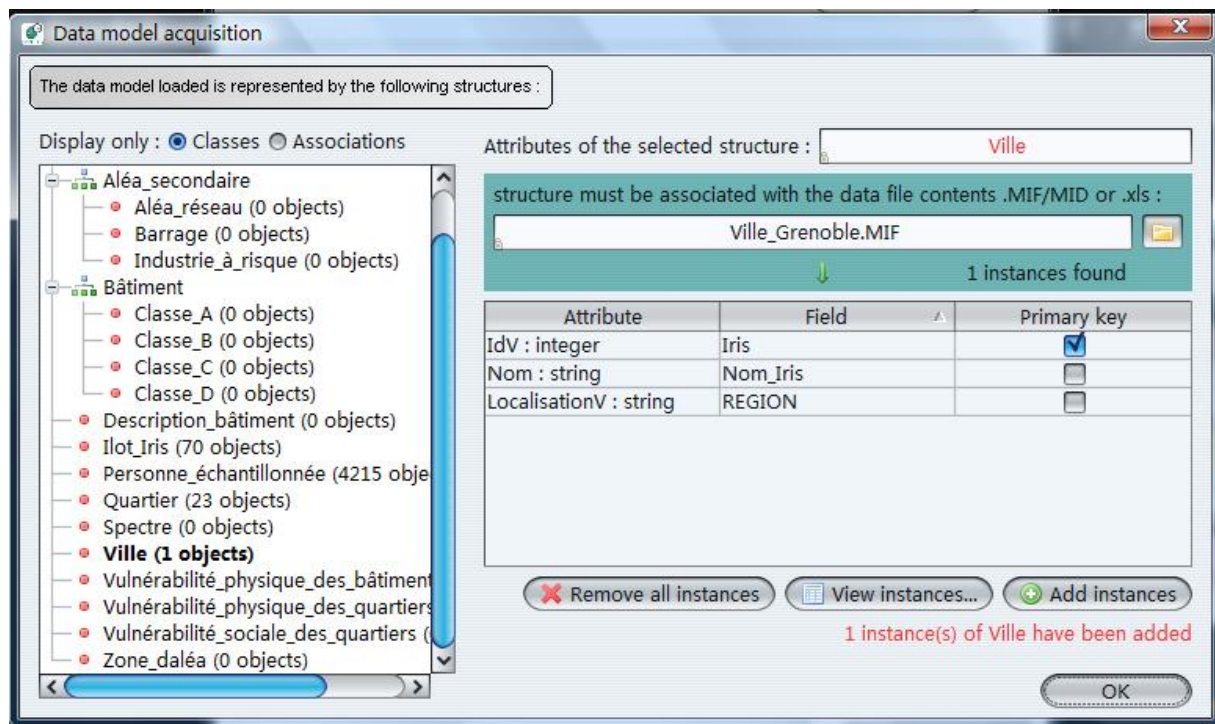


Figure 12 : Interface permettant l'instanciation du modèle de données (Intégration des différents fichiers de données).

G/ Géo-visualisation du risque sismique

La géo-visualisation bénéficie d'une interface composée de deux fenêtres synchronisées : une fenêtre attributaire et une fenêtre spatiale.

- La première affiche sous les tableaux de données attributaires liées à chaque entité spatiale (zones d'aléa, quartiers grenoblois, ilots IRIS). Ces attributs indiquent l'aléa, la vulnérabilité physique ou la vulnérabilité sociale. Chaque ligne de cette fenêtre correspond à une entité spatiale. La sélection s'affiche dans la fenêtre carte. Différents onglets précisent les données à différentes échelles géographiques.
- La seconde fenêtre affiche des cartes d'informations liées à chaque entité spatiale pour naviguer à travers l'information géographique : zoom, plan, affichage des différentes couches géographiques, sélection et indexation spatiale. L'utilisateur peut requérir les informations en cliquant sur la carte. La sélection d'une entité spatiale signale dans la fenêtre attributaire les caractéristiques sismiques locales (aléa, vulnérabilité physique ou sociale).

L'hétérogénéité des informations sismiques conduit à structurer la géo-visualisation en trois sous-ensembles : Alea, vulnérabilité physique et vulnérabilité sociale.

L'utilisateur navigue grâce aux onglets ALEA, VULNÉRABILITÉ PHYSIQUE, VULNÉRABILITÉ SOCIALE. Les figures 31, 32, 33 présentent des exemples des interfaces de l'application générées.

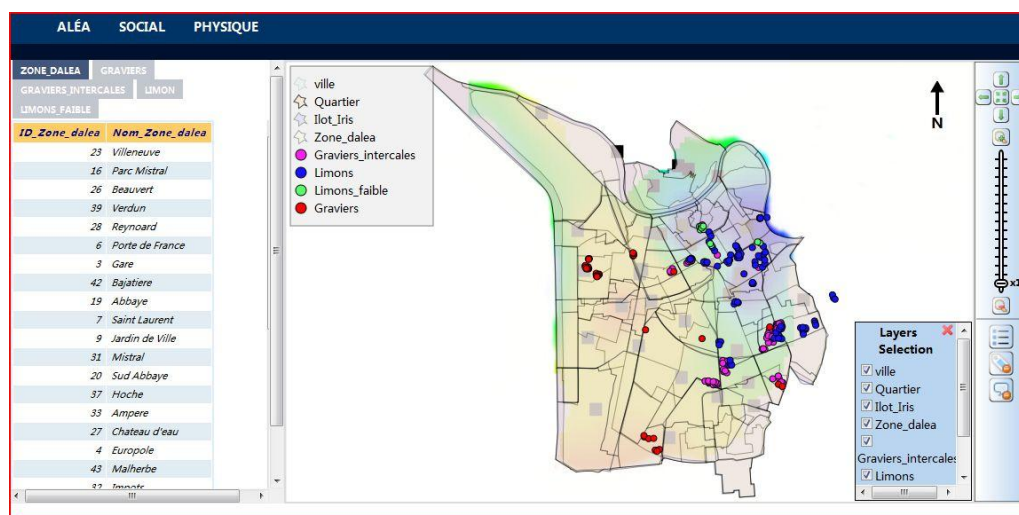


Figure 31 : Géo-visualisation du risque sismique à Grenoble:

