

BÂTIMENTS, TRANSPORTS, BIODIVERSITÉ : LES APPORTS DE LA CHAIRE D'ÉCO-CONCEPTION PARISTECH – VINCI À LA VILLE DURABLE

AUTEURS : FERNANDA GOMES, ÉCOLE DES PONTS PARISTECH, LABORATOIRE NAVIER - GRÉGORY HERFRAY, MINES PARISTECH, CENTRE ÉNERGÉTIQUE ET PROCÉDÉS - HOUDA BOUJNAH, ÉCOLE DES PONTS PARISTECH, LABORATOIRE VILLE MOBILITÉ ET TRANSPORTS - ALEXANDRE HENRY, AGROPARISTECH, LABORATOIRE ÉCOLOGIE SYSTÉMIQUE ÉVOLUTION - MATHIEU RIVALLAIN, ÉCOLE DES PONTS CO-ENCADRÉ PAR MINES PARISTECH, LABORATOIRE VILLE MOBILITÉ ET TRANSPORTS - MAXIME TROCMÉ, VINCI - CHRISTOPHE GOBIN, VINCI CONSTRUCTION FRANCE

DEPUIS 2008, LA CHAIRE « ÉCO-CONCEPTION DES ENSEMBLES BÂTIS ET DES INFRASTRUCTURES » EST UN PARTENARIAT DE LONG TERME ENTRE VINCI ET TROIS ÉCOLES DE PARISTECH (MINES PARISTECH, L'ÉCOLE DES PONTS PARISTECH ET AGROPARISTECH) AYANT POUR BUT DE DÉVELOPPER LA RECHERCHE ET L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR DANS CE DOMAINE. EN 2011, AU TERME DE TROIS ANNÉES D'ACTIVITÉ, LA CHAIRE « ÉCO-CONCEPTION » PARISTECH VINCI VIENT DE FRANCHIR UNE PREMIÈRE ÉTAPE, DONT IL EST UTILE DE PRÉSENTER LES ACQUIS EN RESTITuant LA PROBLÉMATIQUE AVANT DE LES DÉVELOPPER.

MISE EN PERSPECTIVE DES PREMIERS ACQUIS

Elle s'opère en trois étapes.

LES OBJECTIFS DE LA CHAIRE

La Chaire a pour objectif d'asseoir les démarches de progrès de l'éco-conception par la consolidation de méthodes appropriées, en particulier l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Les outils de modélisation existants sont enrichis en étendant leur domaine d'application à la dimension du quartier et en abordant de manière intégrée, bâtiment (neufs et existants), transports et espaces verts dans la conception des quartiers.

Il est en effet primordial de mieux prendre en compte les aspects environnementaux dans la conception et la gestion des éco-quartiers et des infrastructures de transport.

Enfin, la Chaire contribue à créer une communauté scientifique autour de la problématique de l'éco-conception, en mutualisant les efforts de trois écoles de ParisTech et de laboratoires de recherche qui leur sont associés, et en suscitant un vrai débat au niveau français.

LES PROBLÈMES IDENTIFIÉS

Pour une mesure efficace au cours de cette première phase de vie de la chaire, il est apparu, autant aux chercheurs qu'aux opérationnels des

différents groupes miroir, qu'il était indispensable d'apporter une réponse à 5 questions essentielles :

→ Comment stabiliser les bases de données environnementales des composants élémentaires du cadre bâti ? La question de la fiabilité des bases de données environnementales Ecolinvent et INIES pose actuellement problème tant par l'échelle géographique pour la première que par les hypothèses simplificatrices de la seconde.

→ Comment prendre en compte la variation dans le temps des impacts

1- Influence de la composition chimique des aciers sur les impacts environnementaux.

