



HAL
open science

Un outil de diagnostic des potentialités environnementales des enveloppes dans le cadre d'une Opération Programmée d'Amélioration énergétique et Thermique du Bâtiment (OPATB)

Daniel Siret, Marjorie Musy, Fabien Ramos, Lamia Rouleau-Tiraoui,
Dominique Groleau, Olivier Balaÿ, Christian Marenne, Mohamed Benzerzour,
Nicolas Rémy, Erwann Houzay, et al.

► To cite this version:

Daniel Siret, Marjorie Musy, Fabien Ramos, Lamia Rouleau-Tiraoui, Dominique Groleau, et al.. Un outil de diagnostic des potentialités environnementales des enveloppes dans le cadre d'une Opération Programmée d'Amélioration énergétique et Thermique du Bâtiment (OPATB). 2004. halshs-00575923

HAL Id: halshs-00575923

<https://shs.hal.science/halshs-00575923v1>

Submitted on 11 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LABORATOIRE CERMA – UMR CNRS 1563
École d'Architecture de Nantes
Rue Massenet, BP 81931, 44319 Nantes cedex 3
Tél. 02 40 59 43 24

**Un outil de diagnostic des potentialités
environnementales des enveloppes dans le
cadre d'une Opération Programmée
d'Amélioration énergétique et Thermique
du Bâtiment (OPATB)**

*A Tool for the Diagnosis of the environmental
Properties of urban Facades within the
framework of French OPATB*

RAPPORT FINAL – 24 DECEMBRE 2004

Daniel SIRET
Marjorie MUSY, Fabien RAMOS, Lamia ROULEAU-TIRAOU
Dominique GROLEAU, Olivier BALAY, Christian MARENNE
Mohamed BENZERZOUR, Nicolas REMY, Erwann HOUZAY, Guillaume MOREAU

CONVENTION N° 02.04.135 ADEME / CNRS
Établie dans le cadre de l'appel d'offre ADEME / PUCA
« Qualité énergétique, environnementale
et sanitaire : Préparer le bâtiment à l'horizon 2010 »
À compter du 31 décembre 2002

Responsable ADEME : Didier CHEREL

**Un outil de diagnostic des potentialités
environnementales des enveloppes dans le
cadre d'une Opération Programmée
d'Amélioration énergétique et Thermique
du Bâtiment (OPATB)**

*A Tool for the Diagnosis of the environmental
Properties of urban Facades within the
framework of French OPATB*

RAPPORT FINAL – 24 DECEMBRE 2004

Ont participé à la recherche (par ordre alphabétique) :

Olivier BALAY

Enseignant Chercheur, Ecole d'Architecture de Grenoble, Laboratoire CRESSON
Données sonores

Mohamed BENZERZOUR

Doctorant, Laboratoire CERMA
Relevés in situ

Dominique GROLEAU

Chercheur, Laboratoire CERMA
Données solaires

Erwann HOUZAY

Stagiaire, ESRI-France et Laboratoire CERMA
Calculs d'intervisibilité

Christian MARENNE

Enseignant chercheur, Ecole d'Architecture de Nantes, Laboratoire CERMA
Données solaires, inventaire des enveloppes

Guillaume MOREAU

Enseignant chercheur, Ecole Centrale de Nantes, Laboratoire CERMA
Modélisation géométrique

Marjorie MUSY

Chercheur, Laboratoire CERMA
Co-encadrement de la recherche, simulations aérodynamiques, données énergétiques

Fabien RAMOS

Chercheur post-doctorant, Laboratoire CERMA
Spécifications du SIG, développements informatiques

Nicolas REMY

Chercheur, Ecole d'Architecture de Grenoble, Laboratoire CRESSON
Données sonores

Daniel SIRET

Chercheur, Laboratoire CERMA
Définition, coordination et gestion de la recherche

Lamia ROULEAU-TIRAOUÏ

Chercheur contractuel, Laboratoire CERMA
Analyse des procédures et techniques de réhabilitation

1. Sommaire

2. Introduction	5
3. Contexte, objectifs et mise en œuvre	7
3.1 Contexte	7
3.1.1 La réhabilitation du parc de constructions en centre ancien	7
3.1.2 Le dispositif des OPATB	9
3.1.3 L'apport d'un système d'information géographique.....	9
3.2 Objectifs de la recherche	11
3.3 Mise en œuvre	12
4. La réhabilitation de logements : procédures et mises en œuvre	13
4.1 Les enjeux de la réhabilitation.....	14
4.1.1 Les enjeux sociaux.....	14
4.1.2 Les enjeux culturels	15
4.1.3 Les enjeux environnementaux	15
4.1.4 Les enjeux d'ordre économique	16
4.1.5 Les enjeux d'ordre politique et organisationnel	16
4.2 Les procédures de réhabilitation	17
4.3 Politique d'incitation financière à la réhabilitation	18
4.4 Cadre réglementaire général	20
4.5 Cadre réglementaire spécifique aux conditions environnementales	21
4.5.1 Caractéristiques thermiques.....	21

4.5.1.1	Situation actuelle	21
4.5.1.2	Nouvelle directive européenne	22
4.5.2	Caractéristiques acoustiques	23
4.5.3	Conditions sanitaires et ventilation.....	23
4.5.4	Conditions d'éclairage.....	23
4.6	Les OPAH et OPATB	24
4.6.1	Caractéristiques.....	24
4.6.2	Les démarches de conduite des OPAH et OPATB	25
4.6.2.1	Phase d'étude préalable	26
4.6.2.2	Phase d'étude pré-opérationnelle	26
4.6.2.3	Phase opérationnelle.....	28
4.6.2.4	Élaboration des cahiers des charges OPATB	32
5.	Indicateurs environnementaux et techniques de réhabilitation	34
5.1	Indicateurs.....	34
5.1.1	Les indicateurs thermiques et énergétiques.....	35
5.1.1.1	Consommation d'énergie	35
5.1.1.2	Le confort d'été.....	36
5.1.1.3	Indicateurs de confort thermique	36
5.1.1.4	Indicateurs d'efficacité de la réhabilitation	37
5.1.2	Indicateurs acoustiques.....	37
5.1.3	Les indicateurs liés à l'effet de serre.....	37
5.1.4	Les sources de données relatives au projet de réhabilitation	38
5.1.4.1	Sources de données sur le bâtiment	38
5.1.4.2	Données sur les consommations d'énergie.....	40
5.2	Techniques de réhabilitation pour l'amélioration thermique, énergétique et acoustique	41
5.2.1	L'amélioration thermique et énergétique.....	41
5.2.1.1	Interventions sur l'enveloppe.....	41
5.2.1.2	Installation de dispositifs solaires	43
5.2.2	L'amélioration des conditions d'aération et d'humidité	44
5.2.3	L'amélioration des conditions d'éclairage	45
5.2.4	L'amélioration acoustique	46
5.2.4.1	Isolation des bruits extérieurs.....	46
5.2.4.2	Isolation des bruits intérieurs.....	46
5.2.5	Esquisse des relations entre techniques d'intervention et indicateurs environnementaux.....	47
6.	Développement d'un outil de diagnostic environnemental des enveloppes dans le cadre d'une OPATB	49
6.1	Un SIG 3D pour l'assistance à la conduite d'une OPATB	50
6.1.1	Définitions	50
6.1.2	Pertinence d'un SIG dans le cadre d'une OPATB.....	51
6.1.2.1	Phase d'étude préalable	51
6.1.2.2	Phase d'étude pré-opérationnelle	52
6.1.2.3	Phase opérationnelle.....	53
6.1.3	Nécessité d'intégrer la troisième dimension.....	54

6.2	Proposition d'un système	55
6.2.1	Les SIG 3D existants.....	55
6.2.1.1	Tour d'horizon.....	55
6.2.1.2	Solutions 3D des principaux éditeurs de SIG	56
6.2.2	L'environnement de développement ArcGIS	58
6.2.2.1	Présentation	58
6.2.2.2	Visualisation 3D et interrogation des données	60
6.2.2.3	Préparation des données avec ArcMap	61
6.2.2.4	Acquisition de données sur site	62
6.2.3	Organisation générale du système proposé	63
6.3	Le module SIG-CERMA	64
6.3.1	Le modèle de données.....	64
6.3.1.1	Le modèle architectural	65
6.3.1.2	Le modèle géométrique.....	69
6.3.2	Import et export des données	72
6.3.3	Analyse et visualisation des données	73
6.3.4	Interfaces avec l'utilisateur	73
6.3.4.1	Interfaces intégrées à l'environnement ArcGIS	74
6.3.4.2	Les interfaces indépendantes	74
6.3.5	Gestion des données	75
6.4	Les données.....	76
6.4.1	Données concernant le bâti	76
6.4.1.1	Point de vue physique.....	76
6.4.1.2	Point de vue patrimonial.....	78
6.4.2	Données environnementales	79
6.4.2.1	Données solaires	79
6.4.2.2	Données aérodynamiques.....	82
6.4.2.3	Données énergétiques.....	84
6.4.2.4	Données sonores.....	88
6.4.2.5	Données d'intervisibilité	89
6.4.3	Généralisation	91
6.4.3.1	Information attributaire.....	91
6.4.3.2	Information surfacique	91
6.4.3.3	Information volumique.....	92
6.4.3.4	Informations illustratives.....	93
7.	Évaluation de l'outil développé	95
7.1.1	L'OPATB sur le secteur Ile de Nantes.....	95
7.1.2	Modalités d'intégration de l'outil dans le cadre de l'étude pré-opérationnelle	97
7.1.3	Intégration de l'outil dans le cadre de l'étude opérationnelle	98
8.	Bilan et perspectives	99
8.1	Bilan	100
8.1.1	Rappel des objectifs initiaux et moyens mobilisés	100
8.1.2	Résultats	101
8.1.2.1	L'outil prototype.....	101
8.1.2.2	L'expérience applicative	102
8.1.3	Publications et valorisation de la recherche	103
8.1.3.1	Publications et communications.....	104
8.1.3.2	Valorisation	104

8.2 Perspectives	106
8.2.1 Perspectives générales	106
8.2.2 Application à l'OPATB Ile de Nantes.....	106
9. Annexe : analyse des identités sonores de trois quartiers de l'OPATB de Nantes	109
9.1 Introduction	109
9.1.1 Préambule	109
9.1.2 Objectif et méthode	110
9.2 Résultats	112
9.2.1 Le site République	112
9.2.2 Les tours Vulcain	120
9.2.3 Le quartier Mangin.....	121
Table des figures	125

2. Introduction

Le projet de recherche qui fait l'objet du présent rapport est centré sur la question de la prise en compte des facteurs environnementaux dans la réhabilitation du parc urbain existant. Dans ce cadre et dans une logique de développement durable, il s'agit avant tout de favoriser la concertation et la négociation des acteurs autour des préoccupations environnementales de manière à aboutir à des prises de décision pleinement conscientes dans ce domaine.

Pour répondre à ces différents enjeux, nous avons proposé de constituer un outil d'analyse des potentialités environnementales des enveloppes des bâtiments dans le cadre des opérations programmées d'amélioration énergétique et thermique des bâtiments (OPATB) mises en place par l'ADEME et l'ANAH. Cet outil doit fournir un diagnostic des qualités environnementales des enveloppes et de leur potentiel d'amélioration suivant différents critères : thermiques, énergétiques, aérauliques, acoustiques mais aussi sociaux et patrimoniaux. Il ne produit pas de solution d'optimisation mais propose un support de sensibilisation et de concertation entre les acteurs, et une aide à la décision dans un processus de requalification.

Ce rapport final est organisé en 6 chapitres principaux présentant successivement :

- le contexte, les objectifs et la mise en œuvre de la recherche (chapitre 3),
- les procédures et mises en œuvre des opérations de réhabilitation (chapitre 4),
- les principaux indicateurs environnementaux ainsi que les techniques courantes de réhabilitation de bâtiments (chapitre 5),
- le développement de l'outil proposé (outil de diagnostic environnemental des enveloppes dans le cadre d'une OPATB, chapitre 6),
- l'évaluation de cet outil (chapitre 7),
- le bilan et les perspectives de la recherche (chapitre 8).

L'annexe (chapitre 9) présente les attendus et résultats de l'analyse des identités sonores de trois quartiers de l'OPATB de Nantes.

3. Contexte, objectifs et mise en œuvre

3.1 Contexte

3.1.1 La réhabilitation du parc de constructions en centre ancien

En 1997, le secteur résidentiel et tertiaire consommait plus de 40 % de l'énergie produite en France, et était responsable de 17,5 % des émissions de gaz à effet de serre, avec une croissance de cette part estimée à plus de 2 % à l'horizon 2010 (tableau 1 ci-après). Par ailleurs, on estime que 60 % de la surface du parc de résidences principales projeté en 2050 sont déjà construits aujourd'hui (1). On sait également, selon les données générales de l'ANAH (2), que la plupart des immeubles collectifs existants ont été construits dans les années 1962-1975

1. Selon le rapport de l'Assemblée Nationale n° 3415, citant une étude de J-P. Traisnel. Voir le site : <http://www.assemblee-nationale.fr/rap-oecst/energies/r3415-2.asp>

2. Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (ANAH), *Données générales*, Déc. 2001

(notamment sous la forme de grands ensembles périurbains), c'est-à-dire avant le premier choc pétrolier.

Rapporté au mètre carré habitable, le logement ancien émet actuellement jusqu'à deux fois plus de gaz à effet de serre que le logement neuf (3). Cependant, la construction de logements neufs étant généralement concomitante à l'étalement urbain, les flux de transport générés par cet étalement conduisent à un doublement des émissions de gaz à effet de serre si l'on compare un logement de centre ville à un logement pavillonnaire de grande couronne (phénomène identique pour le neuf et l'ancien). Enfin, sur un plan plus qualitatif la division et la transformation des logements anciens en appartements locatifs conduit à une prolifération des pièces humides dont la ventilation non maîtrisée peut être une source d'insalubrité et d'importants désordres des constructions.

	Consommation d'énergie 1997	Émissions de gaz à effet de serre 1997 et croissance à l'horizon 2010	
Industrie	29 %	26 %	-6,5 %
Transport	26 %	22 %	+10,3 %
Résidentiel et tertiaire	43 %	17,5 %	+2,1 %
Agriculture et forêt	1,5 %	18 %	+0,3 %

Tableau 1. Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre
(Source : <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>)

Ces quelques données illustrent bien les enjeux liés à la requalification du parc résidentiel et tertiaire existant dans une perspective environnementale. Il s'agit tout à la fois d'assurer la pérennité de ces constructions et des systèmes énergétiques correspondant jusqu'à l'horizon 2050 au moins ; de favoriser l'attractivité du parc, notamment en termes de confort, de manière à freiner l'étalement urbain (4) ; de réhabiliter les logements de manière à diminuer la consommation énergétique globale du secteur résidentiel d'une part, et à rapprocher les consommations et rejets du parc ancien des niveaux constatés dans le parc neuf d'autre part.

Ces objectifs sont difficiles à concrétiser pour différentes raisons. En premier lieu, le parc de logements anciens échappe toujours à la réglementation (notamment thermique) qui s'applique aux logements neufs ; seule l'incitation peut donc être motrice dans ce domaine et celle-ci ne peut fonctionner correctement qu'avec une forte sensibilisation des acteurs concernés. Une autre raison est précisément la multiplicité des acteurs en jeu (propriétaires occupants, locataires, bailleurs publics) et leur forte diversité sociale, qui conduit à un certain émiettement des actions (5), voire à des conflits d'intérêt dans le cadre d'actions concertées. Parallèlement, le

3. Voir *A quoi ressemblerait un monde 'énergétiquement vertueux' ?*, J-M. Manicore, mai 2001, citant J-P. Traisnel. Voir le site : <http://manicore.com/documentation/sobriete.html>

4. Selon les Données générales de l'ANAH (op. cit), si les ménages apprécient dans l'ensemble leur logement, les moins satisfaits sont précisément dans les logements anciens, les copropriétés et le secteur locatif privé.

5. Selon le rapport d'activités de l'ANAH 2000, les demandeurs de subventions auprès de l'ANAH sont à plus de 75 % des propriétaires individuels et, parmi ceux-ci, majoritairement des retraités.

parc ancien est marqué par une grande diversité et une certaine complexité des constructions, sur les plans morphologiques (tissus denses, stratifications urbaines disparates), physique (hétérogénéité des constructions) et sociale. Enfin, une dernière raison concerne la valeur patrimoniale de certaines constructions en centre urbain ancien, voire des sites et espaces ouverts eux-mêmes. La question de la requalification environnementale doit donc tenir compte du facteur patrimonial qui peut notablement la complexifier.

3.1.2 Le dispositif des OPATB

Pour répondre à ces enjeux, l'ADEME et l'ANAH et deux ministères ont proposé de nouveaux dispositifs incitatifs : les Opérations Programmées d'Amélioration Thermique et énergétique des Bâtiments (OPATB).

Ces opérations de partenariat entre les collectivités locales et des organismes d'Etat sont conçues sur le principe des OPAH (opérations programmées d'amélioration de l'habitat), auxquelles elles ajoutent un fort volet environnemental. Les collectivités qui mettront en place ces opérations « seront les véritables pionnières d'une politique locale visant l'amélioration durable de la qualité de l'environnement et le bien-être de la communauté », indique la brochure d'appel d'offre OPATB de l'ADEME (page 2). Au-delà du slogan, il semble en effet judicieux d'inciter les collectivités, les communes en particulier, à sensibiliser leurs habitants aux enjeux du développement durable et à assumer le contrôle des actions dans ce domaine. Dans le même élan, la recherche et l'innovation ont tout intérêt à se greffer sur ces dispositifs et à soutenir les collectivités dans leur démarche.

3.1.3 L'apport d'un système d'information géographique

La réhabilitation environnementale du parc urbain ancien est un enjeu dont les propriétaires privés comme les décideurs peuvent être en partie inconscients. La complexité morphologique et physique des constructions, le nombre et la variété des acteurs concernés, peuvent rendre inapplicables des procédés constructifs par ailleurs éprouvés. Il ne s'agit dès lors moins d'un problème technique que d'un problème d'organisation, d'animation et de gestion de projet.

Se pose donc le problème de la concertation et de la sensibilisation des acteurs aux questions environnementales. C'est le rôle dévolu et le « talent » consenti aux collectivités, pour reprendre les termes de la brochure sur les OPATB (page 10). Ce talent passe notamment par la mise en oeuvre d'outils adéquats de sensibilisation, de formation et de négociation. Dans le cadre du développement durable, les questions techniques se juxtaposent aux questions de gouvernance urbaine, qui placent le citoyen au centre de la démarche et cherchent à favoriser les décisions issues de consensus pleinement conscients.

La concertation ne se décrète sans doute pas mais elle s'organise, notamment en amont, par un partage efficace de l'information disponible, comme support de médiation (Figure 1). Or, en matière environnementale, l'information apparaît difficile à gérer, à manipuler et à communiquer : elle implique en effet des quantifications physiques peu intuitives ; elle se développe dans l'espace (les surfaces des enveloppes des constructions et leur voisinage) et dans le temps puisqu'il s'agit d'évaluer des phénomènes interagissant sur des périodes allant du

quart d'heure (rythme des événements sonores par exemple) au mois ou à l'année (solicitations climatiques). Les supports graphiques ordinaires sont mal adaptés pour de telles informations et certainement peu efficaces lorsqu'il s'agit de superposer des critères aux échelles spatiales et temporelles différentes.



Figure 1. Un support de médiation est nécessaire à la concertation et à la négociation

Les systèmes d'informations géographiques (SIG) sont des outils communs des collectivités territoriales. Selon une récente étude, 100 % des communes de plus de 100 000 habitants avaient mis en place un SIG en 2002, contre 81,4 % des communes entre 50 000 et 100 000 habitants (6). Les solutions 2D (cartographie en deux dimensions) évoluent désormais pour prendre en compte les trois dimensions de l'espace (7), tandis que les scanners capables de numériser des bâtiments entiers se démocratisent (8).

Les SIG 2D et bientôt 3D présentent de multiples intérêts pour les communes, tant sur le plan de la gestion des services techniques, qu'au niveau de la communication (mise en réseau du SIG) et de la prospective. Par leurs possibilités de traitement de l'information et de représentation, ces outils apparaissent parfaitement adaptés à la gestion des informations environnementales. Différentes recherches proposent aujourd'hui de cartographier les qualités environnementales de quartiers urbains. Il semble tout aussi naturel désormais de faire évoluer ces bases d'informations vers une représentation 3D des enveloppes urbaines, et d'insérer dans les systèmes toutes les informations susceptibles de qualifier leurs potentiels environnementaux.

6. Chiffres de l'Observatoire géomatique 2002, cité par la revue TechCités n° 26, mars 2002

7. Voir Les technologies SIG dans l'aménagement : vers la 3D, revue urb.A0, n°10, mai 2002

8. Voir *L'état de l'art des scanners 3D de grande dimension*, revue urb.A0, n°8, janvier 2002

3.2 Objectifs de la recherche

Compte tenu des éléments exposés précédemment, le présent projet de recherche propose d'utiliser la technologie des SIG 3D afin de constituer un outil d'analyse des potentialités de réhabilitation environnementale des enveloppes dans le cadre d'une OPATB. Cet outil doit fournir un diagnostic des qualités environnementales des enveloppes construites (et des espaces ouverts publics ou privés attenants) et de leur potentiel d'amélioration suivant différents critères : thermiques, lumineux, acoustiques mais aussi sociaux et patrimoniaux. Il ne propose pas de solution d'optimisation mais se place comme support de sensibilisation et de concertation entre les acteurs (collectivité, particulier, maîtrise d'œuvre) et comme aide à la décision dans un processus de requalification.

On donne trois grands objectifs au présent projet :

- Construire un prototype opérationnel du SIG et l'appliquer sur un ensemble de situations existantes représentatives des problèmes de réhabilitation en zone urbaine ancienne (îlots choisis dans le secteur d'étude de l'OPATB mise en place à Nantes),
- Produire les informations environnementales utiles pour l'analyse des situations choisies (modélisations et simulations numériques, mesures et observations in situ), et définir les méthodes de visualisation adaptées au contexte d'une opération concertée entre experts et non experts,
- Mettre en oeuvre l'outil en situation réelle à Nantes, et évaluer sa pertinence dans les processus de concertation et de décision d'une OPTAB.

L'outil doit exposer les caractéristiques environnementales des enveloppes et leurs potentiels d'amélioration, de manière à permettre aux acteurs de négocier au cas par cas et, si nécessaire, d'engager des études plus approfondies sur les points clés. Les questions environnementales sont abordées d'une manière large. Il ne s'agit pas ici d'imposer un savoir expert sans légitimité et sans prise avec les contraintes multiples de la réalité, mais de permettre aux acteurs de constituer l'ensemble des données à partir desquelles ils peuvent opérer des choix ciblés. La diversité des situations environnementales, morphologiques et sociales du parc existant incite en effet à adopter une voie prudente mettant en avant la négociation et la concertation plutôt que l'optimisation.

L'outil proposé sera de ce fait avant tout un outil de diagnostic mettant en avant les potentialités d'amélioration des enveloppes suivant différents critères : apports solaires au cours des différentes périodes de l'année, sur les parois vitrées et sur les maçonneries ; potentialités d'éclairage naturel ; potentiels de ventilation (systèmes pression/dépression sur les façades) ; consommations énergétiques ; qualification des événements sonores au cours du temps, etc.

A ces critères environnementaux, nous ajoutons les indications d'usage des bâtiments, au moins par niveau, en indiquant notamment les périodes d'utilisation privilégiées (habitat, commerces et bureaux ont des rythmes alternés), ainsi qu'une estimation de la valeur patrimoniale des enveloppes dans leur ensemble (architecture) et des dispositifs constructifs qui les composent (maçonneries, châssis de fenêtres, balcons, corniches, etc.).

Cette question du patrimoine apparaît en effet étroitement liée à celle de la réhabilitation. Faut-il par exemple remplacer un châssis du XVII^e siècle en bon état qui ne supporterait pas l'installation d'un double vitrage ? Ces questions posées de longue date, notamment par l'ANAH (adaptation des bâtiments anciens aux conditions actuelles de confort), connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt. Le cadre conceptuel du développement durable invite en effet à prendre des décisions « sans regrets », ce qui implique à la fois des décisions pleinement conscientes, mais également mesurées et équilibrées entre les multiples facettes de la qualité architecturale et urbaine. Les exigences environnementales, par l'urgence qui caractérise les enjeux planétaires fortement médiatisés, s'imposent parfois d'une manière trop exclusive et trop brutale.

La prise en compte de la valeur patrimoniale des constructions peut fournir un contrepoids motivant dans le cadre d'une opération d'amélioration de l'habitat en centre urbain ancien. Elle permet d'envisager des techniques d'amélioration des enveloppes restant respectueuses des procédés constructifs anciens, et sachant concilier qualité environnementale et qualité patrimoniale des constructions.

3.3 Mise en œuvre

Une première phase a consisté en l'étude des procédures réglementaires et des modalités générales d'organisation des opérations de réhabilitation de logements. Elle est rapportée dans le chapitre 4 du présent rapport (La réhabilitation de logements : procédures et mises en oeuvre).

La prise en compte des problématiques environnementales dans les opérations de réhabilitation a fait l'objet d'une deuxième phase d'investigation bibliographique présentée dans le chapitre 5 (Indicateurs environnementaux et techniques de réhabilitation). Ce chapitre développe un état de l'art des principaux indicateurs utilisés pour mesurer les performances des enveloppes construites (indicateurs énergétiques, thermiques, acoustiques, et autres), ainsi que des techniques d'intervention courantes en bâtiment ancien.

Le chapitre 6 expose les spécifications et les principes de développement d'un outil de diagnostic environnemental des enveloppes dans le cadre d'une OPATB. Il s'agit du corps principal de la recherche. Nous développons dans ce chapitre la structure du modèle de données, les principaux choix technologiques, les méthodes d'obtention des données environnementales par simulation et par observation in situ, ainsi que les modalités d'intégration de ces données au système.

Les derniers chapitres concernent l'évaluation de l'outil proposé dans le cadre de l'OPATB de Nantes (chapitre 7), puis le bilan et les perspectives de la recherche (chapitre 8). L'annexe (chapitre 9) présente les attendus et résultats de l'analyse des identités sonores de trois quartiers du secteur OPATB.

4. La réhabilitation de logements : procédures et mises en oeuvre

L'utilisation des termes « réhabiliter » et « réhabilitation » dans le sens de remise en état d'habitation remonte, d'après Le Petit Robert, à 1966. S'ils sont assez récents, ces termes renvoient à des pratiques anciennes d'amélioration et de renouvellement du cadre bâti. Les raisons qui poussent à la réhabilitation d'un bâtiment peuvent être multiples : obsolescence ou usure technique du bâtiment et de ses équipements ou évolution des façons d'occuper l'espace et usages qui rendent caduque la configuration spatiale existante. L'enjeu de la réhabilitation n'est donc pas seulement technique. Ainsi P. Joffroy (9) souligne que le fait de rendre habitable un logement, un bâtiment ou un quartier, c'est actualiser et améliorer les façons de les habiter au sens physique, psychologique et social du terme. La réhabilitation nécessite par conséquent une réflexion transversale entre les aspects techniques, culturels, économiques et sociaux. En dehors des considérations d'intégration architecturale et urbaine, il s'agit également de prendre en compte les modes de vie et les relations entre les individus dans un lieu donné. En effet, l'expérience des grands ensembles a montré que la remise en état technique et l'amélioration du confort ne suffisaient pas à enrayer la dégradation.

9. Pascale Joffroy, La réhabilitation des bâtiments. Conserver, améliorer, restructurer les logements et les équipements. Paris: Le moniteur, 1999

L'intervention sur les constructions regroupe trois approches : la restauration, la reconversion et la réhabilitation (10) :

- La restauration est la sauvegarde ou la réfection à l'identique de tout ou partie d'un bâtiment en vertu de sa valeur patrimoniale définie sur le plan culturel. Elle se caractérise par la recherche d'un statu quo : toute modification de l'état originel est proscrite, à moins d'être clairement lisible et facilement réversible.
- La reconversion signifie le changement de fonction d'un bâtiment pour en éviter la désaffectation.
- La réhabilitation est l'action d'améliorer un édifice en conservant sa fonction principale.

La restauration et la réhabilitation se distinguent par leur rapport à la continuité et au changement. La restauration est dévolue au maintien de la forme bâtie sans égard particulier pour l'évolution éventuelle de son contenu. Ce qui distingue la reconversion de la réhabilitation est le changement d'affectation, qui induit des différences d'approche importantes.

4.1 Les enjeux de la réhabilitation

4.1.1 Les enjeux sociaux

Le principal enjeu social des opérations programmées de réhabilitation est de maintenir les populations à faibles ressources dans leur logement. En effet, les coûts des interventions peuvent se répercuter sur le montant des loyers qui ont une incidence sur la solvabilité des ménages. Il s'agit également de promouvoir le logement conventionné dans l'habitat privé, ce qui implique un plafonnement des loyers. Ceci signifie la diminution des loyers pratiqués, ce qui rend la mobilisation des bailleurs difficile.

La réhabilitation soulève également la question de l'intervention sur un site existant. D'une part, la réhabilitation doit pouvoir considérer les besoins, les modes de vie et les caractéristiques locales d'usage. D'autre part, elle se fait en majeure partie en site occupé. Il doit donc être fait en sorte qu'il y ait le moins possible de nuisances et de répercussions sur la vie quotidienne des occupants. Par ailleurs, les habitants ne doivent pas être seulement témoins des opérations, mais devenir des acteurs à part entière de la définition du programme et des actions à mener. Ils apportent un regard complémentaire et le plus souvent fondamental concernant l'état technique du bâtiment, la

10. Ibid.

perception de la dégradation et les besoins. Ils sont directement concernés par le contenu, la qualité et la conduite des travaux.

L'accompagnement social doit être au cœur du processus. Ceci implique la prise en compte de la diversité et complexité des situations locales et l'instauration d'un dialogue continu avec les occupants. Ainsi, chaque site demande une réponse spécifique, il ne peut y avoir de réponse standard.

4.1.2 Les enjeux culturels

Les enjeux culturels doivent être considérés si le bâtiment ou l'ensemble des bâtiments à réhabiliter ont une valeur patrimoniale reconnue qu'il faudra préserver. La réhabilitation doit, en plus des qualités d'intégration architecturale et urbaine, avoir égard aux mesures de sauvegarde de différents types.

Les secteurs sauvegardés — La loi du 4 août 1962 assure la protection d'ensembles architecturaux au travers de plans de sauvegarde et de mise en valeur. Ces derniers indiquent bâtiment par bâtiment, des prescriptions de modification, de conservation ou de démolition. Les transformations ou créations de bâtiments doivent recevoir l'aval de l'Architecte des Bâtiments de France. Cette procédure lourde s'applique à des quartiers historiques où les réhabilitations patrimoniales sont souvent proches des procédures de restauration.

Les Zones de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager (ZPPAUP) — La création de ces zones donne lieu à un document rédigé en concertation avec l'Etat. Les prescriptions sont établies de façon à préserver l'harmonie d'un secteur ou d'un ensemble de façades. L'architecte des Bâtiments de France donne son accord pour les réalisations opérées sur ces zones.

Les abords de monuments historiques — Les monuments étant jugés indissociables de l'espace qui les entoure. La loi impose le droit de regard sur toute intervention envisagée à l'intérieur d'un périmètre de protection de 500m de rayon autour d'un monument historique. Toute modification dans ce périmètre de l'aspect extérieur d'un bâtiment est soumise à l'approbation de l'Architecte des Bâtiments de France qui doit délivrer un « avis conforme » (pour lequel il approuve ou refuse le projet) si le bâtiment concerné par la réhabilitation se situe en co-visibilité avec le monument sauvegardé.

Les Sites — La loi 1930 permet de protéger aussi bien les espaces naturels que des pays ou des terroirs marqués par l'empreinte humaine. Dans ces sites, les démolitions, modifications et constructions sont également soumises à l'approbations de l'Architecte des Bâtiments de France.

4.1.3 Les enjeux environnementaux

La production (matériaux, composants et équipements) et l'occupation des bâtiments (dépenses énergétiques, émissions de gaz ou autres polluants) contribuent à l'augmentation de l'effet de serre et à la diminution des ressources naturelles. Les bâtiments construits avant la première réglementation thermique (1974) souffrent de lacunes d'isolation pouvant générer des situations d'inconfort et des consommations d'énergie importantes. Le renforcement progressif de la réglementation a permis d'augmenter l'efficacité énergétique des habitations. La RT 2000 améliore

ainsi les rendements énergétiques de 20% pour l'habitation et de 40% pour le non résidentiel par rapport à la réglementation de 1988.

Nous reviendrons largement sur ces enjeux environnementaux qui sont déterminants dans la mise en œuvre des OPATB.

4.1.4 Les enjeux d'ordre économique

Ceux-ci concernent d'une part des questions de mobilisation des financements et d'autre part les conséquences de la réhabilitation sur la solvabilité des occupants. Il est généralement souhaitable de maintenir les occupants (propriétaires ou locataires), surtout ceux à faibles ressources.

Le montant de l'enveloppe qui détermine l'investissement est évalué selon les fonds propres du maître d'ouvrage public ou privé, les aides au financement et les prêts qui peuvent être répercutés sur le montant du loyer. Pour ce dernier point, la connaissance du marché immobilier local ainsi que celle des ressources des occupants est importante. Le montant du financement doit être réévalué par rapport à deux facteurs extérieurs qui sont l'augmentation de la valeur du bien immobilier après travaux et le retour d'investissement lié à la diminution des charges d'exploitation (prise en compte du rendement énergétique des équipements et de l'enveloppe du bâtiment).

L'ampleur de la réhabilitation des bâtiments occupés par des locataires est conditionnée par la solvabilité de ses occupants et celle des propriétaires. Certains maîtres d'ouvrages publics scindent et rééchelonnent les interventions en phases successives afin d'amoindrir les progressions des loyers. Dans une zone de marché de location tendu (offre inférieure à la demande), l'incitation des propriétaires bailleurs à l'amélioration de l'habitat est difficile. En effet, le logement est en général loué assez cher par rapport à ses caractéristiques locatives et techniques et, malgré sa vétusté, il trouve toujours preneur. Son niveau de vacance étant très faible, rien ne justifie pour le propriétaire l'engagement d'opérations de réhabilitation coûteuses. De plus, ces logements sont gérés par des propriétaires bailleurs dont les profils sont assez divers, souvent des ménages à faibles ressources pour qui le loyer constitue un revenu important. L'amélioration des conditions thermiques et sonores du logement nécessite un engagement financier important, auquel les propriétaires ne peuvent, le plus souvent, faire face.

4.1.5 Les enjeux d'ordre politique et organisationnel

Chaque acteur a sa propre logique de pensée et d'action. La convergence des intérêts vers un projet commun (avec des objectifs partagés et des intentions d'actions complémentaires) est un exercice difficile mais nécessaire. Il s'agit de trouver des terrains de dialogue pour établir le diagnostic, hiérarchiser les problèmes, ouvrir un champ de solutions possibles et conjuguer les outils de mise en œuvre ... L'incitation des propriétaires constitue l'une des difficultés rencontrées dans la conduite des opérations de réhabilitation.

4.2 Les procédures de réhabilitation

Les démarches de conduite d'opérations de réhabilitation reposent sur des montages financiers et techniques variés. Certains locataires effectuent eux-mêmes les travaux, dont les coûts sont imputés sur les montants des loyers. Les propriétaires occupants peuvent scinder les travaux en plusieurs phases ou les effectuer après acquisition, avant leur installation définitive. Les configurations d'intervention sont donc multiples.

La maîtrise d'ouvrage publique doit, quant à elle, définir un programme d'intervention où la consultation des occupants est obligatoire. Les montages sont plus complexes sur les plans financier, technique, social et administratif. La mise en place d'une Maîtrise d'Oeuvre Urbaine et Sociale (MOUS) est nécessaire pour une opération ou action à caractère social et relationnel important. Cette dernière met en œuvre les mesures d'accompagnement social, qui consistent en l'incitation et l'entretien d'un dialogue avec les locataires tout au long de l'opération. La MOUS informe les locataires sur le projet de réhabilitation (interventions et répercussions, aides, etc.) ; elle les rassure afin qu'ils perçoivent les interventions comme une amélioration et non comme une agression ; elle intègre les particularités dans la mise en place des actions (horaires de travail, présence d'animaux ou d'enfants, etc.) et elle gère les difficultés rencontrées.

Les réhabilitations regroupant un secteur et des maîtres d'ouvrage différents (publics et privés) peuvent également relever d'une mise en place de procédure complexe de montage d'opération. C'est le cas des OPAH, des Périmètres de restauration immobilière, des mesures de résorption de l'habitat insalubre et des Associations foncières urbaines.

Les Opérations programmées d'amélioration de l'habitat — Une OPAH est une procédure contractuelle réunissant une collectivité locale, l'Etat et l'ANAH, dans le but de lier une politique urbaine à une politique de l'habitat. Son objectif est d'améliorer l'offre de logements essentiellement (et non exclusivement) locatifs et de maintenir ou développer des services de proximité, ce qui peut recouvrir les commerces, services et équipements publics. Le montage de cette procédure reste tributaire du consensus qu'elle arrive ou non à susciter. L'OPAH incite les propriétaires à réhabiliter les logements afin de revaloriser un quartier tout en encourageant le maintien d'un habitat à vocation sociale par la mobilisation de financements spécifiques. Une OPAH peut comporter plusieurs volets cibles. Les OPAH énergétiques sont celles qui ciblent tout particulièrement la consommation des énergies et les qualités d'isolation du bâtiment. Elle peut dans ce cadre s'intégrer dans une mesure OPATB. Une convention commune peut être signée entre une OPAH énergie et OPATB. Toute convention doit préciser le périmètre de l'opération, le montant des aides susceptibles d'être accordés par l'ANAH, l'État, les collectivités ..., les actions d'accompagnement et d'amélioration du cadre de vie, les actions de maintien des populations et de leur diversité, les actions de maintien et de développement des services de proximité : locaux de services, équipements commerciaux ou artisanaux.

Nous développerons le fonctionnement de ces opérations plus loin.