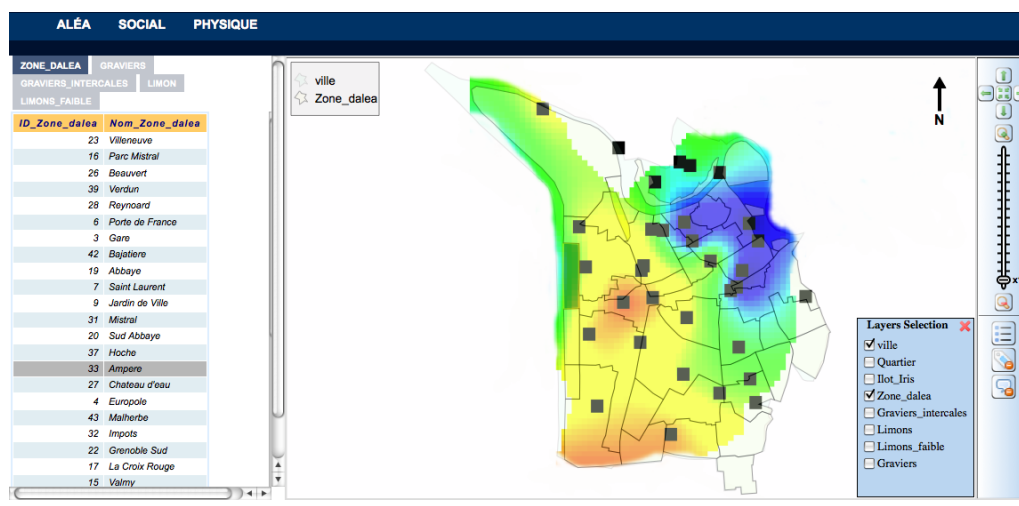


Figure 32 : Géo-visualisation de l'aléa sismique à Grenoble

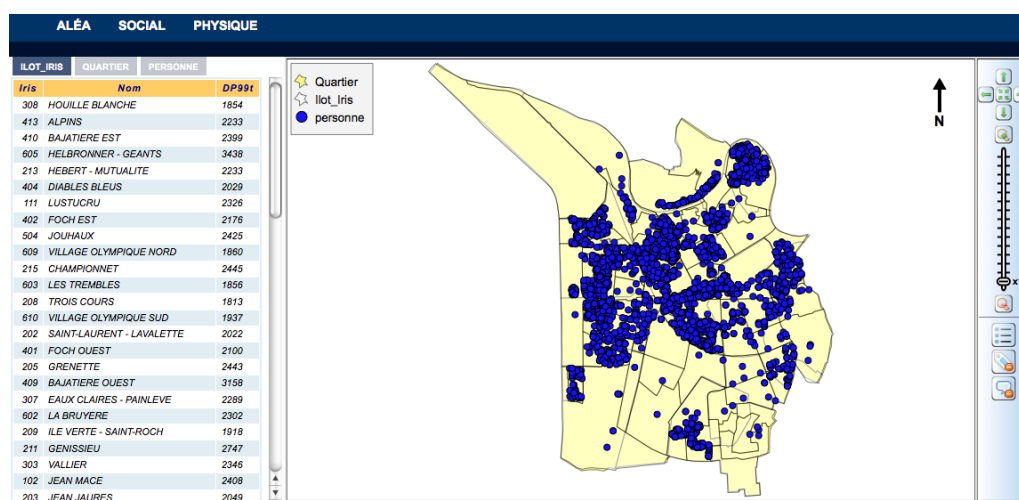


Figure 33 : Géo-visualisation de la vulnérabilité sismique à Grenoble

Ce projet permet de développer un environnement informatique de conception et réalisation de systèmes d'information dédiés aux risques naturels. De plus, il propose une géo-visualisation pour consulter les données sismiques. L'application générée incorpore des données liées à l'aléa, à la vulnérabilité physique et sociale de Grenoble, issues des études des laboratoires partenaires. L'environnement GenGHIS prévoit la diversité des utilisateurs potentiels, grâce à différentes interfaces de consultation.

II/ Le prototype de logiciel : un outil pour décider

Afin de proposer un outil d'aide à la décision en matière de sécurité sismique en fonction des informations scientifiques, il s'agit de cibler la prévention sur l'entretien et le renouvellement de patrimoine urbain bâti. Notre démarche expérimentale s'applique aux bâtiments scolaires municipaux, mais n'a pas été directement validée par les acteurs publics des politiques de prévention. Les informations sur le risque sismique des écoles grenobloises permettent de développer un modèle d'investissement des propriétaires immobiliers dans la sécurité sismique. Ces informations *a posteriori* fondent un modèle abstrait applicable à d'autres cas de propriétaires immobiliers publics ou privés.

L'objectif est de fournir un outil interactif d'aide à la décision publique attentif aux implications techniques et financières. Didactique, il peut aussi aider la population à comprendre les enjeux de prévention du risque. Enfin, l'outil rassemble des informations disponibles : diagnostics sur l'aléa et la vulnérabilité sismiques, limites des connaissances disponibles et marges d'incertitude admises par les expertises.

A/ Le modèle

Les agents

La méthodologie retenue est celle de la modélisation multi-agents. Les unités élémentaires d'analyse spatialisée sont définies par des observations institutionnelles (Cartier et Colbeau-Justin, 2010) et socio-économiques (géographie urbaine). Les bâtiments scolaires sont modélisés comme des agents caractérisés par un ensemble d'attributs : localisation géographique, année de construction, forme architecturale, matériaux utilisés pour la construction, superficie, taille ou effectif, nombre d'étages, indice de vulnérabilité physique, dommage subi en cas de séisme, coûts annuels de fonctionnement et d'investissement consacrés par le maître d'ouvrage. Ces agents n'ont pas d'intentions propres mais une préférence commune : réduire leur vulnérabilité sismique, portée par le décideur public, dont l'objectif est une meilleure sécurité pour minimiser les dommages au moindre coût.

L'échelle micro-géographique (Sanders, 2006) de simulation situe les bâtiments scolaires dans un territoire urbain, doté d'un sol d'intensité sismique variable (EMS 98) et administrativement géré par quartiers correspondants aux six secteurs géographiques (démographie scolaire) grenoblois.

Dans ce modèle, les agents-bâtiments subissent les contraintes vibratoires de leur environnement physique. Néanmoins, la seule interaction directe entre agent est celle de la ventilation budgétaire des investissements publics, décision centralisée par les services municipaux. Une fois construit et localisé dans son environnement, un bâtiment a une certaine durée de vie. Sa destruction est effective, soit au terme de sa durée de vie « normale », soit suite à une décision publique de réaménagement urbain (délocalisation), soit à cause de graves endommagements après un séisme, soit par défaut d'entretien. Ces bâtiments sont donc

des agents vulnérables qui évoluent sous contraintes politico-économiques et géotechniques, dans un territoire urbain. Apparenté à un modèle de micro-simulation individus-centrée (Amblard, 2003), notre modèle observe l'évolution d'une population de bâtiments.

Les contraintes

Malgré les incertitudes qui entourent la connaissance du risque sismique, définir les contraintes géotechniques de nos agents-bâtiments suppose d'échafauder des scénarios sismiques probables. Ceux-ci reposent sur le couplage de l'estimation de l'aléa sismique (partie II, I/) avec la vulnérabilité physique des bâtiments (partie II, II/) afin de composer avec des dommages probables calculés via la formule de l'EMS 98, dont nous avons déjà évoqué les limites. Travailler à partir de dommages probables permet de catégoriser les écoles par classes de vulnérabilité (A, B, C, D).

