

PROJET ACCLIMAT

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE L'AGGLOMÉRATION TOULOUSAINE



MÉTHODOLOGIE DU PROJET ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS



Le projet ACCLIMAT a bénéficié d'une aide de la
Fondation de Coopération Scientifique STAE Toulouse



	Auteurs	Contributeurs
<u>CNRM</u>	Valéry Masson Colette Marchadier	
Auat	Geneviève Bretagne	
CERFACS	Marie Pierre Moine	<i>Thierry Morel</i>
CIRED		<i>Vincent Viguié Paolo Avner</i>
GEODE	Thomas Houet	<i>Rahim Aguejdad Omar Doukari</i>
LRA	Marion Bonhomme	
ONERA		<i>Xavier Briottet</i>

Sommaire

1. Présentation générale du projet ACCLIMAT.....	9
2. Construction de scénarios intégrés	15
3. Modélisation de la ville.....	24
4. Modélisation du climat urbain & changement climatique.....	35
5. Intégration : la plateforme de simulation.....	40
6. Les résultats.....	45
7. Conclusions & perspectives.....	55

Les figures

Figure 1 : Principe général de la plateforme.....	10
Figure 2 les modèles de la plateforme ACCLIMAT.....	11
Figure 3 : Le couplage des modèles de la plateforme ACCLIMAT.....	12
Figure 4 : Représentation d'un scénario systémique de 2010 à 2100.....	13
Figure 5 : Le couplage des éléments de la plateforme avec l'outil PALM.....	14
Figure 6 : les fonctionnalités de la plateforme ACCLIMAT.....	14
Figure 7 : Construction des scénarios : l'approche intégrée.....	15
Figure 8 : les ateliers collaboratifs de construction des scénarios ACCLIMAT.....	16
Figure 9 : Les variables « scénario dépendantes ».....	23
Figure 10 : Construction des données quantitatives pour les hypothèses.....	23
Figure 11 : Schéma de l'architecture et du fonctionnement du modèle de simulation de l'expansion urbaine SLEDUM.....	25
Figure 12 Exemples illustratifs des sorties cartographiques de SLEDUM.....	26
Figure 13 : Cartes de densités de population. Comparaison 2 à 2 de plusieurs scénarios.....	27
Figure 14 : Génération de la carte initiale - Schéma de principe.....	29
Figure 15 : Génération des cartes - Schéma de principe.....	29
Figure 16 : Toulouse en 2010 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé).....	31
Figure 17 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité.....	32
Figure 18 : Organigramme simplifié de calcul des paramètres.....	33
Figure 19 : Représentation des processus du modèle TEB.....	35
Figure 20 : Schéma d'intégration temporelle dans la plateforme ACCLIMAT. Il donne le séquençage des calculs et les temps d'intégration. Les boîtes vertes représentent les modèles.	



Les pointillés verts délimitent le modèle couplé SLEDUM. Les Flèches bleues verticales représentent l'axe des temps pour les modèles urbains (SLEDUM+GENIUS) sur la période de projection 2010-2100. La flèche orange est l'axe des temps pour le modèle d'impact sur le micro-climat urbain (SUFREX-TEB).....41

Figure 21 : Schéma de couplage entre les modèles pour l'exemple du cycle [2040-2050].....42

Figure 22 : (a) page d'accueil et (b) page de sélection scénario via IMH.....43

Figure 23 : Toulouse en 2100 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé)46

Les tableaux

Tableau 1 : Les scénarios thématiques..... 20

Tableau 2 : Les scénarios systémiques..... 22

Tableau 3 : Tests de validation de SLEDUM..... 26

Tableau 4 : Les 7 îlots types retenus..... 30

Tableau 5 : Récapitulatif des évolutions morphologiques..... 48

SYNTHÈSE DU PROJET

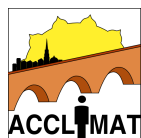
Identification du projet

Thème	Modélisation et simulation des objets et processus complexes
Intitulé du projet	Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine Modélisation numérique de la ville comme instrument d'étude des interactions entre évolution urbaine et micro-climat urbain
Acronyme du projet	ACCLIMAT

Liste des partenaires

CNRM	Centre National de Recherche Météorologiques de Météo France <i>Partenaire coordinateur</i>
Auat	Agence d'Urbanisme et d'Aménagement du Territoire Toulouse Aire Urbaine
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CIRED	Ecole Nationale de la Météorologie et Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
GEODE	Géographie de l'Environnement
LRA	Laboratoire de Recherche en Architecture de l'Ecole Nationale Supérieure de Toulouse
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
Organismes associés au projet, en tant qu'experts	CETE ; CIEU ; Mairie de Toulouse ; CONTINENTAL ; ARPE
Coordinateur du projet	MASSON Valéry Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées - Docteur es Sciences Mèl : valery.masson@meteo.fr Tél : 05 61 07 94 64 Etablissements de tutelle : CNRS et METEO-France
Durée du projet	40 mois
Date de début-fin	15 février 2010 - 14 juin 2013
Personnes. Mois	246 h*m - soit 106 permanents, 91 post-doc, 49 ingénieurs
Aide accordée par la Fondation STAE	850 000 €
Site web	http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique46

RÉSUMÉ



L'objectif du projet ACCLIMAT est d'étudier les interactions entre les processus de développement urbain, de micro climat urbain, et le changement climatique.

L'étude est réalisée à l'échelle du siècle, pour tenir compte d'une part de l'inertie des modifications structurelles de la ville, et d'autre part des scénarios climatiques issus du 4ème rapport du GIEC (IPCC 2007a). Pour adapter les villes au climat de la fin du XXI^{ème} siècle, il est indispensable de commencer dès maintenant à modifier la conception des bâtiments et les stratégies de planification urbaine.

Pour répondre à la complexité du système ville, ce projet s'appuie essentiellement sur la modélisation numérique des processus et leurs interactions (développement urbain et micro-climat urbain, expansion et spatialisation, morphologie urbaine et consommation énergétique), ainsi que sur le développement de méthodes (descente d'échelle, combinaison de bases de données et couplage de code).



Le projet a ainsi permis d'apporter de nouveaux éclairages sur les impacts sur le très long terme de divers leviers d'aménagement urbains, en lien avec le changement climatique.

Par exemple, nous avons montré que :

- Une politique ambitieuse d'urbanisation à l'échelle de l'aire urbaine (par exemple pour mener à une ville compacte ou archipel) nécessite d'être mise en œuvre rapidement.
- Une ceinture verte peut avoir sur le long terme l'effet inverse de celui escompté au départ, augmentant fortement les mouvements pendulaires journaliers vers le centre-ville, au point d'être plus importants que si la périurbanisation diffuse continuait.
- En ce qui concerne le climat en ville, l'influence de la végétation est bénéfique.
- Un levier potentiellement efficace consiste à agir pour améliorer les comportements énergétiques des habitants et usagers.
- Il faudra trouver des mécanismes d'incitation pour accélérer la rénovation des bâtiments existants.
- Le réchauffement climatique induira une plus forte baisse de la consommation de chauffage. Il pourrait par contre, s'il est assez prononcé, conduire à un pic de consommation d'électricité en été, en cas de généralisation de la climatisation.

Enfin, il faut anticiper le peak-oil pour mettre en place une politique d'aménagement urbain efficace pour s'y adapter, quelle qu'elle soit. Une augmentation démographique, si elle se poursuit, augmentera les tensions sur le foncier, le transport, la demande en énergie et le climat urbain. Sans politique concertée et cohérente, l'aménagement et la gestion du territoire devraient être d'autant plus difficile après 2040-2050.



RAPPORT SCIENTIFIQUE

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET ACCLIMAT

Contexte & objectifs du projet

Relever le défi climatique impose aujourd'hui à tous les Etats de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, mais également de prendre des mesures d'adaptation afin d'atténuer les effets néfastes du réchauffement de la planète sur la population, l'économie et l'environnement. La question se pose particulièrement à l'échelle de la ville, qui présente une forte **concentration des populations et des activités, en évolution et augmentation constantes**, ainsi qu'une forte **sensibilité au changement climatique**, due à la densité et aux formes qui génèrent l'**îlot de chaleur urbain**.

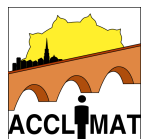
L'aménagement urbain doit ainsi se préoccuper du **changement climatique** à deux niveaux. Premièrement, il s'agit de quantifier les **impacts du réchauffement**, les vulnérabilités sur les environnements urbains et les populations urbaines. On peut citer à titre d'exemple les risques associés aux situations de canicules ou de sécheresse. Deuxièmement, il s'agit d'**atténuer le changement climatique, tout en s'y adaptant**. Dans ce contexte, la définition de **stratégies de planification urbaine** devient un exercice de plus en plus complexe qui nécessite d'intégrer de nombreuses échelles spatiales et temporelles et des critères multiples.



L'objectif du projet ACCLIMAT est d'étudier les interactions entre les processus de développement urbain, de micro climat urbain, et le changement climatique.

L'étude est réalisée à l'échelle du siècle, pour tenir compte d'une part de l'inertie des modifications structurelles de la ville, et d'autre part des scénarios climatiques issus du 4ème rapport du GIEC (IPCC 2007a). Pour adapter les villes au climat de la fin du XXI^{ème} siècle, il est indispensable de commencer dès maintenant à modifier la conception des bâtiments et les stratégies de planification urbaine.

Pour répondre à la complexité du système ville, ce projet s'appuie essentiellement sur la **modélisation numérique des processus et leurs interactions** (développement urbain et micro-climat urbain, expansion et spatialisation, morphologie urbaine et consommation énergétique), ainsi que sur le **développement de méthodes** (descente d'échelle, combinaison de bases de données et couplage de code).



Les partenaires ont ainsi développé une plateforme interdisciplinaire de modélisation numérique, qui simule l'évolution de l'expansion urbaine et du micro-climat urbain et évalue les impacts du changement climatique.

Principe général de la plateforme

La plateforme de modélisation numérique construite dans le cadre d'ACCLIMAT permet la modélisation numérique de différents processus du système ville et de leurs interactions. Les modèles à base physique et urbanistique ainsi développés sont forcés par des scénarios socio-économiques de développement urbain et des scénarios climatiques locaux. Il est alors possible de produire différentes projections de ville, de nos jours jusqu'à la fin du siècle, sous différents climats futurs, et d'estimer les impacts de ces villes sur le climat urbain ou la consommation d'énergie liée au bâti.

Les constantes de temps propres au changement climatique et à l'évolution des villes obligent à raisonner à l'échelle temporelle du siècle : la plateforme ACCLIMAT permet ainsi de réaliser des simulations de nos jours jusqu'en 2100.

Des indicateurs et outils d'interprétation sont également produits, hors plateforme, pour permettre l'évaluation scientifique.

La plateforme est appliquée à l'aire urbaine toulousaine.

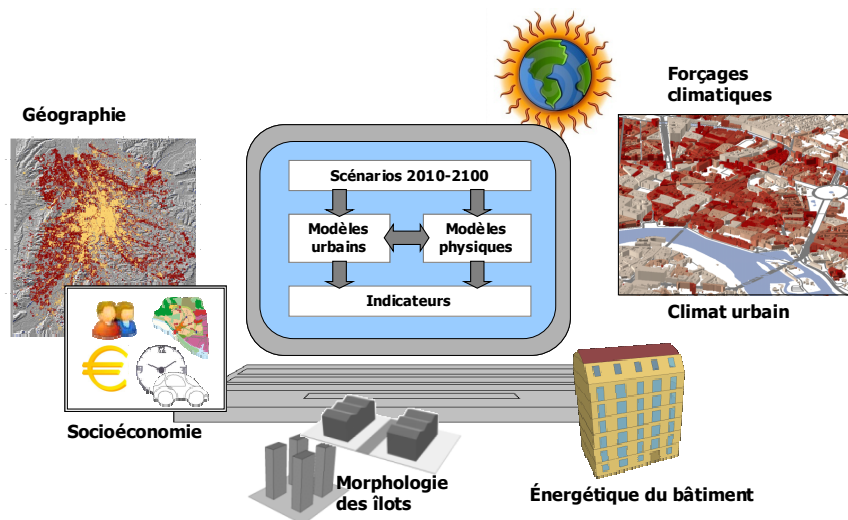


Figure 1 : Principe général de la plateforme

Les éléments de la plateforme

1 - LES MODELES NUMERIQUES

La plateforme se base sur des modèles numériques, existants ou développés dans le cadre du projet.

NEDUM, le modèle économique urbain du **CIRED** (Gusdorf et Hallegatte 2007a,b, Gusdorf et al. 2008) permet de simuler l'évolution continue de villes sur le long terme en prenant en compte les aspects structurels, et les conséquences socio-économiques.

SLEUTH*, le modèle adapté par le **GEODE** pour le projet ACCLIMAT (Clarke et al., 1998, Aguejdad et al. 2012), permet de représenter la forme de l'expansion urbaine en fonction de critères géographiques et de politiques d'aménagement (expansion de type diffus, le long des routes, en continuité, de l'existant, etc)

GENIUS, le modèle développé par le **LRA** et le **CNRM** pour les projets ACCLIMAT et MUSCADE, représente la ville sous la forme de cartes archétypales d'îlots urbains (pavillon, immeuble, continu/discontinu, bâtiment d'activité, ...). Le modèle propose une évolution du type, de la forme architecturale et du taux de végétation des îlots en fonction de politiques d'aménagement.

MESO-NH, le modèle météorologique de recherche du **CNRM** et du **LA** permet de représenter les processus qui ont lieu dans l'atmosphère. Il est utilisé pour modéliser finement le microclimat de l'agglomération toulousaine pour des épisodes météorologiques du climat futur.

TEB, le modèle de climat urbain du **CNRM-GAME** ("Town Energy Balance", Masson 2000), permet de calculer les échanges d'énergie et d'eau entre ville et l'atmosphère. A partir de la forme urbaine, de sa géométrie, des caractéristiques des bâtiments et de la végétation, TEB calcule le climat urbain et la consommation énergétique liée au bâti. TEB est inclus

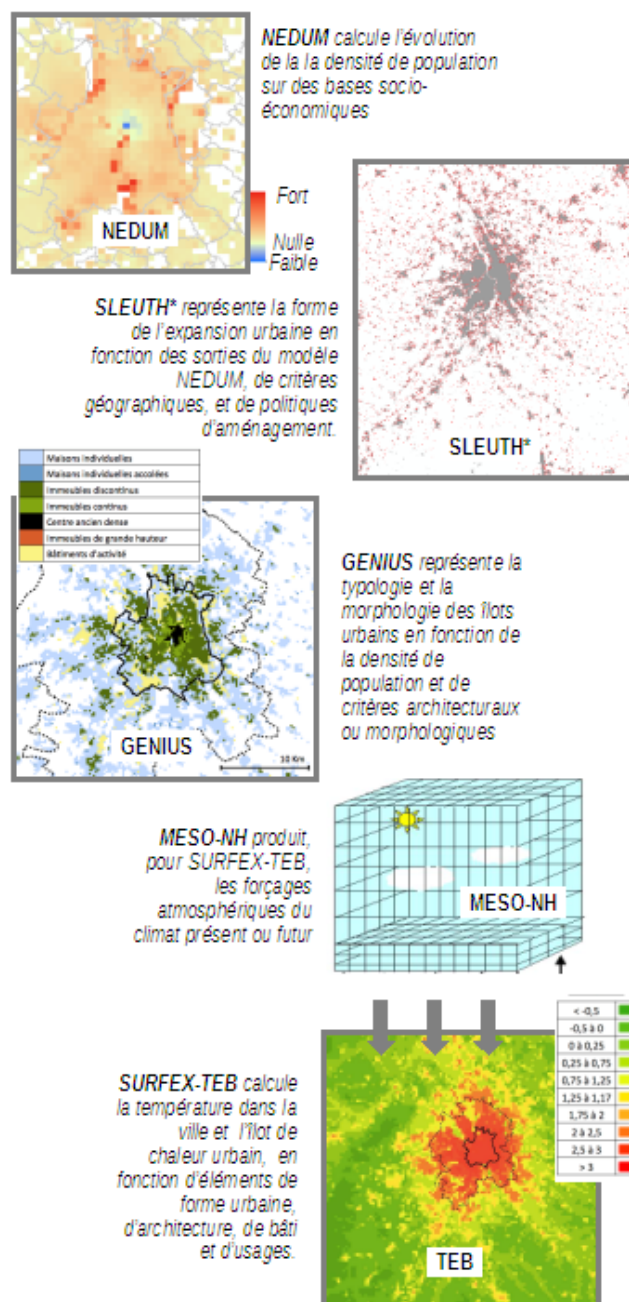


Figure 2 les modèles de la plateforme ACCLIMAT

dans le modèle de surface SURFEX.

2 - LE COUPLAGE DES MODELES

Grâce à une approche systémique, les modèles numériques développés ou adaptés sont **couplés au sein de la plateforme**. Le couplage permet de **prendre en compte plusieurs fonctions de la ville à différentes échelles**. La ville est ainsi représentée de façon plus globale (processus d'expansion socioéconomique, forme urbaine, évolution des quartiers) et permet un calcul d'impacts climatique et énergétique plus justes.

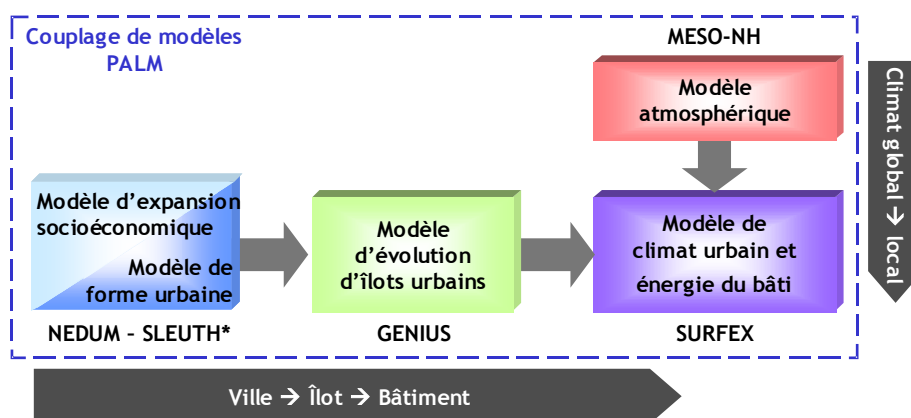
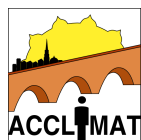


Figure 3 : Le couplage des modèles de la plateforme ACCLIMAT



Grâce à cette approche systémique, les modèles numériques développés, adaptés et couplés permettent de prendre en compte plusieurs fonctions de la ville à différentes échelles. La ville est ainsi représentée de façon plus globale (processus d'expansion socioéconomique, forme urbaine, évolution des quartiers) et permet un calcul d'impacts climatique et énergétique plus juste.

3 - LES FACTEURS INFLUENTS SUR LA VILLE

Les scénarios d'évolution représentent des futurs possibles de la ville. Ils servent à contraindre les modèles numériques de la plateforme, c'est à dire à définir l'ensemble des hypothèses qui seront simulées par ces modèles.