Les Périmètres de restauration immobilière — Créés en 1962 sous le régime de la loi Malraux, ces périmètres concernent les quartiers anciens présentant un intérêt historique ou esthétique. Ils permettent à une collectivité locale ou à une autorité administrative (préfet) de déclarer les travaux de remise en état d'utilité publique et de les imposer aux propriétaires sous peine d'expropriation.

Les mesures de résorption de l'habitat insalubre — Ces mesures ont été créées depuis la loi Vivien du 10 juillet 1970, pour faciliter la suppression de l'habitat insalubre. La loi SRU 2000 a renforcé cette mesure. Le préfet peut, après avis du conseil départemental d'hygiène, déclarer l'insalubrité de locaux et installations utilisés à des fins d'habitation, car impropres à cet usage pour des raisons d'hygiène, de salubrité ou de sécurité. Si le conseil départemental d'hygiène conclut à l'impossibilité de remédier à l'insalubrité, le préfet prononce l'interdiction définitive d'habiter et ordonne la démolition. Si au contraire, on peut remédier à sa situation d'insalubrité, le préfet prescrit les mesures et les délais d'exécution indiqués par le conseil départemental d'hygiène, en maintenant l'interdiction d'occupation des lieux jusqu'à l'achèvement des travaux. Le propriétaire quant à lui, peut conclure un bail à réhabilitation, un bail emphytéotique ou un contrat de vente. Les travaux prescrits seront à la charge du preneur.

Les Associations Foncières Urbaines (AFU) — Ce sont des associations syndicales de propriétaires constituées dans le but de réaliser des travaux de restauration et de mise en valeur d'un ensemble d'immeubles situé dans un secteur sauvegardé ou un périmètre de restauration immobilière. Les AFU permettent le regroupement des propriétaires en vue d'une action commune, et sont des outils spécifiques d'intervention dans des quartiers anciens.

4.3 Politique d'incitation financière à la réhabilitation

Dès la fin des années 1970, une politique d'incitation financière à la réhabilitation a été mise en place afin de promouvoir les activités d'amélioration, de mise en valeur du patrimoine ou de mise aux normes d'habitabilité.

En marché public, actuellement, les aides existantes sont la Prime à l'Amélioration de Logements à Usage Locatif et à Occupation Sociale (PALULOS) et le Prêt Locatif à Usage Social (PLUS). La PALULOS est versée par l'Etat pour l'amélioration des logements locatifs sociaux. Le taux de base s'élève depuis 1997 à 10% du montant des travaux plafonné et à 25% pour les opérations sensibles. Elle bénéficie d'une TVA de 5,5% qui n'est plus plafonnée aux seuls montants subventionnés mais à l'ensemble des travaux. Le prêt complémentaire à la PALULOS est de 4,8% sur une durée de 15 ans sur un montant plafonné.

Depuis janvier 2000 le PLUS remplace le PLA (Prêt Locatif Aidé) qui permettait de financer des opérations d'acquisition et amélioration (contrairement à la

subvention PALULOS qui est réservée aux opérations sans acquisition foncière sur des immeubles acquis ou construits par un organisme de logements publics depuis plus de 15 ans). Il a été conçu pour permettre aux opérateurs de mieux équilibrer les constructions de logement social. Il fusionne l'ex-PLA ordinaire au PLA-LM (PLA à Loyer Modéré) mais laisse de côté le PLA-I (PLA d'Intégration).

En marché privé, les incitations sont diverses. On relève les subventions de l'ANAH, la prime à l'amélioration de l'habitat (PAH), les aides fiscales et le prêt à taux zéro.

Subventions de l'ANAH — Les propriétaires bailleurs de logements construits depuis plus de 15 ans bénéficient de ces subventions sans condition de ressources mais avec un engagement de louer ces logements pendant une durée de 10 ans. En 1999, le taux de subvention s'élevait à 25% d'un montant plafonné des travaux subventionnables. Il pouvait être majoré quand le logement se trouvait dans une OPAH ou est inscrit dans un programme social thématique (PST) issu de contrats entre une collectivité locale, l'état et l'ANAH pour l'accueil de familles défavorisées. Les subventions de l'ANAH sont obtenues sous réserve de respecter certaines caractéristiques architecturales. Les travaux subventionnés sont ceux qui contribuent à l'amélioration ou à l'adaptation du logement et de ses équipements, y compris les parties communes et l'état général de l'immeuble et dans certains espaces protégés, les travaux d'intérêt architectural.

La Prime à l'Amélioration de l'Habitat (PAH) — Elle est destinée aux propriétaires occupants à faibles ressources. En 1999 son taux était de 20% d'un montant plafonné des travaux, il pouvait être porté à 25% dans le cadre d'OPAH, à 35% pour les propriétaires aux ressources très faibles et à 50% pour les travaux concernant les handicapés pour un montant plafonné variable. Ces aides sont obtenues par l'intermédiaire du Pact-Arim.

Les aides fiscales — Elles s'appliquent en faveur des travaux de grosses réparations et d'amélioration, elles sont constituées d'une réduction de TVA, de l'impôt sur le revenu et d'un crédit d'impôt.

Le prêt à taux zéro — Il s'agit d'un prêt plafonné octroyé sous conditions de ressources. Il concerne l'acquisition et amélioration d'un logement construit depuis plus de 20 ans et dont les travaux représentent 35% du coût total (prix d'achat hors frais plus pris des travaux, honoraires compris).

Plusieurs dispositifs s'appliquent aussi bien en marché public que privé, il s'agit de l'aide personnalisée au logement (APL) qui, sous condition de ressources des locataires, compense l'augmentation de loyer consécutive aux travaux de réhabilitation, la collecte du 1% patronal qui finance des opérations, des OPATB que nous présentons plus loin.

4.4 Cadre réglementaire général

Les textes juridiques qui régissent de façon spécifique les opérations de réhabilitation sont peu nombreux. D'ailleurs, le terme de réhabilitation ne fait l'objet d'aucune définition juridique. Selon leur objet (immeubles, maisons), leur étendue (légère, lourde ou exceptionnelle), et le maître d'ouvrage (public ou privé), les travaux relèvent de cadres juridiques différents.

Dans le cas d'une réhabilitation par une personne privée, le maître d'ouvrage peut prendre lui-même en charge la réhabilitation de son logement, et décider de réaliser des travaux de réhabilitation pour les occuper personnellement ou les louer. Dans les situations où le maître d'ouvrage est un professionnel qui dans la perspective de la vente, réalise des opérations de réhabilitation directement ou par l'intermédiaire de sociétés créées pour chaque opération déterminée, les textes juridiques ici cadrent principalement la forme de vente pour la commercialisation des locaux réhabilités et le statut des sociétés de réhabilitation.

Bail à réhabilitation — Un particulier peut confier la réhabilitation à un tiers dans le cadre d'un bail à réhabilitation. Le bail à réhabilitation a été créé par la loi du 31 mai 1990 dont les conditions d'applications sont fixées par une circulaire du 29 janvier 1991. La particularité de ce bail réside dans le fait que l'immeuble est loué à un preneur en vue de son amélioration par des travaux, de sa location à usage d'habitation, notamment à des personnes défavorisées, pendant la durée du bail et la restitution au propriétaire en bon état d'entretien. Le bail doit être conclu pour une durée minimale de 12 ans et ne s'applique que pour les bâtiments à usage d'habitation. Par ailleurs, le bailleur propriétaire ne doit conclure le bail qu'avec les personnes morales mentionnées dans l'article L. 252-1 du code de la construction et de l'habitation (organismes HLM, SEM, les collectivités territoriales, et les organismes, dont l'un des objets est de contribuer au logement des personnes défavorisées agréés par le préfet).

On parle de réhabilitation par une personne publique, lorsqu'une personne publique est amenée à réaliser ou faire réaliser des travaux de réhabilitation dans le cadre d'une politique de la ville, cette dernière ayant pour objet d'inciter les propriétaires (publics ou privés) à effectuer ou faire effectuer des travaux de réhabilitation. Cette incitation peut se conclure par:

- Un contrat de Ville Etat-Commune dont l'objectif est de mettre en place de façon concertée un programme d'action sur cinq ans de sorte que les quartiers difficiles soit réinsérés,
- La mise en place de Grands Projets Urbains (GPU) entre l'Etat et la commune concernant des zones à forte densité de logements sociaux,
- Des programmes d'aménagement concerté de territoires urbains,
- Des Contrats d'Agglomérations,
- La mise en œuvre de missions dites de Maîtrise d'Oeuvre Urbaine et Sociale (MOUS, voir plus haut).

4.5 Cadre réglementaire spécifique aux conditions environnementales

La réglementation concernant le confort intérieur (thermique et acoustique) et la consommation d'énergie s'applique principalement à la construction neuve. Cependant, les dispositions décrites par cette réglementation peuvent être appliquées dans le cadre de l'intervention sur l'existant si les financements dépendent en partie ou totalement des organismes publics ou de l'État. La considération des contraintes financières et techniques assouplit leur application. La prise en compte de ces dispositions par le particulier s'effectue donc principalement à titre volontaire, pour des raisons de recherche de confort et de diminution des charges d'exploitation liées à la consommation d'énergie.

4.5.1 Caractéristiques thermiques

4.5.1.1 Situation actuelle

En 1974, après le premier choc pétrolier, la France a établi sa première réglementation thermique des constructions neuves, définissant des exigences minimales d'isolation, qu'elle a progressivement renforcées en 1977, en 1982, en 1988 et en 2000. Aujourd'hui, on cherche à réduire les écarts entre les renforcements réglementaires tous les cinq ans à partir de 2005.

La réglementation actuelle (RT 2000) renforce l'isolation pour améliorer le rendement énergétique des bâtiments (réduction des consommations énergétiques de 20% pour le résidentiel et de 40% pour le non résidentiel). Elle introduit une approche globale de la consommation en intégrant le confort estival et hivernal. Les phénomènes de déperditions sont mieux considérés grâce au renforcement des normes de caractérisation des matériaux et la prise en compte des modes de construction. En effet, la RT 2000 inclut dans le calcul des performances d'isolation les effets de ponts thermiques, facteurs importants de déperdition de chaleur par l'enveloppe. La transmission linéique de chaleur trouve ainsi sa première expression et sera renforcée dans les futures réglementations thermiques (réglementation de 2005 et suivantes).

La RT 2000 s'applique aux bâtiments neufs dont le permis de construire est déposé à partir du 1er juin 2001. Cependant, pour les opérations réalisées avec l'aide financière de l'État, d'une collectivité ou d'un organisme assurant un service public, les dispositions et conditions énergétiques et thermiques en vigueur peuvent être rendues applicables sur l'existant, mais peuvent être dérogées en raison d'une impossibilité technique ou d'un coût excessif.

L'instruction n° I.2002-01 du 26 juillet 2002 (11) définit les critères de recevabilité des demandes de subvention pour la maîtrise de l'énergie. Ainsi sont considérées les qualités des équipements et de leur installation, assurées par la certification et les recommandations de la RT 2000 concernant les matériaux. Par exemple, pour le chauffe-eau solaire ou système solaire combiné (plancher solaire direct, système avec stockage), l'installateur doit être adhérent à la charte QUALISOL certifiant que le matériel est issu d'une liste des matériels agréés par l'ADEME et que l'installation est effectuée dans les règles de l'art. Les équipements sont considérés éligibles pour l'octroi des primes d'aide s'ils sont certifiés CSTBAT. Les fenêtres doivent être certifiées ACOTHERM, car ce label assure à la fois les qualités acoustiques et thermiques de la baie pour des conditions normales d'installation (respect d'étanchéité).

Actuellement, il n'existe pas de conditions thermiques et de rendement énergétique à atteindre pour l'octroi de subvention ou l'intervention sur l'existant. Les contraintes de terrain peuvent rendre difficile et onéreux tout essai de référencement du cahier des charges sur la nouvelle réglementation thermique 2000 ou même celle de 1988. Par contre, l'amélioration des conditions énergétiques et thermiques est fondamentale à la mise en œuvre des opérations programmées à volet énergétique.

Le diagnostic préalable permet d'identifier les lacunes de rendement thermique et énergétique et de pré-évaluer les améliorations possibles et les coûts prévisionnels liés à l'opération de réhabilitation. L'analyse des coûts globaux, pour une recherche d'équilibre entre investissement dans les travaux d'amélioration et gains résultants, permet d'identifier les difficultés financières et techniques des solutions et d'analyser les scénarios possibles dans un objectif de choix optimum entre gain énergétique et possibilités financières, en terme de répercussion sur les hausses des loyers et sur la solvabilité des locataires. Ainsi, les exigences de réhabilitation sont identifiées au cas par cas. L'ANAH est en cours de mise en place d'une exigence minimale qui se référerait à la réglementation thermique de 1982 (12).

4.5.1.2 Nouvelle directive européenne

La France dispose de trois ans pour traduire en droit français la nouvelle directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments établie en 2002. À terme, ce nouveau cadre introduira une certification énergétique des constructions (à titre d'information dans les transactions immobilières) et définira une réglementation en termes de performances énergétiques applicables dans certaines opérations importantes de réhabilitation.

11. Instruction explicative sur la mise en oeuvre des nouvelles mesures en faveur de la maîtrise de l'énergie, consulté sur le site des bulletins officiels du MELT.

12. D'après discussion avec la direction technique de l'ANAH à Paris.

4.5.2 Caractéristiques acoustiques

La Nouvelle Réglementation Acoustique (NRA) s'applique aux constructions neuves dont le permis de construire a été déposé à partir de janvier 2000. Elle ne s'applique pas aux opérations de réhabilitation.

Des prescriptions relatives aux caractéristiques acoustiques peuvent être imposées aux travaux soumis à autorisation ou à déclaration préalable ou réalisés avec l'aide de l'État, d'une collectivité publique ou d'un organisme assurant une mission de service public, exécutés dans des ouvrages ou locaux existants autres que d'habitation. Des décrets en Conseil d'État fixent le niveau d'exigence acoustique et les conditions d'application des prescriptions.

Les exigences minimales décrites dans la NRA concernent principalement les bâtiments à usage d'habitation. En ce qui concerne les autres bâtiments, quatre familles d'établissements doivent respecter les dispositions des articles R111-23-1, R111-23-2 et R111-23-3 du code de la construction en matière de limitation des bruits à l'intérieur des locaux : il s'agit des établissements d'enseignement, des établissements de santé, de soins, d'action sociale, des établissements de loisirs et de sport, et des hôtels et établissements d'hébergement à caractère touristique.

Les dispositions doivent être définies par un arrêté interministériel dont seuls les établissements d'enseignement disposent actuellement (arrêté du 9 janvier 1995 relatif à la limitation du bruit dans des établissements d'enseignement paru dans le journal officiel le 10 janvier 1995).

4.5.3 Conditions sanitaires et ventilation

La réglementation du bâtiment (Article R111-9) impose que les logements bénéficient d'un renouvellement de l'air et d'une évacuation des émanations tels que les taux de pollution de l'air intérieur du local ne constituent aucun danger pour la santé et que les condensations puissent être évitées.

4.5.4 Conditions d'éclairage

Les prescriptions dans le domaine de l'éclairage sont principalement définies par rapport aux conditions de travail. Aucune réglementation ne traite de l'habitation. Cependant, l'Association Française de l'Eclairage (AFE) éditte différentes recommandations.

4.6 Les OPAH et OPATB

4.6.1 Caractéristiques

Les Opérations programmées d'amélioration de l'habitat (OPAH) comportent plusieurs volets thématiques : volet urbain, social, économique, patrimonial et immobilier.

Le volet urbain — Il doit considérer le règlement d'urbanisme et les servitudes particulières, inscrivant ainsi l'OPAH dans un projet territorial et urbain plus large et assurant une meilleure articulation entre les outils de planification urbaine et les outils opérationnels. Des aménagements liés aux déplacements urbains (voirie, stationnement, dessertes, etc.) et le traitement des nuisances particulières telles que bruit et activités polluantes peuvent être proposés dans le cadre de ce volet.

Le volet social — Il définit les mesures permettant de garantir les actions urbaines et immobilières menées (accompagnement social, aides aux copropriétaires en difficultés, etc.).

Le volet économique — Il consiste en un plan d'action ou de sensibilisation des services marchands, commerces de proximité, artisans et entreprises.

Le volet patrimonial — Il doit considérer les enjeux patrimoniaux architecturaux et urbains. Les opérations doivent être menées en étroite collaboration avec les services de l'Etat ou organismes compétents en matière d'architecture et de patrimoine (SDAP, CAUE).

Le volet immobilier — Il a pour objectif d'offrir les meilleures conditions d'habitat et d'accroître l'offre de logements privés conventionnés à travers la remise sur le marché des logements vacants, la création d'offre locative sociale, publique ou privée, l'intervention sur les copropriétés et traitement des rez-de-chaussée commerciaux.

D'autres cibles thématiques peuvent être mises en avant, telles que la lutte contre le bruit ou le volet énergétique, mais elles ne peuvent seules justifier l'engagement d'une OPAH. Cependant, il est possible de mener des opérations de réhabilitation sur les seuls aspects thermiques et énergétiques et cela à travers les nouveaux dispositifs des Opération Programmée d'Amélioration Thermique et énergétique du Bâtiment : les OPATB.

Le volet énergétique de l'OPAH cible tout particulièrement des objectifs d'amélioration du confort et la diminution des consommations d'énergie. Ainsi toute OPAH comportant un volet énergétique et thermique doit désormais systématiquement être accompagnée par un dispositif OPATB. L'amélioration énergétique et thermique du bâtiment, dans le cadre de l'OPATB diffère de l'OPAH à volet énergie en ce qu'elle ne concerne pas seulement le secteur résidentiel, mais également le tertiaire. L'engagement dans un dispositif OPATB, permet donc d'élargir le secteur d'intervention.

Les OPATB ont été lancées le 20 février 2002, par le Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, le Ministère de

l'Économie, des Finances et de L'Industrie, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et l'Agence Nationale de l'Amélioration de l'Habitat (ANAH). Elles ont pour objectif l'amélioration des conditions thermiques et énergétiques de bâtiments résidentiels ou tertiaires, publics ou privés, situés dans un quartier, une commune ou plusieurs communes, voire un département pour une zone à faible densité, afin de limiter les consommations ainsi que les émissions de gaz à effet de serre.

Les OPATB consistent en un vaste programme animé par les collectivités locales et subventionné par l'État, l'ADEME et l'ANAH pour réaliser des travaux sur une période de 4 à 5 ans, permettant le gain dans les consommations d'énergie (amélioration du rendement énergétique pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation des bâtiments tertiaire, etc), la maîtrise de la demande d'électricité et la promotion de l'utilisation d'énergies renouvelables. Les OPATB seront systématiquement accompagnées d'OPAH comportant un volet thermique dans ces mêmes périmètres.

Les études-diagnostic thermique et énergétique préalables aux travaux peuvent être subventionnées par l'ADEME à raison de 50-70% d'un montant plafonné selon le type de bâtiment. Pour le financement des travaux les aides sont différentes selon les situations. Les maîtres d'ouvrage de bâtiments tertiaires publics et privés peuvent percevoir une aide de 10% d'un montant plafonné. Les propriétaires occupants de logements privés peuvent bénéficier sous conditions de ressources d'une aide de l'ANAH variant de 20 à 70% d'un montant plafonné de travaux. Les propriétaires bailleurs selon le type de loyer pratiqué peuvent obtenir de l'ANAH et de la collectivité locale des subventions allant de 20 à 50% du coût plafonné. L'habitat social public peut bénéficier de la PALULOS (cf. § 4.3), de 10 à 15% d'un montant plafonné pouvant être éventuellement augmentée par des aides ADEME. A ces subventions, peuvent être ajoutées les aides de l'ADEME et de l'ANAH pour l'investissement dans des équipements performants ou de production d'énergies renouvelables.

4.6.2 Les démarches de conduite des OPAH et OPATB

Les démarches de conduite des OPATB se différencient peu de celles des OPAH. Elles présentent cependant des particularités concernant le montage initial.

Le démarrage d'une OPAH s'effectue à la signature de la convention entre les autorités compétentes en matière d'habitat (collectivité ou Etablissements Publics de Coopération Intercommunale, EPCI), l'Etat et l'ANAH. L'ADEME est partie prenante et partenaire fondamental à la signature de la convention OPATB. Pour la mise en œuvre de cet engagement spécifique aux questions énergétiques et thermiques, les collectivités doivent présenter un cahier des charges définissant le contexte et l'état des lieux du périmètre d'intervention sur le plan énergétique et thermique, ainsi que les potentiels du site et les atouts de la collectivité sur le plan de la conduite de l'opération. Avant signature d'une convention OPAH ou OPATB, un comité de pilotage doit être créé qui sera chargé de la conduite de l'opération. Il assure le montage partenarial financier et la coordination de la maîtrise d'ouvrage entre les différents partenaires. Ce comité, mis en place sous l'impulsion de la collectivité territoriale, doit comprendre les représentants des services de l'Etat et d'autres partenaires nécessaires au montage de l'opération, tels que

les organismes HLM, les caisses d'allocation familiale. Un comité de pilotage technique peut également être mis en place.

Par ailleurs, le dispositif des OPATB met en avant la mobilisation partenariale, insuffisamment utilisée dans les OPAH. Il s'agit de mobiliser les différents partenaires du maître d'ouvrage ainsi que les adhérents d'organisations professionnelles comme relais de l'équipe d'animation.

On retrouve dans ces opérations (OPAH, OPATB) trois phases principales qui sont la phase d'étude préalable, la phase d'étude pré-opérationnelle et la phase opérationnelle.

4.6.2.1 Phase d'étude préalable

Un diagnostic préalable piloté par la collectivité territoriale doit être effectué avant la décision d'engager l'opération. Ce diagnostic doit mettre en évidence les dysfonctionnements urbains et sociaux et les atouts existants en terme de réhabilitation. Selon la circulaire n°2002-68 (13) (non parue au journal officiel), une OPAH doit être ciblée sur des territoires à enjeux circonscrits avec assez de pertinence pour que leur périmètre soit opérationnel. L'expérience a montré que pour des périmètres comprenant plus de 1500 logements et d'une programmation de plus de 150 à 200 logements à réhabiliter par an, l'opération perdait en efficacité. Dans le cadre d'une OPATB, cette étude doit mettre en évidence les caractéristiques énergétiques du territoire, le gisement potentiel d'économie d'énergie. Elle doit répondre à un cahier des charges précis défini par l'ADEME, qui permet la demande d'inscription à un dispositif OPATB.

4.6.2.2 Phase d'étude pré-opérationnelle

Les études pré-opérationnelles reposant sur des éléments de diagnostic préalable, doivent permettre de préciser le contenu de l'OPAH et/ou de l'OPATB, ses objectifs spécifiques quantitatifs et qualitatifs, les moyens à mettre en œuvre et les engagements de chacun des partenaires. Ces études doivent associer l'ensemble des acteurs concernés, publics et privés.

Les études pré-opérationnelles peuvent comporter une ou deux phases. La première phase, dite de diagnostic précis, vise à relever les informations nécessaires à la conduite de l'opération sur le plan urbain, social, économique, immobilier et patrimonial, et à déterminer les secteurs ou bâtiments ciblés ainsi que les profils des occupants et des propriétaires. Les méthodes de diagnostic possibles pour la réalisation de cette première partie de l'étude peuvent reposer sur :

- L'analyse des sources statistiques existantes,
- L'analyse des résultats des politiques précédentes (PLH, OPAH ...),
- Les enquêtes de terrain (repérage des situations du bâti, de la vacance, rencontre des propriétaires, des habitants, des usagers),

13. Direction Générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction, circulaire UHC/IUH 4/26 n°2002-68 du 8 novembre 2002 relative aux opérations programmées d'amélioration de l'habitat et au programme d'intérêt général. NOR : EQUU0210186C.

- L'élaboration de questionnaires (mailing ou entretien direct),
- La réalisation de tests pré-opérationnels (que nous décrivons plus loin),
- L'enquête auprès des professionnels de réhabilitation, de l'énergie, de l'immobilier, du financement de la réhabilitation et de l'action sociale.

La seconde phase vise la détermination des stratégies d'action et d'animation de l'opération (selon la complexité des situations). Cette phase constitue le programme d'intervention et comporte les réflexions sur :

- Le périmètre opérationnel,
- Les objectifs et modalités d'actions en matière d'habitat,
- Les modalités de financement,
- La mise en œuvre d'une politique foncière (priorités d'intervention, modalités de gestion, mise en place d'un observatoire des disponibilités foncières),
- Les actions proposées sur le plan social : développer la fonction sociale du parc privé (conventionnement pour le maintien ou l'accueil de populations à revenu modeste, dispositif visant la production de logement à loyers intermédiaires, etc.), propositions d'actions pour une meilleure insertion sociale de certaines populations (actions en faveur des personnes âgées, des populations bénéficiaires du RMI, relogement temporaire dans le cas d'insalubrité, etc.), actions en direction des propriétaires occupants et locataires, actions à destination des maîtres d'ouvrage sociaux,
- Les actions de mobilisation du partenariat pour la mise en œuvre du programme d'intervention,
- La proposition des modalités d'animation et de communication.

Cette phase repose principalement sur la compréhension des stratégies et des comportements patrimoniaux locaux : quelle perception ont les propriétaires de leur patrimoine ? Quel est leur profil et niveau de ressources ? Quel type de locaux ou logement occupent-ils ? Avaient-ils envisagé de le réhabiliter ? Quels travaux sont-ils plus enclins à engager ? Ces éléments permettent de définir des actions incitatives ciblées selon les situations et les préoccupations des propriétaires.

Généralement, ce n'est qu'après ces études pré-opérationnelles, que les communes peuvent conclure sur l'importance du volet énergétique et thermique du périmètre choisi. La décision de signature de la convention OPATB, s'effectue à ce moment là, en fin de phase pré-opérationnelle.

Cette distinction des phases (diagnostic et réflexion stratégique) permet de recueillir dans un premier temps les informations et données du contexte nécessaires au choix et à la mise en place d'une stratégie d'action adaptée. Ainsi, pour la mise en œuvre de cette dernière, il est important d'évaluer les potentiels de réussite et de faisabilité et l'estimation des moyens nécessaires à la mise en œuvre de la phase opérationnelle.

Ce découpage permet également aux collectivités de recourir à des opérateurs différents, dont certains sont spécialisés dans le diagnostic thermique et énergétique (bureaux d'étude technique) ou dans le travail de terrain (opérateurs classiques comme les bureaux d'urbanisme, PACT-ARIM, autres associations, etc.). Cependant, ce choix ne peut se faire que si les collectivités disposent des informations précises sur les conditions économiques et sociales

du périmètre d'intervention (14). En effet, ces éléments de diagnostic ne rentrent pas dans le cadre d'activité des bureaux d'étude techniques, sauf bien évidemment si plusieurs appels à consultations peuvent être menés sur la phase diagnostic ou opérationnelle (technique et ingénierie sociale), ciblant d'un côté la connaissance des caractéristiques générales du parc et d'un autre côté le volet énergétique et thermique.

Les tests pré-opérationnels constituent des diagnostics microscopiques de l'étude réalisés sur un segment du parc ou un échantillonnage précis, ciblé selon la nature ou le lieu géographique. Ces tests consistent en une visite du bâtiment, un diagnostic des travaux nécessaires, une estimation de leur coût, une simulation de financement et éventuellement l'essai de motivation du propriétaire. Ils permettent ainsi, à travers cet échantillonnage, de tester l'efficacité et le potentiel de réhabilitation du périmètre défini.

Sur un échantillonnage pertinent ou représentatif, on peut effectuer des réhabilitations tests permettant de valider les programmes d'actions projetés et de sonder la faisabilité technique et financière. Ces opérations constituent également des moyens de communication et de sensibilisation des propriétaires réticents ou indécis.

Suite aux conclusions de l'étude pré-opérationnelle, une convention peut être signée précisant le périmètre de l'opération, le montant prévisionnels des aides sur les actions d'accompagnement et d'amélioration, les financements et les missions de l'équipe animation. Dans le cadre d'une OPATB, il est important de souligner le potentiel d'amélioration énergétique et thermique du parc ciblé.

4.6.2.3 Phase opérationnelle

Les stratégies d'action qui caractérisent la phase opérationnelle se composent de deux types d'interventions clés : l'animation et le montage administratif, technique et financier des demandes de réhabilitation. L'animation est mise en oeuvre par des campagnes d'information et d'incitation.

Pour ce qui concerne le montage administratif, technique et financier des demandes de réhabilitation, un diagnostic est réalisé par le bureau chargé de l'animation de l'OPAH, mandaté par les collectivités locales sur simple demande du propriétaire. Il permet d'élaborer un projet technique et financier personnalisé. Ce dernier s'effectue donc avec l'assistance de l'équipe animatrice, afin de faciliter les démarches administratives, pour obtenir les subventions et établir un montage financier avantageux. Ce projet est donc constitué d'un diagnostic technique comprenant des plans, des photos et des devis du projet d'amélioration qui est effectué après examen du bien immobilier et d'un montage financier (le financement de la réhabilitation doit être clairement identifié et parfaitement maîtrisé) établi par un conseiller qui prévoit toutes les aides financières auxquelles les propriétaires peuvent prétendre. Le dossier constitué sera présenté en commission pour l'octroi de subventions. Les travaux ne peuvent commencer qu'après l'approbation, alors que les subventions ne sont payables que sur présentation des originaux des

14. C'est le cas pour la ville de Vénissieux, dont le périmètre d'intervention dispose d'un fort taux de logement social, où il devient plus aisé de mobiliser l'information sur les occupants grâce aux bailleurs sociaux.

factures acquittées et de justificatifs. Le propriétaire peut bénéficier d'une aide technique tout au long du déroulement des opérations.

Chacune des phases de l'opération de réhabilitation peut être menée par les collectivités ou par d'autres opérateurs. Pour ce faire, on procède à des appels à consultation.

4.6.2.3.1 La compréhension de l'interlocuteur cible

La construction d'un argumentaire, nécessaire à la mise en œuvre des actions de communication, nécessite une compréhension du public cible (propriétaires bailleurs ou propriétaires occupants) et de ses stratégies patrimoniales. Les arguments pour l'incitation à l'engagement de travaux concernent :

- La mise aux normes d'habitabilité (le bâtiment pouvant être déclaré insalubre et donc libéré de ses occupants) et l'amélioration du confort,
- L'environnement global en termes de protection des ressources et de lutte contre le changement climatique,
- La valorisation architecturale et urbaine du cadre de vie,
- L'augmentation de la valeur immobilière du bien après travaux,
- La réduction des charges d'exploitation, notamment liées à la consommation de chauffage, de climatisation et de l'éclairage,
- La diminution des risques d'impayés de loyers et des factures de consommation,
- La diminution des risques de vacances : remédier à la vacance potentielle ou réelle des locaux, ou à la forte rotation des locataires.

Cependant, l'efficacité de ces arguments est relative à la situation et au profil du propriétaire ciblé. Si les aspects de confort sont relativement assimilés par les propriétaires occupants, les propriétaires bailleurs restent peu sensibles à cet argument. Par ailleurs, la valeur immobilière est un aspect qui est assez intégré par la nouvelle génération de propriétaires bailleurs. L'achat pour la location conventionnée devient un moyen de placement intéressant en raison des politiques actuelles de l'Etat en matière d'incitation fiscale (loi Besson). Le placement immobilier est cependant peu perçu par les propriétaires retraités (majorité des situations de réhabilitation) dont les ressources propres dépendent principalement de la location. Il ne faut pas négliger que ces propriétaires n'ont pas toujours les moyens d'assumer les charges de réhabilitation, même si leurs ressources dépassent assez souvent les plafonds imposés par l'ANAH.

Le secteur tertiaire non diffus développe de façon permanente cette réflexion sur les stratégies patrimoniales. Les entreprises sont plus enclines à engager des travaux de réhabilitation à fort potentiel de diminution des charges. Par contre, le secteur tertiaire diffus constitué de petits commerces et artisans, reste généralement réfractaire et demande que soit réellement démontrée la rentabilité de l'opération.

De façon générale, plusieurs arguments doivent être réunis pour l'engagement des travaux. Le conventionnement du logement pour les propriétaires bailleurs devient un frein réel, dans un secteur de marché très tendu. Les prix pratiqués avant travaux sont déjà supérieurs aux plafonds exigés par le conventionnement.

4.6.2.3.2 *L'animation*

L'animation/information constitue une phase de communication générale destinée au public, portant sur les volets énergétiques et thermiques de la réhabilitation, pour les opérations OPATB. La communication et l'information peuvent traiter :

- Des comportements économes et les choix raisonnés d'équipement à adopter,
- De la sensibilisation sur l'impact d'un équipement peu performant ou d'une mauvaise isolation sur les qualités du confort intérieur et les consommations d'énergie (l'exploitation des résultats d'opérations précédentes ou des opérations tests spécifiquement mises en œuvre dans le périmètre peuvent être des moyens de communication non négligeables, permettant au propriétaire concerné d'apporter son propre témoignage),
- De ces mêmes impacts sur le plan global de l'environnement et les changements climatiques.

Les moyens d'animation utilisés sont multiples :

- L'information générale à travers les journaux locaux, radio, affiches, brochures, lettre de l'OPAH, exposition, borne vidéo d'information, affichages en mairie,
- Les mailings (envoi de courrier) et/ou relance téléphonique,
- La création ou l'exploitation des lieux d'information du public (antennes de quartiers, points info-énergie, hall d'immeubles tertiaires et de moyennes surfaces, centres sociaux, ouverture d'une maison OPAH ou OPATB). Les permanences doivent considérer des horaires différenciés afin de permettre un accès à tous : possibilité d'ouverture des lieux d'accueil à l'heure du déjeuner, le week-end ou le soir (15),
- La création d'animations autour des volets énergétiques et thermiques, telles que l'exploitation des journées et événements existants, l'organisation de réunions, l'animation de journées thématiques, etc.
- La possibilité pour l'utilisateur d'apporter un point de vue ou de poser une question personnelle, en laissant à disposition un cahier de doléances, d'expérimenter, tester ou simuler virtuellement les conseils donnés à travers des moyens simples, de laisser ses coordonnées pour être contacté s'il désire obtenir des conseils personnalisés.

4.6.2.3.3 *L'information et la sensibilisation personnalisée*

Ce volet de la communication repose sur le contact direct avec les personnes concernées, grâce aux conseillers chargés de la conduite de l'animation ou aux élus locaux. Ces entretiens peuvent se faire lors des animations ou sur rendez-vous. La visite de la propriété comporte deux volets : le diagnostic proprement dit et la communication avec les occupants et propriétaires. Le diagnostic, effectué par un technicien bâtiment ou thermicien, peut être

15. Par exemple, la ville d'Angers fait remarquer, à travers son bilan d'OPAH mené sur le quartier Ouest de la ville, que les visites s'effectuent principalement entre 12h et 14h et après 18h.

sommaire ou détaillé, selon la pertinence du recours à l'un ou l'autre en sachant que les coûts sont différents.

Le diagnostic nécessite des compétences techniques relatives à l'existant et s'effectue principalement par l'observation et la mesure. La communication exige des compétences relationnelles et pédagogiques. Outre l'information et le conseil, il s'agit de donner au propriétaire des éléments d'argumentaire reposant sur les conditions spécifiques de son logement sur le plan thermique et énergétique : explorer des scénarios de réhabilitation ou de comportements économes avec des gains chiffrés à l'appui. Pour ce faire, les opérateurs de terrains disposent aujourd'hui de certains outils permettant d'estimer rapidement les gains potentiels selon le choix d'intervention. Il faut noter que ces outils ne sont pas encore adaptés à toutes les situations d'habitation et de locaux. Une demande forte s'exprime par les équipes chargées de l'animation, d'outil d'aide à la communication sur terrain.

Un autre niveau de difficulté soulevé par la communication est relatif à la situation sociale du propriétaire ou locataire qui demande une certaine compétence dans l'ingénierie sociale. Il s'agit d'intégrer les actions mises en avant dans le volet social du montage de l'OPAH et de tenter de proposer une approche qui compose à la fois avec des données sociales, énergétiques et thermiques. L'accompagnement social peut être nécessaire, quand il s'agit de rassurer, d'aider au montage administratif, financier et technique de la réhabilitation pour les personnes qui ont des difficultés à effectuer ces tâches.

En résumé, quatre volets de compétence sont nécessaires à la conduite d'opération d'animation et d'incitation à la réhabilitation :

- Le volet administratif et financier : montage des dossiers de demande de travaux et de financement,
- Le volet technique : structure du bâtiment, usure, qualité, analyse énergétique, thermique, acoustique, etc. Ces derniers volets, abordés le plus souvent sommairement, demandent une attention plus particulière dans le cadre des OPATB. Pour y faire face, les maîtres d'ouvrages proposent la mise en place d'une formation des professionnels du bâtiment et des équipes de suivi-animation. Pour un patrimoine important à forte difficulté d'évaluation technique tel qu'observé dans le secteur tertiaire, on fait appel à une équipe d'expert indépendante de celle chargée du suivi et animation,
- Le volet social, en termes d'accompagnement et d'aide spécifique,
- Le volet pédagogique et communicationnel.

Les opérateurs de terrains sont le plus souvent chargés de l'information et l'incitation sur les aspects thermiques et énergétiques. Leur campagne de communication est basée sur une approche personnalisée et fait parfois appel à des bureaux d'étude pour évaluer des situations techniques complexes. Cette approche personnalisée est exigée par la diversité des conditions propres aux propriétaires et des techniques relatives à l'état du bâti.

Le volet communication et incitation peut être conduit par une association, telle qu'ALISEE, dans le cas d'une OPAH à volet énergie à Angers. Engagée sur les questions environnementales, elle apporte des éléments de connaissances spécifiques à la communication et la sensibilisation sur les conditions énergétiques et thermiques dont les collectivités ne sont pas toujours dotées. À la demande du bureau d'urbanisme en charge de

l'animation de l'opération, ALISEE effectue gratuitement des diagnostics rapides du logement. Après chaque visite, des fiches de préconisations établies par le technicien sont remises au propriétaire. Ce dernier peut obtenir s'il le souhaite, un diagnostic thermique détaillé effectué par un bureau d'étude agréé.