Si les contraintes géotechniques dégradent le bâti, les opportunités politico-économiques influencent la sécurité des édifices. L'analyse des processus de décision en matière d'investissement dans le parc scolaire municipal (Cartier et Colbeau-Justin, 2010) permet de les définir en les simplifiant. Il nous est en effet impossible d'intégrer la complexité de ce processus, qui implique non seulement des stratégies d'entretien des bâtiments scolaires, mais aussi du développement de l'expertise, des politiques de formation et de sensibilisation des différents acteurs, et plus généralement des différents moyens ayant une incidence sur les comportements et les représentations du risque. De plus, notre analyse est applicable à des villes capables, financièrement et humainement, d'effectuer une évaluation de la vulnérabilité physique des bâtiments et de définir une politique de maintenance et de construction scolaire. Enfin, le modèle général de décision développé se concentre sur les choix budgétaires effectués par une municipalité pour une prévention parasismique de ses bâtiments scolaires. Les moyens budgétaires globaux d'une municipalité sont produits par la conjoncture économique et la politique fiscale. Selon les priorités accordées aux divers domaines d'intervention, des moyens sont mis en oeuvre pour la prévention parasismique des écoles. La mise en oeuvre de ces moyens contribue ensuite à l'évolution de la vulnérabilité des bâtiments scolaires. C'est ce schéma général que reproduit la figure suivante.

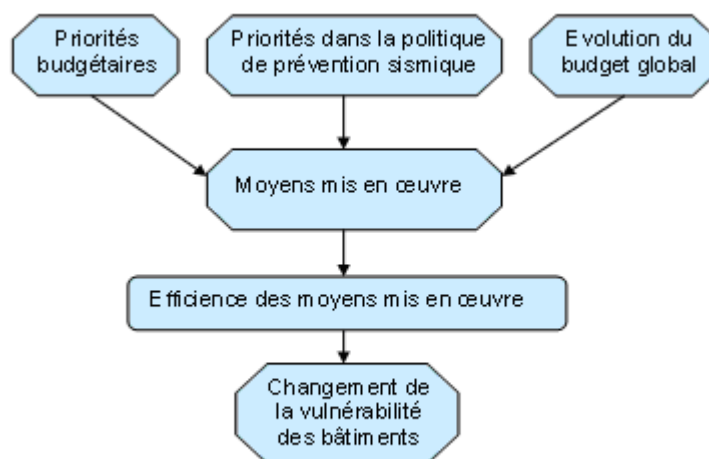


Figure 34 : Schéma général de décision budgétaire des moyens de prévention

La logique générale du modèle consiste, pour les gestionnaires du risque sismique, à fixer une enveloppe budgétaire selon les capacités financières, distribuée ensuite par types de dépenses (notamment de fonctionnement et d'investissement), et par types d'écoles selon leur vulnérabilité et des objectifs de sécurité.

En fonction de ces deux types de contraintes, la dégradation ou l'amélioration de la sécurité des bâtiments scolaires est indiquée par le passage d'une classe de vulnérabilité à l'autre.

Netlogo, un choix technique

Le modèle multi-agents proposé a été implémenté sous la plateforme logicielle Netlogo (Wilensky, 1999), qui présente certains avantages :

- Facile d'accès à un novice pour programmer et développer des modèles simples.
- Libre et gratuite.
- Utilisée par de nombreux chercheurs - modélisateurs (économistes, écologues, géographes...).
- Enrichie par une large communauté d'utilisateurs qui partagent leurs compétences techniques via une liste diffusion en ligne.
- Lien avec des SIG et intégration de données externes.
- Génération facile des applets java stockés sur Internet.
- Utilisation facile du modèle sur Internet.
- Saisie aisée d'un manuel d'aide à l'utilisation.

Ce support logiciel permet donc d'envisager un développement progressif avec les gestionnaires et facilite un large déploiement auprès des différents utilisateurs concernés. Cette plateforme favorise en effet le transfert du modèle d'aide à la décision à d'autres thématiques que les écoles et d'autres régions que la ville de Grenoble moyennant l'acquisition des informations. Toutefois, si Netlogo offre aussi la possibilité de réaliser des interfaces de type SIG, le couplage dynamique de l'outil de géo-visualisation avec le modèle de simulation n'a pas été effectué. L'élaboration de scénarios et l'interprétation des résultats de simulations peuvent toujours s'appuyer sur des analyses spatiales complémentaires.

B/ L'outil de simulation

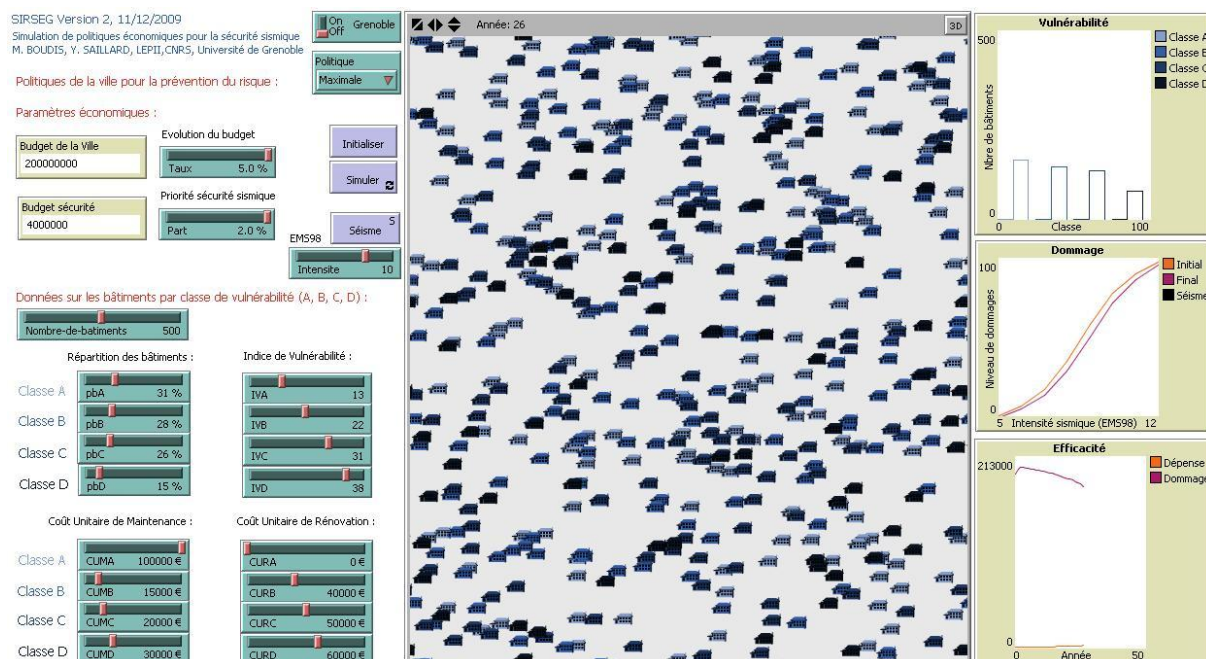


Figure 35 : Interface type du prototype de logiciel de simulation disponible en ligne, version test

Afin de simuler les conséquences de différentes politiques de prévention du risque sismique concernant les bâtiments, le prototype de simulation disponible sur Internet (www.boudism.fr/sirseg) est composé de différents éléments. Le premier type d'élément correspond aux différents paramètres modulables par l'utilisateur :

1. Budget

Dans notre modèle, la conjoncture économique et les politiques fiscales définissent les moyens disponibles pour les politiques urbaines et notamment la sécurité sismique. L'utilisateur doit donc connaître les contours de la fiscalité locale. Deux curseurs permettent de définir le taux d'accroissement du budget de la ville ainsi que celui du budget dédié à la sécurité sismique.

