

PROGRAMME SCIENTIFIQUE du GIS LiRGeC

La plate-forme scientifique du GIS telle que présentée ci-dessous est le résultat d'un travail de concertation entre l'ensemble des acteurs. Elle s'appuie sur les compétences des différentes équipes ainsi que sur les moyens expérimentaux mutualisés. Elle est également le fruit d'une réflexion sur les enjeux économiques et sociétaux propres aux domaines couverts par le GIS. Elle sera la base de travail pour la construction de projets de recherche concertés entre les membres du GIS. Cinq axes de recherche ont été dégagés qui vont constituer le socle scientifique du présent projet centré sur la maîtrise du cycle de vie des constructions, des ouvrages et des infrastructures.

Axe 1: Durabilité des matériaux, durée de vie et maintenance des ouvrages et bâtiments

Les ouvrages de Génie Civil sont soumis à de multiples sources d'agression : les sollicitations climatiques, les sollicitations engendrées par leur usage, les événements accidentels et le vandalisme. Pour les matériaux de construction, on utilise le terme de durabilité qui qualifie l'aptitude à maintenir ses fonctions, par exemple de résistance aux agressions mécaniques et chimiques. Pour les ouvrages on parlera de durée de vie, qui est le temps durant lequel celui-ci remplit en toute sécurité les fonctions pour lesquelles il a été construit, compte tenu des conditions de service et des exigences économiques. La prédiction (ou l'évaluation) de la durée de vie, que ce soit en phase de conception des ouvrages neufs ou en phase de maintenance des ouvrages existants, répond à des enjeux économiques et réglementaires forts, tant pour l'exploitation que pour la programmation des actions de maintenance ou de renouvellement. La durée de vie est devenue à la fois une exigence et un souci : il convient de l'assurer par une conception et une mise en œuvre adéquates, d'évaluer son état mécanique (d'où le recours à l'évaluation non destructive), de restaurer ou de renforcer l'ouvrage afin de prolonger sa durée de vie. Les maîtres d'ouvrages ont donc le souci de connaître l'état du patrimoine existant afin de s'assurer de sa stabilité dans le temps. Faut-il laisser l'ouvrage en l'état, le réparer (maintenance) ou le détruire ? Les solutions de réparation soulèvent la question de la pérennité de cette réparation. La recherche de méthodes, efficaces et rentables, pour le diagnostic, l'auscultation et l'évaluation de la durée de vie d'un ouvrage constituent donc un enjeu important qui doit se situer dans une logique d'optimisation des ressources (matérielles et financières) en respect avec des contraintes de sécurité et de développement durable.

L'axe « Durabilité des matériaux, durée de vie et maintenance des ouvrages et bâtiments » est un axe multidisciplinaire du Génie Civil nécessitant des compétences variées. Ces compétences intègrent aussi bien la mécanique numérique et expérimentale des matériaux et structures, la physico-chimie des matériaux, la modélisation des sollicitations que les transferts couplés de fluides et d'ions. Il présente l'originalité de couvrir une large gamme d'échelles micrométriques à kilométriques liées à la diversité des dimensions des grains ou hydrates, des agglomérats de particules, des poutres et structures, les bâtiments, les structures linéaires et les ouvrages d'art et de ce fait il ne peut être traité que par des approches multi-échelles. Il est abordé au sein de la région des PdL par plusieurs équipes du GeM, de l'IFSTTAR et du CSTB d'une façon non coordonnée, même si plusieurs actions communes ont été déjà entreprises dans le passé

par ces équipes pour répondre et participer à des appels à projets nationaux (ANR Blanc ECOBA, Fui MAREO et MAREVA, Carnot,...) et internationaux (TASSILI, Interreg IIIB, MEDACHS et DURATINET, RILEM, ARI, ...).

Il fait partie aussi des axes forts du PGCE (Pôle Génie Civil Ecoconstruction) et est inscrit dans le contrat Plan état région. 2007 – 2012 (contrat Génie Civil environnemental et gestion durable de la ville).

Cet axe mérite donc une structuration au niveau régional, car il permettrait un enrichissement mutuel des équipes au regard des compétences complémentaires de chaque laboratoire ou institution et constituerait sûrement une force régionale au coté du PGCE. Le GIS renforcerait aussi sa lisibilité au niveau national (au coté des laboratoires tels que le LMDC à Toulouse, le LML à Lille, Université de Limoges, etc...) et international (LNEC de Lisbonne, Trinity College de Dublin, MIT et NIST (USA), Université de l'Illinois (USA), Université de Parme (Italie), de Delft (Pays-Bas), etc.) ainsi que son positionnement dans une stratégie de recherche nationale.

La confrontation des savoirs faire des différents laboratoires a permis de dégager trois sous-axes majeurs de collaboration.

1 - Couplages physico-chimiques et mécanique de la durabilité

Par des approches pluridisciplinaires, les équipes de l'IFSTTAR évaluent les capacités d'adaptation à très long terme des structures de transport aux différentes évolutions du climat, du trafic et du vieillissement des couches des différents matériaux assurant la portance de ces structures. D'importants moyens d'essais en laboratoire et sur structures réelles sont utilisés pour évaluer en vraie grandeur diverses solutions matériaux et structures alternatives limitant les dégradations des chaussées (fissuration thermique ou mécanique, endommagement par fatigue, déformations permanentes, effet du retrait et fluage de certains matériaux, effet de l'eau et des cycles de gel/dégel sur les dégradations de couches de surface, ...). Cette même démarche est appliquée aux parties métalliques des structures et ouvrages d'art (les câbles, les assemblages soudés, rivetés, boulonnés). Elle est mise en œuvre à l'aide d'équipements spécifiques de l'IFSTTAR. Ces nombreux équipements permettent d'aborder les thèmes de la dynamique des structures, du comportement en fatigue et des mécanismes de corrosion assistée mécaniquement.