Quatre grands thèmes ont été identifiés comme influents sur l'expansion et le climat urbain :

- Les tendances mondiales en termes d'économie, d'énergie et de politique climatique
- Les tendances socioéconomiques locales, pour l'agglomération toulousaine
- Les politiques d'aménagement du territoire en termes de forme de ville et de quartiers
- Les avancées technologiques liées à l'énergétique du bâtiment

4 - DES HYPOTHESES AUX SCENARIOS

Un ensemble d’hypothèses a été construit pour chacun de ces thèmes afin d’obtenir un scénario thématique (un futur possible concernant ce thème).

La combinaison des scénarios thématiques permet une représentation d’ensemble de la ville et forme un scénario systémique - ou intégré, c’est à dire un futur possible de la ville combinant les différents thèmes influents dans le temps.

Grandes tendances mondiales	Tendances locales	Aménagement du territoire	Morphologie et architecture des quartiers	Technologie du bâti
Importance du choc pétrolier	Situation économique	Expansion et forme urbaine	Type de quartiers Végétation	Taux de rénovation
Existence d'une politique climatique mondiale	Démographie		Hauteur des bâtiments	Usages (chauffage, climatisation, etc)

5 - LES SCENARIOS SYSTEMIQUES

Un scénario systémique est donc une combinaison chronologique et cohérente de plusieurs scénarios thématiques regroupant des hypothèses socioéconomiques mondiales et locales, des hypothèses d’aménagement du territoire et des avancées technologiques liées au bâti.

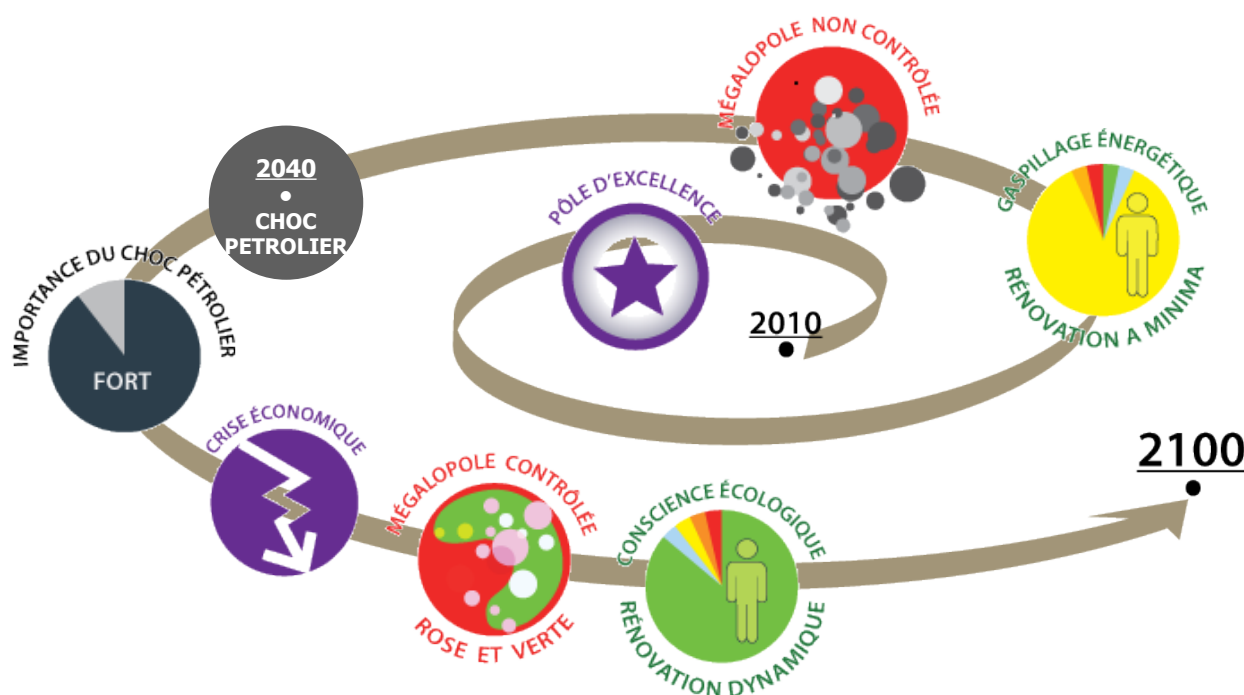
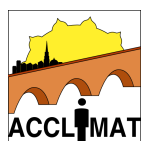


Figure 4 : Représentation d’un scénario systémique de 2010 à 2100



Par une approche originale, largement participative, combinant récits narratifs et simulation numérique, 7 scénarios systémiques ont été construits et simulés. Ils représentent 7 futurs possibles et contrastés pour l’agglomération toulousaine, et sont simulés par la plateforme afin d’évaluer et de comparer leurs impacts.

6 - L'INTEGRATION DES ELEMENTS DE LA PLATEFORME

Les scénarios, modèles et différents outils de la plateforme sont intégrés grâce au coupleur PALM (Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes), développé par le CERFACS (http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/EN/OVERVIEW/index.html).

PALM est un outil performant pour assembler, chaîner ou coupler des applications parallèles complexes basées sur des modèles parallèles écrits dans différents langages de programmation.

L'utilisation de PALM permet ainsi de résoudre plusieurs défis techniques et scientifiques : coupler des modèles de disciplines différentes, travaillant à des échelles spatiale et temporelles différentes et avec des variables différentes, tout en assurant une modularité et une évolutivité de la plateforme.



Figure 5 : Le couplage des éléments de la plateforme avec l'outil PALM

LES FONCTIONNALITES DE LA PLATEFORME

La plateforme permet ainsi, via une interface homme-machine, de :

- Produire des projections d'évolution de l'agglomération toulousaine, de nos jours à 2100, pour différentes combinaisons d'hypothèses
- De comparer leurs impacts en terme de climat urbain et d'énergie, pour le climat actuel et futur.

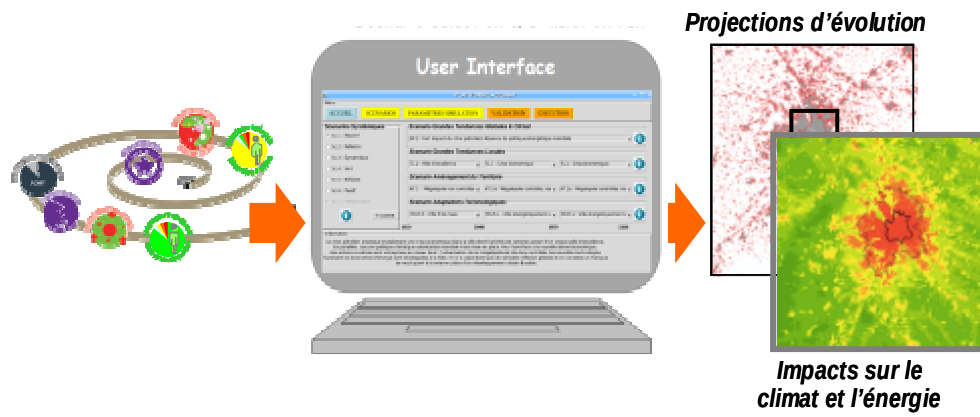


Figure 6 : les fonctionnalités de la plateforme ACCLIMAT

2. CONSTRUCTION DE SCÉNARIOS INTÉGRÉS

L'objectif est de construire des futurs possibles pour l'agglomération toulousaine, prenant en compte différents facteurs d'influence, et de « décrire ces futurs possibles de la ville » de façon à pouvoir les simuler avec le modèle numérique TEB de climat urbain et d'énergétique du bâti.

Méthodologie : l'approche « intégrée » et participative

La méthodologie développée dans le cadre d'ACCLIMAT propose de combiner la réflexion prospective pour l'élaboration de scénarios urbains (élaboration d'hypothèses à partir d'avis d'experts) et la modélisation numérique pour l'évaluation quantitative de ces scénarios urbains.

Ainsi, les scénarios thématiques de tendances mondiale et locale, et d'aménagement du territoire alimentent les **modèles numériques urbains** (expansion, forme et îlots) dont les simulations produisent des **projections de la ville** (décrites en termes de surface urbanisée, forme, architecture, bâti, usages, ..) qui viennent à leur tour alimenter le modèle numérique de calcul d'impacts (climat urbain et énergie du bâti). En ce sens, les projections de la ville obtenues avec les modèles urbains constituent autant de « **scénarios de ville** ».

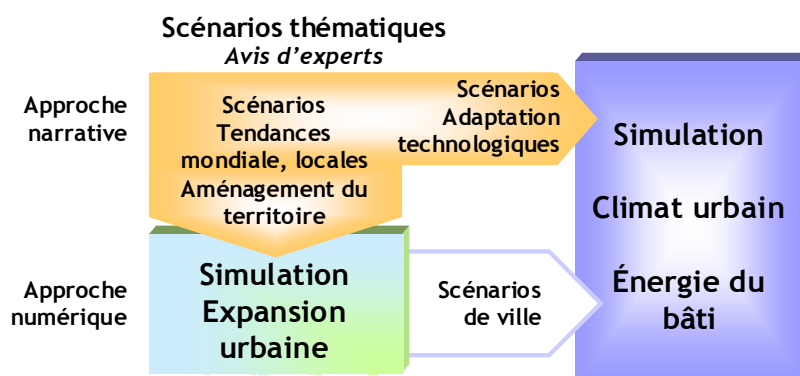


Figure 7 : Construction des scénarios : l'approche intégrée

Cette approche intégrée permet de bénéficier des avantages respectifs des deux types d'approches : une plus grande souplesse dans la définition des scénarios qu'une approche modélisatrice ne permet pas; la simulation et l'évaluation quantitative des impacts à l'aide de méthodes robustes qu'une approche narrative (qualitative) ne permet pas.

L'approche participative

L'ensemble des hypothèses constitutives des scénarios thématiques ont été définies de façon participative, regroupant les membres du projet ainsi que des experts extérieurs (CETE ; CIEU ; Mairie de Toulouse ; CONTINENTAL ; ARPE), afin de représenter et prendre en compte une plus grande diversité de possibilités (thèmes, variables influentes et hypothèses). Une série de réunions organisées en groupes de réflexion a eu lieu en 2010.



Figure 8 : les ateliers collaboratifs de construction des scénarios ACCLIMAT

Suivant un procédé similaire, les scénarios systémiques ont été définis de façon participative. Les scénarios thématiques ont été croisés de façon à définir des scénarios systémiques contrastés. Deux groupes ont réalisé ce travail de façon indépendante. Les résultats ont été confrontés pour définir les scénarios à retenir (élimination des redondances). Enfin, ces réunions ont également permis de vérifier méticuleusement la cohérence des hypothèses entre elles.

Définition des thèmes, variables influentes et hypothèses

Plusieurs ateliers de travail ont permis de définir, progressivement et de façon largement collaborative, les différents éléments constitutifs des scénarios dans une approche narrative.

4 grands thèmes ont été identifiés comme influents sur l'expansion et le climat urbain :

<p>1- Grandes Tendances Les tendances mondiales en termes d'économie, d'énergie et de politique climatique</p>	<p>2- Tendances locales Les tendances socioéconomiques locales, pour l'agglomération toulousaine</p>
<p>3- Aménagement du territoire Les politiques d'aménagement du territoire en termes de forme de ville et de quartiers</p>	<p>4- Technologie du bâti Les avancées technologiques liées à l'énergétique du bâtiment</p>

Puis, des « éléments du système qui exercent ou sont susceptibles d'exercer une influence sur le thème étudié » ont été identifiés : ce sont les « **variables clés** ».



Variables clés pour le thème Grandes Tendances	1- Grandes Tendances
	<ul style="list-style-type: none"> Impact du peak oil Existence d'une politique climatique
Variables clés pour le thème Tendances Locales	2- Tendances locales
	<ul style="list-style-type: none"> Démographie (âge) Démographie (nombre) Attractivité Taille des ménages Revenu des ménages Inégalité des revenus Économie
Variables clés pour le thème Aménagement du Territoire	3- Aménagement du territoire
	<ul style="list-style-type: none"> Planification territoriale Performances énergétiques des territoires Anthropisation / multipolarité Forme urbaine des quartiers Multifonctionnalité des territoires Réseaux transport et logistique Mode de transport (Mobilité individuelle) Volume / linéaire de déplacements Espaces ruraux Gestion des espaces verts et bleus Espace agricole Ville centre
Variables clés pour le thème Technologie du bâti	4- Technologie du bâti
	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation Ressources Locales Typologie du système de Production d'Énergie Évolution des usages et des services liés au bâtiment Normalisation / Réglementation Intégration de l'innovation technique Disponibilités des types de transports Technologie des transports Performance Énergétique des bâtiments Usage dans les bâtiments Procédés constructifs pour le neuf Amélioration Bâtiments Existants Densification et morphologie bâtie

Enfin, chacune de ces variables a été **déclinée en plusieurs hypothèses**, qui décrivent **qualitativement** des évolutions possibles de ces éléments influents du système ville.

Extraits des matrices scénarios (voir en annexe pour les matrices complètes) :

1- Grandes Tendances	Hypothèses	
Impact du peak oil	Faible impact du peak oil	Fort impact du peak oil
Existence d'une politique climatique	Pas de politique climatique	Politique climatique volontariste

2- Tendances locales	Hypothèses		
Démographie (âge)	Pyramide des âges niçoise (vieillesse)	Pyramide des âges parisienne (jeune)	
Démographie (nombre)	Stabilisation	Accroissement de la	Baisse de la population

2- Tendances locales	Hypothèses		
		population	
Économie	Fort chômage. Emploi diversifié ou spécialisé	Faible chômage & forte spécialisation de l'emploi	Faible chômage & diversité économique/de l'emploi

3- Aménagement du territoire	Hypothèses		
Planification territoriale	Faible gouvernance du territoire, faible maîtrise du foncier	Initiatives locales, ponctuelles, sectorielles (manque de cohérence)	Politique régionale cohérente, intégrée, maîtrise du foncier, forte gouvernance
Anthropisation / Multipolarité	Conurbation (Toulouse=Mégalopole Sud-Ouest)	Mitage généralisé (extension du rurbain diffus)	Ville archipel (densification urbaine)
Forme urbaine des quartiers	Aucun contrôle de la densité (étalement urbain anarchique)	Densité de bâti contrôlée : petits collectifs	

4- Technologie du bâti	Hypothèses		
Normalisation / Réglementation	Approches intégrées rapides	Évolutions réglementaires rapides	Évolutions réglementaires lentes
Intégration de l'innovation technique	Culture en évolution rapide	Évolution lente	Faible culture de l'innovation
Performance énergétique des bâtiments	Bâtiments performants et confortables	Bâtiments performants	Bâtiments peu performants
Usage dans les bâtiments	Pro-activité	Usage économe	Usage non économe

On obtient ainsi un jeu d'une centaine d'hypothèses, classées par thèmes et par variables, et qui sont représentées sous formes de matrices propices à la réflexion et à l'étape suivante.

Construction des scénarios thématiques et systémiques

Une première étape consiste à construire des **scénarios thématiques**, c'est à dire une **combinaison cohérente** des différentes hypothèses, pour chacun des thèmes.

Exemple pour le thème « Tendances Locales » :

Hypothèses Tendances locales			
Démographie (âge)	Vieillessement	Jeune	
Démographie (nombre)	Stabilisation	Accroissement	Baisse
Économie	Fort chômage	Faible chômage. Emploi spécialisé	Faible chômage. Emploi diversifié

La combinaison de ces 3 hypothèses constitue le scénario « **Crise économique** »

Exemple pour le thème « Aménagement du territoire » :

Hypothèses Aménagement du territoire			
Planification territoriale	Faible gouvernance du territoire, faible maîtrise du foncier	Initiatives locales, ponctuelles,	Politique régionale cohérente, maîtrise du foncier, forte gouvernance
Anthropisation / Multipolarité	Conurbation (Toulouse=Mégalopole Sud-Ouest)	Mitage généralisé (extension du urbain diffus)	Ville archipel (densification urbaine)
Forme urbaine des quartiers	Aucun contrôle de la densité (étalement urbain anarchique)	Densité de bâtie contrôlée : petits collectifs	

La combinaison de ces 3 hypothèses constitue le scénario « **Mégalopole contrôlée** »

Exemple pour le thème « Technologie du bâti »

Hypothèses Technologie du bâti			
Normalisation / Réglementation	Approches intégrées rapides	Évolutions réglementaires rapides	Évolutions réglementaires lentes
Intégration de l'innovation Technique	Culture en évolution rapide	Évolution lente	Faible culture de l'innovation
Performance Énergétique des bâtiments	Bâtiments performants et confortables	Bâtiments performants	Bâtiments peu performants
Usage dans les bâtiments	Pro-activité	Usage économe	Usage non économe

La combinaison de ces 3 hypothèses constitue le scénario « **Individualiste** »

On obtient ainsi les scénarios thématiques suivants :
















<p>TENDANCES GLOBALES</p>	<p>GT 1 : impact faible du peak oil, mais absence de politique climatique volontariste</p> 	<p>GT 2 : impact fort du choc pétrolier, climat hostile à l'investissement, mais absence de politique climatique volontariste</p> 	<p>GT 3 : impact faible du peak oil, et politique climatique volontariste</p> 	<p>GT 4 : impact fort du choc pétrolier, climat hostile à l'investissement mais politique climatique volontariste</p> 
<p>TENDANCES LOCALES</p>	<p>TL1 : Crise économique</p> 	<p>TL2 : Pole d'excellence</p> 	<p>TL3 : Pole de complémentarité</p> 	
<p>AMMENAGEMENT DU TERRITOIRE</p>	<p>AT1 : Mégalopole non contrôlée</p> 	<p>AT2a : Mégalopole contrôlée, rose et verte</p> 	<p>AT2b : Mégalopole contrôlée, économique</p> 	<p>AT3a : capitale régionale archipel éco-bioclimatique</p> 
<p>ADAPTATION TECHNOLOGIQUE</p>	<p>TECH1 : Ville énergétiquement vertueuse & volontariste</p> 	<p>TECH2 : Ville et Individualisme</p> 	<p>TECH3 : Ville Fil de l'eau</p> 	<p>TECH5 : Ville Climatiquement néfaste</p> 

Tableau 1 : Les scénarios thématiques

La combinaison des scénarios thématiques permet alors une représentation d'ensemble de la ville et forme un **scénario systémique** - ou intégré, c'est à dire un futur possible de la ville combinant les différents thèmes influents.

Un scénario systémique est donc une combinaison chronologique et cohérente de plusieurs scénarios thématiques regroupant des hypothèses socioéconomiques mondiales et locales, des hypothèses d'aménagement du territoire et des avancées technologiques liées au bâti.

Par une approche originale, largement participative, combinant récits narratifs et simulation numérique, 7 scénarios systémiques ont été construits et simulés. Ils représentent 7 futurs possibles et contrastés pour l'agglomération toulousaine, qui seront simulés par la plateforme afin d'évaluer et de comparer leurs impacts.