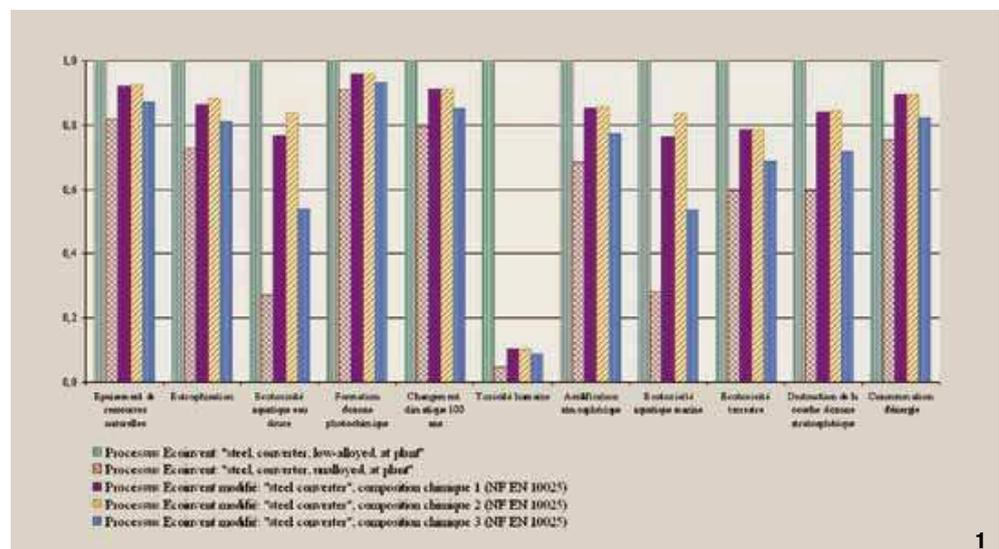
1- Influence of the chemical composition of steels on environmental impacts.

environnementaux (par exemple l'évolution environnementale horaire du mix électrique) ?

→ Comment améliorer la modélisation des déplacements, compte tenu de différentes morphologies urbaines, afin de l'intégrer dans le processus d'aide à la décision ?

→ Comment caractériser les services rendus à la ville par la biodiversité et les intégrer dans le cahier des charges urbain ?

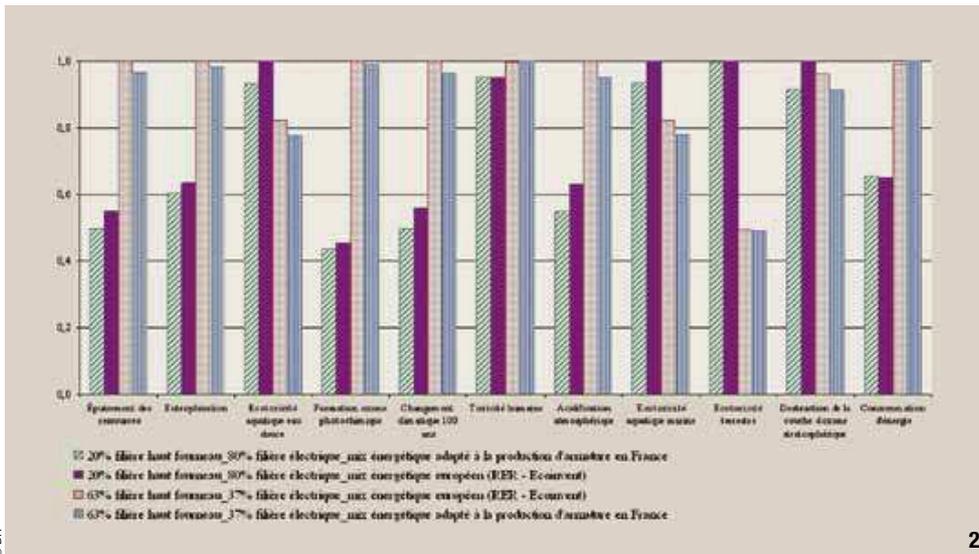
→ Comment optimiser l'éco-conception par l'ACV sous contrainte de coûts ?