La soufflerie climatique Jules Verne du CSTB permet la reproduction à l'échelle 1 de n'importe quel cocktail de pluie, vent, gel, neige, température, humidité sur des composants de grande dimension. En particulier, les effets des cyclages de gel et dégel sur des matériaux de construction traditionnels comme la pierre et la terre cuite, mais aussi plus modernes comme les surfaces de verre, les céramiques, les plastiques sont reproduits de manière parfaitement contrôlée.

Du matériau à la structure, les équipes du GeM conduisent des recherches sur la durabilité des ouvrages en béton notamment et sur les couplages multi-physiques entre les effets des sollicitations mécaniques et/ou environnementales. Elles développent une approche performantielle basée sur des essais pour une meilleure compréhension des effets de la perméabilité au gaz, de la teneur en eau ou de la diffusion sur le comportement au jeune âge et à long terme du béton et de ses produits industriels. Par ailleurs le GeM dispose d'élégants modèles numériques pour simuler aisément par éléments finis les propagations de fissure dans les structures.

La coopération IFSTTAR – GeM – CSTB permettrait d'enrichir et croiser les moyens expérimentaux et de renforcer les moyens de simulation numérique pour l'étude des

effets, couplés aux sollicitations mécaniques, de la teneur en eau, du retrait du béton au jeune âge des conditions environnementales et des cycles de gel/dégel des différents matériaux sur le comportement des différents ouvrages et structures du génie civil.

2 - Détermination d'indicateurs de durabilité et de paramètres de suivi des dégradations et bases de données

Les actions environnementales soumettent les matériaux du génie civil à des sollicitations physiques, chimiques et mécaniques qui affectent leur durée de vie. En vue de mener à bien une évaluation des performances ces matériaux, il convient de déterminer les indicateurs de durabilité et les paramètres de suivi des dégradations aussi bien en laboratoire qu'in situ, par des méthodes destructives et non destructives. La compréhension des mécanismes de dégradation est particulièrement importante pour répondre aux enjeux environnementaux (cf. axe B. Ecoconstruction). En effet, elle permet de substituer à l'obligation de moyens sur la qualité et les proportions des constituants une obligation de résultats – approche performantielle – en termes d'indicateurs et de paramètres de suivi qui auront été identifiés comme déterminants du point de vue des mécanismes considérés. Ces indicateurs peuvent être utilisés directement pour établir des spécifications performantielles (en les comparant à des seuils), ou comme données d'entrée de modèles prédictifs de durée de vie. Ces modèles mathématiques peuvent à leur tour fournir des sorties qui pourront être comparées aux paramètres de suivi des dégradations pour validation puis extrapolation dans l'objectif d'établir un pronostic de durée de vie résiduelle. Enfin, il serait pertinent de les utiliser afin d'estimer la sensibilité des performances des matériaux et structures dans un environnement donné aux variations spatiales et temporelles.

La création d'une base de données régionale regroupant les résultats expérimentaux obtenus par les différents partenaires est envisagée. Cette base de données vise à : (i) déterminer des variables d'entrée fiables pour les modèles de dégradation (ii) caractériser l'aléa des propriétés des matériaux et (iii) établir des indicateurs du comportement, pour chaque matériau, en fonction de sa performance.

3 - Fiabilité, tenue, maintenance et surveillance d'ouvrages et bâtiments

La conception et la gestion d'ouvrages, de bâtiments et de routes sont devenues des enjeux majeurs de nos sociétés auxquels le vieillissement et la durabilité des matériaux sont étroitement liés. Compte tenu des aléas de comportement et de mise en œuvre, les méthodes basées sur la fiabilité des structures sont de plus en plus développées. Elles doivent être associées à des objectifs préférentiels qui peuvent être formulés différemment en phase de conception et en phase de gestion. Dans un objectif d'allocation maîtrisée des ressources, il s'agit alors d'y associer des fonctions objectif intégrant coût, impact sociétal et environnemental, en assurant des niveaux cibles de sûreté et de fonctionnement pendant le cycle de vie des structures.

La modélisation probabiliste emploie des modèles analytiques ou numériques du phénomène étudié et des variables d'entrée modélisées sous forme probabiliste. Le GeM a une grande expérience dans ce domaine mais une collaboration avec des autres acteurs régionaux s'avère essentielle afin de proposer des modélisations plus conformes aux problèmes de dégradation observés réellement et des actions d'inspection et de réparation à envisager. La collaboration avec les équipes impliquées dans le volet 1

« couplages et mécanique de la durabilité » (IEG et MOE du GeM, IFSTTAR et CSTB) donnera des éléments importants pour améliorer le choix et la mise en œuvre des modèles de durabilité plus pertinents. L'interaction avec les équipes qui participent dans le volet 2 « détermination d'indicateurs de durabilité et base de données » (IEG et MOE du GeM, IFSTTAR et CSTB) apportera des données expérimentales qui serviront à identifier des variables aléatoires et des processus stochastiques qui seront introduits dans les modèles probabilistes. Cette identification peut être enrichie par les résultats des évaluations non destructives (IFSTTAR, GeM) qui joueront aussi un rôle fondamental dans l'évaluation de l'état résiduel de l'ouvrage et dans la détermination de l'état mécanique de la structure ou de ses propriétés d'usage. Le développement des méthodes automatisées de surveillance et du déclenchement d'alertes mené au sein du CSTB et de l'IFSTTAR (système de surveillance acoustique des câbles) pourra également être intégré dans la gestion des ouvrages, des bâtiments et des routes vieillissants. On envisage une étroite collaboration avec l'axe A (risques) afin d'intégrer les actions climatiques avec nos modèles probabilistes de dégradation. Enfin le GeM peut contribuer à la mise au point des protocoles expérimentaux, développés pour les autres équipes, sur la base de la fiabilité. Cette mise au point cherche à identifier les facteurs que peuvent influencer le plus les erreurs de mesure afin d'améliorer l'efficacité de ces protocoles. L'objectif de cet axe n'est pas le développement de techniques de contrôles ni d'optimisation qui se situent dans le projet d'urgence collective ECND-PdL. Afin de garantir le bon fonctionnement dans le temps, le projet nommera un correspondant auprès d'ECND-PdL.