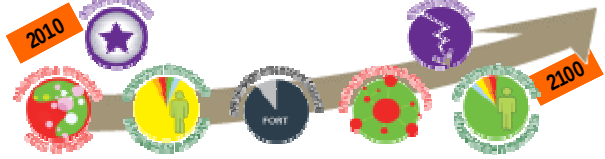
<p style="text-align: center;">N° 1 : REACTIF</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fort choc pétrolier en 2040 ▪ Ville attractive jusqu'au choc pétrolier, puis chute démographique, crise aéronautique mais innovation énergétique. ▪ Ville étalée et dispersée jusqu'au choc pétrolier, puis expansion urbaine contrôlée, architecture compacte et végétalisation des espaces publics ▪ Comportements énergivores et rénovation lente des bâtiments jusqu'au choc pétrolier, puis comportements énergétiques économes et rénovation dynamique des bâtiments. 	<p style="text-align: center;">N° 2 : REFLECHI</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fort choc pétrolier en 2040 ▪ Ville attractive jusqu'au choc pétrolier, puis chute démographique, crise aéronautique mais innovation énergétique. ▪ Expansion urbaine contrôlée jusqu'au choc pétrolier, puis ville multipolaire : architecture compacte et végétalisation des espaces publics ▪ Comportements énergétiques économes ; rénovation des bâtiments lente jusqu'au choc pétrolier, puis dynamique.
<p style="text-align: center;">N° 3 : DYNAMIQUE</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible choc pétrolier en 2040 ▪ Pôle d'excellence, puis diversification économique ; ville attractive, augmentation démographie ▪ Expansion urbaine contrôlée, grands collectifs et immeubles de grande hauteur et faible végétalisation des espaces publics ▪ Comportements énergétiques économes et rénovation dynamique des bâtiments 	<p style="text-align: center;">N° 4 : VERT</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible choc pétrolier en 2040 ▪ Pôle d'excellence, puis diversification économique ; ville attractive, augmentation démographie ▪ Expansion urbaine contrôlée jusqu'au choc pétrolier, puis ville multipolaire : architecture compacte et végétalisation des espaces publics ▪ Comportements énergétiques économes, rénovation dynamique du bâti
<p style="text-align: center;">N° 5 : NEFASTE</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible choc pétrolier en 2040 ▪ Ville attractive jusqu'au choc pétrolier, puis chute démographique, crise aéronautique mais innovation énergétique. ▪ Étalement urbain, mitage, maisons individuelles, et faible végétalisation des espaces publics ▪ Comportements énergivores. Pas d'innovation, taux de rénovation faible jusqu'au choc pétrolier, puis arrêt des rénovations. 	<p style="text-align: center;">N° 6 : PASSIF</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible choc pétrolier en 2040 ▪ Ville attractive, augmentation démographique et diversification économique ▪ Étalement urbain, mitage, maisons individuelles, et faible végétalisation des espaces publics ▪ Peu d'innovation et faible taux de rénovation; comportements énergivores jusqu'au choc pétrolier, puis économes ensuite.
	<p style="text-align: center;">N° 7 : FIL DE L'EAU</p> <p>Identique au scénario n°6, mais les comportements n'évoluent pas et restent énergivores après le choc pétrolier</p> 

Tableau 2 : Les scénarios systémiques

Lien avec les modèles et élaboration de projections quantitatives

Une fois les scénarios construits, il fallait faire le lien avec les modèles numériques de la plateforme. La méthodologie élaborée pour ACCLIMAT comporte les étapes suivantes :

1. Identifier, pour chaque modèle, les variables qui permettent de représenter les hypothèses qualitatives des différents scénarios : ce sont les **variables « scénario dépendantes »**

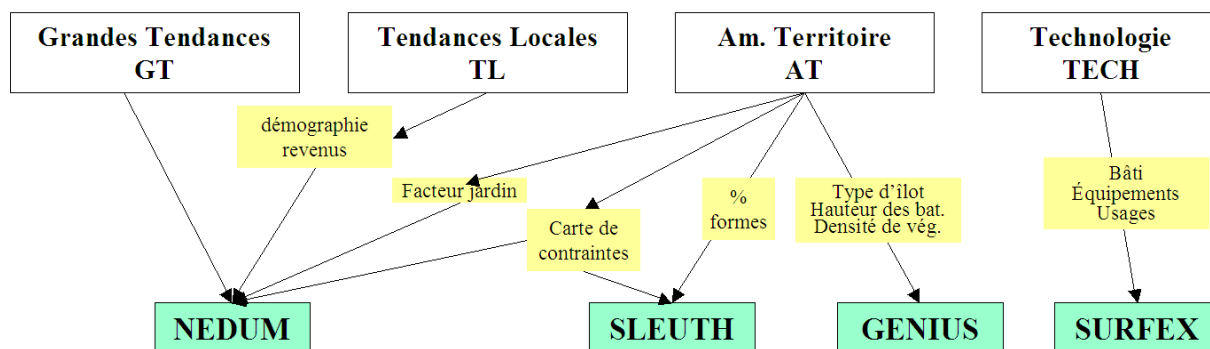


Figure 9 : Les variables « scénario dépendantes »

2. Construire, pour chaque variable « scénario dépendantes », des **projections quantitatives** qui traduisent la tendance qualitative du scénario, et serviront de données d'entrée pour les modèles de la plateforme.

Exemple pour les hypothèses de démographie et d'usage de la climatisation :

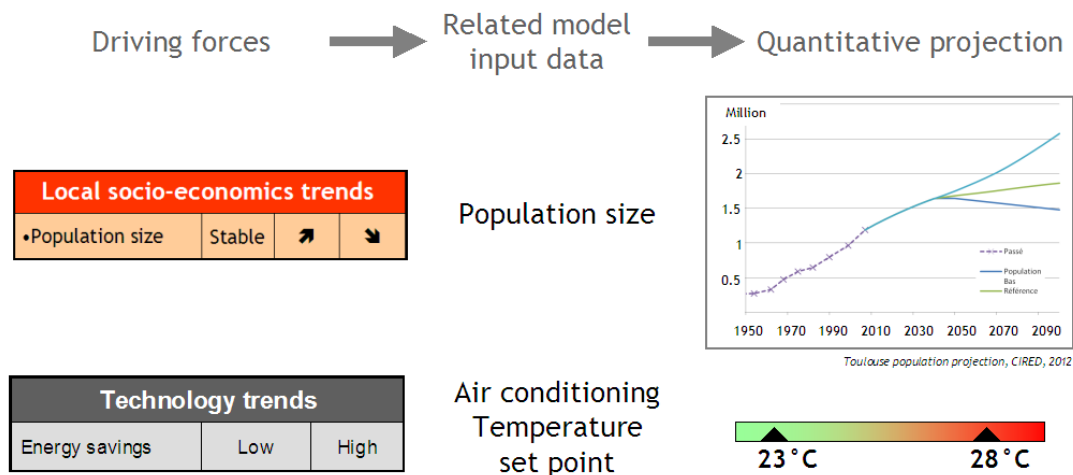


Figure 10 : Construction des données quantitatives pour les hypothèses

3. Créer le jeu de données (projections quantitatives) pour chaque scénario thématique, puis pour chaque scénario systémique. Ces jeux de données constituent les éléments d'entrée de la plateforme qui permettent de réaliser les simulations numériques des scénarios systémiques élaborés.

3. MODÉLISATION DE LA VILLE

Introduction

La modélisation prospective de la ville à long terme et de façon spatialement explicite constitue un enjeu scientifique et technique fort. Il s'agissait d'identifier et relever plusieurs défis, sachant qu'il n'existe aucun modèle qui permettait, à l'origine du projet, de le faire :

- Les modèles économiques, fondés sur la théorie de l'économie urbaine, sont adaptés à la projection à long terme de la croissance urbaine (Gusdorf et Hallegatte, 2007 ; Gusdorf et al., 2008, Viguié, 2012) mais ne permettent pas de prendre en compte finement les spécificités géographiques locales et les politiques de planification urbaine ;
- Les modèles géographiques sont particulièrement performants pour (1) prendre en compte, de façon dynamique, des facteurs de localisation et de simulation des formes d'extension urbaine issus de la dynamique propre du système urbaine et des politiques plus ou moins volontaristes et (2) restituer à une échelle fine la forme de la tâche urbaine (résolution allant de 30mx30m à 100mx100m). A l'inverse, ils excèdent rarement un horizon temporel supérieur à 20-30 ans (Haase and Schwarz, 2009) et sont pour la plupart calibrés sur une période passée ne permettant pas d'envisager une modification du système à l'avenir, c'est-à-dire d'envisager une grande diversité de futurs possibles ;
- Ces deux types de modèles ne permettent pas de représenter les formes urbaines (types de quartiers / bâtis) alors qu'il a clairement été démontré que celles-ci, en plus de l'extension spatiale de la ville, jouent un rôle sur le climat urbain (Oke 2004, Steward and Oke 2009).

L'objectif dans le projet ACCLIMAT était donc de développer un module de modélisation de la ville qui tire parti des avantages respectifs de ces modèles. Pour cela, deux modèles ont été développés :

- Un modèle de simulation de l'expansion et de la forme urbaine (SLEDUM) réalisé par le couplage de deux modèles existants (SLEUTH - Clarke et al 1997, Clarke and Gaydos 1998 - et NEDUM - Gusdorf et Hallegatte 2007, Gusdorf et al. 2008, Viguié 2012), qui ont été adaptés pour répondre à cet objectif ;
- Un modèle architectural de simulation de l'évolution des îlots urbains (GENIUS)

Expansion et forme urbaine : le modèle SLEDUM

Le choix du modèle géographique s'est porté, après analyse comparative, sur le modèle SLEUTH, dont le code source était disponible en ligne. Afin de répondre à une approche scénario-dépendante, il a été modifié de façon à :

- Inactiver la phase de calibration de la version originale afin de pouvoir simuler des futurs plus contrastés ;
- Simuler de façon contrôlée des dynamiques spatiales et temporelles de l'étalement urbain variables, c'est-à-dire suivant des ruptures potentielles au cours de sous-périodes, définies par les scénarios prospectifs ;

Une version simple d'utilisation sous environnement Windows est également disponible, grâce au développement d'une interface homme-machine spécifique à SLEUTH. Les détails du développement, les tests de validation sont présentés dans un article soumis à une revue internationale.

Le choix du modèle économique s'est porté sur NEDUM 2D en raison de sa capacité à prendre en compte les facteurs socio-économiques sur le long terme.

Afin de bénéficier des avantages respectifs de ces deux modèles, ils ont été couplés (couplage fort) grâce au coupleur PALM. L'architecture du couplage est présentée sur la figure ci-dessous. Le modèle résultant est appelé SLEDUM.

Le principe du couplage est le suivant : NEDUM libre simule, pour un scénario donné (constitué de variables de forçage prédéfinies), à chaque pas de temps (décennie), les surfaces de logement (surfaces habitables en m²) supplémentaires à créer. Un coefficient (facteur jardin - Fj), définissant la taille moyenne des jardins associés aux logements à créer, est appliqué à cette sortie de NEDUM afin d'estimer l'accroissement de surface urbanisée globale (en ha). Ce coefficient varie suivant et au cours des scénarios. NEDUM libre calcule également à chaque pas de temps, une carte des coûts des loyers qui est considérée comme une carte définissant l'attractivité du territoire pour l'urbanisation.

La surface à urbaniser et cette carte d'attractivité constituent des variables d'entrée de SLEUTH*. SLEUTH* spatialise ensuite l'augmentation de surface urbaine en tenant compte des spécificités géographiques (contraintes topographiques, distance aux réseaux routiers, etc.) et des scénarios (contraintes sur les formes d'urbanisation et les zones urbanisables traduisant les politiques de planification).

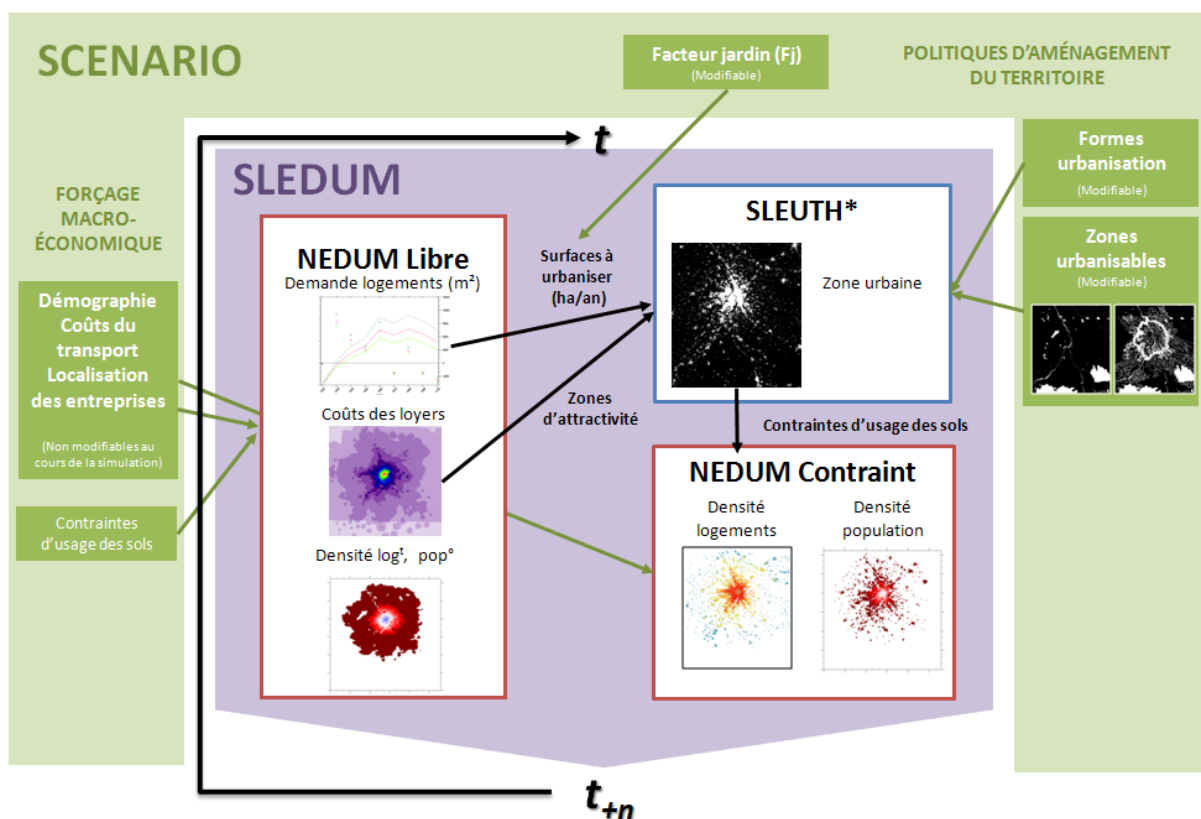


Figure 11 : Schéma de l'architecture et du fonctionnement du modèle de simulation de l'expansion urbaine SLEDUM

La carte d'urbanisation produite par SLEUTH* constitue une contrainte pour une deuxième version de NEDUM tournant en parallèle (appelé NEDUM contraint). NEDUM contraint se différencie de NEDUM libre par le fait que la contrainte d'usage des sols devient dynamique (fournie par SLEUTH*) afin d'affiner le calcul des densités de population et de bâti au sein des surfaces urbanisables simulées par SLEUTH*.

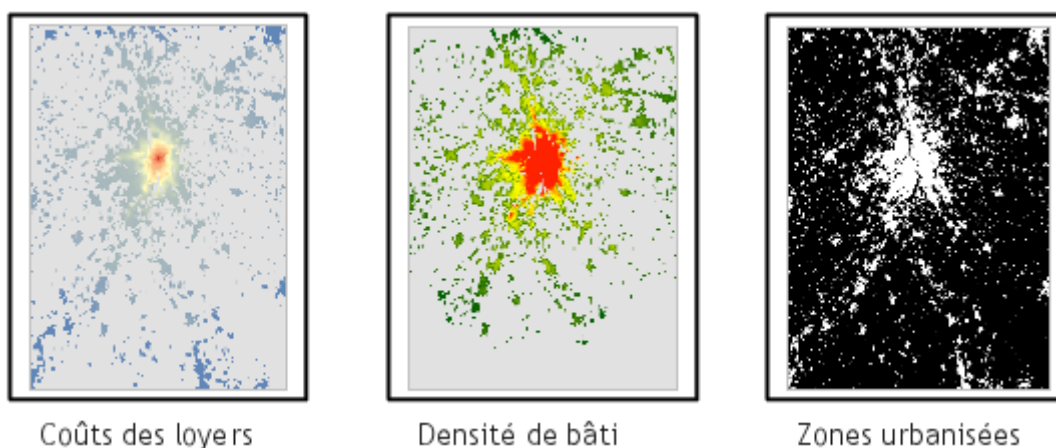


Figure 12 Exemples illustratifs des sorties cartographiques de SLEDUM

Ces cartes (densités de bâti et de population) vont ensuite être utilisées pour le modèle d'évolution des îlots urbains (GENIUS). Au final, les scénarios fournissent les paramètres initiaux et ceux nécessaires au cours de la simulation. Le modèle SLEDUM, et plus particulièrement le couplage de NEDUM et SLEUTH, permet de prendre en compte les paramètres qui évoluent et influencent l'urbanisation de façon dynamique et spatialement explicite.

Calibration et « validation » du modèle SLEDUM

La validation du modèle SLEDUM a été réalisée à l'aide de tests d'intégration et de validation. Ceci a été possible grâce à la mise à disposition de données géographiques par l'AUAT.

Les tests de validation, au nombre de 8, sont listés dans le tableau suivant.

N°	Spécification	
V_0	Le facteur jardin a un impact sur les surfaces urbanisées	
V_1A	Les scénarios Grandes Tendances ont un impact sur la forme urbaine	Influence d'un Choc pétrolier fort/faible
V_1B		Influence d'une Politique climatique / pas
V_2	Les Tendances Locales ont un impact sur la forme urbaine	
V_3	Les % SLEUTH ont un impact sur la forme urbaine	
V_4	Les cartes d'exclusion ont un impact sur la forme urbaine	
V_5	Les scénarios d'aménagement du territoire ont l'impact attendu et sont contrastés	
V_6	Les scénarios socio-économiques ont l'impact attendu et sont contrastés	

Tableau 3 : Tests de validation de SLEDUM

Par exemple, dans le cadre du test V4, les cartes d'exclusion ont une influence sur les formes urbaines. Quand on compare l'urbanisation issue des simulations intégrant les cartes de contrainte « a maxima - AT2a et AT2b » et « ville archipel - AT3 » avec celle intégrant la carte de contrainte « a minima - AT1 », on peut constater que des différences existent : ces contraintes ont une influence - logiquement - sur la localisation de l'urbanisation ainsi que sur les densités d'urbanisation. Par exemple (carte AT3 - AT1), la ville archipel offrant moins de possibilités pour l'étalement urbain, cette contrainte tend implicitement à la verticalisation. De même, la ceinture verte (AT2a - AT1 et AT2b - AT1) influe les densités de bâti : toute chose étant égale par ailleurs, cela favorise une densification à l'intérieur et à l'extérieur de celle-ci.