L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE APPLIQUÉE AUX QUARTIERS

La sensibilisation aux problématiques environnementales a suscité la création de nombreux « éco-quartiers », sans que ce concept soit précisément étayé. Or l'importance des risques, du niveau local au niveau planétaire, justifierait une approche plus rigoureuse : les décisions prises en matière d'urbanisme ont une forte influence sur les secteurs du bâtiment et des transports, qui contribuent de manière très importante à la plupart des impacts environnementaux. L'analyse de cycle de vie (ACV) permet de répondre à cette problématique. Cet outil d'ingénierie a pour but d'évaluer les impacts environnementaux d'un système sur son cycle de vie, c'est-à-dire depuis sa fabrication jusqu'à sa fin de vie, en incluant un recyclage éventuel d'où la notion de cycle. Cette méthode a été développée d'abord dans l'industrie depuis les années 70, puis dans le secteur du bâtiment dans les années 80, et finalement étendue à l'ensemble des activités humaines. Son application aux ensembles urbains a été étudiée plus récemment, et plusieurs prototypes d'outils ont été développés durant ces dix dernières années. C'est le cas par exemple de la chaîne logicielle composée d'un modèleur graphique, ALCYONE (développé par Izuba Energies), d'un outil de simulation thermique dynamique (COMFIE), d'un outil d'ACV des Bâtiments (EQUER) et d'un outil d'ACV des quartiers, développés au Centre Energétique et Procédés de MINES ParisTech.

La figure 3a montre l'exemple d'un projet de quartier à Marne La Vallée (Cité Descartes), et la comparaison de variantes selon un diagramme radar (3b) où chaque axe correspond à un indicateur environnemental, par exemple consommation d'énergie et d'eau, contribution à l'effet de serre (bilan CO₂), génération de déchets, atteintes à la santé et la biodiversité. Le projet proposé est comparé à deux références s'inspirant du quartier Vauban à Fribourg (Allemagne) : un quartier à énergie positive (QEP) et un quartier basse énergie (QBE). Se situant entre ces deux références correspondant aux meilleures pratiques actuellement identifiées, le projet proposé pour la Cité Descartes peut être considéré comme performant du point de vue environnemental. La pratique courante des ACV est basée sur des modèles statiques, c'est-à-dire considérant des procédés invariables dans le temps.



© DR

2

LES PREMIÈRES RÉPONSES

Les travaux des chercheurs de la Chaire apportent des éléments de réponse à ces problématiques. Dans cet article sont développés les travaux de cinq des 20 doctorants ou post-doctorants de la Chaire.

Fernanda Gomes (École des Ponts ParisTech) contribue à la mise en place d'une base de données unique utilisable tant dans la construction de bâtiments que de construction de génie civil (cf revue TRAVAUX 877 de décembre 2010). Grégory Herfray (MINES ParisTech) a développé un modèle d'ACV dynamique adapté au quartier. Houda Boujnah (École des Ponts ParisTech) contribue à l'approfondissement de la fonction stationnement dans un quartier. Alexandre Henry (AgroParitech) entreprend une caractérisation de l'unité fonctionnelle dans sa dimension biodiversité. Enfin, Mathieu Rivallain (École des Ponts co-encadré par MINES ParisTech) contribue à l'optimisation de la ressource économique pour engager des actions d'éco-conception techniques au niveau d'un parc.

LES BASES DE DONNÉES ENVIRONNEMENTALES

Les bilans environnementaux se généralisent dans le domaine de la construction. Comme dans toute analyse visant à comparer des structures ou des ouvrages, il est important d'utiliser des données fiables avec une source identifiée.

L'objectif du travail réalisé entre l'équipe Structure du laboratoire Navier et la Chaire concerne les principaux matériaux de construction : béton, acier, bois, matériaux composites et polymères.

2- Influence du type de filière de production de l'acier et du mix énergétique sur les impacts environnementaux.

2- Influence of the type of steel production process and the energy mix on environmental impacts.