Axe 2 : Eco – construction

Les travaux de Génie Civil sont demandeurs de gros volumes de matériaux souvent acheminés sur de longues distances. La production, l'utilisation et la fin de vie de ces matériaux ont un impact majeur sur l'environnement par la ressource non-renouvelable nécessaire à leur composition (matières premières), par l'énergie nécessaire dans les procédés de transformation et par les émissions associées (gaz à effet de serre, composés organiques, métaux lourds, particules fines). Dans le cadre des politiques d'économie des ressources naturelles, de réduction des gaz à effet de serre et des volumes de déchets, la France, comme de nombreux pays, se fixe des objectifs chiffrés en termes d'optimisation de leurs usages dans le domaine du BTP. Cependant devant les puissances financière et commerciale des producteurs des matières premières et des opposants aux politiques climatiques, les objectifs fixés seront difficilement atteints si les régions ne se mobilisent pas pour relever le défi. En se basant sur une recherche ligérienne bien avancée dans le domaine de l'Eco-construction, il paraît très opportun de profiter de ce projet structurant pour mettre en place une structure de recherche technologique basée sur les forces vives de la recherche en génie civil en pays de la Loire (CSTB, GeM et l'IFSTTAR) et des Entreprises.

Nous proposons de traiter cette problématique selon trois principaux axes qui sont détaillés ci après. Pour chaque action, l'impact potentiel sur l'environnement sera évalué par des éco-comparateurs qui reposent sur le calcul d'indicateurs quantifiant les activités à l'origine de la réalisation et de l'entretien d'infrastructures. En effet, l'analyse de cycle de vie (ACV), méthodologie qui a fait ses preuves depuis les années

1980 fournit un cadre scientifique international reconnu par les experts de la SETAC¹, ne peut être ignorée de toute discussion sur le sujet. L'évaluation des impacts sur l'environnement selon la démarche ACV, consiste à traduire les flux élémentaires de ressources consommées et rejets et déchets recensés en impacts sur l'environnement, à l'aide d'indicateurs quantitatifs, dans la mesure du possible, et en particulier en fonction de la disponibilité des données.

1- Optimisation de l'utilisation des ressources naturelles et alternatives locales dans le BTP.

La mise en œuvre d'une exploitation optimisée de la ressource en matériaux naturels et alternatifs implique de prendre en compte les ressources sur un plan quantitatif et qualitatif. Sur un plan quantitatif, on cherchera à formaliser des critères économiques et environnementaux (base énergétique de l'élaboration et transport à l'échelle du territoire) pour organiser les filières de valorisation des ressources. Sur un plan qualitatif, des développements spécifiques en termes d'assurance qualité dans la gestion de stocks, de certification de la qualité des matériaux produits (vis-à-vis des usages et des retombées environnementales à long terme) doivent être envisagés de la part des fournisseurs, de la même façon que des garanties de traçabilité et de respect des conditions d'emploi doivent être prises de la part de l'utilisateur.

Aussi, on cherchera à développer des connaissances en matière de réemploi de tous les matériaux, notamment les matériaux marginaux déclarés inaptes au réemploi selon les règles de l'art qui prévalent encore aujourd'hui². En région Pays de la Loire, c'est le cas par exemple des matériaux locaux micaschisteux qui ne peuvent être valorisés en couche de forme sous les chaussées, même traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. En parallèle, ces recherches seront orientées vers la description et la hiérarchisation de la suite des mécanismes (à l'échelle microscopique) induits par l'addition d'un liant hydraulique selon une approche physico-chimique. Cette approche couplée géotechnico-physico-chimique et multi-échelle des sols traités constitue l'originalité mise en œuvre dans ce projet.

2. Développement de matériaux du BTP à faible impact environnemental. Nouveaux composants, nouvelles formules, nouveaux procédés

Afin de favoriser l'évolution des matériaux et des procédés utilisés dans le BTP vers un meilleur respect de l'environnement on doit d'une part proposer des nouvelles formulations et de nouveaux équipements et, d'autre part, adapter ces innovations aux pratiques industrielles.

Les différentes voies d'amélioration possibles – substitution de composants traditionnels par des composants plus respectueux de l'environnement, optimisation des compositions et des procédés de fabrication – sont interdépendantes. L'innovation « environnementale » dans le BTP doit s'appuyer sur une bonne compréhension des pratiques industrielles actuelles et des ressources disponibles afin de proposer des solutions utiles et acceptables à court ou moyen terme.

¹ Society of environmental toxicology and chemistry : Cette association, regroupant à la fois des universitaires et des industriels, a posé les bases de l'ACV et constitue encore aujourd'hui l'instance de référence pour de nouveaux développements (<http://www.setac.org/lca.html>) : c'est donc une sorte d'enceinte de réflexions R&D, en amont de la normalisation internationale ISO (<http://www.iso.org>)

² C'est le souhait du Syndicat Professionnel des terrassiers de France, mais également les ministères de tutelles.

Nous proposons de mettre en place de nouvelles méthodes d'évaluation environnementales et performantielles, adaptées à un spectre plus large de matériaux (traditionnels et innovants). Ces projets seront donc nécessairement vastes et généreront un besoin d'interdisciplinarité. Les compétences du génie civil seront utilement complétées par des compétences d'autres disciplines scientifiques: chimie, génie des procédés, traitement du signal, biologie ...

Certains verrous normatifs et techniques sont également à lever. En effet, le contexte normatif est souvent peu favorable car prescriptif, fondé sur une obligation de moyens censés garantir une mise en œuvre et une durabilité convenables. Cela limite le recours à des composants alternatifs, et ne permet pas toujours d'optimiser les compositions en bénéficiant des améliorations sur les procédés et les composants eux-mêmes. Pour innover en vue de répondre aux défis environnementaux et sociétaux, il est donc plus judicieux de qualifier les matériaux par leurs performances. L'approche performantielle nécessite cependant de très bien comprendre le comportement et les mécanismes de vieillissement des matériaux et des structures, afin de spécifier des critères pertinents. Par ailleurs les procédés d'élaboration et de mise en œuvre doivent être adaptés afin d'obtenir des produits industriels fiables malgré les fluctuations des propriétés des matières premières.