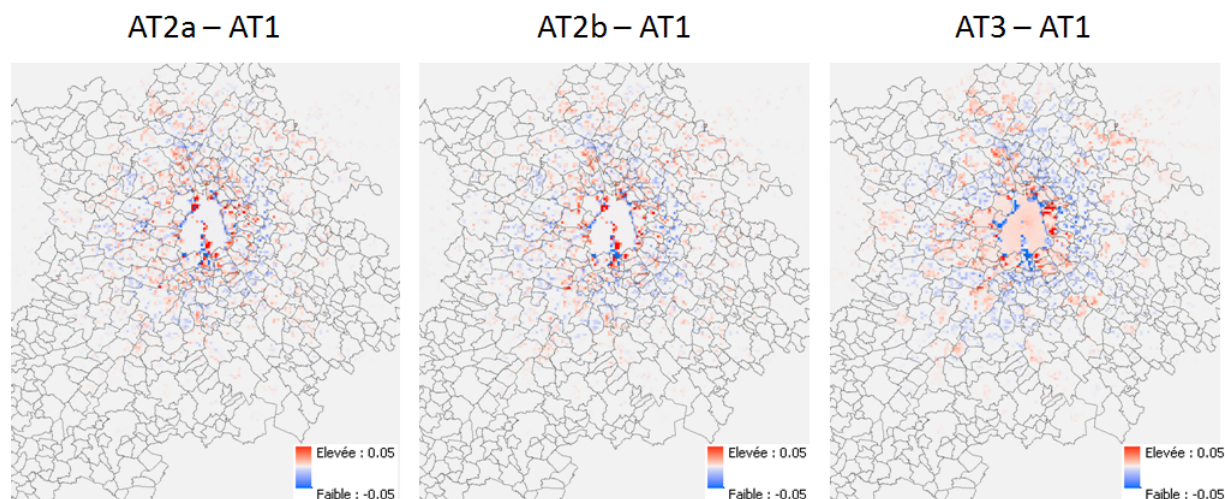


Figure 13 : Cartes de densités de population. Comparaison 2 à 2 de plusieurs scénarios.

Valorisation des développements

Articles

Doukari O., Houet T., Aguejdad R., Clarke K. (Submitted), SLEUTH*: Assessment of a scenario-driven model for projecting contrasted urban growth, *International Journal of Geographical Science*

Aguejdad R., Doukari O., Houet T., (Soumis). SLEUTH* : un nouveau modèle d'expansion urbaine orienté-scénarios. Optimisation du modèle SLEUTH. *Revue internationale de Géomatique*.

Communications orales

Doukari O., Aguejdad R., Houet T., (2011) Simulation de l'expansion urbaine : vers un modèle orienté scenarios. Application à l'aire urbaine de Toulouse. *Colloque "Images & Villes"*, 12 et 13 décembre 2011, Université Paris-Diderot, Paris 13.

Aguejdad R., Houet T., Bretagne G., Luc Adolphe L., Viguié V., Lefevre G., Marchadier C., Masson V., 2011. La croissance urbaine à l'horizon 2100 : de la rétrospective à la modélisation prospective, application à l'aire urbaine de Toulouse. Colloque : "La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain", 23-24 février 2011, Marne la Vallée.

Aguejdad R., Viguié V., Doukari O., Houet T., Avner P., (2011) Etalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation. Application à l'aire urbaine de Toulouse. *Séminaire « La géoprospective : Apports de la dimension spatiale aux recherches prospectives »*, 4 et 5 Avril 2011, Nice-Cannes.

Logiciel

Le logiciel SLEUTH*, dans sa version encapsulée pour Windows, fait l'objet d'une étude préliminaire d'invention en vue d'être breveté.

Formation

Le logiciel SLEUTH*, dans sa version encapsulée pour Windows, a été utilisé dans le cadre d'une formation en modélisation prospective destinée à de jeunes chercheurs (Workshop « La géo en prospective » - 23-26 sept 2012, Brest, <http://geo-prospective.sciencesconf.org/>), à un public de professionnels du monde de l'aménagement du territoire (<http://cnrsformation.cnrs.fr/stage.php?stage=14219&mc=g%C3%A9ogra>) ainsi qu'à des étudiants de Master 2 (AgroParisTech, Université de Rennes, Université de Toulouse 3).

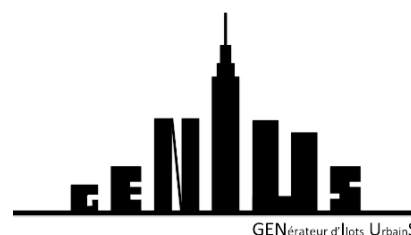
Evolution des îlots urbains : le modèle GENIUS

Afin d'évaluer la consommation énergétique des bâtiments et le microclimat urbain dans les villes futures, il est nécessaire de connaître des données d'entrée précises telles que la morphologie des bâtiments, leur matérialité, leurs équipements, etc.

Or, dans le cadre de ce projet prospectif, les informations utilisables en entrée sont :

- soit issues de scénarios et donc peu détaillées et non cartographiées,
- soit issues des cartes produites par SLEDUM et ne contenant pas d'indication sur la morphologie urbaine.

Nous avons donc besoin d'un outil intermédiaire qui reconstitue les cartes par pas de temps à partir des données disponibles : ce sera GENIUS (GENérateur d'Ilots UrbainS).



La génération d'îlots va se réaliser en deux temps.

Tout d'abord, à partir de bases de données urbaines actuelles, nous allons générer une première carte constituée de ce que nous appelons les « îlots types ». Il s'agit d'une représentation simplifiée de la ville constituée de l'assemblage d'archétypes d'îlots urbains.

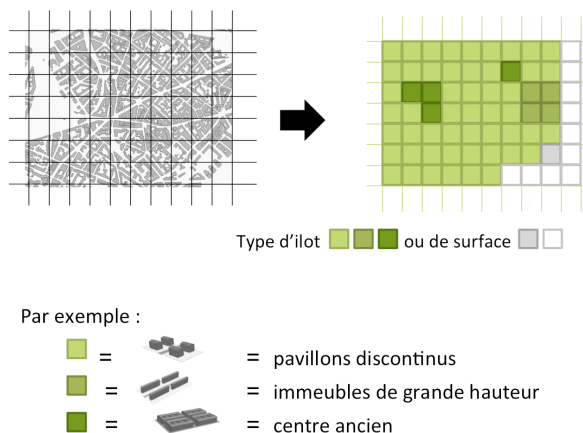


Figure 14 : Génération de la carte initiale - Schéma de principe

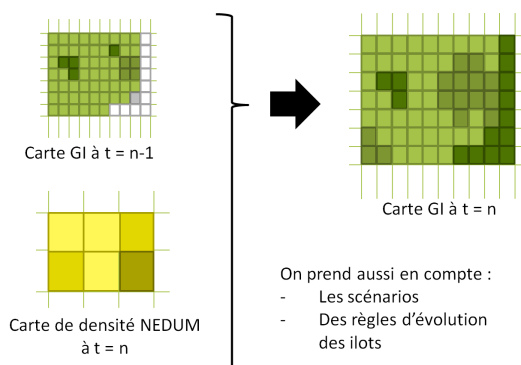


Figure 15 : Génération des cartes - Schéma de principe

Dans un deuxième temps, pour chaque année jusqu'à 2100, GENIUS va échanger avec SLEDUM qui lui fournira des informations sur l'occupation des sols et la densité bâtie brute. En fonction des sorties de SLEDUM, des scénarios, de la carte d'îlots types de l'année précédente et de règles d'évolution urbaine, GENIUS va générer une nouvelle carte chaque année.

Carte initiale

Afin de générer une carte « archétypale » à partir de bases de données urbaines actuelles, nous avons caractérisé chaque maille par des paramètres morphologiques issus de bases de données existantes (BD Topo de l'IGN et données infracommunales de l'INSEE).

Par la suite, nous avons réalisé une analyse statistique de ces paramètres pour identifier de manière automatique les types d'îlots dans chaque maille.

Choix des îlots types

Nous avons sélectionné 7 formes urbaines de référence ou “îlots types”:




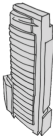
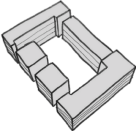

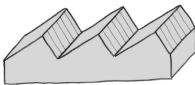
Type	Illustration	Type	Illustration
N° 1 Pavillon continu		N° 4 Immeuble discontinu	
N° 2 Pavillon discontinu		N° 5 Immeuble de grande hauteur	
N° 3 Immeuble continu		N° 6 Centre ancien	
		N° 7 Bâtiment d'activité	

Tableau 4 : Les 7 îlots types retenus

Chaque maille de 250 m x 250 m contient un type d'îlot et un seul parmi les 7 formes urbaines de référence. Un ou plusieurs usages peuvent être attribués au type d'îlot choisi. Chaque maille contient également des bâtiments auxquels sont associées des données attributaires (hauteur, âge, surface, ...).

Choix des paramètres

Afin d'identifier les types d'îlot, il faut caractériser chaque maille avec des indicateurs morphologiques. Ainsi, nous avons mené une analyse bibliographique dans l'objectif d'être le plus exhaustif possible dans le choix de ces paramètres : (1) (Tsai, 2005), (2) (Adolphe et al., 2002), (3) (Long & Kergomard, 2005), (4) (Fouad, 2007), (5) (AUCAME, 2010), (6) (Communauté métropolitaine de Québec, 2010), (7) (Atelier Parisien d'URbanisme, 2007), (8) (Moulinié & Naudin-Adam, 2005a) et (9) (Salat, 2011).

Par la suite, nous n'avons conservé que les indicateurs pouvant être calculés à partir des bases de données à notre disposition. Une étude statistique nous a également permis d'éliminer une partie des indicateurs lorsque certains étaient trop fortement corrélés. In fine, seuls 33 indicateurs sont retenus.

Classification

Parmi les méthodes d'analyse exploratoire destinées à la classification, la plus utilisée est l'analyse en composante principale (ACP). Cette analyse a pour objectif premier de réduire le nombre de variables observées. On va ainsi passer d'un grand nombre de variables corrélées les unes aux autres à un nombre plus faible de facteurs non corrélés (c'est à dire les composantes principales). On pourra ensuite observer les individus grâce à leur coordonnées sur les composantes principales et réaliser plus facilement une classification (Bailey, 1994; Dunteman, 1989).

Notre analyse a mené à deux principaux résultats.















D'une part, elle a permis de déterminer, les paramètres les plus influents (c'est à dire ceux qui permettent de distinguer au mieux un type d'îlot d'un autre) :

- La densité bâtie brute
- La surface d'enveloppe extérieure
- La densité d'habitant nette
- La hauteur moyenne des bâtiments
- Le coefficient d'emprise au sol
- Le pourcentage d'habitat individuel/collectif
- La contiguïté.

D'autre part, nous obtenons via l'ACP une classification pertinente. En effet, les caractéristiques morphologiques des groupes obtenus correspondent bien aux types que nous avons prédéfinis.

Résultats et validation

La représentation cartographique de ces 7 groupes d'îlots précédemment déterminés nous donne la vision suivante de Toulouse :

Légende		
Pavillon discontinu		
Pavillon continu		
Immeuble discontinu		
Immeuble continu		
Immeuble de grande hauteur		
Centre ancien		
Bâtiment d'activité		

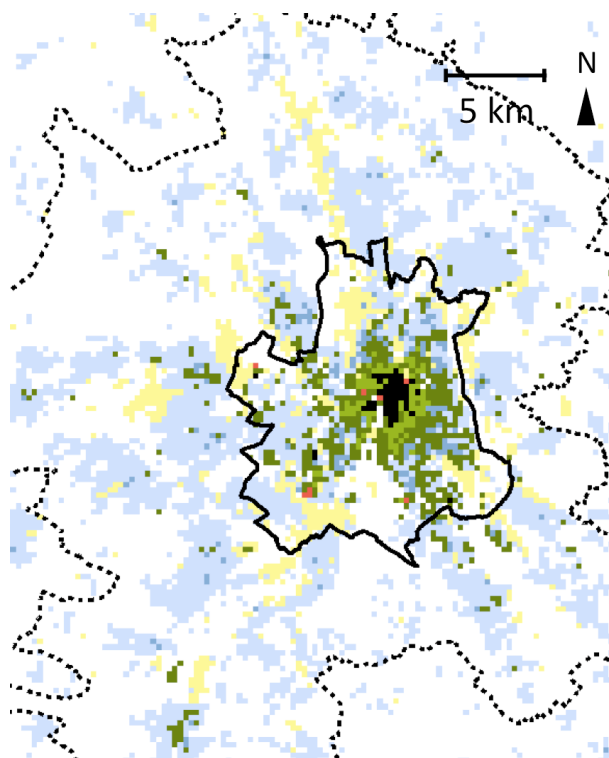


Figure 16 : Toulouse en 2010 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé)

Cette méthode a été validée sur le cas d'étude de la ville de Paris avec un taux de validation de 97% de la zone étudiée et de 71% des zones bâties.

Évolution typologique des quartiers

Principe

Notre étude repose sur 2 principes fondamentaux : la continuité dans la forme urbaine et le fait que la forme future d'un quartier dépende de sa forme passée (P. Panerai et al., 1999). Nous avons donc pris en compte, chaque année, le type d'îlot préexistant et croisé cette information avec les données disponibles : la densité bâtie brute de la maille (issue de SLEDUM) et l'âge des bâtiments (cette donnée étant déduite des changements successifs dans les cartes de GENIUS).

A priori, tant qu'elle reste dans un intervalle de densité compatible avec son type, la maille conserve la même typologie. Le type change si deux conditions sont réunies :

- le bâtiment existe depuis un certain nombre d'années,
- la densité bâtie brute dépasse la limite supérieure du type.

Pour les parties de la ville nouvellement générées par SLEDUM, on se base sur l'évolution des surfaces bâties calculée par le modèle et traduite en densité bâtie brute. A chaque intervalle de densité on fait correspondre un type de quartier qui est le plus susceptible d'apparaître compte tenu de la pression foncière.

La Figure 17 résume les intervalles de densité pour le neuf et pour les évolutions dans l'ancien.

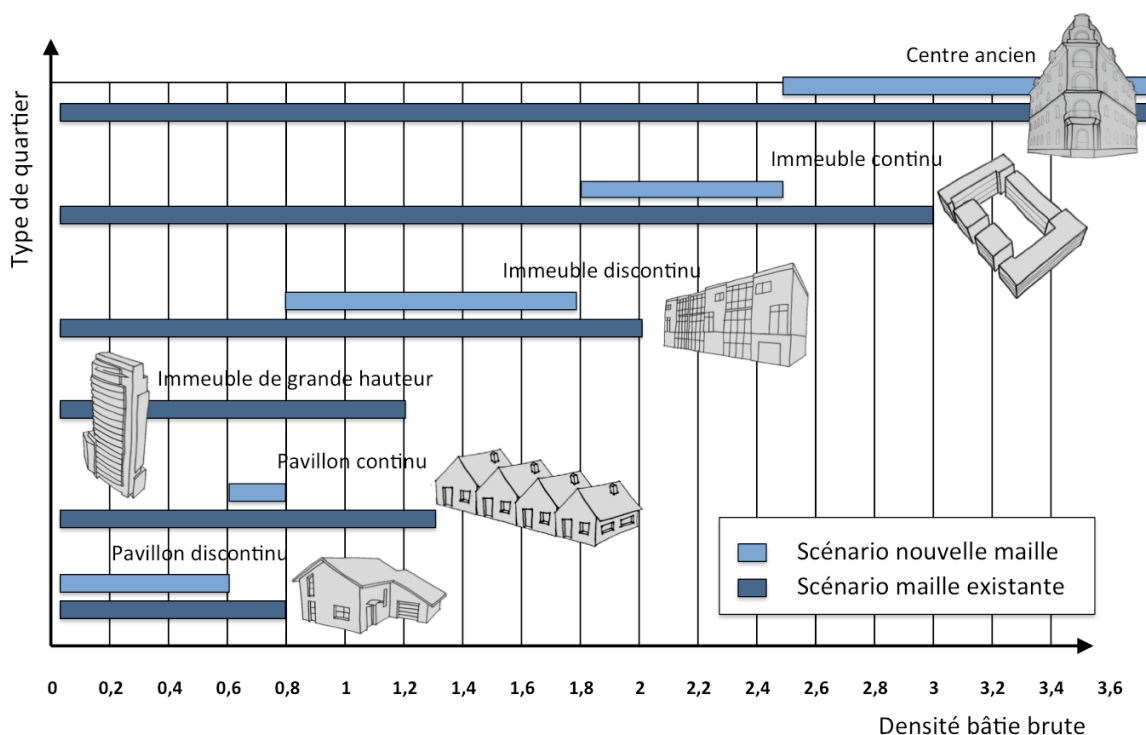


Figure 17 : Attribution des types de quartier en fonction de la densité

Les entretiens avec les experts et les scénarios qui en ont découlé nous permettent d'imaginer que dans le futur, des réglementations urbaines plus restrictives contraignent les formes urbaines, en particulier pour favoriser des formes urbaines plus compactes.

Nous avons donc prévu deux scénarios supplémentaires qui pourront se substituer au scénario « fil de l'eau » présenté sur la Figure 17.

Un premier scénario « formes urbaines compactes » va permettre, pour une densité donnée, de favoriser des formes urbaines plus compactes. En lieu et place d'individuel isolé on construira donc des maisons en bande, à la place d'immeubles discontinus on construira des immeubles continus, etc.

Un deuxième scénario part à contrepied du scénario « fil de l'eau » et prévoit la construction d'immeubles de grande hauteur en cas de fortes densités bâties. L'objectif serait de libérer le sol pour laisser plus de place au végétal.

En prenant en compte ces évolutions de typologie, GENIUS produit des cartes pour chaque pas de temps considéré.

Évolution morphologique des quartiers

L'objectif est de paramétrer chaque îlot type afin de l'adapter à la réalité construite. Pour cela, nous nous sommes basés soit sur des analyses statistiques des mailles existantes, soit sur des liens géométriques simples. Par ailleurs, certains paramètres vont dépendre directement de scénarios reflétant des politiques urbaines volontaristes. L'organigramme ci-dessous explicite l'enchaînement des calculs des différents attributs.

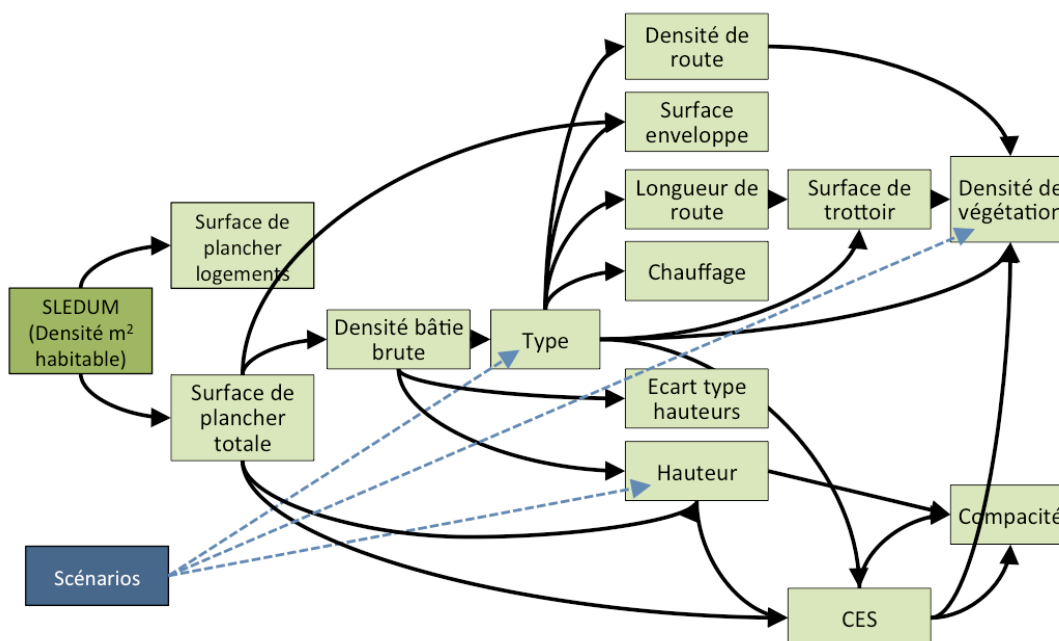


Figure 18 : Organigramme simplifié de calcul des paramètres

Validation

Afin de valider GENIUS, nous avons choisi de faire une simulation sur le passé de l'évolution de Paris et de comparer les résultats à la réalité de la ville existante.