Un focus est fait dans ce document sur le matériau acier mais la démarche suivie reste la même quel que soit le matériau étudié. Cette démarche se décompose en une étude fine du ou des processus de fabrication, une identification des bases de données environnementales existantes, une étude des différentes méthodologies appliquées et enfin une comparaison des résultats obtenus. Il est important de comprendre et d'évaluer la variabilité d'une base à l'autre et de savoir quels sont les paramètres qui influencent le plus l'impact environnemental d'un matériau (par exemple, pour le béton il est clair que c'est le type de ciment qui influence le plus son bilan CO₂). Cela peut conduire à recréer des données environnementales plus fines et plus représentatives du secteur de la construction si besoin est. En parallèle à la démarche de la Chaire, l'Association Française de Génie Civil (AFGC) a créé le groupe « DIOGEN » en vue de construire une base de données relative aux impacts environnementaux

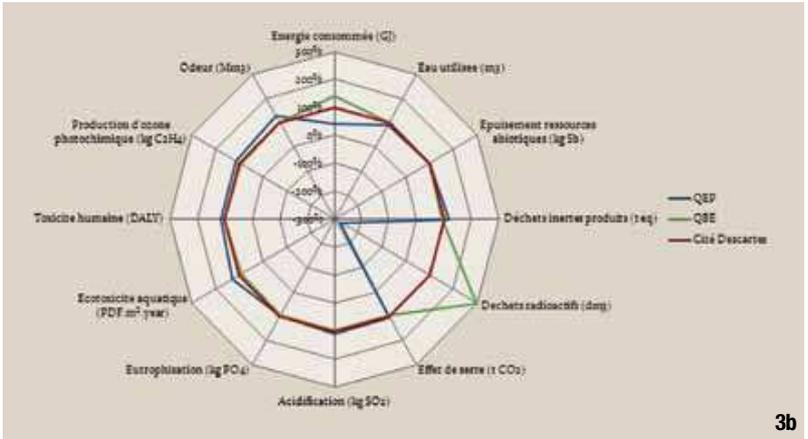
de production des matériaux utilisés en France constitutifs des ouvrages de génie civil. Ce groupe de travail, lancé en 2010, réunit tous les représentants de la profession (producteurs, entreprises, concepteurs, universités, réseau scientifique et technique du MEDDTL) en vue de réaliser une base de données spécifiques, librement accessible, autour de règles communes.

Quelques résultats relatifs au matériau acier sont présentés en figure 1. Il existe deux principales bases de données pour ce matériau : la base de la World Steel Association, qui regroupe les plus grands producteurs d'acier du monde, et la base Ecoinvent, comportant de nombreuses données génériques correspondant à des moyennes européennes ou d'origine suisse. Les résultats de la modélisation sont sensibles à certains aspects de la production de l'acier, comme par exemple le mix énergétique employé pendant la fabrication de l'acier, le pourcentage entre la filière haut fourneau et la filière électrique pour un certain produit et encore la composition chimique des aciers (alliages). La comparaison sur différents indicateurs (énergie consommée, CO₂, toxicité, épuisement des ressources...) fait apparaître des différences importantes en fonction de ces paramètres. Il est connu que les aciers pour la construction sont plutôt du type non allié, mais leur composition est plus élaborée que celle proposée par Ecoinvent.

L'objectif est donc de créer des compositions chimiques intermédiaires, en respectant la norme des aciers de construction. Quelques résultats relatifs au matériau acier sont présentés en figures 1 et 2.



3a
© ALTER STUDIOS



3b
© EQUER, WWW.IZUBA.FR

Dans la réalité, les procédés et/ou les conditions climatiques qui les influencent varient. C'est le cas en particulier de la production d'électricité, qui présente des variations saisonnières liées au chauffage et à la climatisation, des variations hebdomadaires liées aux usages professionnels, et des variations horaires liées également aux usages domestiques. L'analyse de ces variations a permis d'élaborer pour chaque usage un modèle dynamique d'évolution du mix de production (% fournis par les différentes filières) en fonction du temps et d'une température moyenne de référence (du fait des pointes de consommations induites par le chauffage électrique en saison froide).