2. Aléa

En cas de séisme, le facteur géophysique peut généralement induire une variation spatiale de l'intensité sismique. Dans cette interface, on suppose provisoirement que l'intensité sismique est un paramètre exogène constant à l'échelle de la ville considérée. Un séisme d'une intensité donnée peut survenir à n'importe quel instant d'une simulation en fonction des réglages de l'utilisateur. Selon l'état du moment des indicateurs de vulnérabilité, il cause alors des dommages plus ou moins importants, qui peuvent aller jusqu'à la destruction complète de bâtiments.

3. Vulnérabilité physique du bâti

Chaque école est identifiée par un indice de vulnérabilité allant de 0 à 45 indiqué par l'utilisateur. Cet indice permet ensuite d'obtenir des classes de vulnérabilité A, B, C, D qui correspondent aux critères de l'EMS 98.

4. Cinq grands types de politiques de prévention

Le choix d'une de ces cinq politiques par l'utilisateur permet de définir comment est réparti le

budget municipal alloué à la sécurité sismique par groupe de bâtiments, groupes définis par le classement des vulnérabilités A, B, C, D. Ces politiques sont :

- a) Egalitaire (traitement égal des bâtiments) : Répartition du budget à égalité entre les bâtiments. En fonction de leur classe de vulnérabilité, les écoles sont rénovées, maintenues en l'état ou dégradées.
- b) Risque acceptable (maintenance) : Maintien des bâtiments en l'état en commençant par investir dans le groupe le plus vulnérable d'abord. Donc, si le budget est insuffisant, il peut y avoir dégradation.
- c) Rénovation Minimale (minimalisme) : Passage à une classe inférieure de vulnérabilité (de D à C, de C à B, de B à A) en commençant par investir dans le groupe le plus vulnérable (D). Donc, si le budget est trop court, il peut y avoir, soit maintien de bâtiments dans leur état, soit dégradation.
- d) Rénovation Maximale (volontarisme) : Réduction de la vulnérabilité au maximum en commençant par investir dans le groupe le plus vulnérable. Donc, si le budget est trop court, il peut y avoir, soit maintien de bâtiments dans leur état, soit dégradation.
- e) Rénovation Sélective (favoritisme) : Réduction puis maintien de la vulnérabilité en commençant par investir dans le groupe le moins vulnérable. Donc, si le budget est trop court, il peut y avoir dégradation.

L'utilisateur peut configurer chaque paramètre d'entrée du modèle puis initialiser l'interface afin de lancer la simulation. Cette dernière peut être arrêtée par l'utilisateur à n'importe quel moment (année budgétaire). Par ailleurs, on peut déclencher à tout instant un séisme et constater les dommages en fonction du paramétrage de l'utilisateur. Le processus de simulation continue tant que la vulnérabilité de bâtiments peut être réduite, s'interrompt éventuellement en cas de séisme simulé, ou lorsque le budget sécurité de la ville devient insuffisant pour maintenir les écoles les plus vulnérables en leur état ou si la totalité des bâtiments sont arrivés en classe A.

À travers cet outil, on peut simuler différents scénarios de politiques de prévention du risque sismique et évaluer leurs conséquences sur la réduction de la vulnérabilité des bâtiments et les dommages subis. En effet, le second type d'élément du modèle de simulation correspond aux différentes catégories de résultats post-simulation :

- Un monde peuplé d'agents-bâtiments répartis en classes de vulnérabilité : ces classes sont schématisées par des grisés allant du plus clair (classe la moins vulnérable), au plus sombre (classe la plus vulnérable). Lorsqu'un bâtiment change de classe de vulnérabilité au cours d'une simulation, son grisé change sur l'interface de simulation.
- Un histogramme de la vulnérabilité montre l'évolution de la répartition des bâtiments dans les quatre classes de vulnérabilité en fonction d'un code couleur.
- La courbe des dommages compare l'évolution du niveau pondéré des dommages moyens en fonction de l'intensité sismique.
- Le graphique d'efficacité mesure l'efficacité de la dépense publique par rapport à la réduction du niveau global des dommages.

C/ L'interface grenobloise



Figure 36 : Environnement spatial de Grenoble représenté par le monde NetLogo

Sur cette interface, l'environnement spatial du modèle est représenté par le monde NetLogo sur un fond de carte de la ville de Grenoble. Dans ces simulations, on part d'une répartition initiale des écoles par classe de vulnérabilité estimée de façon heuristique à partir de l'étude VULNERALP. Les valeurs initiales des paramètres économiques sont estimées de façon empirique à partir des données publiées sur le budget de la ville de Grenoble pendant les cinq dernières années. On considère, par hypothèse, que les coûts de maintenance et de rénovation d'une école sont proportionnels à son niveau de vulnérabilité. Ces paramètres restent constants pour l'ensemble des simulations effectuées. Les scénarios sont engendrés en faisant varier le taux d'évolution du budget de la ville (stabilisation, restriction, progression) et la priorité (faible, moyenne, forte) que la ville donne à la sécurité sismique en pourcentage de son budget annuel. On peut alors qualifier les différents scénarios en termes de types de politiques de prévention. Comparer les conséquences de différentes simulations permet à l'utilisateur d'évaluer le risque encouru en fonction d'alternatives de politique de sécurité sismique qui prennent en compte une certaine croissance économique associée à un séisme d'une certaine intensité. Ces deux facteurs contraignants ont donc une fonction de "révélation" des risques admis.

E/ Limites de conception et précaution d'usage

Un tel modèle de simulation offre de nombreuses possibilités pour une meilleure compréhension des modes de décision et de leurs conséquences. Un certain nombre de limites de cet outil doivent cependant être indiquées.

Une extension de la base de données intégrée au modèle est tout d'abord nécessaire afin d'inclure davantage de critères dans le choix des bâtiments nécessitant un renforcement : démographie scolaire, localisation géographique, perception locale du risque dans le quartier. Après des tests lors des enquêtes Antillalpes (cartes mentales, localisation des vulnérabilités, perception des risques locaux) (Cartier et Colbeau-Justin, 2010), ces critères sont en cours d'élaboration dans le projet MOVISS (Méthodes et Outils pour l'évaluation de la Vulnérabilité

Sociale aux Séismes ; 2008-2009, projet cofinancé par le Conseil Général de l'Isère via le Pôle Grenoblois des Risques Naturels et le pôle Terre Univers Environnement et Société de l'Université Joseph Fourier ; coord. Elise Beck).

