

## ETAT DE L'ART DES INDICATEURS ET DES OUTILS DE CALCUL DE CONSOMMATION ENERGETIQUE ET DE GAZ A EFFET DE SERRE - DE L'ECHELLE DU QUARTIER A CELLE DE L'AGGLOMERATION

Synthèse des travaux et identification de pistes de recherche à approfondir

14 novembre 2011

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par : BURGEAP (coordination), ICE, EGIS, CSTB, EIVP, et LVMT.

AULAGNIER Simon (BURGEAP), BOURDIC Loeiz (CSTB), COHEN Martin (ICE), POUTREL Séverin (ICE et BURGEAP), COLOMBERT Morgane (EIVP), CÔME Jean-Marie (BURGEAP), DRIS HAMED Insaf (BURGEAP), GASSER Béatrice (EGIS), JARRIN Thibaut (EIVP), LESPINGAL Olivier (EGIS), LATERRASSE Jean (LVMT), NOWACKI Caroline (CSTB), SAGLIO Antoine (LVMT), SALAT Serge (CSTB), ZERGUINI Seghir (LVMT).

Coordination technique : M. Taillant, Service Transport et mobilité – ADEME (Valbonne).



#### L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, et du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la prévention des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

## Avant propos

Le présent rapport synthétise les résultats issus du projet « Etat de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de GES - De l'échelle du quartier à celle de l'agglomération » co-financé par l'ADEME. Ce projet a été coordonné par BURGEAP et mené en partenariat avec ICE, EGIS, le CSTB, l'EIVP et le LVMT.

Cette synthèse du projet est accompagnée de plusieurs livrables :

- un rapport de tâche 1 (chapitre 1) : recensement et analyse critique des indicateurs de consommation énergétique et de GES ;
- un rapport de tâche 2 (chapitre 2) : recensement et analyse critique des outils de calcul ;
- un rapport de tâche 4 (chapitre 3) : articulation des indicateurs et des outils énergie/GES avec les autres démarches françaises existantes ;
- un rapport de tâche 5 (chapitre 4) : identification des pistes de recherche à approfondir ;
- trois bases de données accompagnées d'une notice d'utilisation (tâche 4) : une sur les indicateurs, une sur les outils de calcul et une sur les données et bases de données disponibles.

## Résumé

Ce projet a pour objet la réalisation d'un état de l'art des indicateurs et outils de consommation énergétique et d'émission de GES (gaz à effet de serre), de l'échelle du quartier à celle de l'agglomération. Une attention particulière a été portée sur la manière dont ces éléments permettent d'appréhender la ville en tant que système complexe (en particulier, un focus sur la prise en compte des interactions du type usage du sol / transport a été réalisé). Au-delà de l'analyse critique d'indicateurs et d'outils de calcul, le projet s'est également attaché à préciser les principales difficultés associées à leur mise en œuvre et à identifier des pistes de recherche dans ce champ thématique.

Le recensement et l'analyse critique des indicateurs de consommation énergétique et de GES se sont appuyés sur un tour d'horizon et un examen des initiatives internationales, nationales et locales de constitution de systèmes ou de référentiels d'indicateurs, émanant à la fois d'acteurs académiques, d'institutionnels ou de collectivités territoriales. L'usage concret des indicateurs a été questionné, tout comme les modalités de leur mise en œuvre et les verrous ou facteurs clés de succès des démarches engagées. La conclusion commune qui se dégage de l'ensemble des approches étudiées est la profusion des indicateurs existants, leur faible hiérarchisation ainsi que leur difficulté à représenter des phénomènes complexes ou des phénomènes semblant sortir du champ d'action de la collectivité.

Parallèlement, un recensement (partiel) et une analyse critique des outils de calcul ont été effectués. Le grand nombre de modèles développés est justifié par la nécessité de modéliser tout ou partie des interactions urbaines et de l'écosystème urbain à différentes échelles, l'objectif étant de répondre au besoin de connaître l'incidence de tels ou tels choix de projet urbain ou de projet de territoire. La diversité des modèles développés est représentative des différents points de vue, angles d'analyse possibles pour décrire un aspect du fonctionnement d'une ville ou d'un morceau de territoire. Les objets, les échelles, les relations observées, et/ou les paradigmes changent, ne permettant pas de sélectionner le meilleur modèle, ceci dépendant de l'objectif visé. Chaque outil vient ainsi répondre à une question spécifique : congestion, part modale, impact des infrastructures sur l'affectation des sols, etc. pour ne citer que des exemples dans le domaine du transport et de l'usage des sols. En ce qui concerne les outils technico-économiques sectoriels, il ressort de l'analyse deux principaux types d'outils : les outils « exhaustifs » et les outils « simplifiés ». S'ils permettent de modéliser précisément l'état des lieux énergie-GES d'un secteur et les impacts de mesures sectorielles de politiques énergétiques, les outils technico-économiques analysés ne sont actuellement pas capables de simuler les impacts multisectoriels d'une action.

La question de l'articulation des indicateurs et outils énergie/GES avec les autres démarches existantes a permis de mettre en évidence les efforts engagés au niveau national et européen dans le domaine de l'évaluation. En effet, avec la loi SRU, la Directive européenne 2001/42/CE, la loi POPE, les lois Grenelle I et II et ses décrets d'application, les politiques d'urbanisation ont connu depuis dix ans des évolutions majeures visant à réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement et notamment l'axe énergie / réduction des émissions de GES. Dans le but de mesurer l'impact des projets d'aménagement sur le territoire, la loi portant Engagement National pour l'Environnement renforce l'obligation d'analyse des résultats de l'application des documents d'urbanisme (SCOT, PLU et PDU) et la nécessité de réaliser des évaluations environnementales durant tout le processus (ex-ante, in-itinere, ex-post) d'élaboration et de mise en œuvre des politiques d'urbanisation. De fait, la démarche d'évaluation environnementale nécessite de s'appuyer, dès la phase de diagnostic, sur des indicateurs pertinents qui permettent de suivre dans le temps l'évolution des enjeux environnementaux, sociaux et économiques sur le territoire et d'apprécier l'application des documents d'urbanisme.

Ces différentes analyses ont donné lieu à une réflexion critique sur les différents verrous auxquels sont confrontées les politiques urbaines d'efficacité énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique. A partir de ces analyses et d'interviews d'experts, des axes de recherche opérationnelle ont été identifiés sur des champs thématiques très larges, associés à des enjeux conceptuels (complexité urbaine, appréhension du comportement des consommateurs, appréhension du long terme), méthodologiques (gestion des échelles, prise en compte du contexte local, analyse croisée GES/ autres thématiques environnementales, problématique des données) et de gouvernance (difficultés organisationnelles dans des projets multi-acteurs, intégration des réflexions énergie/climat aux documents d'urbanisme, organisation d'un changement de paradigme).

**Mots clés :** Indicateurs, référentiels, modèles, outils, consommation énergétique, gaz à effet de serre, complexité urbaine.

## Sommaire

<b>AVANT PROPOS</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>1. PREMIERE PARTIE : RECENSEMENT ET ANALYSE CRITIQUE DES INDICATEURS DE CONSOMMATION ENERGETIQUE ET DE GES</b> .....	<b>9</b>
1.1. APPROCHE ACADEMIQUE : LA RECHERCHE SUR LE DEVELOPPEMENT ET L'USAGE D'INDICATEURS TERRITORIAUX.....	9
1.1.1. <i>Indicateurs, évaluation et développement durable</i> .....	9
1.1.2. <i>Un référentiel unique ?</i> .....	10
1.2. CADRES ET REFERENTIELS NATIONAUX ET INTERNATIONAUX.....	11
1.2.1. <i>Cadres nationaux</i> .....	11
1.2.2. <i>Les cadres internationaux : Japon, Etats-Unis et Europe.</i> .....	15
1.2.3. <i>En France comme à l'international : des approches des consommations énergétiques et des émissions de GES multiples et souvent incomplètes</i> .....	16
1.2.4. <i>... et une utilisation pratique qui reste limitée</i> .....	17
1.3. PRATIQUE DES COLLECTIVITES TERRITORIALES .....	17
1.3.1. <i>L'appréhension des indicateurs</i> .....	17
1.3.2. <i>Des verrous multiples</i> .....	18
1.3.3. <i>Quelques facteurs clés de succès</i> .....	18
1.4. CREATION D'UNE BASE DE DONNEES D'INDICATEURS DE CONSOMMATION ENERGETIQUE ET DE GES.....	19
1.5. CREATION D'UNE BASE DE DONNEES DES SOURCES DE DONNEES .....	20
1.6. CONCLUSION .....	20
<b>2. DEUXIEME PARTIE : RECENSEMENT ET ANALYSE CRITIQUE DES OUTILS DE CALCUL</b> .....	<b>24</b>
2.1. OUTILS TRAITANT DU CADRE BATI ET DE LA FORME URBAINE .....	24
2.1.1. <i>Construction d'une typologie de modèles</i> .....	25
2.1.2. <i>Les modèles de type multi-agents comportemental</i> .....	25
2.1.3. <i>Modèles énergie-environnement</i> .....	26
2.1.4. <i>Modèles économiques</i> .....	28
2.1.5. <i>Modèles morphologiques</i> .....	29
2.2. OUTILS TRAITANT DU TRANSPORT ET MODELES LUTI ( <i>LAND USE TRANSPORT INTERACTION</i> ) .....	30
2.2.1. <i>Les modèles géographiques</i> .....	30
2.2.2. <i>Les modèles transports d'inspiration socio-économique</i> .....	31
2.2.3. <i>Les modèles d'inspiration géographique intégrant les comportements</i> .....	31
2.2.4. <i>Les modèles LUTI</i> .....	31
2.3. OUTILS TECHNICO-ECONOMIQUES SECTORIELS.....	33
2.3.1. <i>Modèles « Détaillés »</i> .....	33
2.3.2. <i>Modèles « simplifiés »</i> .....	34
2.3.3. <i>Limites</i> .....	34
2.4. BASE DE DONNEES OUTILS .....	35
2.5. CONCLUSION .....	35
<b>3. TROISIEME PARTIE : ARTICULATION DES INDICATEURS ET OUTILS ENERGIE/GES AVEC LES AUTRES DEMARCHES FRANÇAISES EXISTANTES</b> .....	<b>39</b>
3.2. RETOURS D'EXPERIENCE .....	40
3.3. L'EMERGENCE D'UNE BASE COMMUNE D'INDICATEURS.....	42
3.4. DES EVOLUTIONS DEJA EN COURS .....	42
<b>4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>47</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1: Référentiels nationaux (en noir) et internationaux (en bleu) analysés .....	11
Tableau 2 : Ensemble des démarches et référentiels d'indicateurs étudiés dans le cadre de l'étude « Etat de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de gaz à effet de serre ». .....	21
Tableau 3: Outils de calcul des consommations énergétiques et émissions de GES analysés .....	24
Tableau 4 : Typologie des modèles traitant du cadre bâti et de la forme urbaine.....	25
Tableau 5 : Types de modèles des outils technico-économiques analysés dans le cadre du projet « état de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de gaz à effet de serre » .....	33
Tableau 6 : Outils étudiés dans le cadre du projet « état de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de gaz à effet de serre ».....	36

## Listes des figures

Figure 1 : Rapport de compatibilité entre les documents de planification, © CERTU .....	40
Figure 2 : Proposition de dix axes de recherche .....	45

## Introduction

D'après le dernier rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts pour l'étude du Climat) datant de 2007, la température moyenne du globe devrait augmenter d'ici la fin du siècle de 1,5 à 6 °C. Les données d'observation recueillies sur tous les continents et dans la plupart des océans permettent également de confirmer que beaucoup de systèmes naturels subissent déjà les effets des changements climatiques régionaux, et plus particulièrement des hausses de température. Les futurs changements climatiques vont en grande partie dépendre des évolutions en terme d'émission de gaz à effet de serre (GES) et donc des politiques énergétiques, plus ou moins drastiques, mises en œuvre dans les pays les plus consommateurs d'énergie fossile.

Si les gouvernements peinent à s'entendre sur un nouvel accord mondial de réduction des émissions de GES censé prendre la suite du protocole de Kyoto qui prend fin en 2012, l'Europe, la France et les collectivités s'engagent dès aujourd'hui dans différentes actions de réduction.

Le conseil européen a adopté en fin 2008 son paquet énergie-climat dont les objectifs principaux sont, d'ici 2020, d'augmenter de 20% l'efficacité énergétique, de réduire de 20% les émissions de GES et d'atteindre une proportion de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de l'UE. La France a pour sa part lancé, dès 2007, le Grenelle de l'environnement, processus de concertation au sein duquel les enjeux de maîtrise de l'énergie sont très présents.

Par ailleurs, en 2008, pour la première fois au cours de l'humanité, la majorité de la population est devenue urbaine. En 1950, seule 29% de la population mondiale vivait en ville et 37,2% en 1975. En raison de la forte urbanisation des pays du Sud, cette croissance rapide est amenée à se poursuivre (ONU Habitat, 2010). L'ONU-Habitat estime que les villes sont aujourd'hui responsables de 75% des consommations mondiales d'énergie.

Les villes doivent ainsi faire face à deux défis majeurs : l'épuisement des ressources naturelles et le changement climatique. Les problématiques peuvent cependant être différentes selon le niveau de développement des pays. Pour les pays du Sud, il s'agit en priorité d'adapter les infrastructures urbaines à la rapide augmentation de population dans les villes, gérer les ressources naturelles, garantir aux populations des conditions d'habitations salubres et sûres, et s'adapter au changement climatique. Pour les pays développés, il s'agit d'abord de limiter l'étalement urbain, favoriser les modes de déplacement doux, assurer la mixité sociale et fonctionnelle du territoire, ou encore réduire les consommations énergétiques et émissions de gaz à effet de serre (Chaléard, Pourtier, 2000).

Ces considérations placent la ville au cœur des enjeux du développement durable, défini comme un « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Depuis la parution du rapport « Notre avenir à tous » de la Commission des Nations Unies sur l'environnement et le développement en 1987 (Rapport Brundtland), le développement durable s'est imposé dans l'agenda politique mondial. A tous niveaux, gouvernements et collectivités ont appris à modifier leurs pratiques afin d'être en accord avec ce principe, qui a désormais en France valeur constitutionnelle depuis l'intégration en 2005 de la Charte de l'environnement au sein de la constitution française. En 1992, la conférence de Rio a donné un cadre aux politiques urbaines de développement durable. La nécessité de disposer d'indicateurs de développement durable a également été formulée.

Afin de satisfaire à ces grands principes énoncés à l'échelle planétaire, les collectivités locales et les aménageurs sont confrontés à un besoin croissant d'outils d'aide à la décision et nous avons assisté à une production abondante de tels outils au cours des deux dernières décennies. Il subsiste toutefois des insuffisances tant dans les outils que dans les méthodes actuellement employées qui rendent difficiles la mise en œuvre opérationnelle de ces outils.

Il y a donc une nécessité d'approfondir la recherche dans une démarche opérationnelle. C'est ce que s'est proposé de faire le projet « Etat de l'art des indicateurs et outils de calcul de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre (GES) – De l'échelle du quartier à celle de l'agglomération ». Deux directions ont été privilégiées par le projet : les indicateurs urbains de consommation énergétique et d'émissions de GES et les outils de calcul qui y sont parfois associés et permettant notamment de prendre en compte l'interaction usage du sol / transport et l'impact environnemental du cadre bâti.

Si le projet est focalisé sur les volets énergie et GES, du fait de leurs forts enjeux, ces questions ne sont pas dissociables des autres volets du développement durable comme nous le verrons.

Ce présent rapport synthétise les résultats scientifiques du projet. Il comprend quatre parties :

- Un recensement et une analyse critique des initiatives internationales, nationales et locales de constitution de systèmes ou de référentiels d'indicateurs ;
- Un recensement (partiel) et une analyse critique des outils de calcul permettant de quantifier les consommations énergétiques et les émissions de GES ;
- Une analyse de l'articulation des indicateurs et outils énergie/GES avec les autres démarches existantes, en France ;
- Une conclusion et des propositions de pistes de recherche.

## **1. Première partie : Recensement et analyse critique des indicateurs de consommation énergétique et de GES**

Cette première partie propose un tour d'horizon et une analyse critique des initiatives internationales, nationales et locales de constitution de systèmes ou de référentiels d'indicateurs. Une analyse de l'appréhension et de la pratique des collectivités française, s'appuyant sur une série d'entretiens avec les techniciens d'une dizaine de collectivités, est également proposée (chapitre 1.3). L'usage opérationnelle des indicateurs y est questionné, tout comme les modalités de leur mise en œuvre et les verrous ou facteurs clés de succès des démarches engagées.

Cette première partie est structurée en cinq temps :

- Approche académique : la recherche sur le développement et l'usage d'indicateurs territoriaux
- Cadres et référentiels nationaux et internationaux
- Pratique des collectivités territoriales
- Création d'une base de données d'indicateurs de consommation énergétique et de GES
- Création d'une base de données des sources de données

### **1.1. Approche académique et institutionnelle : la recherche sur le développement et l'usage d'indicateurs territoriaux**

Notre étude s'est intéressée aux indicateurs territoriaux en lien avec l'énergie, cependant le développement de ces indicateurs étant intimement lié de façon plus générale au développement durable, les premiers éléments présentés ici ne se focalisent pas sur les indicateurs de consommation énergétique et de GES.

#### **1.1.1. Indicateurs, évaluation et développement durable**

Le développement durable est indissociable de la notion d'évaluation ; ceci vient de la définition même du développement durable qui interroge en permanence les conséquences de l'action : pour le territoire, les générations futures, etc. Anticiper les conséquences de l'action pour mieux les maîtriser implique ainsi un besoin d'évaluation (Theys, 2006).

Les collectivités ont aujourd'hui un besoin d'outils pour évaluer les politiques de développement durable qu'elles mettent en place. Les travaux d'évaluation se font souvent « ex-ante », comme diagnostic préalable à l'élaboration d'un Agenda 21, d'un plan climat territorial ou de la révision d'un plan local d'urbanisme. Il existe actuellement peu de méthodes et d'outils pour permettre le suivi des actions après réalisation (Theys, 2006).

La complexité du système ville est telle qu'il paraît difficile de définir une solution optimale à un problème posé. Ce constat est particulièrement vrai quand il s'agit d'évaluer le développement durable qui est un concept fortement transversal. Les outils d'évaluation s'orientent donc beaucoup vers des outils d'aide multicritères à la décision. Ce type d'outil est en effet adapté aux systèmes ne présentant pas de solution optimale mais une multitude de facteurs, parfois contradictoires, à prendre en compte. De ce fait, le modèle PSR (Pression – Etat – Réponse) adopté par l'OCDE est critiqué car il ne permettrait pas de prendre en compte la nature systémique et dynamique des processus et leur appartenance à un système plus vaste contenant de multiples boucles de rétroaction.

La littérature relève par ailleurs différents niveaux d'indicateurs correspondant à des niveaux de transformation des données plus ou moins élaborés : de la donnée brute à la constitution d'indices ou indicateurs synthétiques obtenus par agrégations successives (exemples : l'indice de développement humain, le bilan carbone, etc.). La construction d'un indice repose sur une méthode de calcul ou une pondération des indicateurs dont il est issu.

Il apparaît que plus les données sont traitées et agrégées, plus leur communication est facile et donc destinée à un public large ou à des niveaux de pilotage stratégique.

Aujourd'hui, dans la pratique, les outils les plus largement diffusés auprès des collectivités sont des outils de questionnement et d'analyse du développement durable telles que la grille RST02 développée par le

Réseau Scientifique et Technique, les grilles thématiques de l'Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU) développées par l'ADEME, ou encore les grilles d'évaluation des Agendas 21 et des projets territoriaux développées par le CGDD. Ces grilles, en forme de check-list des points à prendre en considération, ne permettent cependant pas de traduire quantitativement le respect ou non respect des principes du développement durable. A l'inverse, certains indicateurs et grilles d'indicateurs permettent une approche plus quantitative. Par exemple, les indicateurs territoriaux de développement durable (ITDD) se présentent sous la forme de référentiels d'indicateurs ou d'indicateurs synthétiques.

### 1.1.2. Un référentiel unique ?

Différents travaux de recherche ont tenté de proposer des référentiels consensuels et standardisés d'indicateurs territoriaux de développement durable (Exemples : le programme de recherche européen « *European Common Indicators, towards a local sustainability profile* » ; le programme de recherche européen TISSUE – « *Trends and Indicators for monitoring the EU Thematic Strategy on Sustainable Development of Urban Environment* » ; l'étude « *Measuring the sustainability of cities : a survey-based analysis of the use of local indicators* »).

Cependant, l'étude des principaux référentiels d'ITDD montre que le consensus est faible quant au choix du nombre et de la nature des indicateurs. Ce manque de consensus peut s'expliquer par les fortes disparités entre les territoires considérés, les acteurs concernés et les échelles d'application. En effet, à un territoire, un acteur et une échelle d'observation donnés correspondent des enjeux très différents qui doivent être pris en compte par le référentiel utilisé. Ce point sera plus largement développé dans le cadre de la troisième partie sur l'articulation des indicateurs et outils énergie/GES avec les autres démarches existantes.