LA PROBLÉMATIQUE DU STATIONNEMENT

Au sein des agglomérations urbaines, le stationnement pose des enjeux majeurs. Outre sa forte consommation d'espace dû à l'immobilité des véhicules

qui passent la quasi-totalité de leurs temps en arrêt, il ne fait qu'accroître les problèmes de congestion de trafic, de pollution et plus généralement de dégradation du cadre de vie. La pression sur l'offre, souvent limitée localement en quantité, augmente sans cesse avec des besoins de demande hétérogènes dans l'espace et dans le temps. S'il fallait hiérarchiser des priorités sur les études à entreprendre en matière de stationnement, la compréhension et la représentation de sa dynamique interne viennent en premier essor et constituent une nécessité absolue et urgente. Dans ce contexte, la mise sur scène de l'éco-conception du stationnement permet de proposer une meilleure qualité de service tout en réduisant ses impacts environnementaux, comment entreprendre alors cette démarche éco-conçue et par quel outils la mettre en place ?

Cette thèse réalisée au sein du laboratoire « Ville Mobilité Transport » a pour objet de fournir une aide à la

- 3a- Exemple de projet.
- 3b- Comparaison de trois variantes par ACV.
- 4- Analyse systémique du stationnement.

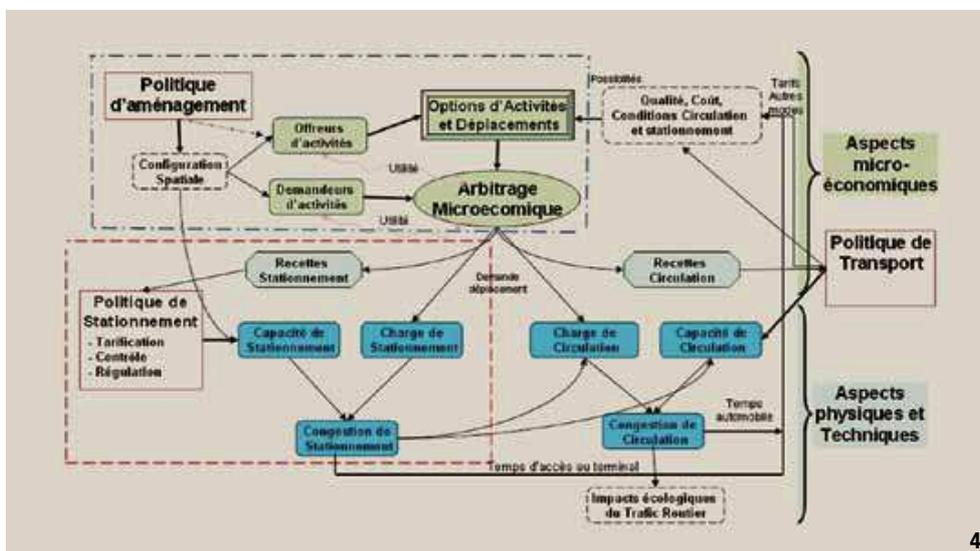
- 3a- Example of a project, source.
- 3b- Comparison of three variants by LCA.
- 4- Systemic analysis of parking.

d'évaluer l'ensemble de ses impacts environnementaux tout en mettant en évidence les interactions avec la circulation routière. L'enjeu à terme est de concevoir, par quartier et en termes d'infrastructure et de modes de régulation (contrôle, tarification), une offre adaptée aux besoins, à la préservation de l'environnement et qui garantie un équilibre durable.

La réalisation a une analyse systémique de stationnement a permis de dégager l'ensemble des composantes du système (offre-usage-demande), sa physionomie interne et ses mécanismes de fonctionnement, et aussi de tracer ses interactions avec les réseaux viaires (notamment la capacité routière) et les politiques de transport et d'aménagement (figure 4).

Le modèle considère trois échelles spatiales : une échelle « microscopique » pour les conditions très fines d'usage d'une place, en fonction de la géométrie dans son environnement immédiat, une échelle « mésoscopique » pour évaluer localement l'adéquation entre d'une part les activités présentes dans une zone (ex. quartier) et en conséquence les besoins, et d'autre part les possibilités locales, enfin une échelle « macroscopique » pour le fonctionnement d'un système de stationnement sur l'ensemble d'une agglomération, en intégrant les fonctions propres des zones et les possibilités de report dans l'espace et dans le temps entre zones, entre lots de stationnement et, a priori entre mode de déplacement.