Ce diagnostic technique se compose d'un calcul des consommations énergétiques et des déperditions thermiques, et d'une étude comparative des différentes solutions d'amélioration. Selon les conditions de ressources du propriétaire, ces analyses techniques peuvent être complétées par une simulation des coûts et des aides prévisionnelles. On apporte également des informations pratiques concernant l'adoption de comportement économe dans le logement. Par exemple, les propriétaires croient souvent que la seule intervention sur les baies réduirait de façon très significative les pertes de chaleur. On tente de leur démontrer que l'isolation doit être menée de façon globale sur toute l'enveloppe et que l'installation de doubles vitrages ou la seule réfection de la menuiserie n'apporte pas de grands changements sur les plans thermiques et économiques.

Les agences locales d'énergie et l'ADEME font également bénéficier les maîtres d'ouvrage de leur compétence à travers notamment l'assistance et le conseil des collectivités sur ces volets spécifiques. Mais en termes de communication, elles interviennent principalement auprès du grand public.

4.6.2.3.4 La formation

La formation s'effectue avec l'aide des Espaces Information Energie, des opérateurs chargés de l'animation et aussi d'autres partenaires actifs dans le domaine de l'énergie et de l'environnement (Fédérations du Bâtiment, Syndicats des entreprises BTP et des gestionnaires immobiliers, ADEME, etc.).

Deux cibles sont privilégiées par ces campagnes de formation : les acteurs de l'intervention (entreprises, maîtres d'œuvre, travailleurs sociaux, membres des syndicats de copropriétés, chargé d'opération ou assistants techniques des bailleurs, etc.) et les occupants (à travers la communication sur les comportements économes ou l'apprentissage d'usage des équipements neufs installés après travaux).

4.6.2.4 Élaboration des cahiers des charges OPATB

Les cahiers des charges permettent de cibler les informations nécessaires à la mise en place et à la conduite des OPATB. S'inspirant des cahiers des charges des OPAH, ils accentuent l'effort sur les volets énergétiques et thermiques du périmètre et des actions (16).

4.6.2.4.1 Cahier des charges de l'étude préalable

Ce cahier des charges de l'étude préalable à la mise en oeuvre d'une OPATB constitue un dossier technique de candidature qui motive l'inscription dans

16. Les procédures OAPTb étant en cours de définition parallèlement à la présente recherche, les informations présentées ici ont pu évoluer depuis la date de rédaction du présent chapitre.

une mesure OPATB. Il comprend deux parties, la première correspondant à l'établissement du contexte et de l'état des lieux, la seconde à un bilan des atouts de la collectivité pour engager une OPATB.

4.6.2.4.2 Cahier des charges de l'étude pré-opérationnelle

Le cahier des clauses techniques particulières de l'étude pré-opérationnelle se compose de quatre éléments principaux : le cahier commun, le cahier habitat, le cahier énergie et le cahier pilotage.

Dans le cahier commun, sont définis le contenu de l'étude pré-opérationnelle, les méthodes utilisées et le pilotage général de l'étude OPATB, cette dernière se faisant sous l'égide du comité de pilotage. Les trois autres cahiers spécifient les trois volets d'étude.

Le cahier habitat cible particulièrement la caractérisation du parc de logements privés et son évolution, le fonctionnement du marché immobilier local, les potentialités des logements à améliorer. Il définit également les prescriptions concernant les méthodes d'évaluation.

Le cahier énergie relève des compétences des bureaux d'étude thermiques et énergétiques.

Le cahier pilotage décrit le pilotage et la coordination de l'opération.

Ce découpage permet une certaine flexibilité dans l'engagement des études. Chaque cahier définit les éléments d'élaboration du diagnostic, les prescriptions d'ordre méthodologique pour l'analyse à mener, les tests pré-opérationnels et le programme d'intervention : proposition du périmètre opérationnel et modalités d'action.

5. Indicateurs environnementaux et techniques de réhabilitation

5.1 Indicateurs

Dans le cadre d'une opération de réhabilitation intégrant les aspects environnementaux, notamment dans le cadre spécifique des OPATB, la définition d'indicateurs environnementaux intervient à différentes étapes :

- Pré-diagnostic et diagnostic : les indicateurs peuvent mettre en relief les potentialités et contraintes du périmètre d'intervention. Ainsi les économies d'énergie et les améliorations potentielles peuvent être estimées et comparées au coût d'investissement nécessaire pour les travaux. La gestion et la mise à jour en continu des données permettent un diagnostic précis qui facilite l'établissement du cahier des charges d'intervention.

- Communication : le caractère innovant des OPATB nécessite une forte mobilisation de moyens pour la communication. L'intervention sur un secteur de bâtiments privés suscite également la concentration de l'effort sur des actions d'incitation pour que les particuliers ou les maîtres d'ouvrages professionnels s'engagent. À ce niveau, des indicateurs environnementaux clairement établis contribuent à apporter des arguments tangibles à la nécessité d'amélioration du bâtiment et peuvent avoir un effet incitateur.
- Évaluation : les collectivités doivent être en mesure de produire une évaluation continue de l'opération (types de travaux engagés et achevés, améliorations effectives recensées après travaux) et d'en dresser un bilan quantitatif. Seuls des indicateurs environnementaux clairement définis peuvent permettre cette évaluation.

5.1.1 Les indicateurs thermiques et énergétiques

La réglementation en vigueur est souvent considérée comme une référence dans les opérations de réhabilitation, sans cependant intégrer une obligation d'application précise.

Pour être conforme à la nouvelle réglementation thermique (RT 2000), le bâtiment (résidentiel ou non résidentiel) doit satisfaire trois exigences portant sur sa consommation d'énergie, la température intérieure estivale maximale et les caractéristiques de l'isolation thermique des parois et des équipements de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de climatisation, ainsi que les protections solaires.

5.1.1.1 Consommation d'énergie

La consommation conventionnelle d'énergie doit être inférieure ou égale à la consommation d'énergie de référence, cette dernière étant calculée annuellement en fonction des caractéristiques thermiques de référence (isolation, chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation) :

$$C - C_{\text{réf}}$$

Les bâtiments tertiaires doivent considérer les consommations liées à l'éclairage. Les consommations liées à la climatisation de bâtiment ne sont pas intégrées. Ainsi, le paramètre C intègre les consommations liées au chauffage, à la production d'eau chaude sanitaire, aux auxiliaires de chauffage et à l'éclairage en ce qui concerne le non résidentiel.

La température intérieure estivale conventionnelle maximale doit être inférieure ou égale à une température intérieure de référence. Cette dernière est calculée à partir de caractéristiques thermiques de référence :

$$T_{\text{ic}} < T_{\text{icréf}}$$

Les caractéristiques de l'isolation thermique des parois et des équipements de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire, d'éclairage, de climatisation et les protections solaires doivent présenter des performances minimales. Ceci implique une restriction des produits mis sur le marché si les performances ne sont pas suffisantes par rapport aux objectifs de la réglementation. Les

caractéristiques concernant aussi bien les composants de l'enveloppe que les systèmes (17).

5.1.1.2 Le confort d'été

La réglementation thermique considère le confort d'été dans l'objectif de limiter les surchauffes potentielles et les consommations d'énergie liées à la climatisation. La méthode de calcul développée intègre divers paramètres tels que la possibilité de ventilation par l'ouverture des baies, l'inertie thermique et les protections solaires. Les baies de façade exposées aux bruits doivent avoir une protection solaire minimale. Quatre zones climatiques d'été (Ea, Eb, Ec, Ed) définissent les qualités thermiques (températures et amplitude de variation), l'humidité quotidienne moyenne, le rayonnement solaire et le rayonnement froid vers la voûte céleste.

La température de confort d'été T_{ic} doit être inférieure à la température $T_{iréf}$ définie comme température intérieure de référence. T_{ic} est la température définie comme une valeur maximale de la moyenne sur 3 heures consécutives de la température opérative. Cette dernière est obtenue par convergence du processus itératif de calcul thermique effectué en régime variable. Les équations d'échanges thermiques entre intérieur et extérieur considèrent les apports de chaleur externes (solaires et thermiques), internes et la capacité thermique (inertie) du bâtiment ou de la zone.

Les apports solaires provenant des parois opaques ne sont considérés que pour l'estimation du confort d'été. Pour l'évaluation des consommations de chauffage en condition hivernale, les apports solaires transmis par les baies sont donc les seuls à être pris en compte.

Les facteurs de réduction du rayonnement (f) et les facteurs solaires S , introduisent les effets de masques, l'inclinaison, la protection du vitrage vis-à-vis du rayonnement et la part de rayonnement réfléchi par les parois intérieures vers l'extérieur.

5.1.1.3 Indicateurs de confort thermique

Le confort thermique dépend de la température de l'air ambiant, de celle des parois (qui peut être prise en compte par la température moyenne radiante), de l'humidité de l'air et de la vitesse de l'air. L'ensemble de ces paramètres doit être mis en rapport avec l'activité de l'occupant et sa vêtue.

On peut également aborder la problématique du confort par des mesures de réduction des risques d'inconfort tels que les asymétries de rayonnement, les courants d'air, les écarts de température tête-pieds, etc. Cette démarche n'est pas intégrée dans la réglementation actuelle.

17. Les modalités de calcul de ces consommation énergétiques ont été décrites de manière exhaustive dans une annexe du second rapport d'avancement de la présente recherche, daté de mars 2004.

5.1.1.4 Indicateurs d'efficacité de la réhabilitation

En terme de gains énergétiques, l'efficacité d'une intervention particulière de réhabilitation peut être mesurée par le ratio moyen d'économie d'énergie et par la rentabilité conventionnelle.

Le ratio moyen d'économie d'énergie est défini par :

$$G_c = (C_1 - C_2) / C_1$$

Où C_1 est la consommation annuelle avant intervention et C_2 la consommation annuelle après intervention.

La rentabilité conventionnelle peut être appréciée par le coût de l'équipement rapporté à l'économie moyenne annuelle en tonnes d'équivalent pétrole :

$$Re = \text{coût de l'intervention} / \text{économie annuelle en tep.}$$

5.1.2 Indicateurs acoustiques

L'isolement brut D est la différence de niveau de pression acoustique entre deux locaux adjacents d'émission et de réception. Il est mesuré in situ et prend en compte la totalité du bruit qui arrive dans le local de réception par transmission directe (paroi séparative) ou par transmission latérale (paroi liée à la paroi séparative).

L'isolement normalisé D_{nt} est l'isolement brut corrigé en fonction du rapport entre la durée de réverbération réelle mesurée dans le local de réception et la durée de référence (0.5 seconde à toutes fréquences dans les logements).

5.1.3 Les indicateurs liés à l'effet de serre

La comptabilité énergétique nationale permet d'estimer les rejets de gaz à effet de serre, au niveau de l'ensemble du pays, en fonction des types et quantités d'énergie consommée (18). Au niveau local, sur un périmètre d'OPATB par exemple, les estimations sont beaucoup plus difficiles. Il est nécessaire d'établir un bilan des consommations énergétiques détaillé de la zone et de transformer ces consommations en émission de gaz à effet de serre via des facteurs d'émission spécifiques à chaque type de consommation. Ces approches appellent la collecte d'un grand nombre de données sur la zone, et ne donnent de résultats que pour les émissions directes. Les émissions indirectes (par exemple, pour la production et le raffinage du fioul utilisé ou pour la production de l'électricité), d'énormes bases de données et des hypothèses spécifiques, toujours sujettes à polémique, sont nécessaires.

Notons que l'ICLEI (association internationale de villes) a fait développer un logiciel dans le cadre de la campagne « Climate Protection Campaign » (19).

18. Voir par exemple le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) : <http://www.citepa.org/>

19. Logiciel *emission*. Voir le site <http://www.torriesmith.com/>

Par ailleurs, le logiciel *Gemis* développé par l'Oeko-Institut allemand peut être utilisé au niveau de collectivités locales. Il traite toutes les émissions polluantes, gaz à effet de serre et autres émissions (20). D'autres logiciels du même type existent. Cependant, en matière d'aide à la décision, le besoin d'outils plus simples, ne nécessitant pas de bilan énergétique détaillé en entrée, se fait fortement sentir.

5.1.4 Les sources de données relatives au projet de réhabilitation

L'information sur le patrimoine bâti constitue un élément essentiel pour l'établissement du diagnostic et le montage des opérations de réhabilitation. Selon les différents volets concernés par l'opération, la nature de l'information diffère ainsi que les sources. Globalement trois types d'information sont nécessaires :

- Les informations générales sur le parc de bâtiments à réhabiliter : type, situation géographique, date d'achèvement, surface, occupation, etc.
- L'information sociale concernant la situation du propriétaire bailleur ou occupant, les données relatives à l'occupation (mode et statut d'occupation, activités, nombre d'occupants, etc.),
- L'information technique concernant l'état des locaux relativement aux conditions énergétiques, thermiques et sonores du bâtiment, et déterminant le potentiel de réhabilitation des locaux : orientation du logement, qualité de l'enveloppe, équipements existants de chauffage, etc.

Les enquêtes de terrain et les visites effectuées par les opérateurs lors de l'établissement de diagnostic sommaire ou détaillé du logement à réhabiliter constituent la principale source d'information. Cependant d'autres sources, lorsqu'elles sont disponibles, peuvent s'avérer utiles.

5.1.4.1 Sources de données sur le bâtiment

Les informations utiles concernent le type de logement, l'année d'achèvement de la construction, la surface, le nombre de pièces, le statut d'occupation, l'appartenance à un organisme HLM, les installations sanitaires, les moyens de chauffage, les types de combustibles, etc. Certains organismes possèdent des fichiers renseignés sur certains périmètres :

- Les fichiers du ministère de l'équipement concernent les financements aidés et réhabilitation (PLA, PALULOS, PAH),
- Un recensement des logements sociaux a été instauré par la loi SRU (Solidarité et Renouvellement Urbains),
- EDF possède également des fichiers sur les logements, ainsi que la Direction Générale des Impôts (données issues des fichiers de la taxe d'habitation et des revenus fiscaux),

20. Voir le site : <http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm>

- L'ANAH dispose de fichiers qu'elle exploite avec OPERA, son logiciel d'instruction, de gestion et suivi des demandes de subventions,
- Enfin, lors du Recensement Général de la Population (RGP, effectué environ tous les sept ans jusqu'à 1999), des renseignements relatifs au logement sont enregistrés.

Ces informations peuvent être exploitées de différentes manières.

L'IRIS est un découpage géographique permettant la gestion cartographique de l'information statistique. La base IRIS-2000 (RGP 1999) comporte une série d'informations sur le logement (taille, date d'achèvement, type de combustible ou de chauffage), à l'échelle communale ou à l'échelle de l'îlots pour les territoires découpés. Les fonds numérisés des IRIS-2000 sont constitués d'une base cartographique des communes coproduite par l'IGN et l'INSEE. Pour plus de 900 communes les fonds IRIS sont créés à partir de la Base-îlots (21). Pour les autres, les fonds sont créés par l'INSEE ou grâce aux fonds GEOFLA de l'IGN.

GEOKIT est un logiciel de gestion de données communales sur la construction, l'habitat, l'urbanisme et l'aménagement. Il est disponible dans les DRE et les DDE et alimenté par le Service économique et statistique du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Cette base, contrôlée, documentée et enrichie régulièrement, est composée du fichier SITADEL sur la construction neuve, de l'Enquête Parc Locatif Social (EPLS) et de l'Enquête Commercialisation des Logements Neufs (ECLN) : prix de vente, modes de financement.

Le fichier SITADEL sur la construction neuve est un système d'information et de traitement automatisé des données élémentaires sur les logements et les locaux : permis de construire, année de construction, logements autorisés, types de logements, taille des logements, locaux commencés, maîtres d'ouvrage, SHON. Ce fichier permet le suivi de l'ensemble des opérations faisant l'objet d'un permis de construire, celui des principales caractéristiques des opérations de construction de logements et de locaux non résidentiels, l'étude de l'évolution de la construction neuve. Il comporte les déclarations d'ouverture de chantier (DOC), les déclarations d'achèvement des travaux (DAT), les annulations, les modifications de permis de construire. Pour les statistiques conjoncturelles, les dates retenues sont celles où les événements sont connus de l'Administration ; pour les statistiques rétrospectives, ce sont les dates réelles des événements. Le champ couvert comprend l'ensemble des opérations de construction à usage d'habitation et à usage non résidentiel soumises à la procédure du permis de construire. Pour les permis créant un ou plusieurs logements neufs, ou créant des locaux neufs, les chantiers sont suivis. Les principales caractéristiques de l'opération sont décrites par des variables d'identification et de localisation, des variables qualitatives (type de construction, statut d'occupation, catégorie du maître d'ouvrage, types d'ouvrages des locaux non résidentiels ...) et des variables quantitatives (nombre de logements neufs, SHON, nombre de niveaux des bâtiments, nombre de pièces des logements). L'information est collectée au niveau local, par les services instructeurs (mairies, Directions Départementales de l'Équipement) et transmise mensuellement aux services des DRE qui assurent les exploitations statistiques et la diffusion des informations au niveau régional. Le Service économique et statistique assure la consolidation et la diffusion au niveau national.

L'enquête « Parc Locatif Social » (EPLS) est gérée par le service économique et statistique (Division Financement du logement social) du Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer. Il contient une description

21. Base-îlots® est une base de données géographiques intégrable dans un Système d'Information Géographique. Cette base de données présente les contours d'îlots, leurs codes, des éléments de repérage (version standard), les noms de voies (version intermédiaire) et les numéros de début et de fin de tronçons de voies (version complète).

du parc de logements locatifs sociaux au 31 décembre d'une année, les modifications intervenues au cours de l'année écoulée (réhabilitation, mouvements), les taux d'occupation, le niveau des loyers, les informations relatives au financement et au conventionnement, la nature des programmes, les types de logements, les organismes gestionnaires. Cette enquête ne couvre pas les logements-foyers, les résidences pour personnes âgées ou handicapées, etc.

L'enquête « Commercialisation des Logements Neufs » (ECLN) regroupe les prix de vente, modes de financement des logements neufs. Le Service économique et statistique publie chaque trimestre les résultats de l'enquête effectuée par les cellules statistiques des DRE par voie postale et/ou par enquêteur auprès des promoteurs sur l'ensemble des opérations de construction de cinq logements ou plus et destinés à la vente aux particuliers. Cette enquête est inscrite au programme d'enquêtes obligatoires arrêté par le Conseil national de l'information statistique (CNIS). Les résultats portent sur le nombre de logements mis en vente, réservés, disponibles à la vente, les prix de vente, les délais d'écoulement et le taux de renouvellement des stocks. Les données sont disponibles aux niveaux national et régional, et pour des zones géographiques plus fines (sous réserve de respect du secret statistique).

5.1.4.2 Données sur les consommations d'énergie

L'Observatoire de l'Économie de l'Énergie et des Matières Premières (Direction Générale de l'énergie et des matières premières du Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie) dispose de données régionales sur la production et les consommations d'énergie par secteur et par habitant.

L'Enquête Nationale Logement de l'INSEE (ENL) est réalisée tous les quatre ans sur un échantillon national de 40 000 logements. La dernière enquête date de 1996-1997 et recense les dépenses des ménages en énergie par type. Elle fournit des informations sur les profils des ménages, les caractéristiques du logement, les équipements et énergies pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, la cuisson, etc.

Les fournisseurs d'énergie possèdent des relevés des consommations.

Les Fonds de solidarité pour le logement, la CAF, les Conseils Généraux, la DDASS, disposent d'indication sur les indices des surconsommations d'énergie via le fichier des impayés d'énergie.

Enfin, les organismes HLM ont une connaissance des consommations de leurs logements.

5.2 Techniques de réhabilitation pour l'amélioration thermique, énergétique et acoustique

5.2.1 L'amélioration thermique et énergétique

L'amélioration des conditions thermiques et énergétiques demande une réflexion globale sur le bâtiment, sur les plans technique, architectural et financier. Différentes techniques sont possibles, notamment par l'intervention sur l'enveloppe (isolation du bâtiment par l'intérieur ou par l'extérieur), la protection solaire pour le confort d'été, la mise en place d'équipements plus performants reposant éventuellement sur les énergies renouvelables.

5.2.1.1 Interventions sur l'enveloppe

L'intervention sur l'enveloppe ne doit pas seulement considérer les parois et les baies, mais également les défaillances techniques liées à la perméabilité à l'air des parois et aux ponts thermiques. L'isolation par l'intérieur présente souvent une plus faible efficacité vis-à-vis des ponts thermiques. Les solutions idéales n'existant pas, on opère au mieux selon les contraintes de terrain.

Les réflexions sur les isolations thermiques et acoustiques doivent se faire de manière conjointe. En effet, certains isolants peuvent n'être efficaces que par rapport à un seul aspect, acoustique ou thermique.

L'encadré ci-dessous rappelle les principales techniques courantes d'isolation des enveloppes.

Isolation par l'extérieur

L'isolation de l'enveloppe par l'extérieur est généralement coûteuse et lourde à mener, mais efficace (gain pour les niveaux intermédiaires pouvant atteindre 90%) car elle considère conjointement les problèmes d'isolation de parois et les ponts thermiques. L'isolation des niveaux intermédiaires doit être accompagnée par celle des niveaux supérieurs et inférieurs notamment les toitures et parties chauffées en contact avec le sol ou avec des locaux non chauffés.

L'isolation par l'extérieur peut être conseillée lorsque les enduits extérieurs sont défectueux. Elle permet de faire deux opérations en même temps : l'isolation et le ravalement. Cependant, pour les interventions en site ou bâtiment protégé, cette technique n'est pas toujours possible, notamment quand la modification de l'aspect extérieur du bâtiment est soumise à l'approbation de l'Architecte des Bâtiments de France, quand les façades présentent beaucoup d'irrégularités (corniches, balcons, terrasses ...) car le recouvrement devient difficile.

L'intervention en copropriétés dégradées présente également cet inconvénient de recherche d'un accord unanime pour l'intervention sur l'ensemble d'un bâtiment, qui se pose assez souvent dans les opérations de réhabilitation. L'isolation par

l'intérieur permet alors de contourner ces contraintes même si son efficacité reste le plus souvent assez relative.

Les solutions techniques sont multiples :

- L'enduit mince sur isolant : système composé d'un isolant (généralement du polystyrène expansé), d'un enduit spécifique armé d'un tissu de fibres de verre et d'un enduit de finition. Le mode de fixation est choisi selon la nature du support. S'il est régulier, on procède par collage. Dans le cas contraire, la fixation mécanique s'impose.
- L'enduit hydraulique sur isolant : la technique est proche de la précédente. L'enduit mince est remplacé par un enduit hydraulique (mortier) généralement projeté. La tenue aux chocs dans les endroits exposés est meilleure et l'entretien plus aisé en zone urbaine.
- Les parements sur isolants : l'isolant revêtu ou recouvert de pierres minces, de carrelages ou de panneaux de bardage ou de contre-murs en brique, est fixé au support.
- Les vêtements : une vêtue est constituée d'éléments préfabriqués en usine comprenant un isolant (généralement le polystyrène expansé moulé) et une plaque de parement. La mise en œuvre s'effectue par fixation mécanique.
- Les enduits isolants : ils sont constitués de mortiers auxquels sont incorporées des particules de matériaux isolants (billes de polystyrène expansé, vermiculite exfoliée ...). Généralement appliqués en trois couches, ils ne permettent pas d'obtenir des résistances thermiques équivalentes à celles atteintes par les autres procédés. Ils sont réservés aux parois déjà isolées auxquelles on souhaite apporter un complément d'isolation.

Isolation par l'intérieur

La solution d'isolation par l'intérieur ne permet pas de traiter tous les types de ponts thermiques (par exemple les nez de dalle). Par contre, elle est moins coûteuse que l'isolation par l'extérieur et ne modifie pas l'aspect du bâtiment. Dans les situations difficiles de mise en accord des copropriétaires, cette solution est appropriée pour des améliorations personnalisées.

L'isolation par l'intérieur présente cependant l'inconvénient de réduire sensiblement le volume intérieur. Elle oblige une mise en œuvre complexe, liée à la prise en compte des contraintes de l'existant, notamment les gênes possibles par exemple pour l'ouverture des baies du fait de l'épaisseur additionnelle, une mise en œuvre qui peut être contraignante dans le cas de prises électriques existantes, de canalisations ou autres équipements à démonter.

Il existe trois types de produits correspondant à différentes techniques de pose :

- les panneaux simples d'isolant : des isolants collés au support et protégés par une cloison de doublage. Lorsque ce support est trop irrégulier, il est préférable d'envisager des fixations mécaniques.
- les panneaux composites (ou complexes) sont constitués d'un parement en plâtre cartonné (qui évite la contre-cloison) et d'un isolant (laine minérale, polystyrène ou polyuréthane). Posés sur des cales en bois, les panneaux sont fixés contre le mur, par collage (paroi sèche et plane) ou par vissage sur tasseaux (fixés préalablement au mur, ils permettent de ménager une lame d'air entre l'isolant et la paroi).
- les panneaux « sandwich » sont constitués d'un isolant collé en usine entre deux plaques de plâtre. Plus rigides que les précédents du fait de leur double parement, ils sont utilisés pour isoler des murs humides ou présentant des irrégularités importantes. Leur pose s'effectue par vissage sur des tasseaux, en ménageant une lame d'air de 3 cm environ.

Isolation des baies

Elle peut également être réalisée de différentes manières :

- remplacement d'une fenêtre simple vitrage par un double vitrage simple ou plus performant (vitrage peu émissif, isolation entre vitrage par un gaz, etc.),

- isolation par survitrage (un châssis est rapporté sur le vantail d'une fenêtre existante). Cette technique est actuellement peu utilisée,
- remplacement de la menuiserie de la fenêtre ; ce remplacement reste peu efficace vis-à-vis de l'amélioration des performances énergétique des locaux, cependant, beaucoup de propriétaires occupants font le lien entre les déperditions thermiques et l'état des menuiseries,
- renforcement de la perméabilité à l'air des baies, par le changement ou l'isolation des caissons à store roulant notamment,
- protection solaire des baies, par l'adjonction au vitrage d'un film protecteur, ou l'installation de brise soleil, store ou autre masque en façade.

Isolation des toitures

Les toits sont généralement les parties les plus importantes à isoler, car ils constituent les principaux lieux de déperdition de chaleur dans une maison individuelle. Les combles perdus, qui sont des locaux non occupés situés sous la partie inclinée des toitures, ne nécessitant pas chauffage, doivent être isolés du reste du logement. Deux types d'isolation pour les combles sont possibles. On peut intervenir sur le plancher qui sépare la toiture du logement (combles perdus) ou bien en sous face de toiture. Dans ce cas, l'isolant posé en sous face est à base de fibres minérales en rouleaux équipées d'un pare-vapeur.

L'isolation des combles perdus se fait en intervenant sur le plancher qui sépare la partie du logement chauffé des locaux non chauffés. Elle permet d'éviter l'isolation de la toiture, plus complexe et difficile à mettre en œuvre en raison de la pente et des porosités multiples. De plus, elle permet d'aérer la toiture en été. L'isolant est simplement disposé sur le plancher. En présence de solives, l'isolant doit être disposé entre chacune de ces dernières, sans les dépasser, si on prévoit la pose d'un plancher. Sinon l'isolant doit recouvrir toutes les solives.

Plusieurs types d'isolant peuvent être utilisés : fibres minérales en rouleaux, équipées d'un pare-vapeur, isolants en vrac (vermiculite) déversés sur le plancher, laine de verre en vrac, isolants en panneaux (polystyrène, polyuréthane) disposés jointifs sur le plancher.

5.2.1.2 Installation de dispositifs solaires

On peut améliorer les conditions énergétiques d'un bâtiment en installant différents dispositifs solaires sur l'enveloppe existante :

- Vérandas comme pièces indépendantes ou en extension des cuisines et des séjours dans les espaces résidentiels (en veillant à une orientation et une disposition architecturale évitant les surchauffes estivales),
- Protections solaires des baies pour le confort d'été (la réglementation thermique invite à considérer les protections solaires plus spécifiquement pour les baies exposées au bruit, dans la mesure où celui-ci influence l'ouverture de la fenêtre, élément important pour la ventilation),
- Dispositifs solaires de production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage (capteurs solaires thermiques en façade ou en toiture),
- Dispositifs actifs de production d'électricité (panneaux photovoltaïques).

Ces dispositifs exigent des contextes architecturaux spécifiques : capacité d'extension pour les vérandas, faculté de modification des façades pour les autres dispositifs. Dans la réglementation française actuelle, cette dernière faculté peut poser problème en centre urbain ancien soumis à une protection architecturale particulière (secteur sauvegardé, Zones de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager, ZPPAUP, abords de monuments historiques, etc.).

Remarquons qu'il s'agit là d'actions liées à une certaine volonté politique de promotion des énergies renouvelables. Depuis août 2000 à Barcelone, un arrêté municipal, connu sous le nom d'Ordonnance de Barcelone, impose l'installation de capteurs solaires pour la production d'au moins 60% de l'eau chaude sanitaire lors de toute nouvelle construction ou rénovation d'un immeuble collectif dont la consommation en eau chaude dépasse 2500 litres par jour. Suivant l'exemple de la municipalité de Barcelone, plusieurs agglomérations voisines s'apprêtent à promulguer (ou l'ont déjà fait) des règlements allant dans le même sens.

5.2.2 L'amélioration des conditions d'aération et d'humidité

Les problèmes d'humidité et d'aération sont sources d'inconfort et de désordres qui ne concernent pas seulement les bâtiments anciens. Les isolations thermiques et acoustiques peuvent provoquer des condensations localisées et la dégradation de l'aération du logement.

L'humidité dans les murs est nuisible car elle provoque des dégradations affaiblissant leur résistance. Les problèmes rencontrés se manifestent par des désordres dans le logement (moisissure des papiers peints et peintures, dégradation des menuiseries en bois), la mauvaise évacuation des odeurs, de la vapeur d'eau, de fumée et de gaz toxiques, le mauvais fonctionnement des appareils de chauffage ou de production d'eau chaude (arrêts intempestifs, dégagement d'oxyde de carbone lié à la raréfaction de l'air).

L'humidité peut avoir différentes origines : l'eau capillaire (ascension de l'eau dans les murs non isolés du sol), l'eau de pluie et la condensation. Les solutions contre les remontées capillaires peuvent être assez simples comme l'intervention sur l'entourage immédiat du bâtiment (modification des pentes du terrain, application d'enduits remédiant à la porosité du murs en contact avec le sol, ventilation des caves, drainage de l'eau au pied des murs, assèchement des murs par électro-osmose ...). Concernant l'eau de pluie, les interventions visent principalement à renforcer l'étanchéité de l'enveloppe (toitures, façades, enduits, revêtements, bardage, etc.).

La condensation se manifeste sur les parois dont la température superficielle est au-dessous du point de rosée, en particulier les vitres et les parois extérieures mal isolées. Les remèdes consistent à diminuer l'hygrométrie des locaux (ventilation mécanique, installation de hottes, abaissement de la température de l'eau chaude sanitaire, etc.), à assurer une régulation du chauffage permettant d'obtenir une température homogène dans les locaux, et à diminuer l'effet de parois froides (en contrant les problèmes liés aux ponts thermiques).

Améliorer l'aération ne signifie pas obligatoirement l'augmenter mais plutôt l'adapter aux besoins. Ces besoins dépendent de l'utilisation des locaux. En effet, la production de vapeur d'eau est fonction du nombre d'occupants et de leur activité. Les phénomènes de condensation dépendent de la température de chauffage : les contrastes entre températures de l'air intérieur et températures de surface peuvent être source de condensation, notamment au niveau des parois vitrées et des ponts thermiques. L'analyse de l'état du logement repose sur l'appréciation des besoins d'aération et de l'efficacité du

système existant. Il est également important de recenser les éléments susceptibles d'orienter le choix de nouveaux dispositifs d'aération, notamment la configuration spatiale, la présence de gaines ou de conduits de fumées.

Plusieurs techniques peuvent être proposées pour la ventilation. La plus simple est la ventilation par les ouvrants qui s'effectue par l'ouverture de la fenêtre de la pièce à aérer ou la création d'ouvrants. Ce moyen ne permet pas de contrôler le débit de ventilation (et pour cette raison, peut aller à l'encontre de l'économie d'énergie) et dépend de l'initiative des occupants. La ventilation traversante s'effectue grâce à des orifices hauts et bas, présents en façade. Le moteur du tirage est thermique, reposant sur l'écart de la température de l'air intérieur entre le haut et le bas de la pièce. Ce dispositif ne fonctionne néanmoins pas toujours dans le sens prévu, car il dépend des conditions climatiques, notamment du vent et de la température extérieure. De plus les débits peuvent être parfois insuffisants, parfois excessifs.

La ventilation verticale à tirage naturel s'effectue grâce à des conduits verticaux débouchant sur l'extérieur. La maîtrise des débits reste difficile, ils sont importants l'hiver, quand le tirage thermique est maximal, et insuffisants voire nuls en mi-saison et l'été. La ventilation mécanique verticale ou horizontale est réalisée par une extraction mécanique qui, théoriquement, permet le contrôle des débits et reste donc indépendante des conditions climatiques en s'adaptant aux besoins. Elle nécessite l'installation de conduits. On parle de ventilation mécanique contrôlée (VMC) quand l'air est introduit par des orifices autoréglables se trouvant généralement au dessus des baies, et l'extraction s'effectue mécaniquement par un groupe d'extraction. Le système de contrôle intéresse l'ensemble du logement avec possibilité de modulation en fonction des besoins.

5.2.3 L'amélioration des conditions d'éclairage

Le confort visuel d'une installation d'éclairage est déterminé par deux conditions étroitement liées : les conditions de nature physiologique (conséquence des mécanismes de la vision) et les conditions subjectives d'ordre psychologique, propres à chaque usager.

Selon la littérature, un bon éclairage fonctionnel ne doit pas attirer l'attention de façon consciente ou inconsciente. Plusieurs sortes de perturbations de la fonction visuelle peuvent être engendrées par les conditions d'éclairage. L'inconfort, la fatigue visuelle ou même des altérations rétiniennes plus ou moins durables peuvent être liés à des efforts répétés des mécanismes de la vision dus à une insuffisance d'éclairement, à des éblouissements (plus ou moins forts et répétés), ou à la nécessité d'accommodations répétées imposée par des forts contrastes lumineux, la présence de plans différents, etc.

On peut admettre qu'une installation d'éclairage est bonne si :

- Tous les objets et espaces sont classés en importance et en fonction par l'éclairage,
- L'éclairage permet la lisibilité de l'environnement,
- L'atmosphère créée est en harmonie avec la fonction de chaque espace et objet,

- Il satisfait aux conditions de confort visuel,
- Sa durabilité et sa maintenance sont assurées,
- Il est efficace du point de vue énergétique. Favoriser l'éclairage naturel permet de minimiser les consommations. Par contre, par la connaissance de l'ensoleillement et l'éclairage naturel, cet éclairage doit être maîtrisé et géré afin d'optimiser le confort visuel.

Il n'existe pas de cadre réglementaire spécifique à l'éclairage domestique. Seuls les locaux visés par le code du travail (lieux de travail) ont des conditions minimales à respecter et des types de sources à utiliser selon les fonctions du lieu.

5.2.4 L'amélioration acoustique

5.2.4.1 Isolation des bruits extérieurs

Pour l'isolation par rapport aux bruits extérieurs, on peut intervenir au niveau du plan de masse du bâtiment ou sur son enveloppe. L'intervention au niveau du plan-masse peut se faire par l'implantation d'écrans acoustiques, la transformation ou la modification de la voirie, la modification des conditions de circulation et de l'aménagement de l'espace extérieur.

Concernant l'intervention sur l'enveloppe du bâtiment, il faut identifier les voies de transmission du bruit. Les transmissions directes (TD) se font par les composants opaques ou vitrés de la façade qui transmettent une énergie acoustique vers l'intérieur quand ils sont sollicités par les bruits extérieurs. Les transmissions latérales (TL) se font par les parois solidaires de la façade qui captent et rayonnent l'énergie acoustique de la façade (sollicitée par les bruits extérieurs) vers les pièces. Les transmissions parasites (TP) concernent les bruits qui pénètrent par les entrées d'air et par les coffres des volets roulants.

La qualité acoustique de l'enveloppe extérieure peut être améliorée grâce à :

- L'isolation thermo-acoustique des parois extérieures (on peut également intervenir en posant un revêtement sur les sous-faces des balcons),
- L'intervention sur les baies et parois vitrées : le choix du type d'ouvrant, le montage et le système d'étanchéité influencent l'isolation acoustique. Le vitrage reste très perméable au bruit par rapport à une surface opaque. Le rapport surface vitrée / surface opaque peut être important,
- L'intervention sur les conduits, entrées d'airs et coffres de volets roulants.

5.2.4.2 Isolation des bruits intérieurs

On cherchera à atténuer la transmission des bruits entre les logements et entre les parties communes et les logements.

L'article 2 du deuxième arrêté du 28 octobre 1994 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments définit un isolement acoustique normalisé au bruit

aérien, entre une circulation commune intérieure et la pièce d'un logement, qui doit être égal ou supérieur aux valeurs indiquées.

Par ailleurs, dans la conception, il s'agit d'éloigner les pièces d'habitation en regroupant et utilisant les espaces de services comme tampon, ou en utilisant les joints de construction. Certains interviendront sur la minimisation des contacts de la paroi séparative.

Dans l'intervention sur l'existant, il s'agit d'améliorer les conditions d'isolation des parois et planchers en optant pour des revêtements spécifiques. Les bouches de VMC d'appartements différents placées l'une en face de l'autre doivent faire l'objet de précautions complémentaires.

Certains équipements peuvent être source d'inconfort. On peut y remédier en intervenant sur les équipements eux-mêmes ou sur le local accueillant ou jouxtant ces équipements. Dans le premier cas, il s'agira d'améliorer ou de changer les équipements, de désolidariser l'équipement du bâtiment avec des plots anti-vibratiles, d'éloigner l'équipement des zones d'activité ou d'habitation, des murs et des parois vitrées. Dans le second cas, on pourra modifier les revêtements par la pose d'absorbants ou de revêtements de sol performants, modifier l'enveloppe (la paroi séparatrice ou l'enveloppe du local technique), désolidariser le local de la structure et du bâtiment (en optant pour une dalle flottante ou un joint), opter pour un écran ou un espace tampon (placards entre deux pièces ou entre chambre et pièce d'eau).