De plus, l'outil de simulation actuel privilégie une approche budgétaire alors que d'autres éléments du choix public sont à considérer. La vulnérabilité des écoles est réduite par des politiques globales de mitigation du risque, mais sans négociation fine du niveau de sécurité envisageable pour chaque école. La précision des diagnostics, des objectifs de sécurité et des budgets, permettrait d'intégrer davantage les arguments de décision pour renforcer les écoles. Les acteurs de la prévention du risque pourraient alors être considérés comme des agents supplémentaires.

L'intégration de données « réelles » dans ce modèle d'aide à la décision constitue aussi une limite au projet. Certaines informations, comme les coûts de renforcement pour passer d'une classe de vulnérabilité à l'autre, sont encore issues de moyennes ou tendances générales. Il convient d'alimenter l'outil avec des données plus précises et réalistes pour adapter le modèle à d'autres régions, où les « tarifs » de construction varient, où les normes parasismiques sont plus drastiques (zone II du zonage sismique français).

Un autre registre d'approfondissement concerne la spatialisation. L'intensité sismique exogène doit être décrite en fonction des caractéristiques géologiques du sol de la ville. L'ensemble des paramètres caractéristiques de l'espace doit ensuite être traité de façon à permettre une adaptation de l'outil à d'autres territoires géographiques et à d'autres types de bâtiments.

Pour gagner en cohérence, il est tout aussi nécessaire de revenir sur des points de blocages volontairement ignorés dans cet effort interdisciplinaire. Ainsi, l'agent peut revêtir plusieurs costumes selon les interlocuteurs : propriétaire, bâtiment, école, facteurs de risque sismique, informations ... De même, l'entité spatiale de référence peut être le site sismique, le site urbain, la municipalité, le quartier urbain, la parcelle, l'ensemble d'édifices, alors que seule la parcelle cadastrale permet d'articuler décision sur l'ouvrage et contraintes géologiques ou financières spécifiques. Facilitée par le choix d'un travail sous NetLogo, la perspective d'un couplage entre plateforme d'aide à la décision et bases de données géo-visualisables reste un objectif d'avenir.

Difficulté inhérente aux projets interdisciplinaires, le dialogue entre communautés scientifiques est nécessaire à l'étude globale du risque sismique, malgré les difficultés de compréhension académiques. Science d'interface, la géographie a facilité ces dialogues par une vision globale du système. Ceci permet d'identifier les limites du modèle d'aide à la décision selon les logiques des différentes disciplines (géologie, sismologie, ingénierie du bâtiment, sociologie, informatique, économie).

Conclusions

Statut des informations

Les difficultés d'accès et d'utilisation des informations rencontrées au cours du programme SIRSEG représentent une occasion rare d'explication. Pour offrir des diagnostics sismiques urbains aux différents décideurs, les techniciens doivent disposer d'observations primaires et fournir des analyses compatibles. La sécurité parasismique urbaine dépend de la généralisation de protocoles de collectes, de traitement et de partage des informations géotechniques, architecturales et financières.

Informations géotechniques

Grâce à une transgression interdisciplinaire, le programme SIRSEG permet une lecture géophysique des informations géologiques. Le croisement de compétences de plus en plus séparées académiquement permet de valoriser une collection personnelle de données géotechniques (Collection de forages géologiques et géotechniques par Gilles Ménard). Les tests de classification, d'extraction et d'usage de ces données permettent de vérifier une corrélation entre composition géologique et propagation des ondes sismiques, voire de relancer les investigations de géophysiques pour analyser les spécificités identifiées. Reste que cette collection personnelle est exceptionnelle. Elle réunit en effet des informations d'ordinaire dispersées et souvent égarées, les résultats de sondage, effectués par des bureaux d'études géotechniques pour les maîtres d'ouvrages propriétaires fonciers. Indispensables au paramétrage des fondations des édifices, ces informations privées sont ensuite souvent abandonnées. Seuls les sondages de plus de trente mètres de profondeur doivent être remis au BRGM dans un délai de dix ans afin d'affiner la carte géologique de la France. Pour les sondages ordinaires, aucun protocole de collecte n'existe. Or, réunies, ces informations facilitent une lecture géophysique simplifiée utile aux éventuels microzonages et PPRS à l'échelle du site urbain ou municipal.

Les tests développés encouragent à imiter le protocole de collecte développé en Italie par l'ARPA du Piémont, agence régionale chargée d'établir les planifications urbaines, les cartes d'aléa naturel, les permis de lotir et de construire (Cartier et Peltier, 2009). De facto, le service d'urbanisme de l'agglomération du Havre tente déjà de collecter les informations géologiques pour délivrer les permis de construire (Gralepois, 2008) sans cependant disposer d'une assise juridique confirmée.

Le protocole de collecte et d'usage des informations géologiques peut préciser plusieurs degrés de partage :

- Collecte des informations géotechniques des projets des propriétaires publics (municipalité, conseil général, grands opérateurs publics)
- Convention de transfert des informations géotechniques des grands équipements privés
- Collecte municipale ou d'agglomération ou départementale des informations parcellaires privées
- Indexation individuelle au cadastre ou aux actes notariés (information sur les risques majeurs).

Informations diagnostics vulnérabilité sismique architecturale

Les informations sur l'état du bâti existant relèvent des propriétaires publics ou privés. Néanmoins de multiples dispositifs de contrôle public existent déjà en routine à travers les codes de l'urbanisme : permis de construire, vérifications de chantiers, certificats de

conformités, contrôles techniques des matériaux, contrôle de conformité aux prescriptions de sécurité, obligations vicinales, arrêtés de destruction des ruines menaçantes, etc. Si le principe général est la préservation de la sécurité urbaine aux dépens des propriétaires, peu d'obligations existent pour limiter l'aggravation de la vétusté des édifices. De plus, rare pour les nouvelles constructions, le contrôle de la sécurité parasismique reste extrêmement difficile pour le bâti existant. Le développement d'indices de vulnérabilité sismique offre une caractérisation approximative et statistique des différents tissus urbains. Leur usage ciblé sur un ensemble de bâtiments offre des possibilités de première hiérarchisation des besoins et des priorités d'intervention. Néanmoins, l'accord du maître d'ouvrage reste un préalable pour accéder aux informations (plans, dates de construction, matériaux, feuilles de calcul) et aux édifices (inspections superficielles, carottages, mesures, auscultation). Même pour des ouvrages publics comme les bâtiments scolaires municipaux, la collecte d'informations nécessite la rédaction de conventions, le partage des résultats, des clauses de confidentialité. Les craintes exagérées des représentants des maîtres d'ouvrages entravent une vision réaliste des situations de vulnérabilité, offrant libre champ aux pires rumeurs. Pour autant, usagers, parents d'élèves, contribuables et citoyens peuvent requérir le libre accès aux informations publiques auprès du tribunal administratif ... d'autant plus que les exemples helvètes et canadiens démontrent la maturité du public en situation d'information générale sur le diagnostic sismique des écoles (Cartier et Colbeau-Justin, 2010). Le défi reste de permettre une caractérisation sismique simplifiée des bâtiments grâce à des méthodes de pré-diagnostics rapides (GEOTER, 2009). Ensuite, la publication des informations par les maîtres d'ouvrage nécessite de développer une communication sismique fondée sur la confiance de la population. À la hiérarchie des besoins doit répondre une gamme de solutions techniques et organisationnelles, une clarté des critères, une explication des calendriers. La persistance de réflexes administratifs de cloisonnement de l'information témoigne d'une méfiance technocratique persistante et des difficultés à responsabiliser l'ensemble des acteurs (usagers, propriétaires, professionnels, instances publiques). Les efforts accomplis à l'occasion du Plan Séisme permettent de trouver des pistes de partage de l'information à partir des expériences antillaises.