Les taux de validation des typologies sont très bons :

- le pourcentage de validation global du bâti est de 91 %,
- le pourcentage de validation du bâti créé par GENIUS entre 1962 et 2008 est de 93%
- le pourcentage de validation du bâti réellement construit entre 1962 et 2008 (c'est à dire les mailles de la carte initiale de 2008 dont l'année de construction est postérieure à 1962) est de 84%.



Articles & Thèses

Bonhomme M., "Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine", *thèse de l'université de Toulouse, 11 décembre 2013*

Communications orales

Bonhomme M., Ait Haddou H., Adolphe L. « The Block-Generator: A tool for classification and evolution of urban typologies to assess environmental performances at the city scale ». PLEA 2012, Lima.

BONHOMME M., Hassan AIT HADDOU, Luc ADOLPHE, Energy and urban morphology : A decision support tool for urban energy paradox. ISUF 2011, The Eighteenth International Seminar on Urban. Form Urban Morphology and the Post-Carbon City Concordia University, 26 - 29 August 2011, Montréal, Canada.

4. MODÉLISATION DU CLIMAT URBAIN & CHANGEMENT CLIMATIQUE

Modèle de climat urbain TEB-SURFEX

Présentation

Le modèle TEB (Town Energy Balance, Masson 2000) permet de simuler les échanges d'énergie entre ville et atmosphère. Il a récemment été amélioré afin d'être aussi capable de simuler finement des impacts liés à l'énergétique du bâtiment ou le confort humain, ainsi que certains aménagements pouvant être mis en œuvre dans des stratégies d'adaptation au changement climatique (verdissement, toits végétalisés, climatisation, etc...).

Un autre développement important de TEB, propre à ACCLIMAT et réutilisé ensuite dans MUSCADE, a été lié au couplage avec GENIUS et la prise en compte des scénarios technologiques liés au bâti et aux usages (cf ci-après).

Plus en détail, le bilan d'énergie des bâtiments prend en compte les vitrages (et volets), les charges internes, la conduction dans les parois (décrites avec plusieurs types de couches possibles, permettant en particulier l'isolation à l'intérieur ou par l'extérieur), la ventilation, l'infiltration, et différents systèmes de climatisation et chauffage. Les rejets d'énergie liés à ces systèmes vers l'extérieur peuvent se faire au niveau de la façade ou du toit. Les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation sont calculées à chaque instant (en fonction des conditions extérieures et intérieures et des échanges entre les deux) et intégrées sur l'année.

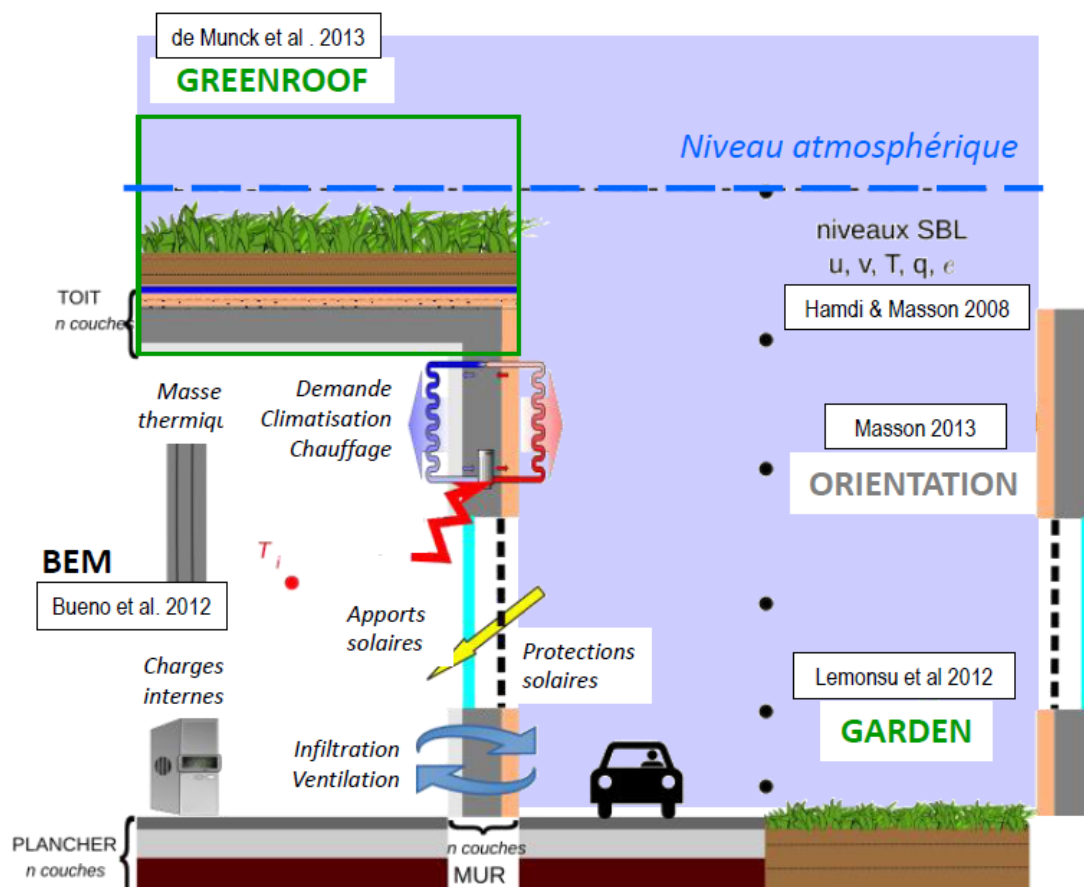


Figure 19 : Représentation des processus du modèle TEB

Le micro-climat dans la rue est simulé avec une bonne résolution verticale (6 niveaux sous 30 m). Les profils de température, vent, humidité et turbulence de l'air sont ainsi simulés et interagissent avec les éléments bâtis et la surface (routes et jardins). Les jardins, simulés avec le modèle d'« Interface Sol-Biosphère-Atmosphère » (ISBA au sein même du canyon urbain sont bien sûr aussi utilisés, afin de prendre en compte des stratégies de verdissement. Des indices de confort (UTCI, Universal Thermal Climate Index) sont calculés à l'intérieur mais aussi à l'extérieur, à l'ombre et au soleil. Les toits végétalisés sont aussi simulés avec ISBA, mais en modifiant le fonctionnement du sol pour tenir compte du fait que l'on utilise des substrats artificiels.

Les surfaces urbaines sont donc simulées par TEB, incluses dans SURFEX. Les surfaces végétales naturelles ou agricoles à l'extérieur de la ville sont simulées par ISBA. Les contrastes de comportement énergétique entre les deux vont créer un îlot de chaleur, pouvant être différent suivant le scénario urbain simulé.

La caractérisation des matériaux urbains

Pour établir le bilan d'énergétique du canyon urbain équivalent, le modèle TEB a besoin de l'albédo (intégré entre 0,3 et 2,5 μm) et de l'émissivité dans les infrarouges thermiques (intégré entre 5 et 12 μm) pour les principales surfaces suivantes : route, toit, partie opaque des façades, vitrage.

Dans ce but, l'ONERA-DOTA a réalisé une base de données de propriétés radiatives de matériaux urbains définis au préalable utilisables dans le modèle TEB (pour différents types de façades, toitures et chaussées). En plus des données déjà existantes, des mesures ont été spécifiquement réalisées pour ACCLIMAT avec divers instruments de mesures (par exemple un goniomètre pour les gros échantillons, cf photo) pour des matériaux émergents : peintures blanches rugueuses, panneaux solaires photovoltaïques, bardages métalliques, bétons architectoniques, vitrages (dont basse émissivité).



Par exemple, les albédos des panneaux solaires varient typiquement de 11 % à 16 % en fonction de la position du soleil et de l'inclinaison du capteur, avec une émissivité de 0.93.

Le lien avec GENIUS

GENIUS produit des cartes de type d'îlots urbain, avec pour chaque îlot une soixantaine d'indicateurs (morphologiques, d'usage, d'occupation du sol, etc...). Cette information permet de déduire l'ensemble des paramètres géométriques et d'occupation du sol pour TEB. De plus, le type d'îlot ainsi que l'âge des bâtiments dans l'îlot permet d'estimer quel type de bâtiment se situe majoritairement dans cet îlot. Par exemple, à Toulouse, un bâtiment d'avant 1900 dans le centre dense sera considéré comme ayant été construit en briques.

Ceci permet de déduire, à partir de la carte d'îlot et d'un fichier d'expertise architecturale de type de bâti, l'ensemble des paramètres architecturaux des bâtiments dans chaque maille du modèle : par exemple, des capacités calorifiques, les conductivités thermiques, la

fraction de vitrages, et plus généralement l'ensemble des paramètres issus des techniques constructives.

Les scénarios sont inclus à deux niveaux lors de ces étapes :

- Premièrement, un taux de végétalisation des espaces libres (non définis dans la carte d'îlot comme route, bâtiment, parc et espace vert public, eau, jardin privé - en fonction du type d'îlot-) permet de verdir plus ou moins la ville.
- Deuxièmement, pour les bâtiments construits ou rénovés lors des périodes futures, les paramètres architecturaux issus des techniques constructives sont déduits pour chaque type de bâtiment à partir du fichier d'expertise architecturale décrivant les technologies de bâti.

Scénarios climatiques régionaux

Dans le cadre du projet ACCLIMAT un des objectifs scientifiques est « d'extraire, à partir des projections climatiques sur l'Europe, des situations météorologiques pertinentes sur la région toulousaine, en adaptant une méthode de descente d'échelle appropriée ».

Concernant les scénarios climatiques disponibles, à l'heure actuelle 2 deux types de projections sont disponibles : un premier groupe issu du projet Européen ENSEMBLES et un deuxième groupe issu du Climate Center du Mark Plank Institute (MPI) en Allemagne. Ces projections climatiques ont été corrigées de leur biais systématique par rapport à la période de référence 1961-1990 et pour chaque jour de la série un type de temps a été attribué.

Concernant la méthode de descente d'échelle, deux méthodes ont été développées.

La première, commune aux projets MUSCADE et ACCLIMAT, consiste à identifier des types de temps représentatifs de la climatologie locale à partir d'une méthode de classification des données d'observation à haute fréquence temporelle. Une fois les types de temps définis et attribués aux jours d'une période de temps donnée (dans le passé ou le futur) des séries à fréquence horaire peuvent être reconstruites en combinant les séries à fréquence journalière et le cycle diurne du type de temps de la journée.

La deuxième, développée spécifiquement pour le projet ACCLIMAT, consiste à obtenir des forçages 3D représentatifs des types de temps obtenus au préalable et cela pour le climat présent et le climat futur pour chacun des scénarios climatiques. Les journées les plus proches des centroïdes ont été extraites des fichiers du centre européen, et les champs 3D ont été interpolés sur la grille du modèle atmosphérique à haute résolution MesoNH (modèle de recherche développé par le CNRM et la Laboratoire d'Aérodynamique à Toulouse). En climat futur, une anomalie de température uniforme peut être ajoutée au champ correspondant au climat présent.

Forçage météorologique sur la ville

Une fois les conditions climatiques extraites des scénarios climatiques par descente d'échelle, il s'agit de prendre en compte l'effet urbain, en particulier l'îlot de chaleur. Pour ce faire, deux méthodes sont possibles.

La première, celle envisagée dès le début du projet, est de coupler SURFEX avec MesoNH (avec une résolution spatiale plus grande pour SURFEX, afin de décrire finement la ville). Ainsi le modèle météorologique crée de lui-même l'îlot de chaleur urbain. Cependant, cette

méthode ne peut être appliquée que sur un nombre restreint de jours (pour des raisons de coût calcul). Une méthodologie de combinaison des jours simulés (et des impacts associés) a été développée en combinant les simulations des jours correspondants aux types de temps et leurs fréquences d'occurrence.

La deuxième possibilité, permettant des simulations longues sur 1 an en continu, n'utilise comme données météorologiques que celles de la station météorologique de campagne la plus proche. L'îlot de chaleur est donc reconstruit grâce à des considérations énergétiques (prenant en compte les flux de chaleur en ville et à la campagne) et un modèle de couche limite intégral sur la ville. Ce modèle simplifié a été développé dans le cadre des projets MUSCADE et ACCLIMAT (Bueno et al 2013). Les résultats et impacts présentés dans ce rapport ont été simulés en utilisant cette approche.

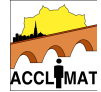
Valorisation des développements

Articles & Thèses

1. *Bueno, B.; Pigeon, G.; Norford, L. K.; Zibouche, K. & Marchadier, C. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme Geoscientific Model Development, 2012, 5, 433-448 <http://www.geosci-model-dev.net/5/433/2012/gmd-5-433-2012.html>*
2. *Bueno B., Hidalgo J., Pigeon G., Norford L. and Masson V., 2013: Calculation of air temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52, 472-483, doi:10.1175/JAMC-D-12-083.1*
3. *De Munck C. A. Lemonsu, R. Bouzouidja, V. Masson, R. Claverie, 2013: "The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB", Geoscientific Model Development, 6, 1941-1960, doi:10.5194/gmd-6-1941-2013*
4. *Lemonsu A., V. Masson, L. Shashua-Bar, E. Erell, and D. Pearlmutter, 2012 : Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas, Geoscientific Model Development, 5, 1377-1393*
5. *Masson V., C. Marchadier, L. Adolphe, R. Aguejdad, P. Avner, M. Bonhomme, G. Bretagne, X. Briottet, B. Bueno, C. de Munck, O. Doukari, S. Hallegatte, J. Hidalgo, T. Houet, A. Lemonsu, N. Long, M.-P. Moine, T. Morel, L. Nologues, G. Pigeon, J.-L. Salagnac, K. Zibouche, 2013 : Adapting cities to climate change: a systemic modelling approach. Urban Climate, submitted.*

Communications orales

1. *Julia Hidalgo, Bruno Bueno, and Valéry Masson, How to obtain atmospheric forcing fields for Surface Energy Balance models in climatic studies, 2011, General Assembly of the European Geosciences Union, March 2011, EGU.*
2. *Bruno BUENO, Grégoire PIGEON, Development and evaluation of a Building Energy Model in the Town Energy Balance scheme, March 2011, EGU.*



3. *B. Bueno, G. Pigeon, K. Zibouche, V. Masson, DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A COMPREHENSIVE BUILDING ENERGY MODEL IN THE TOWN ENERGY BALANCE SCHEME : TEB-BEM, International Workshop on Urban Weather and Climate : Observation and Modeling, 12–15 July 2011, Beijing, China.*
4. *Pigeon G., Zibouche K., Bueno B.. Development and evaluation of a comprehensive building energy model in TEB. ICUC8, 6-10 Aug 2012, Dublin.*
5. *Hidalgo J., Bueno B. and Masson V. About forcing fields for SVAT models in urban climatic studies. ICUC8 conference in Dublin, August 2012.*
6. *Bueno B., Hidalgo J., Pigeon G., Norford L. Prediction of urban air temperatures from measurements at an operational weather station. ICUC8 conference in Dublin, August 2012.*
7. *Masson et al, Adapting cities to Climate Change : a systemic modelling approach, ICUC8 conference in Dublin, August 2012.*
8. *Marchadier et al, How to define and assess city adaptation strategies? ICUC8 conference in Dublin, August 2012.*

5. INTÉGRATION : LA PLATEFORME DE SIMULATION

Défi de l'intégration

Les spécifications techniques générales de la plateforme ACCLIMAT étaient de disposer d'une plateforme de modélisation unique permettant, sous un seul environnement informatique, de simuler l'ensemble des scénarios systémiques avec l'ensemble des modèles urbains et de climat « connectés » ou couplés à chaque pas de temps.

Les objectifs techniques de l'intégration étaient donc multiples :

- Identifier les paramètres et variables que les modèles doivent s'échanger ;
- Préparer les interfaces d'échange entre les modèles ;
- Les assembler (coupler ou connecter) et les synchroniser pour permettre une simulation « ordonnée » ;
- Apporter une solution numérique aux différences d'échelles spatiales entre les modèles ainsi qu'aux différences de temps de calcul de chaque modèle;

Les interfaces d'échanges entre modèles présente une grande hétérogénéité : échange d'un seul paramètre global, échange de champs bi-dimensionnels, nécessité d'interpoler spatialement les données avant de les réceptionner sur la grille d'un autre modèle, les synchroniser temporellement si la différence de pas de temps et le choix de la fréquence de couplage le nécessitent.

Ayant à faire à des modèles non prévus pour communiquer numériquement avec d'autres, développés dans des langages différents (Matlab, C, Fortran,...) par des communautés scientifiques bien distinctes, et étant donnée la différence de granularité des interfaces de couplage/échanges attendues entre les modèles, l'outil logiciel sous lequel nous avons décidé d'intégrer les modèles est le coupleur **Open-PALM**.

L'environnement PALM permet :

- de contrôler l'enchaînement des modèles (synchronisation et séquençement) ;
- d'optimiser les calculs en parallélisant certaines tâches (un modèle peut par exemple continuer son intégration au pas de temps suivant dès que les calculs au temps précédent sont terminés et que le modèle suivant peut commencer)
- de scripter et automatiser les traitements périphériques aux modèles (récupération de données d'entrée, manipulation de fichiers)

Architecture d'assemblage/couplage des modèles

Sur la figure 20 ci-dessous est représenté schématiquement le flux de calcul dans la plateforme. Le modèle SLEDUM fait une intégration entre 2 instant t_{n-1} et t_n , intervalle appelé « pas de temps des modèles urbains » ou « cycle ». Typiquement ce cycle est de 5 ou 10 ans (il faut laisser suffisamment de temps à la ville pour évoluer significativement). A

chaque fin de cycle GENIUS est à son tour appelé. Les modèles urbains SLEDUM+GENIUS sont ainsi intégrés de 2010 à 2100.

Si le temps de calcul t_n correspond à une date à laquelle on souhaite calculer les impacts de la nouvelle ville à cette date (par exemple 2050) sur le climat-urbain, alors une simulation SURFEX-TEB est lancée. Son temps d'intégration est différent : il doit couvrir une année climatologique donnée (peu importe sa temporalité exacte, c'est la situation climatique et la reproduction du cycle annuel qui nous intéressent).