5.2.5 Esquisse des relations entre techniques d'intervention et indicateurs environnementaux

Le tableau page suivante montre l'incidence des techniques courantes d'intervention en réhabilitation, sur les principaux indicateurs utiles pour estimer la performance environnementale des enveloppes.

Cette esquisse reste qualitative. Elle peut être cependant s'avérer utile à des fins de communication ou d'aide à la décision.

			Consommation énergétique annuelle et mensuelle [Wh ou Wh/m²]		Apports et déperditions énergétiques surfacique (m² d'enveloppe) ou totale [Wh]		Caractéristiques de l'enveloppe		Ambiance thermique		Aération et ventilation Débits [m3/h] et débits surfaciques [m3hm²d'enveloppe]		Bruit [dB _A]		Eclairage [lux]																	
			C	Ced	QD	D	Qsol	Qint	Qh	Qw	Uparoi	Ubaie	ψ	Ubat	Cm	Tic	Top	Trad	Hr	Q	q	V	Lnat	Dnat	E	Eclair	Eclair					
☐ dépendant des situations ☐ aucun changement ☐ augmentation ☐ diminution	Intervention sur l'enveloppe	Isolation par l'extérieur	Façades	isolation phonique	isolation thermique	étanchéité et perméabilité																										
			Toitures	isolation phonique	isolation thermique	étanchéité / perméabilité																										
			Balcons/ terrasses	isolation phonique																												
			Baies	Double vitrage	Double vitrage + vitrage peu émissif	Double vitrage + vitrage gaz isolant	Double vitrage + film protecteur																									
			Association des qualités	Création ou modification de masque	Changement ou création de stores ou volet	Installation de brises soleil	Modification de la ventilation	Création de baies ou d'ouvertures																								
			Isolation par l'intérieur	Murs	isolationphonique	isolation thermique	étanchéité et perméabilité																									
				Toiture	phonique	thermique	étanchéité / perméabilité																									
			Planchers	isolation phonique	isolation thermique																											
	Intervention systèmes	Système de chauffage	Système d'aération	Réglage de grilles d'air existantes	Pose ou remplacement de grilles d'air existantes	Installation d'une VMC																										
				Modification des équipements de chauffage	Modification des organes de réglage et de programmation	Modification des équipements de production d'eau chaude sanitaire																										
				Modification des équipements de climatisation	Modification des conduits	modification des organes de réglage et de programmation																										
Interaction enveloppe système				Installation de panneaux solaires	de production d'eau chaude	de chauffage	de production électrique																									
				Modification de panneaux solaires	de production d'eau chaude	de chauffage	de production électrique																									
					de production d'eau chaude	de chauffage	de production électrique																									

6. Développement d'un outil de diagnostic environnemental des enveloppes dans le cadre d'une OPATB

Cette recherche s'inscrit dans le contexte des opérations programmées d'amélioration thermique et énergétique des bâtiments (OPATB). Nous appuierons donc nos développements en regard des spécificités de ces opérations, bien que le système proposé possède une portée plus générale, pour toute opération de réhabilitation ou de diagnostic, mettant en jeu des données environnementales.

6.1 Un SIG 3D pour l'assistance à la conduite d'une OPATB

6.1.1 Définitions

Les systèmes d'information géographique, le plus souvent désignés par l'acronyme SIG en français (GIS en anglais), sont des outils informatiques qui servent à manipuler (saisir, enregistrer, modifier), analyser et visualiser des données géographiquement référencées. La plupart des outils de type SIG intègrent les fonctions suivantes :

- Consultation de cartes, d'attributs d'objets, de la structure de la base de données,
- Sélection d'un ou de plusieurs objets, par type d'objets, par requête,
- Saisie d'informations géométriques, de fonctions d'accrochage, de toponymes, de topologie,
- Analyse des données,
- Requêtes sémantiques, thématiques, géométriques, topologiques,
- Cartographie, représentation d'objets ponctuels, linéaires et surfaciques,
- Symbolisation en fonction de valeurs d'attributs, de l'échelle utilisée,
- Échanges d'informations par importation et exportation de données, impression de plans, sauvegardes de fichiers « dessins », etc.

Certains outils se spécialisent et mettent l'accent sur des fonctionnalités spécifiques (le géocodage, le traitement d'image, les calculs en trois dimensions). Un SIG est dit 3D lorsqu'il permet de manipuler des données décrites dans les trois dimensions de l'espace.

Un vocabulaire spécifique à ces outils existe. Nous donnons ici la définition des mots et expressions couramment utilisées (22) :

Attribut : Caractéristique d'une entité cartographique. Les attributs d'une rivière, par exemple, peuvent comprendre son nom, sa longueur et sa profondeur moyenne. Un SIG stocke les attributs dans des tables et les lie aux entités cartographiques qu'ils décrivent.

Géomatique : Ensemble des applications liées à la gestion et au traitement informatique des données géographiques.

Géoréférencement : Processus visant à établir une relation mathématique entre des coordonnées (exemple : centimètres ou millimètres) sur une carte

22. Ces définitions sont pour la plupart issues du glossaire proposé par le site web de la société ESRI : <http://www.esrifrance.fr/societe/glossaire.htm>

planaire et des coordonnées réelles (géographiques). Le géoréférencement nécessite de connaître les coordonnées d'un certain nombre de points (points de calage) dans l'un et l'autre des systèmes.

Géotraitement : Ensemble des traitements, généralement de type opération booléenne (intersection, union, différence), effectués sur des données géoréférencées.

Requête : Question ou demande formulée pour sélectionner des entités ou des enregistrements. Une requête se présente souvent sous la forme d'un énoncé ou d'une expression logique. Il existe un langage normalisé de requêtes SQL (*Search Query Language*) supporté par la plupart des SGBD (systèmes de gestion de bases de données). Autrement dit, une requête SQL formulée pour interroger la base X pourra être utilisée sans modification pour interroger la base Y, si X et Y partage le même modèle de données.

Visualisation cartographique : Représentation graphique d'une région (zone) géographique et des entités qui s'y trouvent.

6.1.2 Pertinence d'un SIG dans le cadre d'une OPATB

Les opérations de réhabilitation de type OPATB se déploient sur des territoires urbains souvent larges comprenant de nombreux bâtiments. À cet égard, les techniques de cartographie numérique et les SIG (2D ou 3D) devraient très naturellement faire partie des outils de base de ces opérations. De plus, le nombre important des données manipulées, la nécessité de leur croisement pour l'analyse, ainsi que le besoin de documents de communication clairs, faciles à produire et à actualiser (suivi et bilan de l'opération) imposent plus encore le recours au SIG comme un moyen susceptible de faciliter la réussite de l'opération. Au final, les outils SIG s'imposent dans le cadre des OPATB :

- Par leur capacité à intégrer l'ensemble des données (environnementales, sociales, patrimoniales, etc.) utiles à l'opération sur un territoire donné, géographiquement référencé,
- Par leurs possibilités quasi-illimitées de croisement de données (requêtes) permettant de produire efficacement toutes les analyses utiles, aux différentes phases de l'opération, de l'étude préalable jusqu'au bilan final chiffré,
- Par la facilité qu'ils offrent pour la production de documents visuels 2D ou 3D actualisables à tout instant.

Nous décrivons ci-après les avantages que la collectivité pourrait tirer de la mise en œuvre d'un SIG dans les différentes phases d'une OPATB. Cette vision reste bien évidemment idéalisée. Nous verrons plus loin les difficultés et limites qui se présentent en situation réelle.

6.1.2.1 Phase d'étude préalable

Il s'agit dans cette phase de rédiger le cahier des charges de l'étude préalable à la mise en œuvre d'une OPATB. Celui-ci constitue un dossier technique de candidature qui motive l'inscription dans une mesure OPATB. Il comprend deux parties, la première correspondant à l'établissement du contexte et de

l'état des lieux, la seconde à un bilan des atouts de la collectivité pour engager une OPATB.

Le diagnostic préalable doit mettre en évidence les dysfonctionnements urbains et sociaux et les atouts existants en termes de réhabilitation du périmètre choisi. Doivent également être soulignées les caractéristiques énergétiques du territoire, le gisement potentiel d'économie d'énergie.

L'équipe qui monte le dossier de candidature devra commencer par réaliser (s'il n'en dispose pas déjà) une maquette du périmètre choisi (à cette étape, il peut s'agir d'une maquette 2D issue du plan cadastral). Elle pourra ensuite, via un SIG, renseigner la base de données avec les informations d'usage des bâtiments (bâtiments publics, tertiaires, logements, commerces). Connaissant les périodes de construction de ces bâtiments, elle sera en mesure d'évaluer approximativement les caractéristiques thermiques des enveloppes. Pourront également être introduites dans la base de données des informations relatives aux sources de chaleur utilisées, réseaux ...

Le SIG permettra alors de croiser les différents paramètres disponibles et de mettre en évidence le gisement potentiel d'économie d'énergie. Il facilitera les différentes analyses entre facteurs sociaux et paramètres techniques.

6.1.2.2 Phase d'étude pré-opérationnelle

Les études pré-opérationnelles permettent de préciser le contenu de l'OPATB, ses objectifs spécifiques quantitatifs et qualitatifs, les moyens à mettre en œuvre et les engagements de chacun des partenaires. Ces études doivent associer l'ensemble des acteurs concernés publics et privés.

Cette phase comporte en général deux étapes : le diagnostic précis et la détermination des stratégies d'action et d'animation de l'opération.

Au cours de l'étape de diagnostic précis, l'équipe de la collectivité territoriale relèvera les informations nécessaires à la conduite de l'opération sur le plan urbain, social, économique, immobilier et patrimonial, déterminera les secteurs ou bâtiments ciblés ainsi que les profils des occupants et des propriétaires.

Elle pourra alors intégrer au SIG des sources statistiques existantes, les résultats d'études et politiques précédentes, les informations collectées lors d'enquêtes de terrain (repérage des situations du bâti, de la vacance, rencontre des propriétaires, des habitants, des usagers) ou suite aux réponses aux questionnaires réalisés sous forme de publipostages ou par entretien direct.

A ce niveau, il devient indispensable d'investir dans l'élaboration d'une maquette 3D dans laquelle on pourra faire apparaître plus précisément les informations comme des usages différenciés de bâtiments (commerce au rez-de-chaussée, logement au-dessus) ou des réhabilitations partielles. Pourront alors être réalisées des simulations d'ensoleillement qui mettront en évidence les surfaces à fort potentiel d'apport solaire. Pour ces surfaces, pourront être faites des cartes de visibilité depuis la voie publique, ce qui permettra de cibler les meilleurs emplacements pour l'intégration de différents systèmes solaires.

Pour renseigner la base de données, les collectivités peuvent recourir à des opérateurs différents, dont certains sont spécialisés dans le diagnostic thermique et énergétique (bureaux d'étude technique) et dans le travail de terrain pour d'autres. Cependant, l'objectif étant dans cette étape d'accumuler les données nécessaires à l'élaboration d'une stratégie, ce qui incombe à l'équipe de la collectivité, il est préférable que ce soit cette dernière qui gère l'intégration des données.

Toutes ces informations, qui viennent compléter celles déjà acquises lors de l'étude préalable serviront de base à la phase de détermination des stratégies d'actions et d'animation de l'opération. Il s'agit alors de croiser les données disponibles pour enrichir les réflexions sur :

- le périmètre opérationnel,
- les objectifs et modalités d'actions en matière d'habitat,
- les modalités de financement,
- la mise en œuvre d'une politique foncière (définition des priorités d'intervention, modalité de gestion, mise en place d'un observatoire des disponibilités foncières),
- les actions proposées sur le plan social,
- les actions de mobilisation du partenariat pour la mise en œuvre du programme d'intervention,
- la proposition des modalités d'animation et de communication.

L'objectif est de définir des actions incitatives ciblées selon les situations et les préoccupations des propriétaires.

6.1.2.3 Phase opérationnelle

Dans cette phase, trois types d'outils s'avèrent nécessaires :

- Des outils de sensibilisation et de communication, permettant d'appuyer le démarchage auprès des propriétaires ciblés ; la personnalisation de la communication est en général très souhaitable ;
- Des outils d'évaluation rapide des caractéristiques environnementales des enveloppes construites et des améliorations potentielles, ainsi que leurs répercussions financières immédiates (coût des travaux) et lointaines (économies d'énergie et amortissement) ;
- Des outils de suivi permettant à la collectivité de s'assurer régulièrement que les actions de réhabilitation entreprises convergent vers l'objectif de réduction des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre sur le secteur concerné (évaluation continue de l'efficacité de l'OPATB).

Le SIG 3D devient alors un outil de communication. Il peut être utilisé par l'équipe d'animation comme support pédagogique lors des interventions auprès des propriétaires. Il permettra de constater les performances effectives de leur logement ou bâtiment (par comparaison immédiate à d'autres bâtiments de la zone d'étude) et d'évaluer, en leur présence, différents scénarii de réhabilitation. Le calcul des gains de consommations pourra alors être utilisé pour évaluer la faisabilité et la pertinence de la solution du point de vue financier.

6.1.3 Nécessité d'intégrer la troisième dimension

Depuis une dizaine d'années, la troisième dimension fait progressivement son apparition au sein des systèmes d'information géographique. Cependant, les possibilités de représentation 3D des informations géographiques sont souvent perçues comme un moyen de produire, par l'intermédiaire d'images texturées, de spectaculaires scènes photo-réalistes. La 3D est alors envisagée comme une forme supplémentaire de visualisation interactive, sans interférer avec les modèles de données sous-jacents qui restent le plus souvent en deux dimensions, éventuellement en couches horizontales superposées.

Il existe cependant une nécessité fondamentale d'utilisation de la troisième dimension pour les données qui ne peuvent être correctement représentées en 2D. Les données environnementales font partie de celles-ci. Par exemple, il est très réducteur de représenter l'ensoleillement d'un immeuble par un attribut moyen (durées ou valeurs énergétiques). Non seulement les valeurs d'ensoleillement sont différentes suivant les façades (qui peuvent avoir elles-mêmes des formes et hauteurs différentes) mais de plus, par les effets de masques caractéristiques des milieux urbains denses, ces valeurs varient considérablement entre les niveaux bas et haut d'un même immeuble. Il en va de même pour ce qui concerne l'exposition au vent, l'exposition au bruit ou les questions d'intervisibilité. Dans tous ces cas, il est nécessaire de moduler les données en fonction de la hauteur des bâtiments, c'est-à-dire d'affecter les données non pas aux entités géographiques représentées en deux dimensions, mais aux formes tridimensionnelles des bâtiments, c'est-à-dire aux éléments de leur enveloppe.

Ainsi, les SIG 3D ne peuvent être seulement catalogués comme des outils de communication. Ils se révèlent indispensables pour manipuler et analyser de l'information complexe, se déployant à la fois dans le temps et dans les trois dimensions de l'espace. Les données environnementales permettant de caractériser les enveloppes bâties sont de cet ordre. De ce fait, il apparaît que tout outil SIG défini avec l'objectif de qualifier ces enveloppes pour leur réhabilitation, devrait d'emblée prendre en compte les trois dimensions de l'espace. Dit autrement, un SIG pour l'assistance à la conduite d'une opération de réhabilitation environnementale des enveloppes construites, devrait être un SIG 3D. Un tel outil devrait ainsi :

- Être capable d'intégrer les résultats d'observations et de simulations de phénomènes sur l'enveloppe des bâtiments représentés,
- Permettre l'analyse des propriétés environnementales des enveloppes construites afin de pouvoir cibler les bâtiments sur lesquels un processus de réhabilitation doit être engagé (phase pré-opérationnelle) et pour assister les décisions de réhabilitation en phase opérationnelle,
- Faciliter le dialogue et la concertation avec les maîtres d'œuvre (public ou privés) en produisant une information explicite, complète, claire, lisible par les non-experts.

Ce sont ces objectifs que nous cherchons à atteindre à travers le système proposé et développé dans le cadre de la présente recherche.

6.2 Proposition d'un système

6.2.1 Les SIG 3D existants

6.2.1.1 Tour d'horizon

Le plus souvent, lorsqu'un éditeur de SIG met en avant une solution dite 3D, celle-ci ne prend en charge qu'une 3D approximative, certes suffisante pour bon nombre d'applications, mais généralement trop restrictive pour la représentation architecturale et urbaine. De manière générale, nous qualifions de 2,5D ces modélisations dont la caractéristique essentielle est de faire correspondre à un couple (x,y) de coordonnées géographiques une et une seule altitude z .

Les solutions proposées autour de la thématique 2,5D sont aujourd'hui très nombreuses et s'étendent à travers de nombreux domaines d'applications. L'U.S. Army Topographic Engineering (23) a produit en juin 2002 un document recensant quelque 600 solutions commerciales disponibles traitant de visualisation dites 3D. Toutes les branches de la 3D y sont abordées ainsi que tous les domaines d'applications, mais les solutions dédiées à l'information géographique sont en nombre très limité. Il ne reste alors plus que quelques dizaines de logiciels pouvant être classés en 3 catégories que nous détaillons ci-dessous, avec une liste non exhaustive d'exemples de logiciels pour chacune d'entre elles.

6.2.1.1.1 Logiciels de visualisation 3D

- Logiciel World Construction Set, 3D Nature : modélisation et la visualisation de terrains photo-réalistes.
- Logiciel Virtual Forest et RAPID Surfing, Pacific Meridian Resources : visualisation en foresterie et survol de modèle de terrain sous Arc/Info.
- Logiciel Vertical Mapper, Northwood Geoscience : extension pour la visualisation 3D du logiciel MapInfo.

6.2.1.1.2 Logiciels de visualisation et navigation 3D

- Logiciel Fly!, PCI Geomatics : outil de visualisation de terrain et de création de scènes 3D texturées.
- Autodesk Map 5 : Module cartographique d'AutoCAD.
- Logiciel Environmental Visualization System EVS, C Tech Development Corp. : visualisation 3D et analyse géostatistique d'environnements miniers et sites contaminés.

23. Jorgensen, T.E. *Survey of Terrain Visualization Software*. US Army Topographic Engineer Center. Topography, Imagery and Geospatial Research Division, 12 juin 2002

6.2.1.1.3 Logiciels de navigation et visualisation avec des fonctions d'analyse

- Module 3D for Geoconcept, Geoconcept SA : extension 3D de GeoConcept pour la création de modèles numériques de terrain (MNT), scènes 3D ou profils en long.
- Erdas Logiciels IMAGINE Virtual GIS, ERDAS : outil de visualisation et d'analyse supportant des fonctionnalités SIG dans un environnement 3D.
- Logiciel SIS, Cadcorp : logiciel de SIG présentant des possibilités 3D et notamment utilisé par l'Institut Géographique National français (IGN).
- Virtual Geo, Communication & Systemes : logiciel offrant des fonctionnalités de navigation, visualisation et de SIG. Initialement utilisé comme extension de GeoConcept, il peut s'adapter aux autres SIG classiques.
- Logiciel ArcView 3D Analyst, ESRI : extension du SIG ArcView pour la visualisation et la navigation dans un environnement 3D.

6.2.1.2 Solutions 3D des principaux éditeurs de SIG

6.2.1.2.1 GeoConcept

Créé en 1990 sous le nom d'ALSOFT, GeoConcept fut le premier système d'information géographique orienté objet sous Windows. Il se place comme un outil stratégique d'aide à la décision et propose de juxtaposer sur une seule carte de multiples niveaux d'informations provenant de sources de natures différentes, de visualiser immédiatement les corrélations, et par conséquent d'accélérer les processus de réflexion.

Le logiciel est assez modulaire et permet l'adjonction de composants complémentaires. Ainsi GeoConcept SA propose le module *3D for GeoConcept* dédié à la manipulation d'objets 3D. Les possibilités de ce module sont assez limitées, mais elles donnent un avant goût de ce qu'il est possible de faire en matière de 3D dans un SIG.

Notons que la société Communication & Systemes a développé en 2002 un module SIG 3D (VirtualGeo) parfaitement compatible avec GeoConcept et aux fonctionnalités plus avancées. Malheureusement il est aujourd'hui difficile d'obtenir de l'information sur VirtualGeo.

6.2.1.2.2 MapInfo

MapInfo Professionnel (350 000 licences au niveau mondial) est l'outil phare de la société MapInfo qui propose en outre une gamme de produits assez étendue. Il s'agit d'un outil simple, puissant et flexible pour la visualisation de données, l'analyse thématique et la représentation de données sous forme de graphiques, de tables ou de cartes. C'est un logiciel très bien intégré dans un environnement bureautique. La version professionnelle de MapInfo permet des accès directs en lecture et écriture sur les systèmes de gestion de base de données les plus courants (Oracle, Informix, Sybase, Access ...).

Les possibilités 3D de MapInfo sont très limitées. Cependant, des logiciels dédiés à la 3D ont été développés comme sur-couche de MapInfo :

- Le produit *Vertical Mapper* est totalement intégré dans le logiciel MapInfo. Il permet de faire de l'interpolation, de l'analyse et de la représentation de données tridimensionnelles.
- *Virtual Frontier* est un module de représentation et d'analyse 3D de la société Northwood Geoscience. Le logiciel peut être utilisé comme une extension de MapInfo en y apportant des fonctions intéressantes pour générer des représentations 3D dynamiques.

Dans un cadre architectural et urbain, l'extension Vertical Mapper est sans doute la plus adaptée. Cependant ses fonctionnalités restent insuffisantes pour envisager d'utiliser cet outil dans le cadre de la présente recherche.

6.2.1.2.3 AutoCad Map 5

AutoCad Map est le logiciel de cartographie de précision et d'analyse de la société Autodesk. Conçu sur la base du modèleur 2D/3D AutoCad, il permet entre autres la création, la gestion et l'intégration de données spatiales, l'élaboration de cartes thématiques et l'utilisation d'imagerie Géoréférencée. AutoCad Map permet également le nettoyage ou l'amélioration de données, plus particulièrement sur des aspects topologiques.

Une des principales limitations de cet outil réside dans la quantité de données qui peut être facilement manipulée au cours d'une session de l'application. AutoCad a été initialement conçu pour modéliser un ou quelques objets 3D aux formes complexes. Or dans le domaine de l'information géographique, les objets ont généralement des formes relativement simples mais ils peuvent être très nombreux.

6.2.1.2.4 ESRI

ESRI a été à l'origine du développement de la technologie des systèmes d'information géographique (SIG) dès la fin des années 60, avec notamment la mise au point du logiciel ArcInfo. Depuis, les produits développés par cette société ont notablement évolué et se positionnent aujourd'hui encore parmi les plus avancés en terme de SIG.

La solution ArcGIS actuellement proposée par ESRI se décline sous trois versions différemment abouties, auxquelles viennent se greffer un nombre conséquent d'extensions. Au final l'ensemble des fonctionnalités disponibles est très riche, même s'il peut sembler difficile de s'y retrouver dans un premier temps.

La 3D est gérée par l'extension *3D Analyst* qui est essentiellement un outil de visualisation. Si on s'en tient aux options disponibles à partir de l'interface graphique, l'outil ne gère que les formes 2,5D extrudées à partir d'emprise au sol. Cependant, quelle que soit la version utilisée, le logiciel est livré avec une librairie nommée ArcObject qui offre de grandes possibilités de développement et de personnalisation de l'outil. D'autre part, bien que l'outil standard ne les utilise pas, les formats et modèles de données mis au point pour cette application ont été élaborés en prévoyant la possibilité d'intégrer des primitives 3D complexes.

Ainsi, bien que l'application ArcGIS en elle-même ne permette pas d'aborder toutes les problématiques architecturales, elle met à notre disposition un environnement de développement suffisamment riche pour que nos puissions

adapter l'outil à nos besoins. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de développer notre système autour de cette solution.

Par ailleurs, dans le cadre de partenariats avec l'enseignement supérieur et la recherche, la société ESRI-France facilite l'acquisition des logiciels au sein de notre laboratoire et nous donne accès, par l'intermédiaire d'un programme de bêta-test, aux fonctionnalités des versions non encore commercialisées.

6.2.2 L'environnement de développement ArcGIS

6.2.2.1 Présentation

ArcGIS est une solution proposée par la société ESRI et regroupant plusieurs logiciels autour de la thématique des Systèmes d'Information Géographique. Les composants de ce système peuvent être installés sur un seul ordinateur ou distribués sur un réseau informatique hétérogène formé de postes de travail et de serveurs. Les utilisateurs peuvent déployer une ou plusieurs parties du système et ainsi mettre en œuvre un SIG adapté à leurs besoins.

6.2.2.1.1 ArcGIS Desktop

L'ensemble ArcGIS Desktop comprend trois logiciels : ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. A l'aide de ces trois applications, il est possible d'effectuer des tâches SIG de type cartographie, gestion des données, analyse géographique, mise à jour ou géotraitement :

- ArcMap représente l'application centrale d'ArcGIS Desktop. Elle est utilisée pour toutes les tâches de cartographie, d'analyse et de mise à jour des cartes.
- ArcCatalog facilite l'organisation et la gestion des données d'un SIG. Cette application comprend des outils de navigation et de recherche d'informations géographiques, d'enregistrement et de visualisation de métadonnées (données sur les données). Elle comprend enfin des outils pour définir la structure des couches de données géographiques.
- ArcToolbox est une application simple contenant de nombreux outils SIG utilisés dans le géotraitement (notamment des outils de conversions vers les principaux formats de données géographiques).

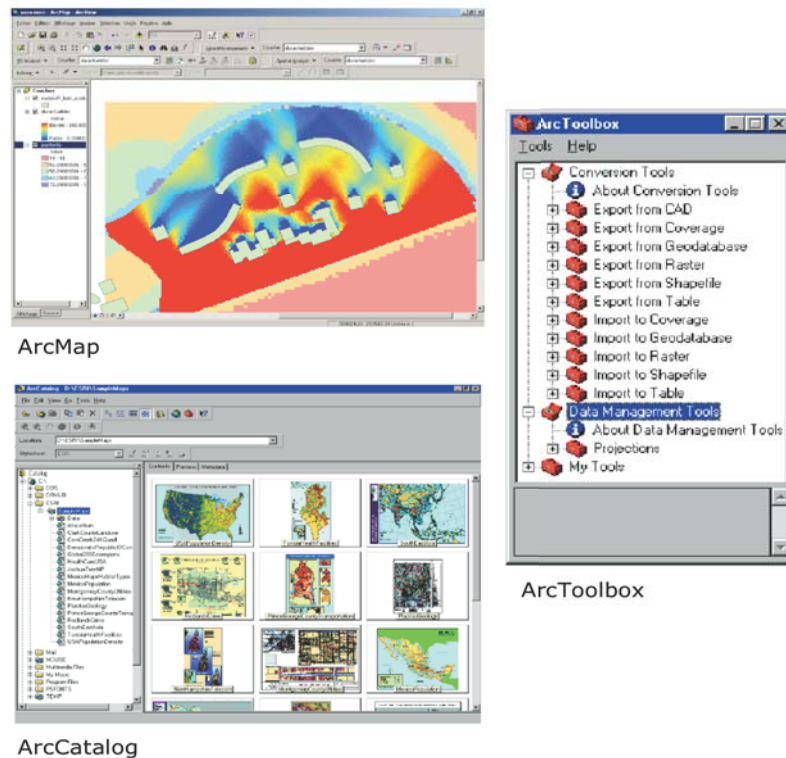


Figure 2. Les trois composantes d'ArcGIS Desktop

6.2.2.1.2 ArcView, ArcEditor, ArcInfo

ArcGIS Desktop se décline en trois versions : La version ArcView offre des outils de cartographie, d'analyse et de géotraitement simples. En plus de ces fonctionnalités, la version ArcEditor possède des processus avancés de mise à jour des bases de données. Enfin la version ArcInfo, la plus aboutie de toutes, intègre des fonctionnalités de géotraitement évoluées. Etant donné que ArcView, ArcEditor et ArcInfo partagent la même architecture, les données créées sous l'une de ces trois versions sont parfaitement compatibles avec les deux autres versions.

La version que nous avons retenue dans le cadre de l'OPATB est la version ArcView qui bien qu'étant la version de base possède les principales fonctionnalités dont nous avons besoin pour l'étude.

6.2.2.1.3 Les extensions

ArcGIS est un système modulaire. Il existe un nombre important d'extensions qui peuvent être greffées sur l'architecture de ce système. Parmi ces extensions, deux sont particulièrement intéressantes dans le cadre de notre recherche :

- 3D Analyst qui fournit à l'utilisateur différents outils de visualisation et de manipulation d'objets et de surfaces en trois dimensions,
- ArcPAD qui est une version légère de ArcMap, portée sur un outil de type PocketPC ; cette extension peut être d'une grande utilité pour le relevé et la mise à jour de données sur le terrain.

Nous allons maintenant revenir plus en détail sur les composants ArcGIS que nous utilisons dans le cadre de cette recherche. Notre présentation est axée sur l'utilisation que nous faisons de cet outil.

6.2.2.2 Visualisation 3D et interrogation des données

La visualisation des données que nous générons au travers de notre système s'effectue par l'intermédiaire du module 3D Analyst et de son interface ArcScene. Celui-ci nous permet non seulement d'afficher nos données en 3 dimensions mais nous donne également un accès en lecture aux informations stockées en base de données et associées aux formes géométriques. Des requêtes SQL peuvent être effectuées par l'intermédiaire d'une interface simple d'accès.

La Figure 3 donne une illustration de cette interface de visualisation 3D. Nous voyons une représentation 3D d'une partie des immeubles concernés par l'OPATB, sur un fond de plan de l'île de Nantes (image 2D). La couleur des bâtiments est fonction de leur année de construction. La fenêtre à gauche est une table des matières reprenant l'ensemble des données affichées sous formes de « couches » dans la scène. La petite fenêtre en haut à droite peut être vue comme une fiche récapitulative des caractéristiques des bâtiments. Cette fiche est générée à partir des informations contenues en base de données.

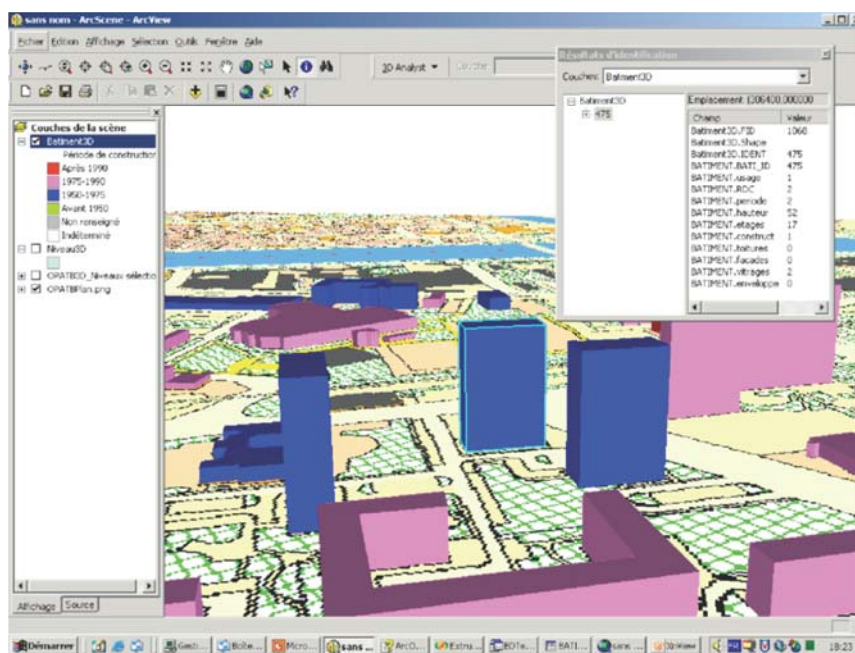


Figure 3. Interface ArcScene

Parmi les principales fonctionnalités proposées par 3D Analyst et ArcScene, nous pouvons citer:

- La construction de modèles surfaciques à partir de données quelconques,
- La visualisation interactive 3D incluant les fonctions zoom, déplacement, rotation, survol,

- La génération à la volée de surfaces 3D à partir d'attributs altimétriques,
- Le drappage et la visualisation de données bidimensionnelles sur un modèle 3D (l'opération de drappage, *mapping* en anglais, consiste à plaquer une image sur une entité géométrique dans l'espace),
- Le calcul de surface, volume, pente, orientation et ombrage,
- La génération d'isolignes sous la forme de géométrie 2D ou 3D,
- Les calculs de visibilité sur le modèle numérique de terrain (MNE), avec interpolation de points altimétriques, calculs de profils et de chemins de plus faible pente,
- L'utilisation des données supportées par ArcGIS incluant les formats CAO, Shape, couvertures ArcInfo et images,
- L'interrogation tri-dimensionnelle sur la base des attributs ou de la localisation,
- L'export de données sur Internet au format VRML.

Ces fonctionnalités couvrent nos besoins dans le cadre du présent projet de recherche. Choisir une application externe supplémentaire pour gérer la 3D (comme nous l'avions d'abord envisagé) conduirait à alourdir inutilement le système.

6.2.2.3 Préparation des données avec ArcMap

Au-delà des possibilités de visualisation 3D que nous venons d'aborder, la solution ArcGIS s'est initialement construite autour d'un outil de traitement et d'analyse d'informations géographiques 2D. Cet outil, que nous pouvons associer au module ArcMap, offre de nombreuses possibilités en terme de traitement et manipulation de données géographiques.

Notre utilisation d'ArcMap se centre essentiellement autour de la préparation des données avant de les insérer dans l'environnement de visualisation et manipulation 3D. Nous utilisons par exemple ArcMap pour recalibrer des photographies aériennes ou des fonds de plan, très utiles pour le repérage dans une scène 3D, par rapport aux formes géométriques représentatives des bâtiments. En effet, les cartes numérisées ne contiennent généralement pas d'information relative à l'emplacement de la zone représentée sur la surface terrestre et les informations de localisation fournies par des photographies aériennes et des images satellite sont souvent inadéquates pour l'analyse ou l'affichage en alignement correct avec d'autres données.

Ce processus de recalage ou alignement est couramment désigné sous le terme de géoréférencement. La procédure de base du géoréférencement consiste à déplacer l'image (photographie ou carte numérisée) dans le même référentiel spatial que les données cibles par l'identification d'une série de points de contrôle au sol (coordonnées x,y) qui relie des emplacements de l'image à des emplacements des données cibles dans des coordonnées géographiques. L'association d'un point de contrôle sur l'image et du point de contrôle correspondant sur les données cibles constitue un lien. Après avoir créé plusieurs liens, nous pouvons transformer ou déformer l'image en faisant appel à une transformation mathématique pour déterminer l'emplacement correct des coordonnées géographiques pour chacun des pixels de l'image.

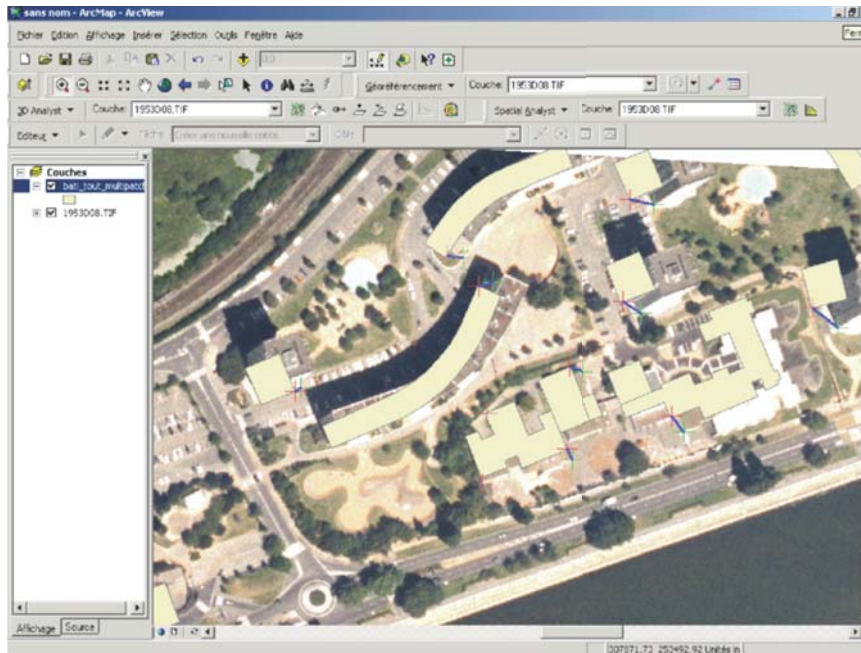


Figure 4. Utilisation de points de contrôle sous ArcMap pour recaler une photographie aérienne sur un fond cadastral

Nous utilisons ArcMap pour éditer et modifier les données 2D dans des phases de pré-traitements avant de les incorporer dans une scène 3D, soit en tant que données planes (photos, cartes numérisées), soit après extrusion des contours pour obtenir des objets 3D (extrusion du cadastre 2D vers des formes 3D par exemple).

6.2.2.4 Acquisition de données sur site

ArcPAD est un Système d'Information Géographique et cartographique pour les environnements Windows CE et Pocket PC fonctionnant sur certaines gammes d'assistants personnels (PDA). L'intérêt de ce logiciel réside dans les possibilités qu'il offre en matière de collecte et mise à jour de données sur le terrain. Il permet d'emporter sur site les informations 2D et attributaires contenues dans la base de données, sans avoir à les convertir dans un format spécifique, et autorise la saisie d'informations selon un modèle de données défini par l'utilisateur. Il est également possible de coupler ce module à un système de positionnement par satellite respectant les normes NMEA et TSIP.

Nous verrons plus loin quelle utilité pratique présente ce type d'outil lorsque l'on doit inventorier rapidement les caractéristiques des bâtiments d'une zone, à partir d'un formulaire de saisie pré-établi.



Figure 5. Le module ArcPAD permet de saisir des données in situ au moyen d'un assistant personnel

6.2.3 Organisation générale du système proposé

La Figure 6 présente l'organisation générale du système proposé. Ce dernier est organisé autour de trois modules principaux :

- Le module Simulation est constitué des logiciels de simulation développés ou utilisés par le laboratoire pour l'évaluation environnementale des enveloppes construites (simulations et évaluations solaires, énergétiques, aérauliques, sonores, etc.) ;
- Le module ArcGIS est la solution commerciale SIG retenue pour visualiser et manipuler l'information produite par notre système (cf. § précédent) ;
- Le module SIG-CERMA constitue l'apport principal de la recherche en termes de développements informatiques. Il assume plusieurs rôles :
 - il porte le modèle de données des primitives architecturales,
 - il assure la communication entres les différentes entités impliquées dans le système. Cette communication se fait principalement par l'échange et la conversion de fichiers,
 - il fournit des fonctionnalités complémentaires à celles disponibles dans la solution ArcGIS.