Informations financières

Le partage des informations financières reste soumis à des contraintes techniques et professionnelles. Inscrits dans des relations de concurrence très vives, les professionnels du bâtiment rechignent à communiquer la valeur financière des matériaux et opérations. Les assureurs ne disposent que rarement de la valeur spécifique des biens assurés et jamais de coûts sismiques types. Les maîtres d'ouvrages publics (municipalité, conseil général) peinent à rendre compte du détail des investissements dans le patrimoine architectural. En effet, les services techniques ont une vision très parcellaire des coûts, alors que les élus raisonnent en investissements globaux annuels par domaine d'activité. Les services financiers enregistrent les dépenses, mais souffrent des changements fréquents de nomenclature comptable qui entravent une lecture des évolutions budgétaires. Travail de bénédictin, reconstituer l'information budgétaire détaillée sur plusieurs années et plusieurs instances publiques suppose une volonté constante appuyée par une autorité affirmée. Reste que faute de renforcements parasismiques effectifs, l'analyse devrait composer avec des dépenses d'entretien portant sur les éléments essentiels à la solidité des ouvrages (murs porteurs, toitures). Les études développées aux Antilles (GEOTER, 2009) sur la totalité des bâtiments scolaires municipaux constituent une première piste d'évaluation des besoins sans cependant préciser le détail de certaines estimations des coûts de travaux. Ces diverses lacunes encouragent à travailler par hypothèses forfaitaires tant qu'aucune analyse coût / avantage détaillée ne sera disponible.

Réécrire la grammaire parasismique

La sécurité constitue une clef de voûte entre activités en interdépendance. La coordination dans la maîtrise de la vulnérabilité sismique des bâtiments nécessite une clarification rigoureuse des fonctions et des responsabilités. Le partage des informations suppose l'adoption de dénominateurs communs entre activités en interdépendance pour caractériser l'aléa, la vulnérabilité, les objectifs de sécurité, les moyens mobilisables et les responsabilités.

Toujours très approximative, la grammaire parasismique comporte des ambiguïtés persistantes. Fondement de toutes les méthodes européennes de diagnostic statistique, l'usage des EMS 98 recèle des confusions entre caractérisation de l'aléa supposé et typologie des vulnérabilités architecturales. Pour définir des classes de vulnérabilité, l'intensité sismique est estimée à partir de l'intensité envisageable des dommages grâce à une indexation dont la pertinence est réservée à quelques initiés. Or, l'aléa sismique peut maintenant être physiquement mesuré ou estimé avec des métriques spécifiques (magnitude, accélérométrie, énergie), de même pour la mesure de la vulnérabilité selon les fréquences des bâtiments. De plus, à titre d'exemple, le terme de classes de vulnérabilité (A B C D) provoque une confusion avérée avec les classes parasismiques officielles françaises (A B C D), qui sont des catégories de bâtiment auxquelles s'appliquent des degrés différents de protection. Difficiles entre spécialistes, les interprétations par des décideurs novices peuvent provoquer des incompréhensions dangereuses. Revenir à des définitions architecturales simples pour exprimer la ductilité, l'effet des renforcements, les coûts techniques paraît nécessaire pour stabiliser l'information dans un contexte où l'analyse probabiliste du risque sismique provoque de nouvelles incertitudes pour les acteurs concernés. Outre des efforts de définition des termes et des syntaxes, le partage intégral des critères de hiérarchisation des besoins et priorités nécessite d'établir des unités de compte.

Dans le domaine parasismique, beaucoup de « secrets de fabrication » tiennent de l'initiation professionnelle tacite, accomplie au cours d'un parcours rituel où l'expérience des commissions confidentielles remplace progressivement les apprentissages de terrain. En dehors des interactions académiques, associatives ou administratives entre quelques spécialistes, la grammaire parasismique reste très difficile à comprendre pour le novice. Peu d'acteurs peuvent investir du temps dans la compréhension d'éléments dispersés dans des domaines académiques quasi-cloisonnés (sismologie, géologie, physique, génie civil, architecture, informatique), les nombreuses revues scientifiques de chaque domaine, beaucoup de littérature grise (actes de colloque, programmes de recherches, rapports administratifs, publications professionnelles, sociétés savantes) et surtout des échanges très peu tracés au sein de commissions d'experts confidentielles (AFPS). La difficulté à comprendre les éléments est renforcée par le flou des articulations entre domaines, souvent laissées à l'appréciation personnelle d'experts ingénieurs engagés dans des collaborations où l'ajustement des arguments s'opère lors d'exposés oraux pressés. Faute d'articulation claire, les habitudes de travail amplifient des approximations dommageables. Les flous dans les définitions et les calculs occultent souvent les tensions entre intérêts latents des industriels de l'acier ou du ciment, entre industriels de l'énergie et industriels de la construction, entre pouvoirs publics et assureurs. Les démonstrations sont souvent aussi provisoires, labiles et évolutives que leurs supports powerpoint ... Il est d'ailleurs significatif de constater le faible investissement scientifique stable dans le domaine en France : peu d'universitaires, quasiment pas de chercheurs CNRS, quelques ingénieurs publics ou privés passionnés. Beaucoup de discours, extrêmement peu d'observations scientifiques mesurées représentatives des besoins nationaux. Seule la participation permet de comprendre l'étendue des ignorances, incertitudes, extrapolations qui font du génie parasismique une science plus approximative que certifiée.

Fonder des bâtiments et des décisions suppose une tolérance à la relativité qui s'harmonise mal avec la rigueur des organisations sociales, où les protocoles techniques, contrats professionnels, jugements civils et pénaux, budgets publics sont toujours plus clarifiés.