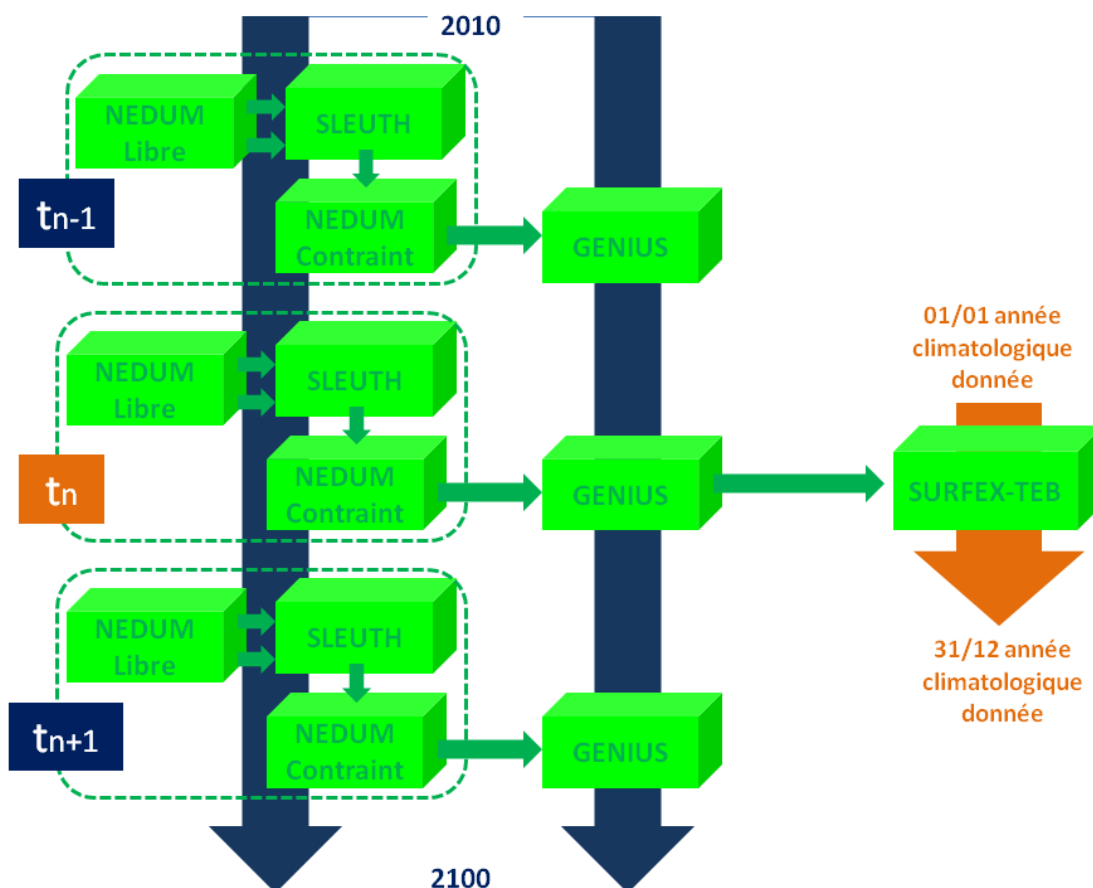


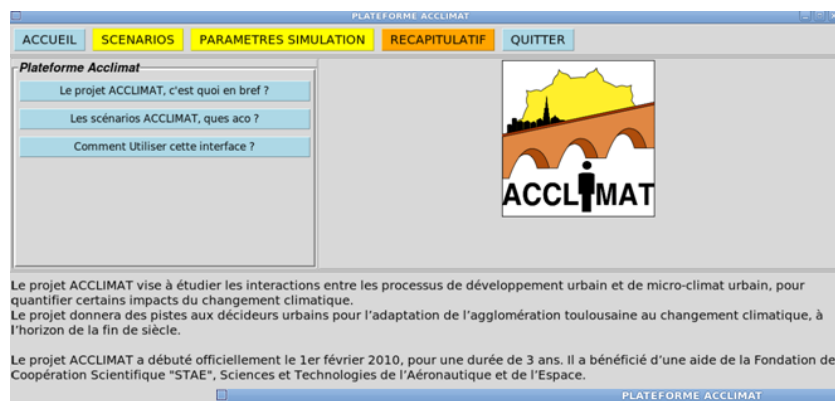
Figure 20 : Schéma d'intégration temporelle dans la plateforme ACCLIMAT. Il donne le séquençage des calculs et les temps d'intégration. Les boîtes vertes représentent les modèles. Les pointillés verts délimitent le modèle couplé SLEDUM. Les flèches bleues verticales représentent l'axe des temps pour les modèles urbains (SLEDUM+GENIUS) sur la période de projection 2010-2100. La flèche orange est l'axe des temps pour le modèle d'impact sur le micro-climat urbain (SURFEX-TEB).

Flux des données échangées entre modèles

La Figure 21 donne une vue générale des informations transmises d'un modèle à l'autre. La trame bleu clair le long de laquelle se succèdent les différents modèles (boîtes vertes) ne sous-entend pas que l'exécution des modèles est purement séquentielle d'un point de vue numérique.

Pilotage de la plateforme

Utiliser la plateforme c'est la configurer (choisir le scénario systémique à jouer, par exemple), la compiler et l'exécuter. S'offrent à l'utilisateur 2 façons de réaliser ces opérations : en ligne de commande (mode plutôt réservé à un développeur) ou via une interface Homme-Machine (IHM).



(a) Page d'accueil.

(b) Page de sélection du scénario systémique.

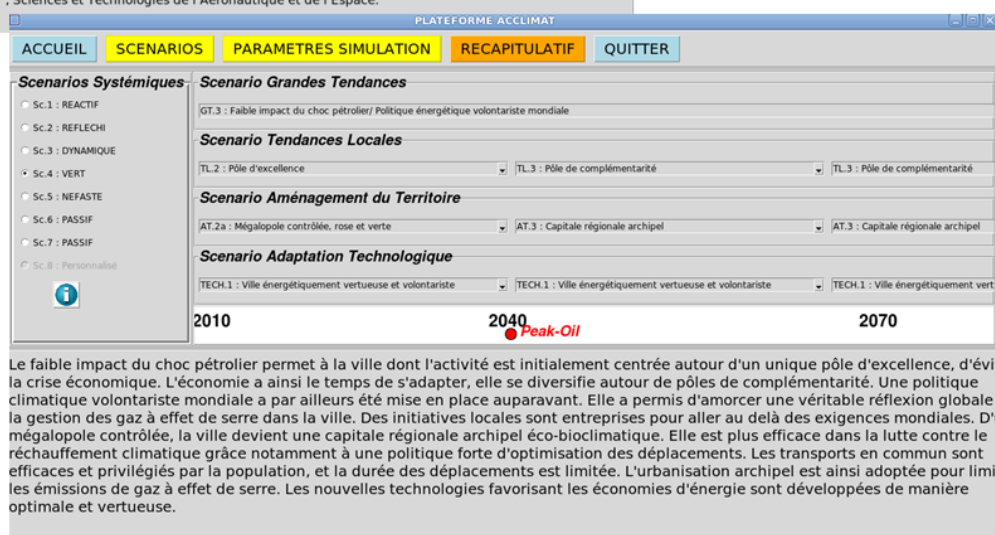
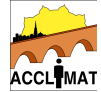


Figure 22 : (a) page d'accueil et (b) page de sélection scénario via IMH.

Cette interface homme-machine permet le choix :

- de la ville (même si seulement les données pour Toulouse existent actuellement)
- du scénario systémique
- des modèles à utiliser : uniquement l'expansion urbaine ou aller jusqu'aux modèles énergie-climat
- de paramètres de simulation, comme les dates de début et de fin
- du scénario climatique (même si ceci n'est pas encore implanté automatiquement dans la plateforme elle-même).

Ainsi, cette plateforme a été conçue de façon à être évolutive. L'objectif est de l'enrichir afin qu'elle puisse être utilisée sur d'autres villes. Un projet de recherche va d'ailleurs commencer en 2014 avec, entre autres, une action sur les bases de données urbaines à l'échelle de la France : le projet MapUCE. La plateforme pourrait aussi s'enrichir d'autres modèles pour calculer d'autres impacts et évaluer d'autres leviers.



Valorisation des développements

Rapports Techniques

M.-P. Moine et T. Morel : **Guide utilisateur-développeur de la plateforme ACCLIMAT**,
Rapport Technique CERFACS, TR-CMGC-11-136, septembre 2011, Toulouse, France

Communications orales

M.-P. Moine, T. Morel, V. Masson, C. Marchadier and the ACCLIMAT team: **A multidisciplinary modeling platform to draw possible futures of urban climate.**, 8th
International Conference on Urban Climate, 6th-10th August 2012 - Dublin, Ireland

Transfert de compétence

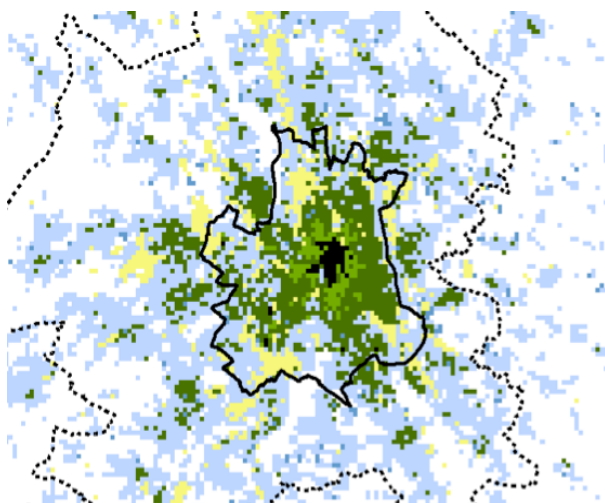
La plateforme ACCLIMAT fait actuellement l'objet d'un transfert de compétence de la recherche vers l'opérationnel. Ce transfert, à destination du bureau d'étude de Météo-France (DP/SERV/BEC), est assuré par le CNRM et le CERFACS. Il s'agit non seulement d'une tâche de portage, mais également d'adaptation de la plateforme (modularisation, préparation à des applications sur d'autres villes). Les utilisateurs potentiels sont les centres Météo-France en régions, qui souhaiteraient utiliser cette plateforme de simulation ville-climat afin de répondre à des demandes spécifiques de clients engagés dans les problématiques d'aménagement territorial et dans des plans climat-énergie (collectivités territoriales, bureaux d'études,...).

6. LES RÉSULTATS

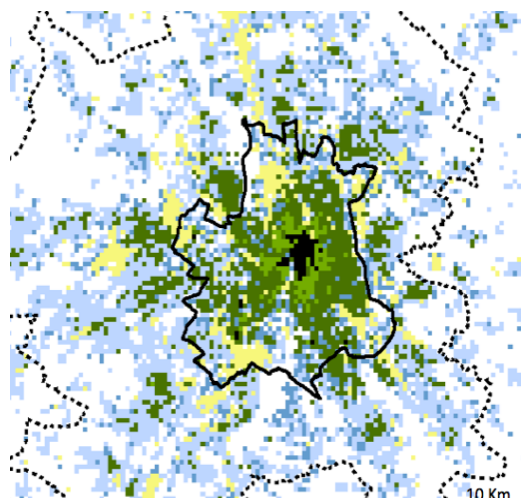
Quels sont les formes urbaines générées ?

Les sept scénarios systémiques produisent des formes urbaines différentes, que l'on retrouve sur les cartes d'îlots générées par GENIUS.

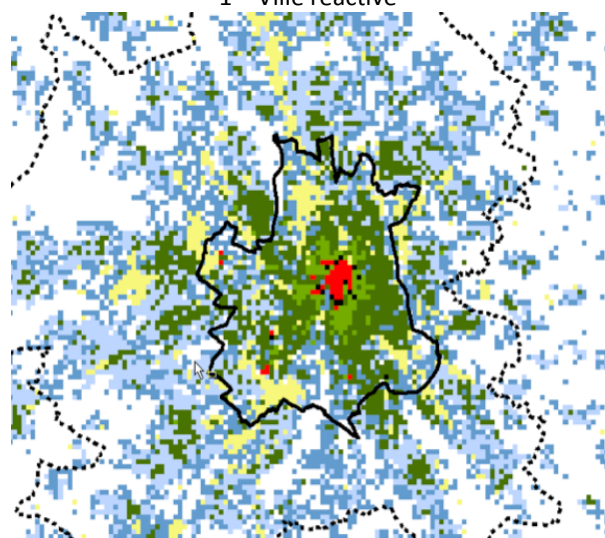
Les cartes d'îlots urbains



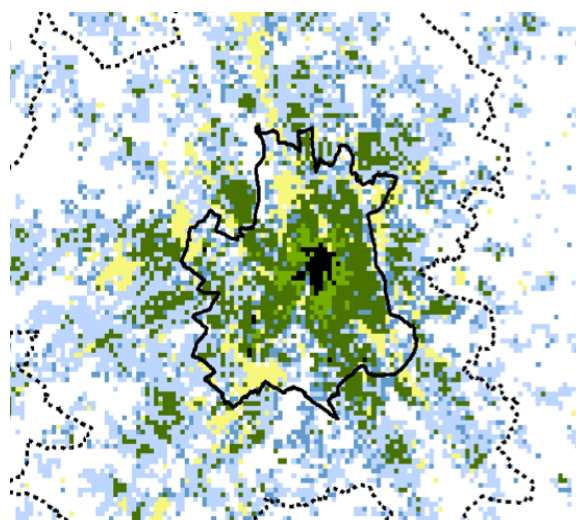
1 – Ville réactive



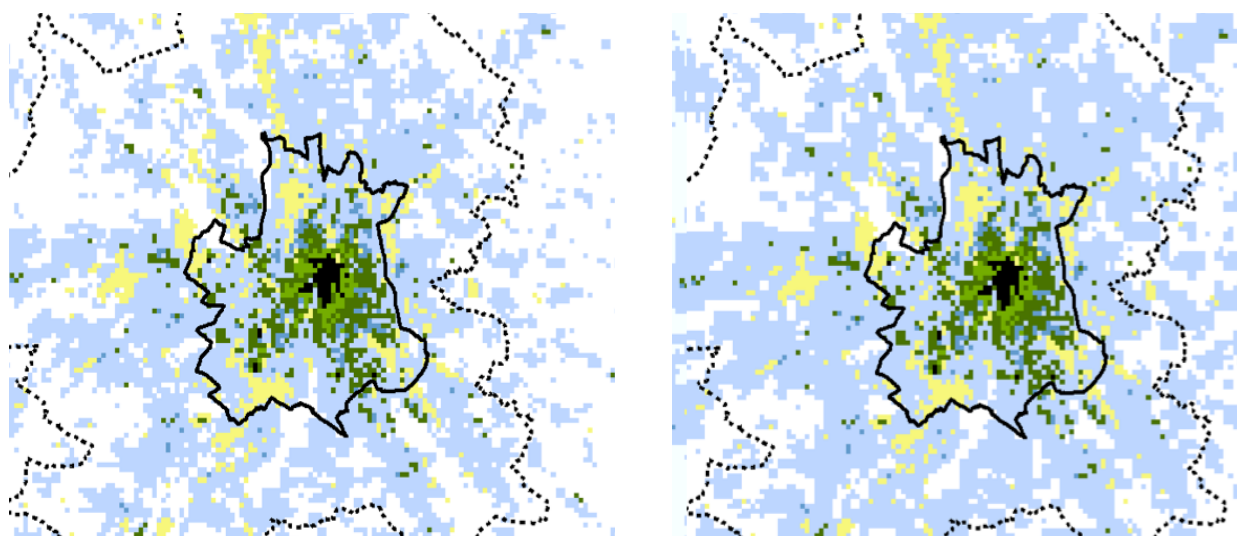
2 – Ville réfléchie



3 – Ville dynamique



4 – Ville verte



5 – Ville néfaste

6 – Ville passive

Figure 23 : Toulouse en 2100 selon GENIUS : répartition des types de quartier sur la ville (trait plein) et sur le pôle urbain (trait pointillé)

Les sept scénarios sont très contrastés. Cependant, on peut noter qu'en général, les mutations typologiques vers des formes compactes sont accentuées lorsqu'une politique globale de contrôle de l'expansion urbaine est menée en amont et traduite par SLEDUM (scénarios 2, 3 et 4).

Scénario 1 - Ville réactive

Dans ce scénario, la maison individuelle isolée (forme la plus bâtie actuellement à Toulouse) est privilégiée jusqu'en 2040. On observe donc jusqu'à cette date une augmentation rapide de ce type de logement.

Après 2040, ce sont des formes plus compactes qui sont encouragées par la réglementation. Cette nouvelle politique a des effets tant dans le secteur de la construction neuve que dans celui de la réhabilitation urbaine. Par conséquent, en nombre de mètres carrés construits, les pavillons et les immeubles sont à peu près équivalents en 2100. Cependant, la crise économique freine les nouvelles constructions après 2040 et les pavillons restent majoritaires en termes d'occupation du territoire. Comme précédemment, on note ici l'importance d'anticiper les politiques urbaines pour prendre en compte l'inertie de la ville.

Scénario 2 - Ville réfléchie

Dans ce scénario, les formes compactes sont privilégiées dès le début du siècle. Cela signifie que pour une densité bâtie brute donnée, là où on construisait habituellement des pavillons, on construit maintenant des immeubles (et de fait on laisse plus d'espaces libres au sol).

Ainsi, ce scénario voit sa progression de maisons individuelles réduite par rapport au scénario précédent, bien que l'évolution démographique soit la même dans les deux cas. En contrepartie, ce sont des formes plus denses qui sont construites : pavillons continus, immeubles discontinus et continus.

Scénario 3 - Ville dynamique

Les formes verticales sont ici encouragées par la réglementation urbaine. La principale conséquence est que ce scénario est le seul où l'on ne détruit pas les immeubles de grande hauteur existant. À l'inverse, il s'en construit de nouveaux dans les zones de fortes densités (nouvelles centralités autour de Toulouse et centre ancien). Par conséquent, le bâti ancien du centre où la pression foncière est importante est détruit pour construire des tours d'habitation et de bureaux du type de celles que l'on rencontre dans beaucoup de mégapoles mondiales.

Ce scénario privilégie également les morphologies compactes. Ainsi, décuplés par la croissance démographique, les quartiers de pavillons continus et d'immeubles vont largement être construits, principalement au travers de l'expansion de la ville mais également par un processus de reconstruction de la ville sur elle-même.

En effet, on observe dans ce scénario de nombreuses mutations des quartiers existants vers des quartiers plus denses. Ces mutations résultent de la densification liée au solde migratoire vers Toulouse mais surtout des contraintes réglementaires qui amènent à changer de type de quartiers dès que la densité augmente un peu. Comme précédemment, ces mutations ont surtout lieu en proche périphérie.

Scénario 4 - Ville verte

Dans ce cas de figure, les formes compactes sont privilégiées dès le début du siècle.

Ainsi, ce scénario voit sa progression de maisons individuelles réduite au profit de formes plus denses : pavillons continus et immeubles discontinus dont la production est décuplée par la hausse démographique. Les immeubles continus sont en revanche moins construits que dans le scénario 2 car la structure même de la ville conduit à des densités bâties plus faibles.

Comme dans le scénario 3, on observe de nombreuses mutations des quartiers existants vers des quartiers plus denses.

Scénarios 5 - Ville néfaste, 6 - Ville passive et 7 - Ville fil de l'eau

Dans ces scénarios, la construction de pavillons isolés prend le dessus. En effet, sans aucun contrôle de l'étalement urbain, des densités très faibles constituent l'expansion de Toulouse. Par ailleurs, aucune réglementation ne contraint la morphologie du bâti, les quartiers construits sont donc essentiellement constitués de maisons individuelles.

De plus, en l'absence de contraintes en termes de densité ou de réglementation, les quartiers existants n'évoluent presque pas. Seuls les immeubles de grande hauteur sont peu à peu remplacés par des quartiers plus denses.