Par ailleurs, tout ou partie des données et informations traitées par le système peuvent être stockées dans une base de données extérieure (SGBD : système de gestion de base de données).

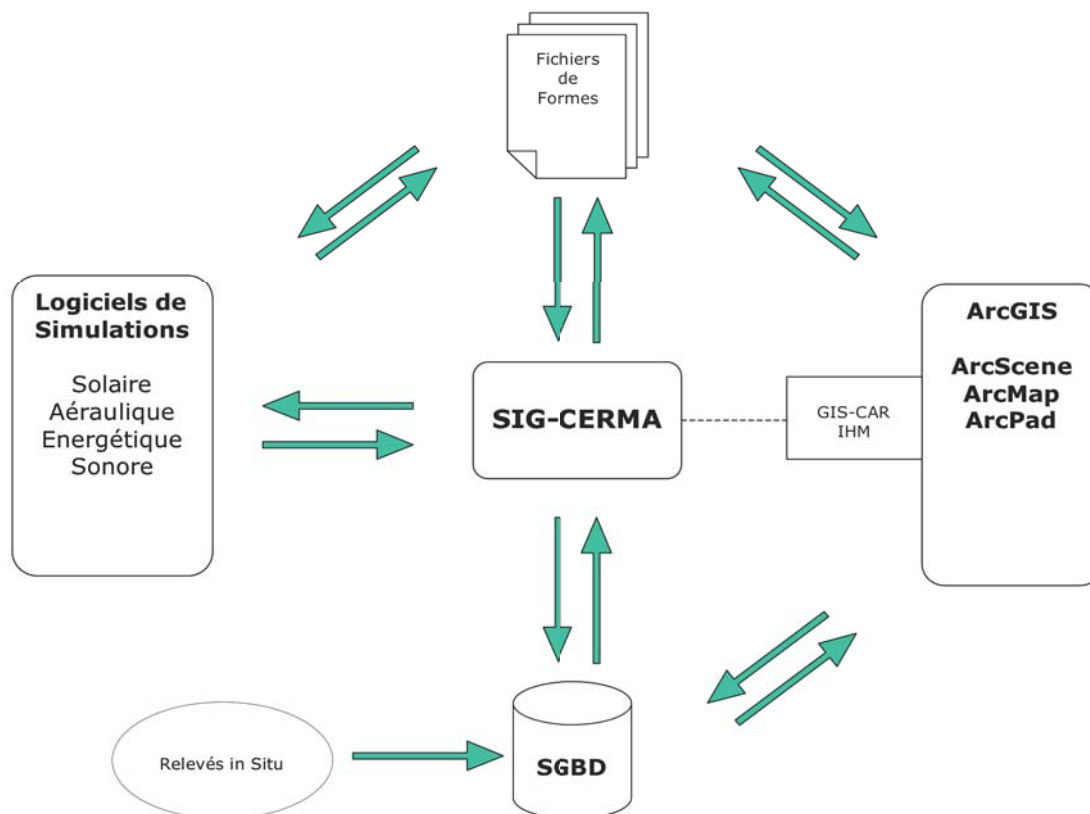


Figure 6. Organisation générale du système

6.3 Le module SIG-CERMA

Le module SIG-CERMA comprend l'ensemble des développements réalisés dans l'environnement ArcGIS pour constituer l'outil qui forme le cœur de la présente recherche. Nous en présentons ici les principaux aspects sous l'angle informatique.

6.3.1 Le modèle de données

Le modèle de données que nous proposons est simple tout en étant suffisamment précis pour manipuler les différents types d'informations attachées aux bâtiments. Dans ce modèle de données, nous distinguons une composante architecturale qui décrit les grands éléments constituant le bâtiment, d'une composante géométrique qui permet d'associer une forme

géométrique aux éléments architecturaux. Un bâtiment est décrit par son emprise cadastrale, son enveloppe, ses façades, ses différents niveaux, les parois de ces niveaux (en distinguant les parois extérieures et les parois mitoyennes) et les éventuels éléments caractéristiques apposés sur les parois.

Toutes ces informations peuvent être obtenues à partir du plan cadastral et de l'observation de la façade in situ (cf. § 6.4.1). Le modèle de données ne permet pas de raffiner l'information jusqu'au logement, dans la mesure où le découpage d'un niveau en logement est en général difficile à deviner à partir des informations délivrées par l'enveloppe extérieure (ce découpage peut être particulièrement complexe dans certains immeubles anciens et dans certains autres contemporains, ou parfaitement répétitif dans des constructions des années 1960 et 1970). De plus, hormis les éléments particuliers qui peuvent jouer un rôle important dans les simulations physiques (balcons par exemple), les fenêtres et autres éléments apposés sur les parois ne sont pas directement modélisés par une entité tridimensionnelle. Cependant, chaque paroi est qualifiée par un attribut indiquant son pourcentage de vitrage, information nécessaire pour la simulation énergétique. D'autres attributs utiles peuvent être rajoutés dans la base de données, sans faire l'objet d'une modélisation 3D.

6.3.1.1 Le modèle architectural

Afin de décrire les bâtiments, nous proposons six classes de primitives qui dérivent toutes de la classe mère SIG_Primitive (Figure 7).

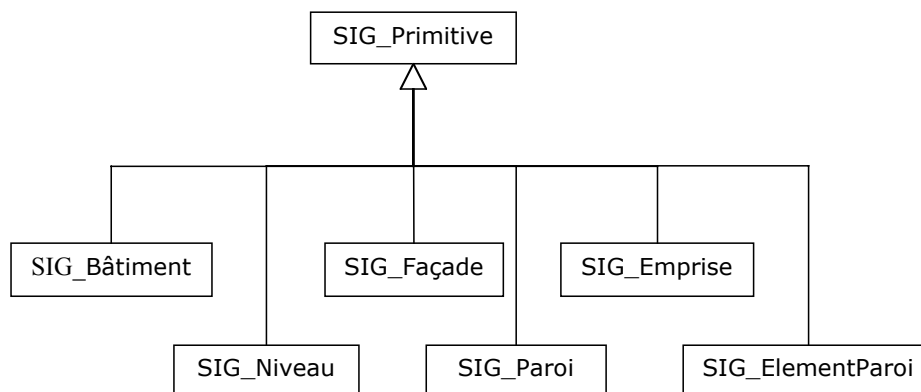


Figure 7. Les primitives architecturales utilisées pour la description d'un bâtiment

Le schéma de la Figure 8 illustre la décomposition d'un bâtiment en quelques-unes des primitives architecturales présentées au travers du diagramme UML précédent.

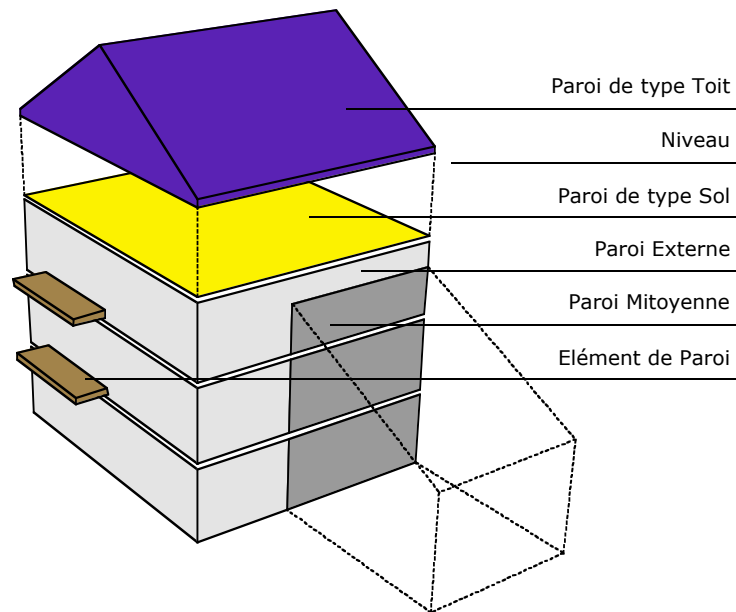


Figure 8. Bâtiment décomposé en primitives architecturales

Nous reprenons ci-dessous chacune des classes impliquées dans le modèle architectural pour en détailler les caractéristiques.

6.3.1.1.1 SIG_Primitive

Cette classe possède les caractéristiques communes à toutes les autres classes impliquées dans la description du bâtiment. Quatre attributs lui sont associés :

- un identifiant,
- une référence vers la forme géométrique 3D de la primitive,
- une référence vers l'emprise 2D de la primitive,
- un attribut hauteur.

Nous ne prévoyons pas de stocker les résultats de simulation directement dans le modèle de données. Ces informations seront stockées dans une base de données interrogeable à partir du SIG mais ne sont pas systématiquement recopiées en mémoire vive durant une session de l'application.

6.3.1.1.2 SIG_Batiment

Le bâtiment est l'entité de plus haute abstraction dans notre modèle de données. Il est composé d'un certain nombre de niveaux. Nous envisageons plusieurs types de représentations pour les bâtiments. Un bâtiment peut être le centre d'intérêt d'une étude, ou un simple élément de la scène. Lorsque le bâtiment n'est qu'un élément de l'environnement, une forme 3D globale peut suffire à le représenter. Lorsqu'il devient le sujet principal d'une étude, il est alors préférable de le représenter plus en avant dans le détail en faisant appel à sa décomposition en niveaux, façades ou parois (Figure 9).

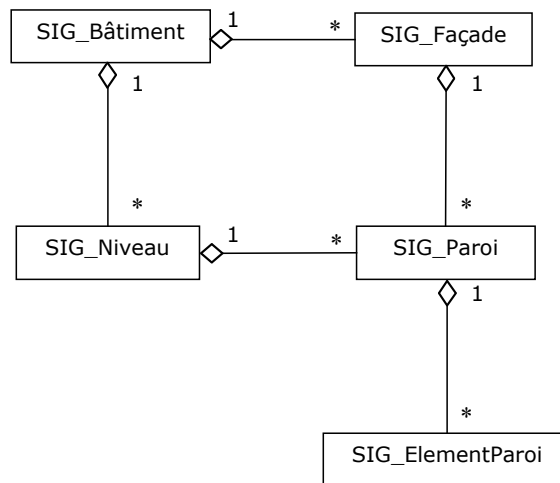


Figure 9. Relation de composition entre les différentes classes de primitives architecturales (24)

Les données thématiques rattachées au bâtiment sont actuellement :

- la date de construction,
- le type de bâtiment,
- le type de toiture du bâtiment,
- des données patrimoines sur le bâtiment,
- le pourcentage de vitrage des façades,
- l'état des façades,
- le système constructif (béton banché, maçonnerie de pierres ou de parpaings, structure métallique, etc.),
- le nombre de niveaux,
- la présence ou l'absence d'un commerce au RDC.

La classe SIG_Batiment implémente les méthodes suivantes :

- *SIG_Facade[] genere_facades_generiques()* : Génère les façades des bâtiments à partir de l'emprise 2D du bâtiment et de sa hauteur.
- *SIG_Niveau[] genere_niveaux_generiques()* : Génère les niveaux des bâtiments à partir de l'emprise 2D du bâtiment, de sa hauteur et du nombre de niveaux du bâtiment.
- *void initialise_hauteurs_niveaux()* : Initialise un tableau associant à chaque niveau du bâtiment sa hauteur.
- *void extrude_emprise()* : Extrude la forme 3D générale du bâtiment à partir de son emprise 2D et de sa hauteur. Le résultat est affecté à l'attribut "forme3D" du bâtiment.

24. Dans le formalisme UML, les losanges désignent une relation de composition de type « est composé de ». Les nombres donnent la cardinalité des relations, l'étoile signifiant un nombre quelconque (un bâtiment est composé d'un nombre quelconque de façades, tandis qu'une façade n'appartient qu'à un seul bâtiment).

6.3.1.1.3 SIG_Niveau

Un niveau correspond à un étage du bâtiment ou éventuellement aux combles sous le toit du bâtiment. Dans un cas comme dans l'autre, le niveau peut être lui-même décomposé en parois et éléments de parois.

Les données thématiques rattachées au niveau sont :

- une référence vers le bâtiment père,
- le type,
- le locataire ou le propriétaire,
- l'usage (logement privé, logement public, tertiaire, commerce etc.),
- des données liées à la valeur patrimoniale,
- les caractéristiques thermique.

La classe SIG_Niveau implémente les méthodes suivantes :

- *SIG_Paroi[] extraire_paroi()* : Retourne les parois qui composent le niveau. Les parois sont construites à partir de la géométrie du niveau. Ce sont des parois génériques tenant compte de la hauteur du niveau et de son emprise. Aucune distinction entre paroi mitoyenne et paroi externe n'est faite à ce stade.

6.3.1.1.4 SIG_Paroi

La paroi représente la surface correspondant à un pan de toit, à un sol ou à une partie de façade contenue dans un niveau. Ce sera souvent l'élément venant en entrée des simulations d'ensoleillement. Une paroi peut être visible ou non depuis l'extérieur. Deux bâtiments mitoyens ont en commun une paroi non visible. Seules les parois visibles (et donc extérieures) composent l'enveloppe du bâtiment.

Les données thématiques rattachées à la paroi sont :

- une référence vers le niveau père,
- le matériau,
- l'orientation (la normale),
- la surface,
- l'inertie,
- la mitoyenneté de la paroi (mitoyenne ou extérieure),
- le type de paroi (mur, sol, toit).

Aucune méthode associée à la classe SIG_Paroi n'est implémentée pour le moment.

6.3.1.1.5 SIG_Façade

Une façade regroupe un ensemble de parois réparties sur toute la hauteur du bâtiment.

Ses caractéristiques restent à déterminer.

6.3.1.1.6 SIG_ElementParoi

Un élément de paroi est une caractéristique suffisamment remarquable de la paroi pour qu'elle puisse être individualisée. Il peut s'agir d'une porte, d'une fenêtre, d'une baie, d'un panneau solaire, d'un balcon, etc.

Les données thématiques rattachées à l'élément de paroi sont :

- une référence vers la paroi mère,
- le type,
- le matériau,
- l'opacité,
- la surface,
- la possibilité d'ouverture.

Aucune méthode associée à la classe SIG_ElementParoi n'est implémentée pour le moment.

6.3.1.1.7 SIG_Emprise

Cette primitive représente le contour de la projection 2D d'une primitive architecturale sur un plan parallèle au sol. Les données disponibles étant très souvent de nature 2D, cette primitive nous permet de charger la forme plane dans notre modèle afin d'obtenir, par une série d'opération et de traitements sur celle-ci, une forme volumique plus ou moins proche de la forme réelle de l'objet architectural.

Hormis les attributs dont elle hérite de SIG_Primitive, la classe SIG_Emprise ne possède pas d'attribut thématique spécifique.

La classe SIG_Emprise implémente la méthode suivante :

- *SIG_Forme3D extrude(Coordinate pCoord, double dHauteur)* : Extrude une forme 3D à partir de l'emprise et selon un vecteur spécifique.

6.3.1.2 Le modèle géométrique

Pour associer une géométrie à chacune des primitives précédemment citées, nous nous sommes appuyés sur la librairie *Geotools.net* (25). Cette librairie est le portage en langage C# de la librairie Java JTS, qui elle-même propose :

- Une implémentation du modèle de données spatiale (Simple Feature Schema) défini par l'OGC (Open GIS Consortium),
- Une implémentation de nombreux algorithmes fondamentaux de calculs sur les géométries 2D,
- Des méthodes d'import et export de données depuis et vers les principaux formats de données utilisés dans le domaine de l'information géographique.

La Figure 10 schématise le lien entre le modèle architectural et le modèle géométrique. A chaque classe du modèle architectural est associée une forme géométrique 3D représentée. Nous avons utilisé la modélisation par frontière BREP dans notre application (26), ce qui veut dire que SIG_Forme3D est constitué d'un certain nombre de faces issues de la classe SIG_Face.

25. <http://geotoolsnet.sourceforge.net/Index.html>

26. Représentation d'une entité volumique par un ensemble de faces planes et un modèle topologique associé. Cf. Fabien Ramos *Modélisation et validation d'un système d'information géographique 3D opérationnel*, Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, 2003

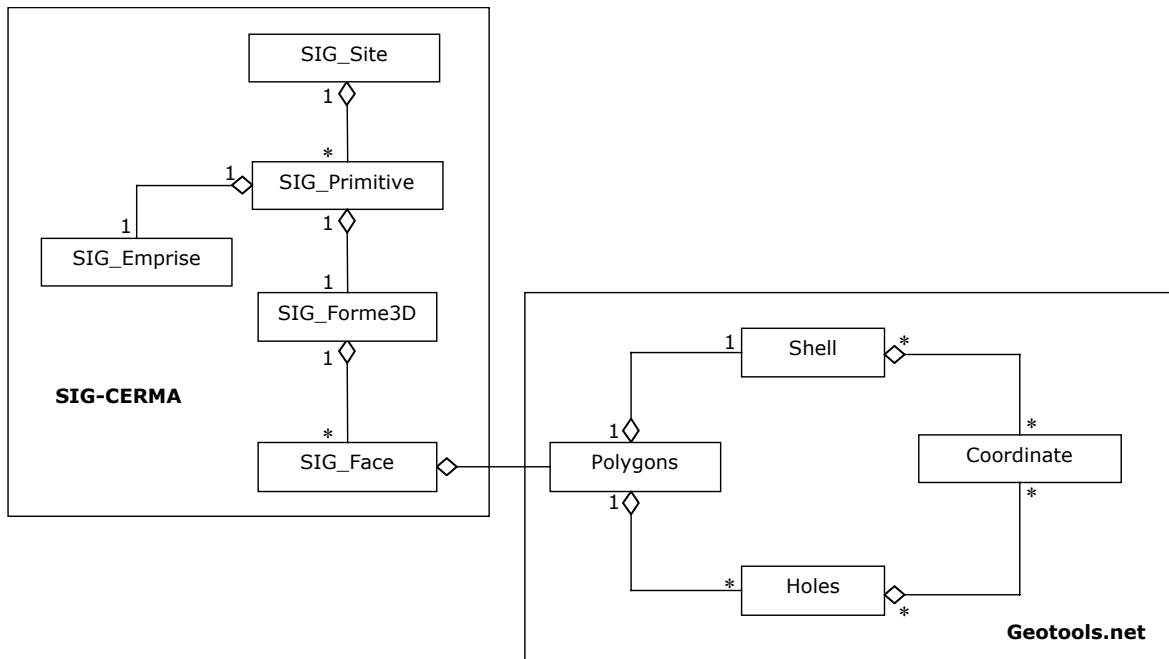


Figure 10. Couplage modèle architectural - modèle géométrique

6.3.1.2.1 La forme géométrique 3D

Elle est représentée par la classe SIG_Forme3D qui possède un identifiant et est composée d'une liste de SIG_Face. L'attribut TypeForme nous informe sur la nature de la forme : plane ou volumique.

La classe SIG_Forme3D implémente les méthodes suivantes :

- *void ajoute_face(...)* : Ajoute une face à la forme.
- *void supprime_face(SIG_Face)* : Retire une face de la forme.
- *Nb_faces()* : Retourne le nombre de faces composant la forme.
- *BBox3D Englobant()* : Retourne la boîte englobante 3D dans laquelle est incluse la forme. Les faces de cette boîte englobante sont parallèles aux plans du repère de la scène.
- *void translation(double,double,double)* : Translate chacune des faces composant la forme, et donc la forme elle-même.

6.3.1.2.2 Description de la forme géométrique par un ensemble de faces

Notre description géométrique des formes architecturales s'appuie sur une modélisation de type BREP, c'est-à-dire sur une description de la frontière de la forme par la liste des faces qui la compose. La classe SIG_Face possède un identifiant, une référence vers une ou plusieurs géométries de type Polygon (primitive Geotools.net), un type (permettant de retrouver à quel type de primitive architecturale appartient la face) et une normale. Tous les polygones formants une même face doivent être coplanaires.

La classe SIG_Face implémente les méthodes suivantes :

- *void ajoute_polygone(..)* : Ajoute un polygone à la face. Une face peut donc être décrite par plusieurs polygones.
- *void supprime_polygone (...)* : Retire un polygone à la face.
- *void calcule_normale()* : La normale à la face est calculée à partir des 3 premiers points distincts du premier polygone formant la face.
- *Bbox3D Englobant()* : Calcul l'englobant 3D de la face.
- *void extrude(Coordinate pVecteur, double dh)* : Extrude une forme 3D à partir de la géométrie de la face accompagnée d'un vecteur et d'une hauteur en paramètres.
- *int NbPolygons()* : Retourne le nombre de polygones composant la face.
- *void translation(double,double,double)* : translate les sommets de la face et donc la face

6.3.1.2.3 Les primitives géométriques issues de Geotools.net

Pour décrire les formes des objets 3D manipulés, nous faisons appel à la librairie *Geotools.net*. Bien que cette dernière propose de nombreux types de primitives géométriques, nous avons restreint l'éventail des possibilités aux seules primitives de type polygone qui permettent de décrire l'ensemble des objets architecturaux ou urbains. Au sens *Geotools.net*, une primitive *Polygon* distingue le contour externe du polygone et les éventuels contours des trous à l'intérieur de celui-ci. Dans un cas comme dans l'autre, les contours sont gérés par des listes de coordonnées X,Y,Z.

6.3.1.2.4 La notion de Site

Les classes ou primitives exposées permettent de décrire un bâtiment isolé. Il est important d'introduire la notion d'ensemble de bâtiments dans notre modèle de données ; c'est ce que représente la classe *SIG_Site*. Un site répertorie l'ensemble des primitives architecturales associées à un projet. Dans des applications plus sophistiquées, le site sera l'entité à laquelle on associera la gestion de fonctionnalités évoluées (comme par exemple la gestion des référentiels ou les processus de sérialisation).

Dans l'état actuel de notre développement, la classe *SIG_Site* propose les fonctionnalités suivantes :

- *void ajoute_batiment (...)* : Ajoute des bâtiments au site.
- *void supprime_batiment(...)* : Retire des bâtiments du site.
- *NbBatiments()* : Retourne le nombre de bâtiments.
- *SIG_Batiment get_batiment(identifiant)* : Récupère le bâtiment possédant l'identifiant spécifié.
- *void charge_attributs_batiments(BD,Table,ColonneID)* : Charge depuis une base de données les attributs pour les bâtiments composant le site. La correspondance entre les données chargées en mémoire et la base de données est faite par l'intermédiaire de l'identifiant du bâtiment.
- *void repere_pariet_mitoyenne()* : Détecte les parois du site mitoyennes et celles qui ne le sont pas (en cours d'implémentation).

6.3.2 Import et export des données

Le système SIG proposé n'a pas vocation à contenir en lui-même toutes les fonctions utiles pour l'analyse environnementale des enveloppes construites. Au contraire, le système est développé dans une perspective modulaire par laquelle les résultats produits par les différents outils d'analyse mis en oeuvre (simulation solaire, aérodynamique, énergétique, sonore, etc.), quelle que soit leur origine (simulations, relevés) et leur nature (valeurs numériques, descriptions textuelles, images, fichiers sons, etc.), puissent être facilement intégrés à l'ensemble des données manipulées. Dans cette perspective, il nous a fallu construire un ensemble de passerelles permettant d'importer et d'exporter les données utiles depuis/vers le système SIG.

Nous traitons ces processus d'import et d'export à travers la classe SIG_IO qui est capable de retranscrire (ou d'alimenter) le modèle de données sous (ou à partir de) divers formats (ascii ou binaires). Les méthodes d'import mises au point à ce stade du développement sont :

- *SIG_Forme3D[] importe_solene(string sFichier.cir, string sFichier.val)* : Solène est le logiciel de simulation solaire développé par le laboratoire CERMA (cf. § 6.4.2.1.1). Le fichier d'extension ".cir" correspond au fichier de formes et le fichier d'extension ".val" au fichier de valeurs (descripteurs) associées aux formes. Les fichiers ".val" peuvent contenir tout type d'information. Dans cette méthode, le fichier attendu doit contenir les informations permettant d'effectuer la correspondance entre l'identification des données sous Solène et celle sous SIG-CERMA.
- *void exporte_solene(SIG_Primitive[], string sFichier)* : La fonction d'export vers les fichiers Solène génère deux fichiers : un fichier ".cir" contenant les formes géométriques et un fichier ".val" permettant de faire la correspondance entre les identifiants.
- *SIG_Forme3D[] importe_esri_multipatch(string sFichier.shp)* : La suite d'applications dédiées à l'information géographique ArcGIS propose plusieurs types de primitives géométriques. Le type *multipatch* est celui offrant la plus grande liberté de modélisation. La modélisation par *multipatch* est une modélisation par frontière très comparable à celle que nous avons choisie pour notre modèle de données (cf. Figure 11).
- *void exporte_esri_multipatch(SIG_Primitive[], string sFichier)* : La fonction d'export vers des primitives *multipatch* génère trois fichiers binaires : un fichier ".shp" contenant la description géométrique des formes, un fichier ".dbf" (format Dbase III) établissant la correspondance entre les identifiants, et un fichier d'entête ".shx".
- *void exporte_script_gambit_topologique(SIG_Primitive[], string sFichier, int iIdPremierPoint, int iIDPremiereFace)* : Gambit est un modéleur-maillieur utilisé pour générer des scènes interprétables par le logiciel de simulation aéraulique Fluent (cf. § 6.4.2.2.1). Gambit possède un langage de script qui automatise les procédures de construction géométrique de la scène 3D. Notre procédure d'export vers Gambit consiste à écrire un script Gambit capable de reconstruire sous format fluent le modèle de données SIG-CERMA. Ici nous utilisons également les possibilités de modélisation par frontière (ensemble de faces) de gambit.
- *void exporte_script_gambit_extrusion_topologique(SIG_Emprise[], string sFichier, double hauteur)* : Contrairement à la procédure exposée précédemment, l'export Gambit assuré ici ne reconstitue pas le modèle de données dans une modélisation BREP mais par extrusion d'emprises 2D.

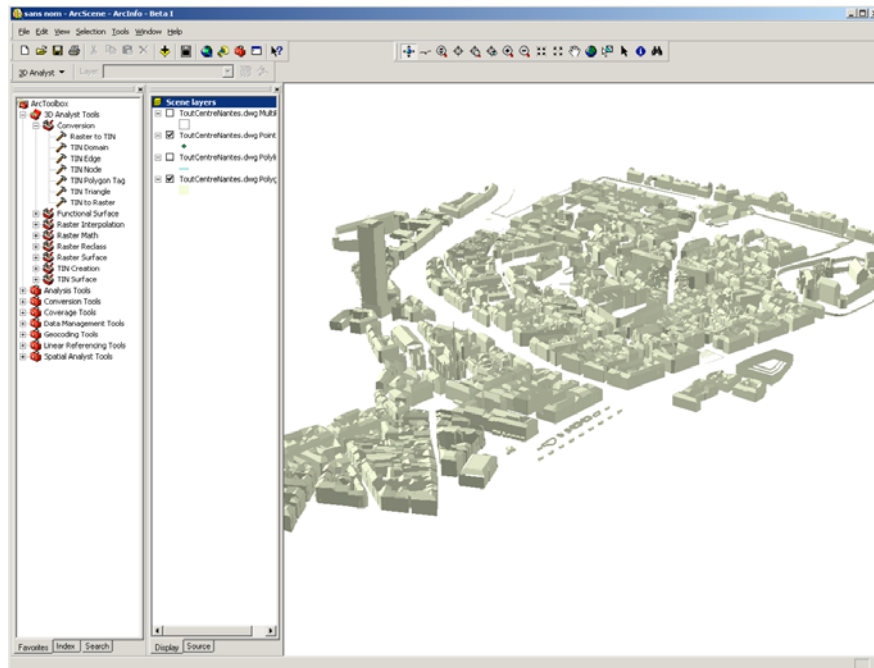


Figure 11. Exemple d'importation dans le SIG de données issues de modeleurs géométriques 3D (une partie du centre de Nantes).

6.3.3 Analyse et visualisation des données

L'application SIG-CERMA fournit principalement un modèle de données et des procédures d'import/export pour intégrer des résultats produits par divers outils extérieurs. Les fonctionnalités d'analyse des données (requêtes) et de visualisation 2D/3D sont principalement réalisées à travers la solution ArcGIS qui présente les principaux outils pour ce faire.

Cependant, certains outils d'analyse utiles à notre projet ne sont pas présents dans la solution ArcGIS. Par exemple, cette dernière ne prend en compte que le modèle numérique de terrain (MNT) dans les calculs d'intervisibilité. Or, dans le cadre d'un projet architectural ou urbain, il est impératif d'intégrer les bâtiments et autres éléments du sursol lorsqu'on cherche à établir une carte de visibilité. Pour pallier ces manques, nous avons défini une classe SIG_Algorithme dans laquelle nous développerons les différentes méthodes d'analyse et de traitement dont nous aurons besoin. Nous y développerons par exemple les algorithmes de calcul de visibilité prenant en compte les éléments du sur-sol (cf. § 6.4.2.5 page 89).

6.3.4 Interfaces avec l'utilisateur

Nous proposons deux types d'interfaces avec l'utilisateur (interfaces homme machine ou IHM) : les interfaces intégrées à l'environnement ArcGIS et les interfaces sous forme de modules indépendants, aux fonctionnalités très ciblées.

6.3.4.1 Interfaces intégrées à l'environnement ArcGIS

L'application SIG-CERMA a été développée sous forme de DLL (bibliothèques de liens dynamiques sous le système Windows). L'application SIG-CERMA_IHM offre une interface graphique et appelle les différentes fonctionnalités de l'application SIG-CERMA.

L'interface a été conçue sous la forme d'un panneau à multiples onglets qui s'intègre à l'interface ArcScene (visualisateur 3D de la solution ArcGIS) comme le montre la Figure 12 ci-dessous.

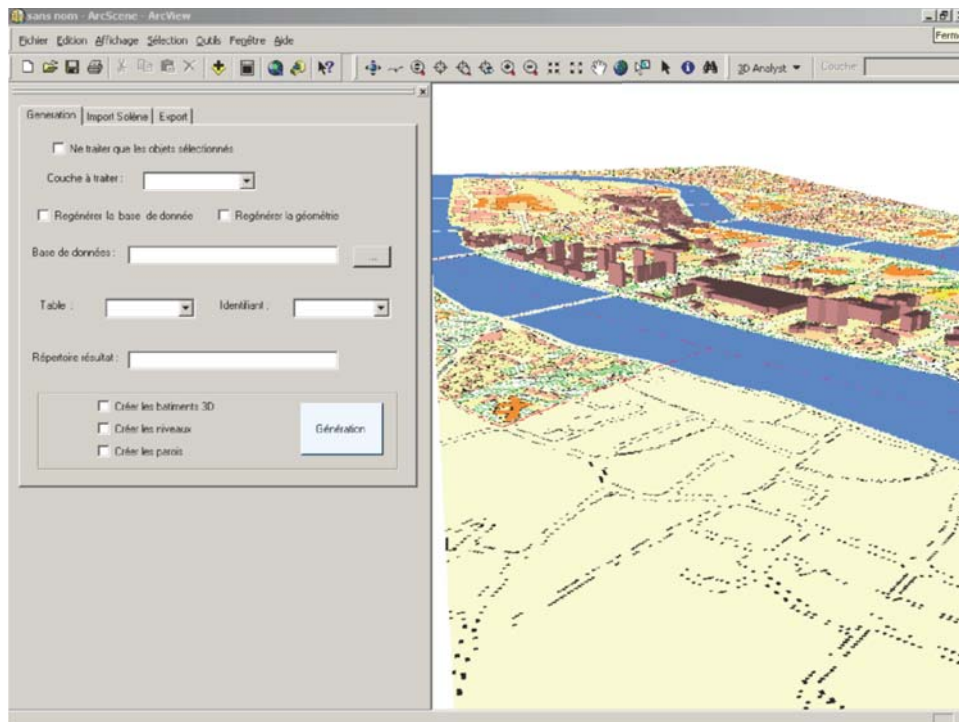


Figure 12. L'interface SIG_CERMA_IHM intégrée dans ArcScene

6.3.4.2 Les interfaces indépendantes

Certaines situations ne nécessitent pas l'utilisation d'une IHM graphique évoluée. Au contraire, celle-ci peut se révéler encombrante, notamment dans le cas de répétition de tâches simples telles que la conversion systématique de fichiers d'un format vers un autre. Afin d'automatiser ces procédures répétitives nous déclinons les fonctionnalités contenues dans SIG-CERMA sous forme d'exécutables indépendants présentant leur propre interface. Il est ainsi possible d'écrire des scripts faisant appel à ces exécutables pour effectuer des travaux répétitifs.

Ces exécutables sont plus facilement transportables sur d'autres postes et leur prise en main est plus rapide que celle de l'interface graphique associée à ArcGIS. Ils sont par ailleurs indépendants de l'environnement ArcGIS et ne dépendent que de la librairie *Geotools.net*.

6.3.5 Gestion des données

Il est primordial pour un système d'information géographique d'offrir des possibilités de capitalisation des données et des traitements effectués sur celles-ci. Nous avons sur ce point à prendre en compte la diversité de l'information à stocker. Il n'est pas envisageable de stocker de la même manière l'information rattachée à la forme 3D de l'objet (primitives géométriques complexes, matériaux, textures) et l'information attributaire. S'il existe des extensions spatiales de certains SGBD (*Spatial Cartridge* d'Oracle 8i par exemple) qui proposent de nouveaux types atomiques pour permettre le stockage efficace de formes géométriques 2D, il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'équivalent pour la gestion de primitives 3D. Nous ne pourrions pas stocker directement la forme 3D des objets dans une base de données. La persistance des formes 3D, c'est-à-dire leur stockage, ne pourra être assurée que par le biais de fichiers descriptifs indépendants.

En revanche, nous aurons tout intérêt à profiter du potentiel d'un SGBD pour assurer la persistance des informations attributaires issues des logiciels de simulation ou des relevés in situ. Quelle technologie choisir parmi les nombreux SGBD disponibles ? Différents aspects doivent être considérés avant d'arrêter le choix d'une base de données. Par exemple, pour combien d'utilisateurs doit être dimensionnée la base ? Doit-on envisager des connexions simultanées depuis plusieurs postes ? Quels seront les coûts d'installation et de maintenance ? Le système choisi est-il suffisamment évolutif pour supporter une augmentation de la quantité de données à stocker si le besoin s'en fait ressentir ?

La présente recherche vise à démontrer l'intérêt d'un système d'information géographique dans un processus de réhabilitation de bâtiments de type OPTAB. Il ne s'agit donc pas, pour le moment, de privilégier les critères de robustesse et de performance qui sont l'apanage des bases de données les plus sophistiquées et les plus coûteuses ; nous souhaitons avant tout pouvoir disposer d'une application abordable et qui soit démonstrative. Nous avons de ce fait choisi la solution Microsoft Access qui présente, pour notre prototype, les avantages suivants :

- la simplicité d'utilisation (base de données contenue dans un seul fichier de type .mdb),
- la simplicité d'installation,
- le coût peu élevé,
- l'intégration parfaite dans les solutions ArcGIS,
- le moteur de base de données d'Access est supporté par la librairie *Ado.net* que nous utilisons dans nos développements (librairie de manipulation de bases de données fournie par Microsoft),
- la capacité de stockage de 2 Go, suffisante pour notre prototype,
- la capacité de supporter simultanément une vingtaine d'utilisateurs.

Notons que ce choix d'Access pour le prototype ne conditionne en rien le futur de l'application. En effet, notre système est suffisamment modulaire pour pouvoir facilement remplacer le SGBD Access par une solution plus performante si le passage du prototype à l'application opérationnelle le nécessite (grâce aux fonctionnalités développées à partir de la bibliothèque *Ado.net*).

6.4 Les données

6.4.1 Données concernant le bâti

6.4.1.1 Point de vue physique

La reconstitution volumétrique d'ensembles urbains est un problème difficile. Le manque de données concernant les bâtiments, l'hétérogénéité et la complexité des formes bâties, le caractère inapproprié des outils de CAO pour ce type de tâche, sont autant de facteurs rendant généralement laborieuse la réalisation de maquettes 3D de larges zones urbaines.

Nombre de travaux se heurtent, selon nous, à l'ambition d'aboutir à une maquette hyperréaliste des environnements urbains étudiés. Cette ambition conduit à récolter, à organiser et à structurer un ensemble considérable de données qu'il s'agit ensuite de transformer en objets 3D plus ou moins bien renseignés. Très coûteuse en temps, cette approche fait peser la plus grande partie de l'effort sur les phases de construction de la maquette, au détriment souvent des phases d'analyse que cette maquette est supposée aider. Par ailleurs, la maquette 3D ainsi obtenue est généralement figée, rendant difficile toute modification ultérieure.

Dans le cadre du présent projet de recherche, il nous est impossible de mettre en œuvre une approche lourde de modélisation 3D. Nous avons choisi une approche intermédiaire qui vise à obtenir une représentation pseudo réaliste de la zone urbaine considérée, en accord avec la précision exigée par les analyses environnementales conduites sur les bâtiments. Il ne s'agit donc pas d'obtenir « la » maquette 3D de la zone urbaine rendant exactement compte des détails morphologiques et matériels des constructions, mais plutôt de construire rapidement une maquette 3D représentant la zone urbaine de manière suffisamment fidèle pour que les analyses environnementales menées par la suite puissent être considérées comme valides. Dans cette perspective, les bâtiments sont modélisés en 3D « à la volée » à partir d'une base de données facilement manipulable. Le modèle 3D est adapté à la visée d'analyse environnementale, et notamment de simulation des phénomènes physiques urbains. Dans cette perspective, les formes réelles des bâtiments peuvent être représentées de manière simplifiée (suppression des détails mineurs des parois et toitures par exemple) ou même légèrement faussée (hauteur approchée des niveaux, sous réserve d'une faible incidence de cette erreur sur les phénomènes étudiés).