Les rapprochements permis à l'occasion de SIRSEG montrent combien l'articulation des informations complémentaires offre une perspective de gestion plus intégrale du risque sismique. A ce titre, les décalages éprouvés éclairent les limites des modèles particuliers et les difficultés à transférer les résultats d'un domaine à l'autre, entre sciences, mais aussi entre gestionnaires de la sécurité. En permettant l'identification de certains nœuds, SIRSEG souligne le besoin de décrypter la logique des éléments disponibles et les possibilités des progresser :

- Amélioration de l'estimation locale d'amplification sismique
- Traduction des accélérations sismiques en indices de vulnérabilité
- Corrélations entre informations géotechniques et propagation sismique
- Diagnostic parasismique architectural simplifié
- Critères d'évaluation de vulnérabilité d'un patrimoine bâti
- Variation de vulnérabilité indexée aux investissements
- Effet sur la sécurité à terme selon les modalités d'investissement
- Articulation et communication des informations
- Statut et protocole d'utilisation des informations publiques et privées
- Délimitation des responsabilités entre acteurs privés et publics
- Développement d'une réduction de la vulnérabilité parasismique à échelle urbaine
- Gammes de solutions techniques et administratives
- Compatibilités réglementaires et normatives

Modalités de coordination entre acteurs pour atteindre et maintenir la sécurité.

Logique de calcul intégral

La difficulté pour harmoniser les différentes parties de l'équation « intégrale » envisagée correspond à une limite fondamentale de la compatibilité des métriques utilisées. Quelle que soit la manière de mesurer les propagations d'onde sismique, l'échelle principalement utilisée, la magnitude, est logarithmique. À l'inverse, le calcul économique repose sur une logique arithmétique. La traduction des effets sismiques en logique d'investissement reste donc sans dénominateur commun. D'autant plus que les indexes de vulnérabilité des bâtiments ne correspondent pas à une logique mathématique mais à une logique de score : les estimations obtenus par les principales méthodes de diagnostic statistiques en usage sont destinées à établir un classement, sans toutefois permettre une intégration fonctionnelle. L'ajout d'une approche probabiliste pour calculer la récurrence sismique tend à augmenter la confusion de l'équation universelle de la sécurité sismique. Enfin celle-ci correspond à une situation d'économie des coûts de transaction à deux inconnues : d'une part l'aléa sismique, d'autre part les vices cachés des bâtiments existants.

Expliquer les principes pour appliquer les normes

Évidemment souhaitable, l'amélioration de la sécurité parasismique des écoles ne peut être opérée d'un coup. Elle nécessite une programmation budgétaire et une clarification des objectifs de sécurité. Souvent insistante sur la caractérisation de la vulnérabilité, la recherche peine à offrir une gamme de solutions graduelles. De plus, les progrès techniques, comme le développement des isolateurs parasismiques, supposent un aggiornamento des prescriptions réglementaires. Actuellement la multiplication des référentiels techniques à travers des prescriptions spécifiques inscrites dans les cahiers des charges des maîtres d'ouvrages

multiplient les ambiguïtés techniques et juridiques. Préalable à la définition des objectifs de sécurité et des budgets nécessaires, la clarification des responsabilités appelle une réflexion politique sur les principes de solidarité face au risque. Fixer une doctrine de sécurité publique dépasse les partenaires engagés dans l'amélioration locale de la situation. L'organisation d'une conférence de consensus nécessite une amélioration constante de la traçabilité des sources documentaires et de l'écriture des modalités de calcul.

BIBLIOGRAPHIE

Amblard F., 2003.

Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées : Application à des modèles de dynamiques d'opinions, Thèse de doctorat en Informatique de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Ayadi L., 2009.

Diagnostic de la problématique d'estimation des coûts générés par la mise aux normes parasismiques du bâti neuf et existant, Mémoire de Master2 en économie, UPMF.

Bettig B., Bard P.-Y., Sherbaum F., Riepl J., Cotton F., Cornou C., Hatzfeld D., 2001.
"Analysis of dense array measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC). Application to Grenoble area" in *Boletín de Geofísica Teoría e Aplicada*, 42(3-4): 281-304.

Bruchez P., 2004

Étude parasismique d'une école, Mémoire de Master1, École polytechnique fédérale, Lausanne, Suisse.

Cartier S., Chatelain, J.L., Guillier, B., 2006.

« Le microzonage sismique » in *Vies de Villes*, 4 : 62-63

Cartier S., 2007.

« Microzonages sismiques dans les vallées alpines et déclinaison locale des règles d'urbanisme » in *Revue de Géographie Alpine*, 95(2) : 51-72.

Cartier S., Peltier A., 2009.

« La gestion spatiale des risques naturels en France, en Italie et en Suisse, Analyse comparée des risques gravitaires et sismiques », in *Colloque Risques Naturels en Méditerranée Occidentale*, Carcassonne.

Cartier, S., Colbeau-Justin, L., 2010.

La sécurité scolaire à l'épreuve du risque sismique, fractures de coordination et solidarité de responsabilité, Documentation Française, Paris.

Causse M., Chaljub E., Cotton F., Cornou C., Bard P.-Y., 2009.

"New Approach for coupling k-2 and Empirical Green's Functions : Application to the blind prediction of broadband ground-motion in the Grenoble basin" in *Geophysical Journal International*, 179(3) : 1627-1644.

Cotton F., 2006.

Rapport Sismo-DT, programme de recherche RDT, MEDD.

Chaljub E., Cornou, C., Verbeke J., Converset J., Voisin C., Stehly L., Grasso J.-R., Guéguen P., Roussel S., Roux P., Hatton S., Campillo M., 2006.

"Measurement and variability study of site effects in the 3D glacial valley of Grenoble, French Alps." in *International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Grenoble, Bard, P.Y., Chaljub, E., Cornou, C., Cotton F., Guéguen P. (eds), LCPC Editions, paper 154.

Chaljub E., Cornou C., Bard P.-Y., 2009.

“Numerical benchmark of 3D ground motion simulation in the valley of Grenoble, French Alps” in *International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Bard P.-Y., Chaljub E., Cornou C., Cotton F., Guéguen P. (eds), LCPC Editions, paper SB1.

Cornou C., S. Tsuno E., Chaljub L., 2008.

“Real and synthetic ambient noise recordings in the Grenoble basin: reliability of the 3D numerical model” in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, Chine, paper 03-03-0070.

Cornou C., P.-Y. Bard, M. Dietrich, 2003.

“Contribution of dense array analysis to basin-edge-induced waves identification and quantification. Application to Grenoble basin, French Alps (II)” in *Bull Seism. Soc. Am.*, 93(6): 2624-2648.

Cornou C., 2002.

Traitement d'antenne et imagerie sismique dans l'agglomération grenobloise (Alpes françaises) : implications pour les effets de site, Thèse de doctorat en géophysique, UJF, Grenoble.

Dietrich M., Cornou C., Ménard G., Lemeille F., Guyoton F., Guiguet R., 2009.

“Seismic profiling and borehole measurements in the Isère valley near Grenoble” in *France: 1- Data acquisition and processing, Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, P.-Y. Bard, E. Chaljub, C. Cornou, F. Cotton, P. Guéguen Eds, Grenoble, France, 30 August - 1 September 2006.

Dietrich M., Ménard G., Guyoton F., Gallego G., 2003.

Imagerie structurale de haute résolution du remplissage alluvial de la vallée de l'Isère : vibrosismique en ondes P, SV et SH avec estimation des vitesses de propagation des ondes. Rapport de recherche, Pôle Grenoblois des Risques Naturels/Conseil Général de l'Isère.