D'autres projets, comme le projet européen de recherche *Promoting Action Through Indicators at the Local Level in Europe* (PASTILLE, 2002), soulignent ainsi les vertus de la phase d'élaboration du référentiel dans la constitution d'une culture commune et d'une appropriation commune de la complexité d'un territoire. L'implication des acteurs dans la construction d'un référentiel qu'ils comprennent semble constituer l'un des facteurs clés de succès de la démarche. Ces analyses interrogent ainsi fortement la pertinence de la construction d'un cadre unique d'indicateurs.

Ainsi la construction du référentiel par les différents acteurs concernés par le processus d'évaluation apparaît comme une étape essentielle. Il e semble pour autant pas souhaitable de voir se développer une multitude de référentiels différents pour chaque situation. En effet, cette alternative ne permet pas une comparaison simple des territoires et, de plus, peut engendrer un manque de rigueur scientifique pour certaines approches.

Les travaux récents s'orientent donc vers la création d'une base d'indicateurs susceptible d'adopter une géométrie variable en fonction des spécificités de chaque situation. Cette démarche correspond à un équilibre entre la nécessité de disposer d'un outil scientifiquement valide et comparable et celle d'engager les parties prenantes dans le processus de construction d'un référentiel adapté au contexte local. Plusieurs travaux témoignent ainsi de cette tendance : les « indicateurs centraux pour le développement durable des villes et des cantons » développés par l'Office fédéral du développement territorial Suisse (2005) pour harmoniser les différentes démarches entreprises en Suisse ; le référentiel d'indicateurs du MEEDDAT (2009) qui stipule que « Le référentiel vise à mettre à leur disposition un cadre commun pour définir et mettre en œuvre un dispositif pérenne d'évaluation [...] » ou encore que « [ ... ] il permet aux collectivités et territoires de construire leur propre système d'évaluation, adapté aux spécificités de leur organisation territoriale et aux enjeux locaux de leur territoire. » (Commissariat général au développement durable, Mars 2009) ; les 73 indicateurs du réseau *Référentiel d'évaluation et de suivi des politiques environnementales des collectivités territoriales* (RESPECT), coordonné par le Centre national de formation de la fonction publique territoriale (CNFPT) ; le cadre de référence des villes durables Européennes élaboré dans le cadre de groupes de travail associant les 27 pays de l'UE plus la Suisse et la Turquie (RFSC – Reference Framework for European Sustainable Cities) qui vise à donner aux collectivités les outils pour la mise en place de la Charte de Leipzig (mai 2007) et plus largement pour une évaluation DD de leurs politiques publiques correspond à un engagement européen de la France (Déclaration de Marseille en novembre 2008) ; etc.

## 1.2. Cadres et référentiels nationaux et internationaux

Le projet a permis de constituer un état de l'art des référentiels nationaux et internationaux (Japon, Etats-Unis, Europe) disponibles, qui ne vise pas l'exhaustivité mais présente un recensement permettant de mettre en lumière le nombre élevé de démarches proposées et susceptibles d'être mises en œuvre.

Que ce soit à l'échelle de la ville où à celle du quartier, deux types de référentiels principaux sont mis en évidence (tableau 1) :

- les outils de notations environnementales, délivrant une certification ou un label, grâce à l'évaluation d'un tiers ;
- les démarches proposant une réflexion sur les projets, un accompagnement, plus qu'une notation.

On note cependant, pour ces deux démarches, un réel déséquilibre entre l'échelle de la ville et celle du quartier : en effet, si les référentiels, les démarches ou les systèmes d'évaluation se multiplient à l'échelle du quartier et du projet d'aménagement, l'échelle de la ville, peut-être parce qu'elle est plus complexe à aborder et que le besoin est plus récent (évaluation des PLU par exemple), ne dispose que de peu de documents cadre.

**Tableau 1: Référentiels nationaux (en noir) et internationaux (en bleu) analysés**

	Notation environnementale	Démarches de réflexion et de questionnement
Echelle quartier	HQE <sup>2</sup> R Norme ISO AFNOR « quartier d'affaire durable » CASBEE UD LEED Neighborhood BREEAM Communities DGNB	Grille RST02 AEU Démarche HQE aménagement Référentiel du MEEDDM 2012 Carnet de bord du développement durable @d-aménagement durable Démarche des éco-maires
Echelle agglomération	Cit'ergie CASBEE City STAR Community Index	Référentiel national d'évaluation des projets territoriaux Indicateurs RESPECT Profil environnemental territorial Modèle « ville durable » de l'Agence Ecologia Urbana de Barcelone

### 1.2.1. Cadres nationaux

**A l'échelle de la ville**, le benchmark national réalisé met en évidence un outil principal de notation environnementale : le label **Cit'ergie**.

Le label **Cit'ergie** (<http://www.citergie.ademe.fr/>), version française du label EEA (**European Energy Award**) spécifiquement développé sur le champ des consommations énergétiques, dispose d'une bonne notoriété auprès des collectivités territoriales et permet un travail par services très efficace. Certains secteurs n'y sont cependant que partiellement traités (développement économique, rénovation urbaine). Le processus de labellisation s'exécute en quatre étapes. En premier, est réalisé un état de lieux. L'évaluation est faite à partir d'une grille d'indicateurs standardisée au niveau européen et composée de 87 actions dans six domaines qui concernent les compétences de la collectivité (développement territorial ; patrimoine de la collectivité ; approvisionnement énergie, eau et assainissement ; mobilité ; organisation interne ; et communication et coopération). A chaque action de chaque domaine correspond un nombre maximum de points. La grille est composée d'indicateurs obligatoires ou non obligatoires à remplir par la collectivité. Ensuite est validé un programme de politique énergétique. Puis un audit externe est réalisé. Trois niveaux de performance sont possibles : Label eea® Gold pour plus de 75% du potentiel mis en œuvre ; label Cit'ergie pour plus de 50% du potentiel mis en œuvre ; et reconnaissance CAP Cit'ergie pour moins de 50% du potentiel mis en œuvre. Ensuite, un ré-audit est réalisé tous les quatre ans. Les premières collectivités françaises labellisées Cit'ergie en 2007 sont au nombre de quatre : les villes de Besançon, d'Echirolles, et de Montméliant et la Communauté d'agglomération Grenoble Alpes Métropole (première intercommunalité européenne labellisée). En 2011, deux collectivités ont été labellisées : les villes de Nantes et de Rennes.

A ce label, spécifiquement centré sur la question énergétique et climatique, s'ajoute la présence d'approches non normatives à visée environnementale plus large, comme la méthodologie de diagnostic territorial développé par l'association R.E.S.P.E.C.T., ou encore le profil environnemental territorial développé par la DIREN, la Délégation Régionale de l'ADEME et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais (<http://www.cerdd.org>). La question énergétique constitue alors un objet parmi de nombreux autres et les indicateurs associés sont généralement généraux et peu fouillés.

La méthodologie de **diagnostic territorial développé par l'association R.E.S.P.E.C.T.** s'appuie sur un système d'indicateurs de référence comprenant 73 indicateurs regroupés en dix catégories (air, bruit, cadre de vie, déchets, déplacements, eau, énergie, risques, sol et sous-sol, et engagement mutuel pour l'environnement). Sur ces 73 indicateurs, un peu plus d'un quart est en relation avec les questions d'énergie et de GES (ceux bien sur des catégories énergie et déplacements, mais également certains des catégories air, cadre bâti, déchets). Les indicateurs de la catégorie engagement mutuel pour l'environnement concernent également l'énergie et les GES puisqu'il s'agit d'indicateurs sur les actions de sensibilisation, de communication.

Mis au point par la DIREN, la Délégation Régionale de l'ADEME et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais, le **profil environnemental territorial** a été créé spécifiquement à l'attention des chefs de projet de territoire (Agglomérations, Pays, Parcs Naturels Régionaux) pour les aider à intégrer l'environnement dans l'élaboration du projet de territoire et la mise en œuvre d'un programme d'actions. Bien plus qu'une simple description de l'état de l'environnement du territoire considéré, le profil environnemental territorial cherche à faire émerger et à hiérarchiser les enjeux environnementaux majeurs pour le territoire. Il permet ainsi d'aboutir à des orientations stratégiques en vue d'intégrer l'environnement dans le développement du territoire, de définir des objectifs précis et des actions concrètes à mettre en œuvre, et d'esquisser des indicateurs environnementaux de suivi et d'évaluation. Le champ de l'étude du profil environnemental territorial porte plus spécifiquement sur trois grands enjeux communs à l'échelle locale et régionale : 1/ le maintien et le développement du patrimoine naturel régional (préservation des milieux naturels, qualité des paysages : trame bleue, trame verte...); 2/ la gestion des eaux et la préservation des ressources naturelles (préservation des milieux aquatiques, maîtrise des risques d'inondations, gestion et valorisation des eaux pluviales ...); 3/ le changement climatique (utilisation rationnelle de l'énergie, développement des ressources énergétiques locales, maîtrise de la mobilité). Les enjeux autour de l'énergie et de la réduction des émissions de GES sont ainsi un élément fort de ce profil.

**A l'échelle du quartier**, parmi la dizaine de démarches n'ayant pas de visée de certification, on peut distinguer les simples « grilles d'indicateurs » (comme la grille RST02) des démarches plus complètes proposant un accompagnement tout au long du projet (comme par exemple la démarche HQE Aménagement). La majorité de ces approches sont issues de réflexions d'organismes publics ou parapublics (DIREN, ADEME, MEEDDM, DREIF, etc.).

**La grille RST02** est issue d'un travail de réflexion mené dès 2001 par le réseau scientifique et technique (RST) du ministère de l'Équipement associant la mission aménagement durable placée auprès de la Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction (DGHUC), la Direction des routes, le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions (CERTU) et les centres d'études techniques de l'équipement (CETE). Seconde version d'une première grille (RST01), la grille RST02 est un canevas de travail, une check-list à passer en revue engageant l'utilisateur à se poser les bonnes questions pour trouver la voie du développement durable au sein d'un projet. Grâce aux différents modules et sorties graphiques développés sur le logiciel Excel, la grille RST02 offre un cadre de référence pour apprécier la performance économique, environnementale et sociale d'un projet. Elle s'appuie sur les 27 principes de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement. Elle est structurée sous forme de liste de 29 critères, eux-mêmes classés dans sept catégories (gouvernance et démocratie participative, dimension sociale, interface équitable, dimension économique, interface viable, dimension environnementale, et interface vivable). Chaque critère est apprécié à l'aide de questions et de recommandations générales. La problématique de l'énergie est abordée plus particulièrement au sein de la dimension environnement et du critère 'gestion économe des ressources naturelles' via la question « le projet est-il économe en énergie ? » (CERTU, 2006).

**L'Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU)** a été développée par l'ADEME pour permettre aux collectivités locales d'intégrer la dimension environnementale dans leurs opérations d'aménagement et leurs projets d'urbanisme. La démarche a été conçue pour permettre l'identification des enjeux avant la conceptualisation des projets urbains. En pratique, autant la méthode que le financement ont permis d'entériner l'importance d'une réflexion amont sur les enjeux environnementaux. L'AEU consacre donc la

nécessité d'un diagnostic avant tout de l'ordre du dessin urbain. L'AEU est une pratique qui a vocation à se généraliser au point de se fondre dans la pratique courante de l'urbanisme. Les objectifs de l'AEU sont à la fois de contribuer au respect des exigences réglementaires en matière d'environnement, faciliter l'intégration des politiques environnementales dans le projet, concrétiser les principes d'une qualité urbaine plus durable et contribuer concrètement à la qualité environnementale des projets urbains. L'énergie, ou, plus précisément, les choix énergétiques et l'environnement climatique, ont une place importante au sein de l'approche et font partie tout deux des huit sujets abordés par l'AEU.

Suite à une expérimentation menée sur dix projets pilotes entre 2006 et 2009, l'association HQE et ses partenaires nationaux (CSTB, SNAL, EPL, CICF, ADEME, USH, OGE, UNSFA) ont étendu le concept de Haute Qualité Environnementale aux aménagements urbains, avec la publication en 2010 d'un nouveau référentiel explicitant la **démarche HQE Aménagement**. La méthodologie, qui s'appuie sur l'Approche Environnementale de l'Urbanisme (AEU) développée par l'ADEME, s'organise autour de deux éléments principaux : un système de management d'opération (SMO) et une approche thématique. Le SMO constitue un outil de gouvernance dont le but est d'optimiser l'effort des acteurs en facilitant le dialogue entre les parties prenantes tout en anticipant le suivi des performances de l'opération grâce à la transparence et la traçabilité des différentes actions mises en œuvre au cours de l'aménagement. L'approche thématique, quant à elle, décrit plus particulièrement les objectifs durables recherchés dans l'opération d'aménagement. La démarche HQE aménagement est organisée autour de 17 thèmes (dont un sur l'énergie et le climat) et les objectifs sont : assurer l'intégration et la cohérence avec le tissu urbain et les autres échelles du territoire, préserver les ressources naturelles et favoriser la qualité environnementale et sanitaire de l'aménagement, et promouvoir une vie sociale de proximité et conforter les dynamiques économiques. Elle permet d'orienter les choix de l'aménageur en termes d'actions durables à mettre en œuvre suivant les caractéristiques de l'opération et les enjeux des parties prenantes. Son suivi permet la définition d'objectifs précis à atteindre dans l'opération d'aménagement ainsi que la rédaction d'une charte d'objectifs d'aménagement durable. Cette charte constitue un document contractuel signé par la collectivité locale et l'aménageur, qui s'engage ainsi à réaliser les actions d'aménagement durable définies pour atteindre les objectifs visés pour l'opération.

La **démarche HQE<sup>2R</sup>** est le résultat du projet européen HQE2R (Sustainable Renovation of Buildings for Sustainable Neighbourhood) (<http://www.suden.org/fr/projets-europeens/hqe2r/>). La démarche est constituée de méthodes et d'outils permettant d'intégrer le développement durable dans chacune des phases d'un projet de quartier ; c'est-à-dire d'élaborer, d'évaluer et de suivre des plans d'action pour les projets de renouvellement urbain durable et les opérations de réhabilitation durable. Cette démarche donne la possibilité de réaliser des études sur la situation existante, d'identifier les aspects critiques ou les priorités (en relevant où sont les impacts les plus importants), d'améliorer le contrôle de l'efficacité des actions réalisées, grâce à des évaluations ultérieures. La démarche est itérative et permet d'intégrer les impacts croisés des actions et d'éviter l'irréversibilité des choix. Elle tente d'éviter les impacts négatifs, à la fois sociaux, économiques et environnementaux. Les finalités sont décomposées de façon pyramidale en cibles (Intégration, diversité, environnement local, ressources, et lien social), sous-cibles et indicateurs, et constituent le système d'analyse Isdis (Integrated Sustainable Development Indicators System) qui structure la démarche et ses outils. Pour préciser les objectifs globaux de développement durable et favoriser une approche opérationnelle, ont été définis des cibles de développement durable qui, au nombre de 21, couvrent les différents champs du développement durable urbain. La première d'entre elles concerne l'énergie : « Réduire la consommation d'énergie et améliorer la gestion de l'énergie ». Cette cible s'articule autour de quatre actions clés : l'amélioration de l'efficacité énergétique pour le chauffage et la climatisation, l'amélioration de l'efficacité énergétique pour l'électricité, l'utilisation d'énergies renouvelables et la lutte contre les rejets de GES.

Suite aux appels à projet « EcoQuartier » lancés en 2009 et 2011, le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (**MEDDTL**) élabore également son propre référentiel, dont la première version est prévue pour 2012. Le référentiel de l'appel à projet 2009 s'organisait autour des trois piliers du développement durable, dont les problématiques sont présentées dans la notice explicative encadrant le concours « EcoQuartier » : le pilier social et sociétal, avec l'organisation de la gouvernance et la mise en place d'une mixité sociale et fonctionnelle à l'échelle de l'écoquartier ; le pilier économique, qui oriente plus précisément les porteurs de projet à prendre en compte la pérennité du montage socio-économique de leur opération ; et le pilier environnemental, qui s'organise autour des sept thèmes suivants : Eau, Déchets, Biodiversité, Mobilité, Sobriété énergétique et énergies renouvelables, Densité et formes urbaines, Ecoconstruction. La grille Ecoquartier 2011 a fait l'objet d'une refonte et de l'ajout d'un pilier pour la prise en compte de la gouvernance participative impliquant les habitants ou futurs habitants et vers un pilotage politique fort, ainsi que sur le montage financier et juridique fiable. La grille 2011

est ainsi structurée en quatre dimensions (Démarche et processus, Cadre de vie et usages, Développement territorial, Préservation des ressources et adaptation au changement climatique), qui se décline en 20 ambitions issues des différentes politiques menées par l'Etat. La démarche Ecoquartier de l'Etat s'articule ainsi avec les politiques publiques nationales et européennes en termes de développement durable et d'aménagement grâce à la prise en compte du cadre de référence ville durable européenne (RFSC).

Le **Carnet de Bord Développement Durable (CBDD)** est un cadre méthodologique, mis au point par Syntec-Ingénierie avec le concours du CSTB et de l'AITF pour faciliter la mise en perspective par les donneurs d'ordre de leur démarche Développement Durable. Ce carnet de bord est destiné à accompagner, à tous les stades de leur vie (dès la programmation d'un ouvrage et tout au long de son existence jusqu'à sa fin de vie) un ouvrage/équipement ou un ensemble d'ouvrages/équipements au travers de critères de référence régulièrement actualisés. Tous les types d'ouvrages sont concernés : bâtiments, infrastructures, industriels, neufs ou existants, etc. C'est un support méthodologique composé d'un ensemble de tableaux permettant de définir puis de suivre des objectifs et des enjeux au regard du développement durable, spécifiques aux ouvrages/équipements considérés. Le cadre est composé de quatre domaines (gouvernance, social / sociétal, environnement, et économie) décomposés en 14 thèmes invariables et 60 objectifs et enjeux (à choisir dans une liste). Chaque objectif est classé par ordre décroissant de priorité (1 / 2 / 3). A chaque stade de vie du projet, sont consignés dans un tableau les réponses opérationnelles et les résultats observés. La mise en œuvre du CBDD permet au décideur de bénéficier d'une « check list » développement durable pour éclairer ses choix et l'approche en coût global. Au sein du domaine de l'environnement du CBDD, deux thèmes ont un lien avec l'énergie : le changement climatique – dont les objectifs sont la maîtrise des émissions de l'ouvrage, la maîtrise des émissions des transports induits, la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, l'adaptation aux changements climatiques –, et la gestion des ressources – dont les objectifs sont la maîtrise des consommations d'énergie, le recours aux énergies renouvelables, la maîtrise de la consommation d'eau, la maîtrise de la consommation en matières premières et la prise en compte du cycle de vie des matériaux –.

**@d aménagement durable®** est un processus élaboré par la DREIF et les huit Établissements Publics d'Aménagement de l'Ile-de-France. Ouvert au dialogue et à l'enrichissement, ce processus est conçu comme une contribution, une boîte à outils intégrant les politiques publiques nationales et les résultats du Grenelle de l'environnement. Le processus @d aménagement durable® privilégie une démarche stratégique susceptible de rassembler habitants, entrepreneurs et élus autour d'enjeux partagés. Ce processus a été construit en se centrant dans un premier temps sur les territoires prioritaires franciliens. Parce qu'il vise à constituer une réponse significative, à la hauteur des enjeux du développement durable, ce processus a pris pour objectif de faire levier avec le projet d'aménagement sur tout le territoire (intercommunal par exemple) dans lequel il va se développer. Il décrit l'ossature d'une stratégie d'aménagement durable locale articulant le projet d'aménagement et le territoire. Au lancement du processus, les lignes d'action identifiées constituent autant de questions à traiter par les acteurs du projet et les décideurs du territoire ; par exemple réduire les émissions de gaz à effet de serre ou offrir un cadre propice au développement d'une économie durable. Elles sont associées à des indicateurs simples, quantifiables et incontestables ; par exemple les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire des bâtiments, mesurés en kWh/m<sup>2</sup>/an ou la densité humaine, mesurée par la somme de la population et des emplois rapportée à la surface urbanisée. Ces indicateurs permettent à chacun des nombreux acteurs de mesurer les progrès effectués, tant du fait du projet que de son effet de levier sur le territoire. Les objectifs à atteindre par le projet d'aménagement reviennent à fixer un niveau à chacun des indicateurs. La fixation de ce niveau relève de la décision des élus du territoire. Pour des raisons de lisibilité globale et partagée, le nombre de lignes d'action et d'indicateurs a été limité à dix pour le projet (dont trois en lien direct avec l'énergie et les GES : réduire les émissions de gaz à effet de serre, diminuer les déplacements motorisés individuels domicile-travail, et réduire la consommation d'énergie des bâtiments ; et trois en lien indirect : assurer une densité humaine urbaine, construire une mixité fonctionnelle, et privilégier les matériaux de construction renouvelables, recyclés ou réutilisés), et douze pour le territoire (dont trois en lien direct avec l'énergie et les GES : réduire les émissions de gaz à effet de serre, diminuer les déplacements motorisés individuels domicile-travail, et réduire la consommation d'énergie des bâtiments ; et quatre en lien indirect : réduire l'empreinte écologique, privilégier la boucle locale alimentaire, assurer une densité humaine urbaine, une mixité fonctionnelle).