Il faut faire remarquer l'originalité de l'association entre les recherches sur la conception de nouveaux matériaux et celles sur les procédés d'élaboration nécessaires à leur mise en œuvre au niveau industriel. Il faut rappeler également l'effort de recherche encore nécessaire pour élaborer des méthodes d'évaluation environnementales capables de prendre en considération l'innovation technologique.

3- Recyclage des matériaux de construction dans le BTP

Dans les prochaines décennies, on devrait observer une croissance importante du volume des déchets de construction ; ceci en raison de l'augmentation probable du nombre d'ouvrages à démolir ou à réhabiliter. De plus, les sources de granulats naturels devraient se raréfier et la mise en décharge devenir de plus en plus coûteuse.

D'une manière générale, le recyclage est bien inférieur à ce qu'il pourrait être d'un point de vue technique. Les raisons sont souvent à la fois économiques et liées à un a priori négatif vis-à-vis des matériaux recyclés. Mais lorsque les normes environnementales sont élevées et lorsqu'une volonté politique s'exerce en faveur du recyclage, celui-ci a plus de succès, et peut s'avérer rentable. Le besoin est donc réel de développer et de promouvoir dès aujourd'hui des filières de recyclage et de valorisation de ces matériaux.

L'objectif scientifique principal de cet axe est d'évaluer et d'élaborer des méthodologies d'optimisation des matériaux de construction (route, bâtiment...) incorporant des recyclés d'un point de vue mécanique, environnemental et économique dans un contexte de développement durable.

La seconde tâche consiste à définir le potentiel de recyclabilité des constituants à la fois pour les matériaux neufs, à recycler, ou ayant été déjà recyclés. Dans tous les cas, la recherche visera à prédire l'évolution des matériaux par recyclages successifs. Ce type d'approche pourra conduire à des choix a priori sur les matériaux neufs à mettre en œuvre pour assurer leur recyclabilité future.

Ces thématiques ont d'ores et déjà motivé un certain nombre d'études et opérations de recherche sur différents matériaux. La complémentarité des équipes de l'IFSTTAR et du GeM, aussi bien au niveau des outils de modélisation qu'au niveau des équipements expérimentaux, permettra d'aborder ces questions de manière globale,

depuis la caractérisation du constituant jusqu'au comportement mécanique et physico-chimique des matériaux obtenus et de poursuivre les recherches entamées. L'implication des industriels sera également primordiale.

Axe 3 : BTP et énergie

Thème 3.1 – le génie civil support de la sécurisation et du transport de l'énergie

Il est possible d'affirmer que l'énergie, sa production son transport et différentes problématiques connexes reposent pour beaucoup, pour ne pas dire essentiellement sur du génie civil. Ce parc génie civil énergétique nécessite bien entendu lors des élaborations, des constructions le recours à différentes innovations traitées par nos différents laboratoires. Par ailleurs, notre approvisionnement énergétique ainsi que sa sécurisation ou la limitation de ses impacts repose sur la mise en place de méthodologies dédiées d'observation ou de surveillance. Nos laboratoires sont largement impliqués sur ces aspects en fort développement en partenariat avec les industriels ou établissements majeurs du secteur (EDF, RTE, ANDRA, CEA, IRSN, AIEA). A titre d'exemple les points suivants font l'objet de nombreux travaux de recherche actuels :

- 1- Le prolongement de la durée de vie de nos unités de productions nucléaires implique la mise en place d'un certain nombre de techniques d'observations ou de monitoring. Elles portent notamment sur l'analyse de la fonction précontrainte dans les enceintes de confinement, sur la caractérisation de la géométrie de la fissuration dans le béton, sur la définition de méthodologies expérimentales à faible impact lors des essais décennaux ...
- 2- La sécurisation de l'alimentation en eau de ces centrales constitue un point majeur de notre sécurité (on ne le sait que trop actuellement). Il convient donc de définir des procédures d'observations permanentes des différents ouvrages d'alimentation en vue de déclencher d'éventuelles alertes précoces.
- 3- Le transport de l'énergie électrique sera assuré encore durant de nombreuses années par un parc ancien de lignes aériennes HT et THT. La réévaluation à la hausse des aléas climatiques impose d'évaluer leurs fondations. Des techniques particulières de surveillance, d'imagerie et de confortement doivent donc être développées.
- 4- En fin de chaîne, la problématique du stockage souterrain soulève un grand nombre de sujets de recherche liés au domaine génie civil. En particulier, la sûreté à moyen terme de ce type de stockage repose en partie sur la connaissance de son proche environnement et de son évolution potentielle ainsi que sur la surveillance de certaines de ses parties constitutives.
- 5- Les inspections d'installations nucléaires requièrent également des techniques de détection adaptées (au sein de milieux très complexes) de manière à détecter d'éventuels écarts vis-à-vis des déclarations des pays signataires du traité de non prolifération nucléaire.

La région concentre dans ces domaines des potentiels de formation, de recherche et d'entrepreneuriat dont la mise en réseau est un gage d'inventivité et d'efficacité.

Thème 3.2 –Eoliennes en mer

La production d'énergie électrique est un grand enjeu dans nos sociétés développées, dans lesquelles certains des moyens de production en site terrestre vieillissent et sont de moins en moins bien acceptés par les populations locales, en particulier en raison des risques liés à l'exploitation de certains générateurs. Le développement de la production d'énergie électrique d'origine éolienne est en plein développement ces dernières années, les meilleurs sites terrestres étant peu à peu équipés en France. Les grandes éoliennes (hauteur supérieure à 12m) en site terrestre font depuis octobre 2008 l'objet d'un contrôle technique obligatoire (Article R111-38 du Code de la construction et de l'habitation). Le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique a réuni dans ce cadre les différents intervenants (fabricants, producteurs, bureaux d'étude, entreprise,...) afin d'éditer des recommandations sur la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des fondations d'éoliennes.

La Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 (fixant les orientations de la politique énergétique) indique (article 5) que le troisième axe de la politique énergétique est de développer la recherche dans le secteur de l'énergie [...], dont « l'augmentation de la compétitivité des énergies renouvelables, notamment des carburants issus de la biomasse, du photovoltaïque, de l'**éolien en mer**, du solaire thermique et de la géothermie ». Sous le feu des projecteurs début 2011, lors de la désignation des sites (dont un au large du Croisic) l'éolien en mer est inexistant en France, alors qu'il est développé dans d'autres pays européens (Grande-Bretagne, Danemark, Pays-Bas, Suède,...).

Un nouveau secteur d'activité industrielle pour la région des Pays de la Loire semble émerger. Il n'en demeure pas moins que dans la région sont concentrés plusieurs équipements remarquables permettant de relever certains défis de la connaissance liés à l'éolien off-shore : le bassin de Houle du Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ECN, la soufflerie du CSTB, le Banc de Fatigue des Câbles et la Centrifugeuse Géotechnique de l'IFSTTAR permettent de simuler sur modèles réduits certains des effets de l'environnement marin sur les éoliennes off-shore. Par exemple l'effet de la houle et des marées, du vent (ou de la combinaison des deux) sur des structures flottantes ou non peuvent être approchés en bassin et/ou en soufflerie, tandis que l'effet de ces sollicitations variables sur des fondations sous-marine peut être testé en centrifugeuse.

Une coordination avec la fédération de recherche Mer et Littoral et un rapprochement avec le pôle de compétitivité « Pôle Mer Bretagne » sont à envisager, d'autant qu'une de ses 5 thématiques concerne les « ressources énergétiques marines ».

Thème 3.3 – Energie en ville

L'objectif de ce thème est d'étudier les différents supports d'installation de sources de production et/ou d'économie (ou de récupération) d'énergie en milieu urbain.

La ville offre en effet une infrastructure de génie civil existante (bâtiments, immeubles), sur laquelle peuvent venir prendre appui des éléments de production et/ou de récupération d'énergie (éolienne, solaire photovoltaïques, solaire thermique, aérosolaire, chaleur des eaux rejetées), et assurer une part d'autonomie énergétique au milieu urbain. En outre, la proximité entre lieux de production et lieux de consommation permet de réduire les coûts d'infrastructures du transport de l'énergie, et d'améliorer le rendement

global du système de production en évitant les pertes en ligne. Ces modifications de l'architecture du réseau énergétique se justifieraient dans un monde où 90% de la population est appelée à vivre en milieu urbain à l'horizon 2020.

En contrepartie, les contraintes d'espace et de nuisance en milieu urbain limitent le choix à des équipements de faible puissance, de faible encombrement et impact environnemental. La géométrie des bâtiments laisse peu de possibilités d'installation: en façade (incidence verticale) ou en toiture ou en terrasse (horizontale à faible angle d'incidence). Des technologies solaires spécifiques permettraient de s'adapter à des conditions d'incidence peu favorables (aérosolaire par exemple).

Le thème de recherche cible les deux sources d'énergie que constituent l'éolien et le solaire, (photovoltaïques et thermique), ainsi que de possibles combinaisons du solaire thermique avec le système de pompe à chaleurs (aérosolaire).

Comme acteurs de ce thème, il conviendrait d'associer l'agglomération nantaise, mais également des services de l'urbanisme, des architectes et des juristes pour des raisons administratives et juridiques évidentes.

Nantes Métropole est fortement sensibilisée à la dimension écologique de son développement urbain. D'une part, elle a lancé une vaste consultation de la population via l'atelier climat (<http://www.nantesmetropole.fr/actualite/l-actualite-thematique/atelier-climat-vers-l-avis-citoyen-developpement-durable-35740.kjsp>); d'autre part, Nantes souhaite justifier de son récent statut de « capitale verte européenne » (http://www.nantes.fr/dev-durable/actualites-durable/2010_6/capitale_verte_europe) .

Thème 3.3a –Eoliennes urbaines intégrées au bâti

L'utilisation du potentiel éolien en milieu urbain est une idée récente. En effet, la rugosité de cet environnement induit des turbulences perturbant le fonctionnement des éoliennes utilisées jusqu'à présent. Cependant, des études sur le vent rencontrant un obstacle tel un bâtiment montrent que le vent s'accélère au passage de celui-ci ce qui permet d'imaginer qu'en plaçant astucieusement de petites éolienne on pourrait obtenir des rendements intéressants.

Les éoliennes à axe horizontal sont similaires dans leur principe aux machines géantes que l'on rencontre actuellement sur les grandes fermes éoliennes. Elles sont alors de petite taille, placées sur un mât de 5 à 20 m avec un diamètre compris entre 2 et 10 m pour une production pouvant aller jusqu'à 20 kW. Les machines de type Darrieus (utilisant la portance) ou Savonius (utilisant la traînée) sont pour leur part mieux adaptées à une intégration directe au bâtiment.

Les éoliennes à axe vertical ont été conçues pour s'adapter aux contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et leur production souffre moins de ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments.

L'intégration de machines tournantes aux bâtiments est source potentielle de vibrations et de bruit. Leur développement passe donc avant tout par la résolution de ces contraintes avant même les questions architecturales et patrimoniales.

Plusieurs programmes de recherches sont en cours, dont AeroJoule avec le CSTB et l'ICAM. Tout comme pour les panneaux photovoltaïques le marché éolien domestique passe par une étape de certification, les constructeurs étant aussi demandeurs de recherche partenariale.

La sollicitation dynamique des constructions supports est étudiée à la fois à partir des effets de la turbulence du vent et de l'excitation dynamique par la machine tournante.