En pratique, l'approche consiste à définir un bâtiment à partir de son emprise cadastrale (fournie par les services techniques de la collectivité ou les administrations compétentes), puis à documenter la fiche de ce bâtiment avec un ensemble d'informations relevées in situ (période de construction, type de structure, nombre de niveaux, etc.). Ces informations sont obtenues par la simple observation des enveloppes depuis l'espace public (Figure 13). Elles sont ensuite intégrées à la base de données et utilisées directement par les

méthodes informatiques développées dans les classes de ce que nous avons appelé le modèle architectural (cf. § 6.3.1.1). Les parois mitoyennes sont automatiquement détectées à partir des emprises cadastrales et les parois de la base sont renseignées en fonction de ce paramètre (essentiel pour la simulation énergétique). En l'état actuel de nos développements, les toitures ne sont pas modélisées automatiquement (cf. Figure 15).



Figure 13. La reconstruction 3D des enveloppes construites s'effectue à partir de leur emprise cadastrale et d'un ensemble d'informations collectées in situ

Naturellement, la qualité finale de la maquette 3D ainsi produite dépend entièrement de la précision des informations collectées in situ. C'est pourquoi il convient de s'assurer que les personnes réalisant cette collecte disposent d'une formation suffisante pour évaluer rapidement la période de construction d'un immeuble ou sa hauteur approximative. De plus, le dispositif peut être complété de plusieurs manières :

- Des outils de mesure in situ (distancemètres) peuvent aider à évaluer les hauteurs des niveaux et des bâtiments,
- La mise en œuvre des relevés au moyen d'assistants personnels facilite la prise de note (champs pré-remplis, cases à cocher ou boutons radios, etc.) et permet d'éviter les risques d'erreurs entre le carnet de note électronique et la base de données du SIG (cf. la solution ArcPAD qui permet de synchroniser la base de données du SIG avec les données

recueillies in situ au moyen d'un formulaire construit à partir du modèle de données, § 6.2.2.1.3),

- L'adjonction d'un filtre de type règles « expertes » entre le relevé brut et la base de données permet d'éviter les erreurs les plus grossières. Par exemple, des règles peuvent préciser la hauteur moyenne des niveaux en fonction de la période de construction, ou encore le type de toiture en fonction de la structure, etc.

Par ailleurs, les collectivités maîtres d'ouvrage d'opérations de type OPTAB disposent en général d'une connaissance approfondie de tout ou partie des bâtiments composant la zone (études précédentes, inventaires de patrimoine, etc.), si bien qu'une partie des données nécessaires à la modélisation 3D de la zone peut être obtenue de manière fiable et rapide par ce biais.

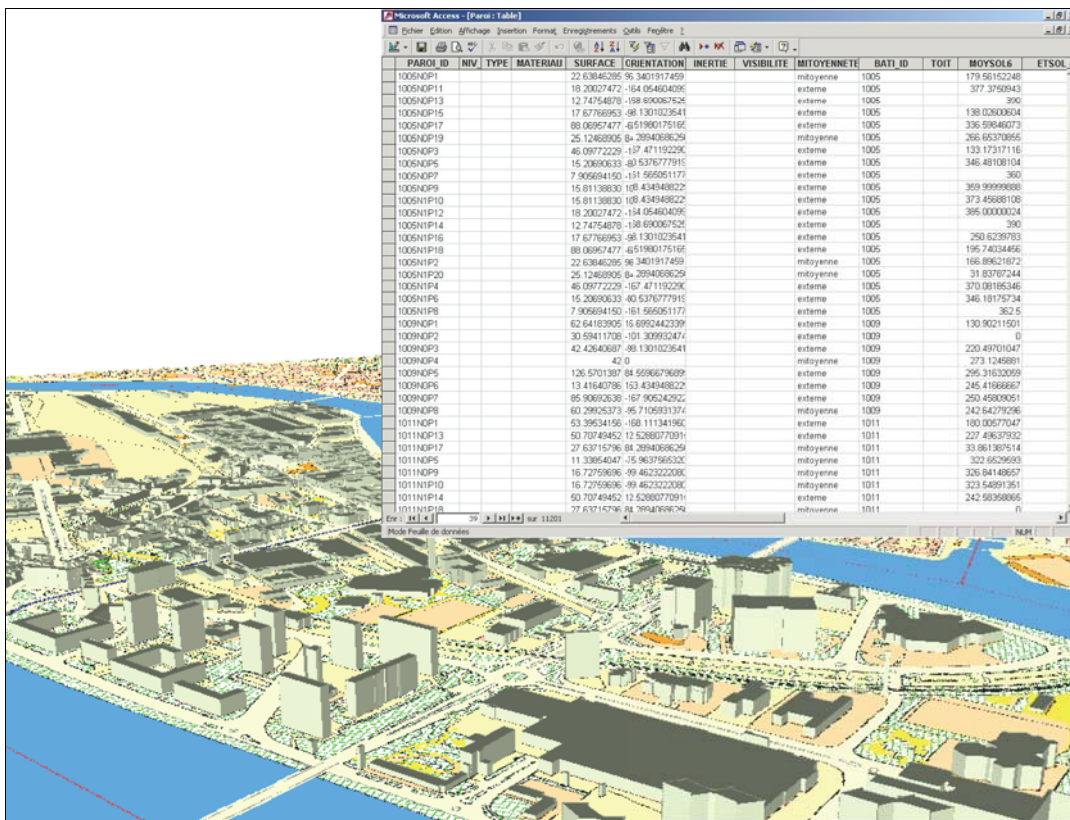


Figure 14. Illustration du processus de reconstruction 3D : les entités (bâtiments, niveaux, parois) sont créées dans la base de données et dans les fichiers de formes

6.4.1.2 Point de vue patrimonial

Nous avons remarqué l'importance des problématiques patrimoniales pour la réhabilitation de logements en centre urbain ancien (cf. § 3.2). Il convient de prendre en compte ces problématiques dans le cadre de l'outil d'assistance à la gestion d'une OPATB, dans la mesure où la qualité patrimoniale des bâtiments peut notablement complexifier le processus de réhabilitation.

Pour intégrer ces données au sein du SIG, nous avons choisi de confier une mission d'expertise à un architecte du patrimoine. Ce dernier proposera une évaluation des qualités patrimoniales des bâtiments composant l'ensemble des îlots tests choisis dans le secteur de l'OPATB. Une fiche sera rédigée pour chaque situation, et attachée aux entités du SIG. Les informations mentionnées dans la fiche seront définies en accord avec l'architecte du patrimoine. Il s'agira principalement du type de construction (selon une typologie à définir), de l'intérêt patrimonial du bâtiment et, le cas échéant, des modes de conservation ou de réhabilitation jugés pertinents.

Ces expertises seront réalisées dans le premier semestre 2005. Elles seront intégrées à la recherche d'indicateurs de performance des enveloppes pour la communication de la phase opérationnelle de l'OPATB (cf. § 8.2.2 page 106).

6.4.2 Données environnementales

Nous décrivons ici les modalités de production et les méthodes d'intégration au SIG des données environnementales de type solaires, aérodynamiques, énergétiques, sonores et d'intervisibilité.

6.4.2.1 Données solaires

6.4.2.1.1 Logiciel Solène

Le logiciel Solène développé par le laboratoire CERMA (27) est le fruit d'une réflexion méthodologique sur l'ajustement et le contrôle environnemental et climatique des projets et d'applications effectuées à la demande d'opérateurs extérieurs par le CERMA. Développé sur PC dans l'environnement standard de Microsoft avec Open Inventor pour les fonctions de visualisation, Solène se prête à une utilisation plus conviviale et applicative.

Solène constitue en fait un système ouvert de questionnements, proposé dans une interface graphique, et organisé autour de fonctions de simulation, qui permettent d'appréhender les ensembles construits architecturaux ou urbains au travers des paramètres solaires, lumineux et thermiques. Divers modes de visualisation rendent compte des comportements observés dans l'espace et le temps. Les applications sont variées et les modes d'exploitation des résultats des simulations permettent, à partir d'un modèle géométrique 3D (sous formes de facettes polygonales) du site à simuler, de traiter aussi bien :

- Les questions d'ensoleillement en termes de tracés d'ombre mais aussi de durée d'ensoleillement avec des rendus sous forme d'animation temporelle ;
- Les questions d'énergétique solaire en appréhendant les composantes directes et diffuses du rayonnement incident solaire sur les facettes du projet. Le rayonnement diffus est traité à partir de modèles de radiance de ciel (la voûte du ciel est modélisée géométriquement dans Solène par

27. Cf. Miguet F., Groleau D. (2002) : « A daylight simulation tool for urban and architectural spaces — Application to transmitted direct and diffuse light through glazing », *Building and Environment*, Vol. 37, n° 8-9, 833-843

discrétisation géodésique de l'hémisphère), considérant alors le rayonnement anisotropique ;

- Les multi-réflexions solaires sont prises en compte, grâce à la mise en place d'un modèle de résolution basé sur la radiosité des surfaces, impliquant l'évaluation des facteurs de forme. Les surfaces de la géométrie sont alors caractérisées par leurs coefficients solaires d'absorption et de réflexion ;
- L'évaluation de l'éclairement naturel, directement en provenance du soleil et du ciel, en utilisant des modèles de luminances de ciel (normalisés CIE ou quelconques) ou indirectement en gérant les multi-réflexions en fonctions des propriétés de réflexion et de transmission des surfaces par la même méthode de radiosité ;
- Les problèmes de transmission lumineuses à l'intérieur des locaux en tenant compte des propriétés des vitrages (qui peuvent être différenciés sur les deux faces du vitrage) et du sens de traversée du flux lumineux. Les réflexions à l'intérieur du local et celles provenant de l'extérieur au travers des vitrages sont alors considérées simultanément dans une même simulation, en considérant conjointement les masques et les transparences ;
- Des fonctions diverses d'analyse de l'éclairement comme les facteurs de ciel, les facteurs de lumière du jour sur des plans horizontaux ...
- Les problèmes de rayonnement thermique, tenant compte des deux types de spectre, solaire et thermique IR, dans des scènes urbaines, permettant d'évaluer les températures de surface des parois et d'appréhender le niveau de confort en extérieur.

L'ensemble de ces fonctions, qui sont susceptibles de se développer à la demande, assurent ainsi une aide efficace à l'évaluation et à la conception des projets. Elles permettent en même temps de mener des investigations à caractère théorique sur l'ajustement climatique des bâtiments et des formes urbaines.

6.4.2.1.2 Intégration des résultats de Solène dans le SIG

Les résultats retournés par le logiciel Solène sont sous la forme de fichiers de valeurs (résultat des calculs demandés) associés à des fichiers de contours (formes géométriques auxquelles les valeurs s'appliquent). Pour la plupart des opérations, un maillage surfacique des objets est nécessaire, si bien que le nombre de contours (chaque maille) et le nombre de valeurs associées peuvent devenir importants. La finesse et la richesse de ces résultats sont l'un des atouts de Solène qui convient bien à l'analyse d'un dispositif architectural particulier, mais qui est moins bien adapté à l'analyse de l'ensemble des bâtiments d'une zone urbaine. Intégrer l'ensemble des données produites dans le SIG conduirait à alourdir inutilement le système.

Dans cette situation, il est nécessaire d'organiser une sélection des résultats afin d'en extraire les informations les plus pertinentes. Pour cela, nous proposons de procéder selon deux protocoles. Le premier consiste à récupérer la durée d'ensoleillement et le flux incident sur chaque paroi de chaque niveau du bâtiment qui nous intéresse et ceci pour chaque matinée et après-midi des trois dates représentatives que sont les solstices et l'une des équinoxes. Nous intégrons les résultats de simulations obtenus pour ces six périodes afin d'aboutir à un ensemble de 48 valeurs décrivant la moyenne, l'écart type, le minimum et le maximum de durée d'ensoleillement et de flux solaire pour

chaque demi-journée de chaque date. Ces valeurs sont stockées comme autant d'attributs des parois dans la base de données associée au SIG (Figure 15). Des requêtes attributaires sur l'information solaire sont alors possibles dans le SIG, permettant par exemple de déterminer l'ensemble des parois exposées au soleil plus de 2 heures en hiver et moins de 6 heures en été (Figure 16). Des cartographies 3D d'ensoleillement deviennent alors envisageables.

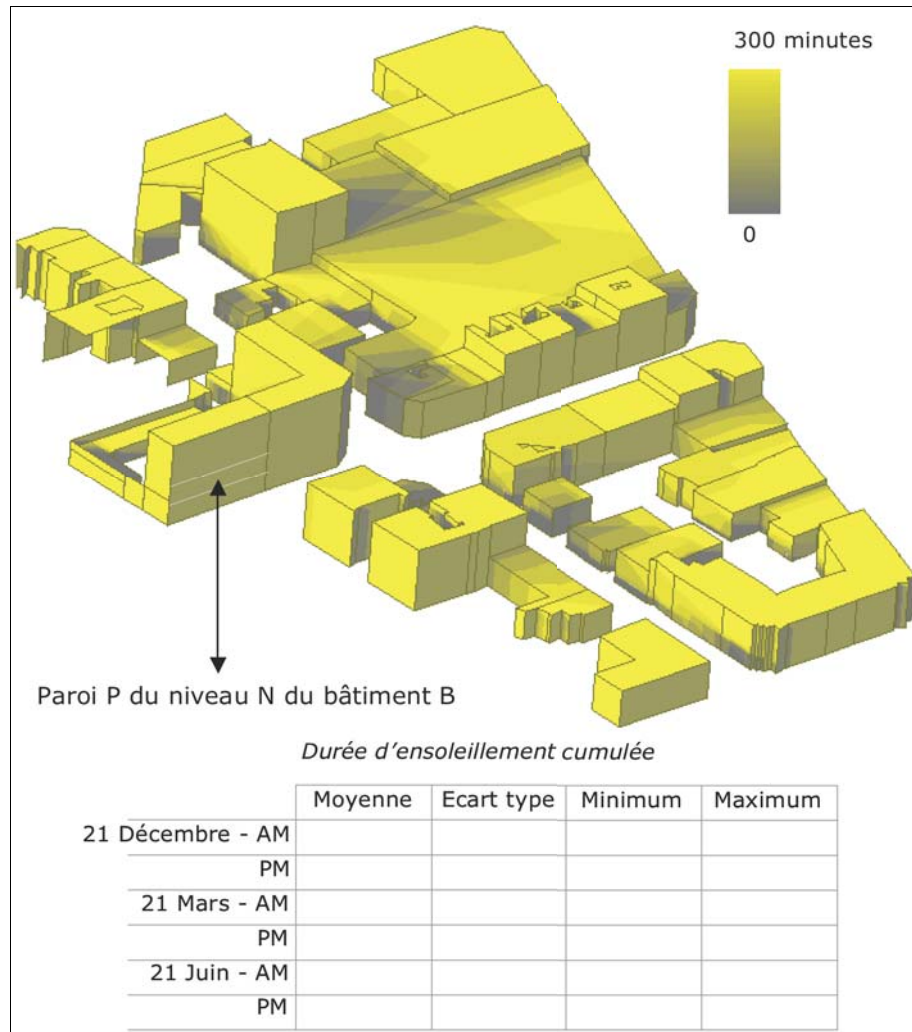


Figure 15. Intégration de données de simulation solaire par textures de simulation ou par valeurs numériques

Une autre façon d'intégrer les résultats de simulation solaire réside dans la possibilité que nous avons de générer des images que nous appelons « textures de simulation ». Solène peut produire pour un même bâtiment des dégradés de couleur représentatifs de l'intensité de tel ou tel phénomène. L'idée est de récupérer sous forme d'image ce dégradé de couleur et de le plaquer sur les façades correspondantes dans le SIG. Incorporée à la maquette 3D, cette « texture de simulation » fournit à l'utilisateur des indications qualitatives et quantitatives d'ensoleillement. Il pourra ainsi faire une première sélection des bâtiments potentiellement intéressants pour ensuite entrer plus précisément dans le détail des données numériques.

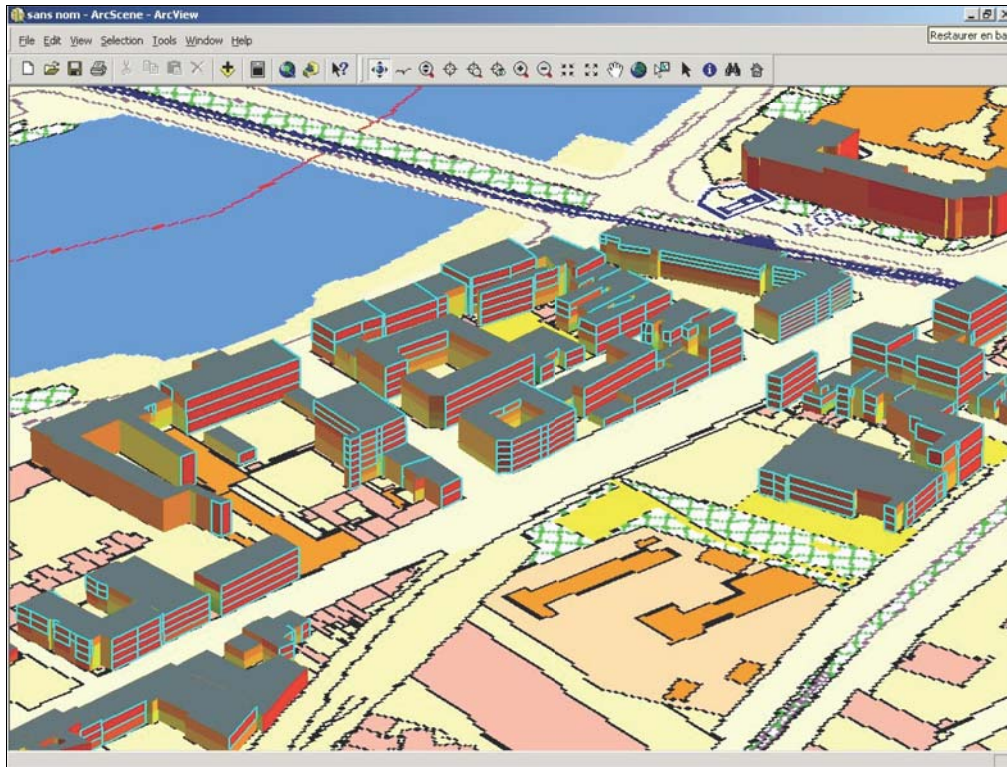


Figure 16. Exemple d'une requête attributaire : sélection de l'ensemble des parois exposées au soleil plus de 2 heures en hiver et moins de 6 heures en été

6.4.2.2 Données aérodynamiques

La simulation des écoulements d'air dans les tissus urbains peut recouvrir plusieurs objectifs :

- La simulation des conditions de vent dans les espaces extérieurs pour des évaluations liées au confort des piétons ou à la qualité de l'air,
- L'évaluation des potentiels de ventilation naturelle des bâtiments, via la connaissance des pressions sur les façades.

Nous intéressant aux enveloppes des bâtiments, nous nous sommes orientés vers le deuxième type de simulation. Il s'agit donc, par des simulations aérodynamiques des tissus, d'accéder aux champs de pression sur les façades des bâtiments. Ces pressions, qui dépendent de l'insertion du bâtiment étudié dans le tissu urbain, sont nécessaires pour évaluer le potentiel de ventilation naturelle d'un bâtiment. Ce type d'informations pourra également être croisé à des informations d'exposition des façades à la pollution sonore et atmosphérique (proximité des voies circulées).

6.4.2.2.1 Logiciel Fluent

Pour la conduite des simulations aérodynamiques dans les espaces ouverts de la zone urbaine étudiée, nous utilisons le logiciel *Fluent* (28) qui est un code commercial de dynamique des fluides. Même si l'utilisation de ce logiciel est de plus en plus facilitée par une interface graphique et une documentation très conviviales, elle n'en reste pas moins réservée à des utilisateurs ayant une expertise de la modélisation des écoulements turbulents et du calcul numérique. Par ailleurs, la création des maquettes numériques (géométrie des tissus urbains et création de la veine de soufflerie numérique) reste très difficile, compte tenu de l'échelle à laquelle nous travaillons. De plus, le caractère instationnaire de la sollicitation vent rend impossible une simulation réaliste et nous devons donc nous limiter à quelques simulations stationnaires qui fournissent des tendances pour des orientations et vitesses de vent particulières.

Notons qu'une simulation de ce type est extrêmement coûteuse en temps de préparation de la maquette numérique (une vingtaine d'heures) et de calcul (environ 48 heures sur les machines actuelles). Il n'est pas actuellement envisageable d'en généraliser l'usage hors des laboratoires.

6.4.2.2.2 Intégration des résultats de Fluent dans le SIG

En raison des limites énoncées ci-dessus, l'interfaçage de l'outil SIG avec le logiciel *Fluent* (via le mailleur *Gambit*) reste encore expérimental. Nous avons principalement réalisé une interface d'import/export de données entre le SIG et *Fluent*. En pratique, une procédure spécifique permet, depuis le SIG, de générer la maquette 3D courante dans le format du mailleur *Gambit*. Cette procédure lance une génération semi-automatique du domaine de calcul autour de la zone urbaine étudiée (veine aérodynamique) en fonction de la direction de vent considérée, puis du maillage du volume d'air contenu dans ce domaine. Elle réduit de ce fait considérablement le temps de préparation des calculs (le maillage manuel étant une opération à la fois complexe et coûteuse, comme indiqué ci-dessus).

Parallèlement, nous avons développé plusieurs procédures permettant d'importer les résultats des calculs de *Fluent* dans le SIG (Figure 17). Nous pouvons actuellement importer des champs de valeurs horizontaux (champs de vitesse de vent par exemple) qui peuvent être traités au moyen des outils d'analyse spatiale de la suite ArcGIS afin de qualifier le confort de certains espaces extérieurs. Nous pouvons également importer les valeurs des calculs au niveau des parois des bâtiments. Dans le SIG, ces valeurs peuvent alors être associées aux entités du modèle de données afin d'en constituer des attributs spécifiques (potentiels de ventilation par exemple).

Ces développements sont en cours à l'heure où nous écrivons ce rapport. Ils n'ont pas été intégrés à l'analyse OPATB dans la mesure où la composante liée au vent s'avère, au final, mineure dans la démarche mise en œuvre. En effet, l'OPATB n'intéresse pas les questions de confort extérieur et, par ailleurs, les problématiques de ventilation naturelle des bâtiments ne sont abordées qu'au cas par cas, dans la phase opérationnelle.

28. <http://www.fluent.com/>

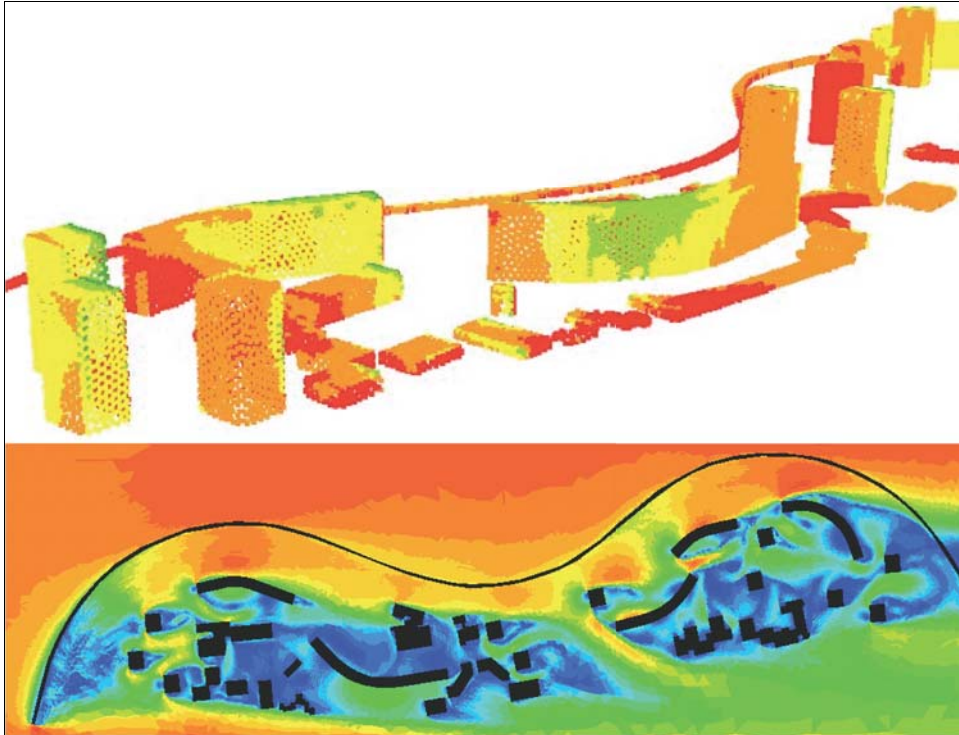


Figure 17. Simulation des champs de vitesse autour d'un ensemble d'immeubles (en bas) et pressions dynamiques sur les parois en 3D (en haut).

6.4.2.3 Données énergétiques

Dans la phase d'étude préalable et plus précisément lors de la réalisation du diagnostic préalable, il s'agit pour la collectivité territoriale de souligner les caractéristiques énergétiques du territoire et le gisement potentiel d'économie d'énergie. À cette fin, elle pourra évaluer les caractéristiques thermiques des enveloppes à partir des dates de construction des bâtiments. Ces informations, comme celles relatives aux sources de chaleur utilisées, aux réseaux, à l'usage des bâtiments, introduites dans la base de données et croisées à l'aide de l'outil SIG avec les différents paramètres disponibles, permettraient de mettre en évidence le gisement potentiel d'économie d'énergie. À cette étape, il n'est pas nécessaire de faire un diagnostic énergétique précis logement par logement ; les outils de calcul thermique du bâtiment ne sont donc pas utiles.

Dans la phase d'étude pré-opérationnelle, la collectivité pourrait intégrer au SIG un grand nombre d'informations supplémentaires, telles que des données statistiques existantes, des résultats d'études et politiques précédentes, les informations collectées lors d'enquêtes de terrain (repérage des situations du bâti, de la vacance, rencontre des propriétaires, des habitants, des usagers) ou suite aux réponses aux questionnaires. A ce niveau, l'équipe chargée de cette étude travaillerait dans la maquette 3D de la zone, et pourrait faire apparaître des informations plus précises comme des usages différenciés de bâtiments (commerce au rez-de-chaussée) ou des réhabilitations partielles. C'est à cette étape que les premières simulations thermiques pourraient intervenir, puisqu'il s'agirait de cerner les bâtiments (ou parties de bâtiments)

qui présentent les performances énergétiques les plus faibles et donc qui sont susceptibles d'offrir le potentiel d'amélioration le plus important. Pour l'évaluation des performances thermiques des bâtiments, les collectivités recourent en général à des opérateurs spécialisés dans le diagnostic thermique et énergétique (bureaux d'études techniques) qui sont en général équipés d'outils de simulation.

Lors de la phase opérationnelle, l'équipe chargée de la mise en oeuvre a également l'utilité d'un outil de simulation thermique qu'elle utilisera sur le terrain, en présence des maîtres d'ouvrage. L'outil doit alors présenter une performance supplémentaire, sur le plan communicationnel. Il doit avant tout permettre une communication aisée sur les problèmes que connaissent les locaux avant intervention et les gains possibles, pour différentes options de réhabilitation, sur le plan qualitatif et quantitatif. Il doit pour cela être interactif et facile à utiliser.

Nous constatons donc que l'usage d'un outil de simulation des performances thermiques des bâtiments est souhaitable dans la phase d'étude pré-opérationnelle et s'impose pour la phase opérationnelle. Le même outil pourrait être utilisé pour ces deux phases, pourvu qu'il réponde aux exigences communicationnelles nécessaires à la phase opérationnelle. S'il ne permet pas d'évaluer la pertinence de la solution de réhabilitation du point de vue financier, il devra être chaîné à un autre outil traitant cet aspect.

En outre, pour ces deux phases, il est important qu'un pré-paramétrage facilite la saisie des entrées nécessaires au calcul. En effet, le nombre de logements concernés par les opérations de réhabilitation réduit le temps de chaque intervention, d'où l'importance de la facilité de saisie et la rapidité de calcul de l'outil, exigés par les opérateurs. Or, une grande partie de ces entrées seront présentes dans la base de données du SIG. Il est donc très intéressant qu'elles puissent transiter de la base de données vers les logiciels de calcul des consommations énergétiques sous forme d'un pré-remplissage des fichiers d'entrées. L'opérateur n'aura plus alors qu'à saisir les seules entrées qui ne figureraient pas dans la base de données (celles recueillies lors de l'entretien avec le propriétaire par exemple) et les différentes possibilités de réhabilitation pour en mesurer les impacts. Enfin, les résultats des calculs devront pouvoir enrichir la base de données afin que l'utilisateur puisse resituer le bâtiment étudié plus particulièrement par rapport à l'ensemble du parc, et que l'équipe opérationnelle puisse mesurer l'impact global de l'ensemble des opérations de réhabilitation engagées.

6.4.2.3.1 Deux outils dédiés à ce type d'étude

Nous avons relevé deux outils adaptés à la phase opérationnelle : X-DCL et COIND'TABL (29). L'outil X-DCL a été développé pour les maisons individuelles par le bureau d'études TRIBU dans le cadre des travaux financés par le Ministère du Logement et l'ADEME pour la mise en place de l'affichage des consommations d'énergies dans les bâtiments. Il n'en constitue pas pour autant, en l'absence de textes officiels, une méthode homologuée ou agréée par les Pouvoirs Publics.

29. Pour être complet, il convient de citer également les outils actuellement en cours de développement à l'initiative de l'ADEME (MEDIADROME, MINERGIE) ou de l'ANAH (EQTOR, MEDIATHAER). EQTOR est un outil simple utilisable par les non-spécialistes. MEDIATHAER met en oeuvre la méthode des certificats énergétiques.

X-DCL utilise une nomenclature proche de celle des équipements pour illustrer le niveau de consommation de la maison analysée. L'objectif est d'arriver après intervention à un niveau de consommation proche du A, ou au moins égal à B (Figure 18 ci-dessous).

Euros/m ² .an	
< 7,6	A
7,6 à 10,7	B
10,7 à 13,7	C
13,7 à 16,8	D
16,8 à 19,8	E
19,8 à 22,8	F
>= 22,8	G

Figure 18. Nomenclature des dépenses énergétiques de X-DCL.

Le calcul des consommations s'effectue grâce à la saisie des informations concernant le logement. Les résultats affichent le niveau de consommation énergétique sur une échelle variant de A à G. Est présentée également, la part de consommation de chaque équipement (chauffage, eau chaude sanitaire, etc.). L'analyse du comportement de consommation se base sur la comparaison entre les dépenses réelles et une plage de variation des dépenses calculées autour de la consommation conventionnelle (Figure 19). Il permet de savoir, si le comportement des occupants vis-à-vis de l'énergie est plus ou moins économe.

La méthode présente cependant des limites. Elle ne tient pas compte du comportement des occupants ou des données réelles comme les degrés jours du lieu. L'outil ne prend pas en compte les aberrations ou les équipements particuliers. Les logements fortement ensoleillés (larges surfaces vitrées, vérandas, serres ...) ne peuvent être traités correctement par cette méthode.

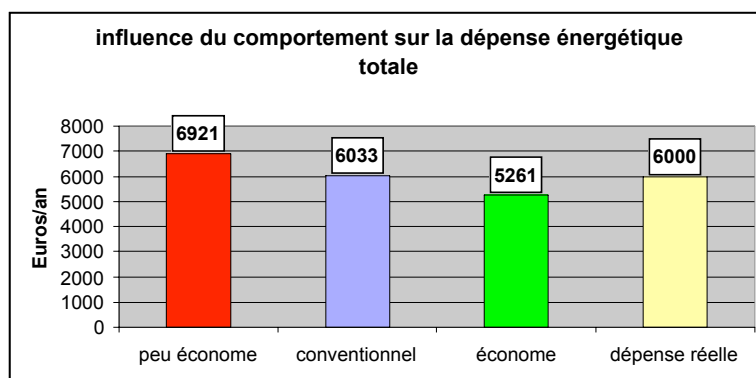


Figure 19. Exemple d'analyse de la répercussion du comportement sur les dépenses énergétiques.

COIND'TABL a été développé principalement pour les bâtiments tertiaires. Il fonctionne sous le tableur Microsoft Excel. Chaque feuille de calcul constitue une fiche d'entrées ou de résultats. La méthode de calcul des consommations de chauffage est une méthode globale annuelle basée sur les degrés-heure (HK ou kilo degrés-heure). Par simplification, les rendements des installations sont pris en compte avec des valeurs forfaitaires. Cet outil est très peu convivial. Il présente les résultats au moyen d'un diagramme comparatif des consommations entre les différents postes (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, auxiliaires, etc.) et entre les types d'énergie.

L'outil ne permet pas d'effectuer un comparatif sur plusieurs types d'entrées concernant les qualités physiques du bâtiment ou des équipements. Il reste donc difficile à utiliser pour les opérations de réhabilitation. En effet il faudrait effectuer manuellement le comparatif des consommations avant et après intervention.

La saisie est également difficile car elle nécessite la connaissance des caractéristiques physiques des parois. Une annexe donne la correspondance entre la composition de la paroi et les coefficients thermiques. A l'usage, un aller et retour répété est nécessaire entre cette annexe et la fiche de saisie de calcul des consommations.

6.4.2.3.2 *Le logiciel de simulation énergétique EnergyPlus*

Nous avons examiné les caractéristiques d'un grand nombre de logiciels de calcul des consommations énergétiques des bâtiments, pour la plupart recensés sur le site Internet *Building Energy software Tools Directory* (30), ainsi que sur le site de l'antenne française de l'IBPSA (31). L'analyse des informations relatives à 60 de ces outils de simulation qui semblaient, en première approche, convenir à nos exigences, nous a permis d'en dégager une dizaine qui sont téléchargeables gratuitement. De ce fait, ces logiciels ont pu être testés rapidement. Nous avons également testé des logiciels dont nous avons des versions de démonstration (Codyba et Enercad).

Il résulte de ces tests qu'un grand nombre de ces outils sont dédiés à la simulation d'un seul type de bâtiment (résidentiel, commercial ou tertiaire). Par ailleurs, la plupart des outils produits aux USA n'utilisent pas les unités du Système International ou proposent uniquement des données climatiques pour les villes américaines, sans qu'il soit possible de générer ou d'utiliser d'autres fichiers climatiques. Enfin, nous avons examiné les fichiers produits par la description du problème (fichier d'entrées pour le moteur de calcul) afin de voir si ceux-ci pouvaient être aisément générés depuis notre SIG. Ces fichiers sont souvent difficilement compréhensibles et rarement documentés.

De ce travail, il ressort, pour le moment, que le logiciel qui semble répondre le mieux à nos exigences est EnergyPlus (32), construit à partir des points forts des logiciels BLAST et DOE-2 qui ont déjà fait leurs preuves. EnergyPlus permet les simulations thermo-aérauliques de tous types de bâtiments (résidentiels, tertiaire ou commerciaux), à différents niveaux (approches

30. http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/

31. International Building Performance Simulation Association : <http://www.ibpsa.org>.
Site web de la section française : <http://www.ibpsa-france.net/>

32. <http://www.energyplus.gov>

multizones ou monozones), incluant un grand nombre de types de parois transparentes et opaques (notamment des parois dynamiques comme les parois double-peau) et de systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation. Les problèmes sont construits d'une manière modulaire et intuitive.

EnergyPlus utilise un fichier d'entrées en format ASCII et génère des fichiers de sortie dans le même format. Il a volontairement été conçu comme un moteur de calcul de thermique du bâtiment, et non pas comme un logiciel de simulation encapsulé dans une interface graphique. Ceci suggère qu'il peut être interfacé à notre outil SIG — ce qui devrait être largement facilité par la documentation fournie qui comprend un guide à l'intention des développeurs d'interfaces, lequel détaille la constitution des fichiers d'entrées et de sorties. Par ailleurs, ce logiciel déjà très complet, est de plus en plus utilisé et évolue rapidement sans que ses fondements ne soient remis en cause. Enfin, l'environnement EnergyPlus est ouvert à l'intégration de modules développés sous TRNSYS ou SPARK, ce qui permet d'envisager le développement de modules spécifiques à nos utilisations.

6.4.2.3.3 Interopérabilité entre le SIG et les outils d'évaluation énergétique

L'interface entre le SIG et le logiciel EnergyPlus n'a pas été réalisée car le besoin ne s'en est pas fait sentir dans le cadre de l'OPATB de Nantes. Cette interface sera proposée dans le cadre de projets urbains où l'évaluation énergétique approfondie des constructions s'impose (cf. § 8.2 page 106).

Il conviendra également d'envisager l'interfaçage du SIG avec des outils plus simples, de type tableur, qui conviennent dans les cas courants et sont en prise avec les pratiques opérationnelles. Cependant, pour ce faire, il serait illogique de s'appuyer sur une autre méthode que celle qui sera proposée pour les certificats énergétiques qui s'imposeront bientôt dans les transactions immobilières. Dans l'attente de cette méthode, il est difficile de s'avancer sur ce sujet.

6.4.2.4 Données sonores

6.4.2.4.1 Simulation des niveaux de bruit

Différents outils permettant d'évaluer les niveaux sonores sur les façades exposées aux bruits routiers (logiciels MITHRA, SoundPlan, etc). Ces logiciels produisent des cartographies des niveaux sonores sur des plans horizontaux et au droit des façades. Ils n'ont pas été mis en œuvre pour la présente étude OPATB, mais ils ont été interfacés avec le SIG et testés dans le cadre d'autres recherches, essentiellement pour évaluer les niveaux sonores dans les espaces extérieurs.

6.4.2.4.2 Approche qualitative de l'identité sonore des quartiers

Dans le cadre de l'OPATB, une approche plus qualitative, nous a semblé pertinente en regard des objectifs d'aide à la concertation assignés à cette recherche. Elle consiste à identifier l'identité sonore des quartiers considérés. Des mesures complétées par des enquêtes et des prises de sons permettent d'établir et de communiquer les principales caractéristiques de cette identité sonore.