Entre ces trois scénarios, la seule différence notable est l'évolution de la démographie qui conduit, dans le cas des scénarios 6 et 7, à un étalement urbain massif.

Évolutions morphologiques de la ville

Au delà de la répartition des typologies, GENIUS permet d'influencer la morphologie au sein d'un même type de quartier. Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques morphologiques les plus influencées par les différents scénarios.

Scénario	Densité de végétation sur le pôle urbain	CES	Hauteur
Existant 2010	0,9	0,128	6,1
1 – Ville réactive	0,8	0,086	5,7 ↓
2 – Ville réfléchie	0,9	0,090	6,1
3 – Ville dynamique	0,5 ↓	0,069 ↓	11,2 ↗
4 – Ville verte	0,7	0,089	6,2
5 – Ville en crise	0,5 ↓	0,099	5,8 ↓
6 & 7 – Villes passive & néfaste	0,5 ↓	0,092	5,8 ↓

Tableau 5 : Récapitulatif des évolutions morphologiques

Densité de végétation

En ce qui concerne la végétation sur le pôle urbain, pour la plupart des scénarios, la densité de végétation diminue sous l'effet de l'expansion urbaine qui grignote le territoire et donc les espaces végétalisés.

On peut remarquer que, très logiquement, les scénarios 1, 2 et 4 qui favorisent une végétalisation intensive des espaces non bâtis présentent une densité de végétation élevée. Au sein de ces trois scénarios, celui dont l'évolution démographique est la plus élevée (scénario 4) est également celui où la densité de végétation sur le pôle urbain est la plus faible. En effet, la tâche urbaine y est plus importantes, il y a donc globalement plus de zones bâties et donc moins de végétation. En revanche, celui où la population augmente peu et où l'expansion urbaine est la plus contrôlée (scénario 2) est celui où la densité de végétation est la plus élevée, conservant même le taux actuel.

Le fait de bâtir des formes peu compactes et donc de libérer de l'espace au sol n'est donc pas une garantie de quantité des espaces végétalisés. A l'inverse, on peut conclure que densité bâtie et densité de végétation sont tout à fait compatibles.

Coefficient d'emprise au sol

Quel que soit le scénario, le coefficient d'emprise au sol a tendance à diminuer en raison de l'expansion urbaine qui se fait majoritairement par des formes discontinues. On remarque logiquement que cette diminution est accentuée dans les scénarios encourageant les formes urbaines compactes, en particulier dans le scénario 3 qui encourage également la construction d'immeubles de grandes hauteurs.

Hauteur

Dans les scénarios 5, 6 et 7 où la construction de pavillons est très largement majoritaire et où les formes architecturales suivent une tendance fil de l'eau, la hauteur moyenne des bâtiments sur la ville diminue.

A l'inverse, dans le scénario 3 où les formes architecturales verticales sont encouragées, la hauteur moyenne augmente de près d'un étage.

Quels sont les leviers de l'expansion urbaine ?

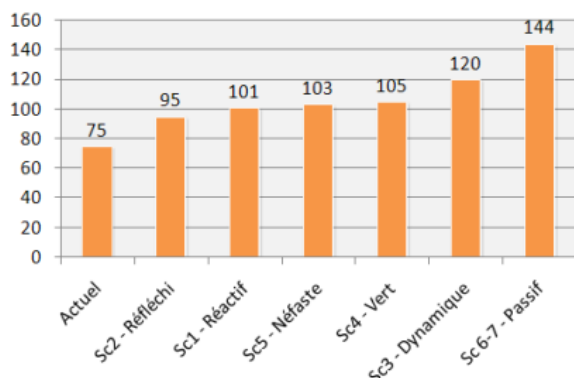
La mise en œuvre d'une politique de planification urbaine plus ou moins volontariste exige la prise en compte de facteurs influents tels que l'évolution de la démographie, l'attractivité économique de l'agglomération.

Toutefois, la forme urbaine de la ville influe sur l'environnement (biodiversité, qualité de vie...) ainsi que sur le climat urbain (îlot de chaleur). Quelle place donner à la végétation en ville? Quelle forme urbaine promouvoir (fil de l'eau? Ville compacte? Ville archipel?). Et suivant quelles conditions? Quels sont les avantages et inconvénients de chacune d'elles ? Tels sont les enjeux liés au(x) modèle(s) urbain de demain.

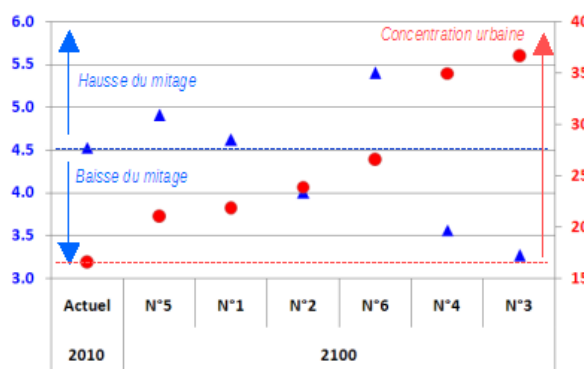
« Laisser faire » ? (scénarios n° 5/6/7)

Si la hausse de la taille moyenne des zones urbaines témoigne de la tendance à la concentration urbaine, la forte augmentation du nombre de zones illustre la poursuite du phénomène de mitage (de +21% à +42%).

La poursuite des tendances passées (fil de l'eau) met en évidence le rôle moteur des axes routiers dans l'expansion urbaine: le désengorgement du réseau par son extension peut ainsi avoir un effet négatif, catalysant l'urbanisation.



Surface urbanisée
(milliers d'hectares)



Nombre (milliers) et
taille moyenne (ha)
des zones urbaines

Favoriser la ville compacte ? (scénarios n° 1 vs. n° 3)

Le contrôle de l'expansion urbaine par la réglementation et la mise en place de la trame verte et bleu (corridors + ceinture verte) a une influence limitée en cas de crise. Dans le cas contraire, elle est efficace (baisse du mitage).

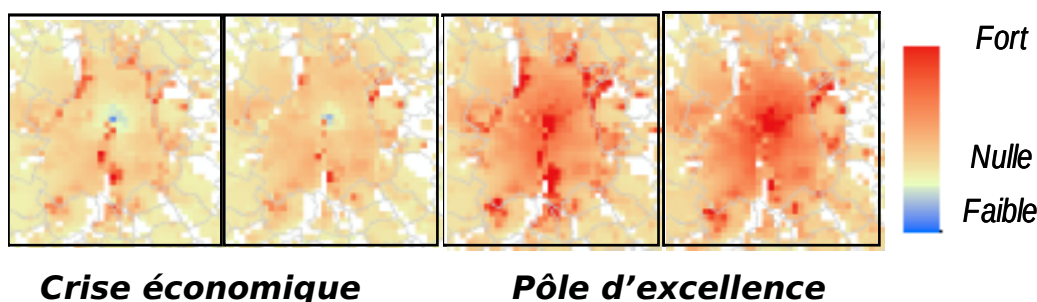
La ceinture verte repousse l'urbanisation au-delà de ses limites, augmentant fortement les migrations pendulaires (de +58% à +122% par rapport à 2010). Les zones concernées présentent donc un fort enjeu foncier.

Vers une ville archipel ? (n° 2 et n° 4)

Une politique « ville » archipel n'a pas de réelle influence sur la forme urbaine de la métropole en cas de crise (scénario 2). Dans le cas contraire (scénario 4), elle limite le mitage et influence fortement sur la hausse des migrations pendulaires (de +57% à +120% par rapport à 2100). L'effet polarisant (augmentation des zones urbaines de moyenne taille) est favorable à la mise en place de réseaux de transport multimodaux. Son efficacité requiert une concertation avec les agglomérations / intercommunalités voisines.

Quelle densité pour le centre ville ? Dynamisme économique vs. Crise

Une situation de crise engendre une dépopulation du centre-ville, au profit de la périphérie. Les coûts du foncier deviennent trop élevés par rapport aux coûts du transport. A l'inverse, un fort dynamisme favorise la densification du centre-ville (par rapport à 2010).



Favoriser la végétation en ville ?

On observe que densité bâtie et végétalisation de la ville sont compatibles. Par exemple, le scénario 4 « Vert » a la densité bâtie la plus forte mais aussi une densité de végétation élevée, en raison d'une politique de végétalisation volontariste.

A l'inverse, promouvoir la libération des sol n'est pas systématiquement synonyme de verdissement de la ville. Par exemple, le scénario 3 « Dynamique » a le CES le plus faible mais également la densité de végétation la plus basse.

Il est donc primordial de mettre en œuvre des politiques de végétalisation spécifiques dans la ville.

Quels impacts sur l'énergie et le climat ?

Protocole des simulations

Les impacts énergétique et sur le micro-climat ont été modélisés avec des simulations d'un an forcées en utilisant le protocole de simulation via un forçage par une station météorologique (cf chapitre 4). Les données choisies proviennent de la campagne de mesures CAPITOUL (mars 2004-mars 2005). Cette période était typique du climat présent, avec même un été frais peu ensoleillé.

Îlot de chaleur urbain

Les scénarios d'aménagement du territoire semblent avoir un impact sur l'îlot de chaleur urbain. Rappelons que le processus majoritaire créant l'îlot de chaleur urbain provient de la minéralisation des surfaces : les matériaux urbains ayant tendance à stocker de la chaleur le jour pour la restituer à l'atmosphère la nuit. Diminuer l'îlot de chaleur peut ainsi être réalisé soit en diminuant, par l'introduction de végétation, ces surfaces imperméabilisées, soit en permettant qu'elles stockent moins de chaleur le jour, via par exemple des peintures blanches ou réfléchissantes. L'îlot de chaleur peut être accentué par des rejets de chaleur liés aux activités humaines, en particulier ceux dus au chauffage et à la climatisation.

L'expansion urbaine forte dans l'ensemble des scénarios aurait tendance à augmenter l'îlot de chaleur par rapport à aujourd'hui. Ceci, toute autre considération exclue, devrait être encore plus prononcé pour les scénarios 3 « dynamique », 4 « vert », 6 « passif » et 7 « fil de l'eau » pour lesquels Toulouse est en croissance jusqu'en 2100.

Nous allons donc voir comment les différentes stratégies d'aménagement modifient cette perspective.

Les scénarios « énergivores »

Les scénarios 5 « néfaste », 6 « passif » et 7 « fil de l'eau » augmentent tous trois l'îlot de chaleur urbaine de manière significative, de plus de 1.5°C en été et, pour le scénario « néfaste » de 0.5°C en hiver. La faible proportion de végétation dans ces scénarios explique une partie de ces tendances. La non rénovation des bâtiments dans le scénario « néfaste » ne permet pas l'application des peintures réfléchissantes ou l'isolation par l'extérieur sur bon nombre de bâtiments, et ne permet donc pas de diminuer le stockage de chaleur en journée. C'est pourquoi, même si la population cesse d'augmenter dès 2050 pour ce scénario, l'îlot de chaleur, lui, reste fort.

Le scénario « bâti de grandes hauteurs »

Le scénario 3 « dynamique » se caractérise par des formes verticales autour de places et espaces publics plutôt minéralisés. Ceci conduit à un îlot de chaleur en hausse l'été, en particulier dans les banlieues, qui sont en forte croissance. Cependant, l'îlot de chaleur diminue en hiver, sans doute du fait de la très bonne isolation des bâtiments. Le plus fort contraste a lieu en centre-ville, pour lequel l'îlot de chaleur diminue fortement en hiver. Ceci peut sans doute s'expliquer par la transformation du centre ancien, dense avec des rues étroites, en ensemble de hautes tours espacées. Le vent a alors bien plus prise pour ventiler et refroidir les espaces urbains, à l'image par exemple du quartier de la Défense à Paris. Ceci aurait tendance à diminuer le confort des usagers en hiver.

Les scénarios « ville verte »

Les scénarios faisant la part belle au verdissement urbain (scénarios 1, 2 et 4) sont ceux pour lesquels l'îlot de chaleur est le plus faible. Les îlots de chaleur forts ont ainsi tendance à disparaître ou diminuer dans les banlieues, mais se maintiennent tout de même en centre-ville, qui reste relativement minéral. L'îlot de chaleur diminue en hiver par rapport à la ville actuelle. Ceci s'explique par la présence de végétation d'une part, et la très bonne isolation des bâtiments dans ces trois scénarios d'autre part, qui limite fortement les rejets et pertes de chaleurs dus au chauffage domestique. On peut noter qu'une ville en expansion mais de type archipel (scénario 4, « vert »), permet de maintenir un îlot de chaleur sur l'agglomération

centre similaire à ceux des villes des scénarios 1 et 2 qui eux sont en récession à partir de 2050. En effet, une part relativement importante des nouvelles constructions est réalisée loin de l'agglomération centre, dans les villes définies comme polarisantes, et ces constructions n'influent ainsi pas l'îlot de chaleur en centre ville.

Consommation d'énergie

La population étant un des paramètres clef définissant la consommation d'énergie de la ville (plus il y a d'habitants, plus il y a de consommation d'énergie), et afin d'isoler les effets liés purement au type d'adaptation (ou non-adaptation), nous analyserons les consommations d'énergie en termes de consommation par m² et par an.



Le premier point est, pour un climat identique au climat présent, la consommation en climatisation est bien inférieure à celle en chauffage, quel que soit le scénario.

Le deuxième point à souligner est que les consommations énergétiques (normalisées par m²) sont principalement pilotées par les scénarios technologiques du bâti et les scénarios d'usage.

Par exemple, les scénarios 1, 2, 3 et 4, qui ont tous une « ville vertueuse » en termes de rénovation urbaine et des usages, présentent (à 1kWh/m²/an près) les mêmes consommations d'énergie.

En corollaire, ceci pourrait tendre à dire que les stratégies d'aménagement du territoire ont un effet plus faible sur les consommations d'énergie. Ceci dit, les scénarios 1 à 4, contrastés en terme d'aménagement du territoire, sont aussi ceux qui sont le moins sensible au climat extérieur, car les bâtiments sont bien isolés, les consignes vertueuses, et l'îlot de chaleur faible et similaire. **Ceci peut expliquer que l'aménagement du territoire n'a plus d'effet sur la consommation énergétique pour ces scénarios : il n'y a pratiquement plus rien à gagner une fois une certaine efficacité énergétique du bâti atteinte.** Par contre, les scénarios avec des scénarios technologiques beaucoup moins vertueux, plus sensibles au climat extérieur, donc à l'îlot de chaleur et donc potentiellement à l'aménagement du territoire ont tous une ville avec expansion de type « fil de l'eau ». Ainsi, il faudrait des scénarios complémentaires pour trancher sur l'efficacité de scénarios d'adaptation du territoire sur les consommations d'énergie.

Le scénario « sans rénovation »

Plus en détail, l'on peut voir que le scénario5 « néfaste » présente des consommations totales plus fortes que celles pour la ville actuelle : 10 % plus faible en chauffage mais avec un usage de la climatisation généralisé (marginale et non scénarisée dans la ville actuelle pour le résidentiel). Dans ce scénario « néfaste », il n'y pas de rénovation des bâtiments au cours du temps, et les usages en terme de température de consignes de chauffage et climatisation sont dispendieux. La consommation normalisée de chauffage est plus faible qu'actuellement du simple fait que les bâtiments construits dans le futur (principalement jusqu'en 2050, puisque ensuite la ville est en crise), sont eux construits avec les normes en vigueur au moment de leur construction. Le poids des bâtiments ancien est donc relativement un peu plus faible. On remarque que la climatisation apparaît significativement, mais 6 fois plus faible que le chauffage, poste encore largement majoritaire.

Effet de la rénovation

Dans le scénario numéro 7, « Fil de l'eau », les bâtiments sont rénovés régulièrement, bien que pas particulièrement rapidement. Les usages sont toujours dispendieux. Ceci permet tout de même de diminuer la consommation de chauffage de moitié. Par contre, l'effet est négligeable sur la consommation de climatisation, qui reste aussi forte que pour le scénario « néfaste ». L'isolation des bâtiments, efficace en hiver, l'est moins en terme de refroidissement l'été (la majeure partie de la chaleur provenant de l'ensoleillement direct à l'intérieur par les fenêtres), l'isolation pouvant même avoir tendance à piéger la chaleur à l'intérieur.

Effet des comportements

Ce sont les usages qui ont le plus d'effet sur la consommation de climatisation. Augmenter la température de consigne de 3°C (scénario 6, « passif »), et donc moins climatiser, permet ici de diviser la consommation d'énergie liée à la climatisation d'un facteur 3. Diminuer la température de consigne du chauffage de 2°C, passant celle-ci à 19°C, permet de diminuer la consommation de chauffage d'un tiers.

Rénovation rapide et effet transitoire

Finalement, une fois ces usages vertueux entrés dans les mœurs, améliorer encore plus l'isolation des bâtiments (scénarios 1 à 4) n'a quasiment pas d'effet supplémentaire sur la climatisation (en climat présent) ou le chauffage. Il faut noter qu'en 2100, même en rénovation lente mais régulière (fil de l'eau), quasiment tous les bâtiments d'habitation, seront au moins rénovés au niveau du Grenelle, seuls les bâtiments historiques du centre ville étant encore moins efficaces, mais toutefois avec une isolation équivalent à un bâtiment postérieur à la rénovation thermique de 1974. Les bâtiments tertiaires, seront eux tous très efficaces. Ceci ne veut pas dire qu'il ne faut pas promouvoir une politique de rénovation thermique rapide. Ce qui a été dit ici n'est valable que pour l'état de la ville en 2100. Une politique de rénovation thermique rapide dès maintenant permettrait de diminuer sensiblement les consommations d'énergie dès 2050, sans avoir à attendre 2100.

Quelles interactions avec le changement climatique ?

La méthodologie pour réaliser des simulations d'impact avec changement climatique a été construite, mais n'a pas pu être mise en œuvre faute de temps. Ainsi, une **approche classique en anomalies a simplement été utilisée** : au forçage de la simulation en climat présent, ont été ajoutées des anomalies fixes en température de l'air. L'effet sur le rayonnement infra-rouge et sur l'humidité (conservation de l'humidité relative) ont été aussi pris en compte. L'ensoleillement n'a lui par contre pas été modifié.

Le but ici n'est pas de faire dans le catastrophisme. N'ayant pas réalisé les simulations en tenant compte des distributions de probabilité en temps futur, nous avons préféré ne pas nous concentrer sur des conditions extrêmes (dont on n'a pas analysé la représentativité à ce stade). Il aurait ainsi été possible de choisir des années particulièrement chaudes ou bien ensoleillées du passé (comme 2003 ou 2006) comme référence et leur appliquer l'anomalie de température. La voie choisie a été de conserver pour la simulation de référence l'année de forçage de la campagne CAPITOU, qui est une année typique, voire avec un été peu

ensoleillé. Les résultats qui seront présentés sont donc plutôt à considérer comme des données a minima, voire représentatives, en ce qui concerne la climatisation, pour un été plutôt frais.

Ceci étant posé, nous pouvons maintenant analyser l'impact du changement climatique pour les différents scénarios urbains, principalement en termes de consommation d'énergie.