Le couplage dynamique entre l'éolienne et sa structure porteuse, dont plusieurs exemples sont déjà recensés en France fait intervenir de nombreux paramètres. Seule une étude approfondie sur la base d'une typologie modale des bâtiments croisée avec les caractéristiques des éoliennes mises sur le marché et leur stratégie de fonctionnement pourra permettre de dégager un corpus réglementaire. Des études en situations contrôlées (soufflerie) et en expérimentation vraie grandeur peuvent être l'occasion d'une collaboration entre acousticiens, aérodynamiciens, énergéticiens et spécialistes des structures.

Thème 3.3b – systèmes solaires urbains intégrés au bâti

D'un point de vue strictement technologique, le rendement des panneaux est susceptible d'augmenter et leur prix de chuter dans un futur proche grâce à un changement technologique des semi-conducteurs constitutifs des panneaux ; ceci est de nature à changer radicalement l'utilisation qui est faite des toitures des bâtiments. En outre des technologies solaires spécifiques permettraient de s'adapter à des conditions d'incidence peu favorables (aérosolaire en façade de bâtiment par exemple) ; le champ de la recherche est ici très ouvert.

Le solaire plus que les autres productions d'énergie renouvelable est tributaire d'un cycle. Les lieux et modes de stockage de l'énergie doivent être développés de manière à pouvoir stocker le pic de production solaire (en journée) pour le pic de consommation de début de soirée et la vie nocturne. Le plancher solaire direct, les matériaux à changement de phase sont des réponses actuelles issues de recherches récentes ; l'adsorption de l'hydrogène sur des supports solides ou l'intégration de supercondensateurs dans l'habitat sont des exemples de technologies où tout reste à découvrir.

Thème 3.3c : énergie et isolation

Le premier effort est l'économie d'énergie. Cela passe notamment par un objectif fort d'isolation du bâti ancien, qui représente plus de 90% du parc immobilier. L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) offre la solution technique la plus efficace en toutes saisons (conforts hiver et été). En outre, elle requiert une épaisseur d'isolant moindre, impliquant une économie de ressources non négligeable. En contrepartie, l'ITE peut empiéter sur l'espace public dans certaines configurations de bâti (façade rue par exemple). Il serait judicieux de sensibiliser les élus des collectivités, les architectes du patrimoine à cette contradiction entre droit cadastral et efficacité énergétique.

Axe 4 : Risques naturels

La notion de risque naturel est aujourd'hui entrée dans le vocabulaire courant. Elle combine l'aléa et l'enjeu (ou la vulnérabilité) du site soumis aux phénomènes naturels. C'est l'une des cinq composantes (avec les risques liés à la technologie, au transport collectif, à la vie quotidienne et aux conflits) du risque majeur, que H. Tazieff définissait comme la « menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations ; la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre ».

Les risques naturels comprennent classiquement les feux de forêt, les volcans, les avalanches, les cyclones, les tempêtes, les séismes et tsunamis, les inondations et les mouvements de terrain.

Le GiS vise à structurer une réponse globale en se concentrant sur 5 axes de complémentarité et d'excellence.

Inondations

Les inondations constituent à l'échelle mondiale le risque naturel le plus fréquent induisant les dommages matériels et humains parmi les plus importants. On estime que les inondations en Europe ont provoqué en dix ans la mort de 700 personnes, le déplacement d'environ un demi-million de personnes et des pertes économiques d'au moins 25 milliards d'euros couvertes par les assurances. La directive européenne du 6 novembre 2007, fixe le cadre de la politique de réduction des risques liés aux inondations. Les recherches croisent les compétences du GeM en analyse géo-statistique et celles de l'IFFSTAR sur les approches bayésiennes et la connaissance des mécanismes. Elles consistent:

- à approfondir les connaissances sur les mécanismes générateurs des crues et la cinétique de réponse des bassins versants en relation avec leur occupation des sols, leurs caractéristiques pédologiques et géologiques ;
- à améliorer les méthodes de cartographie des risques, et notamment les outils de traitement statistiques des données hydrologiques ;
- à développer de nouvelles méthodes de prévision des crues, en particulier un outil de prévision des coupures de routes par inondation et une méthode experte d'aide à la prévision des crues.

Séismes

Le tremblement de terre qui a dévasté Haïti, le 12 janvier 2010, a fait 200.000 morts, 300.000 blessés et 1.000.000 personnes jetées à la rue. Le séisme qui vient de se produire au Japon, selon les chiffres officiels à ce jour, a causé la mort de plus de 10.000 personnes, provoqué des dégâts équivalents à 309 billion \$ et il est à l'origine d'un très sérieux incident nucléaire. Le contexte de la prise en compte du risque sismique évolue puisque la nouvelle carte d'aléas sismiques étend sensiblement les zones du territoire exposées à un aléa non négligeable et demande le développement des capacités de vérification de la vulnérabilité des constructions et ouvrages. La mise en application de l'Eurocode 8 (ouvrages sous séismes) accroît également les besoins de connaissance et d'innovation en la matière, en particulier dans les zones de faible à moyenne sismicité (France métropolitaine, Allemagne, Belgique ...). Les recherches proposées s'appuient sur la présence en Région de moyens expérimentaux exceptionnels et d'équipes couvrant la gamme complète d'études de la propagation d'ondes en milieux granulaires et dans sols aux calculs de structures pour la majorité des matériaux (acier, béton et mixte acier-béton) pour amorcer la création d'un pôle

permettant une approche holistique des problèmes de génie parasismique en relation avec le sol. Dans ce cadre les thématiques de recherches complémentaires suivantes seront regroupées permettant des développements théoriques expérimentaux et numériques:

- propagation d'ondes dans les milieux granulaires modèles et les sols,
- simulation de séismes en modèles réduits centrifugés et développements instrumentaux
- modélisation numérique de l'interaction sol-structure et structures – sol - structure
- problématiques sismiques urbaines (formes urbaines, réseaux, gestion du risque)

Tempêtes

La côte Atlantique a subi 2 fortes tempêtes en 10 ans générant les dégâts matériels les plus importants de toute l'Europe de l'Ouest. Le nombre de tués et de blessés reste important, malgré la mise en application de règles de construction anticipant ces aléas mais auxquels tous les ouvrages ne sont pas soumis. La transmission vers le grand public des connaissances scientifiques élaborées après des dizaines d'années d'études pourrait être lancée dans le cadre du GIS au travers d'outils numériques adaptés. Les actions de recherche visent à structurer une collaboration nouvelle en:

- tirant partie des expérimentations pour améliorer les modèles de calcul, notamment pour les structures innovantes comme les éoliennes offshore flottantes ou les structures gonflables ;
- mettant en ligne des outils de conception simple des effets du vent.