La démarche s'est organisée en deux étapes. Dans un premier temps, un repérage in situ a permis de délimiter des zones urbaines (sous-quartiers) du territoire de l'OPATB, présentant une certaine homogénéité sonore. Dans un second temps, une série d'observations, d'enregistrements sonores et de mesures acoustiques ont permis de caractériser les différentes zones. Les éléments déterminant l'identité sonore de ces zones ont été compilés sous forme de fiches synthétiques (textes) et de fragments sonores représentatifs (bandes sons numériques). Ces fiches et fragments sonores ont ensuite été intégrés au SIG, associés aux points de mesure représentatifs. En pratique, cliquer sur l'un de ces points (matérialisé par une entité 3D abstraite dans le SIG) permet de prendre connaissance des qualités de l'environnement sonore et d'écouter les enregistrements significatifs (cf. Figure 20).

Cette partie de la recherche est présentée en détail au Chapitre 9 (page 109).

Fiche Mangin 08

Description des productions sonores locales : Ecoute côté parc (prise de son au sol). Espace sonore anonyme dominé par le fond sonore routier. Le tissu lâche des barres d'habitations ne protège que très partiellement le cœur d'îlot où donnent les façades. Le passage des habitants sur le sol en gravier rappelle que cet espace est parfois réapproprié. Un groupe scolaire anime aussi les rythmes sonores monotones de ce lieux. (A comparer avec le point 07 précédent.)

Mesures acoustiques : Leq 49 dB(A) au RDC, Leq : 55 dB(A) en façade au 5ème étage.

Durée de la bande sonore : 2 minutes 17



Figure 20. Exemple de fiche d'identité sonore (page web) accessible depuis le SIG.

6.4.2.5 Données d'intervisibilité

Les règlements en matière de protection du patrimoine sont basés sur les relations d'intervisibilité entre les bâtiments et l'espace public (voir § 4.1.2). Ces arguments visuels sont parfois mis en avant pour éviter les modifications des enveloppes, et notamment l'intégration de dispositifs solaires, même si la façade concernée n'est pas fortement visible dans le périmètre de protection. Une manière d'éviter ces difficultés consiste à établir l'empreinte visuelle des façades ciblées sur l'espace public attenant. On apporte ainsi un argument tangible dans des débats qui reposent parfois sur des bases infondées.

Les fonctions de calcul d'intervisibilité de la suite ArcGIS ne prennent en compte que le modèle numérique de terrain (MNT), en ignorant les éléments du sur-sol (bâtiments, végétations, objets divers). Cette approche est inadaptée à l'étude des intervisibilités en milieu urbain. En conséquence, nous avons choisi de développer des procédures spécifiques permettant d'évaluer l'empreinte visuelle de tout objet de la scène (une paroi d'un niveau d'un bâtiment) sur l'espace public, dans un périmètre défini (33).

Un prototype a été développé. En l'état actuel, il permet de connaître les relations d'intervisibilité entre un ensemble de « points cibles » et un ensemble de « points observateurs » (Figure 21). L'algorithme s'appuie sur une technique de lancer de rayons entre les deux ensembles de points. La sélection des points d'observation et des points cibles s'effectue directement dans l'environnement du SIG. Les résultats peuvent être stockés dans la base de données et faire l'objet de requêtes. Des cartographies de l'empreinte visuelle d'une paroi ou d'un bâtiment sont donc potentiellement réalisables. Associées avec les données d'ensoleillement, ces données d'intervisibilité peuvent permettre de cibler les façades ou les versants de toiture susceptibles d'accueillir des dispositifs solaires efficaces avec un impact visuel réduit.

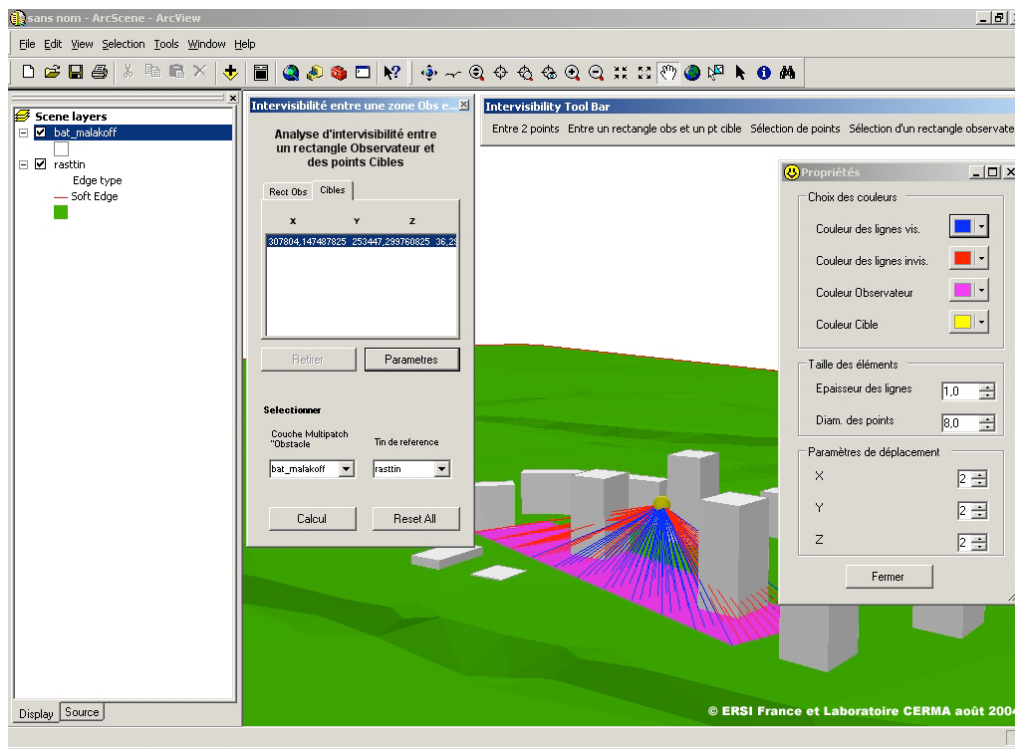


Figure 21. Intégration de fonctions de calcul d'intervisibilité 3D dans la suite ArcGIS

33. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'un stage mené au sein d'ESRI-France et encadré par notre équipe. Stage de E. Houzay, Elève ingénieur fonctionnaire en 2^{ème} années de l'ENSG (Ecole Nationale des Sciences géographiques), Eté 2004.

6.4.3 Généralisation

Nous avons montré comment intégrer à notre outil SIG les données sur le bâti et les données physiques utiles à l'analyse environnementale des enveloppes. Les approches décrites font état de la démarche thématique qui a été la nôtre dans ces développements ; les données ont en effet été traitées au fur et à mesure des besoins et de l'avancement de l'outil : données solaires, données aérodynamiques, données sonores et d'intervisibilité, etc.

Pour généraliser cette approche empirique, il convient désormais de s'interroger sur des modalités plus systématiques d'intégration des données physiques dans un SIG 3D. Ces données sont de deux types : celles qui sont obtenues par simulation au moyen de logiciels spécifiques, et celles qui sont collectées in situ, par le biais de mesures ou d'observations. Les premières peuvent a priori provenir de logiciels quelconques, développés en propre au laboratoire ou faisant l'objet d'une diffusion commerciale. Les données collectées in situ peuvent également être issues de démarches différentes (notations, mesures, images, observations, enquêtes, etc.). Cependant, malgré la variété des techniques informatiques et des sources d'information, les données environnementales se présentent au final selon quatre modalités différentes que nous désignons sous termes d'information attributaire, surfacique, volumique et illustrative. Ces quatre familles d'information peuvent faire l'objet de méthodes systématiques quant à leur intégration à un SIG 3D construit sur un modèle de décomposition hiérarchique des bâtiments (analogue à celui mis en œuvre dans notre outil). Nous proposons ici quelques éléments de réflexion sur ces possibilités de généralisation.

6.4.3.1 Information attributaire

Les données attributaires sont celles qui peuvent être directement associées à une primitive constructive. Ce sont par exemple les données concernant la date de construction du bâtiment, l'usage des locaux (données associées au bâtiment ou au niveau), le type constructif ou encore le pourcentage de vitrage (attribut de la façade ou de la paroi). Les informations collectées pour la reconstruction 3D des bâtiments (cf. § 6.4.1 page 76) font partie de cette catégorie d'information attributaire.

Des informations plus physiques peuvent être attribuées, comme les caractéristiques des matériaux constitutifs des parois, les propriétés de l'enveloppe telles que la résistance thermique ou la perméabilité à l'air, ou encore les consommations énergétiques calculées par niveau ou par bâtiment (cf. § 6.4.2.3 page 84). Certaines de ces données sont collectées in situ (usage du bâtiment ou période de construction par exemple). D'autres sont produites par déduction (résistance thermique approximée à partir de la connaissance du type constructif par exemple). D'autres attributs enfin sont issus des résultats de simulation, comme décrit ci-après.

6.4.3.2 Information surfacique

Les données surfaciques sont celles qui sont produites par les outils de simulation des interactions entre les phénomènes physiques urbains et les bâtiments. En général, ces outils ne fournissent pas des valeurs directement associables aux entités construites. Ils produisent une information surfacique, sous forme de champs de valeurs déployés sur les parois extérieures des

bâtiments (durées d'ensoleillement, flux énergétiques incidents, niveaux lumineux ou sonores, pression due au vent, etc.). De plus, cette information surfacique peut être variable dans le temps, ou dépendre des hypothèses physiques définies pour simuler le phénomène (ciel clair ou couvert, saison, trafic routier, direction du vent, etc.). Il s'agit alors de transformer cette information surfacique en information attributaire associée aux primitives géométriques représentant l'enveloppe des bâtiments, c'est-à-dire les parois ou les façades.

Les méthodes de transformation utilisées varient suivant les phénomènes. Nous avons principalement traité le cas de l'ensoleillement, dans sa composante lumineuse et énergétique. Les données issues des simulations solaires réalisées par SOLENE se présentent sous la forme de champs de valeurs associées à un maillage surfacique des bâtiments. Il est nécessaire d'agréger les résultats des simulations pour les intégrer au SIG. Pour cela, nous récupérons la durée d'ensoleillement et le flux incident sur chaque paroi de chaque niveau du bâtiment, et ceci pour chaque matinée et après-midi des trois situations représentatives que sont les deux solstices et l'une ou l'autre des équinoxes (cf. § 6.4.2.1.2 page 80). Ces valeurs sont stockées comme autant d'attributs des parois dans la base de données.

Le même principe pourrait être appliqué aux résultats de simulation des niveaux sonores sur les façades (34), ou encore aux valeurs d'intervisibilité entre une paroi (ou une façade) et l'espace public (cf. § 6.4.2.5 page 89). De même, le principe des « textures de simulation » proposé pour les simulations solaires pourrait s'étendre à tout type d'information surfacique représenté sous forme graphique par les logiciels de simulation (sous réserve de pouvoir capturer les images produites par ces logiciels).

6.4.3.3 Information volumique

Le calcul des écoulements du vent ou de la propagation du son dans les formes urbaines par exemple, produit des champs de valeurs volumiques (valeurs aux points du maillage utilisé pour la discrétisation du volume étudié). Deux types d'exploitation de ces informations peuvent être mis en oeuvre. Le premier consiste à effectuer une coupe horizontale dans le champ de valeurs, afin par exemple d'obtenir le niveau sonore ou la vitesse du vent à la hauteur des piétons. Les valeurs obtenues pourront ensuite être projetées sur le sol et traitées avec les techniques classiques de l'analyse spatiale en deux dimensions. Cette méthode est utile pour l'analyse environnementale des espaces publics.

Le second mode d'exploitation consiste à projeter des données volumiques 3D sur les enveloppes des bâtiments, en utilisant des méthodes d'interpolation ou d'extrapolation des valeurs calculées dans les mailles les plus proches. On obtient alors une information surfacique du phénomène étudié, à proximité immédiate des parois. Cette information surfacique pourra être traitée comme décrit ci-avant, pour aboutir à une information attributaire exploitable dans

34. Des recherches actuellement menées au centre d'études technique (CETE) de Lyon visent un résultat similaire en produisant des cartographies du bruit sur les enveloppes tridimensionnelles des bâtiments. Cf. *Recherche Equipement* (revue éditée par la DRAST, Ministère de l'Équipement), n°2, février 2004

les requêtes, ou encore à des « textures de simulation » illustrant le phénomène (cf. § 6.4.2.2.2 page 83).

D'autres données spatiales peuvent également être intégrées, comme les relevés sur site de vitesses de vent ou de niveaux sonores. Ces informations volumiques seront traitées différemment des informations similaires obtenues par simulation, dans la mesure où la finesse du maillage de relevé (quelques points de mesure) ne permet pas d'interpolation ou d'extrapolation. Il faudra alors, pour les opérations de projection sur les façades par exemple, tenir compte des lois spécifiques d'atténuation du phénomène.

6.4.3.4 Informations illustratives

En plus des informations décrites ci-dessus, nous pouvons être amenés à traiter dans le SIG des informations que nous avons classées dans la famille des illustrations. Il peut s'agir d'illustrations textuelles (résultats d'enquêtes, expertises des façades, notes diverses), graphiques (photographies ou dessins, relevés thermographiques des façades ou issus de télédétection satellitaire, permettant de connaître la perméabilité des enveloppes aux transferts thermiques) et sonores (enregistrements in situ, comme montré ci-avant). Ces illustrations sont associées aux entités pertinentes : façades ou parois pour les illustrations graphiques, points de l'espace pour les bandes-son par exemple. Sans l'avoir encore réalisé concrètement, nous avons imaginé différents processus permettant de transformer certaines informations illustratives en information attributaire. Les relevés thermographiques de façade par exemple, peuvent donner des indices de « porosité thermique » qu'il serait intéressant d'associer aux parois des bâtiments. De même, les relevés acoustiques peuvent être exploités pour qualifier des types de paysage sonore susceptibles d'être associés aux façades.

7. Évaluation de l'outil développé

Cette évaluation a été proposée dans le cadre de l'OPATB engagée sur le secteur Ile de Nantes. Nous rappelons ici brièvement les enjeux de cette opération, les modalités d'intégration de l'outil dans le cadre de l'étude pré-opérationnelle, ainsi que les suites proposées (hors de la présente recherche) dans le cadre de la phase opérationnelle qui commencera en 2005.

7.1.1 L'OPATB sur le secteur Ile de Nantes

Trois opérations pilotes ont été engagées pour tester et initier les premières mises en oeuvre des OPATB (Bègles, Pays du Haut Entre-deux-Mers, Pau). Huit collectivités ont été lauréates de la première présélection en 2002 (Amiens, Grenoble, Nantes, Vénissieux, Parc Naturel Régional du Pilat). L'OPATB de Nantes fait partie de cette première sélection.

Le périmètre de l'OPATB est l'Ile de Nantes, soit un territoire et 90 hectares et 13 000 habitants. Cette OPATB poursuit une OPAH à volet énergie engagée sur le secteur République-Les Ponts (achevée le 31 décembre 2002). Le bilan de l'OPAH a mis en lumière un très faible impact sur le plan de l'incitation à l'amélioration énergétique et thermique. Le diagnostic, bien que fortement subventionné (90%), n'ouvre pas droit à des aides ou primes spécifiques. La ville de Nantes mène une réflexion avec l'ANAH, l'ADEME et le conseil Général autour :

- De la redéfinition du périmètre,
- De la mise en oeuvre d'actions spécifiques pour le traitement des copropriétés dégradées, des logements vacants (notamment par l'incitation au conventionnement), des immeubles vétustes et insalubres, du confort thermique et acoustique des logements.



Figure 22. Carte de l'île de Nantes

Au-delà d'un parc construit principalement avant la mise en place de la première réglementation thermique (1960-1975), le potentiel d'amélioration du rendement énergétique réside également dans la présence d'un réseau de chaleur (Valorena) qui valorise 90% des ordures ménagères. Il n'alimente que la partie est de l'île et une réflexion est menée en vue de son extension de façon à satisfaire un nombre croissant des besoins.

Les objectifs de l'opération sont de :

- Réaliser des travaux permettant de mieux maîtriser les charges liées à la consommation d'énergie,
- Rechercher pour les logements existants un niveau qualitatif comparable à celui du logement neuf,
- Inciter les propriétaires qui louent des logements à investir dans le confort et limiter les charges d'énergie des locataires,
- Inciter les propriétaires à faire réaliser un diagnostic global de leur logement et des appareils de chauffage,
- Prendre en compte les normes minimales d'isolation acoustique notamment pour les immeubles situés le long des voies de circulation, identifiées comme des voies présentant des niveaux sonores importants,
- Permettre aux propriétaires bailleurs de bénéficier des primes spécifiques de l'ANAH en les conseillant et en prenant en compte la ventilation naturelle ou mécanique du logement.

Les freins identifiés lors de l'OPAH à volet énergie déjà menée sur une partie du périmètre de l'OPATB sont :

- Une forte présence de copropriétés,
- Une majorité de propriétaires-bailleurs (61% de propriétaires bailleurs contre 27% de propriétaires occupants recensés en 1999),
- Un marché du logement dynamique, des prix relativement élevés et une clientèle peu exigeante, ce qui incite peu à l'amélioration de la qualité du logement et le conventionnement,
- Des plafonds de travaux imposés par l'ANAH trop faibles pour traiter les immeubles vacants,

- Un parc important de logements de faible qualité thermique, dont les propriétaires ont des ressources qui dépassent les plafonds de l'ANAH, ce qui les exclut du dispositif OPAH.

Les acteurs clés de l'efficacité énergétique sont :

- Les bailleurs sociaux (7 dont Nantes Habitat),
- Les gestionnaires publics (INSEE, Caisse Primaire d'Assurance Maladie de Nantes, Conseil Régional Pays de Loire, La Poste, La Maison des administrations nouvelles MAN),
- Les gestionnaires privés (centre commercial Beaulieu, Hôtel Mercure, Hôtel Holiday Inn).

La maîtrise d'ouvrage de l'opération est assurée par le GEPA (Groupe d'Etudes et de Propositions d'Actions), rattaché à la direction Générale Urbanisme et Aménagement de Nantes (URBANA).

7.1.2 Modalités d'intégration de l'outil dans le cadre de l'étude pré-opérationnelle

Nous souhaitons initialement que l'outil soit mis en œuvre et évalué dans le cadre de l'étude pré-opérationnelle de l'OPATB. Il n'en a pas été ainsi pour deux raisons :

- Les calendriers de l'étude pré-opérationnelle et du développement de l'outil se sont chevauchés, si bien que l'outil n'a pu être concrétisé (en tant que prototype) qu'à la fin de l'étude ;
- Après discussion avec le bureau d'études, il s'est avéré que l'analyse précise des phénomènes physiques sur les enveloppes n'était pas un critère essentiel de l'étude pré-opérationnelle ; à ce stade de la démarche OPATB, il semble plus important d'analyser finement la motivation des maîtres d'ouvrage, de manière à cibler ceux qui sont prêts à entreprendre des travaux, plutôt que d'analyser les propriétés environnementales des enveloppes.

On peut donc considérer que, dans le cas de l'OPATB de Nantes, l'outil proposé n'a pas été exploité dans le cadre de l'étude pré-opérationnelle. Néanmoins, l'ensemble des tests qui ont permis le développement de l'outil ont été réalisés à partir d'un échantillon de bâtiments représentatifs du secteur de l'OPATB. Ce choix a été réalisé en accord avec la ville de Nantes et le bureau d'études mandaté. On a ainsi retenu une dizaine d'îlots du quartier République (bâti ancien plus ou moins dégradé, dans un tissu urbain dense), ainsi que quelques barres et tours du quartier Beaulieu, représentatives de la production architecturale des années 1960 (Figure 23). Cette base de travail pourra être exploitée pour l'étude opérationnelle.



Figure 23. Quelques constructions représentatives du secteur

7.1.3 Intégration de l'outil dans le cadre de l'étude opérationnelle

Pour faire suite au constat précédent, il apparaît désormais que l'outil SIG proposé serait véritablement utile par sa capacité à produire une information environnementale claire, attractive et personnalisée. Ce sont donc les possibilités de communication, via les images 3D, qui sont désormais privilégiées. Les perspectives d'application en termes de communication dans le cadre de la phase opérationnelle de l'OAPT de Nantes sont décrites plus loin (cf. § 8.2.2 page 106).

8. Bilan et perspectives

L'ambition d'un développement urbain durable appelle de nouveaux outils de diagnostic environnemental des espaces urbains existants ou en projet. Par les possibilités d'analyse et de communication qu'ils offrent, par leur ancrage dans les services techniques des villes, les systèmes d'information géographique apparaissent comme supports naturels de ces développements. Ils doivent cependant s'étendre pour prendre en compte la troisième dimension et savoir interagir avec les outils de simulation des phénomènes physiques. Ces deux extensions laissent ainsi entrevoir de nouveaux SIG 3D environnementaux urbains, susceptibles de devenir des outils communs de gestion des villes, en matière de réhabilitation, de renouvellement urbain ou d'extension urbaine.

La présente recherche a constitué le point de départ de ces développements dans notre laboratoire. Nous en tirons un bénéfice particulièrement positif sur le plan instrumental, même si les applications opérationnelles initialement prévues n'ont pas été complètement réalisées. Les perspectives sont nombreuses et stimulantes, tant en matière de recherche « fondamentale » sur les systèmes d'information géographique 3D, que pour les applications potentielles du système développé.

8.1 Bilan

8.1.1 Rappel des objectifs initiaux et moyens mobilisés

Nous donnions trois objectifs à la présente recherche (cf. § 3.2 page 11) :

- Construire un prototype opérationnel de SIG 3D environnemental et l'appliquer sur un ensemble de situations existantes représentatives des problèmes de réhabilitation en zone urbaine ancienne (îlots choisis dans le secteur d'étude de l'OPATB mise en place à Nantes) ;
- Produire les informations environnementales utiles pour l'analyse des situations choisies (modélisations et simulations numériques, mesures et observations in situ), et définir les méthodes de visualisation adaptées au contexte d'une opération concertée entre experts et non experts ;
- Mettre en oeuvre l'outil en situation réelle à Nantes, et évaluer sa pertinence dans les processus de concertation et de décision d'une OPTAB.

Pour atteindre ces objectifs, différents moyens ont été mobilisés :

- Les ressources humaines du laboratoire CERMA (chercheurs statutaires) auxquelles se sont ajoutés pour ce projet :
 - Fabien Ramos, Docteur en sciences de l'information géographique, spécialiste des SIG 3D (thèse IGN-EADS), recruté au CERMA sur un poste CNRS de post-doctorant pour le développement de l'outil SIG ;
 - Lamia Tiraoui, architecte, Docteur en sciences de l'ingénieur, missionnée pour l'étude préalable sur les problématiques générales de réhabilitation de logements, procédures et mises en oeuvre (cf. chapitre 4) ;
 - Olivier Balaÿ et Nicolas Rémy, Chercheurs au laboratoire CRESSON (Ecole d'Architecture de Grenoble), missionnés pour l'étude de l'environnement sonore ;
 - Erwann Houzay, élève ingénieur fonctionnaire de l'ENSG, stagiaire ESRI-France encadré par F. Ramos, pour le développement de procédures de calcul d'intervisibilité.
- Les moyens matériels et logiciels du laboratoire CERMA notamment pour ce qui concerne les moyens de calcul pour les simulations numériques environnementales (logiciels SOLENE et FLUENT tournant sur stations de travail), la mise en oeuvre du SIG, et l'ensemble des développements informatiques nécessaires.

- Des partenariats avec la société ESRI-France pour les développements techniques (35) et avec la Ville de Nantes pour l'application de l'outil à l'OAPT Ile de Nantes. Ce dernier partenariat a bien fonctionné pour ce qui concerne les spécifications de l'outil et le développement de la recherche ; les responsables de l'OPATB à la Ville de Nantes nous ont associés au montage du projet (dossier de candidature) et mis en contact avec le bureau d'études chargé de l'étude pré-opérationnelle.

Le développement du système a été conduit dans le cadre de la présente recherche concernant les enveloppes des bâtiments, mais également dans le cadre d'une étude concernant l'analyse des espaces extérieurs d'un projet d'aménagement urbain à Nantes (Grand Projet de Ville Malakoff-Pré-Gauchet). Ces deux actions de recherche menées parallèlement se sont enrichies mutuellement.

8.1.2 Résultats

Nous avons abordé le problème de manière pragmatique. Nous nous sommes appuyés sur un SIG commercial et nous avons mis à profit les connaissances acquises en matière de CAO 3D bâtiment pour construire un modèle de données adapté. Sauf cas particulier (en matière d'intervisibilité par exemple), nous n'avons pas cherché à rajouter des fonctions de simulation au système, mais plutôt à intégrer le plus efficacement possible les résultats de logiciels tiers éprouvés (SOLENE, FLUENT, SOUNDPLAN, etc.). Ces outils bénéficient d'une importante communauté d'utilisateurs et connaissent des évolutions régulières ; ils pourraient entrer à plus ou moins long terme dans la gamme des outils utilisés par les collectivités dans différents types de projets urbains. Enfin, nous avons souhaité développer ce système en partenariat avec les collectivités locales (ville de Nantes et communauté urbaine Nantes Métropole), de manière à cerner les multiples dimensions qui interagissent dans les processus de conception des projets urbains.

À la date du présent rapport, nous disposons d'un outil prototype et d'une expérience applicative des SIG 3D pour la gestion des projets urbains. Nous développons ici ces deux points.

8.1.2.1 L'outil prototype

Il s'agit d'un système, interfacé avec la solution commerciale ArcGIS, et qui permet de définir et visualiser des objets en trois dimensions auxquels sont attachés des attributs physiques. En pratique, les développements réalisés permettent aujourd'hui (sous une forme plus ou moins aboutie selon les fonctions) :

35. Une convention de partenariat a été établie avec la société ESRI-France, filiale française de ESRI Inc, éditeur des logiciels de la suite ArcGIS. Ce partenariat a conduit à la mise à disposition des outils de la suite ArcGIS, à la diffusion et la valorisation des résultats, à la facilitation des contacts opérationnels, etc. ESRI-France nous a également soutenu pour l'organisation de la journée thématique décrite ci-après.

- De créer les entités construites (façades, parois, niveaux) d'une scène urbaine donnée, en partant du cadastre 2D et d'une série d'informations collectées in situ.
- De renseigner les entités constructives avec des attributs physiques environnementaux obtenus par simulation numérique. D'un point de vue système, nous classons les données en quatre ensembles qui regroupent l'information attributaire simple, l'information surfacique, l'information volumique et l'information illustrative. Nous proposons des modalités spécifiques d'intégration au SIG selon chaque type d'information. Sur le plan thématique physique, nous traitons concrètement les phénomènes solaires (durées d'ensoleillement, flux énergétiques incidents, avec le logiciel *Solène*), les phénomènes aérauliques (effets du vent autour des bâtiments et dans les espaces publics, avec le logiciel *Fluent*) et les phénomènes sonores (niveaux sonores au droit des façades, avec le logiciel *SoundPlan*). Les routines pour le calcul d'intervisibilité ont été développées mais elles n'ont pas été intégrées de manière efficace dans le système (possibilité de relier points cibles et façade par exemple). L'interfaçage avec les outils de simulation énergétique des bâtiments ne pose pas de problème technique, mais un choix reste à faire quant à la méthode la plus pertinente dans ce domaine, en fonction des applications visées.
- De renseigner la base de données avec des informations collectées in situ. Les attributs physiques des bâtiments, servant en particulier à la reconstruction 3D, font partie de ces données. Nous y avons également ajouté des données acoustiques permettant de qualifier l'environnement sonore des différents sous-quartiers étudiés, et nous prévoyons d'intégrer des informations concernant la qualité architecturale des bâtiments (d'un point de vue patrimonial).
- D'effectuer des requêtes sur les données attributaires de manière par exemple à produire des cartographies thématiques mono-phénomène (ensoleillement hiver/été) ou multi-phénomènes (ensoleillement et vent). Il est également possible de construire des indicateurs spécifiques agrégeant des informations hétérogènes (âge des bâtiment, orientation des façades, durée d'ensoleillement par exemple).
- De visualiser interactivement les formes 3D colorées suivant les attributs choisis. On peut également profiter des fonctions de l'environnement ArcGIS pour superposer des informations graphiques diverses (plans des rues et vitesses de vent, par exemple) afin de produire des documents ayant un certain pouvoir communicatif.

Cet ensemble de possibilités ne s'offrent pas dans un outil « clé en main ». Il s'agit de fonctions prototypes qui ne peuvent généralement être utilisées que dans le cadre du laboratoire. Le développement d'outils robustes pouvant être appropriés par le secteur opérationnel n'est pas intégré à la démarche en l'état actuel de nos recherches.

8.1.2.2 L'expérience applicative

Nous espérions initialement pouvoir appliquer le prototype développé dans la phase opérationnelle de l'OPATB de Nantes. Cette application n'a pas été réalisée pour au moins deux raisons : le chevauchement des calendriers de l'étude pré-opérationnelle et du développement de l'outil d'une part, mais aussi le caractère superflu de l'analyse fine des enveloppes au stade de

l'étude pré-opérationnelle d'autre part, comme nous l'avons expliqué plus haut (cf. § 7.1.2 page 97).

Cet échec relatif nous a permis de modifier nos hypothèses initiales quant à l'applicabilité du SIG dans le cadre des OPATB. Nous avons initialement une perception technique des démarches liées à l'OPATB. Il nous semblait que l'accent serait porté sur un diagnostic physique environnemental détaillé des constructions et sur la promotion de solutions nouvelles pour la réhabilitation. Dans ce sens, nous pensions que notre outil serait d'une certaine utilité pour le diagnostic des potentialités environnementales des enveloppes, et pour la préconisation de techniques innovantes, comme l'installation de capteurs solaires.

Les premières études pré-opérationnelles d'OPATB menées parallèlement à la recherche, dont celle de Nantes, ont relativisé notre perception. Il est ainsi apparu que les informations environnementales trop physiques que nous avons développées n'étaient pas adaptées à la phase pré-opérationnelle, où le choix des cibles se fait en fonction de critères pratiques comme la motivation des maîtres d'ouvrage. Elles ne semblent pas plus efficaces pour la phase opérationnelle, où la communication doit s'appuyer sur des éléments faciles à comprendre pour le grand public, comme l'ont montré plusieurs expériences, dont celle de la Communauté urbaine de Dunkerque (36). De plus, il est apparu que les solutions de réhabilitation préconisées restent assez classiques (isolation, changement des ouvertures) et ne nécessitent pas l'expertise particulière que peut apporter notre outil.

Ces réflexions nous ont permis de mieux situer les potentialités de l'outil que nous avons commencé à développer en matière de gestion des projets urbains. Les éléments de communication doivent certainement être mis en avant. La phase opérationnelle de l'OPATB de Nantes nous invite désormais à nous concentrer sur cet aspect ; nous proposons quelques pistes dans la section Perspectives ci-après.

8.1.3 Publications et valorisation de la recherche

Comme tout projet de recherche, le présent projet a fait l'objet d'opérations de publication, de communication et de valorisation. Nous en présentons ici les principaux éléments.

Notons que, outre leur portée scientifique, ces opérations de communication et de valorisation ont permis d'aider à diffuser les problématiques environnementales urbaines dans des champs où elles sont parfois mal connues (SIG, informatique) et de faire connaître le dispositif particulier des OPATB.

36. La Communauté urbaine Dunkerque Grand Littoral a mis en œuvre une opération de sensibilisation et de communication autour des questions énergétiques liées à l'habitat, en s'appuyant sur une vaste campagne de relevés thermographiques infrarouges aériens. Malgré son caractère a priori très technique, cette campagne a principalement pour objectif de sensibiliser le public aux déperditions énergétiques des constructions au moyen de cartographies thermographiques simplifiées de l'ensemble de l'agglomération. Cf. le site web de la Communauté, rubrique Thermographie : <http://www.dunkerquegrandlittoral.org>

8.1.3.1 Publications et communications

8.1.3.1.1 Publication dans une revue scientifique

D. Siret, M. Musy, F. Ramos, D. Groleau, P. Joanne : « Développement et mise en œuvre d'un SIG 3D environnemental urbain », Article soumis à la *Revue Internationale de Géomatique*, Paris, Hermès (en cours)

8.1.3.1.2 Publications dans des actes de conférences

M. Musy, D. Siret, F. Ramos, D. Groleau : « Interoperability of simulation tools within a 3D GIS », Article soumis pour la conférence *IBPSA Building Simulation 2005*, Montréal, Canada, Août 2005 (en cours)

F. Ramos, D. Siret, M. Musy : « A 3D gis for managing building rehabilitation process », in *Proc. of the 12th International Conference on Geoinformatics*, Gävle, Sweden, June 2004

M. Musy, F. Ramos, D. Siret, G. Moreau, C. Marenne : « Développement d'un SIG 3D dédié au diagnostic des potentialités environnementales des bâtiments », in *Actes des XXIIe Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Association Universitaire de Génie Civil, Marne-la-Vallée, France, Juin 2004

M. Musy, D. Siret, F. Ramos, D. Groleau : « A 3D GIS for environmental diagnosis of urban frontages », in *Proc. of UDMS 2004*, Chioggia, Italy, Oct. 2004

F. Ramos, D. Siret, M. Musy, G. Moreau, C. Marenne, D. Groleau : « Un SIG 3D pour le diagnostic environnemental des façades urbaines », 16ème rencontres européennes de la géomatique, Paris, Palais des Congrès, 1er avril 2004

8.1.3.1.3 Communications orales

D. Siret : « Un SIG 3D pour l'analyse environnementale des enveloppes des bâtiments », Séminaire OPATB, ADEME, Sophia-Antipolis, Novembre 2004

F. Ramos : « Un SIG 3D pour l'analyse environnementale des projets urbains », Journée thématique, CERMA, Ecole d'architecture de Nantes, 15 septembre 2004

F. Ramos : « Un outil de diagnostic des potentialités environnementales des enveloppes dans le cadre d'une opération d'amélioration thermique de l'habitat (OPATB) », Conférence ESRI-France, Paris, Sept. 2003

8.1.3.2 Valorisation

La recherche a été signalée dans différentes publications professionnelles en lien avec les OPATB (lettres des OPATB de l'ADEME, Gazette des communes, etc.).

Par ailleurs, nous avons organisé une journée thématique sur le thème : « les SIG pour la gestion environnementale des projets architecturaux et urbains : intégration de la troisième dimension et couplage SIG-simulation », le 15

septembre 2004 à Nantes (37). Il s'agissait de faire connaître et de discuter les avancées en matière de gestion environnementale des projets architecturaux et urbains au moyen des solutions SIG. La matinée a porté sur les enjeux environnementaux des projets d'aménagement et l'apport des SIG. L'après-midi était consacré aux questions de modélisation 3D et de couplage entre SIG et outils de simulation des phénomènes physiques urbains. Plus de 90 personnes, en provenance de toute la France, ont assisté à la journée.

Le programme de la journée est détaillé ci-dessous. Les supports des exposés oraux sont disponibles à l'adresse : <http://www.cerma.archi.fr/sig/>

- D. Cherel (ADEME, Direction Bâtiments et Energies Renouvelables) : Mise en place d'une politique locale de lutte contre l'effet de serre : le cas des opérations programmées d'amélioration thermique et énergétique des bâtiments (OPATB)
- N. Bedjaoui (Chargée d'opération, Ville de Nantes) : Mise en œuvre d'une OPATB sur le quartier Ile de Nantes : outils d'aide à la décision et à la concertation
- L. Huchet du Guermeur (Directeur de la mission GPV, Communauté Urbaine de Nantes) : Le grand projet de ville Malakoff-Pré Gauchet : problématiques environnementales et outils SIG
- C. Tuffery (Responsable de marché, secteur Education-Recherche, ESRI-France) : Actualité des outils ESRI et ERDAS pour l'aménagement urbain et l'architecture
- P. Gerbe (IGN, Chef de service Conseil Aménagement) : La troisième dimension dans l'information géographique : données, outils et applications
- N. Paparoditis (Chercheur, Laboratoire MATIS, IGN) : Modélisation 3D automatique d'environnements urbains : de l'aérien à la très grande échelle terrestre
- F. Gruson (Directeur, ARCHI-VIDEO) : Reconstruction 3D urbaine réaliste
- B. Miede (Domaine nuisances et cadre de vie, CETE de Lyon) : La cartographie 3D en milieu urbain : qualité de l'air et environnement sonore
- F. Ramos (Chercheur, Laboratoire CERMA, Ecole d'Architecture de Nantes) : Un SIG 3D pour l'analyse environnementale des projets urbains

37. Avec le soutien matériel de ESRI-France et de la Fédération de recherche CNRS « Physique et Image de la ville »

8.2 Perspectives

8.2.1 Perspectives générales

Les éléments présentés dans ce rapport ne font qu'esquisser les premiers résultats d'un travail de recherche envisagé sur le long terme. Il est manifeste pour nous que les SIG 3D environnementaux urbains constituent le point de convergence de nombreux domaines de recherche qui sont parvenus à leur maturité propre : les systèmes d'information, la modélisation 3D et l'image de synthèse, la simulation des phénomènes physiques urbains, ainsi que les indicateurs du développement urbain durable. La poursuite et l'amplification de ces recherches appellent donc plus que jamais la création d'une communauté scientifique interdisciplinaire, soucieuse de répondre aux enjeux auxquels sont aujourd'hui confrontées les collectivités territoriales.

Un travail important reste à faire pour concrétiser ces objectifs dans un outil qui dépasse le stade du prototype. De nombreux développements sont ainsi nécessaires pour une meilleure reconstitution 3D des objets urbains (import des données IGN, modélisation des toitures à l'aide d'une base de connaissances, prise en compte des éléments de parois significatifs, etc.). L'interfaçage avec les outils de simulation doit être rendu plus efficace en s'adaptant à la nature de l'information produite par le logiciel (surfacique, volumique ou illustrative) plutôt qu'au format des résultats, comme nous le faisons actuellement. Des mécanismes généraux et robustes doivent être développés en ce sens, de manière à pouvoir ouvrir la palette des outils de simulation et à garantir leur interopérabilité avec le système.

Sur le plan de l'analyse environnementale, de nouvelles techniques de requêtes spatiales et attributaires doivent être introduites pour tenir compte du caractère spatio-temporel de l'information. De manière plus générale, une réflexion doit être proposée sur la question de la représentation des données environnementales urbaines, et notamment sur leurs multiples échelles d'appréhension, spatiales et temporelles (de la façade à la ville entière, de la seconde à l'année entière, suivant les phénomènes). Un travail théorique sur les indicateurs environnementaux pertinents en matière de gestion urbaine reste également à entreprendre.