Association fondée en 1989, les **Eco Maires** agissent en faveur des démarches globales pour l'environnement et le développement durable. La structure représente aujourd'hui le premier réseau national d'élus mobilisé sur les problématiques environnementales et de développement durable. En partenariat avec Gaz de France, l'association des Eco-Maires a ainsi lancé une Commission chargée d'établir un cadre de référence sur le thème « Pour un Développement durable à l'échelle du quartier ». Cette Commission, réunissant des représentants de collectivités locales, s'est notamment appuyée sur des expériences

européennes de quartiers durables. Les Eco Maires et Gaz de France ont publié un guide méthodologique destiné aux Collectivités Locales : « Pour un Développement Durable à l'échelle du Quartier ». Tenant compte des attentes des élus exprimées lors de la commission « Quartier Durable » des Eco Maires, la démarche s'engage pour la construction / la réhabilitation du quartier à respecter les critères définis par cette commission et repartis selon les quatre familles suivantes : 1. Urbanisme et aménagement (assurer l'intégration et la cohérence du quartier avec le tissu urbain et les autres échelles de territoire) ; 2. Qualité environnementale du tissu urbain (inciter les constructeurs à viser la qualité environnementale pour l'ensemble des bâtiments) ; 3. Développement social et économique (repérer et appuyer les ressources dynamiques et initiatives locales) ; 4. Gouvernance, pilotage et gestion du projet (se doter d'une ambition commune et partagée pour le quartier).

La **norme ISO AFNOR « quartier d'affaire durable »** est également en cours de création. Les travaux s'appuient notamment sur les cinq finalités du développement durable à l'échelle d'un territoire telles que définies par le Ministère en charge du Développement durable, à savoir : la lutte contre le changement climatique et la protection de l'atmosphère, la protection de la biodiversité, des milieux et des ressources, la cohésion entre les territoires et les générations et la volonté de favoriser l'épanouissement de tous les êtres humains ainsi que les modes de production et de consommation responsables.

### 1.2.2. Les cadres internationaux : Japon, Etats-Unis et Europe.

Dans le cadre de cette étude, en plus des cadres français, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux cadres élaborés au Japon, aux Etats-Unis, et en Europe.

Ainsi, à **l'échelle de la ville**, le benchmark international réalisé relève trois outils principaux de notations environnementales :

- En France, le label **Cit'ergie**, comme nous l'avons vu ;
- Au Japon, le système d'évaluation CASBEE développe actuellement un outil à l'échelle de la ville : **CASBEE City**. S'il s'agit d'un outil d'évaluation environnementale au sens large, la question du carbone y est centrale, même si le risque de dilution des questions énergétiques au sein de critères très larges et très disparates existe. En particulier, il est à craindre, comme pour le référentiel homologué à l'échelle quartier, une absence de transparence sur les pondérations choisies ;
- L'approche américaine couvre pour sa part un spectre très large de secteurs. Elle se développe en particulier autour du système **STAR Community Index**, actuellement développé sur la base d'un partenariat entre ICLEI-Local Governments for Sustainability, l'USGBC et le Centre for American Progress (ACP). Les politiques environnementales développées à New York, Pasadena, Chicago et Los Angeles illustrent le caractère opérationnel et pragmatique des démarches américaines. Cependant, les approches, très complètes, ont parfois comme contrepartie la dilution de l'information. De plus, la responsabilité des différents échelons des politiques urbaines reste parfois mal déterminée. Par ailleurs, l'approche américaine est très spécifique à l'urbanisme états-unien et paraît difficile à exporter, en particulier en France. En effet, l'Amérique du Nord a des problèmes spécifiques (sub-urbanisation, étalement urbain, etc.) qu'elle cherche à résoudre. La question du transport est considérée comme centrale (transit-oriented development), et les autres postes de consommation énergétique sont parfois laissés de côté.
- La situation en Europe est légèrement différente du Japon et des Etats-Unis. L'échelle du bâtiment a été la priorité jusqu'à l'heure actuelle via des financements européens ce qui a permis le développement de systèmes d'indicateurs et d'outils de calcul. Des référentiels à l'échelle du quartier commencent à voir le jour en France, en Allemagne et au Royaume Uni. L'état d'esprit actuel est d'encourager la compétition de façon à ce que plusieurs solutions émergent, et que la meilleure s'impose d'elle-même. Néanmoins, la diffusion du cadre de référence ville durable européenne est imminente. Une première version sous forme de site internet a été présentée et validée à Tolède en juin 2010 puis testée par 66 villes de juin 2010 à septembre 2011 (dont en France : Bordeaux, Rennes, Lille-Roubaix, La Rochelle, Le Creusot). La version définitive et publique sortira au premier semestre 2012.

**A l'échelle du quartier ou de l'opération d'aménagement**, l'état de l'art réalisé ne relève pas moins d'une quinzaine d'approches cadres différentes.

Les outils de notation environnementale présentent la particularité d'être majoritairement dérivés d'outils à l'échelle du bâtiment. On relève en particulier les outils suivants : CASBEE UD+, LEED ND, BREEAM et DGNB.

Le système japonais **CASBEE UD+** (CASBEE for Urban Area and Buildings), s'appuie sur une évaluation qui repose sur une notation ultra-agrégée. Une multitude de facteurs sont pris en compte, depuis l'éclairage des rues jusqu'à la part de renouvelable dans la consommation énergétique. Une grande liberté est laissée aux décideurs locaux dans la pondération des différents facteurs. La note finale obtenue est donc une agrégation de critères quantitatifs et qualitatifs, avec une subjectivité dans le choix des pondérations. Ces caractéristiques en font un outil relativement peu fiable. Il reste cependant peu utilisé, même au Japon. Ceci est principalement dû à l'ambitieuse politique **LCS** (Low Carbon Society), impulsée par le cabinet du Premier Ministre, qui phagocyte les autres initiatives.

Le système américain **LEED ND** (Leadership in Energy and Environmental Design – Neighbourhood) a été très récemment développé et publié au printemps 2010. Comme le CASBEE, il a pour principal inconvénient de fonder son système de notation sur une seule note de performance ultra-agrégée. Il en découle une confusion des différents facteurs qui constituent l'efficacité urbaine. De plus, il est difficilement transposable, car principalement orienté vers les problématiques énergétiques nord américaines, selon la même problématique que le Star Communities Index.

A l'exception de la France, deux systèmes d'indicateurs sont développés en ce moment en Europe : **BREEAM Communities** au Royaume Uni, porté par le BRE, et **DGNB** (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) en Allemagne. Les deux systèmes sont toujours en phase de développement ou de test. Force donc est de constater que l'Europe a une ou deux années de retard sur le développement de ces systèmes d'évaluation à l'échelle du quartier par rapport au Japon et aux Etats-Unis.

Notons que pour l'ensemble des systèmes d'évaluation étudiés dans le projet, si l'effet d'entraînement associé à la certification semble efficace, la prise en compte d'une multitude de paramètres, parfois quantitatifs mais souvent qualitatifs, ne permet que très rarement d'identifier les différentes causes à l'origine des consommations énergétiques. Le plus souvent, l'utilisation d'un indicateur unique et ultra agrégé diminue grandement la qualité de l'évaluation. L'élasticité-carbone de ces indicateurs agrégés reste un problème non résolu : compte tenu de la diversité des actions évaluées et de la difficulté à séparer les facteurs influençant les consommations énergétiques, un territoire mieux noté qu'un autre est-il pour autant plus performant sur le plan des émissions de GES ?

### **1.2.3. En France comme à l'international : des approches des consommations énergétiques et des émissions de GES multiples et souvent incomplètes...**

Les analyses produites au cours de la tâche 1 du projet ont permis de mettre en lumière les points suivants :

- Les systèmes d'évaluation ne s'intéressent que très peu au fonctionnement de la ville en tant que système. Notons à ce sujet la tentative faite par LEED Neighbourhood pour se rapprocher d'un modèle systémique : les points distribués dans ce système d'évaluation sont répartis en trois parties répondant à trois questions fondamentales : connexion et localisation, design du quartier, bâtiments et infrastructures. Cette difficulté se traduit concrètement au sein des référentiels étudiés par une distinction très claire entre des indicateurs directement liés à des critères opérationnels, quantitatifs car directement mesurables, et des indicateurs associés à des politiques sectorielles et intersectorielles, beaucoup plus qualitatifs et bénéficiant de définitions plus floues.
- Le comportement des usagers ainsi que les effets rebonds sont rarement pris en compte.
- Il existe des difficultés à fixer les frontières physiques et temporelles exactes du système à étudier. Ces difficultés peuvent se décliner comme suit :
  - d'une part, les approches en cycle de vie sont rarement intégrées aux référentiels :
  - d'autre part, le traitement de certains secteurs, et notamment le secteur industriel, est problématique. La réponse au problème de la définition des frontières reste le plus souvent floue (à qui attribuer la production en particulier ? Aux producteurs ? Aux consommateurs ?). Même le système CASBEE, se fondant pourtant sur le tracé d'une frontière départageant un espace intérieur et un espace extérieur au système analysé, peine à apporter une définition rigoureuse et une réponse satisfaisante sur ce point ;

- enfin, la question des biens de consommation ne fait jamais l'objet d'une évaluation approfondie.
- Une difficulté forte à appréhender les consommations énergétiques et les émissions de GES associées à la mobilité a été mise en évidence. Le sujet est souvent abordé par le biais d'indicateurs de réalisation directs censés favoriser les modes doux ou l'usage des TC au sein du quartier (par exemple nombre de place de stationnement vélo, continuité des trottoirs, etc.). L'impact de la localisation du quartier au sein de la ville et du type d'activité et/ou du nombre de résidents qu'il comporte ne se trouve abordé qu'au travers d'indicateurs de proximité à un transport en commun.

A l'échelle du quartier, notons enfin que la quasi-totalité des approches identifiées s'adresse à la conception ou à la réalisation de quartiers neufs (ainsi, LEED considère que LEED ND est approprié si au moins 50% de la surface du projet constitue un nouveau développement). Seule la démarche HQE<sup>2</sup>R semble spécifiquement s'adresser au renouvellement urbain.

#### **1.2.4. ... et une utilisation pratique qui reste limitée**

Les travaux menés ont permis de mettre en exergue le fait que malgré la multiplicité des approches proposées, celles-ci sont individuellement très peu usitées. A titre d'exemple, LEED Neighbourhood n'a pour l'instant donné lieu qu'à cinq projets construits et certifiés, l'utilisation de CASBEE UD est quand à elle marginale car phagocytée par la politique LCS japonaise. De la même manière, les outils développés dans le cadre du projet HQE<sup>2</sup>R ne semblent avoir fait l'objet que d'une application restreinte (démonstration dans 14 quartiers des 13 villes partenaires dont quatre en France).

Un contre-exemple au constat précédent est l'Approche Environnementale de l'Urbanisme qui connaît en France un succès grandissant (plus de 300 AEU<sup>®</sup> réalisées). Cependant, il s'agit actuellement plus d'un guide méthodologique que d'une grille constituée d'indicateurs.

### **1.3. Pratique des collectivités territoriales**

Face aux difficultés méthodologiques soulignées par la littérature et à la profusion de référentiels, les travaux engagés ont conduit à s'interroger sur la façon dont les collectivités locales abordent concrètement la question des indicateurs de consommation énergétique et d'émissions de GES sur leur territoire. 13 collectivités, sélectionnées à la fois pour leurs pratiques volontaristes et notre proximité avec elles, ont ainsi été étudiées : communauté urbaine de Strasbourg, Ville de Rennes, Rennes métropole, communauté urbaine de Lille, Ville d'Echirolles, Ville de Barcelone, Ville de Paris, Ville de Besançon, Nantes métropole, Grand Lyon, Grenoble Alpes Métropole, ARPE midi Pyrénées et EPA Plaine du Var. Cette analyse a également donné lieu à une vingtaine d'interviews.

Notons que si le projet se focalise sur les indicateurs de consommations énergétiques et de GES, force est de constater que pour un grand nombre de collectivités territoriales cet aspect s'inscrit dans une démarche plus globale de développement durable. Les indicateurs de consommations énergétiques et de GES ne sont alors qu'une partie des indicateurs développés par les collectivités pour suivre, mettre en place et/ou évaluer leur politique et ne constituent alors pas la majorité des indicateurs.

#### **1.3.1. L'appréhension des indicateurs**

Les cas d'étude abordés ont permis d'établir les constats suivants.

Tout d'abord, le champ des indicateurs de consommation énergétique et d'émissions de GES a été très largement investi par les collectivités, que ce soit à l'échelle du quartier ou à celle de la ville. Plusieurs positions sont adoptées selon qu'il s'agisse d'évaluer un plan ou une politique (typiquement un agenda 21 ou des plans de déplacement), de la construire (typiquement les PCET), ou bien d'aider les acteurs à mieux appréhender certaines problématiques (typiquement les chartes écoquartier).

On relève alors une grande hétérogénéité des démarches conduisant à une multitude d'indicateurs, en particulier liés à l'action. En effet, les attendus associés aux indicateurs diffèrent très largement en fonction de l'étape du processus politique ou décisionnel. Pourtant, les référentiels analysés ne hiérarchisent pas les indicateurs développés en fonction des niveaux stratégiques et des jeux d'acteurs associés. Ceci peut amener à des confusions et typiquement à confondre des indicateurs de réalisation avec des indicateurs

d'orientation stratégique (par exemple, le nombre de PDE actés sur un territoire ne présume en rien du nombre de covoitureurs présents sur ce territoire).

Par ailleurs, la relation des collectivités sollicitées avec les référentiels nationaux et internationaux existants est ambiguë. Si celles-ci s'appuient ponctuellement sur des référentiels existants comme base ou pour enrichir leurs réflexions (comme ce fut par exemple le cas pour la charte écoquartier la Communauté Urbaine de Strasbourg avec la démarche HQE<sup>2R</sup>), elles semblent souvent considérer que le contexte du territoire nécessite la constitution d'une grille ad hoc. Cependant, certaines grilles existantes font parfois l'objet d'une appropriation plus importante et sont tout ou partie réinvesties par les collectivités. Citons par exemple le référentiel Cit'ergie qui sert de cadre méthodologique à l'élaboration du plan climat de la ville de Rennes.

### **1.3.2. Des verrous multiples**

Des écueils similaires à ceux observés au sein des cadres et référentiels nationaux et internationaux apparaissent dans les démarches portées par les collectivités.

En premier lieu, les thématiques abordées ne couvrent pas l'ensemble des postes de consommation énergétiques ou d'émissions de GES au sein d'une ville, et ce pour trois raisons principales :

- la faiblesse présumée ou réelle des leviers disponibles de la collectivité. L'exemple typique est celui des consommations industrielles qui ne sont pas considérées comme une question spécifiquement urbaine et pour lesquelles la collectivité se considère désarmée ;
- la méconnaissance ou la mauvaise compréhension de certains processus. Par exemple, la question de la pénétration des meilleures technologies disponibles n'est ainsi pas abordée car elle implique un travail sur les processus socio-économiques qui régissent les marchés de ces technologies ;
- la volonté assumée de réduire le périmètre d'analyse afin de simplifier celle-ci, ce qui explique que les démarches du type ACV ou l'analyse des effets de consommations de biens sont généralement exclues des référentiels.

Au rang des verrous techniques, les travaux ont relevé cinq difficultés récurrentes qui rejoignent largement celles déjà mises en avant dans l'étude des cadres nationaux et internationaux existants :

- l'obtention de données fiables à des échelles fines et sur des territoires moins constitués (hameaux et villages) ;
- l'obtention de données fiables sur les taux de pénétration et le suivi des améliorations techniques et technologiques des différents secteurs ;
- la définition précise et stable du périmètre de comptabilité ;
- la prise en compte de la nature systémique des villes et l'analyse inter-sectorielle ;  
Notons ici le besoin de « scénarisation » exprimée par les collectivités, qui les poussent à définir des concepts fédérateurs (du type densité, polycentrisme, ville intense, etc.) mais dont la déclinaison en indicateurs est problématique et sujette à interprétation en fonction du secteur considéré.
- la prise en compte des comportements.

Par ailleurs, des verrous organisationnels et de gouvernance sont apparus lors des entretiens avec les techniciens territoriaux :

- le manque de moyens : la mise en forme des données peut constituer une charge de travail supplémentaire non négligeable pour certains services ;
- l'absence (ou le déficit) de concertation avec les autres services ou les autres acteurs du territoire lors de l'élaboration d'un référentiel ;
- la synthèse et la simplification des résultats d'études complexes, rendues nécessaires par le jeu politique ;
- la mauvaise communication autour des enjeux de l'évaluation et une vision partielle de la démarche pour certains contributeurs.

### **1.3.3. Quelques facteurs clés de succès**

Enfin, l'étude des pratiques des collectivités étudiées a permis de mettre à jour quelques facteurs clés de succès dans leurs pratiques des indicateurs, en particulier :

- la concomitance de l'élaboration de différents documents de planification facilitant la transversalité ;

- un bon équilibre entre une évaluation quantitative et fortement technique, et une évaluation qualitative, transversale et communicante ;
- l'animation du réseau d'acteurs et l'engagement dans la durée ;
- une élaboration tenant compte des acteurs devant renseigner ce référentiel et en faire usage au quotidien.

Il ne faut pas non plus occulter le rôle de l'Etat qui, par le biais des lois et des décrets ou grâce aux guides méthodologiques et aux retours d'expériences réalisés par les services techniques (CETE, CERTU, DREAL...) permet de développer la pratique de l'évaluation. Toutes ces mesures viennent enrichir le panel des outils mis à disposition des collectivités dans leurs pratiques des indicateurs.

#### **1.4. Création d'une base de données d'indicateurs de consommation énergétique et de GES**

Le recueil des indicateurs développés et utilisés par les collectivités s'est appuyé sur une analyse des documents, stratégiques ou de planification produits par celles-ci. La typologie des documents analysés est donc la suivante : orientations ou actions du plan climat, SCOT, guide écoquartier, évaluation du PDU, PLH, rapport annuel déchets, etc. La recherche s'est focalisée sur les indicateurs ayant un lien direct ou non direct avec la consommation énergétique et les émissions de GES.

Ces indicateurs (près de 650) ont été réunis dans une base de données exploitable sous Excel et structurée autour de sept onglets thématiques :

- Activités\_commerciales\_et\_économiques
- Bâtiments\_parc\_existant
- Comptabilité\_macro\_énergie\_GES
- Genie\_urbain\_Gestion\_environment
- Gouvernance\_et\_communication
- Transports\_Mobilités
- Urbanisme\_Aménagement\_Politique\_bâtiments\_neufs

La tâche 1 de cet état de l'art a permis de souligner :

- la multiplicité des référentiels existants liés à des démarches énergie-climat et la multiplicité de choix d'indicateurs pour une même thématique,
- la difficulté de chercher à imposer à toutes les collectivités un modèle type de référentiel,
- et au contraire l'intérêt d'une définition en interne d'un référentiel associé à la démarche portée par la collectivité pour une meilleure adéquation avec les pratiques de la collectivité et ainsi une meilleure appropriation dans le temps. Comme mentionné plus haut, un équilibre entre ajustement local et global (qui permet la comparabilité) est donc à trouver.

Ce troisième alinéa ne signifie pas qu'il faut laisser la collectivité livrée à elle-même pour imaginer et produire le tableau d'indicateurs permettant de suivre sa démarche. La base de données développée dans cet état de l'art peut ainsi permettre le développement d'un outil structurant pour accompagner la collectivité dans une sélection d'indicateurs pertinents par rapport aux thématiques traitées et aux pratiques des techniciens et décideurs locaux.