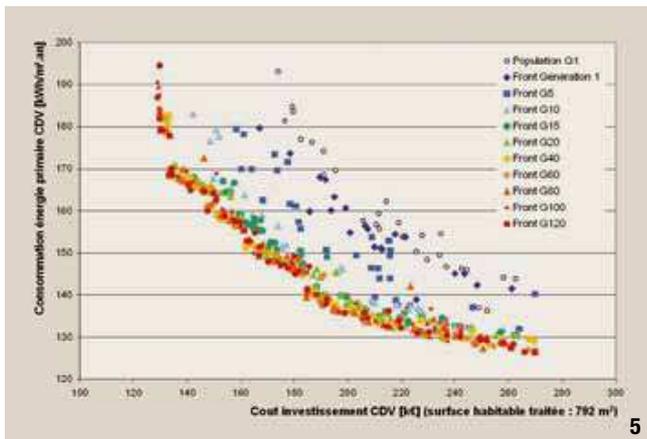
décision pour la conception et la gestion de stationnement en milieu urbain par le développement d'un modèle offre-demande afin de reproduire les mécanismes internes du système et



4
© DR

LA BIODIVERSITÉ DANS L'ÉCO-CONCEPTION DES QUARTIERS

La préservation de la biodiversité, en particulier en ville, est un enjeu essentiel dans l'éco-conception des quartiers, mais les décideurs manquent d'outils.



5
© DR

La thèse réalisée au Laboratoire Écologie Systématique et Évolution à Orsay (Université Paris Sud 11) a pour objectif d'apporter des réflexions scientifiques, des méthodes de travail et des outils sur ces questions.

Les aménagements en faveur de la biodiversité dans les éco-quartiers existants ou en projet ont été étudiés en France et dans d'autres pays d'Europe. Parmi les principales mesures mises en œuvre, on retrouve la préservation des éléments naturels majeurs existants, une réflexion dans le choix des plantes à utiliser, l'augmentation des surfaces d'espaces verts (au sol et sur les bâtiments) et des campagnes de sensibilisation des résidents.

Une des premières questions a été de savoir quelle biodiversité est nécessaire ou désirée en ville et comment la mesurer. Les indicateurs de biodiversité sont principalement basés sur le nombre d'espèces et leur abondance dans un territoire donné. Mais il est surtout important de prendre en compte les caractéristiques des espèces, c'est-à-dire si elles sont rares, locales ou exotiques, leurs fonctions dans l'écosystème et les services écosystémiques

5- Un nécessaire compromis entre le coût d'investissement et la performance énergétique en rénovation.

5- A necessary compromise between capital costs and energy efficiency in renovation .

qu'elles peuvent rendre. On peut alors parler de biodiversité fonctionnelle. Utiliser des indicateurs centrés sur les processus écologiques plutôt que sur la quantité d'espèces est alors pertinent. Un nouvel outil, le Profil-Biodiversité, est actuellement appliqué à titre expérimental sur la Cité Descartes afin de le valider scientifiquement. Il s'agit du premier outil d'évaluation, de comparaison et de suivi de la progression de la biodiversité, permettant d'estimer le potentiel en biodiversité du site et de d'évaluer au cours du temps l'effet de mesures facilement réalisables. Cet outil

prend en compte cinq leviers d'action favorables à la biodiversité : la défragmentation du territoire, la réduction des intrants, les biotopes, les ressources, et les échanges.

Les nouveaux quartiers, dont les éco-quartiers, contribuent pour la plupart à l'étalement urbain, synonyme de destruction des milieux naturels et semi-naturels en périphérie des villes. Pour étudier cette problématique, une modélisation par système multi-agents est réalisée. Cette modélisation vise à constituer un outil d'aide à la décision en permettant aux acteurs concernés de prendre conscience des intérêts de chacun, de dialoguer sur le sujet de la biodiversité et de trouver un compromis satisfaisant.

LA RÉHABILITATION DU PARC EXISTANT

Le taux de renouvellement moyen du parc existant est inférieur à 1 % par an. Il est donc essentiel de travailler sur la rénovation pour atteindre des objectifs environnementaux comme la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. D'autant plus que des projets de démonstration ont démontré qu'il est parfois possible d'atteindre un facteur 10 par la réduction des besoins en énergie, l'efficacité des équipements et l'intégration de la production d'énergie renouvelable.