La mise en œuvre du SIG3D dans le cadre du grand projet de ville (GPV) Malakoff-Pré-Gauchet à Nantes a constitué une première étape dans le développement opérationnel de l'outil. D'autres projets sont en cours (projet RGCU ADEQUA, projet européen CONCERTO) et devraient permettre d'affiner nos propositions.

8.2.2 Application à l'OPATB Ile de Nantes

Malgré les difficultés initiales signalées plus haut (difficultés essentiellement dues au positionnement de notre outil dans la démarche et imputables à nous

seuls), nous souhaitons poursuivre notre collaboration avec la Ville de Nantes dans le cadre de l'OAPT Ile de Nantes, dont la phase opérationnelle débutera en 2005. À cette fin, nous proposons de développer et de mettre en œuvre un indicateur simplifié de performance des enveloppes construites qui s'appuie sur des données immédiates. Cet indicateur pourrait être cartographié dans le SIG 3D dans une perspective de communication vers un large public. Il pourrait prendre en compte et croiser :

- l'année de construction du bâtiment (en rapport avec les dates des différentes réglementations thermiques),
- l'orientation du bâtiment,
- le pourcentage de façades extérieures et la compacité (par niveau, de manière à différencier les étages supérieurs et inférieurs des étages courants),
- l'usage des locaux (par niveau ou par bâtiment selon connaissance).

L'objectif de cette étude serait de produire une représentation simplifiée mais crédible de l'état des enveloppes construites, qui soit personnalisée, facile à communiquer et qui puisse servir de déclencheur à la discussion avec les maîtres d'ouvrage. Une typologie des différentes configurations de paramètres doit donc être construite afin de caractériser les bâtiments. Les cartographies ainsi produites seraient rendues attractives par le biais de maquettes 3D interactives et/ou d'images des enveloppes rue par rue.

La construction de cet indicateur sera réalisée en parallèle à la mission d'expertise patrimoniale programmée en 2005 (cf. 6.4.1.2 page 78). Ces deux opérations sont en effet complémentaires.

Enfin, pour faire écho au travail réalisé, il serait possible d'ajouter au système des éléments de cartographie d'ensoleillement des enveloppes, mettant en évidence les risques de surchauffe (pour le tertiaire notamment), les potentiels d'apports solaires gratuits en hiver (tous types de bâtiments) et le gisement solaire en toiture (potentiel d'intégration de panneaux solaires). Ces éléments seraient présentés dans une démarche de communication spécifique visant la promotion des énergies renouvelables lors des opérations de réhabilitation.

9. Annexe : analyse des identités sonores de trois quartiers de l'OPATB de Nantes

Convention 02.04.135 - Mandat Cabinet CASA, Olivier Balaÿ, juillet 2004.

9.1 Introduction

9.1.1 Préambule

Nos précédentes recherches, études et projet sur le vécu sonore dans le logement ont montré que l'aménagement de l'écoute passe par des dispositifs qui sont loin de se réduire à l'imposition du silence et à l'isolation. Ce constat contribue à remettre en cause le modèle d'explication et d'analyse que l'on présente couramment dès que l'on parle du comportement humain devant les sons ; ce modèle d'explication conforte l'idée que le son serait essentiellement

quelque chose de subi, alors qu'il s'inscrit aussi dans des « systèmes d'utilité » (38) et de confort (39) pour l'individu, y compris le temps libre et a priori inactif, où les flux sonores divers (de vie, d'énergie et d'éléments) sont réglés pour le plus grand bien de tous.

Ne nous laissons donc pas aveugler par les schémas mentaux de notre époque. Tous les bruits ne sont pas nuisants, tous les bruits ne sont pas condamnables. Se défendre du bruit, refuser de l'entendre, le censurer systématiquement, dénier toute émotion sonore émanant de la ville et de l'espace domestique, ne sont que des attitudes circonstancielles et/ou momentanées. C'est dans ce contexte que nous avons creusé l'idée, depuis 1985, d'un diagnostic d'enveloppe de l'habitat destiné à servir la conception sonore du logement, avec la conviction que le recours aux connaissances acoustiques et au domaine des sciences humaines pour construire ou réhabiliter la ville devait un jour aborder la question de l'aménagement sonore ordinaire. Nos travaux sur « La dimension sonore des quartiers » (1985) et sur « Les moyens de la technique et de la représentation sonore pour aider à la conception de l'habitat collectif » (1986, 1987) voulaient contribuer à nuancer cette fausse évidence que l'on retrouve dans le discours acoustique actuel, à savoir que l'ouïe ne peut être à l'aise que dans un milieu isolé du bruit social et culturel. Une démarche globale de qualité acoustique doit permettre à la fois l'appropriation sonore des espaces généralement utilisés par l'habitant quand il est chez lui et la possibilité d'équilibrer ou de choisir son écoute en fonction des différentes sources de bruit extérieures et intérieures (« La conception sonore des espaces habités », 1994).

9.1.2 Objectif et méthode

Ce qui précède annonce la teneur de notre contribution à cette recherche : plutôt que d'étudier les seules situations d'exposition sonore négatives ou bruyantes, nous avons tenté d'identifier les lieux publics remarquables pour l'écoute qu'ils offrent depuis le logement, de manière à les intégrer dans le SIG environnemental conçu par le CERMA.

Pour le technicien comme pour le maître d'ouvrage ou l'architecte, cet apport de connaissances n'est pas neutre. Il met en évidence les diversités locales et montre qu'on ne peut pas appliquer de manière aveugle les normes thermiques en vigueur pour réhabiliter les façades d'un logement. On sait bien en effet que l'amélioration de l'isolation thermique d'un logement transforme la propagation acoustique entre l'extérieur et l'intérieur, et donc modifie les conditions du confort. Via le SIG, on présage donc que l'attitude de l'aménageur saura s'inspirer des conduites sonores locales que nous avons repérées et qui y sont représentées.

Pour aller dans ce sens, notre travail a été guidé par les trois hypothèses méthodologiques suivantes.

38. Foucault (Michel) La volonté de savoir (l'hypothèse répressive), Gallimard Paris 1967

39. Selon la définition du confort que donne Michel Marié dans : Goubert (Jean-Pierre et alii) Du luxe au confort Belin, Paris, 1988, p. 11

La première hypothèse a fait centrer le travail sur l'exposition des façades aux productions sonores locales, en distinguant les façades exposées à une sorte de saturation sonore (la distance d'intelligibilité de la parole est inférieure à trois mètres), les façades exposées à des espaces sonores appropriés (une densité de signaux humains), les façades exposées à des espaces sonores communiquant (des signaux locaux émergent fréquemment et donnent une identité parfois remarquable au lieu) et les façades exposées à des espaces sonores anonymes (les productions sonores locales propagent vers le logement des informations peu ou pas significatives).

L'étude a été conduite sur trois quartiers de l'Île de Nantes choisis par le CERMA en collaboration avec les responsables locaux de l'OPATB : le quartier République, le quartier Mangin et les tours Vulcain (cf. Figure 24).

Le quartier République possède des immeubles de logements aux typologies très variées : immeubles collectifs disposés en barre ou en tour, petits immeubles des années trente et des années cinquante, présence de commerce en rez-de-chaussée. Au niveau de la morphologie urbaine, le tissu des rues est soit continu, soit lâche, ce qui génère des conditions de propagation acoustique vers les façades très changeantes.

Le quartier Mangin est un quartier constitué d'immeubles résidentiels en forme de barres construites dans les années 1970. Ces immeubles, souvent de grande longueur, prennent place au milieu de vastes espaces verts plantés. Leur hauteur varie entre cinq et dix-sept étages. Il n'y a pas de commerce en rez-de-chaussée.

Les quatre tours Vulcain sont rassemblées autour d'un silo de stationnement d'automobiles. Les constructions sont bordées par un stade d'athlétisme et une friche de terrains en herbe où le tissu construit lointain est très lâche. C'est un ensemble résidentiel à l'écart de la ville.

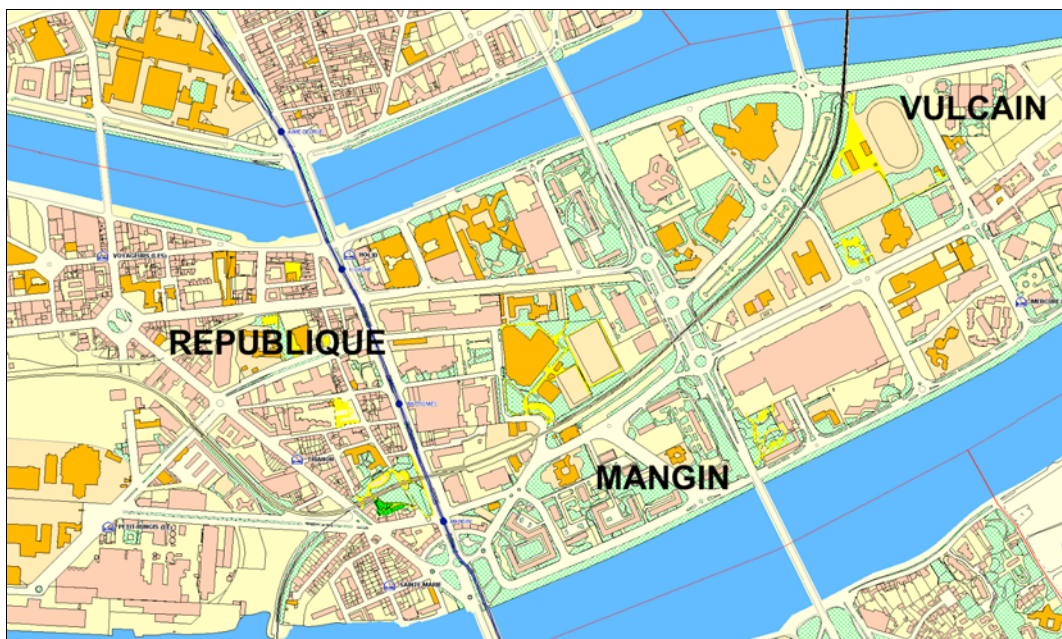


Figure 24. Les 3 quartiers étudiés

Selon la seconde hypothèse méthodologique, il semblait important de compléter l'observation des productions sonores locales par des enregistrements sonores. Ceux-ci constituent en effet les traces de la réalité des expositions sonores des façades des logements. La bande sonore est également le seul moyen de montrer les potentialités phoniques d'un lieu à travers les usages habituels les plus marquants ou les plus minuscules qui s'y déroulent. Elle peut donc être une véritable référence pour imaginer des concepts d'aménagement sonore ou proposer et corriger l'enveloppe acoustique d'un logement donné.

Enfin, selon **la troisième hypothèse méthodologique**, il semblait important de mettre en parallèle des observations locales et des enregistrements sonores, les informations liées à la mesure acoustique des bruits réels. Dans le cadre financier qui nous était imparti, l'outillage des mesures fut succinct : un sonomètre pour connaître le niveau sonore L_{eq} jour au rez-de-chaussée des façades des logements. Il était toutefois suffisant car il donnait une des plus importantes informations quantitatives dont le concepteur a besoin. Enfin, chaque fois que cela a été possible, les variations de niveau selon les étages ont été mesurées.

Les données qui suivent reprennent point par point la méthode énoncée ci-dessus et qu'on peut résumer ainsi :

- Sélectionner sur les trois terrains la diversité des situations d'écoute de l'environnement depuis le logement
- Constituer un corpus d'informations pour le SIG selon trois descripteurs qui se complètent : la description des productions sonores sociales, la bande sonore locale et la mesure acoustique moyennée des bruits émis.

La présentation dans le SIG permet de repérer les différences d'exposition des logements, par exemple le « côté cour » et le « côté rue ». Le concepteur peut ainsi faire ses choix d'isolation acoustique en conséquence.

9.2 Résultats

9.2.1 Le site République

Deux territoires sonores très différents l'un de l'autre ont été repérés dans ce site en forme générale de triangle dont les sommets sont la place Victor Mangin, la place François II et le pont général Audibert (cf. Figure 25).

Le premier secteur (sud) qui va de la place Mangin au boulevard Gustave Roch est très homogène quand on le parcourt. Il est entouré de boulevards à dominante de bruit routier et technologique (tram, voiture, camion). Au

centre, l'environnement sonore ambiant est plutôt calme même s'il est traversé par une voie ferrée.

Le second secteur (nord) est très diversifié selon les rues et les îlots. Le parcours mène à découvrir des lieux sonores particuliers dont certains ont une identité acoustique remarquable (Cf. ci-dessous).



Figure 25. Points d'observation et de mesure, quartier République

Point 1

- *Description des productions sonores locales* — Façades sur rues exposées à des productions sonores anonymes ou peu significatives, sauf quand la source sonore est intense (bruits de chantier ou passages bruyants de véhicules automobiles)
- *Mesures acoustiques* — Leq 56 dB(A)
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 29.

Point 1 bis

- *Description des productions sonores locales* — Espace sonore communiquant. Façades en connexion sonore avec les trams et les passages de trains. Bonne perception des sons lointains. Au pied de l'immeuble, une cour creusée dans le sol sert de parking à voitures (on entend bien les arrivées et démarrages de moteur). A comparer avec le point 1 et le point 21.
- *Mesures acoustiques* — Leq 56 dB(A)
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 41.

Point 2

- *Description des productions sonores locales* — Les façades donnant sur le square Vertais sont exposées à un espace sonore approprié et rythmé en fonction des passages de train, des passages de trams et des arrivées des enfants (sorties d'écoles, weekend...) Il est traversé par une voie ferrée surélevée. Les passages de trains agissent comme des donneurs de temps (« c'est le train de telle heure »). Les sons de la nature sont audibles. Le fond sonore, constitué par le bruit routier, est qualifié par le rythme de passage des trams. Signaux sonores remarquables : des pas, des voix, des oiseaux, des trams, peu de trains ; des gens passent, des habitants s'allongent sur l'herbe.
- *Mesures acoustiques* — Leq 55 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 48.

Point 3

- *Description des productions sonores locales* — Carrefour de rues où les façades sont exposées à un environnement sonore anonyme mais calme. Les activités audibles sont rares. Le lieu est très minéral et réverbérant. Nous avons observé qu'il amplifie le chant des oiseaux et le jeu de ballon dans la rue. La moindre activité sonore est donc amplifiée. Dans le calme relatif, les logements sont en connexion acoustique avec les autres espaces du quartier (passages des tramways et passages des trains).
- *Mesures acoustiques* — Leq 49 dB(A). Passage de train : Leq 59 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 28.

Point 4

- *Description des productions sonores locales* — Façades sur boulevard exposées à un environnement sonore anonyme mais rythmé par la matière phonique de l'arrivée et du démarrage des trams. Les irrptions sonores de mobylettes et de moteurs sont fréquentes ; elles placent les logements dans des conditions limites de saturation sonore. Côté cour, les logements sont exposés aux bruits domestiques mais ils restent en connexion avec les bruits de tram, de train et les sirènes des ambulances.
- *Mesures acoustiques* — Leq 71 dB(A). Lmax 93 dB(A)
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 06.

Point 5

- *Description des productions sonores locales* — Façades sur une cour ouverte entourée d'immeubles R+3, R+5 donnant sur la place Wattignies. L'environnement sonore est plutôt anonyme, sauf au pied d'un immeuble

où des conversations d'habitants prennent place régulièrement l'après-midi (comme on peut l'entendre sur la bande sonore). Le traitement du sol de la cour est minéral avec des bordures végétales ; le plan des masses bâties est en forme de U. L'ensemble confère au lieu une grande clarté acoustique qui convient mal à la rareté des productions sociales : le moindre bruit (claquement de porte d'entrée, jeu de ballon, appel...) fait irruption. C'est un ensemble de logements certainement « fragile » du point de vue du vécu sonore (à vérifier par une enquête approfondie). Le bruit de fond d'un transformateur est particulièrement présent.

- *Mesures acoustiques* — Leq 51 dB(A). Lmax 65 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 47.

Point 6

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposés sur rue A. Fourny. Espace sonore communiquant offrant des conditions d'écoute très variées et très variables (voix, voitures, téléphones, rollers). Une voiture passe et tout bascule. Elle s'éloigne et tous les bruits se font à nouveau entendre. A comparer avec le point 6 ter pour les remarques concernant le rez-de-chaussée de la tour de logements.
- *Mesures acoustiques* — Leq 56 dB(A). Lmax 73 dB(A)
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 34.

Point 6 bis

- *Description des productions sonores locales* — Au huitième étage de la tour de logements, exposition côté boulevard Gustave Roch. Espace sonore communiquant à amplitudes d'intensité variables (entre 55 et 61 dB(A)). Le bruit routier domine ainsi que les gazouillis d'oiseaux. En arrière plan, les voix d'enfants en train de jouer sont perceptibles, comme si le jeu était très éloigné de la tour, alors qu'il se déroule à son pied. A comparer avec le point 6 ter.
- *Mesures acoustiques* — Leq 61 dB(A). Lmax 71 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 20.

Point 6 ter

- *Description des productions sonores locales* — Au rez-de-chaussée de la tour de logements, exposition côté boulevard Gustave Roch (en léger surplomb par rapport à la chaussée). Espace sonore communiquant à amplitudes d'intensité variables. À comparer avec le point 6 et le point 6 bis.
- *Mesures acoustiques* — Leq 68 dB(A). Lmax 86 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 33.

Point 7

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposées sur le boulevard Victor Hugo à une dominante de bruits routiers. Il y a pourtant des pauses de vingt secondes environ toutes les minutes (cf. bande sonore). L'environnement sonore est anonyme même si on entend parfois les voix en provenance du trottoir d'en face. À comparer avec le point 22.
- *Mesures acoustiques* — Leq 69 dB(A). Lmax 84 dB(A).

- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes.

Point 8

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposées côté cour à un environnement sonore calme et communicant : connexions avec les rues voisines par les porches, bruits domestiques audibles nettement détachés (volets, fenêtres, descentes d'eau).
- *Mesures acoustiques* — Leq 50 dB(A). Lmax 62 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 28.

Point 9

- *Description des productions sonores locales* — Situées à 50 mètres environ du boulevard Victor Hugo, les façades des immeubles donnant sur cette rue bénéficient d'une ambiance sonore calme rythmée par des émergences faibles ou moyennes (quelques passants et quelques bruits de portes de garage.) C'est un espace sonore peu communicant. A comparer avec le point 10.
- *Mesures acoustiques* — Leq 52 dB(A). Lmax 73 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 0 minute 58.

Point 10

- *Description des productions sonores locales* — Situées à 50 mètres environ du *Boulevard des Martyrs Nantais de la Résistance*, les façades des immeubles donnant sur cette rue sont complètement « connectées » à ce boulevard. Espace sonore communicant rythmé par les émergences moyennes des passages de trams et des voitures. De grandes plages de « silence ». A comparer avec le point 9.
- *Mesures acoustiques* — Leq 57 dB(A). Lmax 67 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 38.

Point 11

- *Description des productions sonores locales* — Façades donnant sur une cour intérieure en retrait du *Boulevard des Martyrs Nantais de la Résistance* mais ouverte sur ce boulevard. D'où son ambiance sonore anonyme et bruyante, à la limite de la saturation. De plus, la présence de jeux pour enfants amplifie le sentiment d'exposition (forte réverbération). Quand il n'y a pas d'activité, il y a le bruit routier, et quand les enfants sont là, on n'entend que leurs cris. L'ambiance est donc à la limite de la saturation acoustique, quelque soit l'occupation sociale. La nuisance n'est pas quantitative mais qualitative.
- *Mesures acoustiques* — Leq 61 dB(A). Lmax 86 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 50.

Point 12

- *Description des productions sonores locales* — Côté rue, façades exposées à un espace sonore approprié. Sans doute le lieu phonique le plus expressif du quartier étudié (bruits domestiques, bruits de restaurants, avions, passages de voitures et connexions sonores avec les deux boulevards voisins).

- *Mesures acoustiques* — Leq 57 dB(A). Lmax 76 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 29.

Point 13

- *Description des productions sonores locales* — L'espace sonore côté « ruelle parking » est à comparer avec le point 12. Il est communicant mais fragile acoustiquement (nombreuses ouvertures sur les boulevards). Les transitions sonores entre le point 12 et le point 25 sont très intéressantes à étudier pour le sentiment d'urbanité qu'elles engendrent et le filtrage du bruit routier qu'elles proposent (côté *Boulevard des Martyrs Nantais de la Résistance*). Le fragment sonore en est l'illustration.
- *Mesures acoustiques* — Leq 54 dB(A). Lmax 70 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 04.

Point 14

- *Description des productions sonores locales* — Espace sonore à peine communicant, à la limite de l'anonymat. Il y a du mouvement humain mais on ne l'entend pas. Ce lieu a sans doute perdu son identité sonore après la construction du nouvel immeuble côté *Boulevard des Martyrs Nantais de la Résistance* (le passage sous celui-ci apporte du bruit là où il n'y en avait pas). Dans le fragment sonore, l'auditeur se rendra compte des conséquences acoustiques liées au choix d'implanter un espace de parking au pied du nouvel immeuble (cf. remarques point 13 pour un traitement plus adapté).
- *Mesures acoustiques* — Leq 60 dB(A). Lmax 76 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 25.

Point 15

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposées sur un espace sonore approprié et appropriable (voix compréhensible à 10 mètres de distance). La traverse côté boulevard Babin Chevaye est trop courte pour filtrer le bruit routier mais cela n'entame en rien la qualité sonore locale. Les activités sociales sont tantôt fréquentes tantôt absentes, en fonction de l'ouverture du centre des « bains douches ». Il y a donc perception d'un rythme sonore propre à la rue, ce qui lui confère une ambiance de village.
- *Mesures acoustiques* — Leq 54 dB(A). Lmax 66 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 31.

Point 16

- *Description des productions sonores locales* — Espace sonore approprié. Les façades qui donnent sur cette cour urbaine construite dans les années 1920 / 1930 (HBM) bénéficient de l'écoute de sons proches et de sons lointains (connexions avec les appartements voisins, avec les escaliers et avec la rue). C'est un environnement phonique remarquable car très reposant pour l'oreille. Il est plein de bruits sociaux mais vide de bruits naturels (à l'exception des martinets et des hirondelles le soir). À comparer avec le point 20.
- *Mesures acoustiques* — Leq 49 dB(A). Lmax 70 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 48.

Point 17

- *Description des productions sonores locales* — Les immeubles exposés côté rue bénéficient d'un environnement sonore communicant (passages piéton, passages voiture sur chaussée pavée). Le fragment sonore pourrait être intitulé « Musique et chaussée pavée ».
- *Mesures acoustiques* — Leq 53 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 29.

Point 18

- *Description des productions sonores locales* — Espace sonore communicant. Par rapport au quai A. Rhuys, les formes urbaines créent une succession de filtres acoustiques qui exposent les façades sur rue à un drone tranquille et structuré de mouvements, accompagné de quelques bruits naturels.
- *Mesures acoustiques* — Leq 53 dB(A). Lmax 72 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 07.

Point 19

- *Description des productions sonores locales* — Espace sonore saturé et bruyant. Les formes urbaines sont larges et, contrairement au point 18, elles ne filtrent en rien le bruit routier local. Il n'y a aucune pause dans le bruit.
- *Mesures acoustiques* — Leq 70 dB(A). Lmax 84 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 35.

Point 20

- *Description des productions sonores locales* — Cet espace sonore communicant aux émergences acoustiques ténues est une particularité architecturale : le centre de la cour accueille des logements individuels en bande ayant des petits jardins fermés. À comparer avec le point 16 pour l'ambiance phonique. La bande sonore est très valorisante. Le plus souvent, dans ce lieu, les émergences sonores sont rares.
- *Mesures acoustiques* — Leq 45 dB(A). Lmax 72 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 34.

Point 21

- *Description des productions sonores locales* — Espace sonore bruyant et anonyme. Les façades des logements Place Mangin sont exposées à un bruit routier continu qui possède de grandes amplitudes acoustiques selon les passages des tramways (- 4 dB(A)) quand ceux-ci coupent la circulation des voitures et des camions. À comparer avec le point 1.
- *Mesures acoustiques* — Leq 64 dB(A). Lmax 78 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 26.

Point 22

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposées côté rue sur un environnement sonore saturé (une dominante de bruits routiers sans pause). À comparer avec le point 7.

- *Mesures acoustiques* — Leq 69 dB(A). Lmax 86 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 27.

Point 23

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposées côté rue sur un environnement sonore saturé et fatigant (une dominante de bruits routiers sans pause.) À comparer avec le point 7.
- *Mesures acoustiques* — Leq 70 dB(A). Lmax 83 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 35.

Point 24

- *Description des productions sonores locales* — Façades exposées sur une rue calme (une longue cour allongée) possédant un atelier de réparation automobile et des garages. Espace sonore communiquant ayant une grande clarté acoustique (détachement des sons). Passages très audibles des habitants et des mouvements de portes. Lieu en connexion sonore avec le viaduc SNCF et le boulevard adjacent.
- *Mesures acoustiques* — Leq 54 dB(A). Lmax 70 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 20.

Point 25

- *Description des productions sonores locales* — Façades sur boulevard exposées à un environnement sonore saturé plus homogène que celui correspondant au point 4.
- *Mesures acoustiques* — Leq 69 dB(A). Lmax 97 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 26.

9.2.2 Les tours Vulcain

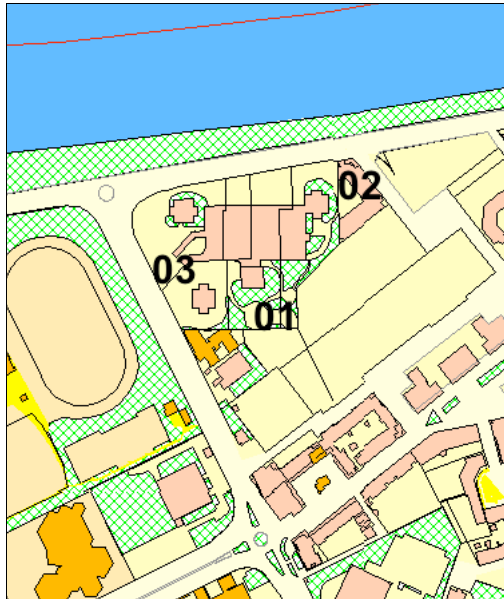


Figure 26. Points d'observation et de mesure, tours Vulcain

Point 01

- *Description des productions sonores locales* — Façades d'immeubles donnant sur un parc aménagé autour de bouleaux. L'espace sonore est silencieux et communicant, fortement marqué par les sons de la nature (vent dans les arbres) qui se mélangent avec la rumeur urbaine nantaise. Parfois, un habitant est audible depuis sa fenêtre (6ème étage) ou le parking. Il faut écouter le point 03 pour d'autres moments plus animés.
- *Mesures acoustiques* — Leq 49 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 39.

Point 02

- *Description des productions sonores locales* — Façade (18 étages) exposée au Nord-est qui capte la rumeur urbaine lointaine et la circulation routière et ferroviaire à ses pieds. Ce bruit de fond permanent permet aux sources des appartements d'émerger clairement (bruits domestiques audibles dans la bande sonore). Espace sonore plutôt anonyme.
- *Mesures acoustiques* — Leq 54 dB(A). Lmax 62 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 21.

Point 03

- *Description des productions sonores locales* — Façades des Tours Vulcain donnant sur le boulevard Alexandre Millerand et le Stade Michel Lecoindre. Expressions sonores remarquables du quartier : le silence naturel du site (cf. début de la bande son) est parfois bousculé par les pratiques sportives. Rythmé par le passage des voitures et des trains, le fond sonore (fréquences graves) présent sur le site peut parfois être le fond

sur lequel une sociabilité sonore s'exprime et communique. Espace sonore communicant.

- *Mesures acoustiques* — Leq 61 dB(A) pour la séquence avec appels dans le stade. Leq 50 dB(A) quand le stade n'est pas occupé. Lmax 77 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 4 minutes 30.

9.2.3 Le quartier Mangin

Le quartier Mangin est pauvre dans ses expressions sonores. Les axes de circulation qui le délimitent (boulevard Mangin, le pont Georges Clémenceau et sa continuité en Boulevard du Général De Gaulle, et la voie de chemin de fer) construisent l'environnement sonore plutôt « technologique » des lieux. Les façades d'immeubles, en fonction de leur orientation, sont donc plus ou moins exposées aux bruits de la circulation. L'ensemble du tissu est aussi largement baigné par les sons de la nature côté parc. Ce sont donc sons naturels et sons de la circulation d'un côté, et sons routiers de l'autre qui caractérisent l'écoute depuis le logement dans ce quartier, les sons liés aux activités sociales étant plutôt rares et rarement mis en valeur par le bâti.

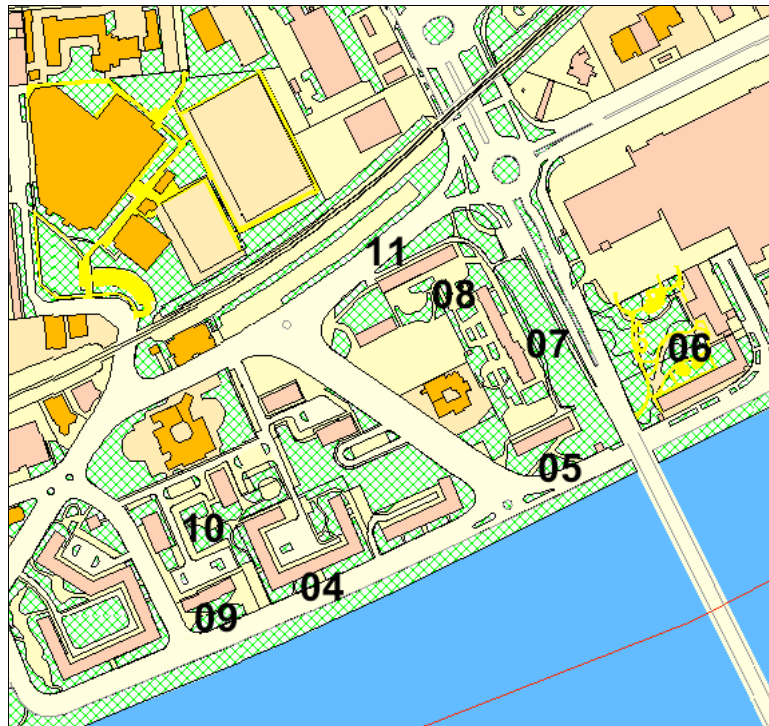


Figure 27. Points d'observation et de mesure, quartier Mangin

Point 04

- *Description des productions sonores locales* — Façades donnant sur le boulevard Georges Mandel. Environnement sonore anonyme et mécanique, quelques sons naturels se mélangeant au rythme de la circulation. La circulation du Pont Clémenceau est présente. Cependant

lorsqu'il n'y a pas de trafic (pauses acoustiques) les sons de la nature émergent facilement sur ce bruit de fond.

- *Mesures acoustiques* — Leq 61 dB(A) au 3ème étage, 55 dB(A) au RDC.
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 20. Prise de son réalisée sur le balcon d'un appartement au 3ème étage.

Point 05

- *Description des productions sonores locales* — Façades d'immeuble donnant sur le boulevard Georges Mandel exposées plein sud avec tous les balcons qui donnent principalement sur la circulation importante du Pont Clémenceau. Environnement sonore saturé, aucune source sonore liée aux activités sociales du quartier n'est facilement audible. Seuls, quelques sons s'échappent des halls d'entrée. Les espaces sont peu appropriés, mais ils sont parcourus régulièrement par les habitants du quartier qui les empruntent pour aller à la galerie commerçante.
- *Mesures acoustiques* — Leq 60 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 3 minutes 11.

Point 06

- *Description des productions sonores locales* — Façades d'immeubles donnant sur un petit parc peu approprié par ses habitants. L'environnement sonore anonyme reste exposé à la circulation du boulevard Général De Gaulle (fréquences graves.) malgré les buttes en terre.
- *Mesures acoustiques* — Leq 51 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 14.

Point 07

- *Description des productions sonores locales* — Façade donnant sur le boulevard Général De Gaulle. Environnement sonore saturé par les bruits de la circulation. Les appartements de ces immeubles donnent sur un balcon qu'une grande majorité des propriétaires a transformé en cellier fermé ou en véranda. Trois séquences sonores illustrent les possibilités de la modulation sonore de la façade côté boulevard (5ème étage) : le début révèle l'écoute quand les fenêtres de la véranda sont ouvertes, puis fenêtres de la véranda fermées, puis à l'intérieur de la cuisine (on entend le balancement électrique de l'horloge). Les habitants indiquent qu'ils entendent bien les bruits internes (téléphones et chasses d'eau).
- *Mesures acoustiques* — Leq 64 dB(A) au sommet de la butte donnant sur le boulevard, 58 dB(A) fenêtres de la véranda ouvertes (5ème étage), 47 dB(A) fenêtres de la véranda fermées, 47 dB(A) dans la cuisine.
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 21.

Point 08

- *Description des productions sonores locales* — Ecoute côté parc (prise de son au sol). Espace sonore anonyme dominé par le fond sonore routier. Le tissu lâche des barres d'habitations ne protège que très partiellement le cœur d'îlot où donnent les façades. Le passage des habitants sur le sol en gravier rappelle que cet espace est parfois réapproprié. Un groupe

scolaire anime aussi les rythmes sonores monotones de ce lieux (à comparer avec le point 07 précédent).

- *Mesures acoustiques* — Leq 49 dB(A) au RDC, Leq 55 dB(A) en façade au 5ème étage.
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 17.

Point 09

- *Description des productions sonores locales* — Façades d'immeubles en R+5 donnant sur le boulevard Georges Mandel. Les passages irréguliers de voitures et camions à vitesse lente viennent masquer un environnement sonore naturel (chants d'oiseaux et son du vent dans les arbres). Au loin, on entend la rumeur du pont routier Clemenceau. Peu d'activités sociales sur les trottoirs. La nuit, des habitants nous ont dit qu'ils dormaient fenêtres ouvertes. L'heure de réveil sonore du boulevard est à 6 heures le matin. Le fragment sonore est enregistré au niveau RDC qui est situé en contrebas du boulevard (à comparer avec le point 04). L'ensemble reste cependant très anonyme.
- *Mesures acoustiques* — Leq 55 dB(A) à RDC. Au troisième étage Leq 61 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 19.

Point 10

- *Description des productions sonores locales* — Façades d'immeubles donnant côté cour sur le cœur d'un îlot relativement protégé des bruits de la circulation (à comparer avec le point 09 exposé sur le boulevard). Lieu approprié par les habitants (on les voit mais on ne les entend pas) et rythmés par le groupe scolaire à côté et la pêche à la petite anguille sur le bras de Pirmil la journée et en soirée. L'espace est pourtant réverbérant (cf. l'amplification de la présence du corbeau dans la bande son). Le bruit de fond de circulation reste cependant très présent. D'où un caractère acoustique local finalement peu communiquant.
- *Mesures acoustiques* — Leq au RDC 54 dB(A).
- *Durée de la bande sonore* — 2 minutes 18.

Point 11

- *Description des productions sonores locales* — Façade Nord (11ème étage) donnant sur la rue Anatole de Monzie et sur la voie ferrée. Environnement sonore anonyme dominé par la circulation. Espaces pas du tout réappropriés, écrasés sous la rumeur urbaine.
- *Mesures acoustiques* — Façade Nord : Leq 52 dB(A) fenêtres ouvertes, 38 dB(A) fenêtres fermées. Façade Sud : Leq 58 dB(A) fenêtres ouvertes, 40 dB(A) fenêtres fermées.
- *Durée de la bande sonore* — 1 minute 05. Prise de son au 11ème étage côté Nord, puis fermeture de la fenêtre.

Table des figures

Figure 1. Un support de médiation est nécessaire à la concertation et à la négociation	10
Figure 2. Les trois composantes d'ArcGIS Desktop	59
Figure 3. Interface ArcScene	60
Figure 4. Utilisation de points de contrôle sous ArcMap pour recaler une photographie aérienne sur un fond cadastral.....	62
Figure 5. Le module ArcPAD permet de saisir des données in situ au moyen d'un assistant personnel.....	63
Figure 6. Organisation générale du système	64
Figure 7. Les primitives architecturales utilisées pour la description d'un bâtiment	65
Figure 8. Bâtiment décomposé en primitives architecturales.....	66
Figure 9. Relation de composition entre les différentes classes de primitives architecturales ().....	67
Figure 10. Couplage modèle architectural - modèle géométrique	70
Figure 11. Exemple d'importation dans le SIG de données issues de modeleurs géométriques 3D (une partie du centre de Nantes).	73
Figure 12. L'interface SIG_CERMA_IHM intégrée dans ArcScene	74
Figure 13. La reconstruction 3D des enveloppes construites s'effectue à partir de leur emprise cadastrale et d'un ensemble d'informations collectées in situ.....	77
Figure 14. Illustration du processus de reconstruction 3D : les entités (bâtiments, niveaux, parois) sont créées dans la base de données et dans les fichiers de formes.....	78
Figure 15. Intégration de données de simulation solaire par textures de simulation ou par valeurs numériques.....	81

Figure 16. Exemple d'une requête attributaire : sélection de l'ensemble des parois exposées au soleil plus de 2 heures en hiver et moins de 6 heures en été.....	82
Figure 17. Simulation des champs de vitesse autour d'un ensemble d'immeubles (en bas) et pressions dynamiques sur les parois en 3D (en haut).....	84
Figure 18. Nomenclature des dépenses énergétiques de X-DCL.	86
Figure 19. Exemple d'analyse de la répercussion du comportement sur les dépenses énergétiques.....	86
Figure 20. Exemple de fiche d'identité sonore (page web) accessible depuis le SIG.	89
Figure 21. Intégration de fonctions de calcul d'intervisibilité 3D dans la suite ArcGIS	90
Figure 22. Carte de l'île de Nantes	96
Figure 23. Quelques constructions représentatives du secteur	98
Figure 24. Les 3 quartiers étudiés	111
Figure 25. Points d'observation et de mesure, quartier République.....	113
Figure 26. Points d'observation et de mesure, tours Vulcain	120
Figure 27. Points d'observation et de mesure, quartier Mangin	121