Impact sur la consommation annuelle d'énergie

Dans nos conditions de simulation, le réchauffement climatique aurait tendance, pour des années peu ensoleillées l'été, à faire diminuer plus fortement la demande de chauffage qu'augmenter la demande de climatisation. Ceci pourrait laisser penser que le réchauffement climatique permettrait de diminuer la consommation totale d'énergie. C'est sans doute vrai pour nos régions où la consommation largement majoritaire actuellement est le chauffage, mais le point crucial est que l'énergie ne provient pas des mêmes sources. Ainsi l'on dispose de chauffages au gaz, au fioul ou à l'électricité, alors qu'en été la seule énergie consommée est l'électricité. Ainsi, la consommation totale d'électricité pourrait augmenter, en fonction du parc de types de chauffages installés dans la ville. Ceci reste à quantifier. De plus, il est possible que le potentiel de production d'électricité reste, comme à l'heure actuelle, plus faible en été qu'en hiver.

La consommation estivale

De plus, même pour des conditions météorologiques plutôt moyennes, avec un été nuageux, la consommation d'énergie pour la climatisation peut dépasser pour tous les scénarios la consommation pour le chauffage pour un réchauffement moyen de 6°C, voire, pour une ville de type « fil de l'eau » (scénario 7) pour un réchauffement de 4°C. Des simulations, restant à réaliser, prendront en compte une augmentation possible de l'ensoleillement en été selon les scénarios climatiques (en utilisant la méthodologie de simulation avec les densités de probabilités en types de temps). Alors, il est possible que le renversement entre consommation d'hiver et d'été se passe pour des réchauffements moyens encore un peu plus faibles.

7. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

Principaux résultats

Le projet a permis d'apporter de nouveaux éclairages sur les impacts sur le très long terme de divers leviers d'aménagement urbain, en lien avec le changement climatique.

Le premier enseignement à retenir des résultats d'ACCLIMAT est que, pour être soit efficace à coup sûr, **une politique ambitieuse d'urbanisation à l'échelle de l'aire urbaine** (par exemple pour mener à une ville compacte ou archipel) **nécessite d'être mise en œuvre rapidement** : en cas de crise économique majeure qui ferait perdre son attractivité à Toulouse d'ici 30 à 40 ans, il serait trop tard pour modifier la forme de l'agglomération ensuite, puisque celle-ci ne serait plus en expansion (les marges de manœuvre seraient donc bien plus limitées). En cas d'expansion économique, il convient tout autant d'agir vite : en effet, les bâtiments et maisons nouvellement construites dans les prochaines décennies impacteront fortement la forme de la ville jusqu'à la fin du siècle.

En ce qui concerne la forme de la ville elle-même, la ville dense est présentée depuis quelques décennies comme le paradigme de la ville vertueuse d'un point de vue environnemental. Une méthode classique pour y parvenir est d'implanter une ceinture verte interdisant (ou limitant fortement) toute construction. Toutefois, paradoxalement, **une ceinture verte peut avoir sur le long terme l'effet inverse de celui escompté au départ** : en cas d'affluence forte de population dans l'agglomération, nombre de ménages s'installeront non pas à l'intérieur de la ceinture verte, où la densité est forte, mais à l'extérieur, **augmentant fortement les mouvements pendulaires journaliers vers le centre-ville, au point d'être plus importants que si la périurbanisation diffuse continuait** comme maintenant. Londres ou Ottawa sont des exemples types de ce phénomène.

En ce qui concerne le climat en ville, l'influence de la végétation est bénéfique puisqu'elle permet de contrecarrer l'effet d'îlot de chaleur urbain lié à l'accroissement de la population. Cependant, pour inclure de la végétation en ville, il ne suffit pas de libérer des espaces, il faut une volonté spécifique pour verdifier ces espaces. Des bâtiments rénovés (isolation par l'extérieur et peintures réfléchissantes) auront aussi tendance à limiter l'îlot de chaleur urbain.

Les consommations énergétiques (normalisées par m²) sont principalement pilotées par les scénarios technologiques du bâti et les scénarios d'usages. **Un levier potentiellement efficace consiste donc à agir pour améliorer les comportements** énergétiques des habitants et usagers : un comportement vertueux peut permettre à lui seul de diminuer d'un tiers la consommation de chauffage et par trois celle de climatisation. Rénover les bâtiments permet de faire baisser encore plus le besoin en chauffage. Toutefois, s'il l'on veut atteindre une diminution de consommation énergétique significative par ce biais avant la fin du siècle (pour atteindre le facteur 4 en 2050 en particulier), **il faudra trouver des mécanismes d'incitation pour accélérer la rénovation des bâtiments existants.**

Le **réchauffement climatique** induira une plus forte baisse de la consommation de chauffage. Il **pourrait, s'il est assez prononcé, conduire à un pic de consommation d'électricité en été.**

Il faut anticiper. **Il ne faut pas attendre le peak-oil** pour commencer à mettre en place une politique d'adaptation en termes d'aménagement urbain. Une augmentation démographique, si elle se poursuit, augmentera les tensions sur le foncier, le transport, la demande en

énergie et le climat urbain. Sans politique concertée et cohérente, l'aménagement et la gestion du territoire devraient être d'autant plus difficiles après 2040-2050.

Discussion et Perspectives

Limites du projet :

La question de la validation de scénarios prospectifs et/ou de simulations issues de modèles est récurrente en prospective. Il est bien évidemment impossible d'évaluer le caractère prédictif de scénarios, c'est n'est d'ailleurs pas leur but. Ainsi, on ne peut pas savoir si l'un d'eux va se produire. Néanmoins, la cohérence des hypothèses entre elles est la garante de la plausibilité des scénarios qui peuvent avoir une probabilité d'occurrence plus ou moins forte. Au final, seule la rigueur méthodologique de construction des scénarios permet de les « valider ».

Il faut garder à l'esprit que le projet s'appuie sur une démarche scientifique essentiellement fondamentale : la participation s'est faite exclusivement en faisant appel à des experts et non à des décideurs. Si cette démarche était volontaire pour étendre au maximum la gamme des futurs à tester et ne pas être contraint par des stratégies d'aménagement du territoire, cette lacune peut engendrer un rejet de la part des décideurs dans la mesure où ils n'ont pas été associés au processus de construction des scénarios ; ils peuvent donc difficilement s'approprier, et a fortiori approuver les hypothèses et tendances retenues.

Le projet était très ambitieux : les objectifs ont été atteints, en particulier en ce qui concerne la réalisation des scénarios systémiques, le couplage entre les différents modèles et l'interprétation interdisciplinaire. Cependant, le projet ne comprenait pas de partenaire disposant d'un modèle spécifique aux transports ; ceux-ci ont donc été modélisés de manière simplifiée et indirecte au travers du modèle socio-économique d'expansion urbaine. De plus, la valorisation scientifique a difficilement été réalisable durant le temps du projet.

Point forts / verrous scientifiques levés:

Sur le plan méthodologique nous avons avancé sur les plans de la modélisation prospective et du couplage entre modèles interdisciplinaires. En ce sens, le projet est véritablement novateur.

En modélisation prospective, nous avons **combiné des scénarios qualitatifs et des modèles quantitatifs**. L'approche qualitative/narrative permet d'envisager une plus grande diversité de futurs possibles et elle assure la cohérence interne de chacun (chose impossible avec une approche modélisatrice pure). L'approche quantitative/modélisatrice permet la prise en compte des interactions spatio-temporelles et l'évaluation quantifiée de l'impact des scénarios (impossible avec uniquement l'approche narrative de la prospective territoriale).

Nous avons aussi réalisé le **couplage de divers modèles**, non sans difficultés il est vrai, comme par exemple pour le couplage entre le modèle d'économie urbaine (exploration du long terme) et le modèle géographie d'étalement urbain (spatialisation fine des modes d'urbanisation). Les tests d'intégration et de validation réalisés ont permis de valider que l'interaction des paramètres d'entrée des modèles, ainsi que des modèles entre eux, n'engendre pas d'erreurs et traduit fidèlement les scénarios. Le couplage multi-échelles des modèles permet, au final, de couvrir une large gamme d'échelles spatiales.

Sur le plan scientifique, nous avons relevé des enjeux vis à vis de l'approche interdisciplinaire et pluridisciplinaire, sur les connaissances apportées sur les interactions



Ville-Climat à long terme (cf. résultats) grâce à une évaluation quantitative et sur l'identification de leviers d'actions et de sources de tensions potentielles à l'avenir.

Valorisation

La plateforme qui a été développée dans ACCLIMAT est transférée à des bureaux d'études de Météo-France, afin que puissent être réalisées des études sur la ville (en particulier sur l'impact d'aménagements urbains) prenant en compte proprement les interactions entre les différents processus urbains et météorologiques. D'autre part, des modules spécifiques, comme SLEUTH*, font l'objet d'une étude préalable en vue d'un dépôt de brevet (mais qui serait alors entièrement recodé, ce qui n'impliquerait pas son utilisation dans la plateforme actuelle).

Perspectives

Afin d'étendre la plateforme à d'autres villes, le développement d'une génération automatique des données urbaines utilisables par GENIUS et TEB sera menée au sein du projet MapUCE (financé par l'ANR).

Les indicateurs développés dans ACCLIMAT pour rendre compte des leviers d'action urbain seront aussi pris en compte dans ce projet dont un des objectifs scientifique et sociétal est d'identifier les moyens juridiques et législatifs permettant de prendre en compte le plus efficacement possible les problématiques énergétiques et climatiques dans la planification urbaine.

ANNEXES

Les livrables ACCLIMAT

Les livrables et rapports techniques complets sur les différents aspects développés au cours du projet peuvent être téléchargés à partir du site ou peuvent être demandés en contactant directement l'auteur.

Bibliographie

- Adolphe, L., Châtelet, A., Boussoulim, Aït-Ameur, Barlet, Casal, ... Deboulbé, E. (2002). *SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines - RAPPORT FINAL* (MENRT- Direction de la Technologie.).
- Atelier Parisien d'URbanisme. (2007). *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes (Energy consumption and greenhouse gas emissions related to heating of Parisian housing)*. APUR. Consulté à l'adresse <http://www.apur.org/sites/default/files/documents/246.pdf>
- AUCAME. (2010). *Répertoire des formes urbaines résidentielles de Caen-Métropole (Inventory of residential urban forms of Caen)*. Agence d'étude d'Urbanisme de Caen-Métropole.
- Bailey, K. D. (1994). *Typologies and Taxonomies: An Introduction to Classification Techniques*. SAGE.
- Clarke K.C., Gaydos L. (1998), Long term urban growth prediction using a cellular automaton model and GIS: Applications in San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, n° 7, pp. 699-714
- Clarke, K.C., Hoppen, S. and Gaydos, L., 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, 24, 247-261
- Communauté métropolitaine de Québec. (2010). Exemples de densité sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (Examples of density on the territory of the Quebec Metropolitan Community). Communauté métropolitaine de Québec.
- Dunteman, G. H. (1989). *Principal Components Analysis*. SAGE.
- Fouad, A. O. (2007). *Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics: étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec (Urban morphology and thermal comfort in public spaces: a comparative study of three urban fabric of the city of Québec)*. Université Laval.
- Gusdorf, F. and Hallegatte, S. (2007b). Compact or spread-out cities: Urban planning, taxation, and the vulnerability to transportation shocks. *Energy Policy*, 35(10):4826-4838
- Gusdorf, F., Hallegatte, S., and Lahellec, A. (2008). Time and space matter: How urban transitions create inequality. *Global Environmental Change*, 18(4):708-719.
- Haase, D. and Schwarz, N. (2009). Simulation models on Human Nature interactions in urban landscapes: A review including spatial economics, system dynamics, cellular automata and agent-based approaches. *Living Reviews in Landscape Research*, 3:1-5.
- Long, N., & Kergomard, C. (2005). Classification morphologique du tissu urbain pour des applications climatologiques (Morphological classification of the urban fabric for climate applications). *Revue Internationale de Géomatique*, 15, 487-512.
- Masson V., 2000 : A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.
- Moulinié, C., & Naudin-Adam, M. (2005). Appréhender la densité 2 - Les indicateurs de densité (Understanding density 2 - Indicators of density). *Note rapide sur l'occupation du sol. Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France*, (383).

- Oke, T.R., 2004. Urban observations, World Meteorological Organization, IOM Report N_ 81, WMO/TD n_1250.
- Panerai, P., Demorgon, M., & Depaule, J. C. (1999). *Analyse urbaine (Urban analysis)*. Parenthèses. Consulté à l'adresse <http://en.scientificcommons.org/8186064>
- Salat, S. (2011). *Les villes et les formes: Sur l'urbanisme durable*. Hermann.
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2009. Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. Preprints, Eighth Symposium on Urban Environment, January 11e15, Phoenix, AZ.
- Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: Compactness versus 'sprawl'. *Urban Studies*, 42(1), 141.
- Vigié V. (2012). Modélisation des dynamiques urbaines, application à l'analyse économique du changement climatique. Thèse en économie, CIRED, Université Paris-Est, <http://www.centre-cired.fr/IMG/pdf/these-2.pdf>

Table des scénarios : thèmes, variables et hypothèses

1- Grandes Tendances	Hypothèses	
Impact du peak oil	Faible impact du peak oil	Fort impact du peak oil
Existence d'une politique climatique	Pas de politique climatique	Politique climatique volontariste

2- Tendances locales	Hypothèses		
Démographie (âge)	Pyramide des âges niçoise (vieillesse)	Pyramide des âges parisienne (jeune)	
Démographie (nombre)	Stabilisation	Accroissement de la population	Baisse de la population
Attractivité	Forte attractivité	Faible attractivité	
Taille des ménages	Baisse de la taille des ménages	Hausse de la taille des ménages	
Revenu des ménages	Revenus supérieurs à la moyenne européenne	Revenus inférieurs à la moyenne européenne	
Inégalité des revenus	Inférieure à la moyenne nationale	Supérieure à la moyenne nationale	
Économie	Fort chômage. Emploi Diversifié ou spécialisé	Faible chômage & Forte spécialisation de l'emploi	Faible chômage & Diversité économique/de l'emploi

3- Aménagement du territoire	Hypothèses		
Planification territoriale	Faible gouvernance du territoire, faible maîtrise du foncier	Initiatives locales, ponctuelles, sectorielles (manque de cohérence)	Politique régionale cohérente, intégrée, maîtrise du foncier, forte gouvernance

3- Aménagement du territoire	Hypothèses		
Performances énergétiques des territoires	Toulouse:ville décarbonée et presque autonome	Subsidaire à la politique énergétique française	Toulouse : plus mauvais que la moyenne nationale
Anthropisation / Multipolarité	Conurbation (Toulouse=Mégalopole Sud-Ouest)	Mitage généralisé (extension du rurbain diffus)	Ville archipel (densification urbaine)
Forme urbaine des quartiers	Aucun contrôle de la densité (étalement urbain anarchique)	Densité de bâtie contrôlée : petits collectifs	Densité de bâtie contrôlée : grands collectifs
Multifonctionnalité des territoires	Mixité fonctionnelle (Multifonctionnalité des bâtiments ou quartiers)	Mono fonctionnalité (Zoning urbain)	Fil de l'eau (Ville mixte conjuguant zones mono et multifonctionnelles)
Réseaux transport et logistique	Mise en place politique d'infrastructure de transport (grandes artères métropolitaines)	Développement d'infrastructures pour la multi-modalité et le fret	Pas de développement (augmentation des temps de transport, risque d'asphyxie)
Mode de transport (Mobilité individuelle)	Voiture individuelle compagne de la péri-urbanisation (fragmentation des espaces ruraux)	Mixité dans les modes de transport (Mort de la voiture individuelle)	
Volume / linéaire de déplacements	En augmentation	En baisse	

4- Technologie du bâti	Hypothèses		
Ressources Locales	Circuit court	Circuit intermédiaire	Circuit long
Typologie du système de Production d'Énergie	Bâtiments autonomes	Mise en réseaux	Fil de l'eau
Évolution des usages et des services liés au bâti	Processus intégré offre-demande	Amélioration de l'offre seule	Consommations croissantes
Normalisation / Réglementation	Approches intégrées rapides	Évolutions réglementaires rapides	Évolutions réglementaires lentes
Intégration de l'innovation Technique	Culture en évolution rapide	Évolution lente	Faible culture de l'innovation
Disponibilités des types de transports	< tendance	Suivant la tendance générale	> tendance
Technologie des transports	Transports fossiles dépendants	Transports électrique et carburants alternatifs	Carburants alternatifs
Performance Énergétique des bâtiments	Bâtiments performants et confortables	Bâtiments performants	Bâtiments peu performants
Usage dans les	Pro-activité	Usage économe	Usage non économe

bâtiments			
Procédés constructifs pour le neuf	Processus intégrés	Techniques innovantes	Traditionnel prédominant
Amélioration Bâtiments Existants	Solutions intégrées innovantes	Solutions Techniques nouvelles	Traditionnel amélioré
Densification et morphologie bâtie	Morphologie urbaine dense	Bâti densité extrême	Morphologie étalée

Liste des tests d'intégration SLEDUM réalisés

	Spécifications nedum libre, nedum contraint, sleuth*		Test
I_1	SLEUTH lit et utilise correctement la quantité de changement issue NEDUM libre	a)	NEDUM fournit la quantité de changement de surfaces artificialisées attendue par sleuth : surfaces artificialisées = surface au sol bâti + jardins+routes (hors aéroport, parc urbains, ..) : Calculer les km2 de jardin, bâti au sol, route (cf. test V_0)
		b)	Les cartes d'exclusion entre les 2 modèles sont cohérentes Sleuth exclue bien les parcs + zones aéroports, de ses zones constructibles
		c)	Comparer la surface urbanisée issues de sleuth avec la qté de changement nedum dans la plateforme (tester dans la boucle sleuth-nedum de la plateforme)
I_2	SLEUTH lit et utilise correctement la carte d'attractivité issue NEDUM libre	a	NEDUM fournit une carte « d'attractivité » : cartes des loyers ? normalisée ? quelle unité ?
		b	Vérifier si les surfaces urbanisées issues de sleuth sont localisées dans les zones attractives nedum (loyers forts ?) et inversement pas (ou peu) de surface urbanisées dans les zones non attractives Comparaison de cartes attractivité Vs nouvelles zones urbanisées de sleuth
I_3	NEDUM contraint utilise bien les données de contraintes issues de SLEUTH :		Si les résultats de NEDUM-non contraint et de NEDUM-contraint sont identiques, c'est que NEDUM-contraint n'utilise pas l'information issue de SLEUTH => faire remonter l'information (Vincent, Valéry, Colette) Si les résultats de NEDUM contraint sont différents du NEDUM non-contraint, alors vérifier que la carte d'urbanisation issue de NEDUM est bien incluse dans la zone que SLEUTH lui autorise (donc comparaison avec la carte de contrainte de SLEUTH).
I_4	NEDUM est capable de « se caler » sur une carte initiale		Est-ce que nedum est capable d'avoir en 2006 une carte « conforme » à la réalité ? Comparer la sortie du run 1 avec la carte réelle 2006 : visuel + densité moyenne + Surface bâti et taux d'urbanisation, ...)
I_6	la durée du cycle n'influe pas sur la Qté de chgt		Comparer le run 2 avec un run 3 Les sorties « qté de chgt » des 2 runs doivent être identiques
I_7	la durée du cycle n'influe pas sur la localisation du changement		Comparer le run 1 avec un run 4 La carte tâche urbaine doivent être similaires
I_8	Nedum-sleuth reproduit bien les 4 formes urbaines		Etude de sensibilité (cf. test V_2)