Les documents étudiés sont :

1. Baro'métropole (Rennes Métropole)
2. Référentiel aménagement durable (Ville de Rennes)
3. Guide aménagement durable (Rennes Métropole)
4. PCT (Ville de Rennes)
5. Charte Ecoquartier (Lille Métropole)
6. Actualisation Charte Ecoquartier (Lille Métropole)
7. Evaluation PDU CUStrasbourg (Communauté Urbaine de Strasbourg)
8. Guide des écoquartiers (Communauté Urbaine de Strasbourg)
9. Orientations PCET (Communauté Urbaine de Strasbourg)
10. Synthèse actions PCET (Communauté Urbaine de Strasbourg)
11. Rapport annuel sur le prix et la qualité du service d'élimination des déchets (Communauté Urbaine de Strasbourg)
12. Pré-diagnostic du 4ème PLH (Communauté Urbaine de Strasbourg)
13. 4ème PLH (Communauté Urbaine de Strasbourg)
14. Référentiel Ville durable (Agence d'urbanisme de Barcelone)
15. Démarche HQE2R (CSTB, La Calade)
16. Indicateurs de mobilité durable: de l'état de l'art à la définition des indicateurs dans le projet SIMBAD (LET)
17. Les indicateurs régionaux d'efficacité énergétique, d'efficacité en CO2 et de développement des énergies renouvelables (RARE/ MIES/ ADEME)
18. Projet européen CRISP (CSTB / VTT)

19. Référentiel de l'ARPE Midi-Pyrénées / Toulouse
20. Référentiel environnement de l'Agenda 21 du Grand Lyon (Grand Lyon)
21. Tableau de bord de l'Observatoire du développement durable du Grand Lyon (Grand Lyon)
22. Tableau de bord Développement Durable de la Ville de Paris (Ville de Paris)
23. Tableau de bord Cit'ergie mis en œuvre par Besançon (Besançon)
24. LEED - Congress for the New Urbanism, Natural Resources Defense Council, and the US Green Building Council.
25. Mega City Project. Energy Demand Model of Residential and Commercial Sectors of Cities: A Case Study of Tokyo (Matsumoto. T. Institute for Global Environmental)
26. Energy Consumption and CO2 Emissions in Urban Counties in the US with a Case Study of the New York Metropolitan Area (Parshall et al.)
27. Prediction of greenhouse gas reduction potential in Japanese residential sector by residential energy en-use model (Shimoda et al.)
28. Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions. PLANYC. (the city of New York)
29. CASBEE - Japan Sustainable Building Consortium (JSBC)
30. HQ2R (association HQE, CSTB)
31. BREEAM (Building Research Establishment)
32. DGNB - Conseil Allemand pour la construction durable
33. Modèle Max Planck - Ville de Vienne
34. Ville de Pasadena
35. Index Villes Vertes Europe
36. Low Carbon Society Japon
37. Référentiel agenda 21
38. Indicateurs RESPECT
39. Indicateurs pour l'évaluation des SCOT (DIREN LR) application au SCOT de Montpellier
40. SCOT du Grand Toulouse
41. Observatoire de l'environnement de Toulouse (indicateurs RESPECT)
42. PLU de Dunkerque
43. PLU de Neuilly sur Marne (indicateurs P-E-R)
44. Indicateurs d'évaluation environnementale de PDU (préconisations)

### 1.5. Création d'une base de données des sources de données

Face à la problématique récurrente du manque de données permettant de renseigner des outils de calcul ou des indicateurs, il a paru utile d'esquisser un premier travail de synthèse des bases existantes susceptibles d'être utilisées d'ores et déjà par les collectivités.

La base de données des sources de données regroupe donc, sous un format Excel, un ensemble de sources de données susceptibles d'être mobilisées lors de la réalisation d'un exercice de planification énergétique ou climat sur une agglomération, une ville ou un quartier. A l'heure actuelle une cinquantaine de sources de données (les plus usuelles) sont renseignées. La liste ne se veut pas exhaustive, le document proposant plutôt un cadre susceptible d'être enrichi par les utilisateurs.

Pour chaque source de données, les informations suivantes sont, dans la mesure du possible, renseignées :

- Thématique abordée par la base de données ; les thématiques actuellement présentes sont : Eau, énergie-GES, Equipements, Industrie – tertiaire, Logement, Multi-thématiques, Pollution, Santé, Sous-sol, Transport, Urbanisme.
- Nom commun de la base de données
- Organisme responsable de la collecte et lien internet éventuel vers la base
- Echelle la plus fine à laquelle l'information est disponible
- Zone géographique couverte par la base de données (périmètre)
- Description des sous-thématiques pour laquelle la base peut être exploitée
- Disponibilité et coût de la base
- Année de première publication de la base
- Fréquence théorique d'actualisation de la base.

### 1.6. Conclusion

La conclusion commune qui se dégage de l'ensemble des approches présentées dans cette partie est la profusion des indicateurs existants, leur faible hiérarchisation ainsi que leur difficulté à représenter les phénomènes complexes (approche systémique, approche en cycle de vie, etc.) ou des phénomènes semblant sortir du champ d'action de la collectivité (secteur industriel, comportement des usagers, définition exacte du périmètre de comptabilité, etc.).

La nécessité de s'approprier les enjeux de l'énergie, du changement climatique et, plus globalement, du développement durable, incite les collectivités à développer leur propre référentiel d'indicateurs même si elles s'appuient sur des démarches existantes (cf. tableau 2). Ceci explique le grand nombre d'indicateurs « énergie & GES » recensés au sein de la base de données indicateurs (près de 650). Loin de représenter autant d'objectifs différents pour chaque collectivité, ce nombre représente plutôt le fait qu'il peut y avoir pour un même objectif plusieurs choix d'indicateurs relativement similaires et qu'il conviendrait de fusionner ou

plusieurs actions à mettre en œuvre et de fait plusieurs indicateurs pour en rendre compte (par exemple, la réduction des consommations énergétiques liées au transport passe par des actions favorisant les TC et les modes doux, actions qui peuvent se mesurer en longueur de pistes cyclables, en part des déplacements effectués en mode doux, en fréquence d'utilisation des TC urbains selon le secteur de résidence, etc.).

**Tableau 2 : Ensemble des démarches et référentiels d'indicateurs étudiés dans le cadre de l'étude « Etat de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de gaz à effet de serre ».**

Démarche/Référentiel	Pays	Année parution (année de la dernière m à)	Echelle	Nature (notation, label, guide, etc.)	Nombre de projets/villes ayant mis en œuvre cette démarche	Exemple de projets/villes ayant mis en œuvre cette démarche
Label Cit'ergie	France	2005	Ville, collectivité	label	6	Les villes de Besançon, d'Echirolles, de Montmélian, de Nantes et de Rennes, la Communauté d'agglomération Grenoble Alpes Métropole
Diagnostic territorial de R.E.S.P.E.C.T	France	1997	Territoire	Méthode	-	-
Profil environnemental territorial	France	2003	Territoire	Méthode	Profils dressés par la DREAL pour 16 territoires du Nord Pas de Calais	Artois., Audomarois Béthunois, Boulonnais., Calaisis, Cambrésis, Douaisis, Dunkerquois, Lens-Liévin, Valenciennois, Métropole Lilloise
RST02	France	-	Aménagement	Méthode	Nombreuses applications réalisées par les services techniques de l'Etat (CERTU, CETE, CETU, DREAL)	Projets divers d'ouvrages d'arts, tunnels, routes et autoroutes, ZAC
AEU	France	2000	Aménagement	Méthode	Très nombreux	-
HQE aménagement	France	2010	Aménagement	Méthode, certification (en cours)	18 opérations test	Bois-Colombes, Tours, Castellane...
HQE2R	France	2001/2004	Aménagement, quartier	Méthode	Une dizaine	Anzin, Cannes, Angers...
CBDD	France	2010	Aménagement ouvrage(s)	Méthode	Quelques expérimentations en cours	Non diffusées

Démarche/Référentiel	Pays	Année parution (année de la dernière mât)	Echelle	Nature (notation, label, guide, etc.)	Nombre de projets/villes ayant mis en œuvre cette démarche	Exemple de projets/villes ayant mis en œuvre cette démarche
@d aménagement durable®	France	2008	Aménagement et territoire	Méthode	Tests réalisés par des acteurs publics et membres de la commission agenda 21 et développement durable de l'AMIF	Etablissements publics partenaires de la démarche : EPAMSA, EPAORSA, EPASA, EPAD, EPA Marne-EPA France, EPA Sénart, EPA Plaine de France, AFTRP
CASBEE City	Japon	En cours de développement	Ville	Méthode	-	-
STAR Community Index	Etats-Unis		Ville	Méthode	-	-
CASBEE UD+	Japon	≈2000	Quartier, bâtiment	Méthode	Information non disponible	-
LEED ND	Etats-Unis	2010	Quartier	Méthode	239 projets pilotes – 5 certifiés	Beijing Olympic Village, City Creek Center (Salt Lake City)...
BREAM Communities	Royaume-Uni	En cours de développement	Quartier	Méthode	-	-
DGNB	Allemagne	En cours de développement	Quartier	Méthode	-	-
Référentiel Agenda 21	France	2011	Aménagement et territoire	Méthode	Nombreuses applications sur les projets d'Agenda 21	-
RFSC	Europe	2010-2012	Ville	Méthode	66 villes en Europe, 27 pays	Bordeaux, Rennes, Lille-Roubaix, La Rochelle, Le Creusot

Cette synthèse du projet présente les outils de calcul et les indicateurs de façon relativement disjointe. Il s'avère dans les faits que leur mise en pratique est également rarement liée et se fait plutôt en parallèle. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet état de fait, comme explicité de façon plus précise dans la partie suivante, telles que :

- la complexité des outils,
- le temps, parfois long, nécessaire à l'utilisation des outils,
- des différences notables entre facteurs d'entrée et de sortie d'un outil et indicateurs (les bases de données indicateurs et outils permettent de le confirmer),
- 

Ainsi, dans la pratique, très peu d'indicateurs sont calculés par des outils de calcul :

- à l'échelle de la ville, il s'agit essentiellement du Bilan Carbone : Ville de Paris, Région Ile-de-France, le Grand Lyon, communauté d'agglomération de Val de Bièvre, Cachan, Gentilly, etc.
- à l'échelle du quartier, il s'agit de façon exploratoire de l'ACV : Lyon Confluence (Peuportier et al. 2006), ZAC Claude Bernard à Paris (Colombert et al., 2011).

Ceci s'explique en partie par le fait que de nombreux outils sont difficiles d'accès pour les collectivités territoriales ou les aménageurs et nécessitent bien souvent d'avoir une bonne expertise pour les manipuler. Cela nécessite alors souvent pour les collectivités de faire appel à des ingénieries ou à des équipes de recherche, ce qui génère un coût et un délai additionnel.

La partie suivante s'intéresse plus particulièrement à ces différents outils de calcul développés pour évaluer des consommations énergétiques ou des émissions de GES.

## 2. Deuxième partie : Recensement et analyse critique des outils de calcul

Parallèlement à l'analyse des indicateurs de consommations énergétiques et d'émissions de GES utilisés par les collectivités territoriales, un état de l'art a été conduit sur les outils de calcul permettant d'évaluer ce type de consommations et d'émissions. Les outils de calcul des consommations énergétiques et des émissions de GES analysés sont présentés tableau 3.

Ces outils répondent à la nécessité de posséder des outils permettant d'analyser, de modéliser la complexité urbaine. Comme le signale Antoni (2010), « en urbanisme, en aménagement ou en transport, la modélisation consiste en effet souvent à simplifier la réalité du monde, de manière à mieux comprendre comment les décisions et les événements y interagissent les uns avec les autres. Elle permet alors également de les reproduire ou de les modifier *in vitro*, afin de tester des solutions qui permettraient d'influencer ou d'orienter leurs conséquences, de décider à l'avance des politiques et des stratégies qui peuvent conduire à un futur souhaitable. »

Cette deuxième partie comprend quatre chapitres :

- Outils de calcul traitant du cadre bâti,
- Outils de calcul transport et LUTI (*Land Use Transport Interaction*)
- Outils de calcul technico-économiques sectoriels
- Création d'une base de données d'outils

**Tableau 3: Outils de calcul des consommations énergétiques et émissions de GES analysés**

Outils de calcul traitant du cadre bâti et de la forme urbaine	Outils de calcul transport et LUTI	Outils de calcul technico-économiques sectoriels
Shimoda et al. (Japon, 2007)	WISEM/VISUM/DAVISUM (PTV, Allemagne)	Bilan Carbone (ADEME, France, 2004)
Michalik et al. (USA, 2008)	Emme/2 (INRO Consultants)	GEMIS (+BASIS) (Allemagne, 1987)
EEP (Jones et al., UK, 2001)	Transcad (CALIPER, USA, 1990)	ENERTER (France, 2005)
Matsumoto (Japon, 2002)	Cube (City labs, USA, 2000)	SceGES (France, ≈ 2008)
Protocole ICLEI (USA, 2010)	Omnitrans	PROSPENER (France, 2008)
Heipe et Sailor (USA, 2008)	DSCMOD (UK, 1990)	NECATER (France, 2008)
URBS (Allemagne, 2003)	MUSSA (Chili, 1992)	Urba-GES (France, 2010)
ARIADNE (Ecole des Mines de Paris, 2009)	ITLUP/DRAM/EMPAL/METROPOLIS (USA, ≈ 1995)	UIAF et GRIP (Tyndall Centre, UK, 2007)
ADEPT (Summerfield et al., 2010)	HLFM II+ (A. Horowitz, 1980)	ECOREGION
Ashima (Japon, 2008)	TRANUS (Venezuela)	
Lily Parshall (USA, 2010)	MEPLAN (UK, 1978)	
Yamaguchi et al. (Japon, 2007)	METROSIM (USA, 1980)	
NON Domestic Building Stock Project (H. Bruhns et al., UK, 2000)	URBANSIM (USA, 1990)	
APUR (France, 2007)	DELTA (DSC, 1995)	
Syncity (Imperial College, UK, 2009)		

### 2.1. Outils traitant du cadre bâti et de la forme urbaine

Ce volet du projet a été abordé en repérant et analysant les politiques publiques et les travaux de recherche en France et dans quelques pays étrangers, principalement le Japon, les Etats-Unis et l'Europe. Pour analyser les outils de calcul identifiés, une typologie des modèles a été établie. Dans le rapport complet, l'enchaînement géographique est conservé. Ici, le classement par type est privilégié, pour mettre en avant les inconvénients et avantages de chaque type de démarche.

Pour ces modèles sur le cadre bâti, la méthodologie utilisée s'est ainsi appuyée sur la mise en place d'une typologie de modèles : multi-agent comportemental, économique, énergie-environnement et morphologique. La grille d'analyse est structurée en six étapes visant à mettre en évidence la qualité scientifique d'une part, et la portée opérationnelle d'autre part. Les six étapes sont les suivantes :

- Contexte et antériorité
- Contenu et structure du modèle
- Dynamique d'acteurs, données et mise en œuvre
- Evaluation, application
- Conditions de transposition

- Réflexion critique sur les cinq étapes

L'approche a également pour objectif de vérifier la prise en compte de chacun des quatre leviers d'efficacité énergétique urbaine (forme urbaine, technologie constructive, efficacité énergétique des systèmes, comportement des usagers), mais également si ces leviers d'action sont isolés ou confondus dans l'analyse.

### 2.1.1. Construction d'une typologie de modèles

Le recensement et l'analyse critique des outils de calcul des consommations énergétiques à l'échelle du quartier et de la ville part de l'idée qu'il y a plusieurs façons de modéliser ceux-ci et que l'on peut classer les modèles selon une typologie. Nijkamp et Perrells (1994) ont proposé une typologie comprenant quatre classes de modèles : les modèles input-output, les modèles énergie-environnement, les modèles énergétiques avec substitution et les modèles de systèmes énergétiques à grande échelle.

Cette typologie a été modifiée pour prendre en compte les modèles plus récents identifiés et pour faciliter la lecture de la base de données présentée dans le chapitre 2.4. (tableau 4).

**Tableau 4 : Typologie des modèles traitant du cadre bâti et de la forme urbaine**

Modèle de type multi-agent comportemental	Ce type de modèle s'appuie sur les comportements individuels au sein de la ville dans le seul secteur résidentiel. Ces modèles recensent de façon exhaustive les activités possibles pour chaque individu et leur associent des consommations énergétiques caractéristiques. Les scénarios sont affinés en fonction de la qualité et du type de logement, de la catégorie socio-professionnelle de l'individu. Ces modèles reposent avant tout sur l'agrégation globale des comportements individuels. Ils ne font pas apparaître la forme urbaine.
Modèle de type énergie-environnement	Ces modèles décrivent les interactions complexes entre la production et la consommation énergétique et leurs conséquences sur l'environnement, comme le bruit, la qualité de l'air et le changement climatique. Il existe un grand nombre de modèles de ce type, mais la plupart sont à grande échelle et ne prennent pas en compte la forme urbaine.
Modèle de type économique	Ces modèles, souvent économétriques, expriment des relations entre des variables économiques (capital, travail, énergie et demande en matériaux) et la demande énergétique. Ces modèles présentent une structure généralement rigide, manquent de pertinence pour la planification de la demande énergétique, et ne prennent pas en compte la forme urbaine.
Modèle de type morphologique	L'approche choisie par ces modèles ne s'intéresse pas à l'échelle du bâtiment mais à celle du quartier et de la ville. Les études se concentrent sur le rôle et l'impact de la forme du développement urbain sur l'efficacité énergétique urbaine dans le secteur du bâtiment. La forme urbaine prend en compte entre autres le type d'activité, sa localisation relativement aux autres activités et la densité de développement.

Compte tenu de la typologie proposée, quatre types de facteurs clés ont été identifiés :

- la forme urbaine,
- la technologie constructive,
- l'efficacité énergétique des process,
- le comportement des usagers (ainsi que des agents économiques et de la puissance publique).

Les principaux avantages et inconvénients de chaque type de modèles sont détaillés ci-dessous en y précisant les modèles étudiés.

### 2.1.2. Les modèles de type multi-agents comportemental

Ces modèles, développés principalement au Japon, s'appuient sur les comportements individuels. On peut citer le modèle de **Shimoda et al. (2007)** à Osaka qui crée une véritable ville virtuelle pour prévoir les consommations énergétiques et les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel. En s'appuyant sur de nombreuses bases de données, le comportement de chaque citoyen et de chaque foyer est simulé au cours de la journée (par pas de 5 minutes). En agrégeant les comportements de tous les agents, ces modèles font apparaître une « ville virtuelle » intégralement issue de la simulation. Ces méthodes permettent alors

d'obtenir une simulation temporelle des besoins énergétiques globaux de la ville, cependant limitée au seul secteur résidentiel.

Un des avantages de ces modèles est de pouvoir évaluer ex ante l'impact de mesures concrètes d'économie d'énergie : amélioration de l'isolation, de l'efficacité énergétique des appareils électroménagers, des climatiseurs ou des appareils de chauffage, etc. La gamme des mesures, dont l'évaluation ex ante est rendue possible par ce modèle, est cependant limitée. Parmi les exemples donnés par les auteurs : augmenter la température de réglage des climatiseurs, diminuer la température de réglage pour le chauffage, ou encore un dernier exemple, pouvant prêter à sourire dans un contexte européen, mais dont l'impact est non négligeable dans le contexte japonais : inciter les membres d'une même famille à tous regarder la télévision dans le salon et non dans leurs chambres respectives.

La mise en place de ce modèle se heurte par ailleurs à trois difficultés :

- L'importance des données nécessaires : recensements pour préciser la composition des familles et des foyers, études afin de savoir quels sont les emplois du temps typiques de chaque catégorie d'agent, répartition des appareils électroménagers et leurs consommations énergétiques, données météorologiques, données précises sur le parc immobilier, etc. L'obtention et le traitement de ces données représente un coût important, et impose un laps de temps long entre les évaluations. Au Japon par exemple, ces modèles sont appuyés sur les recensements, ayant lieu uniquement tous les cinq ans. Les performances opérationnelles de ces modèles sont donc compromises par le coût et le temps nécessaires à la gestion de ces données ;
- les modèles sous-jacents, concernant la simulation des comportements et des consommations énergétiques induites. Le fait de prendre appui non pas sur l'échelle du bâtiment, mais sur l'échelle individuelle implique l'utilisation de modèles complexes reliant le comportement de chaque agent à une consommation énergétique : l'activité « prendre une douche » implique des besoins en eau chaude (simulation de l'énergie nécessaire), de l'éclairage, du chauffage (modèle de circulation thermique entre les pièces), etc. Le nombre et la diversité de relations mathématiques utilisées augmentent les risques d'erreur et d'incertitude dans la simulation ;
- les méthodes d'agrégation : la méthode choisie consiste à passer directement de l'échelle de l'individu à l'échelle de la ville. Cette approche simule l'impact de mesures ciblées, mais pose un problème d'identification des différents leviers d'action disponibles afin de mettre en place de nouvelles politiques urbaines.

**Le modèle australien de Michalik et al. (2008)** a pour objet de déterminer les profils de consommation électrique du secteur résidentiel. Il se base sur le descriptif détaillé des consommations (télévision, climatiseur, etc.), modélise la consommation et la demande énergétique, et construit des profils de demande, avec une anticipation à moyen terme. Il s'appuie sur une classification des consommateurs d'énergie (quatre catégories de famille) et des appareils électriques (quatre catégories et six sous-catégories). Ses avantages sont sa simplicité, grâce à une sélection d'un nombre réduit de données, et sa prévision, due au fait qu'il a été créé pour les fournisseurs d'énergie.

En revanche, il présente comme inconvénients de ne pas aller jusqu'au calcul des niveaux d'émissions, d'être limité à l'étude du secteur électrique et d'être trop simplifié pour véritablement expliciter les raisons de la demande. En résumé, il prévoit la demande mais ne l'explique pas.