Du point de vue de l'aide à la conception, si les outils de simulation existants permettent l'évaluation de scénarios, l'optimisation de programmes de rénovation, ciblant les mesures à mettre en œuvre et leur phasage dans le temps, demeure une tâche complexe à appréhender pour les professionnels qui procèdent généralement par simulations successives, guidées par l'expérience. Au sein de la Chaire, des méthodes d'optimisation multicritère sont alors développées dans le cadre d'une colla-

boration entre l'institut Navier de l'École des Ponts ParisTech et le CEP de MINES ParisTech. Des algorithmes génétiques ou la programmation dynamique sont mis en œuvre pour optimiser simultanément la composition et le phasage dans le temps des actions de réhabilitation. Les mesures de réhabilitation ciblent l'enveloppe de bâtiment pour la réduction des besoins (isolation thermique, dimension des ouvertures), le remplacement des équipements de ventilation et de chauffage, la production d'eau chaude sanitaire solaire. Pour chacune de ces mesures, différentes variantes sont considérées.

Par exemple, la figure 5 représente les « fronts de Pareto » obtenus par l'étude de la réhabilitation séquentielle d'un petit bâtiment collectif de 10 logements. Résultats d'une optimisation multicritère, les fronts (de différentes couleurs) représentent les solutions optimales obtenues aux différentes générations issues d'un algorithme génétique.

Au fil des générations, on constate une amélioration de la qualité des solutions, tant sur le plan de leurs performances que de leur étalement sur la surface de compromis.

Ce graphique illustre explicitement la nécessité d'un compromis ; il n'est pas possible de minimiser à la fois la consommation d'énergie et le coût des travaux de réhabilitation. Plus on cherche à réduire la consommation sur le cycle de vie, plus la réhabilitation coûte cher. Les surfaces de compromis obtenues à l'issue de l'optimisation permettent aux décideurs d'ajuster les investissements pour maximiser les bénéfices en termes de performance énergétique et de bilan environnemental, sur le cycle de vie. □

Pour en savoir plus :
www.chaire-eco-conception.org

ABSTRACT

BUILDINGS, TRANSPORT AND BIODIVERSITY: THE CONTRIBUTIONS OF THE PARISTECH – VINCI ECO-DESIGN CHAIR TO THE SUSTAINABLE CITY

PARISTECH : F. GOMES, G. HERFRAY, H. BOUJNAH, A. HENRY, M. RIVALLAIN
VINCI : M. TROCMÉ, C. GOBIN

The "Building and Infrastructure Eco-design" chair is a long-term partnership established in 2008 between VINCI and three ParisTech schools (MINES ParisTech, Ecole des Ponts ParisTech and AgroParisTech) with a view to developing research and higher education in this field. In 2011, after three years in activity, the ParisTech - VINCI "Eco-design" chair recently completed a first stage, for which we outline the approach and describe the achievements in detail. □

EDIFICIOS, TRANSPORTES, BIODIVERSIDAD: LAS APORTACIONES DE LA CÁTEDRA DE ECODISEÑO PARISTECH – VINCI A LA CIUDAD SOSTENIBLE

PARISTECH : F. GOMES, G. HERFRAY, H. BOUJNAH, A. HENRY, M. RIVALLAIN
VINCI : M. TROCMÉ, C. GOBIN

Desde 2008, la cátedra "Ecodiseño de conjuntos de edificios y de infraestructuras" es una colaboración de largo plazo entre VINCI y tres escuelas de ParisTech (MINES ParisTech, la École des Ponts ParisTech y AgroParisTech) que tiene como objetivo desarrollar la investigación y la enseñanza superior en este ámbito. En 2011, al término de tres años de actividad, la cátedra "Ecodiseño" ParisTech VINCI acaba de pasar una primera etapa, y es conveniente presentar sus experiencias exponiendo la problemática antes de desarrollarlas. □