Erosion interne des digues

Sous chargement hydraulique fluvial ou maritime, les ouvrages hydrauliques en terre (digues, levées et barrages) peuvent être le siège d'écoulements internes qui engendrent un arrachement et une migration de particules constitutives de l'ouvrage ou de ses fondations. Ce phénomène complexe et mal connu, appelé érosion interne, est directement responsable de la moitié des destructions d'ouvrages hydrauliques en terre. Cette problématique se caractérise par son ampleur (la France compte 8000 km de digues de protection, 6700 km de voies navigables, plus de 1000 km de digues d'aménagement et de grands canaux et plusieurs milliers de barrages) et par son importance sanitaire et économique.

Chaque étape de l'érosion (détachement, transport et filtration) se caractérise par la complexité de l'interaction fluide – grains. Dans le cadre du projet R2GC et par plusieurs co-encadrements d'étudiants de Master, les partenaires du GiS ont déjà engagé une dynamique. On propose de se concentrer sur :

- d'un point de vue expérimental, la caractérisation hydromécanique de l'érosion et de ses conséquences complétée par une caractérisation géophysique ;
- d'un point de vue modélisation, la description locale des interactions entre le fluide interstitiel et la phase granulaire solide d'une part; et d'autre part la dégradation des propriétés constitutives hydrauliques et mécaniques du sol en relation avec la modification de sa micro-structure induite par l'érosion.
- d'un point de vue soutien à l'ingénierie, le développement de modèles à caractère prédictif applicables à l'échelle des ouvrages développés sur la base des connaissances acquises par l'expérimentation et la modélisation locale.

Climat

Durant ces dix dernières années et de manière accentuée depuis 5 ans, l'intérêt porté à ce sujet a particulièrement augmenté à cause des fortes incertitudes concernant les variations climatiques produites par le réchauffement climatique et plus fondamentalement la représentation de la réalité. La Région dispose d'équipements remarquables de simulation de climats et de modèles numériques probabilistes permettant d'avoir une contribution forte au niveau international, ceci à très court terme. Dans ce contexte, cette action du projet vise principalement à évaluer l'influence des variations climatiques sur la fiabilité des ouvrages. Sur la base de cette évaluation, nous proposerons de nouveaux modèles et protocoles pour l'amélioration de la conception et de la gestion des structures afin d'optimiser les coûts de construction et d'opération ainsi que d'assurer des niveaux optimaux de sûreté pendant sa durée de vie. Parmi ces actions, nous nous intéressons à l'interaction « climat réel » et « processus de dégradation ». Cette action s'appuie sur deux volets :

- la modélisation probabiliste du climat et des processus de dégradation ;
- la modélisation physique des structures ou composants sous environnement changeant.

Axe 5 : Infrastructures de transport

La loi dite Grenelle 2 a placé la question des transports comme un chantier majeur des années à venir en matière de politique d'aménagement et de développement des territoires. L'axe « Infrastructures de transport » vise à apporter des solutions quant à l'évolution des infrastructures, existantes et à venir, des comportements, en tenant compte des enjeux environnementaux (réduction des nuisances, réduction des GES, ...) et sociétaux (mobilité des biens et des personnes, sécurité, ...). Enjeu majeur, le développement des transports terrestres collectifs, urbains et périurbains, en site propre (TCSP) et ferroviaires à grande vitesse constitue la ligne directrice de l'axe D.

Les enjeux qui existent aujourd'hui sur les questions du ferroviaire et des transports guidés sont nombreux :

- économie des ressources naturelles non renouvelables et notamment du ballast ;
- optimisation du cycle de vie des infrastructures existantes et futures (lignes LGV, voies tramways) : par l'augmentation de la durabilité des infrastructures et leur recyclabilité ;
- meilleure intégration et diminution des impacts des transports guidés en milieu urbain, notamment des vibrations et nuisances sonores.

L'axe infrastructures de transport comprend 3 thématiques :

- la thématique sur les plateformes ferroviaires ;
- la thématique sur le transport en milieu urbain ;
- la thématique sur le transport routier.

Thématique: Plateformes ferroviaires

La thématique abordera 1 - la question de la pérennité des performances des voies ballastées et 2 – la question des solutions alternatives innovantes pour les structures ferroviaires.

Pérennité des performances des voies ballastées

L'exploitation des voies ballastées pour trains à grande vitesse montre l'apparition de désordres géométriques de la couche de ballast qui évoluent rapidement avec le trafic et génèrent des coûts de maintenance directs et indirects importants (*source : RFF*). Ces désordres sont expliqués principalement par l'effet des forces d'inertie dans le ballast. L'objectif est ici de pouvoir quantifier, en associant les approches théoriques, expérimentales et numériques, la dégradation des structures ballastées sous les effets des efforts statiques et dynamiques. La complémentarité des équipes de l'IFSTTAR et du GeM, aussi bien au niveau des outils de modélisation (thèse co-encadrée par le GeM et l'IFSTTAR doit débiter en 2011) qu'au niveau des équipements expérimentaux (dalle d'essai, cellules triaxiales, instrumentation in-situ), permettra d'aborder cette question de manière globale, depuis la caractérisation du granulat jusqu'au comportement de la structure. L'implication des industriels (la collaboration avec la SNCF et RFF est effective) dans cette thématique doit aussi déboucher sur la proposition de dispositions constructives afin de réduire les désordres encourus sur le réseau LGV et d'optimiser les programmes de maintenance et de réparation.

Solutions alternatives innovantes pour les structures ferroviaires

L'optimisation de la structure sous-jacente au ballast est un défi majeur, aussi bien du point de vue technique qu'économique. La technique des traitements de sols, au ciment ou à la chaux, reste d'application exceptionnelle dans le domaine ferroviaire, alors qu'elle est d'un usage courant dans le domaine routier et étudiée depuis plus de 20 ans à l'IFSTTAR. Elle permet d'une part d'optimiser le dimensionnement des structures et d'autre part d'autoriser le réemploi des matériaux naturels du site, minimisant l'impact environnemental et réduisant le coût économique des ouvrages. Cependant, certaines précautions sont à prendre avant de transposer cette technique aux ouvrages ferroviaires qui présentent quelques spécificités : durée de vie de l'ouvrage ferroviaire, possibilités d'intervention (entretien courant, ...), sollicitations dues au trafic d'une LGV. Des questionnements sur la durabilité des traitements (stabilité chimique, résistance à l'érosion, ...) et sur la fatigue mécanique des sols traités seront traités en priorité sur ce sujet.

Une seconde piste de réflexion vient en rupture des méthodes traditionnelles de conception des structures ferroviaires. Il s'agit ici d'évaluer des structures ferroviaires innovantes par l'expérimentation sur « maquette » (dalle d'essai) pour tester les performances de matériaux (bétons, enrobés) autres que des sols en couches d'assise de la voie ferrée. Il s'agit également d'évaluer dans quelle mesure les méthodes de dimensionnement routier peuvent être transférées au domaine ferroviaire et ainsi permettre leur optimisation.

Thématique: Transports en milieu urbain

Dans le domaine des aménagements urbains, la multiplication et la densification des systèmes de transport en commun de surface est l'un des faits remarquables de ces vingt dernières années. Durant cette période, on a vu à la fois se moderniser le concept du tramway standard sur rails avec un abandon progressif de la voie ballast au profit de la structure « tout béton ». On dispose aujourd'hui d'un retour d'expérience de plus d'une vingtaine d'années sur le comportement dans le temps de ce type d'infrastructures. Celui-ci montre des dysfonctionnements relativement fréquents des revêtements des voies tramway, en site propre comme en site partagé et en carrefour : dégradations anormales de ces revêtements (pavés, enrobés, béton, dallages, éléments modulaires...),

vieillissements inattendus des interfaces et des joints entre la voirie classique et la voie pour tramway.

En revanche, quand il s'agit du comportement structurel des voies, les cas de pathologie sont exceptionnels. Ainsi, les structures «tout béton» telles que celle des tramways de Nantes ou du Mans, sont parfois considérées comme surdimensionnées. Des alternatives à cette structure massive ont été envisagées et parfois expérimentées (structures de voie béton sur enrobés ou béton sur béton compacté au rouleau par exemple). Ces variantes sont prometteuses car elles conduisent à des épaisseurs moindres des structures de voies, se traduisant par des allègements des travaux et des volumes de matériaux utilisés. Les données actuelles sont cependant insuffisantes pour permettre une validation de ces nouvelles structures et leur utilisation opérationnelle.

La répétitivité des pathologies rencontrées sur les revêtements des voiries pour systèmes urbains sur rails a d'ores et déjà motivé diverses études et actions de recherches, qui ont permis de procéder à l'analyse des désordres rencontrés sur les plateformes pour tramway, d'en rechercher les causes, de dégager des règles de bonne pratique et de mettre l'accent sur les conceptions inadaptées.

La thématique «transport en milieu urbain» vise à poursuivre ces recherches en intégrant les récents développements menés par les multiples acteurs impliqués, de réaliser des expérimentations en vraie grandeur pour valider les propositions de structures alternatives pour, entre autre chose, caler des modèles numériques de structure et de loi de fatigue de matériau.

Thématique: Transport routier

L'infrastructure, après le conducteur et le véhicule, constitue le troisième élément du «système» de sécurité. A cet égard, tout au long de ces dernières années, «Faire contribuer l'infrastructure à la sécurité routière» s'est naturellement imposé comme une priorité nationale. Une étude de l'INRETS portant sur 700 km de routes nationales et s'appuyant sur l'analyse de 1350 procès-verbaux d'accidents corporels a permis d'identifier les principaux facteurs «**route**» contribuant à la genèse des accidents. Parmi ces facteurs accidentogènes, le manque d'adhérence a été ainsi identifié comme étant principal.

Cependant, sur chaussées sèches, le niveau d'adhérence est généralement suffisant et les accidents y survenant sont généralement liés au tracé de la route et/ou à une mauvaise visibilité. Alors que sur chaussée mouillée, l'adhérence peut décroître à des niveaux très faible jusqu'à ne plus combler les besoins de sécurité de ses utilisateurs en cas d'urgence (courte distance d'arrêt, suivi de virage serré...). D'autre part, l'adhérence des chaussées évolue toujours avec le temps. Cette évolution est due à ensemble de facteurs tels que l'effet du trafic par son action de polissage des granulats à la surface de la chaussée, le vieillissement du liant qui aura tendance à se durcir et ainsi gêner son décapage, les variations saisonnières par l'effet des changements de température et de la nature des débris sur les surfaces de chaussée. Ce sous-thème se subdivisera en deux parties :

- **Adhérence des chaussées en condition mouillée** : cet axe vise à déterminer les mécanismes à l'origine de l'adhérence et à comprendre comment ces mécanismes sont influencés par la présence d'eau. Le but final étant d'identifier les paramètres propres à la chaussée ayant une réelle influence sur le niveau de frottement pneu/chaussée afin de les optimiser.

- **Evolution de l'adhérence** : cet axe vise à comprendre comment les paramètres tels que le trafic, les variations saisonnières, etc. influent sur l'évolution de l'adhérence. Ceci permettra d'optimiser les paramètres intrinsèques à la chaussée pour le maintien d'un niveau suffisant d'adhérence pendant toute la durée de vie de la route.