### **2.1.3. Modèles énergie-environnement**

Ces modèles décrivent les interactions complexes entre la production et la consommation énergétique et leurs conséquences sur l'environnement, comme le bruit, la qualité de l'air et de l'eau, le changement climatique. Il existe un grand nombre de modèles de ce type, mais la plupart ne prennent donc pas en compte la forme urbaine.

#### **En France**

**Le Bilan Carbone de l'ADEME** (ADEME, Bilan Carbone. Entreprises - Collectivités - Territoires. Guide méthodologique - version 6.1 - objectifs et principes de comptabilisation, juin 2010) permet d'estimer les émissions de GES à l'échelle de la ville et peut être utilisé comme outil d'aide à la décision pour les politiques urbaines. Il bénéficie d'une méthodologie globale et opérationnelle facile à mettre en œuvre, et prend en compte la majeure partie des postes d'émissions GES à l'échelle territoire. Ses défauts résident principalement dans l'agrégation globale des niveaux de consommation, qui gomme les facteurs explicatifs amont, induisant une confusion des différents leviers d'action.

**ARIADNE du laboratoire CEP de l'Ecole des Mines de Paris** (Peuportier et al. 2006) est un outil permettant de réaliser une ACV à l'échelle d'un quartier. Il fournit une aide à la conception pour des projets en construction ou en réhabilitation. Il emploie le modèle EQUER (<http://www.izuba.fr/logiciel/equer>) pour l'évaluation environnementale de chaque type de bâtiment et prend en considération les autres composants du quartier : stationnement des voitures, routes, rues, espaces verts, réseaux d'eaux, gestion des déchets et équipement de chauffage tout au long du cycle de vie du quartier. Les données nécessaires sont issues de la base de données ECOINVENT. Le principal défaut relevé à ce stade réside dans le fait que la prise en compte des transports des résidents est forfaitaire, ce qui apparaît trop simpliste.

### A l'étranger

Une méthode prenant les bâtiments individuels comme point de départ pour l'analyse énergétique d'un tissu urbain est le **modèle EEP (Jones et al., 2001)**, modèle de prédiction environnementale et énergétique développé dans le cadre du programme Villes Durables EPSRC par Phil Jones à l'Ecole d'Architecture de l'*University of Wales* (Royaume-Uni). Le modèle EEP est conçu pour aider les planificateurs à faire des comparaisons entre différentes mesures d'efficacité énergétique (par exemple doubles vitrages, amélioration des coefficients U des parois, etc.) pour un groupe de bâtiments ou une zone urbaine.

Le module d'énergie domestique du modèle est fondé sur la procédure d'évaluation standardisée britannique (SAP, *Standardised Assessment Procedure*) qui donne un classement d'efficacité énergétique pour un bâtiment à partir de données décrivant sa morphologie, son vitrage, sa ventilation, ses systèmes de chauffage et d'eau. Le modèle EEP permet d'évaluer une zone urbaine plutôt qu'un seul bâtiment en affectant les bâtiments à des ensembles ayant des classements SAP similaires, en se fondant sur cinq caractéristiques (la surface au sol chauffée, la façade, le ratio de vitrage, les surfaces exposées, l'âge). Les « ensembles SAP » sont alors affectés à une centaine de types de bâtiments (20 types de bâtiments x 5 classes d'âge). Pour évaluer la demande énergétique domestique pour une zone, les bâtiments de cette zone sont affectés à une des 100 classes de bâtiments (par un repérage sur le terrain). Le modèle est appliqué pour déterminer l'impact relatif de différentes mesures d'efficacité énergétique.

Le modèle EEP permet de comparer l'impact relatif de stratégies d'efficacité énergétique pour de grandes régions urbaines. Cependant, il ne considère pas les paramètres de forme urbaine de manière explicite mais plutôt comme des sous-produits des classes de bâtiments.

Le **modèle de Matsumoto (2002)** pour la ville de Tokyo simule à moyen terme la consommation énergétique des secteurs résidentiels et commerciaux par usage et source d'énergie. En s'appuyant sur un nombre réduit de données (demande énergétique, prix de l'énergie, pénétration des technologies, efficacité énergétique des systèmes), le modèle permet, grâce à des outils de prévision économique classique (régressions, profils exponentiels ou logistiques, etc.), de prévoir les tendances de consommation énergétique. Cet outil, simple et didactique, est particulièrement adapté du point de vue opérationnel, mais cette même simplicité rend discutable la robustesse de l'analyse prédictive.

**Le protocole développé par l'ICLEI (2010) sert de base méthodologique à certains modèles** et inventaires des émissions de GES à l'échelle urbaine en définissant les frontières des systèmes et en quantifiant les consommations énergétiques et les émissions de GES avec des facteurs d'émissions. Le protocole définit de façon extrêmement précise les sources d'émission qui peuvent être considérées comme appartenant au système et les sources extérieures au système. Du fait de la grande diversité des types de gouvernance des villes à l'échelle mondiale, l'ICLEI apporte une attention particulière à cette problématique de définition des frontières des systèmes. Il a comme avantages son protocole qui fixe une méthodologie des inventaires des émissions et son approche détaillée et didactique. Ses inconvénients sont les suivants : la quantification des consommations à partir des données des fournisseurs d'énergie et le fait que l'approche choisie, basée sur les coefficients d'émission, empêche la prise en compte des facteurs d'efficacité autres que le facteur technologique. Il est d'autre part cantonné à la question des émissions de GES et ne traite pas des autres impacts environnementaux.

**Le modèle développé par Heiple et Sailor (2008) aux Etats-Unis** appartient aussi à ce type. Il a pour objectif de déterminer les profils de consommation énergétique du secteur du bâtiment et de les modéliser spatialement. Il s'appuie sur des prototypes de bâtiments adaptés des travaux de Huang (Huang J. et Franconi D.M., *Commercial Heating and Cooling Loads Component Analysis*, 1999). Le modèle développé par les auteurs s'appuie sur un logiciel de simulation énergétique à l'échelle du bâtiment, ainsi qu'un ensemble de prototypes de bâtiments. Les prototypes de bâtiments sont choisis à partir des données de l'US DoE (*US Department of Energy*). Les différentes catégories de bâtiments sont déterminées en fonction des profils de consommation durant la journée et au fil des saisons. Les bâtiments au sein d'une même

catégorie présentent des profils de consommation énergétique proches, et des ratios électricité sur gaz naturel proches. Il a l'avantage de séparer la consommation électrique et la consommation non-électrique et d'analyser de manière dynamique des profils de consommation énergétique ainsi que de proposer une analyse spatiale (SIG). Ses défauts sont sa limitation à l'électricité et au gaz naturel (problèmes de transposition), son incapacité structurelle à déterminer les niveaux d'émissions GES, et l'absence de prévision ex ante d'impacts et d'analyse de scénarios.

**La ville de New York** calcule aussi ses consommations énergétiques et émissions de GES sur la base d'un modèle énergie-environnement (The City of New York, Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions, 2009). Le modèle calcule les consommations à partir de bases de données variées (factures, permis d'installation de systèmes de chauffage, etc.), détermine des coefficients d'émission reliant consommations, usages et émissions GES, et agrège à l'échelle urbaine toutes les émissions. Les avantages du modèle sont la précision de sa définition des systèmes et de leurs frontières, la production d'un inventaire détaillé et précis et la prise en compte de toutes les contributions (aviation, eaux usées, autres GES, etc.). Ses points faibles sont la non prise en compte du seul facteur d'efficacité énergétique et l'absence de prévision d'impacts ex ante.

#### 2.1.4. Modèles économiques

Les modèles économiques se différencient de façon très nette des modèles précédents par leur principe même de fonctionnement : alors que les modèles morphologiques, énergie-environnement ou comportementaux fonctionnent sur un schéma du bas vers le haut, par une succession d'agrégations (*bottom-up*), les modèles économiques adoptent une stratégie radicalement différente : l'approche part des niveaux les plus hauts vers les niveaux les plus bas (*top-down*). Ces modèles permettent d'étudier les relations entre le secteur énergétique et l'économie en entier, en s'appuyant sur des séries temporelles de données économétriques.

Ces modèles économiques (voire économétriques<sup>1</sup>) s'appuient sur les relations entre la consommation énergétique et d'autres variables telles que le revenu, le prix des carburants, le produit intérieur brut (PIB), et parfois sur des données climatiques.

La principale difficulté liée à l'utilisation de ces modèles est le manque de détails sur différentes options technologiques (actuelles et futures) : ils sont davantage orientés vers les tendances macroéconomiques et leurs relations passées plutôt que sur les facteurs physiques pouvant influencer la demande énergétique. De plus, cette orientation vers le passé pourrait rendre ces modèles peu appropriés pour appréhender des sujets nouveaux tels que le changement climatique, pour lesquels les conditions sociales, environnementales et économiques futures seront probablement très différentes des conditions passées. Ces modèles *top-down* prennent en compte une palette d'autres facteurs, tels que les effets de saturation, le progrès technologique, ou les changements structurels. Ces facteurs sont pris en compte par les méthodes économétriques, mais la cause réelle de ces phénomènes n'est pas explicitée.

Le **Annual Delivered Energy Price and Temperature (ADEPT)** est un exemple de modèle économique simplifié, développé récemment pour analyser la consommation énergétique annuelle par foyer en Grande Bretagne depuis 1970 (Summerfield et al., 2010). Ce modèle de régressions s'appuie sur les températures saisonnières moyennes et des prix de l'énergie tenant compte de l'inflation. Le seul objectif du modèle ADEPT est de permettre la comparaison entre les données de consommation énergétique annuelle avec ce qu'elles seraient en modifiant les prix et les réglages de température dans les logements.

**L'équipe d'Ashina au Japon** propose quant à elle une modélisation purement économique de l'impact de mesures d'économie d'énergie et des coûts associés à l'échelle d'une préfecture japonaise (Ashina et Nakata, 2008 a et b). Les méthodes d'optimisation utilisées sont robustes et permettent l'analyse ex ante de deux scénarios économiques (subvention pour les technologies les plus efficaces, mise en place d'une taxe carbone). La structure du programme d'optimisation ne permet néanmoins pas d'isoler la contribution de chaque facteur, limitant l'analyse à des scénarios purement économiques.

**Lily Parshall** a élaboré un modèle appliqué à la ville de **New York City** pour modéliser les consommations énergétiques des différents comtés (électricité non comprise) et optimiser les systèmes de cogénération à

---

<sup>1</sup> Les modèles économétriques interprètent les données économiques à l'aide de méthodes mathématiques et statistiques afin d'établir des corrélations entre les différents paramètres.

l'échelle urbaine (Parshall et al., 2009 a et b). Son modèle, qui est en accord avec le protocole de l'ICLEI (ICLEI, 2010), calcule les consommations à partir des données des fournisseurs d'énergie, quantifie les émissions grâce aux coefficients d'émissions, et analyse des scénarios de cogénération. Le modèle a pour avantages d'utiliser un SIG et d'évaluer l'impact de la cogénération. Les inconvénients sont la non prise en compte de la consommation électrique et une méthodologie trop calquée sur l'ICLEI (coefficients d'émission qui gomment les différents facteurs responsables de la consommation énergétique à l'échelle urbaine).

### 2.1.5. Modèles morphologiques

Les villes sont à la fois des systèmes humains et des volumes physiques poreux complexes à plusieurs échelles associant un haut degré de variabilité et une structure sous-jacente plus ou moins ordonnée. Elles sont à la fois des volumes construits (des pleins) et des espaces vides. L'analyse des unités discrètes composant les pleins (c'est-à-dire les bâtiments) a été fortement développée dans ses aspects bioclimatiques et énergétiques. Beaucoup moins de travaux ont été consacrés à la texture de la ville dans son ensemble (taille des grains, porosité, densité du maillage, connectivité des vides, grandes et petites coupures, etc.). Or, il est indispensable, pour parvenir à des résultats opérationnels, d'affiner et de quantifier la description morphologique des différents types de densité à la fois dans leurs impacts sur la mobilité et dans leurs impacts sur le microclimat urbain.

Le microclimat urbain affecte les espaces extérieurs. La connaissance de ses effets sur le confort thermique des bâtiments est nécessaire pour créer des architectures bioclimatiques passives permettant de diminuer l'intensité énergétique et l'empreinte carbone des bâtiments. Les possibilités de recours à la ventilation naturelle dépendent, par exemple, non seulement des propriétés morphologiques des bâtiments mais aussi des conditions climatiques adjacentes aux bâtiments comme le mouvement de l'air et la pollution atmosphérique et sonore. Ces conditions dépendent de la morphologie urbaine. La texture urbaine offre divers degrés d'isolation par rapport au climat naturel. Dans certains cas, elle offre des avantages, comme la modération des températures extrêmes en protégeant des vents froids d'hiver et en réduisant la chaleur d'été par des rues ombragées. Dans d'autres cas, la texture peut présenter des inconvénients, comme la stagnation des polluants dont la morphologie urbaine ne permet plus la dispersion par les vents dominants.

Les modèles morphologiques proposent donc une approche reliant la consommation énergétique à la morphologie du tissu urbain : densité, compacité, maillage, fragmentation des activités, hiérarchie, connectivité des réseaux de déplacement, etc. L'échelle caractéristique d'étude s'établit au niveau du groupe de bâtiments, ou du quartier, en prenant en compte la structure hybride et hétérogène des villes, liée à leur histoire.

#### En France

Le **modèle de l'APUR** (APUR, Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes, 2007) détermine les consommations énergétiques et les émissions de GES liées au chauffage du secteur résidentiel parisien. Il détermine des archétypes et analyse thermiquement ceux-ci en fonction de caractéristiques d'enveloppe et de compacité, bâtiment par bâtiment. Les émissions sont calculées sur la base des systèmes énergétiques utilisés, des comportements individuels, et des besoins théoriques. Ses avantages sont une méthode opérationnelle de cartographie des performances énergétiques pour toute la ville, la possibilité d'analyse ex ante de scénarios et la séparation partielle des différents facteurs. Ses inconvénients sont la difficulté de transposer ses archétypes, et une prise en compte de la morphologie uniquement à l'échelle du bâtiment : les effets de la morphologie (à l'échelle de l'îlot et du quartier) sur le microclimat urbain ne sont, par exemple, pas pris en compte.

#### A l'étranger

Le modèle développé par **Yamaguchi et al. (2003, 2007 a et b) au Japon** consiste en une modélisation - s'appuyant partiellement sur la morphologie des bâtiments - de la consommation et des émissions du secteur commercial d'Osaka, et en une analyse de scénarios à horizon 2050. Les méthodes d'agrégation utilisées s'appuient sur les différentes échelles (bureau, bâtiment, quartier, ville) et permettent de différencier en partie l'influence de différents facteurs. L'efficacité des systèmes n'est pas clairement découplée de la forme construite. Les auteurs concluent par exemple que les tours sont plus efficaces que les petits bâtiments. C'est en fait les systèmes énergétiques des tours, du fait de leur dimensionnement et de l'effet d'échelle, qui sont plus efficaces. Mais les tours en elles-mêmes ne le sont pas. L'efficacité des systèmes

n'est cependant pas clairement découplée de la forme construite et biaise l'analyse des scénarios de long terme.

Le modèle **Non Domestic Building Stock Project** (Bruhns et al, 2000) **au Royaume-Uni** exploite une base de données utilisée pour modéliser la consommation et les émissions du secteur non résidentiel. Il dispose d'une classification multi-niveaux (catégorie d'usages, de locaux, de bâtiments, de forme construite), et d'une ébauche de modélisation énergétique. Il a l'avantage d'avoir créé une base nécessaire à toute modélisation basée sur la forme des bâtiments, d'inclure une combinaison des bases de données existantes et d'études de terrain, et d'avoir une architecture multi-niveaux. Ses inconvénients sont le coût humain et financier dépendant de la préexistence de bases de données complètes et fiables : le volume de données nécessaires au fonctionnement du modèle est très important.

Le modèle **Syncity de l'Imperial College au Royaume-Uni** (Keirstead, J., Samsatli, N. and Shah, N., 2009) s'adresse aux concepteurs des villes nouvelles. Les principaux objectifs sont de fournir, à l'échelle de la ville, une aide à la décision sur la sélection du mix énergétique et des technologies de production associées, l'optimisation de l'implantation des différentes fonctions de la ville, et l'optimisation du réseau de transport. L'outil a été initialement développé pour le programme « éco-towns » et il a été testé dans des contextes variés (UK, USA, Australie, Chine). Le modèle semble utilisable pour un usage R&D mais pas encore pour une application opérationnelle pour une collectivité territoriale.

## 2.2. Outils traitant du transport et modèles LUTI (*Land Use Transport Interaction*)

Les réseaux de transport sont un élément structurant de l'espace en général et de l'aire urbaine en particulier. Ils favorisent la mobilité des biens et des personnes et influencent fortement l'organisation géographique du territoire. La modélisation de ce système complexe et de ses interactions avec les autres secteurs s'est progressivement développée à partir des années 1950 et les modèles se sont perfectionnés jusqu'à aujourd'hui au fur et à mesure des avancées scientifiques et informatiques.

Les outils se sont initialement développés pour évaluer les projets d'infrastructures, l'objectif étant notamment de prévoir la demande engendrée par les constructions d'infrastructures dans une double logique de gestion des coûts, voire des recettes tarifaires, et de gestion du trafic. Deux types d'outils se sont développés pour répondre à ces problématiques : les modèles à forte connotation géographique et les modèles plus orientés socio-économie. Les modèles « transport » ont été conçus à des fins de planification, de dimensionnement, ou d'exploitation des réseaux de transport. Notons que les données de sortie de ces modèles sont essentiellement des données de prévision de trafic, à divers horizons temporels. Pour avoir les consommations d'énergie ou les émissions de GES associées, il est indispensable d'avoir des données aussi fiables que possible sur la typologie et les consommations unitaires du parc de véhicules.

### 2.2.1. Les modèles géographiques

Les modèles géographiques, comme par exemple les logiciels **Cube**, **Emme**, **Transcad** ou **Visum**, s'attachent à la modélisation du réseau et de ses capacités physiques. Les modèles à trois étapes s'attachent à la prévision du trafic en fonction des zones géographiques pour le mode considéré. Cette logique de flux permet d'avoir une première vision du trafic engendré par les nouvelles infrastructures, mais évalue mal les effets de moyen et de long termes sur le trafic. L'ajout d'une affectation modale des déplacements, et donc la prise en compte des modes alternatifs au mode routier, dans les modèles à quatre étapes ont permis de rendre compte des arbitrages modaux, mais cette représentation présente encore aujourd'hui de nombreux manques, notamment en terme de données. En effet, comme le rappelle Fabien Leurent<sup>2</sup>, « parmi les divers aspects de l'offre, on sait bien modéliser la circulation automobile, moins bien la circulation des voyageurs en TC (les phénomènes de congestion commencent à être répertoriés et modélisés) ; la modélisation du stationnement est encore simpliste, la connaissance des interactions par report entre des modalités ou des lieux étant encore peu avancée ; la modélisation des traitements logistiques au sens large, incluant les opérations de transport mais aussi les opérations de groupage et de stockage, est encore dans son enfance. »

Le traitement des modes alternatifs (auto-partage, vélo, etc.) est encore très sommaire, car leur traitement fait intervenir en grande partie les possibilités physiques et les préférences des acteurs, deux éléments encore mal explorés.

---

<sup>2</sup> Professeur à l'Ecole des Ponts Paris-Tech et Chercheur au LVMT

La modélisation de la demande de transport repose elle généralement sur les principes économiques où chaque ménage ou entreprise va choisir ses options de déplacement (opportunité, mode(s), horaires, itinéraires) en fonction de ses préférences et de la localisation de son domicile et de ses lieux d'activité.

### 2.2.2. Les modèles transports d'inspiration socio-économique

Une autre catégorie de modèle s'est parallèlement développée, mettant plus l'accent sur le caractère socio-économique du phénomène de mobilité. Les études sociologiques mettent ainsi en évidence le caractère social de la mobilité. Elle n'est pas la même selon les lieux de résidences, les revenus des ménages ou le type d'emploi occupé. Contrairement à la logique de flux physiques des véhicules, ces outils se sont développés pour des approches plus ciblées sur les ménages et leurs préférences en termes de choix de transport. Cette approche par le haut de la mobilité présente l'avantage de considérer les phénomènes de façon agrégée, ce qui la rend plus aisément exploitable. L'abandon de la complexité de la représentation des flux dégage des capacités pour le traitement social des problématiques, ainsi que pour l'utilisation de règles ou lois empiriques. Ce type de modèle permet par exemple d'exploiter la conjecture de Zahavi, qui postule la constance des temps moyens journaliers de déplacement à l'échelle d'une population.

**MATISSE** est un exemple de ce type de modèle mettant l'accent sur les comportements des ménages et traitant de manière frustrée l'espace. Le modèle est calé sur les données observées de mobilité des ménages en France, fournies par l'EGT pour le cas de l'Ile de France, et explore les modifications de comportement de mobilité lors de la variation des conditions de l'offre de transport ou des conditions socio-économiques des ménages (augmentation du prix de l'énergie, etc.).

### 2.2.3. Les modèles d'inspiration géographique intégrant les comportements

Le développement des applications et des capacités informatiques ont permis le développement de modèles d'inspiration géographique intégrant des informations sur les comportements. La théorie de l'utilité aléatoire (McFadden, 1978. Anas, 1982) a débouché sur l'utilisation des modèles logit notamment dans les étapes de choix modal et d'affectation de trafic sur les itinéraires du réseau. En effet, ces formes mathématiques s'avèrent précieuses pour décrire et interpréter les choix de mode de transport, en laissant, comme l'observation le montre, des parts de marchés pour chaque mode. Ce qui permet de traduire la pertinence de chaque mode au sein de la mobilité, la concurrence entre les différents modes s'exprimant différemment en fonction des conditions socio-économiques mais aussi en fonction de la nature et de la portée des déplacements. Ainsi, les modèles décrivent finement à la fois les comportements sur les réseaux dédiés, mais aussi l'arbitrage entre les différents modes. A titre d'exemple, le modèle de déplacements **MODUS** de la DREIF utilise le modèle logit.

L'exploitation de ces modèles permet de calculer des indicateurs pertinents sur la mobilité des personnes au sein d'une agglomération (parts modales, accessibilité, etc.). L'indicateur d'accessibilité par exemple est un indicateur de communication et d'aide à la décision dont le calcul repose sur des modèles transport de type géographique, mais intégrant aussi le contexte technique et socio-économique à travers les coûts monétaires du transport et la valorisation du temps et des conditions d'accès. Les modèles peuvent ici être utilisés pour le calcul de tels indicateurs, et être diffusés en particulier grâce aux outils cartographiques.

Le développement de ces trois catégories de modèles a mis en évidence l'importance de la prise en compte d'une part des structures physiques de la mobilité et d'autre part des préférences de comportement des ménages. Cependant, l'utilisation de modèles transport purs ne permet pas de mettre en évidence les nombreuses interrelations entre le transport et les autres secteurs du métabolisme urbain. Les scientifiques se sont attachés à combler ce manque en développant des **modèles LUTI (Land Use and Transport Interaction)** qui visent à replacer les déplacements au sein d'un espace plus vaste et plus réaliste. Cette complexité additionnelle repose là encore sur des hypothèses théoriques discutables (et discutées).

### 2.2.4. Les modèles LUTI

Les outils précédemment développés s'appliquent au système des transports et présentent peu de lien avec les autres secteurs d'un territoire. En effet, le système de transport est intégré au sein de l'organisation de l'espace dans un sens large, et la réalité des phénomènes de mobilité met en jeu non seulement les réseaux de transport, mais aussi les lieux de localisation des activités et des logements au sein du territoire. La

problématique de l'utilisation des sols interagit fortement avec la formation de la mobilité, mais cette interaction est encore mal connue et mal délimitée. Chaque territoire présente ses particularités qui en font un système unique. Les théories d'utilisation des sols et de la liaison entre activités, ménages et mobilités visent à expliciter ce lien encore opaque pour les chercheurs.

Les premiers modèles explicitant le rapport entre transport et utilisation des sols sont apparus avec les modèles de la théorie monocentrique (Alonso, 1964 ; Mills, 1967 ; Muth, 1969).

La représentation de l'usage des sols et de prix du foncier comble un manque dans la modélisation des systèmes urbains. Une grande partie de la valeur ajoutée créée par le fonctionnement économique et distribuée aux différents acteurs se retrouve dans les constructions résidentielles et commerciales. Pour les ménages français en 2005, les terrains et les logements représentaient 69% du patrimoine net, soit plus de 3 500 milliards d'euros, près de deux fois le PIB de la France. Pour mieux traiter le volet économique, les modèles s'intéressant à la ville et aux questions de durabilité doivent intégrer cet élément à l'intérieur du cadre de la modélisation. Terrains et logements sont par définition immobiliers. Ils se transforment sur des périodes très longues et sont les éléments structurant le territoire, avec l'économie et les infrastructures.

L'usage des sols met en compétition les logements, les bâtiments commerciaux et les infrastructures, mais aussi les espaces agricoles et naturels.

Comment faire interagir ces différents espaces au sein d'un modèle, sachant qu'ils présentent des caractéristiques d'usages, d'appropriation et de valorisation disjointes. Les scientifiques se sont appropriés cette question depuis plusieurs siècles et quelques théories et représentations formelles et mathématiques de cette compétition ont été développées depuis Von Thunen au 19<sup>ème</sup> siècle.

Les rapports entre transport et urbanisation sont placés sous le signe de la complexité, complexité des phénomènes et de leurs interactions. La complexité découle notamment de l'articulation des différents éléments du système dans des temporalités très différentes. Wegener (1994) dégage huit types de sous-systèmes urbains qui se partagent en quatre temporalités :

- très long terme (changement très lent) : réseaux, occupation des sols. Ces deux systèmes présentent des temps caractéristiques très longs, qui correspondent à la construction de nouvelles infrastructures ;
- long terme (changement lent) : lieux d'emplois (bureaux, usines, etc.) et de logements ;
- moyen terme (changement rapide) : population et emplois ;
- court terme (changement immédiat) : déplacements, biens de consommation. Pour cette catégorie, les changements sont immédiats.

La complexité apparaît donc dans la constitution du système, avec des sous-systèmes ayant des logiques propres et des temporalités bien distinctes. Les modèles LUTI s'intègrent dans cette approche et vont chercher à faire interagir ces différents éléments du système.

Le lien entre transport et utilisation des sols se fait à l'aide des activités et de l'accessibilité. Les activités sont associées à un lieu où se déroule cette activité, et l'accessibilité va mesurer les possibilités d'accès à ce lieu, et à quel coût. La distribution des activités et des lieux de résidence dans l'espace va engendrer des déplacements, dont la réalisation dépendra des coûts et des caractéristiques des ménages (revenu, motorisation, localisation). Les flux de déplacements ainsi engendrés vont à leur tour influencer sur l'accessibilité des différents lieux, et donc sur leur attractivité, ce qui peut modifier les décisions des investisseurs.

Pour représenter ces interactions, un certain nombre d'outils ont été développés (**Tranus, MARS, Cube Land, UrbanSim,...**). Mentionnons que les modèles LUTI s'inscrivent dans le prolongement des modèles 'transport' existants. D'un point de vue conceptuel, les modèles montrent une grande diversité des approches en fonction de la question posée. En d'autres termes, il n'existe pas de modèle LUTI universel permettant de rendre compte de l'ensemble des phénomènes, la recherche de la performance sur une question donnée (par exemple la congestion) se faisant nécessairement au détriment des autres problématiques.

## 2.3. Outils technico-économiques sectoriels

Avec l'essor de la problématique énergie-climat et malgré la relative jeunesse de ce domaine de recherche, un grand nombre d'outils technico-économiques sectoriels ont vu le jour, principalement à destination des collectivités et des administrations.

Parmi les outils technico-économiques analysés, nous proposons de dissocier deux types de modèles : des modèles détaillés, traitant finement d'un panel large de secteurs et des outils simplifiés, plus grossiers ou abordant des thématiques moins larges (tableau 5).

**Tableau 5 : Types de modèles des outils technico-économiques analysés dans le cadre du projet « état de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de gaz à effet de serre »**

<p><b>Modèle « détaillés »</b></p>	<p>Les modèles que l'on qualifie de détaillés cherchent à être le plus précis possible afin de modéliser au mieux les déterminants de la demande en énergie ou des émissions de gaz à effet de serre sur un territoire. Ces outils visent à :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• identifier les principaux postes de consommation énergétique ou d'émissions de gaz à effet de serre ;</li> <li>• repérer les gisements afin de cibler au mieux les actions à mettre en œuvre ;</li> <li>• évaluer l'impact de plans d'actions.</li> </ul> <p>Le but est, au travers d'une méthodologie « bottom up », d'aider à la construction de stratégies et de plans d'actions territoriaux ou nationaux en apportant des arguments quantitatifs. Abordant l'ensemble des secteurs, relativement complexes à mettre en œuvre et lourds, ils sont utilisés le plus souvent par des bureaux d'études en lien avec les collectivités qui leur fournissent les données locales nécessaires pour compléter les bases de données existantes qu'ils utilisent (recensement général de la population de l'INSEE notamment).</p>
<p><b>Modèle « simplifiés »</b></p>	<p>Les outils simplifiés n'ont pas la même application. Construits pour être utilisés directement par les collectivités, administrations ou aménageurs, ils sont plus légers et faciles à prendre en main. L'objectif est d'obtenir des ordres de grandeur sur un volet spécifique de la thématique gaz à effet de serre.</p>

### 2.3.1. Modèles « Détaillés »

Les modèles étudiés relevant de modèles « détaillés » sont les modèles GEMIS, ENERTER, SceGES et PROSPENER. Ces outils visent à repérer les gisements afin de cibler au mieux les actions à mettre en œuvre. Parmi ces modèles, certains effectuent des simulations dynamiques (PROSPENER, SceGES, GEMIS couplé à BASIS) et permettent d'alimenter des exercices de prospective ; d'autres ne permettent pas cette vision dynamique et sont cantonnés à la réalisation de bilans.

Mis à part SceGES qui a été conçu spécifiquement pour le territoire français dans sa globalité, les autres modèles cités et analysés peuvent être utilisés de l'échelle de la ville à celle de la France, voire à l'étranger (PROSPENER et GEMIS) après mise à jour d'un certain nombre de données (facteurs d'émissions et mix énergétique notamment).

**PROSPENER** est un outil de calcul développé par le bureau d'études ICE, adaptable à tout territoire en fonction des bases de données disponibles. Il a été utilisé dans de très nombreuses situations : communes (Grand Lyon, Mulhouse, Voiron, etc.), régions (Rhône alpes, Ile-de-France, etc.), territoire national, Europe. Il permet à la fois la réalisation d'un bilan suffisamment détaillé pour comprendre les principaux postes de consommation et d'émissions et leurs causes, et une modélisation prospective dynamique. Il s'agit donc d'un modèle destiné à alimenter des exercices de prospective sur des bases techniques argumentées et détaillées, permettant de modéliser un grand nombre d'actions à portée des décideurs publics, de façon à permettre la construction de stratégies et de plans d'actions territoriaux. Sur un plan technique, ce modèle peut être qualifié de bottom-up, sectoriel (même si des développements sont en cours pour tendre vers un outil systémique) et dynamique.

**GEMIS** est un outil mis au point par l'öko-institut et l'université polyvalente de Kassel. L'outil a été utilisé dans un grand nombre de situations, notamment au niveau de la commune ou de l'agglomération. En permettant d'évaluer les impacts environnementaux et économiques des systèmes énergétiques, GEMIS est

un outil d'aide à la décision pour les collectivités le mettant en œuvre et peut apporter ainsi des éléments essentiels à l'élaboration de la stratégie et de la planification énergétique du territoire. C'est donc un véritable appui aux choix des investissements énergétiques des territoires. Un modèle « BASIS », non libre d'accès a été développé pour la définition de scénarios.

**ENERTER** est un outil développé par le bureau d'études Energie Demain. Il permet une vision à long terme des consommations énergétiques du secteur bâti et d'identifier les gisements d'économie. Les échelles d'application vont de la commune à celle de la France entière et de très nombreuses études ont déjà été réalisées. Le modèle est fondé sur des bases de données statistiques (INSEE en particulier) et des données architecturales et morphologiques ajoutées grâce au travail d'historien de l'architecture. ENERTER est donc adapté aux politiques énergie-climat de type plans climat et bilan énergétique territorial pour des mesures portant sur les secteurs résidentiel et tertiaire uniquement.

L'outil **SceGES** a été développé par le bureau d'études français Énergies Demain en partenariat avec le MEEDDM, le CITEPA, l'École des Mines de Paris, l'INRA ainsi que Solagro. SceGES a été développé initialement pour analyser les politiques nationales. Il prend donc en compte l'ensemble du territoire français, espaces urbains comme espaces ruraux. SceGES a été utilisé pour tester les hypothèses du Grenelle de l'Environnement ainsi que pour établir le Plan Climat national 2009.

### 2.3.2. Modèles « simplifiés »

Parmi les outils disponibles en France, citons NECATER dont le but est d'analyser succinctement la neutralité carbone de programmes d'aménagement, et Urba-GES qui vise à apporter un éclairage rapide sur l'impact en termes d'émissions de GES d'orientations prises en termes de planification territoriale.

Le modèle UIAF du Tyndall Centre (Royaume-Uni) a été développé pour simuler l'évolution des impacts climatiques et des émissions de GES à l'échelle de la ville. L'un des atouts du modèle est d'avoir couplé un outil simplifié de quantification des émissions de GES (GRIP) avec une série de sous-modèles physiques (modèles climatiques) et économiques (modèle LUTI) permettant d'alimenter la réflexion prospective.

L'outil **NECATER** (NEutralité CARbone des TERRitoires) a été développé par le bureau d'études français Energies Demain pour la Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires (Diact). Son échelle d'application est l'opération d'aménagement depuis la phase de réalisation du projet jusqu'à la fin de sa durée d'exploitation. Bien que tenant compte des spécificités régionales et distinguant 70 actions selon cinq thèmes, NECATER est un outil relativement imprécis, dont l'intérêt réside dans l'exhaustivité des projets qu'il évalue,

**URBA-GES** est un outil développé par le CERTU, permettant en particulier de modéliser les impacts GES des actions que peuvent mettre en œuvre les collectivités dans leurs documents d'urbanisme ou opérations d'aménagement. Il ne vise pas une quantification exhaustive des GES d'un territoire mais la quantification en termes d'émissions générées ou évitées d'hypothèses spécifiques liées à l'aménagement d'un territoire (comparaison de scénarios). L'outil tente également de proposer une approche systémique, en « forçant » l'utilisateur à se positionner sur les impacts intersectoriels. L'outil est actuellement en phase de test auprès de 12 collectivités.

Le **Modèle UIAF** du Tyndall Center est un outil qui a vocation à être utilisé par les responsables de la politique urbaine, les planificateurs et les ingénieurs pour comparer les alternatives en stratégie d'atténuation et d'adaptation, au Royaume-Unis. L'UIAF se veut un outil intégré. Il comporte ainsi de nombreuses approches : évaluations quantitatives d'impacts climatiques et d'émissions à une échelle urbaine (outil **GRIP**), scénarios climatiques et de changements socio-économiques pour le 21<sup>ème</sup> siècle, interactions entre l'usage du sol, les transports et les impacts climatique, analyse des options d'adaptation et d'atténuation dans une même structure, L'outil technico-économique sous-jacent, GRIP, disponible sur internet apparaît cependant simpliste.

Développé par la société suisse ECOSpeed, **EcoRégion** est un outil permettant d'effectuer très rapidement un bilan chiffré des consommations énergétiques et émissions de GES d'un territoire à partir d'une déclinaison des données nationales. Relativement peu précis et n'offrant pas de vision dynamique, son intérêt réside cependant dans le travail collaboratif en ligne qu'il permet.

### 2.3.3. Limites

S'ils permettent de modéliser précisément l'état des lieux énergie-GES d'un secteur et les impacts de mesures sectorielles de politiques énergétiques, les outils technico-économiques analysés ne sont

actuellement pas capables de simuler des impacts multisectoriels d'une mesure, par exemple une mesure d'urbanisme, qui pourrait impacter à la fois sur le bâtiment, le transport de personnes et le transport de fret. Ce type d'approche plus systémique est l'objet de travaux R&D (Citons par exemple le projet ANR/ASPECT-2050) et devrait être particulièrement utile pour orienter les territoires vers des choix plus consistants.

## 2.4. Base de données outils de calcul

Les outils de calcul et modèles analysés dans le cadre de cette étude sont d'origines diverses :

- Institut ou laboratoire de recherche
- Bureaux d'étude
- Acteurs institutionnels
- Acteurs opérationnels

La diversité des origines implique une grande diversité quant aux méthodologies employées et au type d'approche privilégiée. Les outils de calcul et modèles analysés sont au nombre de 31 et recouvrent un spectre international : France, Europe, Amérique du Nord, Asie.

Ils sont regroupés dans une base de données outils sous format Excel® qui détaille un grand nombre d'information relative à chaque outil :

- Informations sur le concepteur : pays, statut...
- Les finalités de conception : scientifique, politique ou commerciale
- Les sources des outils
- Le périmètre d'activité
- Le but de l'analyse : photographie au temps t, analyse ex post, prévision d'impact, scénarios...
- Les secteurs concernés : énergie, industrie, déchets, agriculture...
- La méthodologie de constitution des données d'entrée
- Les sorties des outils par type : énergie, environnement, socioéconomique
- L'horizon temporel et l'échelle spatiale
- Ainsi qu'une série d'information concernant l'ergonomie ou encore les capacités opérationnelles.

La liste suivante présente les outils de calculs et modèles étudiés :

- |   |  |
|---|--|
| 1. ARIADNE (ACV Echelle quartier)   | 18. Parshall et al   |
| 2. UIAF (Urban Integrated Assessment Framework)                             | 19. ANTONIN ANalyse des Transports et de l'Organisation des<br>Nouvelles Infrastructures |
| 3. SYNCITY  | 20. MODUS  |
| 4. GEMIS  | 21. Modèle stratégique de déplacements de l'agglomération<br>lyonnaise                   |
| 5. SceGES   | 22. TRANUS   |
| 6. ENERTER  | 23. MATISSE  |
| 7. NECATER  | 24. Transportation and Environment Strategy Impact Simulator<br>(TRESIS)                 |
| 8. PROSPENER  | 25. URBANSIM   |
| 9. Urba GES   | 26. GLOBAL   |
| 10. Residential energy end-use model  | 27. DRAM/EMPAL (METROPILUS pour la version avec SIG)                                     |
| 11. Toru Matsumoto  | 28. MEPLAN   |
| 12. Yamaguchi   | 29. IMACLIM-R  |
| 13. Energy efficiency strategy for CO2 emissions in a residential<br>sector | 30. IMPACT de l'ADEME  |
| 14. GHG emissions analysis protocol   | 31. COPERT   |
| 15. Michalik et al.   |  |
| 16. Heiple et Sailor  |  |
| 17. Inventory of NYC GHG emissions, The City of New York                    |  |

## 2.5. Conclusions

Il existe, comme le montre le tableau 6, un grand nombre d'outils susceptibles d'être mobilisés par les collectivités sur la problématique énergie-climat (notre tour d'horizon étant par ailleurs loin d'être exhaustif).

Comme le signale Morency (2010), « aujourd'hui, et ce de part et d'autre de l'Atlantique, la nécessité de confirmer la durabilité des projets urbains est déterminante dans le développement des modèles transport-urbanisation et dans leur opérationnalisation pour répondre à des demandes criantes d'accompagnement du processus de prise de décision ». Le grand nombre de modèles développés et présentés succinctement dans cette synthèse s'accordent avec cette nécessité de modéliser les interactions urbaines, l'écosystème

urbain, l'objectif étant progressivement de répondre au besoin de connaître l'incidence de tels ou tels choix de projet urbain ou de projet de territoire.

Le nombre de modèles issus du monde de la Recherche & Développement montre l'ambition opérationnelle de ceux-ci. Le nombre est également représentatif des différents points de vue, angles d'analyse possibles pour décrire un aspect du fonctionnement d'une ville ou d'un morceau de territoire. Les objets, les échelles, les relations observées, les paradigmes changent, ne permettant pas de sélectionner le meilleur modèle, le choix dépendant de l'objectif visé.

Chaque outil vient ainsi répondre à une question spécifique : congestion, part modale, impact des infrastructures sur l'affectation des sols, etc. pour ne citer que des exemples dans le domaine du transport et de l'usage des sols.

En ce qui concerne les outils technico-économiques sectoriels, il ressort de l'analyse deux principaux types d'outils : les outils « exhaustifs » et les outils « simplifiés ». S'ils permettent de modéliser précisément l'état des lieux énergie-GES d'un secteur et les impacts de mesures sectorielles de politiques énergétiques, les outils technico-économiques analysés ne sont actuellement pas capables de simuler des impacts multisectoriels d'une action.

**Tableau 6 : Outils étudiés dans le cadre du projet « état de l'art des indicateurs et des outils de calcul de consommation énergétique et de gaz à effet de serre »**

Outils	Pays	Stade de développement (R&D, opérationnel, interne labo de recherche, méthodologie, etc.)	Accessibilité (freeware, payant, licence, etc.)	Echelle d'application (quartier et/ou ville)	Type d'outils (multi-agents comportementaux, LUTI, etc.)	Objectifs de l'outil (calcul des émissions de GES, etc.)	Nombre de cas mis en œuvre avec cet outil
VISUM	Allemagne	Opérationnel	Payant	Quartier jusqu'au pays	Modèle d'affectation statique et macroscopique	Prévision des flux de trafic	> 100
TRANSCAD	USA	Opérationnel	Payant	Quartier jusqu'au pays	Modèle d'affectation statique et macroscopique	Prévision des flux de trafic	> 100
OMNITRANS	Australie	Opérationnel	Payant	Quartier jusqu'au pays	Modèle d'affectation statique et macroscopique	Prévision des flux de trafic	
EMME	Canada	Opérationnel	Payant	Quartier jusqu'au pays	Modèle d'affectation statique et macroscopique	Prévision des flux de trafic	> 100
CUBE	USA	Opérationnel	Payant	Quartier jusqu'au pays	Modèle d'affectation statique et macroscopique	Prévision des flux de trafic	> 100
CUBE Land	USA	Opérationnel	Payant	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
MARS	Autriche	R&D	Gratuit	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
URBANSIM	USA	R&D	Open Source	Agglomération	Modèle LUTI dynamique	Prévision usage du sol	
TRANUS	Venezuela	R&D	Gratuit	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
IRPUD	Allemagne	R&D	Gratuit	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
DSCMOD	Grande-Bretagne	R&D	Gratuit	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
MUSSA	Chili	R&D	Gratuit	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
DELTA	Grande-Bretagne	R&D	Gratuit	Agglomération	Modèle LUTI d'équilibre	Prévision usage du sol	
ARIADNE	France	R&D opérationnelle	-	Quartier	ACV	Evaluation environnementale	< 10
GEMIS	Allemagne	Opérationnel	Freeware	Toutes échelles	Technico-économique	Emissions de GES	inconnu

Outils	Pays	Stade de développement (R&D, opérationnel, interne labo de recherche, méthodologie, etc.)	Accessibilité (freeware, payant, licence, etc.)	Echelle d'application (quartier et/ou ville)	Type d'outils (multi-agents comportementaux, LUTI, etc.)	Objectifs de l'outil (calcul des émissions de GES, etc.)	Nombre de cas mis en œuvre avec cet outil
SCEGES	France	Opérationnel	Disponible auprès de la Direction Générale de l'Energie et du climat	Ville	Technico-économique	Emissions de GES	> 10
ENERTER	France	Opérationnel	Payant	Ville	Technico-économique	Consommations énergétiques Emissions de GES	> 10
NECATER	France	Opérationnel	Payant	Programmes d'aménagement tous échelles	Technico-économique		> 10
PROSPENER	France	Opérationnel	Payant	Ville	Technico-économique		> 10
URBAGES	France	Sub-opérationnel	Freeware	Multi-échelles	Technico-économique		> 10
SYNCITY	UK	R&D	Payant	Ville	Modèle intégré Multi-agents/morphologique	Optimisation énergétique	< 10
UIAF	UK	R&D			Technico-économique	Emissions de GES	< 10
Shimoda et al.	Japon	interne labo de recherche	interne labo de recherche	quartier/ville	multi agent	Energie, GES	1
Matsulmoto et al.	Japon	interne labo de recherche	interne labo de recherche	ville	énergie environnement	conso énergie	1
Ashina	Japon	interne labo de recherche	interne labo de recherche		économique	impact politique réduction énergie	
Yamaguchi	Japon	interne labo de recherche	interne labo de recherche	quartier	morphologique	Energie, GES	1
ICLEI	US	opérationnel	ouvert	ville	énergie environnement	GES	protocole de base, donc beaucoup de cas
Michalik	Australie	opérationnel	interne labo de recherche	quartier/ville	multi agent	électricité	
Heiple et Sailor	US	opérationnel	interne labo de recherche	quartier	multi agent	conso énergie	
Inventaire émissions NYC	US	opérationnel	ouvert	ville	énergie environnement	GES	2
Parshall	US	interne labo de recherche	interne labo de recherche	quartier	économique	GES	1
EEP	GB	opérationnel	interne labo de recherche	quartier	énergie environnement	Energie, GES	3
APUR	France	opérationnel	interne labo de recherche	quartier	morphologique	Energie, GES	1
Bilan carbone ADEME, Paris	France	opérationnel	ouvert	quartier/ville	énergie environnement	GES	> 30 (pour collectivités)
URBS	France	interne labo de recherche	interne labo de recherche	quartier	énergie environnement	Energie, GES	1

L'une des contraintes récurrentes des modèles étudiés est l'utilisation systématique des coefficients d'émission. Certains modèles, en particulier ceux inspirés par le protocole d'inventaire développé par l'ICLEI, sont structurés de façon binaire : la première partie consiste à calculer les consommations énergétiques agrégées, la deuxième à calculer les niveaux d'émission associés, sur la base des coefficients d'émission par type d'énergie et système énergétique.

Une dérive dans certains de ces modèles consiste alors à calculer les niveaux de consommation énergétique sur la base des données agrégées à l'échelle de la ville : agrégation globale des factures d'électricité ou des consommations globales en gaz. Le modèle ne permet alors pas – et ce structurellement – d'étudier les causes des consommations énergétiques en amont, encore moins d'identifier les leviers d'actions possibles pour les diminuer. Du fait de leur construction même, ces modèles permettent uniquement de jouer sur la modification des coefficients d'émission (nouveaux systèmes, passage d'une énergie à une autre, systèmes à l'échelle du quartier comme la cogénération, etc.), et non sur les consommations amont. Cette méthode peut certes donner lieu à de fortes réductions des émissions, mais se limite à une part faible (amélioration de l'efficacité des systèmes et des comportements) du facteur global, englobant également les paramètres structurels d'efficacité du tissu urbain (connectivité, morphologie, orientation, etc.). De plus, la mise en œuvre de mesures technologiques, entreprises sans prise en compte globale des phénomènes (et en particulier des comportements), peut hypothéquer les opportunités futures de réduction des émissions de GES, par le biais des autres facteurs en particulier.

L'analyse critique des modèles a également montré l'importance de la séparation des différents facteurs contribuant aux consommations énergétiques et aux niveaux d'émission. Seule cette approche peut permettre d'isoler les différents leviers d'action disponibles pour les pouvoirs publics et d'identifier leur efficacité. La difficulté réside alors dans le délicat équilibre entre un modèle complexe, prenant en compte toutes les échelles urbaines et les différents usages (et donc la multiplicité des leviers d'action), et un modèle accessible aux pouvoirs publics et suffisamment opérationnel. D'une certaine manière, c'est encore une fois la nécessité d'identifier l'intérêt d'avoir à la fois des indicateurs agrégés et des indicateurs plus sectoriels et précis qui est en question ici. L'un comme l'autre ayant des objectifs différents mais complémentaires.

Il est à noter que les collectivités considèrent peu l'indicateur comme un éventuel facteur d'entrée d'un modèle mais davantage comme un élément d'appréciation de leur territoire. Il suffit de comparer les éléments d'entrée d'un modèle comme le Bilan Carbone, pourtant de plus en plus utilisé par les collectivités territoriales, et les indicateurs classiquement retenus par une collectivité pour mesurer l'écart entre données d'entrée d'un outil de calcul et les indicateurs. Le Bilan Carbone s'intéressera par exemple à des km parcourus, des consommations d'essence, etc., alors que la collectivité privilégiera ce qui montre son action : la longueur de piste cyclable et de voies bus, la population desservie par les transports en commun, etc.

Les différents travaux conduits sur les indicateurs et les outils ont aussi permis de saisir le rôle primordial de la communication entre les milieux académiques (qui construisent les modèles), les sociétés d'ingénierie (à la fois concepteur de modèles et prestataires de services pour le compte des collectivités territoriales), et les collectivités territoriales, aménageurs, etc. qui les utilisent.

L'analyse des politiques et des modèles japonais a mis en évidence les difficultés engendrées par un manque de communication entre les laboratoires de recherche et les politiques. Les philosophies des modèles japonais sont variées, de l'approche multi-agent comportementale (Shimoda et al, 2007), à l'approche économique (Ashina et al, 2008), en passant par des approches prenant en compte la morphologie des bâtiments (Yamaguchi et al, 2007). Ces modèles complexes sont des outils détaillés particulièrement utiles pour simuler la consommation énergétique à l'échelle des villes. Mais les analyses sont segmentées, traitant par exemple soit des bâtiments commerciaux, soit des quartiers résidentiels. De plus, ces modèles sont très complexes pour être utilisés tels quels par les pouvoirs publics pour la mise en œuvre et l'évaluation de politiques urbaines et nécessitent de ce fait l'intervention de bureaux d'études spécialisés.

Le manque de communication entre les milieux académiques et les autorités chargées de la mise en place des systèmes d'évaluation et des politiques apparaît également en France comme à l'étranger. Alors que les universités japonaises développent des modèles sophistiqués et parfois difficiles à mettre en œuvre sur le plan opérationnel, les autorités territoriales (japonaises) continuent de s'appuyer sur des outils majoritairement basés sur des critères qualitatifs, et sans réelle fondement solide sur le plan technique et scientifique.

L'autre extrême apparaît dans certains modèles académiques nord américains, qui suivent de trop près les protocoles du type de ceux publiés par l'ICLEI, une association internationale regroupant des gouvernements locaux. Cette trop grande proximité entre élaborateurs des modèles et institutions publiques peut dans ce cas brider les capacités tant techniques qu'opérationnelles des modèles urbains.

### **3. Troisième partie : Articulation des indicateurs et outils énergie/GES avec les autres démarches françaises existantes**

Cette partie traite de l'articulation entre les indicateurs et les outils de calculs énergie/GES avec les outils susceptibles d'accompagner la pratique de l'urbanisme et de la construction :

- Loi SRU et réglementation (RT)
- Documents d'urbanisme (SCOT, PLU, PDU, PLH)
- Schémas et référentiels indicatifs (Plan Climat, Schémas régionaux, labels et référentiels bâtiments, référentiels urbanismes durables)
- Méthodes d'intervention (maîtrise d'ouvrage directe, mesures informatives, financières, fiscales, normatives ou législatives)

Ces travaux s'appuient en particulier sur le recensement des indicateurs exposés dans les parties précédentes, complété par une analyse approfondie des indicateurs utilisés dans le cadre de l'évaluation environnementale<sup>3</sup> à laquelle doivent satisfaire certains documents d'urbanisme comme les SCOT, les PLU, les cartes communales et les PDU.

#### **3.1. Cadre législatif et réglementaire**

Le dispositif législatif et réglementaire encadrant l'aménagement du territoire en France a évolué en fonction de différents facteurs tels que la prise en compte de l'environnement ou la décentralisation. Le dispositif actuel s'appuie sur trois types d'outils :

- **les outils de la planification** avec les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les directives territoriales d'aménagement (DTA et DTADD), qui organisent le territoire à différentes échelles ;
- **des outils programmatiques et sectoriels** qui, par domaine, permettent d'étudier et d'organiser un ensemble cohérent de projets hiérarchisés pour prendre en compte les priorités et les moyens à y affecter (PDU, PLH, PCET, SRCAE, etc.) ;
- **le principe de contractualisation** qui engage les différents acteurs sur des projets à financer en tenant compte des priorités de chacun (contrats entre les collectivités locales et l'état, contrats entre les collectivités publiques et les acteurs privés, etc.).

La cohérence entre les différents outils est assurée par les règles de compatibilité à respecter.

Dans la pratique le rapport de compatibilité s'exprime par la définition d'un cadre général, d'orientations et d'objectifs par les documents de hiérarchie supérieure alors que les documents de hiérarchies inférieures précisent une lecture territorialisée et les moyens de mise en œuvre. La norme supérieure est opposable à la norme inférieure.

Ainsi, avec la loi SRU, la directive européenne 2001/42/CE, la loi POPE, les lois Grenelle I et II et ses décrets d'application, les politiques d'urbanisation ont connu depuis 10 ans des évolutions majeures visant à réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement et notamment l'axe énergie / réduction des émissions de GES.

Dans le but de mesurer l'impact des projets d'aménagement sur le territoire, la loi portant Engagement National pour l'Environnement renforce l'obligation d'analyse des résultats de l'application des documents d'urbanisme (SCOT, PLU et PDU) et la nécessité de réaliser des évaluations environnementales durant tout le processus (ex-ante, in-itinere, ex-post) d'élaboration et de mise en œuvre des politiques d'urbanisation.

De fait, la démarche d'évaluation environnementale nécessite de s'appuyer, dès la phase de diagnostic, sur des indicateurs pertinents qui permettent de suivre dans le temps l'évolution des enjeux environnementaux, sociaux et économiques sur le territoire et d'apprécier l'application des documents d'urbanisme.

---

<sup>3</sup> Cf. Circulaire n° 2006-16 UHC/PA2 du 6 mars 2006 relative à l'évaluation des incidences de certains documents d'urbanisme sur l'environnement.

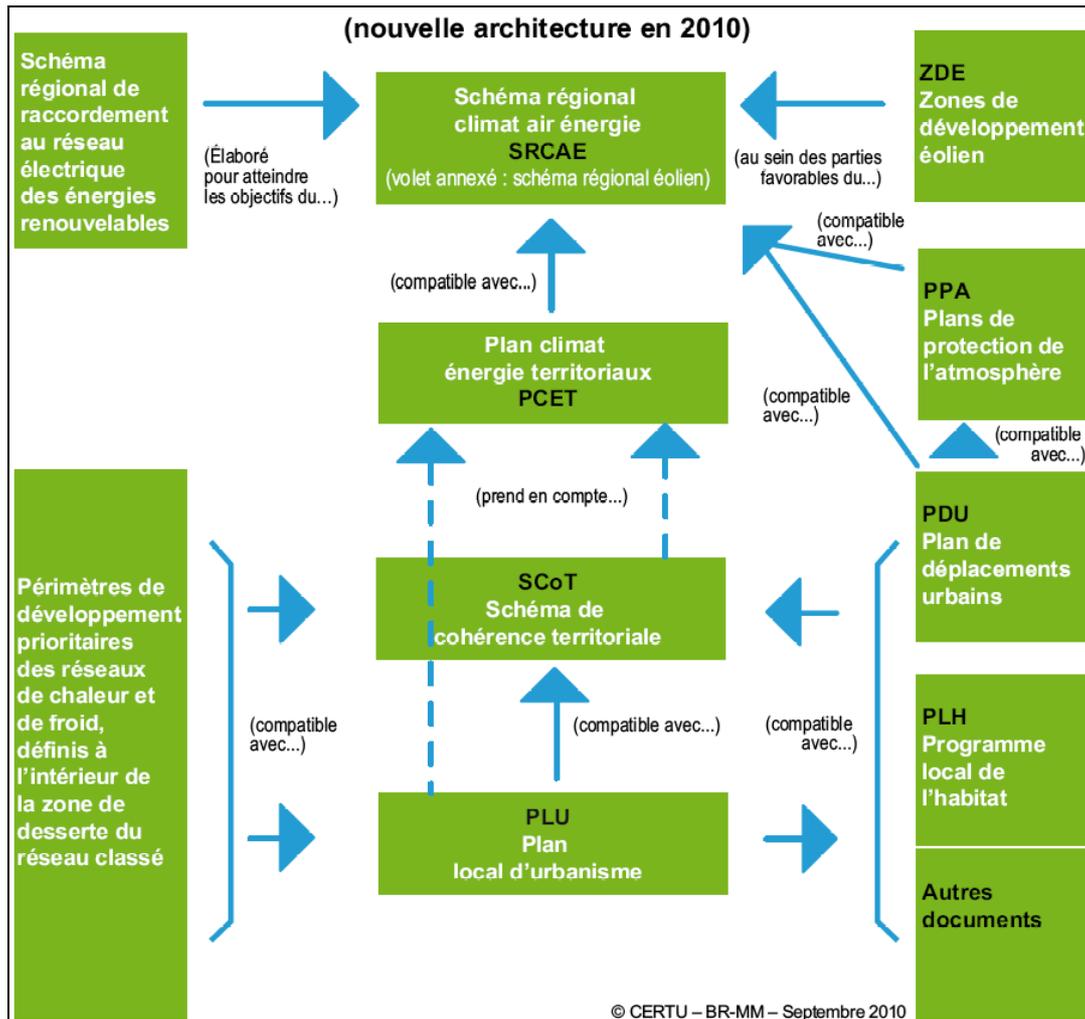


Figure 1 : Rapport de compatibilité entre les documents de planification, © CERTU

L'évaluation environnementale, imposée à plusieurs échelles (DTA, SCOT, PLU, PDU, cartes communales) constitue un premier point d'articulation des documents de planification autour des indicateurs notamment ceux en rapport avec l'Energie et le climat. On peut ainsi envisager l'existence d'un cadre d'évaluation défini à une échelle territoriale supérieure qui serait décliné aux échelles inférieures et susceptible d'être d'abord contextualisé et ensuite complété afin de répondre aux exigences. La superposition ou la proximité des territoires d'action entraîne cependant nécessairement des enjeux communs, des impacts mutuels qu'il serait certainement intéressant de coordonner.

En outre, le législateur a décliné à différentes échelles dans les textes de loi les exigences en matière d'évaluation des consommations d'énergie et d'émission de GES. Aussi, les décrets d'application précisent les éléments qui feront l'objet d'un suivi et d'un bilan en termes de consommation ou d'émission. Bien que les indicateurs ne soient pas précisément nommés, il semble relativement aisé, d'après les objectifs visés d'en déduire leur consistance.

### 3.2. Retours d'expérience

Un certain nombre d'expérimentation d'évaluation de SCOT, de PLU ou de PDU, ont été menés par quelques collectivités désireuses de réaliser une évaluation environnementale à l'aide d'indicateurs de développement Durable (et donc comportant un volet énergie-climat). Les retours d'expérience réalisés

récemment sur la mise en œuvre de l'évaluation environnementale dans 14 PDU<sup>4</sup> (juin 2011) et la prise en compte de l'énergie, du climat et des déplacements dans 12 SCOT<sup>5</sup> (mars 2010 et juillet 2011) ont ainsi en particulier alimenté nos réflexions. Ces retours d'expériences sont présentés au sein du rapport sur la tâche 4.

Des travaux de recherche ont en outre été engagés depuis la directive européenne 2001/42/CE pour tenter de définir des indicateurs de développement durable pour l'évaluation des politiques de planification et d'urbanisme. Dès 2003, le Ministère de l'écologie et du développement durable et le Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer avait lancé conjointement un appel à recherche sur le thème « politiques territoriales et développement durable » où figurait la question de l'évaluation des politiques publiques territoriales au regard du développement durable.

L'articulation des documents de planification est assurée sur le plan réglementaire, en ce qui concerne les politiques énergétiques et de réductions des émissions de GES, par la mise en compatibilité qui impose au document de niveau inférieur un suivi et un respect des principes essentiels du document de niveau supérieur.

L'ambition d'amener à la baisse les consommations et les émissions se retrouve dans l'ensemble des documents généraux. Les chartes Eco quartiers et les démarches EcoCité cherchent à aller plus loin dans cette ambition, et se positionnent surtout comme des démarches expérimentales exemplaires et reproductibles. A contrario d'autres territoires suivent le mouvement a minima.

Malgré le fait que les objectifs fixés soient les mêmes à l'échelle d'un PCET, d'un SCOT ou d'un PDU, le niveau de mise en œuvre peut fluctuer d'une commune à une autre, d'un secteur à un autre. A titre d'exemple, lorsqu'un PDU décide, dans une optique de limiter la place de la voiture dans les centres urbains, de réduire le stationnement, il revient au maire de définir sur sa commune le niveau de réduction des places de parking. L'effectivité de la mesure va donc dépendre de l'engagement du maire et de sa volonté d'aller dans le sens du PDU.

A titre d'exemple, le document d'orientation élaboré dans le cadre du SCOT –Grenelle de Caen-Métropole renvoie aux documents locaux (PLU ou PDU) bon nombre d'orientations :

- les modalités d'insertion urbaine des transports en commun (TC) desservant les pôles ;
- les possibilités de création de parcs relais ;
- la définition des corridors desservis par les transports en commun en site propre (TCSP) ou les lignes structurantes du réseau urbain et les principes de limitation du stationnement à l'intérieur de ces corridors. De plus, à l'intérieur de ces corridors, les documents d'urbanisme devront prévoir des dispositions spécifiques d'aménagements, en termes de densité et de mixité, au regard de la qualité de la desserte en transports collectifs ;
- l'urbanisation autour des TC, la promotion des modes doux et de l'autopartage.

La mise en œuvre du SCOT se traduira essentiellement dans les PLU qui seront élaborés ou révisés dans le périmètre du SCOT, ce qui nécessitera un délai supplémentaire pour la mise en œuvre des actions.

Ainsi, entre une démarche énergie-climat initiée au niveau régional et/ou départemental, voire à l'échelle d'un établissement public de coopération (EPCI), et des politiques sectorielles en matière de maîtrise de consommation énergétique (développement des EnR, éco-quartiers, démarche Haute Qualité Environnementale, etc.), le SCOT, en interface avec les différentes échelles territoriales, peine à trouver la meilleure approche pour prendre en compte la question de l'énergie et des GES. Dans certains cas, le SCOT permet de transcrire et d'assembler les résultats des démarches régionales et/ou départementales d'Agenda 21 et/ou de plan climat énergie territorial (PCET). Dans d'autres cas, c'est le SCOT qui élabore un volet énergie et développe le thème énergie-climat dans une approche environnementale.

Les indicateurs sont élaborés pour permettre de juger de la situation actuelle (indicateurs d'état) et d'appréhender au mieux les impacts induits par les actions engagées (indicateurs de réponse) par les pouvoirs publics. Lorsque les actions ne sont pas coordonnées, un cadre commun d'évaluation est

---

<sup>4</sup> Liste des PDU : CABRI (Saint-Brieuc), Grand Nancy, Perpignan Méditerranée, Pays Voironnais, Territoire de la Côte Ouest – TCO (La Réunion), Reims Métropole, Nîmes Métropole, Rennes Métropole, CANCA (Nice), CASA (Sophia-Antipolis), CC du bassin de Pompey, AggIO (Orléans), Agglopolo Provence (Salon-de-Provence), SMTC de l'agglomération clermontoise (Clermont-Ferrand)

<sup>5</sup> Liste des SCOT : SCoT de l'aire métropolitaine bordelaise, SCoT Région Grenobloise, SCoT Caen Métropole, SCoT sud Meurthe-et-Moselle, SCoT du Valenciennois, SCoT de la région d'Arras, SCoT Provence verte, SCoT Marne Brosse et Gondaire, SCoT de la Communauté d'Agglomération de Cergy-Pontoise, SCoT du pays de la Baie du Mont-Saint-Michel, SCoT du Pays des Cévennes, SCoT Ouest Alpes-Maritimes

difficilement concevable. Ainsi majoritairement, chaque niveau d'action élabore son propre tableau de bord, sa propre « politique d'indicateurs » sans réelle concertation et collaboration avec les autres niveaux.

### **3.3. L'émergence d'une base commune d'indicateurs**

Ainsi, bien que le cadre législatif et réglementaire permette à ce jour aux collectivités de coordonner et de déployer au sein de leur territoire toutes les actions nécessaires à la réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES, les systèmes de suivi et de monitoring peinent à se mettre en place et sont présentés comme des axes innovants de progrès comme en témoignent les collectivités qui ont concouru à l'appel à projet Ecocités. Les projets démonstrateurs de bâtiments à très haute performances énergétiques ou à énergie positive, les systèmes de monitoring urbains des polluants atmosphériques, ou encore les projets de smartgrids sont présentés comme des outils permettant d'optimiser les consommations énergétiques, de favoriser le développement des EnR et de réduire les émissions de GES.

Les retours d'expérience des premières mises en applications des directives de la loi Grenelle II concernant l'évaluation environnementale des documents d'urbanisme et de planification (PCET, SCOT, PLU, PDU) démontrent que l'utilisation d'indicateurs de mesure reste encore balbutiante, du fait notamment des difficultés de mise en œuvre au niveau local, répondant à un contexte particulier, des difficultés pour les services qui interviennent à des niveaux différents au sein d'une même collectivité de bâtir un outil d'évaluation commun, et enfin des difficultés liées à l'acquisition des données et à leur mise à jour régulière.

Cependant, l'analyse de la base de données indicateurs, construite dans le cadre de ce projet, fait apparaître une certaine récurrence dans les indicateurs d'évaluation qui ont une portée territoriale à plusieurs échelles (SCOT, PLU, PDU). Ceci laisse entrevoir une possibilité d'articulation entre les documents de planification. Ces indicateurs sont par exemple : la consommation énergétique sur le territoire par secteur d'activité (habitat, industrie, transport, tertiaire, agricole), la consommation énergétique sur le territoire par type d'énergie (électricité, charbon, gaz, hydrocarbures, ENR), les émissions de gaz à effet de serre du territoire, la production d'énergie renouvelable sur le territoire (éolien, solaire, biomasse, hydraulique), etc.

En revanche, lorsque l'on se place à l'échelle du projet opérationnel, les éléments de mesure sont très disparates d'une collectivité à l'autre confirmant le fait que chaque collectivité recherche avant tout à adapter le système de mesure au contexte local et aux moyens dont elle dispose pour en assurer le suivi.

### **3.4. Des évolutions déjà en cours**

En parallèle du cadre réglementaire, qui ne donne pour l'instant que peu d'éléments sur le choix des indicateurs permettant d'articuler les démarches et de mesurer les GES et l'énergie, des initiatives volontaires tentent d'apporter les outils méthodologiques nécessaires à l'élaboration d'un tableau de bord d'indicateurs. Il s'agit en particulier de la démarche AEU qui grâce aux développements en cours va converger de façon plus accrue vers le référentiel d'évaluation des projets territoriaux des agendas 21 qui lui-même, fait l'objet d'une actualisation par le Conseil Général du Développement Durable. En parallèle, un groupe de travail piloté par le MEDDTL et la CDC est entrain d'établir un guide sur l'évaluation des écoquartiers, dans le but de fournir aux collectivités une aide dans le choix des indicateurs.

Ainsi, parties dès le début en ordre dispersé, les collectivités ont jusqu'à présent développé à leur manière, leur méthode et mis en place un système de gouvernance propre à leur territoire. Cependant, on peut remarquer la volonté de l'état et de l'Europe de reprendre la main sur les directives à suivre en matière d'énergie et de GES.

En témoignent la décision du parlement Européen et du conseil du 23 avril 2009, relative à l'effort à fournir par les Etats membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la Communauté européenne en matière de réduction de ses émissions jusqu'en 2020, ou encore les décrets de 2011 concernant les SCRAE, les bilans carbone et les PCET. Par ailleurs, le ministre en charge de l'écologie avait jusqu'au 30 septembre 2011 pour mettre à la disposition des collectivités territoriales et de leurs groupements la méthode d'établissement du bilan des émissions de GES servant de base aux PCET.

La commission Européenne va donner prochainement son avis sur le référentiel européen de la ville durable (RFSC). La construction de ce référentiel, associant 27 pays de l'UE ainsi que la Suisse et la Turquie, vise à donner aux collectivités les outils pour la mise en place de la Charte de Leipzig (mai 2007) et plus largement

pour une évaluation développement durable de leurs politiques publiques correspond à un engagement européen de la France (Déclaration de Marseille en novembre 2008).

Ce référentiel, testé par 66 villes dont Bordeaux, Rennes, Lille-Roubaix, La Rochelle, Le Creusot entre juin 2010 et septembre 2011, n'a cependant pas de vocation normative. Il propose un questionnement (25 questions de base et 86 questions secondaires) construit à partir de l'analyse de 200 référentiels existants, des indicateurs de suivi et un échange de bonnes pratiques.

En revanche, il montre la voie à suivre pour aboutir à un système commun d'évaluation et de suivi des consommations énergétiques et des GES, en tenant compte de l'ensemble des problématiques de la ville durable.

Les efforts engagés au niveau national et Européen devraient ainsi faciliter la mise en place d'un système d'indicateurs partagé et également coordonné avec les politiques et outils d'urbanisme.

## **4. Conclusions et perspectives**

L'analyse des outils de calcul et des systèmes d'indicateurs, réalisée en tâches 1, 2, 3 et 4 du projet et présenté dans les trois parties précédentes a donné lieu à une réflexion critique sur les différents verrous auxquels sont confrontées les politiques urbaines d'efficacité énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique.

Le premier point essentiel qui ressort de l'analyse des outils de calculs et systèmes d'indicateurs est une hétérogénéité quant à la définition des limites des systèmes étudiés. Que l'on se place du côté des outils ou du côté des indicateurs, chacun s'appuie sur des ensembles différents. Comment définir l'agglomération ? Les frontières sont-elles définies sur des critères spatiaux, administratifs, démographiques, fonctionnels ? Où s'arrête la prise en compte des consommations énergétiques et des émissions de GES ? Suivant les cas, les approches varient, depuis le réductionnisme, où seules les consommations pour les transports et le bâtiment sont prises en compte, jusqu'aux approches intégratrices englobant toutes les émissions et consommations attribuables aux habitants : bâtiments, transports dans et hors de la ville (avion notamment), produits importés, nourriture, etc.

La deuxième série d'interrogation issue des premières phases du projet sont relatives à la prise en compte de la complexité des structures urbaines pour la mise en place de politiques efficaces de réduction de la consommation énergétique et des émissions de GES. Les villes sont des systèmes extrêmement complexes. En tant que telle, l'optimisation du système global ne semble pas toujours obtenue pour une optimisation de chacun des sous-systèmes, mais au contraire par une approche plus globale. L'analyse des modèles et outils de calcul internationaux a démontré qu'une approche multi-échelle est susceptible de tenir compte de cette complexité.

Une décomposition de la consommation énergétique met en évidence cinq principaux leviers d'action pour les politiques urbaines : morphologie globale, « passivité » des structures, efficacité des systèmes, substitution et sobriété des comportements individuels. L'intérêt majeur de cette approche est que les différents facteurs ne sont pas additifs mais multiplicatifs.

Le dernier point essentiel émergeant de l'analyse des premières tâches du projet concerne le lien entre les politiques urbaines et les analyses techniques et scientifiques. Au Japon, aux Etats-Unis et en Europe, notre analyse fait apparaître les lacunes et le manque de communication entre les milieux académiques et scientifiques d'une part, à l'origine des modèles et des outils de calcul, et les autorités locales d'autre part, utilisant les systèmes d'indicateurs pour la mise en place des politiques urbaines. Il apparaît essentiel de renforcer le lien entre ces deux milieux.

Les pistes relevées dans les premiers volets de nos travaux ont fait l'objet d'un double approfondissement via une recherche bibliographique et par l'interview d'une trentaine d'experts (institutionnels, du monde académique, ou de l'entreprise) afin d'identifier des axes de recherche opérationnelle, en particulier pour la mise en œuvre des Plans Climat Energie Territoriaux.

Dix axes principaux ont ainsi pu être identifiés, sur des champs thématiques très larges, associés à des enjeux conceptuels (complexité urbaine, appréhension du comportement des consommateurs, appréhension du long terme) ; méthodologiques (gestion des échelles, prise en compte du contexte local, analyse croisée GES/ autres thématiques environnementales, problématique des données) et de gouvernance (difficultés organisationnelles dans des projets multi-acteurs, intégration des réflexions énergie/climat aux documents d'urbanisme, organisation d'un changement de paradigme).

Ces axes font l'objet dans le rapport complet de fiches analysant le contexte dans lequel ils s'inscrivent et les principales pistes de développement associées. La figure 2 résume leur contenu et les liens qu'ils entretiennent.

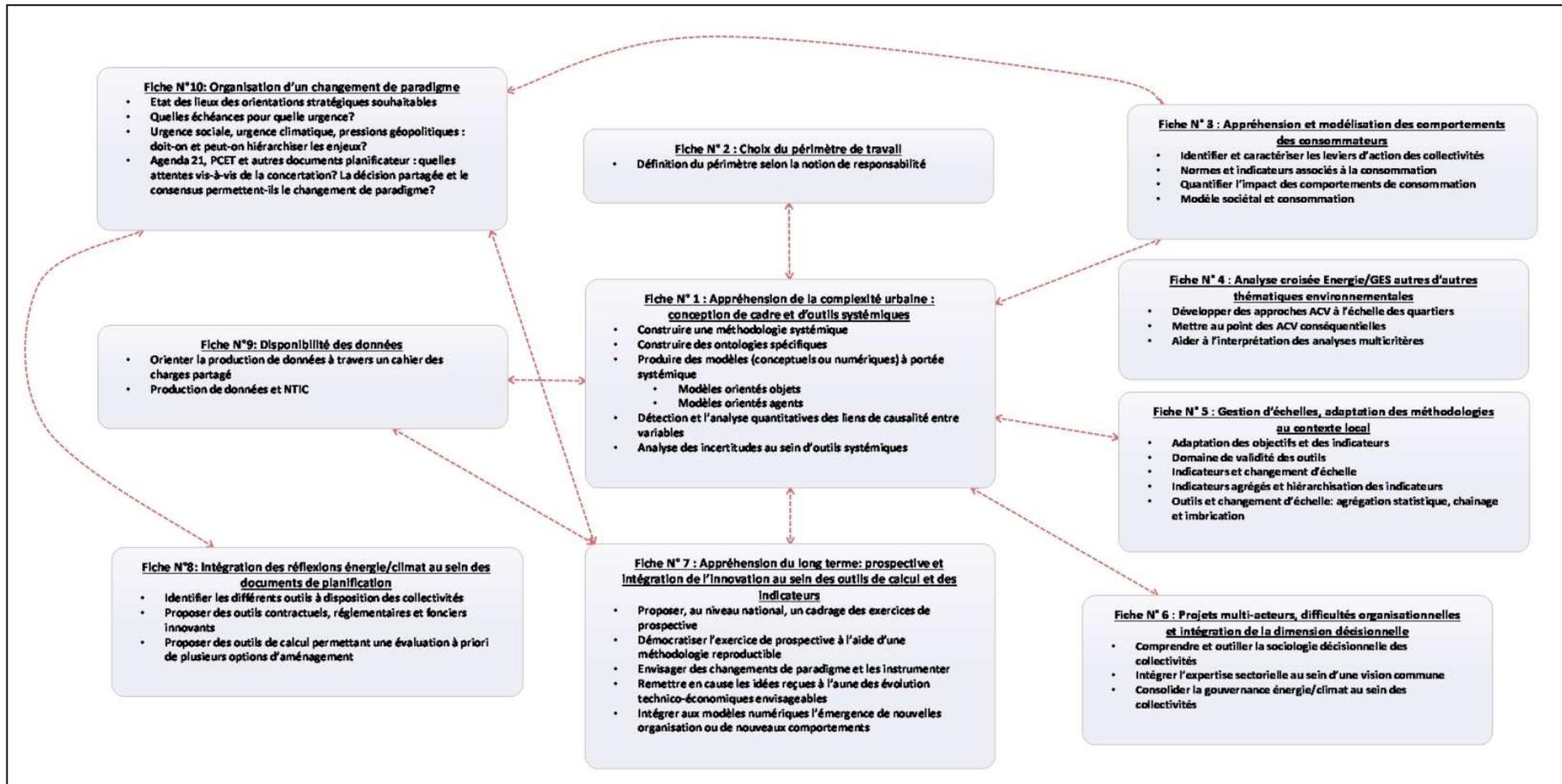


Figure 2 : Proposition de dix axes de recherche

Les travaux réalisés au cours du projet ont ainsi permis de mettre en avant la richesse des sujets d'approfondissement ou de développement relatifs à l'utilisation d'indicateurs et d'outils de calcul dans la mise en œuvre de projets énergétiques et climatiques. Chaque étape semble ainsi comporter son lot de défis : depuis la constitution d'un cadre méthodologique systémique jusqu'à la collecte des données susceptible de l'alimenter, en passant des problématiques de mise en perspective temporelle et géographique des outils.

Si les développements numériques offrent un champ d'expérimentation très important (notamment via le passage de modèles orientés objets à des modèles orientés agents), de nombreuses problématiques méthodologiques et conceptuelles restent posées (questions du périmètre, de la prise en compte des comportements, etc.). En particulier, alors que les prospectives « post carbone » réalisées laissent envisager la nécessité de fortes ruptures pour atteindre le facteur 4, les territoires ne semblent dotés ni des outils conceptuels et techniques ni des outils organisationnels pour envisager de telles ruptures.

Si ces défis soulignent le challenge que constitue l'assemblage technique, juridique, organisationnel, comportemental de la « ville durable », il nous semble que les chantiers associés, même parcellaires doivent être engagés dès à présents, le chemin emprunté pouvant dans un premier temps être plus intéressant que le but recherché.

## **Bibliographie**

### **Références bibliographiques de la synthèse**

- Alonso W. (1964). *Location and Land Use*. Cambridge: Harvard University Press.
- Anas A. (1982). Residential Location Markets and Urban Transportation: *Economic Theory, Econometrics and Policy Analysis with Discrete Choice Models*. New York: Academic Press, ISBN 0-12057920-0.
- Antoni JP (2010). *Modéliser la ville, formes urbaines et politiques de transport*. Paris : Economica, 438 p.
- APUR. (2007). *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*. APUR.
- Ashina et Nakata. (2008a). Energy-efficiency strategy for CO2 emissions in a residential sector in Japan. *Applied Energy* 85 , pp. 101-114.
- Ashina et Nakata. (2008b). Quantitative analysis of energy-efficiency strategy on CO2 emissions in the residential sector in Japan - Case study of Iwate prefecture. *Applied Energy*, 85, pp. 204-217.
- Bruhns et al. (2000). A database for modeling energy use in the non-domestic building stock of England and Wales. *Applied Energy*, 66, pp. 277-297.
- CERTU. *Prendre en compte le développement durable dans un projet, guide d'utilisation de la grille RST02*. CERTU, 2006, septembre 2006, 71 p.
- Chaleard J-L., Pourtier R. (2000). *Politiques et dynamiques territoriales dans les pays du Sud*, Publications de la Sorbonne.
- Colombert, M. De Chastenet, C. Diab, Y. Gobin, C. Herfray, G. Jarrin, T. Peuportier, B. Tardieu, C. Trocme, M. Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier : un outil d'aide à la décision ? Le cas de la ZAC Claude Bernard à Paris (France). *Environnement Urbain Urban Environment*, n°5, 2011 (à paraître)
- Commissariat général au développement durable, mars 2009. *Référentiel pour l'évaluation des projets territoriaux de développement durable et agendas 21 locaux*. Commissariat général au développement durable. Disponible sur : <http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/Refmars.pdf>
- Heiple S., Sailor, D.J. (2008). Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. *Energy and Buildings* 40, pp. 1426-11436.
- ICLEI. (2010). *Local Government Operations Protocol for the quantification and reporting of greenhouse gas emissions inventories Version 1.1*.
- Jones et al. (2007). Modelling the built environment at an urban scale - Energy and health impacts in relation to housing. *Landscape and Urban Planning* 83 , pp. 39-49.
- Keirstead J., Samsatli N. et Shah N., (2009). SYNCITY: an integrated tool kit for urban energy systems modelling. In *Fifth Urban Research Symposium 2009*.
- Matsumoto T. (2002). Energy Demand Model of Residential and Commercial Sectors of Cities: A Case Study of Tokyo. *Proceedings of IGES/APN Mega-City Project* (pp. 1-10). Kitakyushu, Japon: Institute for Global Environmental Strategies.
- McFadden D. (1978). Modelling the choice of residential location, in A. Karlquist et al. (ed.), *Spatial interaction theory and residential location*, North-Holland, Amsterdam, pp. 75-96.
- Michalik et al., (1997). Structural modeling of energy demand in the residential sector: 2. The use of linguistic variables to include uncertainty of customers behaviour. *Energy Vol. 22*, pp.949-58.
- Mills E.S. (1967). An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. *American Economic Review*, 57:197-210.
- Morellet O. (2007). Les ménages et le transport dans le modèle M.A.T.I.S.S.E. : Analyse rétrospective et prospective de l'équipement automobile et de la mobilité dans un pays tel que la France. *Rapport INRETS n°273*.
- Morency C. (2010). Préface. dans Antoni JP (2010). *Modéliser la ville, formes urbaines et politiques de transport*. Paris : Economica, 438 p.

- Muth R.F. (1969). *Cities and housing*. Chicago: University of Chicago Press.
- Nijkamp, P. and Perrels, A. (1994). *Sustainable Cities in Europe: Chapter 4: Methods for urban energy-environmental impact studies*. Londres: Earthscan.
- Parshall et al. (2009a). Energy Consumption and CO2 Emissions in Urban Counties in the US with a Case Study of the New York Metropolitan Area. *Fifth urban research symposium, Word Bank*. Marseille.
- Parshall et al. (2009b). Modeling energy consumption and CO2 emissions at the urban scale: Methodological challenges and insights from the United States. *Energy policy*.
- Peuportier, B., E. Popovici et M. Trocme (2006). Analyse de cycle de vie à l'échelle du quartier, Séminaire ADEQUA Quartiers Durables, Chambéry, octobre 2006.
- Shimoda et al. (2004). Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment*, 39, pp. 959-967.
- Summerfield et al. (2010). Two models for benchmarking UK domestic delivered energy. *Building Research & Information*, pp. 12-24.
- Theys J., 2006. *Les processus d'évaluation des politiques territoriales au regard du développement durable*, dans Larrue C. (dir), Actes du colloque *politiques territoriales et développement durable*, Tours, 2006, pp. 24-66
- The City of New York. (2009, September). Inventory of New York City Greenhouse Gas Emissions. PLANYC.
- Yamaguchi Y. (2003). Modeling approach to consider urban form for evaluation of city level energy management. *Meeting KCBS-BPS*. Research Institute for Sustainability Science, Osaka University.
- Yamaguchi et al. (2007a). Transition to a sustainable urban energy system from a long-term perspective : case study of a Japanese business district. *Energy and Buildings* 39, pp. 1-12.
- Yamaguchi et al. (2007b). Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management. *Energy and Buildings* 39, pp. 580-592.