Dietrich M. Guichet R., Chaffard V., 1999.

Imagerie sismique des remplissages alluviaux dans la région de Grenoble : Exploration préparatoire au forage profond de l'IPSN et utilisation des ondes converties PS. Rapport de recherche, Pôle Grenoblois des Risques Naturels/Conseil Général de l'Isère.

Duvernay B., 2006.

Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, concept et directives pour l'étape 2, 2^e édition, Office fédérale de l'eau et de la géologie, Ittigen, Suisse.

Duvernay B., 2005

Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants, concept et directives pour l'étape 1, 2^e édition, Office fédérale de l'eau et de la géologie, Bienne, Suisse.

EMS 98, 2001,

“L'Échelle Macrosismique Européenne 1998” in *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Conseil de l'Europe, 19.

Federal Emergency Management Agency, 1994.

Typical costs for seismic rehabilitation of existing buildings, volume 1, 2^e édition, USA.

Foray et al. 2005.

Comportement sismique des sédiments de la cuvette grenobloise. Rapport de recherche, Pôle Grenoblois des Risques Naturels/Conseil Général de l'Isère..

GEMGEP, 2005

Le Risque Sismique à Nice, apport méthodologique, résultats et perspectives opérationnelles, rapport final.

GEOTER international, 2009.

Étude de présomption de vulnérabilité sismique et de la pertinence de renforcement des écoles primaires publiques la Martinique, rapport technique.

Gollier C., 2005.

Calcul économique et risque : comment intégrer le risque dans le calcul économique?, Université de Toulouse.

GNDT, 1993,

Rischio sismico di edifici pubblici – Parte I : aspetti metodologici, Centro Servizi Quasco, Bologna.

Guéguen, P., Garambois S., Tadenuma S., Lebrun B., Cotton F., 2009.

“Geotechnical, geophysical and seismological data used for the estimate of the highest amplified frequency in the basin of Grenoble” in *International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Bard, P.Y., Chaljub E., Cornou C., Cotton F., Guéguen P. (eds), LCPC Editions, Abstract 100.

Guéguen P., Cornou C., Garambois S., Banton J., 2007.

“On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool. Application to the Grenoble basin (France)” in *PAGEOPH*, 164 : 1-20.

Guéguen, Ph., 2008,

Outil logiciel d'inventaire sismique du patrimoine bâti, ISIBAT, DIREN Rhône-Alpes / Plan Séisme / Pôle Grenoblois.

Gueguen Ph., Lutoff C., Davoine P.A., Taliercio G., Cotton F., Cartier S., 2009.

« Analyse de la vulnérabilité sismique dans un pays à sismicité modérée : le cas de Grenoble », in *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Becerra S., Peltier A. (dir.), L'harmattan, Paris, 285-302.

Gralepois, M., 2008.

Les risques collectifs dans les agglomérations françaises. Contours et limites d'une approche territoriale de prévention et de gestion des risques à travers le parcours des agents administratifs, Thèse de doctorat en Urbanisme, LATTs, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée.

Hatzfeld et al., 1998.

Étude de l'aléa sismique dans la cuvette grenobloise, Rapport de recherche, Pôle Grenoblois des Risques Naturels/Conseil Général de l'Isère.

Hobiger M., 2005.

Caractérisation expérimentale et numérique des résonances globales de la vallée grenobloise, rapport de stage Master1 Physique, UJF, Grenoble.

Jerram J., Foray P., Labanieh S., Flavigny E., 2009.

“Characterising the non linearities of lacustrine clays in the Grenoble basin” in *Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Bard P.-Y., Chaljub E., Cornou C., Cotton F., Guéguen P. (eds), Grenoble.

Juster-Lermitte S., Beck E., Bouchon B., Fournely F., Juraszek N., Jomard H., Lamadon T., Lavore V., Poursoulis G., Rey J., Sarant P.-M., Seyedi D., 2009.

Le séisme de L'Aquila (Italie) du 6 avril 2009. Rapport de mission AFPS, Paris.

Lebrun B., Hatzfeld D., Bard P.-Y. 2001.

“A site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France)” in *Pure Appl. Geophys*, 158 : 2543- 2557.

Lestuzzi P., 2009.

Évaluation sismique de bâtiments existant, approche basée sur le risque introduite en suisse, Lausanne, Suisse.

Ménard G., Dietrich M., Vallon M., Tadenuma S., Bordes C., Meric O., Lemeille F., 2009.

« Seismic profiling and borehole measurements in the Isère valley near Grenoble, France: 1- Interpretation” in *Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Bard P.-Y., Chaljub E., Cornou C., Cotton F., Guéguen P. Eds, Grenoble.

Ménard G.,

Collection de forages géologiques et géotechniques.

Metral V., 2008.

Évaluation des coûts générés par la mise aux normes parasismiques, mémoire de Master1 en géographie, IGA, Grenoble.

Metzger P., 2006.

« Concepts scientifiques et demande sociale, quels atouts, quels obstacles? L'expérience du programme système d'information et risques à Quito (Equateur) » in *Atelier du Programme RDT du MEDD, Sciences Humaines et Sciences Sociales et Sciences de l'Ingénieur : Quelles Collaborations pour Quels Objectifs ?*, Echirolles, 19 mai 2006 : 53- 60.

Nicoud G. Royer G., Corbin J.C., Lemeille F., Paillet A., 2002.

« Creusement et remplissage de la vallée de l'Isère au Quaternaire récent » in *Géologie de la France*, 4 : 39-49, 2002.

RiskUE, 2003

An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns, Projet Européen, EVK4-CT-2000-0014, 325 p.

Sanders L., 2006.

« Les modèles agent en géographie urbaine » in *Modélisation et simulation multi-agents ; applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Amblard F., Phan D. (eds), 2006, 151-168.

Seismocare, 1998,

Sismocare Computed Aided Reduction of Seismic Risk with application to existing cities, town planning and construction – Directions to fill in the vulnerability form GNDT levels 1 and 2, European project Environment and Climate, 1994-1998, ENV4-CT97-0588.

Scherbaum F., Riepl J., Bettig B., Ohrnberger M., Cornou C., Cotton F., Bard P.-Y. 1999.

« Dense array measurements of ambient vibrations in the Grenoble basin to study local site effects » in *AGU Fall meeting*, San Francisco, USA.

Tadenuma, S., 2003.

Etude des formations superficielles du bassin grenoblois. Rapport de fin d'études, Polytech Grenoble.

Tsuno S., Cornou C., Bard P.-Y., 2008.

« Superficial S-wave velocity and damping factor model determined by the MASW measurement in the Grenoble sedimentary basin » in *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, Chine, paper 03-03-0017.

Vallon M., 1999.

Estimation de l'épaisseur d'alluvions et sédiments quaternaires dans la région grenobloise par inversion des anomalies gravimétriques, Unpublished IPSN/CNRS Report.

VULNERALP, 2007.

Projet d'évaluation de la vulnérabilité sismique à Grenoble. LGIT, Région Rhône-Alpes.

Wilensky U., 1999.

NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL.