



**HAL**  
open science

# Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"

Mohamed Benzerzour

## ► To cite this version:

Mohamed Benzerzour. Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique". Histoire. Université de Nantes, 2004. Français. NNT : . tel-00428536

**HAL Id: tel-00428536**

**<https://theses.hal.science/tel-00428536v1>**

Submitted on 29 Oct 2009

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

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

ECOLE DOCTORALE  
Mécanique, Thermique et Génie Civil  
DE NANTES  
Année 2004

Thèse de **DOCTORAT**

Discipline : *Mécanique, Thermique et Génie Civil*  
Spécialité : *Sciences pour l'ingénieur, option Architecture*

Présentée et soutenue publiquement par  
**BENZERZOUR Mohamed**

Le 15 octobre 2004  
à l'Ecole d'Architecture de Nantes

**TRANSFORMATIONS URBAINES ET VARIATIONS DU  
MICROCLIMAT : APPLICATION AU CENTRE ANCIEN DE NANTES ET  
PROPOSITION D'UN INDICATEUR « MORPHO-CLIMATIQUE »**

*Jury :*

M. Albert DUPAGNE	Rapporteur, Professeur à l'Université de Liège
M. Claude KERGOMARD	Rapporteur, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Paris
M. Valéry MASSON	Examineur, Chercheur au CNRM de Toulouse
M. Jean-Pierre TRAISNEL	Examineur, Architecte, Docteur en urbanisme, Ingénieur de recherche CNRS
M. Pierre-Yves NIZOU	Président du jury, Professeur de l'université ISITEM
M. Dominique GROLEAU	Invité, Ingénieur de recherche au laboratoire CERMA

*Directeur de thèse :* M. Jean-Pierre PENEAU, Professeur Associé Emérite de l'Université de Nantes,  
Professeur Associé des Ecoles d'Architecture

*Co-Encadrant :* M. Dominique GROLEAU, Ingénieur de recherche au CERMA



**...à Amine, à Selma et à Soumeya**

Les siècles un à un sont passés  
D'autres après eux viendront  
Qui sait ce qu'ils nous ont légué ?  
Qui sait ce qu'ils nous légueront ?  
Peut-être le passé  
Nous servira-t-il à comprendre le présent ?  
Dis à mes amis et mes frères  
Que l'on n'apaise pas la mer en la regardant.

---

Lounis Aît-Menguellet, poète et chanteur Kabyle d'Algérie.





## Avant propos

Ce travail s'inscrit dans l'une des thématiques de recherche du laboratoire CERMA (Centre d'Etudes et de Recherches Méthodologiques en Architecture), il concerne la mise en relation des ambiances climatiques et des ensembles bâtis. La problématique posée insiste sur les modalités opérationnelles de cette mise en relation, que l'on propose ici d'aborder en terme historique et instrumental. Cette thèse a été menée dans sa globalité au laboratoire CERMA à l'Ecole d'Architecture de Nantes.

Le présent document se présente en quatre chapitres avec une introduction et une conclusion générales. Il contient également en complément des annexes. Des illustrations sont insérées dans le texte pour une meilleure clarté du propos ainsi que des notes en bas des pages. La table des matières est disposée en tout début du document.

Je tiens, dans cet avant propos, à remercier tous les membres du laboratoire qui ont aidé de près ou de loin à la réalisation et la finalisation de ce travail, à commencer par M. Jean-Pierre Péneau qui a dirigé cette thèse et qui a aidé par ses précieuses relectures à la construction et la rédaction finale de ce document. Mes remerciements également à Dominique Groleau qui, avec ses critiques constructives, a co-encadré cette recherche, et a été d'un grand secours dans les développements informatiques de notre proposition. Mes remerciements vont aussi : à Martine Chazelas notre chère documentaliste pour sa disponibilité permanente ; à Janick et ses poses café, sans qui le labo aurait sûrement été autre, et enfin à Marjorie Musy pour l'aide qu'elle a apportée lors des simulations aérauliques.

Je remercie également M. Noilhan, directeur du laboratoire GMME/MC2 du CNRM de Toulouse pour son accueil digne des gens du sud lors de mes deux séjours au CNRM, ainsi que Valéry Masson pour son aide et ses observations précieuses lors des simulations avec le modèle TEB.

Je remercie également M. Albert Dupagne et M. Claude Kergomard d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et plus particulièrement M. Nizou d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Mes plus grands remerciements vont à ma petite famille, qui a supporté mes humeurs, mes absences, et partagé les moments d'incertitude que tout thésard a dû connaître. Egalement à mes chers parents qui ont tout fait pour que je puisse atteindre ce rêve que j'avais à Alger, de soutenir un doctorat en architecture. Mes remerciements également à mon beau père qui m'a accueillis tel un fils au tout de début de mon aventure à Nantes et à mon très cher et regretté grand père Baba Sadek, grâce à qui ce début fut possible.

Et puis, un immense remerciement et une mention spéciale à ma chère Soumeya vers qui vont mes dernières pensées, elle qui a accepté tant de sacrifices durant ces longues et interminables années d'étude à Nantes. A tous et à toutes les personnes que je n'ai pas citées, je dis..... « un grand merci ».



## **Résumé**

Cette recherche porte sur l'analyse diachronique des interactions entre les paramètres physiques du microclimat et les transformations urbaines. La démarche mise en œuvre prend appui sur deux investigations complémentaires : une approche historique visant à mettre au jour les savoir-faire et les interventions qui ont visé, depuis les premiers temps de l'urbanisme salubriste, l'amélioration de l'environnement urbain; et une exploration à caractère physique sur la quantification des effets microclimatiques des transformations urbaines. L'une et l'autre portent de manière privilégiée sur le centre ancien de Nantes. Des reconstitutions ont ainsi été effectuées sur la base des sources historiques disponibles et cinq états représentatifs ont été définis allant de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle à la moitié de XX<sup>ème</sup>. Des simulations numériques ont ensuite été réalisées à l'aide du modèle climatologique TEB, développé par le CNRM de Toulouse. Le principal résultat de cette évaluation physique a été de constater une augmentation considérable des flux de chaleur, une croissance progressive de la température de l'air et des surfaces, une augmentation de la vitesse du vent, ainsi qu'une déshumidification importante des espaces de ce centre.

Cette efficacité des transformations urbaines sur le microclimat nous a permis d'établir des corrélations entre les principaux paramètres d'intervention sur la ville (ouverture des vides urbains et minéralisation) et les phénomènes micro climatiques urbains. Ces corrélations ont été ensuite exploitées pour construire un indicateur morphologique permettant la caractérisation du microclimat urbain dans un projet de transformation urbaine.

La définition de cet indicateur s'appuie sur deux objectifs : le premier vise à dépasser une limite du modèle TEB constatée lors des modélisations, le deuxième concerne la prise en compte de la corrélation entre les transformations urbaines et le microclimat. L'utilisation du modèle climatologique TEB, qui repose sur le concept de « rue canyon » pour modéliser la troisième dimension des zones bâties, a nécessité en effet d'opérer une réduction importante de la complexité de la forme urbaine. Pour dépasser cette limite, qui n'est pas propre à ce seul modèle, l'indicateur proposé reprend la notion de gabarit liée au canyon, mais l'étend par une analyse multidirectionnelle à l'évaluation de l'ouverture du vide urbain. Cet indicateur appelé « ouverture directionnelle » est applicable à plusieurs échelles spatiales et permet une caractérisation synthétique de l'espace (rue, place, cours, quartier, ensemble bâti) et du microclimat urbain. Une comparaison avec quelques résultats de simulations effectuées avec des outils du CERMA a permis de constater une bonne caractérisation de l'ensoleillement et de la vue du ciel et d'observer des résultats intéressants quant à la caractérisation du vent. En conséquence, « l'ouverture directionnelle », qui devra être complétée par la définition des états de surface, s'avère un indicateur prometteur pour rendre compte des interactions entre les paramètres physiques et morphologiques qui spécifient les environnements urbains.



## TABLE DES MATIERES

---

Avant propos	p. ii
Table des matières	p. iii

---

### **PROBLEMATIQUE, CONTEXTE ET HYPOTHESES**

---

**P. 1**

Introduction	p. 1
1. Objectifs spécifiques	p. 5
2. Définition du contexte	p. 7
3. Problématique et hypothèses	p. 14
4. Méthode	p. 18
5. L'objet d'étude	p. 23
Synthèse	p. 25

---

### **Chapitre 1 : FORME URBAINE ET MICROCLIMAT : ANALYSE DES NIVEAUX D'INTERVENTION SUR LA VILLE**

---

**P. 27**

<b>1. ADAPTATION A L'AIR MALSAIN ET DEBUTS DE LA CONSCIENCE INTERVENTIONNISTE</b>	<b>p. 30</b>
1.1. Adaptation organique à l'atmosphère malsaine des villes	p. 30
1.1.1. Un contexte militaire et économique contraignant	p. 30
1.1.2. Adaptation à la distribution spatiale de l'air « malsain »	p. 32
1.2. Éléments du contexte salubriste favorisant l'intervention sur la forme urbaine	p. 35
1.2.1. Inquiétudes des médecins et nouveaux procédés de la chimie minérale	p. 36
1.2.2. Inefficacité des fossés à protéger les villes et maîtrise du réseau hydrographique	p. 37
<b>2. AJUSTEMENTS DES ELEMENTS DE LA FORME URBAINE ET PREOCCUPATIONS SALUBRISTES</b>	<b>P. 40</b>
2.1. Assainissement des surfaces malsaines	p. 41
2.1.1. Minéralisation du sol des rues et renouvellement du crépi des murs	p. 42
2.1.2. Comblement des fossés et canalisation des rivières	p. 43
2.1.3. Drainer en sous-sol les eaux de surfaces	p. 44
2.2. Ventiler les vides urbains	p. 45
2.2.1. Alignement des rues	p. 47
2.2.2. Elargissements et percées	p. 48
2.2.3. Réguler le prospect des rues	p. 51
2.3. Un ajustement hygiéniste peu réalisé : « l'orientation du tracé urbain »	p. 52
2.4. Deux ajustements à l'échelle des tracés urbains : « <i>Paris et Barcelone</i> »	p. 53
2.5. Critique du modèle formel de la ville ancienne	p. 56
<b>3. UNE NOUVELLE ECHELLE D'INTERVENTION : LES PROPOSITIONS DE L'URBANISME MODERNE</b>	<b>P. 58</b>
3.1. Les villes « idéales » et la question de l'hygiène au XIX <sup>ème</sup> siècle	p. 58

3.1.1. Entre ville et campagne	p. 58
3.1.2. La ville fonctionnelle	p. 61
3.1.3. Critiques et consensus	p. 62
3.2. Les nouvelles compositions de l'urbanisme moderne	p. 63
3.2.1. Rationalisation du besoin d'air, de soleil et de lumière dans la forme urbaine « moderne » : <i>Le Corbusier et la charte d'Athènes</i>	p. 64
3.2.2. Etalement de l'espace ouvert et mystification de l'espace vert : <i>points de vues critiques sur « l'ouverture exagérée » des grands ensembles</i>	p. 67
3.3. Persistance des ajustements morphologiques :	
3.3.1. La reconstruction des villes en France 1945-1955	p. 68
3.3.2. Retour aux ajustements du vide urbain dans les projets urbains contemporains : <i>Entre cloisonnement et ouverture</i>	p. 70
<b>4. LA VILLE CONTEMPORAINE ET LE MICROCLIMAT URBAIN : NOUVEAUX ENJEUX NOUVEAUX SAVOIRS, QUEL SAVOIR-FAIRE ?</b>	<b>P. 73</b>
4.1. Nouveaux enjeux de la qualité environnementale et microclimat urbain	p. 73
4.2. Directives pour des formes urbaines « durables »	p. 74
4.3. Une Situation Problématique : <i>Densification et accessibilité de l'air du soleil et de la lumière dans les espaces urbains et les habitations</i>	p. 76
<b>CONCLUSIONS : VERS LA QUANTIFICATION DES EFFETS MICROCLIMATIQUES DES TRANSFORMATIONS URBAINES</b>	<b>P. 77</b>

---

**Chapitre 2 : ELEMENTS DE QUANTIFICATION DU MICROCLIMAT URBAIN ET CHOIX D'UN MODELE DE SIMULATION** **P. 79**

---

<b>1. DEFINITIONS ET CONCEPTS</b>	<b>P. 80</b>
1.1. Le concept de surface	p. 80
1.2. Le concept d'échelle	p. 81
1.2.1. Les échelles spatiales de la surface urbaine	p. 81
1.2.2. Les couches verticales associées aux échelles spatiales	p. 82
1.3. Le canyon urbain	p. 83
1.4. Le concept « d'îlot » appliqué à la description spatiale des champs thermiques et d'humidité : <i>îlot de chaleur et îlot d'humidité</i>	p. 84
1.5. Eléments de la surface urbaine caractéristiques de l'échelle climatique locale	p. 86
<b>2. MESURES DES VARIATIONS DU MICROCLIMAT URBAIN EN RELATION AVEC LES ELEMENTS DE LA SURFACE URBAINE</b>	<b>P. 89</b>
2.1. Variation du prospect des rues	p. 89
2.2. Modification de la fraction de surface d'eau	p. 90
2.3. Variation de la fraction de surface végétale	p. 91
2.4. Choix des matériaux de construction et de revêtement des sols	p. 92
2.5. Cas particuliers des effets liés à l'utilisation de matériaux imperméables ou poreux	p. 94

<b>3. MODELISATIONS ET SIMULATIONS NUMERIQUES</b>	<b>P. 97</b>
3.1. Modélisation physique de base du bilan énergétique et hydrique d'une surface urbaine à l'échelle locale	p. 97.
3.2. Les modèles numériques	p. 100
3.2.1. Modélisations par discrétisation spatiale	p. 100
- Le modèle thermo-radiatif « Solene » [Groleau et al. 1987 ; Groleau et al. 2003]	p. 101
- Le modèle « HIP » (Heat Island Potentiel) [Hoyano 1996]	p. 102
- Le modèle « EHU » (Elément Hydrologique Urbain) [Berthier 1999]	p. 103
3.2.2. Les modélisations paramétriques de la surface urbaine	p. 104
<i>Modélisation paramétrique 2D</i>	p. 104
- Le modèle « SM2U » (Urban Sub-Meso Soil Model) [Dupont 2001]	p. 104
- Le modèle « LUMPS » [Grimmond et Oke 2002] (Local-scale Urban Meteorological pre-processing Scheme)	p. 105
<i>Modélisation paramétrique 3D</i>	p. 106
- Paramétrisation de la turbulence de la surface urbaine [Martilli 2001]	p. 106
- Le modèle « SM2U-3D » (3D Urban Sub-Meso Soil Model) [Dupont et al. 2003]	p. 107
- Le modèle « AUSSSM » [Higischima 2003] (Architecture-Urban-Soil-Simultaneous Simulation Model)	p. 108
- Le modèle « TEB » (Town Energy Budget) [Masson 2000 ; Masson et al. 2002]	p. 109
<b>CONCLUSIONS : LE MODELE TEB COMME MODELE DE SIMULATION</b>	<b>P. 112</b>

---

**Chapitre 3 : SIMULATION DES EFFETS MICROCLIMATIQUES LIES  
AUX TRANSFORMATIONS DU CENTRE ANCIEN DE NANTES.**

---

**P. 115**

<b>1. LES TRANSFORMATIONS DU CENTRE ANCIEN DE LA VILLE DE NANTES</b>	<b>P. 117</b>
1.1. Les interventions sur le sol urbain	p. 118
1.1.1. Pavage des rues	p. 118
1.1.2. Les comblements des fossés et des bras de l'Erdre et de la Loire	p. 120
1.1.3. Enterrement du réseau d'évacuation d'eau	p. 124
1.2. Les interventions sur la morphologie des espaces urbains	p. 125
1.2.1. Le processus d'alignement des rues	p. 125
1.2.2. Délimitation du prospect des cours intérieures des îlots	p. 132
1.3. La modification des densités bâties	p. 134
1.3.1. Percement des fragments urbains et des îlots	p. 134
1.3.2. Réglementation des densités bâties, définition des vides de servitude et constructibilité des parcelles	p. 137
1.3.3. L'ouverture de la surface bâtie dans les projets d'extension non réalisés	p. 141
1.4. La modification des matériaux des enveloppes bâties	p. 14*
1.4.1. Modification des matériaux de parois	p. 145
1.4.2. La réglementation de la taille des fenêtres	p. 148



1.5. Arrêt des transformations et débuts de la conservation du centre ancien	p. 152
1.6. Synthèse des transformations urbaines du centre ancien de Nantes : <i>un processus d'ouverture et de minéralisation</i>	p. 154
<b>2. ANALYSE DES SOURCES ET DEFINITION DES ETATS REPRESENTATIFS DES TRANSFORMATIONS URBAINES</b>	<b>P. 157</b>
2.1. Les plans de voiries	p. 158
2.1.1. Les premiers plans du centre	p. 158
2.1.2. Les plans « géométriques »	p. 160
2.2. Les plans du bâti	p. 165
2.2.1. Le plan Iconographique de la fin du XVIIème siècle	p. 165
2.2.2. Le Cadastre Napoléonien de 1835	p. 166
2.2.3. Le plan de F.J.Pinson établit en 1880	p. 168
2.2.4. Le Plan – projet de reconstruction de 1945	p. 170
2.2.5. Le plan « numérique » de la ville actuelle	p. 171
2.3. Les images iconographiques et la troisième dimension des surfaces bâties	p. 171
2.3.1. L'image aérienne du plan iconographique de la fin du XVIIème siècle	p. 172
2.3.2. Les façades des projets de bâtiments	p. 172
2.3.3. Les iconographies de rues ou de parties de rues du centre ancien	p. 174
2.4. Synthèse des transformations urbaines selon cinq états représentatifs	p. 176
<b>3. RECONSTITUTION HYPOTHETIQUE DES ETATS ANCIENS DU CENTRE DE NANTES</b>	<b>P. 178</b>
3.1. Principe de reconstitution numérique des plans anciens de la ville	p. 179
3.2. Calcul des paramètres géométriques de surface	p.183
3.2.1. Calcul des fractions de surface selon le type de sol	p. 183
3.2.2. Calcul des densités bâties	p. 184
3.2.3. Calcul des propriétés géométriques des rues	p. 187
3.3. Evaluation des données physiques et anthropogéniques	p. 192
3.3.1. Les sources anthropogéniques	p. 192
3.3.2. Evaluation des paramètres thermiques et radiatifs des surfaces	p. 193
3.3.3. Les données de forçage « météo »	p. 194
3.3.4. Synthèse des paramètres d'entrées du modèle « TEB »	p. 194
<b>4. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE SIMULATION</b>	<b>P. 197</b>
4.1. Evolution des bilans d'énergie	p. 198
4.1.1. Variations du flux de chaleur latente	p. 199
4.1.2. Variation du flux de chaleur stockée	p. 201
4.1.3. Variations du flux de chaleur sensible	p. 203
4.1.4. Le bilan énergétique journalier en été et en hiver	p. 204
4.2. Evolution des paramètres microclimatiques dans les rues	p. 207
4.2.1. Evolution des températures d'air et de sol	p. 207
4.2.2. « Déshumidification » de l'air et vitesse du vent dans les rues	p. 210
4.3. Synthèse des résultats	p. 212

4.4. Discussion sur la prise en compte par le modèle TEB de la diversité des formes urbaines	p. 216
4.4.1. La forme urbaine composée de rues canyons au prospect identique	p. 216
4.4.2. L'hypothèse de l'équiprobabilité des orientations de rues	p. 219
<b>CONCLUSIONS : VERS UNE PRISE EN COMPTE DE LA COMPLEXITE DES ESPACES CONSTRUITS</b>	<b>P. 221</b>
<hr/>	
<b>Chapitre 4 : PROPOSITION D'UN INDICATEUR MORPHO-CLIMATIQUE POUR LA CARACTERISATION DU POTENTIEL DE REGULATION DU CLIMAT URBAIN DANS UN ENSEMBLE BATI</b>	<b>P. 225</b>
<hr/>	
<b>1. NECESSITE DE PRISE EN COMPTE DE LA VARIATION DES ESPACES CONSTRUITS DANS LA PREDICTION DU CLIMAT URBAIN</b>	<b>P. 227</b>
1.1. Ecart entre les données d'entrée des modèles physiques et la complexité de la forme urbaine	p. 227
1.2. Limites de la prédiction du confort climatique en milieu urbain et nécessité d'une caractérisation des variations spatiales	p. 228.
1.3. De la forme urbaine à l'environnement climatique	p. 231
1.3.1. La réduction morphologique comme approche multicritère du potentiel de régulation du climat urbain	p. 231.
1.3.2. Entre concept et indicateur : <i>vers la définition d'un indicateur morphologique opératoire</i>	p. 233
<b>2. ELEMENTS DE CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE : POTENTIALITES ET LIMITES DE QUELQUES INDICATEURS DE L'INTERACTION ENTRE CADRE BATI ET PARAMETRES PHYSIQUES</b>	<b>P. 235</b>
2.1. Des indicateurs de l'interaction du physique et du construit	
2.1.1. Des indicateurs « morpho-physiques » : <i>de l'espace construit au paramètre physique</i>	p. 235
2.1.2. Des indicateurs « physico-morphologiques » : <i>du physique au construit</i>	p. 239
2.2. Une indication « morpho-physico-sensible » non quantifiable : <i>Le paradigme d'effet</i>	p. 240
2.3. Des « indications géométriques » explicites	p. 242
2.4. Vers la définition d'un indicateur morphologique mesurable, explicite et multi- échelle	p. 243.
<b>3. PROPOSITION D'UN INDICATEUR DU POTENTIEL DE REGULATION DE L'ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE PAR LA FORME URBAINE</b>	<b>P. 246</b>
3.1. Eléments de caractérisation retenus	p. 246
3.2. Proposition d'un indicateur : « <i>l'indice d'ouverture directionnelle du vide urbain</i> » ou le concept de canyon selon un réseau polaire	p. 247
3.2.1. Définition-représentation de l'indicateur	p. 248
3.2.2. Les deux échelles d'analyse de l'ouverture directionnelle	p. 251
3.3. Eléments de caractérisation microclimatique par l'ouverture directionnelle	p. 254.
3.3.1. Application à l'analyse de la perméabilité au vent	p. 255
3.3.2. Application à l'analyse de l'ensoleillement	p. 256
3.3.3. Application à l'analyse de l'éclairement naturel	p. 258

3.4. Applications à différentes formes de différentes échelles et sensibilité de l'indicateur à la complexité des espaces bâtis	p. 260
3.4.1. Applications à des cas théoriques	p. 260
3.4.2. Applications à des espaces et ensembles urbains de Nantes	p. 265
3.4.3. Synthèse	p. 271
3.5. Eléments de validation de l'indicateur : <i>Comparaison avec quelques résultats de simulation</i>	p. 272
3.5.1. Comparaison avec des résultats de simulation de l'ensoleillement avec le logiciel « Solene »	p. 272
3.5.2. Comparaison avec les résultats de simulation du vent avec le logiciel Fluent	p. 274
3.5.3. Synthèse	p. 277
3.6. Ouverture de l'indicateur à d'autres applications climatiques et environnementales	p. 278
- Le bruit dans les espaces et ensembles urbains	p. 278
- La pollution atmosphérique	p. 279
- Définition d'une intensité « directionnelle » de l'îlot de chaleur urbain et de l'émissivité des surfaces	p. 280
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>P. 282</b>

---

**CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES** **P. 285**

---

Cheminement de la recherche	p. 285
Limites et perspectives de développement	p. 287

---

**ANNEXES** **P. 293**

---

Annexe 1 : Présentation du modèle TEB	
Annexe 2 : Tableaux synthétiques des résultats du bilan énergétique obtenus par TEB	
Annexe 3 : Extraits des résultats des simulations aérauliques avec Fluent	
Annexe 4 : Les largeurs des rues selon les plans de 1756, 1835 et 1999	
Annexe 5 : Taux d'ouverture des parois de quelques bâtiments du centre Nantes selon des iconographies anciennes	

---

**BIBLIOGRAPHIE** **P. 313**

---

## Introduction générale

# PROBLEMATIQUE, CONTEXTE ET HYPOTHESES

---

La climatologie urbaine a réalisé, ces vingt dernières années, d'importants progrès dans le développement de modèles appliqués aux différentes échelles des espaces bâtis. Malgré ces progrès l'usage de ces modèles dans les procédures de conception est pratiquement inexistant<sup>1</sup>. Des questions comme celles relatives aux différentes échelles climatiques ou aux paramètres environnementaux ne sont discutées que dans le cadre de recherches spécialisées. Ces dernières élaborent des méthodes très sophistiquées (basées sur des simulations numériques et des mesures complexes) avec un langage et des objectifs souvent décalés de ceux de la planification urbaine en général [THAM et al. 1999]<sup>2</sup>.

La démarche la plus répandue pour intégrer ces questions dans le milieu de la recherche en architecture est en effet une approche instrumentale spécialisée qui demeure assez éloignée de la pratique et de la culture architecturale :

*« ...prenant plus ou moins appui sur des savoirs constitués dans des secteurs plus solides : ceux de la thermique, de l'économie des énergies, de l'informatique, voire –pour ce qui intéressait la question du confort de la physiologie et de la psychologie. Il est patent que les frayeurs sur la crise énergétique se diluant, les sous-cultures architecturales correspondantes se sont trouvées de plus en plus marginalisées ». [PENEAU et al. 1998]*

La procédure instrumentale de l'ingénierie consiste à offrir aux concepteurs des outils de simulation, qui ne sont applicables qu'une fois le projet mis en forme. A ce moment de la conception, la forme proposée inclut déjà toutes les données du contexte. L'application tardive de ces outils, dans le processus de conception, ne permet que des modifications mineures au projet, car les questions environnementales ne constituent pas les seuls enjeux de la conception. Il sera donc difficile de reconsidérer le projet, même si ce dernier s'avérait « qualitativement mauvais » d'un point de vue environnemental.

*« Les instruments proposés, et pour la plupart marqués par les méthodes de l'ingénierie, ne sont applicables que sur des objets déjà constitués. Ils ne peuvent donc pas être considérés comme de véritables outils projectuels, utilisés de manière interactive au cours du processus de mise en forme » [Péneau et al. 1998].*

Pour dépasser ces décalages qui séparent les approches physiques de la pratique du projet, on a vu apparaître dans la recherche sur les ambiances architecturales et urbaines une attention particulière au développement de méthodes de transmission didactique et d'application projectuelle. Deux directions différentes se sont ouvertes dans ce sens au laboratoire CERMA : la première a pour objectif de caractériser les édifices et les tissus urbains de référence<sup>3</sup>, et la deuxième vise à

---

<sup>1</sup> Cela se limite, le plus souvent des cas, à une simple question d'orientation, en adéquation avec la trajectoire du soleil ou (ce qui est plus rare) avec la direction des vents dominants.

<sup>2</sup> « *Expertises are frequently carried out highly founded institutes, but these experts (for numerical simulation, complex measurements and so on) are speaking another « language » as the planners in general* » [THAM et al. 1999].

<sup>3</sup> Ces travaux traitent principalement de l'ensoleillement, de la lumière naturelle [GROLEAU et al. 1995] et du phénomène sonore [WOLOSZYN 1999].

définir des outils de simulation inverse qui contribueraient à la mise en forme du projet architectural ou urbain<sup>4</sup>.

La démarche adoptée, dans ce cadre, par les travaux sur les références consiste à évaluer la performance des éléments bâtis (bâtiments ou fragments des tissus urbains) à réguler les paramètres physiques des ambiances. L'objectif visé est de définir un corpus (aussi large que possible), dont les critères de référencement dépasseraient le seul aspect visuel, qui est le plus répandu chez les concepteurs. On y traite ainsi des ambiances sonores, lumineuses, thermo-aérauliques, voire olfactives [PENEAU et al. 1998]. La finalité de cette première thématique développée au CERMA, est de constituer des exemples d'éléments bâtis dont la qualité physique des ambiances aurait été « prouvée » par des modélisations numériques. Ceci dans le but de les mettre à disposition des concepteurs des projets urbains. Des travaux ont ainsi déjà concerné les aspects liés à l'ensoleillement, à la lumière naturelle, à l'écoulement aéraulique et, à un degré moindre, au phénomène sonore.

Avec la simulation inverse, il est question de définir des outils informatiques d'aide à la mise en forme de bâtiments ou d'espaces urbains. Dans ce cas, il s'agit de « déclarer » une formulation précise d'intentions sur les paramètres d'ambiance pour aboutir à des formes d'éléments bâtis. Les travaux qui ont suivi cette voie n'ont concerné jusqu'à présent que les aspects liés à l'ensoleillement des bâtiments et à la visibilité urbaine<sup>5</sup>.

Portée par des questionnements similaires, mais étendus aux interactions entre les éléments bâtis et l'ensemble des facteurs d'ambiance microclimatiques dans la pratique des projets (la discipline dans laquelle se situe ce travail demeure l'architecture), notre questionnement de base est parti d'interrogations assez primaires. Ces interrogations, que tout concepteur de projet urbain pourrait formuler, prenaient la forme suivante : est-il possible d'anticiper la régulation du microclimat urbain au stade de la conception du cadre bâti ? Sur quoi faut-il agir et comment garantir l'efficacité des interventions ?

Contrairement à une démarche de référencement qui s'appuierait sur l'analyse d'objets déjà constitués (bâtiments, tissus...), nous proposons, pour répondre à ces questionnements, d'adopter une analyse dynamique des transformations urbaines. Cela permettra de distinguer clairement les références d'interventions qui contribuent à réguler les paramètres microclimatiques et environnementaux. Une analyse des différentes actions sur la forme urbaine nous paraît en effet plus proche des préoccupations liées à la pratique du projet qu'une analyse des formes constituées. On peut assimiler en effet le projet urbain à une intervention sur un état existant, et donc à une proposition de passage d'un état du cadre bâti à un autre.

Les procédures de référencement se basent le plus souvent sur les formes constituées, et évacuent de ce fait, toute notion d'action, qui est pourtant le moteur principal des projets urbains.

*« L'aspect déconcertant du devenir fait qu'on est toujours tenté de lui préférer une représentation de la stabilité. Il y a un véritable besoin psychologique de pouvoir s'appuyer sur des choses stables : le mouvement crée le vertige. Ainsi, on se sent généralement plus à l'aise lorsqu'on a affaire à des structures, plutôt qu'à des phénomènes de structuration, de même lorsqu'on est en présence de formes plutôt que de processus de formation. On observe une nette tendance à valoriser le plan plutôt que le processus continu et laborieux de la planification. L'inconvénient d'une telle valorisation du produit par rapport au processus tient surtout au fait que tout le domaine des actes productifs se trouve ainsi évacué de la pensée... » [Malfroy 1991].*

---

<sup>4</sup> Voir à ce sujet les thématiques développées au laboratoire CERMA sur : <http://www.cerma.archi.fr/> et sur la prise en compte de la question des références voir [Péneau et al. 1998].

<sup>5</sup> Voir au sujet de la simulation inverse (ou modélisation déclarative) sur le site Internet du CERMA, les thèses de: [SIRET 1998] ; [MOUNIER1999] ; et [NIVET 2000].

Nous insisterons donc pour notre part sur les actions (c'est à dire la modification des formes et non les formes proprement dites) qui ont contribué, à travers l'histoire des villes, à modifier le microclimat urbain. En faisant cette nuance entre analyse des actions et analyse des formes, nous voulons nous rapprocher de la pratique du projet urbain, qui par définition consiste en une action sur un environnement existant. Avant de formuler les éléments méthodologiques liés à notre recherche, précisons un peu plus son objet :

- « Art urbain » de réguler le microclimat

*« Il faudrait qu'en France on commence à distinguer deux disciplines qui ont chacune sa spécificité : l'art urbain et l'urbanisme – ce que depuis très long temps les Anglo-Saxons appellent town design et city planning. D'un côté un savoir qui intéresse directement la construction de la ville comme entité physique, sa forme, ses espaces publics, son architecture et qui passe par le projet. De l'autre, tout ce qui relève de la planification territoriale, de la gestion et de la distribution des grandes fonctions d'aménagement. Même si ces deux disciplines portent sur le même objet, la ville, il est impossible de les confondre puisqu'elles ne font appel ni aux mêmes savoirs ni aux mêmes méthodes. Immédiatement, il deviendra clair qu'elles relèvent de deux formations distinctes. ».* [B.Huet, Journal le monde du 23/11/1998].

Nous entendons dans cette recherche le projet urbain dans un sens morphologique, et considérons la conception comme une manipulation de formes et de matériaux. C'est ce que Bernard Huet a appelé « l'art urbain ». Les éléments que nous analysons sont donc ceux relatifs à une modification de la forme urbaine et des états de surfaces qui lui sont associés. Ces surfaces sont constituées de différents matériaux et revêtements : sol minéral, végétal, recouvert d'eau ou sol naturel, et font l'objet des projets urbains tout autant que la forme des espaces construits.

L'analyse de « l'art urbain » est entendue dans ce travail dans un sens diachronique. Nous proposons en effet d'observer à travers l'histoire des transformations urbaines, les différentes manifestations de cet « art urbain » qui auraient comme effet de modifier les paramètres microclimatiques. Quant aux conditions du contexte qui favorisent la réalisation de ces transformations, elles ne seront évoquées que pour nous éclairer sur leur contribution dans la mise en forme des transformations urbaines. Cette partie de l'analyse relève en effet au premier chef de la morphologie.

Le pouvoir régulateur des éléments de la forme urbaine sur les paramètres microclimatiques et environnementaux en général, n'est plus une simple hypothèse ; il est depuis quelques dizaines d'années confirmé par les travaux liés à la climatologie urbaine. Les spécialistes de cette discipline reconnaissent non seulement ce rôle régulateur à la forme urbaine, mais vont même jusqu'à le quantifier par des mesures in situ et des modèles de simulation numériques [ARNFIELD 2003].

La principale spécificité de notre travail tient à son aspect dynamique. Au lieu de définir les interactions des paramètres microclimatiques et environnementaux avec tous les aspects du cadre bâti (trop nombreux et trop complexes si on analyse la forme urbaine comme étant un objet constitué), nous suggérons de focaliser l'observation sur « ce qui s'y transforme ». Pour cela on propose de constituer, à partir de l'histoire des villes, des références d'interventions sur le cadre bâti qui ont contribué à modifier le microclimat urbain. Cette lecture historique des actions sur la forme urbaine ayant régulé le microclimat urbain, sans constituer une finalité en soi<sup>6</sup>, vise à instruire les

<sup>6</sup> Il n'est pas question en effet dans cette recherche d'une analyse « historiographique » mais plutôt d'une approche historique visant la mise au jour d'un savoir-faire. Voir, sur la spécificité de l'approche historique qui viserait le projet, la réponse de Christian Devilliers à F. Choay dans un article des cahiers de la recherche architecturale. Il y précise en effet la différence entre un retour historique visant le projet et l'approche historiographique qui s'attacherait plus aux dates qu'à l'objet [DEVILLIERS1990]. Voir aussi Michel Serres (cité par Devillier) qui désigne du doigt : « ... la cuistrerie précise de ceux qui tournent le dos à l'objet pour s'empoussiérer de dates, de généalogies et d'événements ponctuels » [SERRES 1975].

projets urbains contemporains. Nous cherchons ainsi à définir ce que l'on pourrait appeler un « art urbain » de réguler le microclimat.

Nous traitons pour cela de toutes les transformations urbaines qui peuvent contribuer à modifier le microclimat urbain. Parmi ces dernières on peut distinguer celles dont l'intention visait explicitement cette modification. Mais nous pouvons retrouver aussi, dans l'histoire des villes, des transformations qui ont contribué à cette modification, sans que cela n'ait été leur objectif, et que les avancées scientifiques de la climatologie urbaine nous permettent de constater. Ces deux modes de modification (intentionnelle et non intentionnelle) des paramètres microclimatiques feront l'objet de cette recherche. Cela permet, à partir d'une connaissance de ce qui se transforme dans une ville et de la manière dont elle se transforme, de définir des références sur les éléments et les modalités morphologiques pouvant modifier le microclimat urbain.

- *Des intentions salubristes à la modification du microclimat urbain*

Des auteurs comme A. Guillerme et A. Corbin nous décrivent des villes du moyen âge qui avaient des rues humides, sombres, mal ventilées, et puantes. Au vu de « la qualité de l'air » des villes contemporaines, on ne peut que constater une modification radicale de leur microclimat. Ces auteurs, ainsi que ceux qui ont traité de la « conscience hygiéniste », relèvent que ces changements sont indissociables des actions de l'homme sur son environnement construit. Les uns reconnaissent à la forme urbaine et à ses états de surface une capacité à « désodoriser l'air » [CORBIN 1986] alors que d'autres attribuent à la ville le qualificatif de « machine atmosphérique », pour évoquer sa capacité à réguler le climat naturel d'un site et à produire un microclimat spécifique [GUILLERME 1990].

La recherche de la qualité de l'air que l'on respire et du microclimat en général n'est pas une spécificité de notre époque, et les possibilités d'action sur cette qualité, par des interventions liées au domaine de l'architecture et du projet urbain, se confirment à la lecture de l'histoire des villes :

*« Dans le domaine de la salubrité urbaine, les architectes ne sont pas sans être marqués par les idées fustigeant l'enfermement, le confinement, la stagnation de l'air ; tant en ce qui concerne les édifices que l'ensemble de la ville. Mais cette préoccupation dans l'air du temps n'est elle pas dans l'air de tous les temps de la théorie architecturale et urbaine depuis Vitruve ? » [Péneau 1998]*

Cette recherche continue de la qualité de l'air, et des interventions qu'elle implique sur les éléments de la forme urbaine, est inscrite dans une intention récurrente que l'on peut qualifier de « salubriste ». C'est dans cette même intention que l'on peut inscrire les questionnements contemporains liés à la pollution atmosphérique et sonore, puisqu'il est aussi question, dans ces dernières, d'aspects sanitaires.

Face à un problème continu et récurrent à différentes époques de l'histoire urbaine, nous supposons qu'il est possible d'envisager l'application de remèdes déjà mis en œuvre. Alors qu'il fut question dans les villes du passé de rejeter les émanations putrides et malsaines des sols et des marécages, de faire rentrer le soleil, l'air et la lumière dans les espaces de la ville, ce sont aujourd'hui les émanations polluantes des usines et des véhicules qu'il est question d'évacuer hors de la ville. Les auteurs de la ville moderne ne formulaient-ils pas aussi parmi les motifs justifiant l'éclatement du modèle ancien de la forme urbaine, une volonté d'introduire plus d'air, de soleil, et de lumière dans les espaces de la ville et les habitations ? .

Cette préoccupation salubriste récurrente constituera le fil conducteur pour analyser les différentes transformations urbaines dans le temps. Nous commençons notre analyse à partir des premières transformations urbaines explicitement salubristes, c'est à dire celles que l'on qualifia « d'hygiénistes », jusqu'à la ville d'aujourd'hui.

Même si ce travail a été engagé sous l'impulsion des préoccupations contemporaines liées à la qualité environnementale des projets urbains, nous ne considérerons dans notre retour au passé que les paramètres microclimatiques. Cette réduction s'explique par le fait que ce sont là des paramètres permanents de l'édification des espaces construits (contrairement aux pollutions atmosphériques et sonores liées à la circulation automobile par exemple). Ce sont aussi des paramètres que les auteurs des projets urbains ont souvent pris en compte par le passé dans les différentes transformations urbaines.

- *Une information non déterministe pour les projets urbains*

Le projet urbain dépend de facteurs multiples, et non exclusivement de ceux liés à la régulation du microclimat urbain. Les questions microclimatiques ne sont en effet, dans les transformations urbaines, qu'une donnée parmi les données du contexte économique, social, culturel..., de chaque transformation. La prise en compte de l'ensemble des autres critères du contexte pourrait remettre en cause la pertinence de références définies selon les seules préoccupations microclimatiques.

Les décalages qui peuvent exister entre les critères de référencement « ambiantales » et les données multiples du contexte, vont réduire la référence à des éléments descriptifs généraux, qui échappent à la particularité des phénomènes microclimatiques. Par exemple, un prostyle qui peut paraître intéressant pour les facteurs d'ambiances va subir tellement d'adaptations pour répondre aux autres préoccupations d'un projet, qu'il risque de se réduire, dans la pratique, à un simple auvent. Il n'est donc pas de notre propos de chercher un quelconque déterminisme<sup>7</sup> entre la forme urbaine et les valeurs physiques des paramètres microclimatiques. De manière plus explicite, la finalité de ce travail se situerait plutôt du côté de la généralisation méthodologique que de celui de la référencement de formes. Une référencement de formes construites est en effet sans cesse dépassée par les différences qui peuvent exister entre le contexte des références et celui du projet.

Dépassons à présent ces considérations assez générales pour formuler de manière plus spécifique le sujet et l'objet de cette recherche.

## 1. OBJECTIFS SPECIFIQUES

En revenant à l'histoire des transformations urbaines, nous cherchons à définir les modalités d'intervention sur le microclimat urbain qui peuvent être applicables aux projets contemporains. Pour que ces modalités puissent être utilisées dans les projets, on leur proposera une actualisation selon les nouvelles avancées scientifiques de la climatologie urbaine.

Dans le cadre de cet objectif assez général, notre recherche est structurée selon trois objectifs complémentaires. Ils font l'objet des développements qui suivent :

### 1.1. Définition des actions et des règles qui ont contribué à la modification du microclimat urbain

Le premier objectif de cette recherche est de définir toutes les transformations des éléments de la forme urbaine, qui peuvent influencer sur le microclimat urbain. Par définition, on entend constituer, en un premier temps, des références d'interventions qui ont un effet potentiel sur le microclimat urbain. Pour cela nous allons mettre en parallèle :

<sup>7</sup> C'est par exemple du fait de la multiplicité des données du contexte que les démarches de simulation inverse semblent difficilement applicables à la mise en forme du projet urbain. Leur utilisation suppose en effet un déterminisme entre le paramètre analysé (visibilité ou ensoleillement) et la forme urbaine puisque c'est une intention liée exclusivement à ces paramètres qui détermine la forme.



- Les éléments de la forme urbaine qui sont générateurs de ces transformations
- Les intentions associées à ces interventions : celles-ci sont formulées par les auteurs des transformations urbaines pour anticiper (quand cela fait partie des intentions) la modification du microclimat urbain.
- Les éléments du contexte qui ont contribué à la réalisation de ces interventions.

Ces trois niveaux d'information nous permettront de constituer des références d'interventions pour les projets contemporains, puisqu'il est aussi question, pour ces derniers, de mettre en relation : une intention et une intervention. La connaissance du contexte historique de ces références permet de comprendre les conditions favorables à la réalisation de ces références.

Pour atteindre, au delà de la constitution de références, la généralisation méthodologique que nous recherchons, nous formulons aussi un objectif qui complète celui liée à l'énumération des transformations pouvant modifier le microclimat urbain. On se propose en effet de définir les éléments récurrents et les niveaux d'intervention communs à ces différentes transformations. Cela dans le but de définir une sorte de règle d'intervention qui comprendrait un éventail d'actions sur la forme urbaine. La règle regrouperait à la fois les interventions intentionnelles (fruit de connaissances salubristes) et non intentionnelles (qui représenterait en quelque sorte ce que les connaissances actuelles de la climatologie urbaine nous permettent d'envisager) du microclimat urbain. Le rôle de cette règle serait de traduire l'art de réguler le micro-climat urbain, en précisant les modalités de régulation des paramètres microclimatiques par des interventions sur le cadre bâti.

## **1.2. Evaluation des effets des transformations urbaines sur le microclimat urbain**

Après la définition des actions et des règles d'intervention sur les éléments de la forme urbaine nous tenterons d'évaluer les variations que les différentes transformations ont pu induire sur le microclimat urbain. Cela permet de valider et de mesurer la contribution de ces transformations à la modification du microclimat urbain. On peut trouver ainsi des transformations qui n'induisent que des variations mineures alors que d'autres peuvent avoir une influence considérable. Cela permet, en un premier temps, de distinguer une certaine « force modificatrice » attribuée aux transformations du cadre bâti et qui serait différente d'une action à une autre. Cet objectif devient a priori envisageable, au vu des développements de modèles de simulation numériques de la climatologie urbaine. Il existe en effet des modèles qui nous permettent de quantifier les paramètres microclimatiques à partir de données morphologiques comme celles liées aux transformations urbaines. L'évaluation de ces modèles nous permet ainsi de vérifier la pertinence des modes d'intervention sur le cadre bâti du point de vue de leur capacité à réguler le microclimat urbain.

## **1.3. Instruire les projets contemporains**

La définition du rôle régulateur des transformations urbaines sur le microclimat urbain trouve déjà quelques formulations dans les modèles physiques développés en climatologie urbaine. Mais les approches exclusivement physiques, basées sur des méthodes d'ingénierie, ne sont applicables que sur des objets déjà constitués. L'apport de ces méthodes est donc limité puisqu'elles ne peuvent être utilisées que si l'auteur du projet a fini de concevoir ses espaces bâtis. Le concepteur a plutôt besoin d'une aide qui l'accompagne tout au long du processus de conception, en lui permettant d'intégrer les préoccupations microclimatiques parmi les multiples données du contexte dans lequel il intervient. Ce n'est pas notre propos que de remettre en cause l'utilité des outils de simulation qui restent le seul moyen permettant d'anticiper les paramètres microclimatiques, mais nous constatons

que leur application reste limitée à l'évaluation et à l'ajustement de la forme finale des projets urbains.

A partir de là, il nous semble important de compléter ces outils par des éléments d'information sur les effets microclimatiques qui accompagnent toutes les phases de conception du projet urbain, y compris celles qui concernent la mise en forme des traits sommaires de ce dernier. Ces descriptions sommaires caractérisent les premières phases du projet ainsi que les recommandations des règlements urbains. Nous cherchons donc à mettre en place un outil d'analyse et d'anticipation qui permettra, n'étant pas déterministe, d'inscrire les préoccupations liées aux paramètres microclimatiques et environnementaux, parmi les autres données du contexte, dans la mise en forme des projets. En résumé un outil non déterministe, mais ouvert à plusieurs mise en formes possibles.

La réduction de notre investigation aux seuls paramètres microclimatiques n'exclut pas, in fine, un élargissement des conclusions et des propositions à l'ensemble des paramètres environnementaux, qui deviennent, depuis quelques années avec la problématique du développement durable, un enjeu important de la planification urbaine.

Plus concrètement, ce que nous voulons apporter au projet urbain s'inscrit plutôt dans la définition d'indicateurs morphologiques, qui traduiraient la mise en relation d'une intention microclimatique et d'une action sur la forme urbaine. Le rôle de ces indicateurs serait d'informer le concepteur des effets de ses actions sans lui imposer des formes construites précises. Nous cherchons donc à informer et infléchir la manière de concevoir les projets urbains vers une utilisation plus accrue d'indicateurs morphologiques porteurs d'une information microclimatique. Ces indicateurs, n'étant pas déterministes, devront être définis de manière suffisamment ouverte pour permettre une adaptation aux multiples données d'un contexte et suffisamment précises pour renseigner l'auteur des projets sur le microclimat urbain.

Après avoir précisé les trois principaux objectifs de notre travail, nous clarifions dans ce qui suit le contexte dans lequel ils s'inscrivent.

## **2. DEFINITION DU CONTEXTE**

Cette thèse s'inscrit dans la problématique générale des ambiances urbaines. Elle traite de façon particulière des aspects physiques de ces ambiances, en interrogeant les interactions entre les actions sur la forme urbaine et les paramètres microclimatiques. Les travaux qui ont eu pour objet l'analyse de ces interactions n'ont concerné jusqu'à présent que la question de la forme urbaine et non celle liée aux actions sur cette dernière. Ces travaux ont suivi pour la plupart deux démarches : une démarche prédictive, en utilisant des modèles de simulation physique, ou une démarche de caractérisation, en définissant des indicateurs à partir d'une connaissance des éléments de la forme urbaine. Quant aux travaux qui ont tenté de faire explicitement le lien entre un travail d'analyse historique, comme c'est notre cas, et la pratique du projet, on ne les trouvera que dans quelques travaux de morphologie urbaine élaborés principalement par des architectes.

Pour clarifier le contexte de cette recherche, revenons quelque peu sur les trois principaux points que nous venons d'évoquer. A savoir : la problématique générale des ambiances, les approches de l'interaction entre forme urbaine et microclimat et enfin la question du rapport entre l'analyse historique et le projet.

### **2.1. Nature du questionnement dans la problématique générale des ambiances**

La recherche dans le champ des ambiances urbaines implique, par définition, une connaissance du complexe : « espace construit – paramètres physiques du microclimat urbain – espace perçu »

[Augoyard 1998; Peneau 1998]. Les ambiances ne sont donc pas uniquement inscrites dans l'objectivité physique des phénomènes :

*« Elles comportent un renvoi déterminant à l'usage et au sensible. Elles ont pour caractéristique d'allier l'objectif et le subjectif » [Peneau 1998].*

Les travaux de recherche effectués dans le domaine des ambiances (au sens physique et sensible) se sont principalement focalisés jusque là sur les phénomènes sonores [Augoyard et al. 1995]. Nous ne pouvons donc pas, puisque cela n'a pas encore été clarifié (ni en théorie ni en pratique), nous appuyer sur la notion « d'ambiances microclimatiques urbaines »<sup>8</sup>. En effet, les travaux de recherche dans le cadre de notre spécialisation doctorale n'ont concerné que les aspects physiques<sup>9</sup>. Cependant, selon la théorie des ambiances, on peut résumer les connaissances nécessaires pour anticiper les « ambiances microclimatiques » à deux niveaux complémentaires : l'objet du premier est de définir les interactions du cadre construit et des paramètres physiques, et celui du deuxième concerne les interactions entre les paramètres physiques (tels qu'ils sont régulés par le cadre bâti), et leur perception par les usagers des espaces urbains.

*«... dans l'environnement urbain, tout signal physique est instrumenté par un espace de propagation qui lui donne une certaine qualité hic et nunc<sup>10</sup> » [Augoyard 1998].*

Notre recherche traite en particulier du premier niveau de connaissance, celui des interactions entre les espaces construits et les paramètres physiques. La spécificité de notre approche, comme on l'a évoqué à plusieurs reprises, est d'analyser ces interactions selon la dynamique des transformations urbaines.

Les questions liées à la « perception » des paramètres microclimatiques doivent donc l'être, si on avait à les étudier dans le cadre de notre problématique, dans une vision tout aussi dynamique. C'est à dire, qu'il faudrait définir les aspects perceptifs qui argumentent, à chaque fois, les transformations urbaines salubristes, ainsi que les effets que ces transformations engendrent sur la perception des usagers. Cela ne fait pas partie de nos objectifs. Recueillir la perception d'une transformation urbaine, est assez difficile à établir sur des situations du passé et constitue un sujet de recherche en soi.

Les aspects perceptifs ne seront abordés dans ce travail, que lorsque la qualité perceptive fait partie des intentions qui argumentaient les transformations urbaines. Ces arguments étaient formulés, le plus souvent, par le biais d'objectifs précis, comme : améliorer les visibilité des espaces urbains, faire rentrer plus d'air, de lumière et de soleil dans les rues ou encore contrôler les écarts de température, etc. Un minimum de consensus étant nécessaire pour qu'un projet urbain se réalise, les aspects perceptifs ne deviennent moteurs d'une transformation urbaine que lorsqu'ils relèvent d'une perception collective. C'est ce que A. Guillaume appelle « mentalité », pour différencier, par exemple, la perception du microclimat urbain dans les villes du moyen âge de celle propre au

---

<sup>8</sup> La perception des phénomènes microclimatiques a en effet du mal à se définir. Il suffit pour cela d'analyser les différents modèles de confort thermique qui existent déjà depuis plusieurs années, et qui se cantonnaient, jusqu'à récemment, à une approche physiologique.

<sup>9</sup> Différentes recherches ont été menées sur la question des ambiances microclimatiques et notamment dans le cadre des travaux de thèses. Quatre thèses ont été soutenues, au sein de la spécialisation doctorale dans laquelle cette recherche s'inscrit, en portant dans leurs intitulés le terme microclimat urbain : [TIRAOU 1999], [VINET 2000], [BOUSSOUALIM 2002], [AIT AMEUR 2002] ; et [LEHTIHET 2003].

<sup>10</sup> Cette qualité « hic et nunc » est annoté dans le texte original par le texte suivant : « Citons les exemples suivants : temps de réverbération et timbrage, pour le son ; réflexion particulière, modification de température de couleur et organisation des ombres, pour la lumière ; turbulences particulières des flux de l'air autour de certaines configurations architecturales, volatilité variable des odeurs en fonction de la vitesse du vent » [AUGOYARD 1998], note 11, pp. 17.

contexte hygiéniste. Il existerait donc un relativisme des représentations qui conduit à une sorte de filtrage des perceptions par des éléments culturels [Guillerme 1990].

« *Plus une ville était puante plus elle était riche* »<sup>11</sup>. Cette affirmation d'A. Guillerme en dit long sur la mentalité perceptive d'avant la période hygiéniste. L'atmosphère urbaine, malgré son état malsain était perçue comme un état de normalité. L'air de la ville contribuait même parfois jusqu'à induire une certaine organisation « économique », « sociale » et « spatiale » de la ville. Cette « mentalité » qu'évoque A. Guillerme renvoie à la fois à la perception d'une époque et aux actions sur l'environnement construit qui lui sont associées. Par exemple, la mentalité « salubriste » va induire diverses transformations pour « assainir » l'air des villes du moyen âge et s'étendra selon différentes formes jusqu'à aujourd'hui.

Notre propos dans ce présent de travail n'est pas de retracer l'évolution de cette « mentalité », mais nous tenterons d'évoquer quelques-unes des répercussions sur l'organisation et la transformation des espaces construits. C'est reliant les interactions de l'espace construit et des paramètres physiques du microclimat avec cette mentalité salubriste, que notre investigation abordera les aspects perceptifs.

## 2.2. Méthodes d'évaluation des interactions entre microclimat et cadre bâti

L'analyse des interactions entre le cadre bâti et le microclimat urbain ne concerne, dans les travaux de recherches, qu'une dimension synchronique. En effet il s'agit, dans la plupart des cas, de mettre en correspondance, par des mesures in situ, les variations des paramètres microclimatiques pouvant exister entre différents espaces d'un même fragment urbain. Mais les différences, morphologiques et microclimatiques, entre ces espaces étant souvent nombreuses ne permettent pas de conclure sur l'effet induit par telle ou telle variation et entraînent le plus souvent une confusion au sujet du rôle des éléments de la forme urbaine à réguler les paramètres microclimatiques.

Les analyses qui traitent des effets de transformations urbaines sur le microclimat urbain sont donc, à notre connaissance, assez rares. Probablement parce que c'est une question qui ne peut intéresser, au premier chef, que les auteurs de ces transformations, c'est à dire les auteurs des projets urbains. C'est donc auprès des travaux, dont les préoccupations sont assez proches de la production opérationnelle du cadre bâti, que l'on peut retrouver une approche du rapport entre éléments de la forme urbaine associant ses états de surface et les paramètres microclimatiques. Passons brièvement en revue les trois principales méthodes qui traitent de cette question, et ce qu'elles apportent pour le développement de notre recherche :

### - Définition d'indicateurs traduisant le « comportement microclimatique » du cadre bâti

L'objectif de ce type de démarche est de définir un certain nombre de paramètres microclimatiques sur la base de modèles simplifiés et rapportés à la forme des espaces urbains. Des auteurs ont défini par exemple des coefficients d'ensoleillement ou de réduction d'ombrage [Swaid 1993] ou encore des indices d'accessibilité solaire [Arnfield 1990]. On peut rencontrer aussi des travaux concernant le phénomène thermique où on a vu apparaître des notions comme l'intensité de l'îlot de chaleur urbain [Oke 1987] et le coefficient d'inertie thermique d'un fragment bâti [Swaid 1993]. Cette première approche, de l'interaction entre espace construit et paramètres microclimatiques, utilise des formulations mathématiques qui prennent en compte des informations sur la forme urbaine ainsi que quelques propriétés des paramètres microclimatiques analysés.

<sup>11</sup> [Guillerme 1990].

Chaque paramètre microclimatique est rapporté à des propriétés spécifiques des espaces construits. En d'autres termes il y a autant d'indicateurs morphologiques que de paramètres microclimatiques.

**- Une prédiction « quantifiée » dans les modèles physiques**

Le rapport entre éléments de la forme urbaine et les paramètres microclimatiques trouve une modélisation bien précise dans les modèles de simulations physiques. En effet, ces derniers se basent sur des données d'entrées liées à la forme urbaine pour « quantifier » les paramètres microclimatiques, comme la vitesse du vent, la température des surfaces, le rayonnement solaire incident ou encore la pollution atmosphérique, etc. Pour cela, les modèles physiques reconstituent les mécanismes de propagation des paramètres microclimatiques et leur régulation par l'environnement urbain. Ce sont des modèles, le plus souvent, validés par des mesures en situation réelle lorsqu'ils sont définis dans le cadre de recherches « scientifiques » [Voogt 1991], [Vachon 2001], etc.<sup>12</sup>

L'inconvénient principal de ces modèles réside dans leur limite de prise en compte des échelles spatiales de la forme urbaine. Leur application, à des échelles spatiales réduites (bâtiment, espace urbain), exige une reconstitution presque « réaliste » de la forme urbaine. Celle-ci devient de plus en plus complexe au fur et à mesure que l'étendue spatiale du fragment analysé devient importante. Pour pallier à cela, les modèles appliqués à des fragments urbains adoptent une simplification de la forme urbaine par des paramètres « réducteurs ». La plupart de ces modèles définissent par exemple, comme unité élémentaire de la forme urbaine, le concept de « rue canyon », qui représente le prospect moyen des rues [Arnfield 2003]. Cette réduction (sans aucun sens péjoratif) est due à la complexité des phénomènes à simuler. En dehors de cette réduction qui peut parfois paraître excessive pour le concepteur du cadre bâti, l'intérêt des modèles de simulation se situe dans leur capacité à effectuer une évaluation quantitative des paramètres microclimatiques, que l'on ne peut guère obtenir par les autres approches.

La principale condition pour utiliser ces modèles réside dans la formulation explicite, de la part des auteurs, des informations concernant : les données nécessaires et les résultats pouvant être obtenus par les modèles, les hypothèses réductrices adoptées par ces derniers et leur limites d'application [Bouleau 1999].

**- La caractérisation réduite à des indicateurs morphologiques**

L'objectif principal de cette troisième approche est de construire des indicateurs « environnementaux » qui seraient basés sur une information liée principalement à la forme urbaine. Contrairement à la première démarche, où la nature du chaque paramètre physique analysée influait sur la formulation de chaque indicateur, l'hypothèse posée ici est que la connaissance de la forme urbaine pourrait, à elle seule, nous informer sur les paramètres microclimatiques. Et cela peut se faire sans aucune référence explicite aux paramètres microclimatiques ou environnementaux. Parmi ces indicateurs on peut trouver la densité, la compacité, la porosité, la minéralisation des fragments urbains ou encore la sinuosité et l'orientation des rues, etc. [Groleau et al. 1995], [Adolphe 2001], [Ait-Ameur 2002].

La spécificité de cette démarche, contrairement à la précédente qui formulait clairement le rapport entre les causes (paramètres géométriques) et les effets (effet particulier sur les paramètres microclimatiques), réside dans la réduction de l'interaction « espace construit – microclimat » aux

---

<sup>12</sup> Un article paru récemment dans la revue « International Journal of Climatology » passe en revue une bibliographie conséquente sur les travaux de climatologie urbaine, dont ceux concernant les mesures et les modèles de simulation numériques [ARNFIELD 2003].

seules informations concernant la forme urbaine et la nature des surfaces. En d'autres termes, l'hypothèse formulée ici est que l'interprétation de la forme urbaine selon des paramètres morphologiques spécifiques permettrait d'évaluer la qualité des paramètres physiques du microclimat sans procédures de simulation, jugées trop complexes. La volonté de simplification de l'analyse est d'ailleurs affichée comme objectif dans ces travaux.

#### **- Vers une qualification du rapport « forme urbaine– microclimat » dans l'analyse du cadre bâti**

En comparant les résultats de ces trois précédentes démarches de l'interaction entre forme urbaine et microclimat, on s'aperçoit que la première et la troisième produisent des valeurs a-dimensionnelles dont le but est de traduire l'interaction proprement dite. La deuxième (par quantification) utilise les unités de mesures du système international pour quantifier numériquement les paramètres microclimatiques.

Pour notre part, nous entendons analyser le microclimat urbain par une évaluation de l'ensemble des paramètres physiques qui le constituent. Cela inclut les bilans d'énergie et les paramètres microclimatiques comme la température, l'humidité et la vitesse du vent. Cet objectif ne peut être atteint qu'en utilisant des modèles physiques validés qui prennent en compte, parmi les données d'entrée, des éléments de la forme urbaine et des états de surfaces et produisent en sortie une quantification de l'ensemble des paramètres physiques. Ces derniers sont en effet difficilement dissociables et leur mise en relation avec le cadre bâti est trop complexe pour être traitée de façon experte. Les modèles physiques présentent donc l'avantage de modéliser l'ensemble des interactions pouvant concerner ces paramètres. Mais on ne doit pas perdre de vue que tout modèle est une réduction par définition. Il nous faudra donc évaluer si cette réduction est compatible avec la complexité des espaces construits et au-delà évaluer l'applicabilité de ces modèles à l'évaluation des interventions sur le cadre bâti.

Les deux autres approches (par indicateurs et par caractérisation morphologique) nous semblent aussi intéressantes pour analyser ou mettre en forme les espaces bâtis. Elles permettent en effet, dans le cadre d'un règlement ou d'un projet urbain, d'éviter les procédures de simulation qui sont parfois trop complexes à mettre en œuvre. On peut avoir ainsi, à partir de ces approches, des informations synthétiques sur l'interaction « espace construit – microclimat ». De plus, ce sont des approches qui semblent compatibles avec les informations dont a besoin le concepteur pour être renseigné sur la qualité (au sens physique) de ce qu'il conçoit. La définition des indicateurs ne passe pas en effet par des simulations trop complexes, et elle ne s'appuie pas sur un dimensionnement précis du projet.

En résumé, nous retiendrons une complémentarité entre ces trois approches. Les modèles de simulation nous permettront de quantifier les paramètres physiques du microclimat urbain, et les deux autres seront envisagés pour traduire l'opérationnalité de notre recherche historique. Sachant cependant qu'il existe une différence notable entre la définition des indicateurs évoquée dans ces deux approches et les indicateurs que nous voudrions définir. Nous ne cherchons pas à évaluer une situation donnée (une forme figée), mais définir des indicateurs qui nous renseignent sur l'effet microclimatique d'une transformation. C'est à dire celui lié au passage d'une situation morphologique à une autre.

### **2.3. L'histoire, les références et le projet urbain**

Les modalités de passage de l'analyse des références au projet, que ce soit à partir d'objets bâtis particuliers ou, comme c'est notre cas, à partir de l'histoire des éléments de la forme urbaine, restent assez problématique. Rappelons en ce qui suit ce qu'il en est de la question du passage des

références d'objets bâtis au projet, avant d'évoquer, ce qui concerne plus explicitement notre recherche, c'est à dire la question du passage d'une analyse historique du cadre bâti au projet :

- **Des références au projet : le problème de contextualisation des références**

Sur les passerelles qui peuvent exister entre les références et le projet on peut distinguer deux points de vues assez différents :

- Le premier réfute la nécessité d'un lien explicite entre la référence et le contexte du projet. On pense en effet que l'architecte apprend pour inventer et que, de ce fait, les références ne sont que des exemples qu'il pourra réinterpréter selon ses considérations artistiques. On comprend mieux cette position lorsque l'on constate que le champ des références s'élargit hors du champ de l'architecture, et que par exemple des architectes peuvent s'inspirer de la forme d'une main (F.L.Wright), d'un bateau (Le Corbusier) ou même des tableaux de Kandinsky (R.Koolhaas) ou encore de notions philosophiques assez floues comme la structure profonde (P.Eisenmann), pour concevoir leurs projets. Il est donc difficile de trouver des récurrences permettant, une généralisation méthodologique, dans les interprétations de références. Ces interprétations sont ainsi laissées au « génie créateur » des architectes, qu'il serait vain de vouloir pénétrer [Girard 1986]. Notre propos, comme on l'a déjà évoqué, relève de la généralisation méthodologique. Nous ne pouvons donc pas recourir uniquement au registre des références pour définir les interactions entre les projets urbains et le microclimat. Celles-ci paraissent trop multiples et ne prennent leur validité qu'en regard d'une action spécifique de conception d'un projet.

- Le deuxième est opposé à cette conception de « l'architecte génie » qui arriverait à adapter ces références multiples aux données du contexte dans lequel il intervient. C'est, selon les protagonistes de ce point de vue, la raison principale du décalage qui existe entre les espaces construits proposés par les architectes modernes et la réalité sociale, culturelle, économique, etc., de la ville<sup>13</sup>. Des méthodes d'analyse ont vu ainsi le jour pour éclairer les architectes sur la réalité dans laquelle ils interviennent, et leur proposer des directives à respecter. Elles réfutent toute idée de transposition de références sans connaissance préalable du contexte. R.Prost évoque par exemple des références « d'architecture », qui correspondent à des exemples de compositions formelles répertoriés dans l'histoire de l'architecture. Ce sont des exemples de constructions concrètes, reconnues pour leur double valeur esthétique et comme solution possible au problème posé par le contexte [Prost 1992]<sup>14</sup>. Dans ce cadre, le choix des références n'est pas complètement intuitif, il répond aux problématiques du contexte et le passage de la référence au projet est alimenté par les conclusions des analyses urbaines. Ces dernières vont ainsi conduire à remodeler les références en fonction du contexte.

Il s'est avéré, néanmoins, que les conclusions de ces analyses, puisqu'elles suivent les démarches de disciplines scientifiques diverses externes à ce que B.Huet avait appelé « l'art urbain », manquaient d'opérationnalité. En effet ces disciplines ayant des objets de connaissance qui leur sont propres, ne peuvent qu'apporter des solutions dans les termes de leur objet propre. Conclure sur la perception d'un espace urbain par exemple ne peut concerner que cette perception et

---

<sup>13</sup> A ce propos, l'ouvrage intitulé « Eléments d'analyse urbaine » est frappant par son attitude réactionnaire à la démarche des architectes modernes : « non, M. Le Corbusier, la statistique n'est pas 'le Pégase de l'urbaniste' » [PANERAI et al. 1986].

<sup>14</sup> R.Prost distingue à son tour deux catégories de références dans la pratique des projets : des références architecturales sélectionnées parce qu'elles répondent explicitement à un problème similaire à celui posé par le projet ; et des références trouvées hors du champ de l'architecture où le rapport entre la référence et le projet n'est pas explicite mais relèverait de l'intuition du concepteur. [PROST 1992]

non comment la prédire dans la pratique du projet. Alors faut-il avoir une connaissance encyclopédique du contexte d'intervention ?

- **De l'histoire au projet : La problématique de continuité historique**

On peut distinguer deux approches différentes de l'intérêt d'une prospection historique pour le projet urbain :

- La première, que l'on peut qualifier « d'analytique », recherche dans l'histoire la réponse d'un autre temps à un problème qui peut être contemporain. Elle est limitée aux espaces et aux temps auxquels elle se réfère. La démarche du concepteur du projet urbain dans ce cas serait de constituer des exemples de réponses bâties allant de l'histoire très ancienne aux objets les plus contemporains (qui appartiennent aussi à l'histoire puisqu'ils sont réalisés). « L'information historique » va dans ce cas se juxtaposer à d'autres analyses : sociales, culturelles, économiques, etc., que l'auteur du projet abordera pour « maîtriser » le contexte de son projet. Si on s'inscrivait dans ce premier point de vue, notre analyse historique s'arrêterait au stade d'une exemplification des transformations urbaines en rapport avec leur niveau de modification du microclimat urbain.
- La deuxième approche du rapport « histoire-projet » et que l'on pourrait qualifier « d'opératoire », recherche dans le passé non seulement des exemples de réponses, mais s'interroge aussi sur leur rapport avec les productions de l'époque contemporaine. C'est le point de vue de l'approche morphologique (plus connue en France sous l'appellation typo-morphologique) en urbanisme qui a fait émerger des notions comme type, structure, processus, etc. Cette transposition se fait par une volonté d'observer, au-delà des faits historiques isolés, une certaine continuité du savoir-faire à laquelle les actes contemporains pourraient se greffer. Ce point de vue consiste donc à formuler les éléments traduisant « la continuité diachronique d'un savoir-faire ».



**Représentation schématique de deux visions différentes du rapport « histoire-projet »**

Selon cette approche morphologique, il serait possible de réduire cette connaissance de la « totalité » (infinie) du contexte, à une connaissance de l'histoire de la forme urbaine. Cette approche perçoit le temps « passé-présent-futur » comme une continuité, et recherche ainsi les mécanismes de formation et de transformation des espaces bâtis pour les perpétuer. C'est ce que l'on a caractérisé dans le courant italien de ces théories par l'appellation « storia operante »<sup>15</sup> ou histoire opérante.

- **Vers la définition d'un savoir-faire : Des intentions et des actions récurrentes**

Ce qui nous semble intéressant dans cette approche, c'est l'idée d'un retour à l'histoire pour constituer les éléments d'un « savoir-faire » répondant à un questionnement persistant dans le

<sup>15</sup> C'est chez un enseignant et architecte italien, Savério Muratori (1910 – 1973), que l'on retrouve les premières conceptions opératoires de l'histoire appliquées à l'analyse urbaine et à la conception des projets urbains. Voir à ce sujet [GEROSA 1990].



temps. C'est ce que l'on s'est proposé de faire, puisque l'idée de base de notre recherche reste une instrumentation méthodologique pour les projets contemporains. Que pouvons-nous alors extraire de cette approche pour alimenter notre sujet ?

L'opérationnalité de la lecture des transformations urbaines serait donc obtenue, selon ces travaux de morphologie urbaine, par la définition d'un processus auquel les projets contemporains peuvent se rattacher. Définir un processus diachronique présente l'avantage d'insister sur les mécanismes de formation et de transformation. Mécanismes qui, parce qu'ils traduisent des règles, serviraient comme référence opératoire pour les projets contemporains, car ils définissent un savoir-faire.

*« L'acte de structuration est nécessairement au présent, tandis que la structure s'édifie dès qu'elle est dissociée du processus de structuration qui la génère, la structure appartient au passé... Le processus de formation se nourrit de structures passées et de formes passées pour en faire le contenu de structurations actives et de formations en acte. » [Malfroy 1991].*

Un des reproches souvent formulés, à l'encontre de cette recherche de continuité historique, c'est la possibilité d'existence de ruptures qui peuvent remettre en cause le processus [Merlin et al. 1988]. En effet on suppose, par exemple, que les nouvelles techniques apportées par l'époque industrielle et les nouveaux idéaux qui l'ont accompagnée auraient contribué à cette rupture. L'exemple avancé est souvent celui du mouvement moderne en architecture et en urbanisme, et les grands ensembles en sont souvent donnés pour preuve.

Un des positionnements théoriques qui ont indirectement répondu à cette critique est celui de Benedetto Croce<sup>16</sup>. Sa position se résume à ceci : Si une phase historique est perçue comme rupture par rapport à une continuité, cela signifie que les catégories descriptives avec lesquelles on aurait choisi de définir cette continuité sont mal reconnues. Les catégories descriptives, selon Croce, doivent être définies de telle sorte à inclure l'ensemble des phases, y compris celles qui présentent, en apparence, des ruptures [Malfroy 1991].

Il faudra donc, selon ces considérations, pour passer de l'histoire au projet, définir des catégories descriptives relatives à la forme urbaine, qui permettraient d'évaluer la régulation des paramètres microclimatiques dans toutes les phases historiques qui ont conduit la forme urbaine à son état actuel. Le retour à l'histoire ne s'attachera pas seulement à mettre en avant les événements et les formes, sans cesse dépassés avec le passage du temps, mais il s'inscrira dans une reconstitution d'un savoir-faire évolutif latent, qu'il nous faudra actualiser par les projets contemporains.

Ceci nous conduit à formuler les interrogations suivantes : Face à l'apparente discontinuité des transformations urbaines, n'existerait-il pas une certaine continuité dans les interventions morphologiques qui auraient une incidence sur le microclimat urbain ? En d'autres termes, pouvons-nous « réduire » la multitude d'interventions sur la forme urbaine, en des « catégories descriptives », qui traduiraient l'ensemble de ces interventions, tout en nous informant sur l'état des paramètres microclimatiques ou sur leur évolution ? C'est en répondant à ces questionnements que nous pouvons clarifier le contenu des règles d'interventions que l'on s'est proposé de définir dans les objectifs. Cette question générale nous conduit à définir les principaux questionnements de cette recherche. Ces derniers, que nous formulons ci-dessous, s'articulent autour de trois interrogations

---

<sup>16</sup> C'est le philosophe italien Benedetto Croce (1866 —1952), qui était aussi historien et homme politique, qui a le plus influencé Savério Muratori dans sa conception active de l'histoire. Une des idées maîtresses de Croce, c'est qu'il considère qu'il y a contradiction ou discontinuité historique essentiellement parce qu'il y a confusion, parce que la spécificité des catégories descriptives utilisées dans l'analyse n'a pas été assez bien définie. Pour résoudre une contradiction apparente, il faut, selon lui, chercher ce qui rassemble les éléments observés. Les catégories descriptives qui peuvent être multiples, ne sont, selon Croce, que les différents aspects d'un même phénomène que Croce appelle, comme l'avait fait Hegel avant lui : « l'esprit ». C'est ce qui reflète « l'unité de la multiplicité ». « L'esprit » est un phénomène en devenir parce que sans cesse en train de se différencier et sans cesse aussi en train de résorber cette multiplicité en unité. [Malfroy1991]

majeures sur : l'histoire des transformations urbaines ; leurs effets sur l'environnement climatique et le savoir faire qui a conduit à leur formulation.

### 3. PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

Les éléments du contexte de notre recherche que nous venons d'évoquer, nous précisent un peu plus ce qu'il nous faut observer dans notre investigation historique sur la régulation du microclimat urbain. Cela nous conduit aussi à formuler quelques hypothèses. Mais récapitulons d'abord les trois principaux questionnements posés dans ce travail et qui concernent la mise en relation des dimensions « microclimatiques » et « morphologiques » dans une perspective d'intervention :

- Quelles sont les transformations urbaines qui ont produit par le passé des variations des paramètres microclimatiques et selon quelle « intensité » ?
- Selon l'histoire de ces transformations urbaines, quelles sont les règles d'intervention (catégories descriptives) qui contribuent à réguler le microclimat urbain ?
- Quelle forme et quel contenu donner à ces règles pour en faire des instruments de prédiction du microclimat urbain, adaptés au projet urbain ?

Les principales hypothèses de cette recherche traduisent, tour à tour, les trois questionnements précédents. La première concerne la méthode qui aurait permis aux auteurs des transformations urbaines d'anticiper l'effet de celles-ci sur les paramètres microclimatiques. Ces auteurs ne s'appuyaient, en effet, que sur une appréciation des différences apportées aux éléments de la forme urbaine pour argumenter l'efficacité de leur action. C'est donc par les différences morphologiques apportées que l'on jugeait les modifications du microclimat urbain. Dans la deuxième hypothèse nous suggérons que pour définir les règles d'intervention qui contribuent à réguler le microclimat urbain, nous devons observer les transformations comme étant un processus. Cela signifie que ces dernières peuvent faire partie d'une même catégorie tout en admettant des formes différentes à travers le temps. Cela signifierait aussi qu'un projet contemporain, qui s'appuierait sur ce processus continu, pourrait anticiper une régulation du microclimat urbain. Puis, en dernier lieu, nous envisageons une hypothèse d'un ordre plus général. Si les transformations urbaines de nature morphologiques ont permis par le passé de réguler le microclimat urbain, ne pouvons nous pas aujourd'hui par une simple approche morphologique anticiper l'ensemble des phénomènes physiques du microclimat urbain ?

Pour clarifier ces trois principales hypothèses, nous les exposons en ce qui suit, brièvement, une à une.

#### 3.1. Une approche « différentielle » pour anticiper les variations microclimatiques dans les projets urbains

Sans disposer d'outils prédictifs, les auteurs des projets urbains de la période hygiéniste, arrivaient, malgré cela, à modifier, de manière intentionnelle, les paramètres microclimatiques. Pour anticiper les effets microclimatiques de leurs interventions, ces derniers se basaient sur une approche que l'on pourrait qualifier de « différentielle ». En effet, ce qu'ils avaient à évaluer c'était uniquement l'effet de la variation que leur action allait apporter aux éléments de la forme urbaine. Ainsi en élargissant une rue, par exemple, ce qu'il fallait anticiper, d'un point de vue microclimatique, c'était uniquement l'effet de cet élargissement sur le microclimat urbain.

Lorsque les projets urbains avaient pour objet un nouveau fragment urbain, à l'extérieur de la ville par exemple, les concepteurs adoptaient le même modèle de forme urbaine que celui du centre.

Quand il fallait apporter des changements, cela se faisait selon des variations bien définies, sans aller jusqu'à remettre en cause le modèle connu. Ces différences étant définies progressivement une à une au cours du temps, elles permettaient dans une certaine mesure de maîtriser les effets microclimatiques liés à ces changements. Cette appréciation des différences est plus délicate dans le cas d'une création de nouvelles formes urbaines, comme cela a été le cas par exemple des grands ensembles. Car les différences avec ce qui était connu sont trop nombreuses pour être maîtrisées dans leur totalité. Dès que les différences dépassaient un seul élément de la forme urbaine, cela induit des interactions complexes, qui sont difficilement maîtrisables si on ne fait pas usage des modèles de simulation.

Les interventions qui n'apportaient que des « différences mineures » par rapport au modèle connu de la forme urbaine (le modèle de forme urbaine n'était pas remis en cause) permettaient ainsi de maîtriser les effets des transformations urbaines. Le projet urbain se définissait donc par rapport à l'existant dont les effets étaient plus ou moins connus, et la nouveauté consistait à apporter des variations « maîtrisables » de ce qui était déjà connu. Cette conception des projets urbains, fut, comme on le sait, perturbée avec l'avènement du mouvement moderne. Avec le culte de la table rase, la nouveauté se mesurait désormais au décalage des projets par rapport à ce modèle proprement dit. On s'est attaqué donc à la structure même du modèle. Les grands ensembles sont souvent montrés du doigt pour illustrer ce décalage par rapport au modèle, dit « classique », de la forme urbaine. Cela, on le sait aujourd'hui, a provoqué des effets souvent non prévus par les auteurs de l'époque. Il n'est pas de notre propos dans cette recherche de revenir ni sur les causes ni sur les effets de cette rupture. Nous voulons surtout retenir que l'une des raisons avancées pour justifier ce changement de modèle était justement celle relative à la salubrité et l'hygiène des espaces de la ville et des habitations. On pourrait constater ainsi, face à l'apparente discontinuité des interventions, qu'il y a tout de même une continuité des intentions salubristes qui ont généré les interventions « modernes ».

Une des hypothèses que nous émettons, et on l'a déjà vu lorsque l'on a évoqué la question des catégories descriptives atemporelles chères à Benedetto Croce, est que la période dite moderne perpétuerait aussi une approche « différentielle » de la régulation du microclimat urbain par le cadre bâti. Même si le modèle de la ville moderne paraît en rupture avec celui de la ville classique, il reste que les changements apportés pourraient être comparables à ceux qu'a subit la ville ancienne. La raison principale qui nous conduit à effectuer ce rapprochement est la convergence des arguments que les « modernes » avançaient pour justifier cette nouveauté (en dehors des questions sociales et techniques) et les arguments « salubristes » qui ont conduit aux transformations de la ville ancienne. Il était toujours question, en effet, de faire rentrer plus d'air, plus de soleil, et plus de lumière dans les espaces de la ville et dans les habitations. Cela nous permet de supposer que, au vu de ces intentions communes, les transformations modernes et celles de la ville ancienne pouvaient relever des mêmes niveaux d'intervention. Les architectes modernes adoptèrent ainsi, tout autant que les auteurs des projets d'embellissements, une approche différentielle. Le Corbusier ne mettait-il pas en avant les différences entre les éléments de l'architecture et la ville classique avec les éléments de son architecture moderne pour justifier cette dernière ? [Colquhoun 1972].

En résumé, on suppose, qu'il existe des niveaux d'intervention assez proches à travers le temps que l'on peut réduire à des catégories descriptives et dont la qualité se mesurerait à la différence qu'ils apportent aux paramètres microclimatiques. Cette approche différentielle, si elle correspond à celle adoptée dans toutes les phases de transformations urbaines, serait tout aussi valable pour les projets contemporains. En confirmant cette hypothèse par notre recherche, la question qui se poserait aux projets contemporains serait : quelle modification apporter à ces catégories descriptives, que l'on aurait identifiées, pour réguler l'environnement climatique ?.

### 3.2. Des transformations selon un « processus – indicateur » mesurable

Les niveaux d'intervention sur le cadre bâti, s'ils présentent des récurrences, cela ne signifie pas qu'ils se réalisaient de manière identique. Pour décrire à la fois ce qui rassemble et ce qui différencie les interventions diachroniques, on suppose qu'elles répondent à un processus. Ceci signifie qu'il existe des interventions qui pourraient être différentes mais qui tendraient vers une même modification du microclimat urbain. Par exemple, selon les travaux de climatologie urbaine, le processus de densification ou de dé-densification d'un fragment urbain va contribuer, dans les deux cas, à modifier l'îlot de chaleur urbain. La densité est de ce fait considérée comme un paramètre morphologique important qui permet de caractériser l'îlot de chaleur urbain. Pour que la densité devienne indicateur pour les projets de transformation, il suffit de lui trouver une formulation et une mesure qui permettent de caractériser l'îlot de chaleur urbain.

La modification d'un paramètre microclimatique serait donc tributaire du processus de transformation. Si on revenait au processus de densification on peut y déceler une réalisation variable dans le temps. On pourrait ainsi avoir une succession de phases de densification et de dé-densification qui n'ont pas la même intensité et qui s'opèrent selon des périodes de temps assez différentes. Une densification peut se faire en une dizaine d'années, alors qu'une autre, même équivalente, exigeraient plusieurs décennies.

On peut regrouper aussi des variations successives, parfois opposées, sous une même variation globale que l'on pourrait observer sur une période assez longue. Depuis la période hygiéniste, densification et dé-densification se sont ainsi succédées, mais en remontant dans le temps on peut observer une tendance globale continue qui tend vers une dé-densification des tissus urbains. Le processus permettrait de traduire des évolutions à court et à long terme. Le processus serait donc par définition « intégrateur », puisqu'il permet de traduire même les interventions qui peuvent apparaître opposées selon une observation locale. Comme cela peut être le cas par exemple entre la ville classique et la ville moderne qui sont souvent présentées comme opposées, mais qui, selon une observation de longue durée, pourraient être constituées par des interventions continues aux effets compables.

Si l'on arrive à définir un processus qui tend vers une même modification microclimatique, il suffirait d'inscrire le projet urbain dans ce processus pour en connaître les effets microclimatiques possibles. Ces considérations nous font formuler l'hypothèse suivante, en complément de la précédente : les catégories descriptives, qui permettent de traduire une modification du microclimat urbain à partir d'une connaissance des interventions diachroniques sur les éléments de la forme urbaine, répondraient à un processus de transformation continu qui peut inclure plusieurs variations. Et ce processus, s'il permet de mettre en relation transformations urbaines et paramètres microclimatiques, aurait par cette définition, un rôle d'indicateur microclimatique adaptable au projet urbain, que nous considérons comme un projet de transformation.

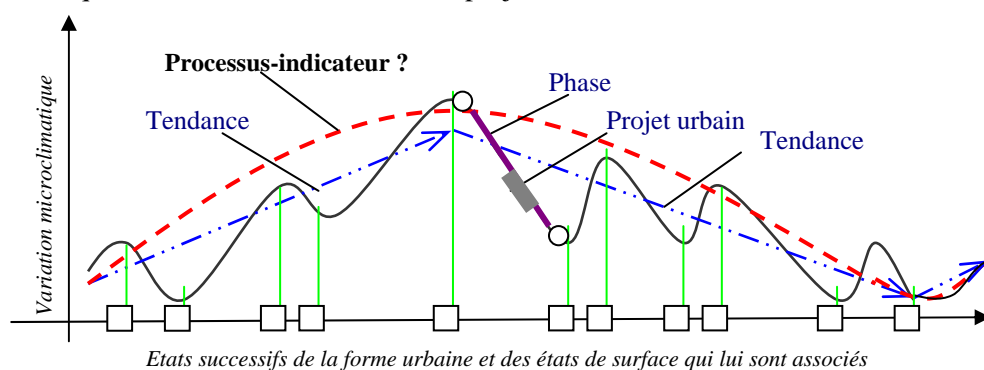


Figure i : Schéma représentant la mise en relation des transformations urbaines et des variations microclimatiques

Un même « processus – indicateur » pourrait ainsi caractériser (fig. i) :

- Des tendances globales : ce sont des modifications continues du microclimat urbain s'observant sur une durée importante.
- Des phases : ce sont des interventions localisées à un moment donné de l'histoire. Tout en étant inscrites dans une tendance, ces phases peuvent induire des variations différentes (positives ou négatives et d'importances variées) des paramètres microclimatiques.

Un projet urbain : celui-ci serait une intervention localisée dans l'espace et dans le temps. Le projet urbain est ainsi inscrit dans une phase (soit constituer à lui seul une phase) et dans une tendance globale.

Une caractérisation des phénomènes physiques nous paraît plus adaptée dans une situation de projet qu'une « prédiction ». La quantification exacte (au sens physique) ne nous renseignera pas sur la perception des phénomènes physiques, car cela dépend des facteurs psychologiques, sociaux, et culturels multiples. Pour faire le lien entre la quantification d'un phénomène et sa qualité, R. Thom évoque « une quantité approchée » [Thom et al. 1993]. La quantification différentielle des éléments du cadre bâti nous permettra, in fine, d'approcher des phénomènes microclimatiques et environnementaux. C'est cette « quantité approchée » des paramètres physiques qui serait opératoire pour la constitution des projets et au delà, potentiellement « perçue » par les usagers des espaces de la ville.

### **3.3. Vers une réduction morphologique de l'environnement climatique**

Le « processus-indicateur », s'il traduit une régulation des paramètres microclimatiques à partir d'informations relatives aux interventions de nature exclusivement morphologiques, nous conduirait vers la formulation d'une hypothèse plus générale. Celle-ci permettrait la prise en compte de l'ensemble des paramètres microclimatiques, voire environnementaux, dans le projet urbain.

Si l'on admet qu'une connaissance des éléments de la forme urbaine permet d'approcher l'état des paramètres physiques du climat urbain, cela suppose la possibilité d'une réduction morphologique de ces derniers en fonction des données climatiques d'un site. La réduction peut se résumer à la possibilité d'anticipation de la variation de l'environnement climatique à partir d'une connaissance des variations de la forme urbaine. La confirmation de cette hypothèse pourrait conduire à élargir le propos à une approche multicritère qui engloberait l'ensemble des phénomènes environnementaux, comme la pollution sonore et la pollution atmosphérique, mais cela ne fera pas l'objet de notre travail, il n'en constituera qu'une perspective. La réduction morphologique peut ainsi constituer une approche multicritère pouvant offrir au concepteur du projet urbain les informations dont il aura besoin sur l'environnement climatique, en partant d'une connaissance du cadre bâti qu'il conçoit.

Les indicateurs que l'on définira à partir de la connaissance du processus de transformation devraient avoir une double tâche : être facilement déductibles à partir des informations liées principalement au cadre bâti et permettre une évaluation des paramètres physiques du climat urbain.

## **4. METHODE**

Cherchant à mettre en correspondance des transformations urbaines et la modification de paramètres microclimatiques, ce travail devra prendre appui à la fois sur des connaissances en matière d'histoire de la ville et dans le domaine de la physique du microclimat urbain. Les deux

connaissances nous offrent en effet des approches complémentaires pour répondre à notre questionnement.

#### 4.1. Définition des transformations urbaines

Pour définir les transformations urbaines qui ont un potentiel notable dans la modification des paramètres microclimatiques nous nous appuyons sur deux références. La première est établie à partir des arguments, intentionnellement salubristes, qui ont été formulés par les auteurs des transformations urbaines. Alors que la deuxième référence s'appuie sur les travaux de climatologie urbaine qui ont mis au jour les éléments de la forme urbaine qui ont des effets potentiels sur la modification du microclimat urbain.

##### - **Les transformations modifiant intentionnellement le microclimat urbain :** *argumentaire salubriste et pratique opérationnelle d'aménagement*

En s'interrogeant sur l'ajustement climatique au siècle des Lumières, J.P.Péneau observe que les argumentaires liés aux questions salubristes se retrouvent généralement dans les pratiques de l'élite professionnelle, constituée d'architectes et ingénieurs du Roi. Par la nature opérationnelle de leur travail, ces derniers, pour justifier leurs interventions, formulaient des arguments qui étaient parfois salubristes. C'est donc dans les discours et les intentions formulées par ces derniers que l'on peut trouver une mise en relation des transformations et des effets attendus sur le microclimat urbain (dans ses composantes salubristes).

En effectuant une lecture de cet argumentaire salubriste et des transformations urbaines ou projets qui lui sont associés, on arrivera à constituer une première énumération des transformations urbaines qui modifient « intentionnellement » le microclimat urbain.

La ville devient en effet, au fil du temps, plus artificielle, maîtrisant le cycle de l'eau, pavant les rues, asséchant les fossés, évacuant les eaux de pluies autrefois ruisselantes en surface par des avaloires, élargissant les rues et traçant des espaces urbains aux formes géométriques. Ce mouvement caractéristique de la deuxième moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle a parfois été désigné par le terme d'aérisme [Péneau 1998].

Nous partons donc dans un premier temps des transformations urbaines dont les intentions s'inscrivaient dans une recherche de salubrité. Ces intentions nous sont transmises, soit par des travaux d'historiens, comme A.Guillaume, D. Corbin, J.L. Harouel... , qui ont étudié plusieurs villes françaises, soit par les archives écrites, dans lesquelles on retrouve les arguments des auteurs des transformations urbaines.

##### - **Les transformations non-intentionnelles du microclimat urbain :** *selon les connaissances contemporaines de la climatologie urbaine*

Plusieurs travaux, développés depuis quelques années dans le milieu de la recherche en climatologie urbaine, mettent en avant les éléments de la forme urbaine dont la modification influe sur les paramètres microclimatiques. Ces éléments étant intimement liés aux connaissances spécialisées ne sont généralement pas développés par les historiens et encore moins dans l'argumentaire des transformations urbaines.

Un état de l'art de ces travaux permet donc de désigner les transformations urbaines d'une ville qui pourraient influencer sur le microclimat urbain. Ce deuxième champ de connaissance, après celui lié à l'histoire, nous permet donc de compléter la liste des transformations urbaines à analyser du point de vue de leurs effets sur le microclimat urbain. Ce sont, dans la plupart des cas, des transformations qui relèvent de préoccupations liées à des questions d'usage et de sécurité ou en

relation avec les progrès techniques et où la modification du microclimat urbain n'est pas intentionnelle.

#### 4.2. Application à l'histoire d'une ville

*« ...Aussi n'accorderons-nous jamais assez d'importance en recherche urbaine au travail monographique, à la connaissance des différents faits urbains. En ne les prenant pas en compte – y compris dans leurs aspects les plus individuels, particuliers, irréguliers, qui sont justement les plus intéressants- nous aboutirions à construire des théories artificielles et inutiles... ». [ROSSI 1966, p. 8]*

Nous proposons d'observer en effet les transformations urbaines d'une ville en particulier. Cela permet de définir les transformations urbaines telles qu'elles se réalisent et non à partir de modèles connus de formes urbaines. Ces derniers sont le fruit de simplifications parfois trop schématiques et non nécessairement concordantes avec nos préoccupations.

En s'attachant aux seules transformations réalisées, nous n'observons que les projets urbains qui ont créé par le passé un consensus à propos des multiples données de leurs contextes respectifs. En effet si un élargissement de rue se réalise pour aérer les rues, cela suppose que sa réalisation répond à toutes les données du contexte de l'époque. Ces transformations, en s'opérant selon des modalités précises, et puisqu'elles sont réalisées, répondent à un savoir-faire intégrateur et non déterministe.

S'appuyer sur une forme urbaine réalisée, comme objet de recherche, permettra aussi de vérifier la pertinence des modèles physiques de la climatologie urbaine dans leur application à des cas existants. Ces modèles, construits sur la base de paramètres d'entrées liés à la forme urbaine, sont le plus souvent des cas assez simplificateurs à cause de la complexité des phénomènes physiques modélisés. Etant « universelles », ces simplifications risquent de présenter des décalages importants avec la réalité de la forme urbaine. On peut citer, par exemple, le cas du concept de « canyon urbain » (ou « rue canyon »), que l'ensemble des travaux de climatologie urbaine adoptent pour interpréter la troisième dimension (le rapport hauteur/largeur) des espaces construits. Une question légitime se pose en effet lorsque l'on veut appliquer ce concept : est-ce que les fragments urbains sont tous assimilables à des rues canyons ? C'est entre autres, à ce genre de questionnement, qu'une évaluation d'une forme urbaine construite peut conduire. Une analyse située permet donc de préciser de quoi est faite une forme urbaine, comment elle évolue et qu'est ce qui peut changer dans cette dernière.

Une approche « monographique » du problème nous paraît aussi plus pertinente que celle qui consiste à choisir des exemples de formes urbaines « artificielles » (non réalisées) [Z.E.D. 1995]. La réalité urbaine fait en effet que l'ensemble des modèles de formes urbaines (organique, en damier ou moderne...) coexistent dans un même territoire.

Les indicateurs, qui seront aussi une simplification de la forme urbaine, devront prendre en compte la complexité de la forme urbaine. Ils traduiront ainsi une double simplification : la première liée à la complexité des phénomènes physiques et la deuxième à la complexité de la forme urbaine.

#### 4.3. Des modélisations numériques pour mesurer la variation des paramètres microclimatiques

Le spécialiste de la physique des échanges sol-atmosphère tente d'interpréter les variations diachroniques par les modèles physiques qu'il a construits. Ces derniers prennent en compte en effet, dans leurs formulations, le rôle occupé par les éléments de la forme urbaine dans la régulation des paramètres du microclimat urbain. Ces formulations permettent de quantifier l'évolution des

paramètres de l'environnement climatique sous l'impulsion des transformations urbaines, dans la limite des performances des modèles en question.

Ce qui sera attendu des modélisations, c'est la connaissance de l'intensité du changement dû aux modifications morphologiques, en considérant des données climatiques constantes. Le choix du modèle dépendra de sa prise en compte des éléments de la forme urbaine concernés par les transformations, de la simplicité des données d'entrées morphologiques nécessaires à ce modèle, de l'échelle spatiale à laquelle il s'applique, et enfin de l'information contenue dans les résultats de sorties du modèle. Ces derniers devront regrouper le plus d'informations possibles sur les paramètres microclimatiques.

#### - **Formulation des limites de modèles**

La méthode qui consiste à choisir parmi une multitude de phénomènes un certain nombre d'entre eux, implique déjà un a priori, puisqu'on utilisera un modèle qui définit déjà les causes et les effets (les entrées et les sorties du modèle de simulation).

Les modèles numériques, étant par définition réducteurs de la complexité des phénomènes physiques, la précaution nécessaire au bon usage de ces modèles est de savoir jusqu'à quel limite ces réductions sont-elles acceptables ? En effet la morphologie urbaine a cette spécificité d'agréger plusieurs échelles spatiales en une multitude de formes, sans oublier qu'il existe plusieurs échelles de variation du microclimat urbain, ce qui ne simplifie pas la modélisation. Le modèle a ainsi cet avantage de réduire la complexité de la forme urbaine et des états de surface et de simplifier donc la lecture, mais comme on le verra, une évaluation critique des modèles physiques et de leurs limites d'application est indispensable pour expliciter les résultats.

#### - **Reconstitution des données d'entrée du modèle**

La réduction de la réalité construite imposée par l'utilisation des modèles physiques se traduit de façon directe dans les données d'entrée nécessaires aux modèles. En effet nous ne ferons pas une reconstitution de tous les détails de la ville, mais uniquement un certain nombre de paramètres morphologiques.

Il ne s'agit pas dans cette recherche de trouver des paramètres physiques nouveaux pouvant être influencés par les transformations urbaines, ni de définir un modèle physique traduisant l'ensemble des transformations urbaines et quantifiant leur effet (c'est le rôle des spécialistes de la climatologie urbaine et des physiciens de l'atmosphère). Il est plutôt question d'effectuer une évaluation de ces transformations par l'intermédiaire de connaissances dont on dispose aujourd'hui en climatologie urbaine. On se doit de ne prendre en compte que les paramètres reconnus par les modèles physiques existants. C'est ainsi que la reconstitution des états anciens de la ville consistera à définir les données d'entrées du modèle physique utilisé, et ce pour chaque état de la ville que l'on voudra analyser. Pour cela, nous nous appuyons sur les textes, les plans anciens et les iconographies répertoriés dans les archives, qui pourraient nous renseigner sur les états anciens de la ville.

Le choix du modèle numérique est par contre conditionné par l'objectif, par l'échelle d'analyse et par le fait qu'il doit être d'actualité. C'est à dire, contenir les connaissances actuelles en climatologie urbaine qui traduisent les mécanismes de régulation des paramètres microclimatiques par la forme urbaine et les états de surface de la ville. Le modèle, puisqu'on part de l'hypothèse qu'il est validé<sup>17</sup>, est supposé suffisant pour évaluer les changements successifs du microclimat

<sup>17</sup> Cela nous renvoi de nouveau à la position « fragile » et délicate d'une recherche interdisciplinaire. Il ne s'agit pas de remettre en cause les conclusions des historiens ni ceux des spécialistes de la climatologie urbaine, mais on suppose, puisque publiées, que ces conclusions peuvent être utilisées sans vérification de leur validité.



urbain. La seule condition pour que cette évaluation soit possible, c'est de pouvoir traduire les transformations que l'on cherche à analyser dans les termes des données d'entrée du modèle.

#### - Le problème de disponibilité des sources historiques

La nature de la problématique posée, dans la mesure où elle appelle à la fois des connaissances historiques et physiques ainsi que la mise en œuvre d'éléments sur la production du cadre bâti, pourrait exiger des études approfondies dans chacun de ces domaines et conduire à dépasser le cadre temporel imparti au présent travail. Pour ne pas se détourner de cet objectif interdisciplinaire on a utilisé, le plus souvent, des sources historiques de « deuxième main ». En effet, lorsque les informations sur le contexte historique des transformations urbaines ont déjà été recueillies par des historiens, on s'est contenté de les utiliser sans vérification. Des investigations dans les textes d'archives viennent soit compléter ces travaux soit éclairer des transformations peu traitées dans l'historiographie des villes (comme c'est le cas du pavage des rues de Nantes par exemple).

Lorsque un manque des documents historiques, permettant de reconstituer un état ancien de la ville, est constaté nous nous appuyons sur des travaux de morphologie urbaine qui ont tenté de définir les différentes phases des transformations urbaines dans une ville. Les plus reconnus à ce sujet, notamment pour leur rigueur méthodologique, sont ceux menés dans des écoles d'architecture italiennes. Ces travaux, qui ont voulu modéliser les différentes étapes des transformations urbaines des villes européennes<sup>18</sup>, peuvent servir de référence pour pallier le manque de sources historiques. Ainsi pour combler des lacunes sur des phases particulières comme la densification des îlots, nous avons dû émettre des hypothèses selon le modèle morphologique élaboré par Gianfranco Caniggia [Caniggia et al. 1986]. Ce dernier a développé des scénarios, à partir de la lecture des plans anciens, qui permettent de reconstituer les phases de transformation des différents états de la ville en s'appuyant sur des tracés du bâti.

#### 4.4. Mise en forme du processus-indicateur selon les connaissances contemporaines

Pour qu'un indicateur devienne opérationnel pour le projet urbain, il nous faut expliciter son contenu, donner un « instrument » pour l'évaluer à partir du cadre bâti et faire en sorte que les résultats de l'instrumentation soient explicites pour le concepteur.

L'outil en question qui permet de traduire le processus-indicateur sur une forme urbaine sera appliqué à des fragments urbains complexes et d'échelles spatiales différentes. Nous rappelons qu'un projet urbain peut concerner des échelles spatiales assez variées, allant d'un simple aménagement d'une rue à une restructuration ou à la création d'un fragment urbain. L'opérationnalité de l'indicateur nécessitera donc la maîtrise de la question de l'échelle. L'évaluation devra prendre en compte la dialectique du rapport entre les parties et le tout. En effet, il existe des transformations locales qui peuvent influencer sur un ensemble urbain. Les indicateurs qui se calculent selon une valeur numérique moyenne ne permettent pas de mettre en valeur cette variation « locale ». Il nous faudra ainsi définir un outil qui traduira à la fois « un effet » global à une échelle spatiale donnée, mais aussi qui mettra en évidence les variations spatiales des paramètres physiques au sein de ce fragment étudié et permettre ainsi la prise en compte de la complexité de la forme urbaine.

---

<sup>18</sup> Le modèle morphologique a été principalement défini par l'architecte et enseignant italien Gianfranco Caniggia (1933-1987). Construit à partir d'une analyse de plusieurs villes italiennes, ce modèle est, selon son auteur, potentiellement applicable à toutes les villes appartenant à une même aire culturelle, dont les villes françaises et quelques villes européennes. [Malfroy et Caniggia ;1986]

Plus concrètement, l'outil que nous voulons définir s'inscrit dans une démarche de caractérisation des interactions entre les formes construites et les paramètres physiques du climat urbain à différentes échelles spatiales.

Nous allons maintenant donner des précisions sur l'objet ayant servi de support à cette recherche.

## **5. OBJET SPECIFIQUE D'ETUDE**

### **5.1. Le centre ancien de Nantes**

Notre investigation s'intéresse, a priori, à tout ce qui contribue à modifier l'état d'un site construit ou à transformer les formes et/ou les matériaux de surface des états antérieurs. La ville de Nantes nous paraît « exemplaire » pour illustrer les multiples transformations que peut subir un tissu urbain. En plus d'une raison d'accessibilité aux sources historiques disponibles dans les archives de la ville, le choix du centre ancien de Nantes présente deux avantages non négligeables pour en faire notre objet d'étude :

- La variété des transformations urbaines : Ces dernières concernent aussi bien la forme bâtie, les matériaux de construction et de revêtement du sol, que les surfaces d'eau et les surfaces naturelles ou végétales. On peut citer, parmi ces transformations, le comblement des cours d'eau et la minéralisation progressive du centre ancien ainsi que des interventions qui concernent parfois des aspects particuliers du cadre bâti, comme l'alignement et l'élargissement des rues.
- La taille relativement modeste de son centre ancien : Le territoire analysé, tout en étant de taille relativement modeste, a subi plusieurs transformations. Le choix d'un territoire peu étendu permet ainsi de réduire la quantité d'information historique qu'il nous faut reconstituer dans le cadre d'une modélisation numérique. L'application d'un modèle climatologique suppose en effet la reconstitution des données d'entrées de ce dernier pour chaque transformation étudiée. Cela nécessite la lecture des plans, des images et des textes anciens et leur interprétation dans les termes du modèle physique. La liste de toutes les transformations des espaces construits peut atteindre une importance considérable qui dépasserait le cadre de cette recherche si on ne limitait pas l'échelle spatiale des transformations que nous devons analyser. Cela peut aller du rajout d'une maison dans une rue à la destruction d'un balcon dans une paroi. On ne peut donc pas citer les transformations de chaque bâtiment. On ne s'intéresse qu'aux interventions qui concernent l'ensemble des fragments urbains du centre ancien. Par exemple les alignements verticaux des parois ne seront analysés que parce qu'ils s'appliquent à toute l'étendue du centre ancien.

### **5.2. Réglementations urbaines et interventions à l'échelle du centre ancien entre 1680 et 1970.**

Nous n'avions, en entamant cette recherche, aucun a priori sur la période temporelle de notre investigation. Les limites historiques définies correspondent à une volonté d'intégrer dans l'analyse diachronique deux transformations morphologiques importantes. La première, relative au pavage des rues, est mise en avant surtout par les historiens de la ville. Ces derniers nous transmettent en effet une « image » de l'atmosphère urbaine presque à l'opposée de celle d'aujourd'hui, et dont le processus de modification aurait commencé par le pavage. La deuxième limite correspond à la date de création du secteur sauvegardé à Nantes par un arrêté ministériel en 1972. Ces secteurs sauvegardés, définis sous l'impulsion du ministre de la culture de l'époque A. Malraux, vont officialiser l'arrêt des transformations urbaines du centre ancien. Cette date va correspondre, à quelques années près, avec la crise énergétique et la conscience de la nécessité d'introduire des

isolants thermiques dans les parois des édifices. Cette période qui s'étale sur presque trois siècles peut paraître, à première vue, trop longue. Mais cette période a été décomposée en phases. La définition de ces phases, comme on le verra, dépendra des faits que l'on veut analyser et de la disponibilité des sources historiques. On obtient ainsi en définitif, une réduction de la durée historique à quelques « états représentatifs » des transformations urbaines qui, par hypothèse, peuvent modifier le microclimat urbain.

Les transformations urbaines à l'échelle du centre ancien de Nantes ont concerné, au cours de l'histoire de la ville, deux échelles spatiales différentes :

**- Des transformations généralisées, générées par les règlements urbains**

En s'appliquant à un territoire bien défini, les règlements urbains contribuent à transformer tous les éléments de la forme urbaine de manière homogène. Toutes les rues, places et cours, etc., si elles sont concernées par le règlement, seront modifiées pour atteindre la même norme. Comme c'est le cas du pavage des rues, des alignements, du changement des matériaux de construction et de la limitation des densités bâties.

La réglementation, qui concerne les éléments de la forme urbaine, a pour objet, le plus souvent, une échelle spatiale assez importante allant d'un fragment urbain à l'ensemble de la ville. Elle se présente à Nantes, depuis le quinzième siècle, selon trois phases :

- Une réglementation par « ordonnances successives » : où il était question de quelques éléments seulement de la forme urbaine, comme l'interdiction des saillies.
- Une réglementation « générale » : que ce soit sous la forme des règlements de voirie ou des règlements sanitaires (depuis la loi du 15 février 1902), les règlements généraux contribuent à la réalisation d'un modèle de forme urbaine où matériaux, gabarits, dimensionnement des rues, et densités bâties sont clairement définis.
- Les règlements de la ville « moderne » : leur grande flexibilité (permettant différentes interprétations) a permis de réaliser une forme urbaine contrastant avec la ville ancienne.

**- Des transformations ponctuelles, générées par les projets urbains**

Ce sont des transformations appliquées au centre ancien de la ville de Nantes qui ne sont pas le résultat d'un règlement mais d'un projet situé dans le temps et l'espace. Ces transformations peuvent dépendre soit d'une décision des autorités publiques faisant suite à un besoin précis, comme ce fut le cas par exemple des comblements des fossés et des cours d'eau, ou résulter d'un projet « d'embellissement » élaboré par un architecte, comme par exemple la création des percées de rues nouvelles.

Aux transformations historiques de nature strictement morphologique, nous avons rajouté des modifications potentielles du microclimat urbain liées à, ce que l'on appelle en climatologie urbaine, des aspects anthropogéniques. Ces derniers sont dus à l'évolution des techniques, comme l'introduction du chauffage dans les maisons, qui deviendra une composante permanente des édifices ou encore la substitution du réseau d'évacuation des eaux en surface par un réseau enterré. Ce sont là des modifications majeures dans la production anthropogénique qui participent aux bilans hydrique et thermique des espaces urbains, et qui, une fois transformées, vont devenir des composantes permanentes de la forme urbaine.

### 5.3. Echelle climatique entre « locale » et « micro »

T.R.Oke [Oke 1987], définit quatre échelles spatiales caractéristiques des phénomènes climatiques : échelle « micro » (entre  $10^{-2}$  à  $10^4$  m) ; échelle « locale » (entre  $10^2$  à  $10^4$  m) ; échelle « Meso » (entre  $10^4$  à  $2 \times 10^5$  m) ; et échelle « macro » (entre  $10^5$  à  $10^8$  m). Les paramètres physiques auxquels on s'intéresse dans cette recherche sont ceux qui dépendent de l'échelle du centre ancien. C'est à dire, selon la classification de T.R.OKE, ceux relevant de l'échelle « locale ». Mais, la modification des paramètres climatiques à l'échelle locale ne se réalise, dans la plupart des cas, que par des interventions à l'échelle « micro » qui ne sont pas toujours homogènes.

Pour simplifier, on dira que l'on s'intéresse à la valeur moyenne des paramètres physiques évalués dans les espaces urbains à l'échelle du centre ancien de Nantes, tout en observant ce qui réalise cette modification locale, c'est à dire la multiplicité d'interventions, pas forcément identiques, à l'échelle « micro ». Par contre on ne prendra en compte que les transformations urbaines qui contribuent (a priori) à modifier les paramètres physiques à l'échelle du centre ancien, et non à des transformations ponctuelles, comme celles qui n'ont lieu que dans une rue par exemple.

Les cibles spatiales de l'analyse microclimatique sont de deux niveaux : les espaces urbains et l'interface entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine. On s'intéressera ainsi à la variation de ces deux éléments dans le temps.

## SYNTHESE

Nous avons exposé dans cette première partie la complexité inhérente à une recherche située au croisement de trois niveaux de connaissances. Nous partons d'un questionnement de l'histoire des transformations urbaines portant sur les intentions et les actions ayant contribué à modifier le microclimat urbain. Nous utilisons ensuite les connaissances et les modèles de la climatologie urbaine pour quantifier l'effet de ces transformations. Enfin nous cherchons à définir le processus morphologique qui relie les différentes transformations ayant eu un effet notable sur le microclimat. Ce processus que l'on suppose d'actualité, voire « atemporel », sera ainsi potentiellement applicable aux projets contemporains. Pour cela nous proposerons une formulation, qui fera de ce « processus-indicateur » un outil adapté aux préoccupations actuelles des projets urbains.

Pour répondre à ces questionnements et à ces objectifs, le présent rapport est structuré selon le découpage suivant :

- En introduction du premier chapitre, nous évoquerons quelques aspects liés à la perception de l'atmosphère urbaine avant l'avènement de la conscience hygiéniste, tel que cela a été traité dans des travaux d'historiens comme A. Guillaume. Suivra un exposé des principales transformations urbaines répondant aux préoccupations salubristes qui s'étendra jusqu'à quelques directives de l'urbanisme durable en passant par les idées fondatrices de l'urbanisme moderne. Pour clarifier le contexte et les arguments liés à ces transformations nous évoquons l'exemple de quelques villes en France ainsi que les écrits de quelques auteurs déterminants dans l'histoire de l'urbanisme. Nous insisterons à travers ce large panorama historique sur la mise en relation des préoccupations microclimatiques et des interventions sur les espaces construits. Ce qui nous conduira, et ce malgré la discontinuité apparente des faits, à constater quelques récurrences.
- Nous adoptons dans le deuxième chapitre une approche physique. Nous interrogeons ainsi la climatologie urbaine sur les méthodes d'analyse de l'interaction de l'environnement climatique et des espaces construits. Nous faisons d'abord référence à quelques travaux sur le microclimat urbain ayant eu pour objet de mesurer les effets microclimatiques liés à des transformations assez proches de celles présentées dans le premier chapitre. Par la suite il sera question des modèles numériques

qui permettent de reconstituer les paramètres microclimatiques, énergétiques et hydriques, sur la base d'une connaissance des éléments de la forme urbaine. De cette présentation, on définira le cahier des charges sur la base duquel nous avons choisi le modèle climatologique que nous utiliserons pour les simulations.

- Dans le troisième chapitre, il est question de l'évaluation proprement dite des variations microclimatiques appliquées aux transformations urbaines du centre ancien de la ville de Nantes. On débutera ainsi par l'énumération des transformations urbaines visant, intentionnellement ou non, la modification du microclimat. Parmi celles ci, le comblement des cours d'eau, le changement de matériaux de construction ou encore l'enterrement des réseaux hydriques. Pour analyser ces transformations et effectuer des simulations numériques nous allons en un premier temps rappeler les sources historiques sur lesquelles nous nous sommes appuyées pour définir les états représentatifs du centre ancien de Nantes. Nous reprenons ainsi les textes anciens que les auteurs des principales transformations à Nantes nous ont laissés. Ces récits nous les trouvons soit dans les archives municipales de la ville de Nantes, soit (ce qui est assez rare) dans des ouvrages ayant traité des évolutions de la ville de Nantes. Ensuite nous passons à la reconstitution des états anciens de centre de Nantes. Pour cela nous définissons les valeurs numériques qui traduisent les états anciens dans les termes des données d'entrée du modèle de simulation. Cette reconstitution consiste en une interprétation des différentes sources anciennes (plans, images, et textes) en des données numériques. Pour passer de la représentation des sources anciennes aux valeurs numériques du modèle une phase d'interprétation a été nécessaire. Quand il existe des états anciens sur lesquels nous n'avons pas d'information, nous émettrons des hypothèses, en nous appuyant, comme on l'a évoqué, sur des scénarios définis dans des travaux de morphologie urbaine. Le dernier propos de cette partie sera d'interpréter et de discuter les résultats des simulations.

- Pour conclure cette recherche nous proposerons, dans le quatrième et dernier chapitre, un indicateur qui permet une caractérisation microclimatique à partir d'informations exclusivement liées à la forme urbaine. Pour cela nous reviendrons d'abord sur les écarts existant entre les modèles de la climatologie urbaine et la complexité des espaces construits. Ensuite, nous discuterons de quelques travaux ayant définis des indicateurs assez proches de nos préoccupations. Ces derniers seront comparés du point de vue de leur opérationnalité. Puis, nous définirons cet un indicateur qui s'inscrit dans la continuité des transformations urbaines qui ont modifié le microclimat. L'indicateur permettra ainsi de caractériser de manière simple et explicite la qualité de l'environnement climatique d'un ensemble bâti. Nous entamerons ainsi une application à trois échelles spatiales différentes ( un point quelconque de l'espace urbain et des interfaces bâtis, échelle d'un espace urbain et échelle d'un ensemble urbain) et une première validation, en comparant les résultats obtenus par l'indicateur à ceux des simulations (de l'ensoleillement, de la vue du ciel et du vent).

L'envergure de ce travail laissera certainement quelques points d'ombre à éclaircir. La nature exploratoire, et obstinément opératoire, de cette recherche laisse en effet sans réponses quelques questions et en ouvre un certain nombre. Après l'analyse et la discussion des résultats de cette recherche, nous situerons les limites et les avancées que notre travail aura permis. On évoquera enfin les ouvertures que nous envisageons à court et à long terme pour cette thèse dans la conclusion finale.

## Chapitre 1

# FORME URBAINE ET MICROCLIMAT : ANALYSE DES NIVEAUX D'INTERVENTION SUR LA VILLE

---

L'intention de modifier la qualité du microclimat urbain n'est pas propre à notre époque. On se propose, dans ce chapitre, de mettre au jour les savoir-faire qui ont conduit lors de certaines périodes de l'histoire des villes à intervenir sur des éléments spécifiques de la forme urbaine en vue de réguler le microclimat urbain<sup>1</sup>.

L'expression microclimat urbain est un terme contemporain à connotation scientifique découlant de la climatologie urbaine. Il signifie l'application de l'objet de la climatologie urbaine et des connaissances qui lui sont associées à une échelle spatiale réduite. L'utilisation de cette notion récente pour qualifier les propriétés physiques de l'atmosphère urbaine (celle des espaces urbains) des époques anciennes de la ville peut donc paraître anachronique. Mais nous admettons cet anachronisme pour deux raisons : tout d'abord le climat est une donnée permanente de toute action d'édification humaine, ensuite parce que depuis le siècle des Lumières la conscience salubriste a eu pour intention explicite une volonté de contrôle des propriétés physiques de l'atmosphère malsaine des villes héritée du Moyen Âge. Cette volonté même si elle s'affirmait par une volonté d'éliminer les miasmes des espaces de la ville, elle se concrétisait surtout par des transformations dont l'objectif était la régulation des éléments climatiques en général et des mouvements de l'air en particulier.

Concrètement il est question ici de définir les différents types d'interventions morphologiques qui visaient la régulation de l'air, de l'humidité, du soleil, de la lumière naturelle et de la « pollution » des espaces urbains. La période historique que nous avons choisi d'analyser s'étend de la fin du Moyen Âge à l'époque contemporaine. Elle reprend pour l'essentiel l'évolution de la conscience salubriste qui n'est devenue un enjeu pour les transformations urbaines qu'à partir du siècle des Lumières. Pour retracer cette histoire des interventions salubristes sur la forme urbaine nous avons structuré ce chapitre en quatre parties. Il sera question dans chacune d'elles d'un savoir-faire identifiable adapté aux spécificités de chaque contexte historique.

Les modes de contrôle historiques du microclimat urbain se sont traduits par quatre types d'interventions typiques sur la forme urbaine :

- Une adaptation spatiale sans intervention sur le bâti;
- une intervention par ajustement des vides urbains et transformations des matériaux de surfaces;
- une intervention par innovation de nouvelles formes urbaines répondant à une logique rationaliste qui relève d'exigences hygiénistes, techniques et fonctionnelles ;

---

<sup>1</sup> Comme nous l'avons évoqué dans le précédent chapitre, il existe des transformations urbaines qui peuvent contribuer à modifier le microclimat urbain sans que cela réponde à des intentions explicites. Ces interventions seront abordées dans les prochains chapitres. Pour le moment c'est la définition de ce savoir-faire qui nous intéresse. Pour rappel, par savoir-faire nous entendons la mise en relation, dans l'histoire des villes, d'une intention microclimatique et d'une intervention sur le cadre bâti.

- et enfin un retour aux ajustements des éléments existants de la forme urbaine héritée du passé.

Ce découpage s'il répond d'abord à une identification des différents modes d'intervention sur la forme urbaine, correspond généralement, mais pas toujours<sup>2</sup>, à quatre périodes successives de l'histoire des villes : la ville médiévale, la période des Lumières, la ville moderne et enfin la ville contemporaine.

En résumé il est question dans chaque partie de ce chapitre des éléments suivants :

- Nous allons en un premier temps exposer les éléments les plus importants du contexte historique qui a précédé la prise de conscience salubriste ainsi que les changements qui ont permis de rendre d'actualité cette dernière. Cette période correspond à la fin du Moyen Âge où il était encore vital pour les habitants des villes de se replier à l'intérieur des remparts pour des raisons militaires. Le repli de l'ensemble des conditions de production économiques qui étaient basées sur les avancées de la chimie organique à l'intérieur de ces villes produisait par la putréfaction des corps et le rejet de matière diverses un microclimat malsain contre lequel une seule solution était envisageable : « *l'adaptation aux variations spatiales de l'air malsain* ». Cette insalubrité ne verra d'amélioration qu'à la suite d'un contexte militaire, scientifique, et économique nouveau qui va conduire à la prise de conscience d'une possibilité d'intervention sur le microclimat malsain des villes.
- Cette prise de conscience que l'on peut qualifier d'« interventionniste » va se traduire progressivement par des transformations des éléments de la forme urbaine. Dans la deuxième partie on rappellera les transformations les plus récurrentes dans les villes françaises reflétant l'action salubriste. Ce sont des interventions que nous définissons comme étant des « ajustements » car il y était question de transformations d'éléments existants et non pas de nouvelles créations. Comme cela sera le cas à Nantes, ces mêmes ajustements qui répondent aux principales avancées scientifiques du siècle des Lumières en matière de salubrité urbaine vont concerner un grand nombre de villes françaises.
- En troisième lieu on présentera le point de vue original de l'époque moderne qui, en partant des mêmes constats hygiénistes et sous l'influence des utopies du XIX<sup>ème</sup> siècle, a proposé une forme urbaine opposée à celle de la ville ancienne. Dès le XIX<sup>ème</sup> siècle on assiste en effet à l'émergence d'idées nouvelles (qualifiées d'utopistes) qui proposaient, entre autres pour des raisons d'hygiène, d'édifier de nouvelles formes urbaines en dehors des villes existantes. Ces idées qui vont envisager « *la ville comme échelle d'intervention* » pour réaliser ces nouvelles formes urbaines auront des répercussions considérables sur l'urbanisme moderne du XX<sup>ème</sup> siècle.
- Enfin, nous présenterons quelques éléments relatifs à la prise de conscience environnementale contemporaine, que nous traduisons comme une perpétuation de la conscience salubriste. En effet en plus de la question récurrente de l'hygiène, de nouveaux enjeux liés au développement durable sont définis pour la croissance et la transformation des villes. Les implications de ces enjeux sur le cadre bâti seront influencées à la fois par les réactions aux expériences modernes et par un contexte de crise économique qui tous deux vont favoriser une exploitation « optimale » des structures bâties existantes et un meilleur contrôle de l'étalement des villes.

L'examen approfondi de l'ajustement climatique pour chacune de ces périodes serait trop lourd pour ne pas laisser échapper des éléments qui peuvent paraître importants. Pour effectuer cette lecture nous nous appuyons principalement sur des travaux d'historiens qui nous livrent des récits

---

<sup>2</sup> Un mode d'intervention ne dépend pas systématiquement d'une période historique de la ville. Il peut très bien concerner deux ou plusieurs périodes, comme on le verra pour les ajustements morphologiques par exemple.

très synthétiques concernant l'atmosphère urbaine dans les villes du Moyen Âge ainsi que les interventions découlant de la conscience salubriste (comme le pavage des rues, le comblement des fossés et l'alignement et élargissement des rues, etc.). Quant aux réalisations modernes en France, dont les grands ensembles sont la réalisation la plus répandue, et qui sont affiliés aux principes de la charte d'Athènes et aux travaux plus spécifiques de Le Corbusier. Enfin, en ce qui concerne les questionnements sur la qualité environnementale des villes et compte tenu de l'aspect récent du débat, on ne présentera que les interrogations et les orientations générales que ces questionnements ont induites. Ce « panorama » de la position interventionniste liée à l'objectif (direct ou indirect) de régulation du microclimat urbain, nous permettra à la fin de ce chapitre d'esquisser les principaux niveaux d'intervention sur les éléments de la forme urbaine.



## 1. ADAPTATION A L'AIR MALSAIN ET DEBUTS DE LA CONSCIENCE INTERVENTIONNISTE

*« Le passage de la « ville puante » de l'ancien régime à la « ville polluée » de l'époque industrielle s'opère lentement par toute une série de prises de conscience, politique et culturelle, symbolique et quotidienne, scientifique et technique, économique et écologique »<sup>3</sup>.*

Les éléments déterminants qui traduisent ce changement de contexte évoqué par A. Guillerme et qui auront une influence sur l'état du microclimat urbain sont principalement dus à trois changements. Le premier relève d'un changement de priorités militaires qui avaient conduit la ville du Moyen Âge à se replier dans l'atmosphère morbide des villes intra-muros. Le deuxième changement important favorisant l'apparition de la conscience salubriste réside dans l'apparition de la chimie minérale qui va permettre de dissocier les conditions de productions de l'humidité de l'air. Enfin les conditions de productions économiques qui vont prendre en compte cette évolution scientifique par un changement des techniques. Le passage d'une atmosphère urbaine dont la caractéristique principale était la stagnation de l'air à une atmosphère caractérisée par sa célérité, n'est accepté que parce que les techniques de productions nouvelles ne dépendent plus de cette atmosphère inerte. La célérité de l'air devient donc envisageable.

Ce changement de contexte induit un changement d'attitude vis à vis du microclimat urbain. On passe d'une « attitude passive » dont la seule alternative était l'adaptation aux variations spatiales de ce microclimat à une « position interventionniste » qui se traduira par la transformation des éléments de la forme urbaine. Ce sont ces deux moments successifs de la mise en rapport du microclimat urbain et de la forme urbaine que nous évoquons ici en les reliant à leurs contextes.

### 1.1. Adaptation organique à l'atmosphère malsaine des villes

#### 1.1.1. Un contexte militaire et économique contraignant

*« Rue Ordre, Rue Basse-fesse, Bougerie, ruelle des Aisances, autant de toponymes qui assignent, à la renaissance, certaines rues à ces fonctions « excrémentielles ». [...] Malgré les interdictions, ces rues conservent leur rôle jusqu'au XVIIIème siècle. Pour la population qui habite ces lieux « immondes », « l'excrémentiel » demeure le quotidien, dont ni l'odeur, ni la vue ne provoquent le dégoût » [Guillerme 1990].*

Cette affirmation d'André Guillerme [GUILLERME 1990], nous laisse penser, que la perception qu'avaient les citoyens du microclimat des rues dans lesquelles ils vivaient, était en relation avec autre chose que la seule perception sensorielle. Dans sa description du long processus qui a permis le passage de cette ville humide et puante à la ville plus saine des Lumières, il relève que ce qui paraît aujourd'hui nécessaire et même vital, pouvait être tout au contraire périlleux d'un point de vue militaire et inconcevable d'un point de vue technique et économique.

Le contexte historique des villes médiévales était défini principalement par une situation de guerre permanente. Les impératifs militaires de protection imposaient aux villes de s'entourer de fossés très larges autour des remparts. Ce qui créait un microclimat à forte humidité. Puisqu'il fallait s'adapter à cette nécessité de repli vers la ville intra-muros, l'ensemble des activités de productions économiques, et surtout celle du salpêtre nécessaire à la poudre des canons, devaient se développer à l'intérieur des remparts. Ces productions, qui dépendaient exclusivement des avancées de la chimie organique, ne pouvaient trouver dans l'air humide et statique des villes que des avantages.

*« Jusqu'au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, la ville est ainsi le premier producteur de salpêtre, fourni par tout ce que l'artisanat ne peut assimiler dans ses moyens de production – détritux, excréments, gravats. Les dépôts d'ordures*

---

<sup>3</sup> [GUILLERME 1990].

*sur le rempart ou dans les rues, la vétusté des bâtiments, deviennent utiles en permettant aux villes leur autonomie défensive en cas de siège et en assurant au royaume dans une certaine mesure son indépendance. L'état de guerre encourage la « putréfaction » dans la ville. » [GUILLERME 1990, p. 152]*

Les sites marécageux étaient même préférés pour l'implantation des villes, pour leur humidité excessive. André Guillerme cite dans ce sens le témoignage d'Olivier de Serres<sup>4</sup>, qu'il qualifie de « juste témoin de son temps » :

*« Dieu ayant établi l'humidité et la chaleur pour principale cause de la génération. C'est pourquoi dès toute ancienneté les rives des remarquables fleuves et orées de grandes forêts ont été choisies pour la construction des grandes villes »<sup>5</sup>.*

Ce n'est pas seulement le salpêtre qui pousse les artisans à conserver l'humidité excessive de l'air. Ne disposant pas des moyens de production synthétiques du XIX<sup>ème</sup> siècle, la plupart des productions économiques de l'époque comme celles du textile, du cuir et du papier avaient besoin de l'humidité de l'air :

*« Textiles, cuirs, papier et salpêtre représentent en volume la majeure partie des produits transformés dans et par la ville jusqu'au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Leurs modes de production dépendent intimement de l'humidité et de la putréfaction ou plutôt de la quantité d'excréments produits dans la ville. L'eau et les fientes sont dans l'économie artisanale des richesses premières qu'il faut stocker, sinon accumuler. En ce sens, les déchets et l'eau sont à l'artisan ce que l'or et l'argent sont à l'état dans la théorie mercantiliste. »<sup>6</sup>.*

Les progrès limités de la chimie et l'état de guerre sont des éléments moteurs parmi d'autres dans l'humidification de l'air des villes. Celle-ci résultait aussi de la baisse des températures (estimée à 1°C) et de l'augmentation de pluviosité qui affecta l'ensemble de l'hémisphère Nord dès le milieu du XIII<sup>ème</sup> siècle [LADURIE 1983], [Guillerme 1990]. Le climat froid et humide qui va durer plusieurs siècles influencerait, au même titre que les conditions de productions et l'état de guerre sur, ce que A. Guillerme appelle, l'économie « fongique », qui régit la ville entre le XIV<sup>ème</sup> siècle et le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Cette économie, fondée sur la fermentation, fait en effet de la putréfaction et de l'humidité des supports de l'urbanisation.

*« l'eau stagnante et l'humidité jouent durant ces quatre siècles un rôle fondamental dans l'économie urbaine. Agent chimique essentiel à la fermentation, agent mécanique nécessaire à la détente des fibres ou à la tension de l'apprêt – indispensable à la bonne qualité des tissus -, la vapeur d'eau apparaît donc comme le moteur économique de l'urbanisation occidentale. Immobile et pesante, elle adhère à la basse ville »<sup>7</sup>.*

Jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle, la qualité du microclimat urbain ne se mesurait donc pas à la qualité sanitaire de l'air. C'est plutôt le sens économique qui prévalait. Cette économie « fongique » ne pouvait donc produire qu'une atmosphère malodorante et humide. La recherche d'une meilleure hygiène de l'air n'est pas encore à l'ordre du jour. C'était même, d'après Guillerme, tout le contraire : « plus une ville était puante, plus elle était riche »<sup>8</sup>.

Par cet enfermement dans la ville intra-muros, les habitants étaient condamnés à vivre avec toutes les matières organiques résultant des activités économiques et de l'habitat. L'humidité excessive étant synonyme de « sécurité » (militaire) et de « richesse » (économique), il ne fallait pas la laisser s'échapper hors de la ville intra-muros. De ce fait l'aération des rues était problématique puisqu'elle risquait de dissiper l'humidité de l'air hors des sites de production économique.

<sup>4</sup> Important théoricien de l'économie agricole de la deuxième moitié du XVI<sup>ème</sup> et du début du XVII<sup>ème</sup> siècles.

<sup>5</sup> Selon : Olivier de Serres, Le théâtre d'agriculture, Paris, 1600, p. 663. Cit2 dans [GUILLERME 1990, p. 169].

<sup>6</sup> [GUILLERME 1990].

<sup>7</sup> [GUILLERME 1990].

<sup>8</sup> [GUILLERME 1990].

### 1.1.2. Adaptation à la distribution spatiale de l'air « malsain »

Si l'on passe de l'échelle de la ville à celle des rues, on s'aperçoit, selon quelques témoignages, que l'état malsain de l'air n'était pas le même dans toutes les rues intra-muros. Si la ville était réputée pour son humidité et sa puanteur, il existait tout de même des quartiers moins malsains que d'autres. Les autorités religieuses et les habitants ayant une condition économique aisée occupaient le plus souvent les parties les plus hautes des villes et des étages de bâtiments assez éloignés du rez-de-chaussée trop proche des sources malsaines.

Robert Favre rappelle la relation qui existait entre la topographie des villes et la qualité sanitaire des espaces urbains. La situation spatiale (topographique en l'occurrence) et la qualité sanitaire de l'air sont souvent mis en relation dans les textes du XVII<sup>ème</sup> siècle [Favre 1977] L'existence d'une certaine hiérarchisation spatiale de la qualité de l'air pouvait aussi contribuer à définir la répartition des activités urbaines qui s'y déroulaient ainsi que le groupe social des habitants :

*« La ville religieuse et la ville commerciale écrasent de leur verticalité la ville qui a fait de l'humidité et de la fermentation un « modus vivendi » adapté au terrain. [...] différenciation verticale qui se précise au fil du temps »<sup>9</sup>*

Un dénommé Morizot avait écrit dans la deuxième moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle que : « le choix d'une habitation ne doit plus être indifférent », qu'il faut préférer les quais et les places et l'exposition au soleil levant, et il préférait des situations topographiques assez hautes éloignées des marécages et de leur atmosphère humide :

*« L'air qui règne à mi-coteau paraît [...], le plus analogue à la constitution de tous les sujets, et le plus sain qu'on puisse respirer »<sup>10</sup>.*

Mais l'économique pouvait encore prévaloir sur le sanitaire à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Au sujet du quartier du Commerce à Nantes, un arrêt du Conseil d'état du 24 avril 1781 fait remarquer :

*« Il n'est peut-être point cependant de ville en France, où l'on ait autant ménagé le terrain par le besoin qu'on avait de logement et de magasins. Les maisons y sont très élevées, les rues étroites, les places publiques petites ; et, ce qui causera encore plus d'étonnement, c'est que dans tout le quartier du commerce, qui est celui de la richesse, les maisons sont louées aussi chèrement qu'à Paris... »<sup>11</sup>*

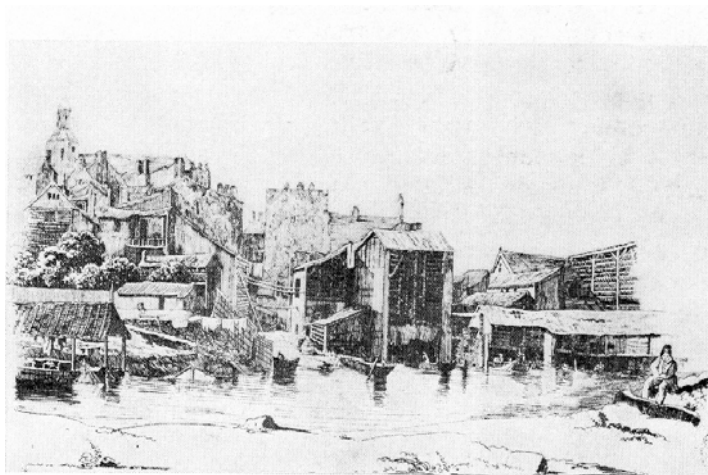


Figure 1.1 : « les vieilles Tanneries », iconographie d'une rive de l'Erdre à Nantes publiée en 1839 [COSNEAU 1973]

---

<sup>9</sup> [GUILLERME 1990].

<sup>10</sup> Morizot Brion et Ivoiry Richard, 1782–1784, Lyon, B.M : 355 646. Cité dans [FAVRE 1977, p. 153].

<sup>11</sup> [A.M.N, DD. 225].

Ce texte sur Nantes dénote la priorité de l'économique sur le sanitaire dans l'attribution des valeurs foncières des quartiers. Il existerait donc une sorte d'équilibre entre les bienfaits « d'habiter » en ville, et la mauvaise qualité sanitaire de l'air. Une sorte de contrat entre le citadin et la ville fait tolérer à ce dernier ce qui peut paraître aujourd'hui insupportable à nos sens. Cela ressemble assez bien à la situation actuelle des rues polluées par la circulation automobile. Ces rues ne sont pas forcément les moins cotées sur le marché immobilier.

L'humidité de l'air et la putréfaction des corps participaient aussi à définir une organisation sociale de la ville. Les villes au XVIII<sup>ème</sup> se structuraient souvent, selon A.Guillermé, en quatre grandes parties :

- L'ancienne cité du haut Moyen Âge, réservée aux ecclésiastiques.
- Le quartier de la rivière et le quartier du marché (comme l'Erdre à Nantes), nés de l'agrandissement des villes à l'époque médiévale. Le premier, fait d'impasses et de rues étroites, contient l'habitat des plus pauvres. Il est trempé de vapeurs nauséabondes nécessaires au bon exercice des métiers de l'époque. Le second, plus aéré, renferme les domiciles des marchands.
- L'extension de l'époque de la renaissance, beaucoup moins dense et plus verte que le centre, où se confinent de nouveaux ordres religieux.
- Et puis, dès la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, on retrouve dans les plus grandes villes, le quartier périphérique industriel. Au-delà des boulevards, dans la vallée, s'étale un vaste réseau hydraulique le plus souvent utilisé par les blanchisseurs. Sur le plan symbolique l'espace périurbain apparaît, selon Guillermé, comme le producteur de la blancheur immaculée (toile et papier) tandis que le centre s'attache aux couleurs et à la putréfaction des matières (teinture, cuir).

En plus d'une adaptation à la différenciation topographique naturelle de la qualité sanitaire de l'air dont la rivière et les crêtes sont les extrêmes, une différenciation verticale s'installe peu à peu dans les rues, et cela au fur et à mesure que le niveau des maisons s'enfoncent par rapport à celui du sol extérieur. Principales causes de cet exhaussement du sol des rues, non seulement le rejet des immondices, mais aussi les destructions du bâti et les transformations des édifices dont les propriétaires rejettent dans les rues toutes sortes de matières et de matériaux résultant des travaux. La destruction des murailles va s'accompagner aussi de la démolition des maisons aux alentours dont les gravats vont se retrouver à leur tour dans le sol des rues. La « paille et les fagots » qui sont jetés à chaque fois dans les rues pour éponger les boues hivernales vont à leur tour contribuer à cet exhaussement du sol.

Conséquence de la « remontée artificielle du sol », les anciens rez-de-chaussée deviennent parfois des sous-sols que seuls des soupiraux éclairent en partie haute, et se transforment ainsi en des espaces sombres, enfouis dans l'humidité du sol. Puisque la technologie demande toujours plus d'humidité, ces espaces que l'exhaussement a transformés en sous-sols, vont être occupés par des magasins et des dépôts. Les habitants qui ont conscience de l'insalubrité de l'air abandonnent ces sous-sols pour habiter les étages plus hauts qui deviennent désormais accessibles par quelques marches depuis la rue [GUILLERME 1990 ; CORBIN 1986].

*« Une telle hantise conduit à dénoncer le double danger des caves et des pièces enfouies, soumises aux émanations du sol et privées de la nécessaire circulation de l'air. Aussi commence-t-on à prôner l'abandon du Rez-de-chaussée au profit du premier étage »<sup>12</sup>*

Une différenciation spatiale verticale de la qualité de l'atmosphère urbaine s'installe donc dans la ville. Si un habitat est mal éclairé ou mal aéré, on remonte, pour ceux qui en ont les moyens, aux étages supérieurs qui ne présentent pas les mêmes inconvénients. Il existe donc une différenciation

<sup>12</sup> [CORBIN 1986].

spatiale des paramètres de l'atmosphère urbaine, qui réduit dans une certaine mesure la mauvaise qualité des paramètres du microclimat urbain. L'existence d'une certaine échelle différentielle de la qualité de l'atmosphère urbaine permet de « choisir » où l'on veut et où l'on peut habiter, à condition que cela respecte l'ordre des priorités : le militaire, l'économique, le social puis le sanitaire.

Cette différenciation spatiale se confirme à Nantes. La rivière d'Erdre dans sa partie sud était bordée de rues dont la plupart étaient les plus sales dans la ville. « Rue des Tanneurs », « rue de la Boucherie » et à un niveau moindre « la rue des Halles », sont trois rues autour de l'Erdre, qui étaient réputées parmi les plus insalubres de la ville. Véritable « égout à ciel ouvert », la rivière d'Erdre présentait un microclimat qui l'opposait au reste de la ville :

*« Boueuse, stagnante, épaisse, mal saine et non navigable que de batelets ou de bois flottés, et encore de cinq lieus seulement [...] la rivière d'Erdre qui est paresseuse au-dessus de la ville extrêmement stagnante, limoneuse et très épaisse, d'un noir verdâtre ou verd noir, pour cela malsaine et très désagréable. »<sup>13</sup>*

Autour de l'Erdre régnait une atmosphère malsaine renforcée par les rejets des activités artisanales. Une ordonnance de police du 30 janvier 1572 défendait :

*« aux bouchers et autres, vendant chair et tripes, de jeter le sang et les immondicités des animaux qu'ils tuent sur la rue »<sup>14</sup>.*

Si les activités sales se concentraient autour de l'Erdre, les fonctions religieuses étaient situées au Nord-Est de la ville, surtout autour de l'église saint Pierre, situation plus haute et assez éloignée de l'air malsain de la rivière.

Jusqu'en 1852 une variation importante des paramètres microclimatiques peut être constatée à l'intérieur même du centre de Nantes. La commission pour l'assainissement du logement insalubre relevait ainsi dans son rapport les disparités entre la qualité sanitaire de l'air de deux quartiers du centre de Nantes : le quartier de la Fosse (habitat dense et espaces urbains exigus à proximité de la Loire) et celui de Delorme (principalement constitué par un boulevard assez large). Une différence d'humidité importante, relevée par un hygromètre à cheveux, est constatée entre les rues et les cours du premier et le Boulevard du second. Elle atteignait 5 à 10%<sup>15</sup>. Le rapport de cette commission, dont on rappellera les conclusions dans le chapitre consacré aux transformations urbaines à Nantes, insiste à plusieurs reprises sur les disparités de la qualité sanitaire entre quelques quartiers et rues de la ville à cette époque. Les statistiques sur les taux de mortalité en sont données pour preuve par les auteurs du rapport. [CHEROT et al. 1852]

A défaut de pouvoir agir sur les paramètres microclimatiques, l'unique solution, jusqu'à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, était donc de « s'adapter ». Pour cela les habitants des villes cherchaient à s'éloigner le plus possible des sources malsaines. Ne disposant pas d'outils qui leur permettraient de suivre la propagation spatiale de l'air malsain dans les espaces de la ville, la seule solution envisageable était en effet l'éloignement des sources. Même si cela ne traduit pas une intervention directe sur les paramètres microclimatiques, cela dénote du moins une possibilité d'adaptation aux caractéristiques différentielles de la qualité de l'air. L'existence de cette qualité différentielle entre espaces de la ville, qui pourrait toucher l'ensemble des paramètres microclimatiques, nous paraît intéressante en

---

<sup>13</sup> Dubuisson Aubrey, Itinéraires de Bretagne, 1636. Cité dans [DENIZEAU 1978, p. D2].

<sup>14</sup> Cette ordonnance est citée dans [DENIZEAU 1978, p.D4a].

<sup>15</sup> Les cheveux comportent de longues chaînes moléculaires dont la propriété est d'adsorber des molécules d'eau et de s'allonger ou de se rétracter avec l'humidité de l'air. Les cheveux humains ont une longueur qui augmente de 2 à 2,5% lorsque l'humidité relative de l'air passe de 0 à 100%. L'hygromètre à cheveux fonctionne sur le principe d'une double mèche de cheveux tendue verticalement. L'allongement du capteur est amplifié par un double jeu de leviers. Le signal reçu est enregistré graphiquement sur un papier. L'hygromètre à cheveux a été développé vers un instrument à lecture directe assez simple (une sorte de boussole) qui permet de mesurer l'humidité relative de l'air. Voir à ce sujet :

[http://www.melounou.com/~memoire/meteo/humidite\\_air.htm](http://www.melounou.com/~memoire/meteo/humidite_air.htm) et <http://www.meteonet.org/html/instruments.html>.

terme d'aménagements urbains. On peut, pour mieux l'imaginer, assimiler cela à une certaine cartographie de la pollution atmosphérique dans les villes contemporaines qui conduiraient les habitants à choisir les rues et les logements les moins pollués. La cartographie de l'air malsain des villes anciennes se faisait donc selon une hiérarchisation verticale, en favorisant les zones topographiques les plus hautes et les habitations les plus hautes des immeubles, et une hiérarchisation horizontale selon l'éloignement des sources malsaines.

Une conclusion s'impose donc. Le microclimat urbain peut connaître des variations spatiales significatives sous les mêmes conditions climatiques et sous l'influence des seules variations morphologiques et anthropologiques. Cette première lecture historique nous montre aussi que la qualité de l'air ne se résume pas aux seuls aspects sanitaires. L'insalubrité de l'air pouvait être perçue, selon le contexte historique, comme une situation de « normalité ». Lorsqu'une prise de conscience de l'insalubrité de l'air a eu lieu, on pouvait trouver dans la qualité différentielle (et donc dans la variation) de la qualité de l'air (et des paramètres microclimatiques qui définissent cette qualité), une solution en terme d'aménagements. En effet la répartition spatiale des activités urbaines et des groupes sociaux se calquait à celle de la qualité de l'air. Solution certes passive (elle ne suggère aucune intervention) mais adaptée au contexte et aux enjeux militaires, et économiques de l'époque.

## 1.2. Éléments du contexte salubriste favorisant l'intervention sur la forme urbaine

Le changement de l'atmosphère urbaine des villes françaises, qui va commencer à se réaliser à partir de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, se produira de manière progressive. Il va d'abord concerner un changement de « mentalité » qui se répandra peu à peu dans l'ensemble de la société.

*« A la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, la macération joue un rôle moins important dans les activités urbaines : la putréfaction du cuir s'éparpille dans les campagnes ; le coton moins polluant se substitue lentement au lin et au chanvre [...] et, peu à peu, tout nanti cherche à réduire l'humidité de son habitat »<sup>16</sup>.*

La disparition de « l'économie fongique » ne sera possible qu'avec le développement de la chimie minérale et les produits de synthèse qui pénètrent les villes de province au début du XIX<sup>ème</sup> siècle. Une nouvelle mentalité va se construire, basée principalement sur le « dégoût de la mort » et dont l'aboutissement va être le comblement du réseau hydrique, la minéralisation des surfaces de la ville, puis l'enterrement des réseaux d'évacuation des eaux. Après la disparition de l'économie fongique, l'humidité de l'air sera peu à peu réduite. Cette mutation des mentalités se fera d'abord par la mobilisation des intellectuels qui situent le mal, recherchent et proposent des solutions diverses et aboutiront à l'invention de la chimie minérale « propre et saine ».

A Nantes, on peut retrouver quelques textes anciens qui reflètent une prise de conscience des problèmes « sanitaires » que posaient les comportements et les manières de vivre des citoyens. Ces derniers ne voyaient en effet aucun mal à rejeter diverses matières et matériaux dans les rues de la ville, en laissant à la nature le soin de les décomposer. Dès la fin du XV<sup>ème</sup> siècle, on retrouve des ordonnances qui prescrivaient le transfert de ces matières dont les vapeurs pouvaient causer des maladies graves, et d'autres qui insistaient sur la nécessité du pavage des rues pour en faciliter leur nettoyage<sup>17</sup>.

<sup>16</sup> [GUILLERME 1990].

<sup>17</sup> Une ordonnance datant de l'année 1487 préconise, au sujet des « terriers et des bourriers » des étables situées dans la ville : « Faire vuyder hors notre ville et icelle nettoier et tenir necte doresnavent, à ce que par les vapeurs des dits terriers et bourriers aucun inconvenient de maladie ne avienne en notre dite ville... » Selon LA NICOLLIERE TEIJERO « Privilèges accordés par les Ducs de Bretagne et les Rois de France aux bourgeois habitants maires et échevins de la ville de Nantes ». Nantes, société des bibliophiles bretons, recueil de textes, 1883. Cité dans [DENIZEAU 1978, p. D4b].

Ce changement de mentalité, l'historien P.Lelièvre le traduit bien dans son ouvrage sur l'histoire de la ville de Nantes. En s'appuyant sur des textes descriptifs anciens de la ville, il nous livre cette affirmation :

« Cette ville, que les hommes du XVIII<sup>ème</sup> siècle jugeront incommode, étriquée, mal bâtie, apparaît à ceux du XVII<sup>ème</sup> magnifique et plaisante. »<sup>18</sup>

### 1.2.1. Inquiétudes des médecins et nouveaux procédés de la chimie minérale

C'est à partir du XVI<sup>ème</sup> siècle, avec la réhabilitation des écrits des médecins grecs et romains, que se pose la question de l'insalubrité de l'air des marécages et des zones à humidité excessive. C'est d'abord en Italie que cette question va se poser ; la constitution d'une école médicale italienne, l'école de Padoue, accuse à la fois l'humidité née de la stagnation des eaux et les exhalaisons méphitiques provenant des ateliers urbains. L'Essai sur la maladie des artisans de Ramazzani s'interroge en 1700 sur les causes de la mortalité urbaine de manière générale (et non seulement aux seules zones marécageuses) :

« Il n'y a pas de métier sain : les ouvriers souffrent des poumons –foulons chandeliers liniers- de la rate, [...] le remède ? Aérer les ateliers, y faire entrer la lumière »<sup>19</sup>.

La société royale de médecine de Paris lance un concours en 1789 sur une question proposée en ces termes :

« Déterminer, par l'observation, quelles sont les maladies qui résultent des émanations des eaux stagnantes, et des pays marécageux, soit pour ceux qui habitent dans les environs, soit pour ceux qui travaillent à leur dessèchement et quels sont les moyens de les prévenir et d'y remédier ? »<sup>20</sup>

Aux multiples inquiétudes face au danger du méphitisme on retrouve, vers 1770, un nouveau courant de la chimie qui rompt avec la chimie « organique » qui continuait à s'appuyer sur la fermentation. Les précurseurs en sont selon Guillaume, Rouelle en France, qui multiplie les expériences sur les minéraux dans ses cours donnés à Paris, Cavendish en Angleterre, qui publie un certain nombre de travaux sur l'Air fixe et autres gaz (1766). Ces travaux sont accueillis avec grand intérêt par le milieu intellectuel parisien. Lavoisier, Berthollet, Guyton de Morveau, Fourcroy..., ainsi que toute une nouvelle génération de chimistes qui veulent faire reculer les frontières de la putréfaction adhèrent à ce mouvement.

Le règne minéral est bénéfique car il serait le seul « à ne pas posséder de substance huileuse » (le seul qui n'exige pas de fermentation). C'est le règne du souterrain (qui n'a pas besoin de l'atmosphère urbaine) que reconnaît alors la physique<sup>21</sup>. Les substances animales et végétales sont très mobiles et très variables, comparées aux substances minérales dont les acides et les sels sont faciles à obtenir, simples à doser et rapides à réagir. Tout peut donc être quasiment obtenu avec ces dernières. [Guillaume 1990]

Entre l'organique et le minéral, entre l'artisanat et la manufacture, le choix est fait. La « machine minérale » n'est pas seulement efficace comme toutes les machines simples, elle paraît aussi propre et saine. Déjà, depuis le milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, le milieu scientifique parisien ne croit plus dans les vertus de l'artisanat. Ce qu'on lui reproche c'est l'utilisation passive de la nature. Il faut désormais « intervenir ».

---

<sup>18</sup> [LELIEVRE 1988, p. 25]

<sup>19</sup> Ramazzani est cité dans [GUILLERME 1990].

<sup>20</sup> BAUME, Mémoire qui a remporté le prix du concours en 1789 : « l'observation et le calcul l'ont démontré ; la durée moyenne de vie est moins longue dans les contrées marécageuses et l'on peut en réduire le terme à 5 ou 6 ans de moins que le terme connu des pays ou des villes où la mortalité n'est point réglée par cette foule de circonstances morales et physiques, qui, dans les capitales et villes principales, portent à une diminution effrayante cette probabilité de vie ». Cité dans [GUILLERME 1990]

<sup>21</sup> Le corps des mines est créé en 1783.

Des métiers aux procédés encore artisanaux, ceux de l'exploitation des émanations de la nature commencent à être dénoncés : Desmaret, dans son *premier mémoire sur la papeterie* (1771), en vantant la supériorité des produits hollandais, dénonce les fabricants français<sup>22</sup>. Lavoisier dans son *Rapport à l'Académie sur le rouissage* (1783) condamne à son tour l'emplacement choisis par les chanvriers et liniers pour leurs productions<sup>23</sup>.

A l'intérieur de la ville, la lutte contre les vapeurs méphitiques est allée de pair avec les découvertes de la chimie minérale. Pour la préparation des toiles par exemple, Dubuc de Rouen reçoit en 1829 le prix Montyon – destiné à récompenser les inventions susceptibles d'améliorer le sort des travailleurs- pour son nouveau procédé de parement et d'encollage à base de chlorure de calcium et de farine de blé qui conserve la toile humide dans une atmosphère relativement sèche. Le procédé se généralise, et les locaux de production sont construits dans des lieux aérés et secs. La découverte du chlore et l'expansion de la production du coton réduisent sensiblement l'importance de l'artisanat textile. Le chlorure de calcium mais aussi l'eau de Javel, mise au point par Berthollet en 1786, révolutionnent les procédés de blanchiment des toiles : il ne faut plus que onze jours là où il fallait plusieurs semaines avec la cendre. La quantité d'eau nécessaire se trouve ainsi réduite de presque autant. Jusqu'en 1825, la fabrication de l'hypochlorate de soude se limite à Paris et Rouen et sert essentiellement l'industrie locale. Au début de la Restauration (1814-1830) l'usage de l'eau de Javel tend peu à peu à se généraliser aux autres centres textiles, Amiens d'abord, puis Beauvais, Reims, Troyes où le blanchiment est pratiqué en atelier sous pression. Autre exemple, celui du tannage. Un procédé mis au point en 1794 permet la fabrication des cuirs en trois semaines. Cette méthode s'implante lentement dans les grandes agglomérations, dans des usines situées près des abattoirs regroupés par mesure d'hygiène hors de la ville en aval de la rivière. Le cuir subit aussi la concurrence d'autres matières plus souples et bien meilleur marché comme les textiles imperméabilisés (procédé Macintosh, 1836). La fabrication du papier adopte de nouveaux procédés dès 1840 à Troyes. La machine « en continu » inventée par Louis Robert à Rouen en 1798, et le blanchiment au chlore mis au point vers 1835 qui réduit le rôle du pourrissoir accélèrent la production et réduisent la consommation d'eau.

Evacuée de tous les moyens de production industrielle, la fermentation, déjà condamnée pour ses vapeurs méphitiques, doit donc définitivement disparaître de la ville. Les cimetières ont été repoussés hors les murs à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Les abattoirs et les hôpitaux ont subi le même sort sous le premier Empire. Restent quelques détritiques urbains de toutes natures que les citadins continuent à jeter dans les fosses d'aisances, dans les canaux et à même la rue ou à porter aux remparts lorsqu'ils n'ont pas été rasés.

### 1.2.2. Inefficacité des fossés à protéger les villes et maîtrise du réseau hydrographique

Les revers essuyés par les armées françaises en Italie et espagnoles aux Pays-Bas, les sièges de Henri IV dans sa conquête du pouvoir, ont montré les faiblesses du fossé plein d'eau. Sa destruction est longue et coûteuse en main d'œuvre pour l'assiégeant, mais ce dernier peut vaincre l'obstacle en édifiant un pont de bateaux. Dans les pays chauds, l'eau engendre un mauvais air permanent, nocif pour les assiégeants comme pour les assiégés ; dans les pays froids elle peut geler et réduire la défense à néant.

<sup>22</sup> Ces fabricants « s'étaient tellement accoutumés aux toiles pourries comme la seule manière qui convînt à leur fabrication qu'ils indiquèrent les qualités estimables d'ailleurs que le pourrissage porté à un certain degré ne manquait jamais de donner à leurs papiers ; en sorte que la méthode hollandaise, malgré la beauté de ses produits, leur répugnait précisément, parce qu'elle présentait d'étranges exceptions à leurs principes chéries ». [GUILLERME 1990, pp.133-137].

<sup>23</sup> « Le rouissage dans des eaux stagnantes, la putréfaction, l'infection, le dégagement de gaz inflammable en hydrogène qui en résulte, ne peuvent-ils pas nuire à la salubrité des habitations voisines ? ». Cité dans [GUILLERME 1990].



Le fossé sec a aussi ses détracteurs ; s'il peut servir de refuge, s'il permet la contre-attaque pied à pied et la surveillance des abords, en revanche, il facilite l'accès de l'ennemi. Machiavel crée la cunette, un canal large et profond de 2 à 3 mètres, creusé au fond du fossé sec et rempli d'eau. Stévin, hydraulicien au service du prince d'Orange, suggère vers 1618 la construction de digues et d'écluse. Par ce procédé, l'eau courante détournée des fossés en temps de paix peut mieux desservir les activités artisanales intra-muros ; on évite ainsi la multiplication des miasmes, soit en maintenant les fossés secs, soit en évacuant périodiquement, par effet de chasse, les détritiques accumulés. Au système continu et statique de Machiavel et des partisans des fossés secs ou pleins d'eau, Stévin oppose donc un système d'écoulement discontinu et dynamique.

Vauban s'oppose en 1668 au projet de fortification de Clairville à Dunkerque. Il opte pour un projet de bastions inondables par des écluses, confié à des ingénieurs hydrauliciens. Des aménagements hydrauliques complexes viennent ainsi protéger les villes frontalières. Pour ce dernier comme pour Mariotte ou Newton à la même époque, l'eau n'est plus une masse inerte mais force naturelle qu'il s'agit d'appivoiser et d'adapter.

*« Pensée par des statisticiens comme Vauban, des mathématiciens comme Euler, des architectes comme Blondel ou de Cormontaigne, la poliorcétique<sup>24</sup> suit l'évolution de la pensée scientifique qui cherche à maîtriser le mouvement des eaux » [Guillaume 1990].*

L'arasement des remparts (qui perdent leur utilité militaire) et la fermeture des impasses à la Restauration par mesure de police obligent la grande majorité des citadins à évacuer leurs détritiques dans les canaux ou dans le fossé, lorsque les canaux conservent encore quelque utilité pour l'artisanat riverain. Avec la disparition des moulins, le réseau hydrographique intra-muros ne conserve plus que sa fonction excrémentielle. Les canaux se transforment en cloaques comme à Londres et Paris, si ce n'est pire dans certaines villes (Amiens, Caen, Troyes) le volume des eaux, détournées au profit des nouvelles voies navigables, est insuffisant pour entraîner les immondices. Le réseau ancien doit être tôt ou tard recouvert. Le long enterrement du réseau hydraulique, commencé à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, s'achèvera au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle.

---

<sup>24</sup> « Art technique d'assiéger les villes ». Définition du dictionnaire « ZEUS » trésor de la langue française édité sur le web par le CNRS : <http://zeus.inalf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/advanced.exe?8;s=4077682305>;

Au terme de cette première partie du chapitre nous avons voulu expliciter les principaux éléments du contexte historique qui relie deux attitudes opposées et successives vis à vis de la régulation de certains paramètres microclimatiques. D'abord, l'impuissance, qui conduisit les habitants des villes à se confiner dans une atmosphère humide, sombre, puante et malsaine, dans le côté intra-muros des villes. Les étendues vertes et ensoleillées ont été ainsi abandonnées pour raison de survie. Face à cette impuissance, deux types d'adaptations ont eu lieu en réaction à l'état malsain de l'air des villes. Une adaptation à l'atmosphère malsaine que l'on peut qualifier de perceptive (en terme de mentalité) favorisée par la nécessité d'habiter à l'intérieur des remparts ainsi que par les limites des techniques de production liés à la chimie organique et une adaptation aux variations spatiales du microclimat urbain qui tente d'échapper aux propriétés malsaines de l'air. Cette deuxième adaptation peut être illustrée par les fonctions attribuées à différentes parties de la ville. Les espaces les moins pollués pour les religieux et les riches et les abords des sources malsaines pour les ouvriers.

L'apparition de la conscience « interventionniste » sur l'atmosphère urbaine, et de fait, sur les paramètres microclimatiques, est donc rendue possible grâce à des changements majeurs dans les domaines, militaires, scientifiques et techniques. La disparition des causes militaires, scientifiques et économiques qui imposaient une régulation passive du microclimat urbain face à l'état malsain des villes a induit l'adoption d'une attitude désormais active. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les interventions proprement dites qui sont le fruit de ce nouveau contexte historique et qui visaient une amélioration de la qualité sanitaire de l'air des villes.

## 2. AJUSTEMENTS DES ELEMENTS DE LA FORME URBAINE ET PREOCCUPATIONS SALUBRISTES

Après la prise de conscience interventionniste, c'est le passage à l'intervention proprement dite sur les éléments de la forme urbaine dans un but de salubrité qui va survenir dans les villes dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle. De la lecture de quelques travaux qui traitent des transformations salubristes de la ville médiévale, il ressort de manière unanime une modification importante du microclimat urbain. Avant tout c'est principalement la qualité sanitaire de l'air des villes qui a été améliorée. Cette modification se réalise par un certain nombre de transformations des éléments de la forme urbaine qui étaient jusque là source d'insalubrité. Cette période va correspondre au siècle des « Lumières »<sup>25</sup>.

Contrairement à la période médiévale où seul le choix des situations spatiales les moins malsaines était possible, il est désormais question d'interventions qui sont autant « d'ajustements »<sup>26</sup> de la forme urbaine aux conditions de salubrité et que nous qualifions comme étant des ajustements morphologiques. Nous allons insister, en ce qui suit, sur les interventions qui visaient explicitement une amélioration du microclimat urbain. Améliorations qui traduisent essentiellement une volonté de faciliter l'accès de l'air, du soleil et de la lumière naturelle dans les espaces urbains et les habitations et d'éliminer les sources malsaines ainsi que réduire l'humidité qui caractérisait les espaces de cette époque. Ces interventions ne prennent place à Nantes, comme la plus part des villes de Province, qu'à partir de la première moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle avec la systématisation de règlements urbains explicitement « salubristes » à l'ensemble des espaces de la ville.

C'est souvent le terme « embellissements » qui est avancé par les historiens pour traduire les différents projets de transformation de la ville à cette époque. Répondant à la fois à des préoccupations esthétiques, pratiques et politiques, les projets d'embellissement regroupent des traités de police, des textes royaux et des cahiers des charges de grands travaux urbains. Selon Harouel, « *Le terme d'embellissement précède et annonce ainsi celui d'urbanisme* » [HAROUEL 1993]. Le processus de transformations urbaines résultant de ces « embellissements » qui va inclure les interventions visant la régulation de l'atmosphère urbaine, s'est opéré sur plusieurs décennies voire des siècles.

J.L.Harouel [HAROUEL 1993] définit trois catégories d'objectifs qui ont progressivement généré ces embellissements :

- *Pratique* : pour garantir de meilleures conditions de circulation et une fluidité de l'air, les rues sont redressées, alignées puis élargies et de grands boulevards sont créés dans les tissus urbains existants. Pour faciliter l'évacuation des eaux pluviales et des eaux usées et isoler l'air des exhalaisons pestilentielles des sols, on insiste sur le bon pavage des rues. Les fossés sont, au même titre, comblés et les cours d'eau canalisés, pour accélérer le mouvement des eaux et canaliser toutes les évacuations hors de la ville.
- *Esthétique* : la ligne droite devient un critère de « beauté » des rues. En plus de l'alignement des rues existantes sous les contraintes des tracés urbains, c'est dans les nouvelles extensions urbaines ou dans la reconstruction des villes comme Rennes que le tracé linéaire des rues trouve son expression la plus aboutie. Ce sont le plan en damier aux îlots presque carré ou encore le tracé en

---

<sup>25</sup> « Nulle période n'est autant un commencement et une fin. Commencement de la croissance soutenue, fin de la société traditionnelle où la connaissance et l'éthique se transmettaient par voir-faire et ouï-dire, [...] ». Cette époque signe ainsi l'arrivée d'une conscience critique des traditions, mais avec tout de même, dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, un certain respect des anciennes structures, au sens où « elle introduit un progrès et non un bouleversement » [CHANU 1982].

<sup>26</sup> Ce terme a été déjà évoqué par Jean-Pierre Péneau dans sa thèse sur les ajustements climatiques de la ville au siècle des Lumières [Péneau 1998]

étoile avec ses places circulaires qui ont le plus de succès. La « façade urbaine » devient tout aussi importante que celle des édifices. Elle fera l'objet de prescriptions et de concours. La façade régulière viendra même se superposer à des édifices médiévaux comme à Nantes, Orléans ou Toulouse. Enfin, ce seront les jardins et promenades qui feront la beauté des villes. Projetés sur les anciens remparts, les promenades font partie des arguments esthétiques des plans d'embellissement.

- *Politique* : la principale production spatiale de l'urbanisme politique, selon J.L.Harouel, réside dans les places royales (comme les places Louis XV et Louis XVI dont seule celle de Nantes fut réalisée) présentes dans les villes françaises les plus importantes. La création des grandes voiries qui traversent les villes sous la forme de « grandes percées » sont à leur tour considérées comme le fruit d'une décision politique relevant du pouvoir central.

Il nous faut cependant distinguer les embellissements projetés et restés au stade de la conception de ceux qui se sont réalisés. Les premiers nous renseignent sur les idées de l'époque et le modèle de la forme urbaine adopté par cette dernière. Ils sont le plus souvent plus explicites quant aux intentions salubristes. Alors que les projets réalisés traduisent des actions réunissant le plus de consensus possible, et souvent contraints par les structures bâties existantes et les pressions du foncier. Néanmoins ce qui se réalise des intentions salubristes reflète la capacité de ces dernières à induire des transformations urbaines.

Les transformations salubristes s'inscrivent dans deux intentions complémentaires : réduire les sources d'insalubrité et faciliter le renouvellement de l'air dans les espaces de la ville. En d'autres termes, on intervient sur les sources et sur le champs de propagation des nuisances et des paramètres microclimatiques.

Dès la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle on commence à s'interroger sur les possibilités de rendre sains les espaces urbains affectés par les sources malsaines. Dans ce cadre un certain nombre de concours sont lancés pour répondre à des questionnements similaires : « *Quels seraient les meilleurs moyens de procurer à la ville de Batavia cette salubrité de l'atmosphère qui y est empoisonné par les vapeurs de la rivière ?* »<sup>27</sup> ou encore « *Est il salutaire ou nuisible à la santé des hommes, de planter des arbres dans les villes, ou aux environs ; leurs exhalaisons épurent-elles ou infectent-elles l'air ?* », se demande l'Académie de Toulouse en 1782. L'intervention sur le microclimat urbain va peu à peu se généraliser :

« [...] tout nanti cherche à réduire l'humidité de son habitat. Le pavage des rues et la construction de fosses d'aisances contribuent à réduire les dépôts d'immondices intra-muros, tandis que les populations des grands centres économiques s'adonnent à des métiers moins polluants, laissant aux campagnes le soin de pousser d'avantage la préparation des matériaux ; l'élite urbaine goûte le bon air des promenades et des jardins publics. La grande ville s'épure et se dégage subrepticement de ses fanges. La putréfaction qui avait sa richesse et celle de la nation va être écartée, éliminée, réduite ».<sup>28</sup>

## 2.1. Assainissement des surfaces malsaines

La plupart des émanations malsaines se situent à la surface de la ville. Les surfaces des rues, des fossés et des murs étaient les principaux supports de ces émanations. La stagnation des eaux des fossés et parfois des cours d'eau transformait ces derniers en des réceptacles de toutes les matières rejetées par la ville. Les surfaces des rues constituaient, avant l'instauration de la police sanitaire au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle, des dépôts permanents de matières diverses provenant des habitations. Les surfaces des murs fixaient à leur tour les émanations provenant de ces rejets. Toutes les surfaces des vides urbains contribuaient à cet état malsain de l'air.

<sup>27</sup> Question posée par la société de Harlem en 1778. Cité dans [Guillerme 1990].

<sup>28</sup> [Guillerme 1990].

La première des solutions consistait donc à éliminer ces sources potentielles de nuisances. Paver les sols et renouveler périodiquement le crépis des murs ou encore combler les fossés et canaliser les cours d'eau pour accélérer leur mouvement sont devenus les principales interventions qui visaient à réduire l'impact de ces différentes surfaces de la ville sur la santé.

### 2.1.1. Minéralisation du sol des rues et renouvellement du crépi des murs

Premier dispositif contribuant à l'assainissement de l'air des villes, le pavage des rues. Il a comme première tâche de couvrir la surface des sols des rues et constituer ainsi une barrière entre ce qui deviendra désormais un sous-sol et l'air des rues.

*« Le plus archaïque des impératifs de cette hygiène désodorisante consiste à tenter d'isoler l'espace aérien des émanations telluriques. Interrompre le flux des souffles plutoniens, se protéger des remontées, empêcher l'imprégnation du sol [...] Partout où le dessèchement se révèle impossible, il importe de noyer les vases, de submerger les terribles fissures et d'éviter ainsi l'échappement des effluves arachnéens qui s'en dégagent ».*<sup>29</sup>

Le pavage équivaut donc à une barrière qui tente de séparer le sous-sol, insalubre et puant, des mouvements d'air qui risquent de propager les propriétés malsaines du sous-sol vers le reste des espaces de la ville. La technique du pavage qui remonte à l'époque romaine, acquiert ici une autre tâche que celle liée exclusivement au besoin de faciliter les déplacements. Dans les villes, à climat humide, c'est l'impératif d'isolement de la souillure du sol qui devient d'actualité. Le pavage facilite aussi le lavage des sols à grande eau. Les alentours des marchés ont été, pour cela, les premiers à être systématiquement pavés.

A Paris c'est le roi Philippe Auguste qui fait paver les premières rues de la ville à la fin du XII<sup>ème</sup> siècle :

*"Philippe Auguste, retenu alors quelques temps à Paris par les affaires de l'Etat, s'approcha d'une des fenêtres de son palais [...] Des chariots qui traversaient, en ce moment la Cité, ayant remué la boue, il s'en exhala une telle puanteur que le roi ne put y tenir. Dès lors, il forma le projet d'un travail bien ardu, mais nécessaire, et qu'aucun de ses prédécesseurs n'avait osé entreprendre, à cause des grands frais et des difficultés que présentait son exécution ; il convoqua les bourgeois et le prévôt de Paris [...] il leur ordonna de faire paver toutes les rues et places de la ville, avec de fortes et dures pierres."*<sup>30</sup>

Mais la réalisation du pavage va être lente et c'est principalement au XIV<sup>ème</sup> siècle que l'opération s'effectuera le plus. Au XVI<sup>ème</sup> siècle on entame déjà le rétablissement et la réparation du pavé des rues à Paris. Le pavement selon l'endroit de la rue où il se trouvait était de qualité différente ; il était renforcé au milieu. Les charrues passaient au milieu de la rue et usaient la surface davantage que le passage des piétons qui se faisait plus près des maisons. A partir de 1782 à Paris, on définit pour la première fois deux zones de circulation piétonne de part et d'autre de la rue, par l'introduction d'un nouveau dispositif : le « trottoir ». Distinguant le piéton de la circulation charretière, ce dispositif permet de réduire la surface devant être nettoyée dans la rue pour faciliter le déplacement [CORBIN 1986].

Cependant le pavage introduit un dilemme :

*« S'il gêne la remontée des puanteurs, il interrompt l'infiltration, il retarde le lessivage des sols par la pluie; il empêche le renouvellement des eaux souterraines et donc l'élimination de l'infection passée. En bref, il favorise la stagnation ».*<sup>31</sup>

---

<sup>29</sup> [CORBIN 1986].

<sup>30</sup> D'après la "Chronique" de l'abbaye de Saint-Denis à l'année 1186.

Cité dans : <http://www.philippe-auguste.com/ville/pavage.html>.

La datation des premiers pavages de rues en France remonterait à l'année 1184, selon un texte que l'on a retrouvé aux archives municipales de la ville de Nantes datant du XV<sup>ème</sup> siècle. Voir [AMN. DD 293].

<sup>31</sup> [CORBIN 1986].

Alternative à ce dilemme une forme adéquate du pavé. Robert Favre [FAVRE 1977] considère un certain Berthelet de Barbot (membre du Ludovicée de Montpellier, de l'Académie de Rome et du collège des médecins de Lyon) comme l'un des réformateurs contribuant à façonner la rue « moderne ». Ce dernier a minutieusement exposé les méfaits du pavage traditionnel, fait de « *cailloux pointus, dont les plus gros ont trois pouces de diamètre* ». Cette forme rend les boues persistantes et le lavage des rues difficile.

L'Abbé Bertholon (physicien d'origine Lyonnaise), consacre plus de la moitié de son ouvrage intitulé, « *De la salubrité de l'air des villes et en particulier des moyens de la procurer* », à examiner le meilleur pavage en pierre et la figure particulière de chaque pavé. Il conclut pour des prismes équilatéraux, triangulaires, carrés ou hexagonaux<sup>32</sup>.

Ce n'est pas uniquement la surface du sol qui fait l'objet de recommandations et prescriptions sanitaires. La conscience hygiéniste va aussi conduire à la « rénovation » des façades de bâtiments. Les propriétaires ont obligation à Nantes, comme c'est le cas pour d'autres villes, de « *remettre à neuf les façades tous les dix ans* ». On encourage donc le renouvellement du crépi des murs situés sur les rues :

*« Les hygiénistes, contre la lepra domorum, encouragent à faire tomber le vieux crépi et le renouveler, piquer les murs, enlever les briques en contact direct avec le sol, car elles s'imbibent des substances putrides mélangées à la terre. Crépir, enduire, peindre, blanchir les murs, les voûtes et les boiseries, c'est se cuirasser contre le miasme. Ainsi se justifie le succès du plâtre qui se révèle un agent efficace de lutte contre l'infection ».*<sup>33</sup>

Après le pavage et son renouvellement, la dernière transformation qui a concerné le sol des rues est celle qui a consisté au XX<sup>ème</sup> siècle à goudronner les chaussées urbaines. Parmi les objectifs affichés de cette transformation il existe une que l'on peut attribuer à une intention salubriste : *c'est la réduction des poussières*. La multiplication du nombre des voitures au début du XX<sup>ème</sup> siècle, va en faire une problématique de l'aménagement urbain. Le premier congrès international de la route réuni à Paris en 1907 définit ces nouvelles problématiques. La lutte contre la poussière prend une part importante devant les effets réciproques entre la chaussée et les véhicules. L'objectif est assez clair, réaliser une chaussée « saine et durable ». Mais le goudronnage ne se réalise pas rapidement. Il faudra attendre par exemple le deuxième quart du XX<sup>ème</sup> siècle pour assister au goudronnage d'un nombre important de chaussées dans l'Ouest de la France. [HARISMENDY 1990]

### 2.1.2. Comblement des fossés et canalisation des rivières

Les fossés qui entouraient beaucoup de villes françaises, ainsi que les cours d'eau qui traversaient parfois les centre intra-muros, comme à Nantes, constituaient une source importante d'insalubrité de l'air des villes qu'il fallait aussi éliminer. Les premiers sont des dispositifs militaires de protection contre les invasions, alors que les seconds permettaient la survie économique des villes par les échanges maritimes.

Avec l'éloignement des menaces de guerre, les remparts des villes sont abattus vers la moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, et à leur place apparaissent des boulevards plantés d'arbres :

*« A Estampes, entre 1833 et 1840, à Noyon entre 1835 et 1845, à Troyes entre 1835 et 1860, à Chartres de 1838 à 1847, à Amiens de 1835 à 1870, les murailles sont presque totalement abattues et noyées dans les fossés ».*<sup>34</sup>

<sup>32</sup> [FAVRE 1977, pp. 155-156].

<sup>33</sup> [CORBIN 1986].

<sup>34</sup> [GUILLERME 1990].

La destruction des remparts ainsi que le comblement des fossés vont d'abord contribué à transformer les canaux et les cours d'eau internes aux villes, en des dépôts d'immondices et de matières diverses. Leur comblement ou leur canalisation pour accélérer le cour de l'eau devenaient donc urgents.

Dans le contexte hygiéniste de l'époque, les surfaces de ces canaux et cours d'eau intra-muros vont être remplacées par des surfaces plus propres. Ils seront ainsi à leur tour peu à peu recouverts. A Chalon, le *Nau* est voûté en 1862 ; à Troyes les fossés de la vieille ville sont enterrés en 1865 alors que les canaux intra-muros creusés au XII<sup>ème</sup> après avoir été privé de leurs blanchisseries, de leurs tanneries et de leurs boucheries ont été définitivement supprimés vers 1836 ; à Rouen le *Robec* et ses dérivations sont recouverts entre 1874 et 1878. Aux conseils de salubrité départementaux<sup>35</sup> qui pressent de couvrir les canaux, les agents voyers vont trouver dans le curage fréquent et la canalisation des cours d'eau pour accélérer leur cour une alternative au comblement. Bruno Fortier souligne dans ce sens la multiplicité des projets destinés à contrôler et à accélérer le mouvement des eaux en imposant par l'intermédiaire des quais un flux forcé aux masses d'eau [FORTIER 1977]. Il faudra ainsi attendre le XX<sup>ème</sup> siècle et l'après guerre pour assister à l'enterrement définitif du réseau hydrographique intra-muros. [GUILLERME 1990]

Les fossés et les remparts qui délimitaient la ville intra-muros vont être transformés en des espaces de promenade et de verdure synonyme, non pas des propriétés malsaines de l'air mais de lieux où, comme à Amiens : « *Souvent on se promène sur les anciens remparts pour respirer l'air pur...* »<sup>36</sup>

Cette description des abords d'Amiens à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle s'appliquerait aussi à d'autres villes françaises.

*« Passé la première moitié du XVII<sup>ème</sup> siècle, les fortifications urbaines perdent toute utilité immédiate. La longue paix antérieure et la puissance des armées françaises rejettent dans l'oubli ces vastes espaces que les municipalités habillent de verdure. Des allées d'ormeaux et de tilleuls agrémentent les remparts [...] .A la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle on ne se borne plus à la suppression de quelques portions de muraille. Sur le conseil des médecins, les intendants veulent combler les fossés de leur capitale. Les remparts et les énormes fossés sont devenus inutiles, incommodes et même périlleux entourent la ville du côté des terres ; les pierres servent à élargir les quais [...] L'objectif que se sont fixés les réformateurs à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle se réalise : la ville respire et se dynamise grâce au bon air de ses boulevards »*<sup>37</sup>

### 2.1.3. Drainer en sous-sol les eaux de surfaces

Arlette Farge et Pierre Saddy ont analysé le discours répétitif des ordonnances sanitaires qui visaient à intervenir sur le cycle des immondices au XVIII<sup>ème</sup> siècle. Ils définissent un processus constitué des faits suivants :

*« Tarir les ruisseaux qui courent au milieu de la chaussée (à partir de 1780) ; par l'interdiction des gouttières débordantes (à partir de 1764) alors que cela était tout au contraire favorisé dans les textes anciens pour faciliter le lavage « naturel des rues » ; prohiber le jet de matières et de vannes (à partir de 1750); Imposer le balayage des devants de porte, Assurer l'arrosage des promenades, des ponts et des quais »*<sup>38</sup>

Les surfaces du réseau hydrique de la ville vont subir d'autres transformations. L'ensemble de ce réseau était en surface, et il était le seul moyen de nettoyer les rues de la ville, et d'évacuer, par la

---

<sup>35</sup> Le deuxième Conseil est créé à Nantes en 1817 pour la Loire inférieure. Il comprend 12 membres : 3 médecins, 3 chimistes, 1 botaniste, 2 vétérinaires, 1 architecte, 1 ingénieur des Ponts et Chaussées, 1 manufacturier. L'équilibre n'est donc pas en faveur de l'artisanat. Les conseils de Salubrité sont institués dans tous les départements en 1851. [GUILLERME 1990]

<sup>36</sup> D'après DEVERMONT, « Voyage pittoresque...dans la ville d'Amiens », Amiens, 1784, p.38. Cité dans [GUILLERME 1990, p217].

<sup>37</sup> [GUILLERME 1990].

<sup>38</sup> [SADDY 1977, p.206].

même, toutes les eaux impropres produites par les citadins. Nettoyer, laver, et drainer étaient associés autour d'une tâche unique : évacuer l'immondice. Assécher la ville par le drainage permet d'éviter la stagnation des différentes matières dans les rues. Un drainage efficace facilite le nettoyage des surfaces, que la simple pente des voies ne suffit pas à garantir. L'assèchement progressif des rues deviendra peu à peu un objectif à atteindre. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, la police sanitaire à ce sujet se fait plus précise, elle vise à devenir quotidienne et en 1779 le nettoyage de Paris devient sujet de concours [CORBIN 1986].

Le réseau d'évacuation des eaux en surface qui se faisait dans l'axe des rues, tel qu'on peut le voir dans les iconographies et sur quelques rues aujourd'hui dans les secteurs sauvegardés des villes en France, sera remplacé par un système de drainage en sous sol dont l'élément principal est « l'égout capteur »<sup>39</sup>:

*« Le modèle technologique de l'égout capteur est le seul que reconnaissent les ingénieurs des Ponts et Chaussées : il est étanche, inodore et sa perte de charge est négligeable avec un fréquent curage. La salubrité est sauve ».*<sup>40</sup>

Cet enterrement du réseau hydrique va non seulement conduire à créer un réseau souterrain d'évacuation des immondices, mais il va considérablement réduire la surface d'eau en contact avec l'air et donc source d'humidité. Au vu de l'étroitesse des rues des centres intra-muros, ces surfaces d'eau qui regroupaient toutes les eaux produites par les habitations et les activités urbaines, en plus des eaux de pluie, contribuaient de manière considérable à l'humidification de l'air des rues. Les enterrer c'est aussi, en les additionnant à la disparition des surfaces d'eau des fossés et des canaux, réduire une part importante des sources d'humidification de l'air. En plus de l'assèchement des surfaces c'est donc, on peut le supposer, un assèchement de l'air qui s'engage peu à peu dans les espaces des villes.

Paris est la première ville à systématiser un système d'assainissement souterrain dans ses rues. « Le tout à l'égout » va en effet être adopté par Haussmann. Le réseau parisien passe de 37 km de canalisations en 1824 à 130 km en 1850 et à 560km en 1871. La loi de 1894 instituant le « tout à l'égout » comme système d'assainissement pour les villes françaises va pousser les villes de province à enterrer et améliorer leur assainissement qui est, comme on le verra à Nantes, défectueux dans la plupart des cas. Les conditions financières étant beaucoup moins importantes qu'à Paris vont conduire à un transfert du modèle parisien avec quelques adaptations aux données de chaque ville. Deux principaux changements sont opérés : contrairement à Paris, les canalisations ne seront pas visitables, et elles ne comporteront ni le gaz ni l'électricité, en prenant comme référence les expériences allemandes et anglaises. La loi d'urbanisme de 1919 et celle de 1929 vont enfin obliger les villes à effectuer des études d'assainissement accompagnant les plans d'aménagement des villes. [DUPUY et al. 1982]

## 2.2. Ventiler les vides urbains

La recherche d'une bonne ventilation constitue le deuxième axe important de la stratégie salubriste après la minéralisation des surfaces. Le flux qu'il importe avant tout de contrôler, c'est celui de l'air. Plus encore que drainer l'immondice, assurer la circulation de l'air et son renouvellement permettent justement de dissiper les vapeurs émanant du sous-sol ou des dépôts de surfaces. L'air était tellement immobile dans les rues médiévales, que l'on voyait se multiplier des

<sup>39</sup> Lorsque le pavage des rues de Paris est entamé par Philippe Auguste, on laisse au milieu des voies des rigoles d'évacuation d'eau. Le premier égout souterrain situé rue Montmartre, verra le jour en 1370 sous la tutelle de Jacques Aubriot prévôt de Paris. C'est seulement en 1850 avec l'arrivée du baron Haussmann et de l'ingénieur Eugène Belgrand que se développeront les égouts. En 1878 c'est près de 600 km d'égouts qui seront construits. Voir : [http://www.histoire-en-ligne.com/article.php3?id\\_article=197](http://www.histoire-en-ligne.com/article.php3?id_article=197)

<sup>40</sup> [DUPUY 1978].



ventilateurs dans les voitures des citoyens<sup>41</sup>. Changer l'air n'était pas seulement considéré, dans le contexte hygiéniste, comme une aide à la guérison mais : « *c'est véritablement guérir* » [PERROT 1975].

Découvrant les vertus du « ventilateur », dispositif dont la principale tâche est de créer un mouvement d'air, le savant anglais Stephen Hales<sup>42</sup> (1677-1761) souligne l'intérêt du mouvement atmosphérique qui :

*« A la faveur de l'agitation qu'il lui communique, purifie et désodorise l'eau corrompue par la stagnation ».*<sup>43</sup>

Sur le plan architectural, on connaît aujourd'hui assez bien l'influence exercée par les théories aéristes sur l'architecture et l'urbanisme des Lumières [PENEAU 1998]. En architecture, le fonctionnalisme et l'utilitarisme entrent en compétition avec la tradition culturaliste qui vise à perpétuer les ordres et l'architecture classique. Les auteurs de projets ont en effet l'ambition de :

*« Ne plus utiliser [...] que les seules ressources de l'architecture pour faire circuler et rejeter l'air »*<sup>44</sup>

Toute ouverture dans les édifices viserait à faciliter l'écoulement du vent dans les bâtiments :

*« L'arcade a désormais pour but d'autoriser l'aération de la partie inférieure des bâtiments et d'interrompre les remontées. Le portique assure la ventilation, tout en permettant au promeneur de se soustraire aux caprices de l'air. L'agrandissement des portes et des croisées, le système, si souvent prôné, des ouvertures opposées, l'élargissement des corridors, la critique des tours et des escaliers en colimaçon, manifestent l'accentuation des besoins aéristes ».*<sup>45</sup>

Cette prise de conscience de la possibilité de contrôle des mouvements d'air par des dispositifs architecturaux, va se transposer aux projets urbains et à l'urbanisme des Lumières La « ville saine » est décrite par l'Abbé Jacquin en 1762 :

*« La ville sera bâtie sur un coteau ; l'absence des hautes murailles permettra au vent de balayer les vapeurs et (les) exhalaisons » ; les métiers responsables des mauvaises odeurs (et souvent dépendantes d'une forte hygrométrie de l'air et d'une disponibilité de l'eau) (tanneurs, mégissiers, teinturiers) seront rejetés hors des murs, ainsi que les cimetières, les hôpitaux et les boucheries. On installera les manufactures dans les faubourgs. Des rues larges, de vastes places parsemées de fontaines faciliteront la circulation de l'air ».*<sup>46</sup>

A partir de 1770, un nombre important d'ouvrages sur « la nature de l'air », sa « corruption » et sa « restauration » sont publiés. La maîtrise de la qualité de l'air devient une nécessité, que les médecins et les architectes tentent de résoudre. Les premiers en situant les causes d'insalubrité et en trouvant quelques remèdes, et les deuxièmes en proposant des solutions préventives matérielles. Le but en clair **est** de trouver toute sorte de moyens permettant de purifier et renouveler l'air :

*« L'un des principaux points de la salubrité d'une grande ville comme Paris, c'est de favoriser la libre circulation de l'air qu'on y respire, en détruisant peu à peu tous les obstacles qui peuvent l'intercepter [...] et en éloignant des habitations tous les foyers de malpropreté et de corruption »*<sup>47</sup>

Une consultation est lancée à Lyon à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle pour définir « les moyens de corriger l'insalubrité de l'air ». Il en découle 12 prescriptions dont on peut rappeler les suivantes : choisir dans la ville (lorsque cela est possible) les espaces les mieux aérés ; faciliter le ruissellement des eaux surtout dans les rues étroites, où la surface de l'écoulement peut vite couvrir une part importante du sol ; multiplier les fontaines qui devraient faciliter le nettoyage des rues, laisser une

---

<sup>41</sup> [FORTIER 1977]

<sup>42</sup> Description du ventilateur, cité dans [CORBIN 1986].

<sup>43</sup> [CORBIN 1986].

<sup>44</sup> [BEGUIN 1977].

<sup>45</sup> [CORBIN 1986].

<sup>46</sup> [CORBIN 1986].

<sup>47</sup> J de Horne, Mémoire sur quelques objets qui intéressent plus particulièrement la salubrité de la ville de Paris (Paris, 1788), p.1. Cité dans [ETLIN 1977, p. 125].

libre circulation de l'air et faciliter cet écoulement par des percées transversales entre les rives des deux cours d'eau, changer le pavé des rues et donner une pente suffisante aux ruisseaux en les mettant sur les côtés plutôt qu'au milieu des rues en choisissant la forme du pavage la plus adaptée [Favre 1977].

Ces idées trouvent des échos chez les architectes de l'époque. C.N.Ledoux reproche à la rue étroite sa dangerosité pour la santé :

*« Le mur opposé est si près qu'il comprime les poumons, restreint les facultés et répercute les souffles contagieux qu'il renferme »<sup>48</sup>.*

Mais, avant d'évoquer, dans le troisième partie de ce chapitre, les idées utopistes du XIX<sup>ème</sup> siècle sur les villes « saines » (dont l'un des objectifs est « aériste » et dont les principes seront pour la plus grande partie suivis par les architectes et urbanistes modernes) voyons de plus près quelles transformations cette prise de conscience des bienfaits de la ventilation va engendrer sur le cadre bâti.

### 2.2.1. Alignement des rues :

L'alignement des rues est la première disposition relative aux transformations salubriste planifiées de la forme des espaces de la ville. Il relève d'une préoccupation à la fois *esthétique*, *hygiéniste* et *utilitaire*.

Une rue étroite et sinueuse contenant des parois avec des saillies entrave la circulation des biens et des personnes. L'air y est inerte et le soleil accède très rarement aux parties basses de la rue. Mais, il reste difficile selon la conclusion de J.L.Harouel de distinguer l'hygiène de l'utilité dans les intentions des projets d'alignement.

*« Le bon et le beau se mêlaient intimement dans le processus de rationalisation des tracés urbains en cours au XVIII<sup>ème</sup> siècle »<sup>49</sup>*

La simple vue du ciel était presque une exception dans la ville médiévale. A Paris, au XVIII<sup>ème</sup> siècle, on veut donner au citadin la possibilité de « respirer un air libre, de voir enfin le ciel et de jouir de la lumière », dans les jardins des Tuileries.<sup>50</sup>

De façon générale on peut qualifier les transformations dues aux préoccupations de salubrité urbaine à un agrandissement progressif du vide au dépend des surfaces bâties. Dans la reconstruction de la ville de Rennes après l'incendie de 1720, on le voit bien dans les plans, les nouveaux alignements imposent des rues droites et larges contrastant avec les tracés anciens (fig. 1.2).

*« Les rues étaient fort étroites et les maisons bâties en bois étaient si élevées, que les rayons du soleil ne pouvant pénétrer dans les rues, elles étaient toujours fort humides et très sales »<sup>51</sup>*

<sup>48</sup> C.N.Ledoux, l'architecture considéré sous le rapport de l'art, des mœurs et de la législation, Paris, 1804, t. 1, p. 70. Cité dans [HAROUEL 1977, pp. 140].

<sup>49</sup> [Harouel 1977].

<sup>50</sup> Selon Sedillez, Discours [...] sur le projet de loi relatif à des embellissements dans les environs du palais et de jardin des Tuileries. Corps législatif, séance du 30 pluviôse an 12 (Paris, an XII), p.6. D'après [ETLIN 1977 ; pp.127].

<sup>51</sup> P. Baneat, "Le vieux Rennes", Editions FERn, 1972. p.23 ; cité dans :

[http://www2.ac-rennes.fr/crdp/doc/fondspe/fonds\\_regional/Rennesvillebois/Histoire/savoirsfaire.htm](http://www2.ac-rennes.fr/crdp/doc/fondspe/fonds_regional/Rennesvillebois/Histoire/savoirsfaire.htm)

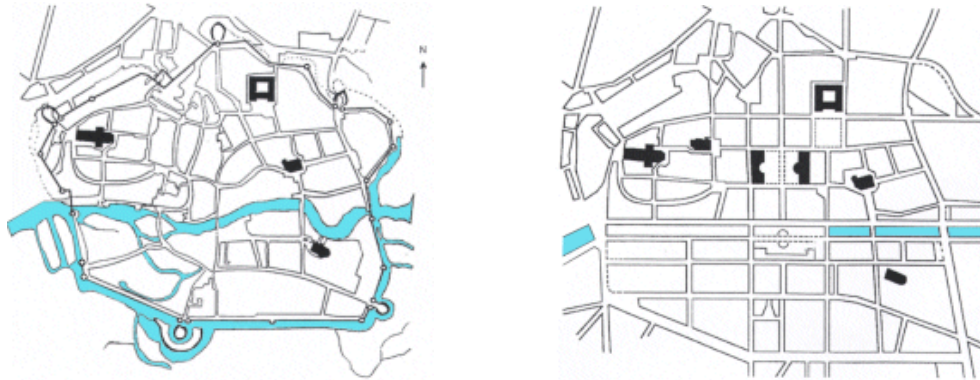


Figure 1.2 : Plan de la ville de Rennes avant et après l'alignement des rues

A Nantes, le tissu ancien, n'ayant pas fait l'objet d'une reconstruction complète comme à Rennes, va offrir une forte résistance à l'alignement des rues. La rue droite au sens propre ne sera créée qu'avec les percées. Avant cela, il a d'abord été question de « soustractions » partielles des parois de rues existantes.

En effet, l'alignement commence d'abord par une interdiction des saillies de rues. Il induira par la suite des actions plus importantes en remodelant ou interdisant non seulement les débords des parois mais l'implantation de celles-ci. Ainsi, on entreprend de dessiner la ligne droite « horizontale » après s'être aperçu que l'alignement « vertical » ne suffisait pas à la « fluidité » des déplacements urbains.

*« Les rues étroites, les maisons s'élargissent par le haut, en sorte que, en beaucoup de lieux, elles se touchent presque l'une à l'autre et à peine le jour entre-t-il dans les rues, car les seconds étages s'avancent en dehors sur les premiers et les troisièmes sur les deuxièmes et ainsi toujours se vont estreccissant »<sup>52</sup>.*

Même si la prescription de l'obligation d'un plan d'alignement avant toute nouvelle construction date de l'édit de 1607, cette obligation est réitérée plusieurs fois, comme à Nantes en 1743 et à Paris en 1783 [HAROUËL 1990].

La recherche de la ligne droite pour les rues suppose l'adoption d'une largeur « optimale ». Avant et après l'acceptation des villes d'un plan d'alignement général, pour des raisons opérationnelles, les largeurs sont fixées rue par rue, dans le but de causer le moins de dommage possible aux propriétaires. L'objectif de ventilation de rue, de même que les autres enjeux liés aux alignements, ont du mal à être atteints. La résistance des propriétaires des édifices fait en sorte en effet que les nouvelles largeurs définies par les plans d'alignement ne sont que rarement réalisées.

### 2.2.2. Elargissements et percées

Si à Nantes, le coût élevé des terrains qui induit à la densification des bâtiments, paraît être la principale raison du « rétrécissement » des rues (fig. 1.3), à Paris c'est cette même raison foncière qui est mise en avant pour faire contribuer les riverains au financement des retranchements pour élargir les rues :

*« A Paris, l'arrêt du conseil du 20 mai 1669 autorise la ville à procéder à l'élargissement de la rue Saint-Roch et précise que les indemnités seront supportées pour un quart par les propriétaires mêmes des constructions « retranchées », en raison de la plus-value que recevront les portions restantes de leurs anciennes propriétés, et pour les cinq huitièmes par les propriétaires des maisons non retranchées de la rue, le dernier huitième étant réparti sur les propriétaires des rues avoisinantes ».<sup>53</sup>*

<sup>52</sup> DUBUISSON-AUBENAY, extrait de "Le vieux Rennes", P. Baneat, Editions FERn, 1972. p.23 ; selon :

[http://www2.ac-rennes.fr/crdp/doc/fondsspe/fonds\\_regional/Rennesvillebois/Histoire/savoirsfaire.htm](http://www2.ac-rennes.fr/crdp/doc/fondsspe/fonds_regional/Rennesvillebois/Histoire/savoirsfaire.htm)

<sup>53</sup> Selon Arc. Nat., Q<sup>1</sup> 1102<sup>1</sup>. Cité par [HAROUËL 1977, p. 145].

La rue droite et large donne ainsi une valeur foncière aux maisons inspectant la rue mais aussi à l'ensemble des riverains. Elle facilite la circulation mais permet aussi de renouveler l'air et l'éclairage naturel des parties basses des rues. L'Abbé Laugier, cité par R. Etlin [Etlin 1977], fait remarquer, dès 1765, l'utilité microclimatique d'ouvrir des places dans la ville :

« [...] ne fût ce que pour les aérer, pour leur donner du jour, pour dissiper plus aisément l'humidité des rues et leurs mauvaises odeurs »<sup>54</sup>.

L'alignement des rues ne signifie pas seulement le tracé d'une ligne droite, mais aussi et surtout l'élargissement des rues. Il s'accompagne aussi, dans le cas de réaménagement des places, d'une « géométrisation » de leurs formes. De Vigny en 1755 et Ceineray en 1766, proposent dans leurs plans respectifs d'embellissement de la ville de Nantes, un agrandissement très important de la taille des places, tout en recherchant la forme la plus régulière possible dans les tracés (fig. 1.4 et 1.5). Cette différence dans le tracé des places et des rues dans le centre de Nantes est clairement représentée par Pierre Lelièvre [LELIEVRE 1988] dans sa comparaison entre les places « médiévales » et celles proposées au XVIII<sup>ème</sup> siècle (fig. 1.6 et 1.7).



Figure 1.3 : Rue du port au Vin, quartier du commerce (exemple de rue étroite encore existante L=4,5m)

La forme la plus extrême liée à l'élargissement des rues est sans doute la création des percées dans les centres anciens des villes. L'exiguïté des rues de ces derniers va en effet pousser le pouvoir central à imposer la création de voies très larges, traversant les villes pour permettre un accès et une traversée aisés des centres villes.

Ces percées sont tracées dans les plans généraux d'alignement dont vont se doter à partir du début du XIX<sup>ème</sup> siècle la plupart des villes françaises. La loi du 16 septembre 1807 prescrit ainsi pour les villes d'une certaine importance l'établissement d'un plan d'alignement général. Les alignements ne sont plus définis au cas par cas par l'architecte voyer, mais rigoureusement fixés au préalable. Alors que pendant le processus d'alignement et d'élargissement des rues, il était question de « soustractions » progressives aux parois bâties qui bordaient les rues, dans le plan général d'alignement, ce n'est plus uniquement d'une « transformation » de vides existants dont il s'agit mais aussi de « la création de nouveaux vides ». [DARIN 1984].

De même que pour les alignements de rues, les percées, que l'on verra plus en détail dans l'histoire des transformations à Nantes, répondent à des objectifs complémentaires qui, comme le revendiquera Haussmann pour justifier la percée Nord-Sud de Paris (actuel Boulevard de Sébastopol), traduisent : « un triple besoin de la sécurité, de la circulation, et de la salubrité »<sup>55</sup>.

<sup>54</sup> Abbé M.-A. Laugier, Observations sur l'architecture, Paris 1765, p. 168. Cité par [Etlin 1977, p. 126].

<sup>55</sup> Cette déclaration d'Haussmann est évoquée dans son rapport sur la grande percée Nord-Sud datant de 1854. Il évoque comme critère de salubrité une volonté de « ... faire pénétrer l'air et la lumière au milieu de cette fourmilière humaine... ». [THIBERGE 2002, p.124].

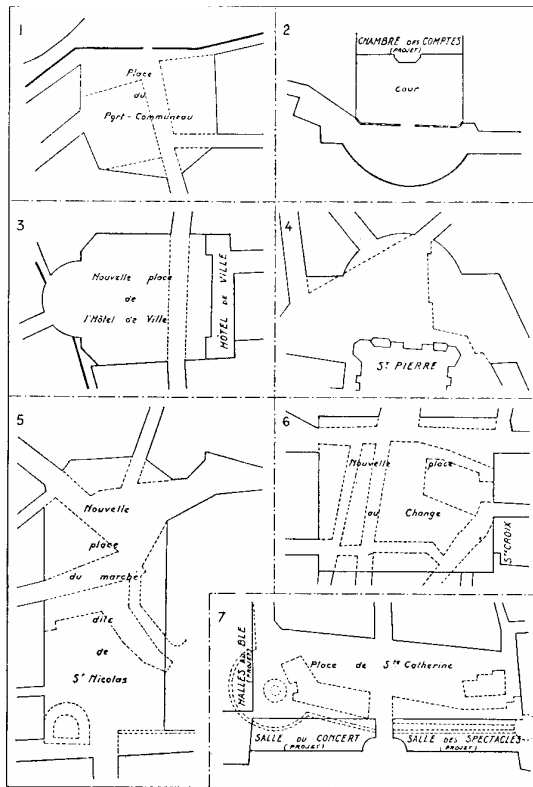


Figure 1.4 : Projets de places présentés par Vigny dans son plan général [LELIEVRE 1988, p172]

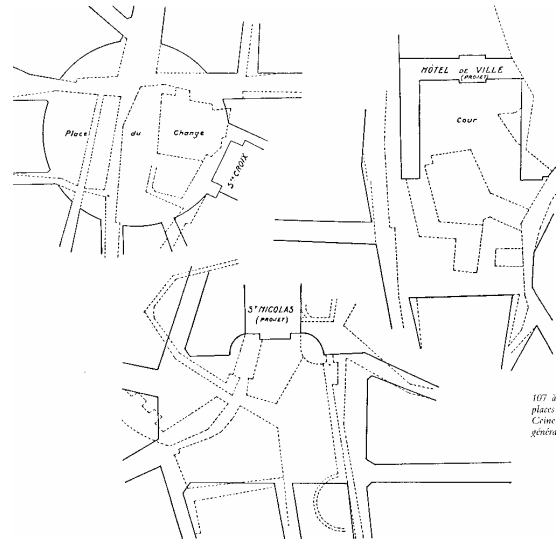


Figure 1.5 : projets de places présentés par Céneray dans son plan général. [LELIEVRE 1988, p 173]

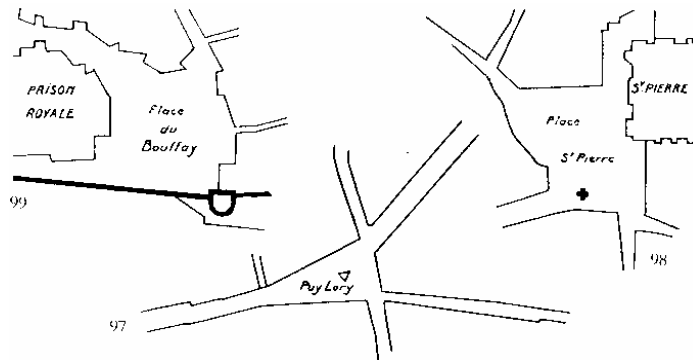


Figure 1.6: Exemples de places médiévales[Lelièvre 1988]

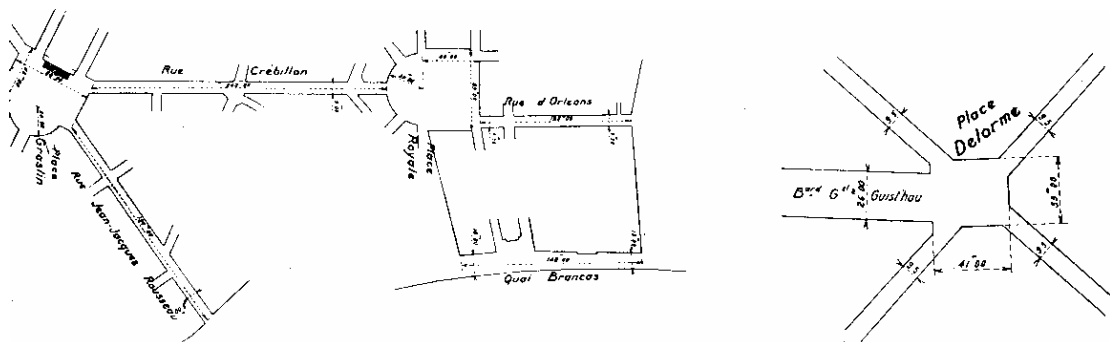


Figure 1.7 : Configuration typique de rues alignées du XVIII<sup>ème</sup> siècle [Lelièvre 1988]

### 2.2.3. Réguler le prospect des rues

L'arrêt du conseil d'état du 11 décembre 1862 (appelé arrêt Lemké) définit pour la première fois dans un texte réglementaire le rôle de la réglementation du rapport de la hauteur et de la largeur des rues :

« Les dispositions ont pour but d'assurer la circulation de l'air et de la lumière dans les rues et d'établir des garanties en faveur de la sûreté publique et de la sécurité des voisins. »<sup>56</sup>.

La limitation de la hauteur des bâtiments est abordée à Nantes dans un cahier des charges de vente de terrains, établi en date du 5 juillet 1866, fixant pour la première fois un gabarit maximum qui : « mesurée du trottoir ne pourra excéder 17,55m »<sup>57</sup>. Cela se traduira quatre années plus tard dans le règlement de voirie de 1870 mis au point au sujet de la grande percée de la rue de Strasbourg, soumise au modèle de la réglementation parisienne, qui s'appliqua à toutes les « grandes voiries » traversant les villes. Alors qu'à Paris la hauteur des bâtiments privés était déjà limitée dès 1784, les architectes de Nantes consultés sur le projet s'étaient opposés à la mesure, au moment où les immeubles gagnaient en hauteur ; et ils ne l'ont complètement admise que lors de la réforme du règlement en 1899 (fig. 1.9).

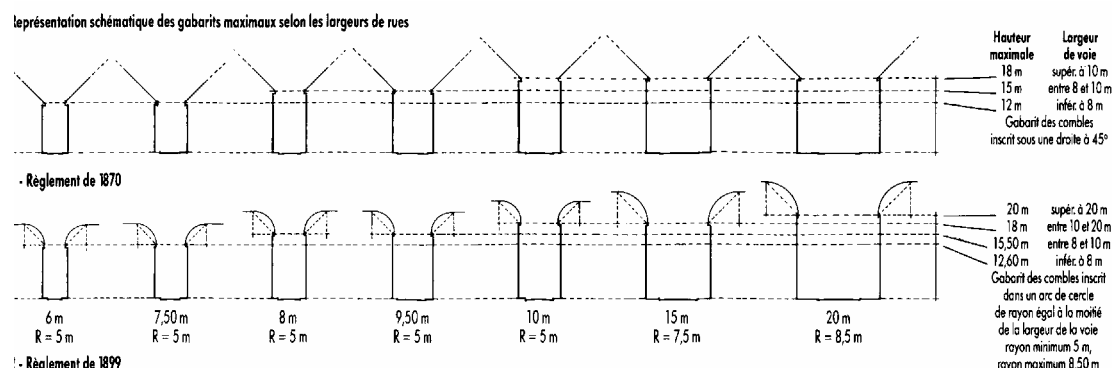


Figure 1.9: Représentation schématique des gabarits maximaux selon les largeurs de rues à Nantes : règlement de 1870 et celui de 1899 [ARDEPA 1991]

Un certain nombre d'ouvrages avaient, à la même époque, traité de l'influence directe du rapport hauteur/largeur de la rue sur l'éclairage et le réchauffement naturel des édifices. En 1887, E. Trélat<sup>58</sup> [TRELAT 1887] définit par exemple la largeur de la rue en fonction de la hauteur des bâtiments pour illustrer les différents angles d'ouverture du sol vers le ciel (fig. 1.8).

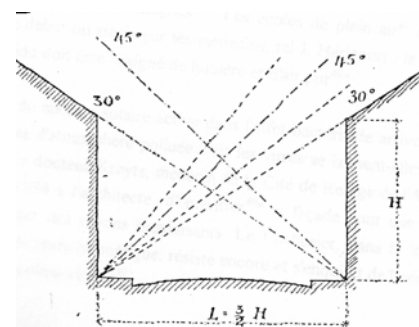


Figure 1.8: « Largeur de rue déterminée selon la portion profitable du ciel » (30° à 75°) [Trélat 1887]<sup>59</sup>

<sup>56</sup> [HAROUËL 1990].

<sup>57</sup> Cité dans [BIENVENU 1989, p.23].

<sup>58</sup> E. Trélat était parmi les rares architectes à participer activement aux travaux de la Société de Médecine Publique et de Génie Sanitaire [PENEAU ND].

<sup>59</sup> E. Trélat, « Moyens de pourvoir les bâtiments de lumière et de chaleur solaires », 1887, Questions de salubrité. Cité dans [TRAISNEL 1997, p.103]

L'ouverture au ciel étant déterminante pour la perméabilité des espaces urbains aux paramètres microclimatiques fait que la réglementation des prospects de rues est l'une des dispositions qui garantit le mieux une amélioration des apports d'air, de soleil et de lumière naturelle aux espaces urbains et aux habitations. Cela est, comme on le verra dans le chapitre suivant, une des notions les plus récurrentes dans les modèles physiques de climatologie urbaine qui prennent en compte la troisième dimension des fragments bâtis des villes.

Le rapport entre le prospect de la rue et la perméabilité aux paramètres microclimatiques des habitations est clairement mis en avant chez l'architecte français Henri Sauvage (1873-1932) au début du XX<sup>ème</sup> siècle. C'est en effet cet architecte qui va proposer une forme urbaine dont l'élément de base est un îlot en gradin visant à introduire un ensoleillement optimal à la fois dans les immeubles et dans les rues (fig. 1.10) [Péneau ND].

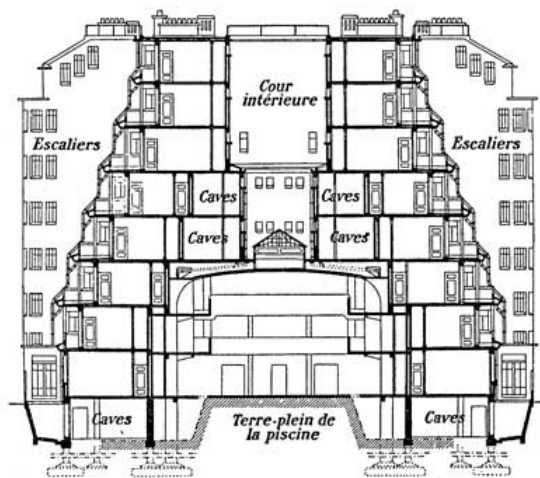


Figure 1.10: Coupe de l'immeuble du 13, rue des Amiraux ; réalisé entre 1922 et 1928 par H. Sauvage<sup>60</sup>

H. Sauvage définit très explicitement ses intentions hygiénistes dans la conception de cette forme urbaine qui en créant les gradins permettra « d'établir de véritables jardins ». On est ici devant une nouveauté typologique qui visent à investir la troisième dimension des rues. En effet Henri Sauvage et Charles Sarrazin déposent en 1912 un brevet d'invention pour cette innovation typologique<sup>61</sup>. Ils préciseront dans ce dernier que le cône d'air et de lumière très ouvert que confère cette nouvelle typologie permettra de « créer des maisons d'habitation très aérées et par suite absolument hygiéniques »<sup>62</sup>.

### 2.3. Un ajustement hygiéniste peu réalisé : « l'orientation du tracé urbain »

Nous avons noté un silence relatif quant à la question de l'orientation de rues dans les travaux traitant des transformations salubristes. Ce sont surtout les auteurs proches du domaine technique et scientifique lié à l'hygiène qui vont argumenter cet élément de la forme urbaine que les théoriciens et urbanistes du XIX<sup>ème</sup> siècle ont fort peu abordé. En 1910, F. Marboutin, enseignant d'hygiène et d'assainissement à l'Ecole centrale, s'appuie sur les observations d'un météorologue (A. Henry) pour mettre en évidence le rôle respectif des apports solaires directs et diffus, et conclure à la définition d'une orientation préférentielle assez proche de l'orientation sud. Il préconise une

<sup>60</sup> <http://mvs.ouvaton.org/Sauvage.htm>

<sup>61</sup> Le principe de l'immeuble en gradin sera tout au long au XX<sup>ème</sup> siècle repris, mais à l'échelle d'immeubles isolés.

<sup>62</sup> Cité dans : [http://www.infociments.fr/concours/pdf/B84\\_00\\_01\\_T.pdf](http://www.infociments.fr/concours/pdf/B84_00_01_T.pdf)

exposition de l'axe principal des immeubles faisant un angle de 60 à 75° avec l'axe Nord-Sud. Il va jusqu'à définir un schéma directeur d'orientation [PENEAU ND].

A.A.Rey, qui à son tour se préoccupe de la définition rationnelle des orientations des rues et des habitations, va conclure à une orientation opposée. En publiant un livre en collaboration avec un architecte et un astronome intitulé : « La science des plans de ville », il énonce dans l'une de ses parties : « les principes scientifiques de la salubrité des villes et les données astronomiques de l'insolation ». Les auteurs définissent « un axe héliothermique » présenté comme un compromis entre la composante thermique et la composante lumineuse du phénomène solaire. Cette proposition qui sera critiquée par G.Bardet<sup>63</sup> dans son article sur les approches solaires, est pourtant celle que va reprendre Le Corbusier pour définir ses principales références pour l'ensoleillement (fig. 1.11) [PENEAU ND].

Si en France la question de l'orientation de la trame urbaine n'est abordé qu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle, en Allemagne elle est problématisée dès 1824 avec le docteur Bernhard Christoph Faust. Ce dernier proposait en effet de régler les problèmes d'orientation et de dégagement des façades et défendait les bienfaits d'une orientation de celles-ci au Sud. Cette orientation présentait selon lui des avantages non seulement en terme d'hygiène et de confort mais aussi d'un point de vue psychologique ou moral (fig.1.12) [PENEAU ND].

La question de l'orientation se retrouve ainsi en France à partir de la première décennie du XX<sup>ème</sup> siècle dans un certain nombre de travaux, comme ceux de l'ingénieur des ponts et chaussées E.Joyant qui suggère une orientation préférentielle Nord-Sud pour les rues. Mais l'orientation de la trame urbaine ne peut être choisie que dans le cadre d'édifications nouvelles, c'est pourquoi on verra assez peu de réalisations s'inspirant de ces recommandations scientifiques. L'orientation des rues sera ainsi laissée de côté dans les projets de transformations urbaines, et sera compensée par un élargissement optimal des rues et une ouverture conséquente des fenêtres.

La question de l'orientation est indirectement abordé à Nantes à la moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Le règlement de 1943 annonce pour la première fois dans l'histoire des règlements de cette ville une nouvelle intention qualitative et une nouvelle disposition de la forme urbaine à Nantes :

« [...] disposer les constructions de sorte qu'elles soient ensoleillées le plus longtemps possible »<sup>64</sup>.

Sans pour autant fixer une orientation précise pour les constructions la question du choix de l'orientation fait donc son entrée ne serait ce que par l'intention dans les textes réglementaires de la forme bâtie.

#### 2.4. Deux ajustements à l'échelle des tracés urbains : « Paris et Barcelone »

Au-delà des ajustements qui concernaient des éléments partiels de la forme urbaine des villes, on trouve aussi au XIX<sup>ème</sup> siècle, des projets de transformations à l'échelle des tracés des villes qui répondaient à des préoccupations salubristes. Les transformations de Paris par Haussmann et les extensions de Barcelone par Cerda en sont des exemples parmi les plus importants. Ce qui est peut être moins connu dans ces projets, c'est l'intention hygiéniste sous jacente à ces projets. [Péneau ND]

<sup>63</sup> G.Bardet, « le facteur soleil en urbanisme », In Technique et Architecture, 1943.

<sup>64</sup> Règlement sanitaire, page 15, article 7 : règles générales de salubrité. Cité dans [BIENVENU 1989].



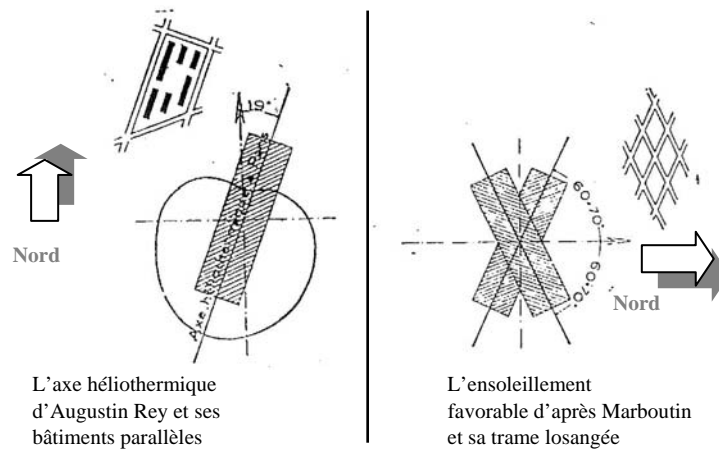


Figure 1.11 : Les orientations préférentielles selon A.Rey et F.Marboutin [PENEAU ND]

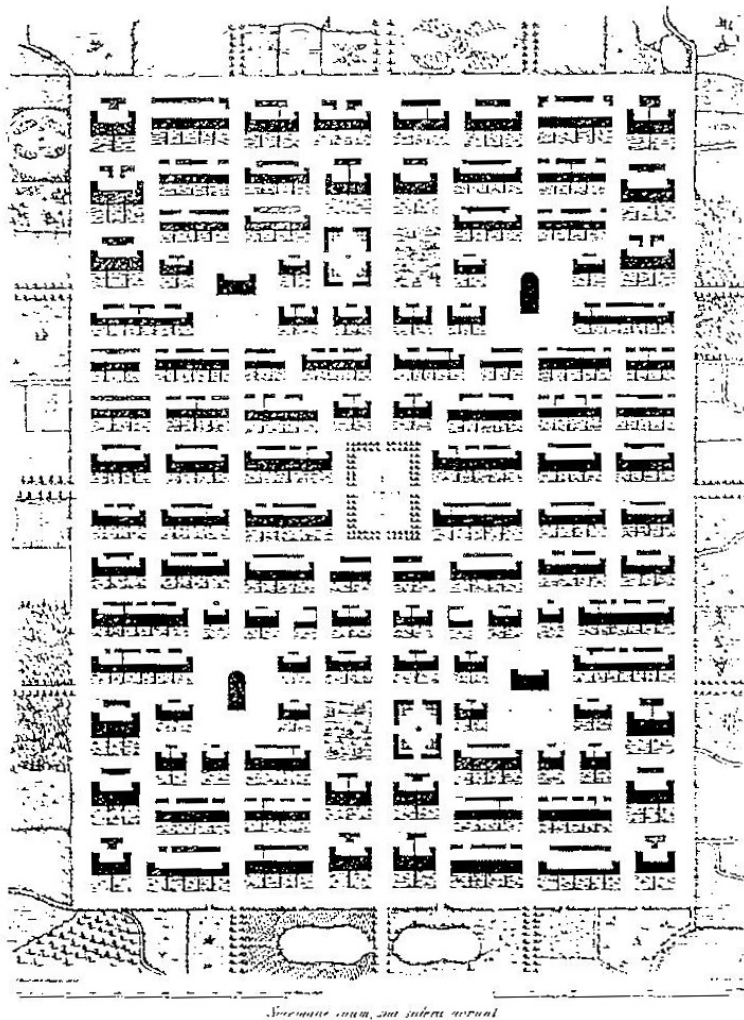


Figure 1.12 : Plan d'une ville idéale dessinée par le Docteur B.C. Faust en 1824 [PENEAU ND]

Avant les travaux de Haussmann<sup>65</sup>, Paris était une ville médiévale aux ruelles étroites, insalubres, malsaines et mal famées. Pour remédier à cette situation, le baron expropria, indemnisa, défonça, abattit et rebâtit sans compter. Les transformations de Paris vont durer jusqu'en 1870 et permettront la réalisation d'un programme de 165 km de voies nouvelles sur un total de 855. La largeur des voies passe en moyenne de 12 à 24 mètres dans l'ancien Paris et de 13 à 18 dans les arrondissements annexés en 1859. Les rues connaissent ainsi de nouveaux prospects (fig. 1.13).

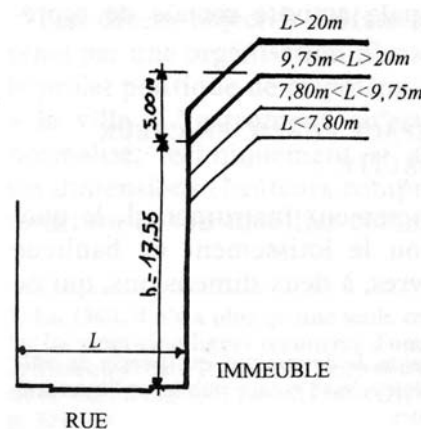


Figure 1.13 : Le gabarit des rues selon le projet de Haussmann [THIBERGE 2002]

Des zones de verdure avec des échelles spatiales décroissantes sont implantées autour et dans la ville. Des parcs sont créés dans les espaces périurbains (bois de Boulogne et de Billancourt), des espaces plantés agrémentent les promenades et des jardins sont créés à l'intérieur du tracé urbain. Enfin des arbres sont plantés dans les squares, les places et les rues de plus de 20m de large (fig. 1.14).

Les objectifs de ces restructurations du tracé urbain relevaient à la fois de préoccupations hygiénistes et fonctionnelles. En dehors du désenclavement des anciens taudis insalubres, il fallait aussi faciliter la circulation automobile. Mais l'argument salubriste est fortement présent dans les intentions d'Haussmann :

*« C'est dans mon œuvre une part aussi utile que les grands percements qui sillonnent la surface de la ville dans tous les sens et font pénétrer dans ses habitations l'air et la lumière, ces deux éléments essentiels de la santé publique »<sup>66</sup>*

Un deuxième projet significatif des aménagements urbains du XIX<sup>ème</sup> siècle est celui de l'extension de Barcelone prévue par l'ingénieur des Ponts et Chaussées Ildefonso Cerda (1818-1876). L'intention générale du projet de Cerda est d'abord politique et sociale. Ce dernier publie en 1867 son célèbre ouvrage : « La teoria general de la urbanizacion ». Il y précise qu'il veut arriver à une société démocratique et égalitaire. Le plan de Barcelone fut établi lors du concours de 1858 qui faisait suite à la démolition des remparts de la ville.

C'est dans le cadre de cette visée d'égalité sociale qu'il cherchera à donner un ensoleillement identique à toutes les habitations. Il choisit pour cela d'orienter la trame urbaine selon les bissectrices de l'angle formé par les parallèles et les méridiens terrestres. Les voies qui suivront les

<sup>65</sup> Les transformations de Paris qui sont généralement associées au baron Haussmann (1809-1884), ont été imaginées par Napoléon III après le coup d'état de 1851. Selon Haussmann c'est l'empereur lui-même qui dessina le schéma des grandes percées pour rénover la capitale. Mais c'est Haussmann, devenu préfet dès 1853, qui va mettre tout en œuvre pour réaliser ce qui était une idée sur un papier. [PENEAU ND]

<sup>66</sup> [PENEAU ND]

directions cardinales seront ainsi des diagonales par rapport à la trame des îlots d'habitation. Un îlot de 113 mètres de côté est le module de base de la trame urbaine. Le projet initial de Cerda prévoyait des îlots bâtis uniquement sur deux côtés des voies et comprenant deux pans ouverts parallèles pour faciliter l'accès de l'air et du soleil dans les habitations. Ces îlots comprenaient aussi une surface importante de jardin. Mais ces « précautions » salubristes de Cerda ne seront pas respectées dans les réalisations que feront ses successeurs.

Les réalisations à grande échelle des ajustements de la forme urbaine ont été assez rares. Haussmann, qui voulait appliquer ses idées à toutes les villes françaises s'est confronté à une opposition très forte. Le coût de telles transformations est très important. Paris est en quelque sorte l'exception qui confirme la règle des ajustements partiels de la forme urbaine. Quant à Cerda, il dessine un plan d'extension et non un projet de transformation d'un tissu urbain existant. Les ajustements de la forme urbaine restent donc pour la plupart des villes assez limités.

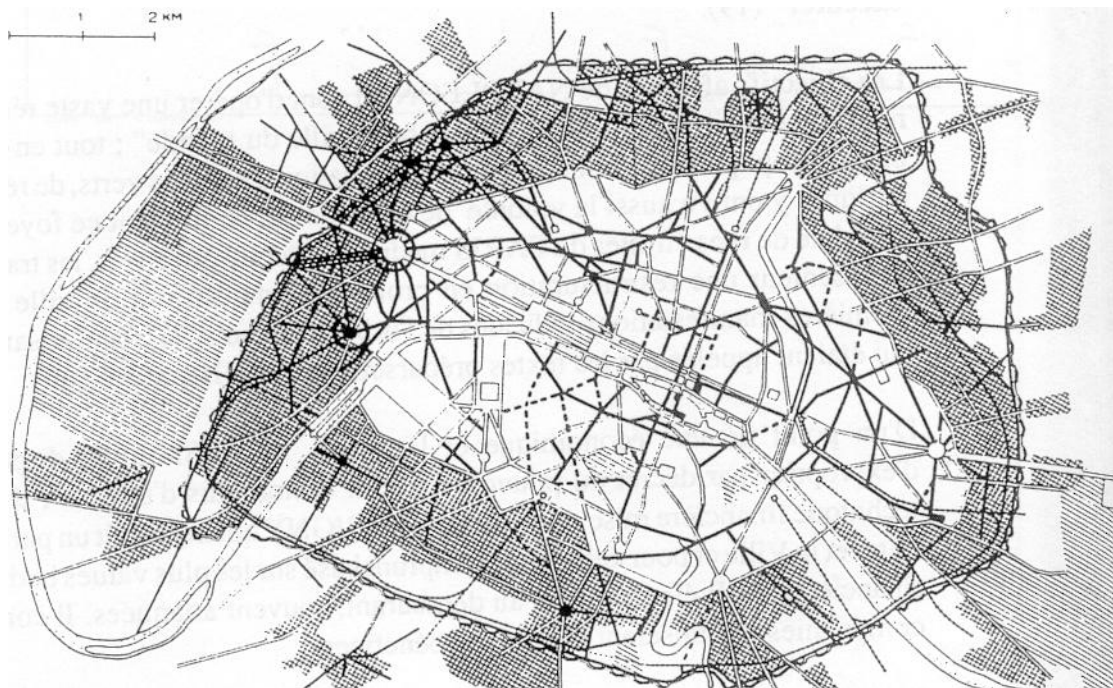


Figure 1.14 : Les percées et le réseau de voirie sous le second empire à Paris<sup>67</sup> [PENEAU ND]

## 2.5. Critique du modèle formel de la ville ancienne

L'un des constats qui vont conduire au refus de la forme urbaine de la ville ancienne et à l'apparition de nouvelles formes urbaines, est sans doute la difficulté de réalisation des ajustements salubristes des vides urbains existants. Ces ajustements étaient en effet confrontés à une situation antagoniste. La crise du logement pousse à la densification, alors que la recherche de salubrité à sa dé-densification. La spéculation foncière et le grand besoin de logements faisant suite à l'explosion démographique du XIX<sup>ème</sup> siècle<sup>68</sup>, freinent en effet les prises de décisions dans les villes de province. Les ajustements sont parfois tellement mineurs qu'ils ne sont guère efficaces.

Alors que dans la période pré-hygiéniste c'est la nécessité de protection militaire qui poussait à la densification du centre intra-muros des villes, au XIX<sup>ème</sup> siècle, on se retrouve devant un

<sup>67</sup> En blanc les rues existantes ; en noir les nouvelles rues ouvertes sous le second empire ; en traits réticulés les nouveaux quartiers ; en traits hachurés les espaces verts.

<sup>68</sup> Paris passe de 647 000 à 2 200 000 habitants entre 1800 et 1880 selon [Le Corbusier 1957].

dilemme. Il faut d'un côté densifier les fragments bâtis pour résoudre la pénurie de logements et de l'autre les dé-densifier pour assurer plus d'hygiène dans les espaces urbains et les habitations. En plus de cela la pression foncière limitait considérablement les interventions dans les centres anciens. Cette situation était donc propice aux « utopies » qui proposaient d'investir l'extérieur des villes. Puisque les ajustements s'avéraient insuffisants, on proposa donc de nouvelles formes urbaines qui répondraient à la fois aux besoins de densité et aux exigences de salubrité. C'est ce qui se fera tout au long de ce siècle. Les propositions fusent en partant de ces besoins réels et consensuels, tout en y intégrant les préoccupations de l'idéologie socialiste très en vogue à l'époque en raison de la situation des ouvriers dans les villes.

Les utopistes vont à partir de cela défendre l'idée selon laquelle la ville telle qu'elle existait était mauvaise et que seul un retour à la nature serait salutaire. En refusant d'améliorer la ville existante un grand nombre d'entre eux proposent de créer de toutes pièces de nouveaux agglomérats isolés en pleine verdure. Alors que d'autres, minoritaires, en réagissant à ces utopies suggèrent au contraire de transformer la ville existante afin qu'elle réponde aux nouvelles exigences techniques, sociales et hygiénistes de la révolution industrielle. Mais tous s'accordent sur la nécessité de modifier le modèle formel de la ville ancienne en y introduisant plus de nature (synonyme d'hygiène). Pour ces idéologues de l'urbanisme du XIX<sup>e</sup>, de Owen et Fourier à Marx et Engels, l'avenir de l'urbanisme semble donc être justement dans « le désurbanisme », qui se traduira par une sorte de synthèse entre la ville et la campagne [RAGON 1986].

Parmi ceux qui ont proposé de faire la ville hors la ville, Michel Ragon distingue dans son ouvrage sur l'histoire de l'urbanisme moderne deux courants différents. Le premier préconise un urbanisme rationnel basé sur une maîtrise des fonctions urbaines en mettant dans l'oubli le modèle formel de la ville ancienne et le deuxième sans être systématiquement opposé à la ville ancienne propose d'en construire une nouvelle en y introduisant plus de nature. Mais la ville de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle malgré les attaques dont font l'objet son centre ancien et ses banlieues, accusés d'être malsains, mortifères, incommodes, laids, incohérents, ségrégatifs et spéculatifs, gardera le modèle formel de la ville ancienne jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle. La réalisation d'un urbanisme rationnel, ne se fera qu'après les destructions de la première guerre mondiale.

Voyons à présent de plus près la place des préoccupations salubristes dans ces propositions « utopistes » et ce que proposent les urbanistes modernes en contrepartie des ajustements des éléments de la forme urbaine existante.

### 3. UNE NOUVELLE ECHELLE D'INTERVENTION : LES PROPOSITIONS DE L'URBANISME MODERNE

Il n'est pas de notre propos ici de revenir sur le contexte d'apparition du mouvement moderne, ni d'en exposer toutes les variantes. C'est là un sujet qui sort de notre objet de recherche. Nous voulons plutôt attirer l'attention sur les aspects récurrents posés par l'urbanisme moderne dans la régulation du microclimat urbain et qui ont été déjà formulés lors des travaux que nous avons qualifiés d'ajustements morphologiques. Là où d'autres verraient une rupture nous y décelons plutôt une continuité des intentions morphologiques répondant au besoin d'accessibilité de l'air, du soleil et de la lumière dans les espaces de la ville et les habitations. Nous verrons ainsi comment en rejetant la forme urbaine des centres anciens, les propositions modernes perpétuent le savoir-faire qui a conduit aux ajustements du XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècles. Pour conclure cette partie du chapitre nous évoquerons quelques projets urbains assez récents et leur prise en compte des formes urbaines modernes et anciennes.

Les discours de la période moderne, et cela à partir des utopies sociales du XIX<sup>ème</sup> siècle, donnaient une place importante à la question de l'hygiène et de manière plus précise au problème d'accessibilité du soleil, de la lumière et de l'air dans les espaces urbains et les habitations. Partant ainsi d'intentions assez proches de celles qui ont conduit aux ajustements successifs de la forme urbaine à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle, l'urbanisme moderne va pourtant proposer une forme urbaine nouvelle voire opposée à celle de la ville ancienne.

#### 3.1. Les villes « idéales » et la question de l'hygiène au XIX<sup>ème</sup> siècle

Le constat d'échec des ajustements de la ville ancienne à améliorer les conditions sanitaires de l'habitat

dans les villes conduisit à penser la ville comme projet. Tous sont d'accord devant un constat, l'explosion démographique, l'entassement des ouvriers et les bouleversements apportés par la révolution industrielle nécessitent de refaire la ville et repenser la forme urbaine existante. Les seules divergences concernent la manière de réaliser la nouvelle forme urbaine ?

Les villes idéales des utopistes s'articulent autour de deux conceptions différentes : une première plus anglo-saxonne proposera d'apporter des améliorations au modèle ancien de la forme urbaine, et une deuxième plus française défendra une opposition à ce dernier. Mais la plupart de ces propositions voient plutôt l'avenir des villes hors de la ville. Si ces idées sont principalement motivées par des idéaux sociaux il reste que la mise en forme de ces idées s'appuie aussi dans la plupart des cas sur une légitimation hygiéniste. Ces auteurs sont en effet conscients des dangers d'insalubrité qu'ils voient de leurs propres yeux dans la ville ancienne. Au moment où les villes connaissent des ajustements des surfaces et des espaces urbains, les auteurs qualifiés d'utopistes proposent donc de conquérir le territoire non urbanisé pour y concrétiser leurs idéaux parmi lesquels une atmosphère urbaine « saine ».

Pour illustrer l'emprise des questions d'hygiène sur la définition de ces villes idéales revenons sur les intentions de quelques auteurs influents sur l'urbanisme du XX<sup>ème</sup> siècle.

##### 3.1.1. Entre ville et campagne

Commençons par « le Phalanstère » proposé par Charles Fourier (1772- 1837). Il est défini comme la cellule de base de la société idéale voulue par Fourier et fondée sur l'association et la coopération des personnes. Laissons de côté les motivations socialistes et intéressons nous à la forme du Phalanstère. Vers 1820, Fourier composa l'un des chapitres de son grand traité de la

*Théorie de l'unité universelle* sous le titre : *Des modifications à introduire dans l'architecture des villes*. Ce qu'il propose, pour rompre avec l'agglomération du passé, c'est de l'intégrer à la campagne, et de mêler les activités des champs à celles de l'industrie. Il anticipe en quelque sorte l'idée des cités jardins élaborée trois quarts de siècle plus tard par Ebenezer Howard. Fourier propose de placer au centre le commerce et l'administration, puis l'industrie et enfin la ville agricole et il fixe la densité des habitants du phalanstère à 1600 personnes. Il définit la largeur des rues à 18 mètres et délimite la surface des places publiques à un huitième de la surface de la ville. Contrairement à la plupart de ses successeurs, en condamnant la forme de la ville ancienne, il récuse la solution de la ville en échiquier :

*« Une ville barbare est formée d'édifices assemblés fortuitement au hasard, sans aucun plan préalable, et confusément groupés entre des rues tortueuses, étroites, mal percées et malsaines. Telles sont en général les villes de France, où l'on trouve à peine un quartier neuf qui s'écarte du mode barbare. Les villes civilisées ont un ordre monotone, imparfait, une distribution en échiquier, comme l'île de Petersbourg, comme Philadelphia, Amsterdam, Londres neuf, Nancy, Turin, Marseille neuf, et autres villes que l'on sait par coeur, quand on en a vu trois ou quatre rues. On n'a pas le courage d'en visiter davantage, elles ont le don d'affadir et d'attrister la vue, et l'on préfère bien vite une ville barbare, si elle est un peu ornée et variée comme Paris » [Ragon 1986]*

Il préconise des « rues-galeries » couvertes pour relier les différentes parties ou zones du phalanstère. Ce qui est nouveau avec Fourier, ce n'est pas tant le dispositif de rue-galerie, puisqu'il existait depuis la ville médiévale, mais c'est la systématisation du procédé sur tout un plan de ville. Pour l'auteur il s'agit bien là d'un procédé de « climatisation » qu'il faut généraliser :

*« Le froid est insensible dans l'intérieur du phalanstère ; il y règne, dans tous les corps de logis, des galeries couvertes et chauffées à petit degré, au moyen desquelles on communiquera partout à l'abri des injures de l'air ». [Ragon 1986]*

L'auteur va se distinguer par une deuxième proposition, qui s'avérera pertinente après l'époque moderne, c'est son refus du déterminisme fonctionnaliste de l'art urbain :

*« [...] en ne s'occupant que de l'utile on n'obtient ni l'utile ni l'agréable. Il faut, pour entrer dans les vues de la nature, combiner l'utile et l'agréable, et obtenir l'un et l'autre ou rien ». [Ragon 1986]*

Fourrier n'est pas le seul socialiste à penser une ville idéale plus proche de la nature. En Angleterre Robert Owen (1771-1858), de même âge que Fourier, va proposer ce qu'il appelle « les Villages d'harmonie et de coopération ». Fourier aurait même accusé Owen de lui avoir pris ses idées sur le phalanstère. Ce qui nous montre bien le niveau de similitude des deux propositions. Ce que cherche à obtenir Owen c'est donner à ces villages « [...] tous les avantages offerts par les grandes villes tout en évitant leurs désavantages. ». Pour cela il propose de laisser les travaux pénibles et malsains aux machines et aux développements des sciences chimiques et mécaniques. [Ragon 1986]

Les intentions formelles et hygiénistes de Fourier vont être poursuivies en France après sa mort par Victor Considérant (1808-1893). Ce dernier en introduisant plus de rationalité dans les propositions de Fourier va définir une notion qui va revenir et influencer les villes modernes du XX<sup>ème</sup> siècle, c'est la notion de « cité-jardin verticale » qui induit par sa définition plus de vide dans les formes urbaines :

*« Demandez vous s'il vous serait plus économique et plus sage, pour loger une population qui devra s'élever à 1800 ou 2000 personnes, de construire un grand édifice unitaire ou de bâtir 350 à 400 petites maisons isolées ». [Ragon 1986]*

L'idée de ville jardin verticale on la trouve aussi chez un médecin anglais Benjamin Word Richardson (1828- 1896) dans une ville qu'il imagina et à qui il donna le nom de « Hygeia ». Le tracé de cette ville idéale dédiée à l'hygiène est principalement défini par deux rues traversantes d'est en ouest et une série de rues transversales plantées d'arbres. Richardson va proposer

d'implanter derrière les maisons une zone de verdure et de jardins. Il fixa la limite maximale de population d'une ville à 100 000 habitants et aucune des maisons ne pouvait dépasser quatre étages. Il conçoit même un élément répandu de nos jours, c'est la création de toits jardins définis comme des lieux de plein air privés où les habitants pourront cultiver des plantes et des fleurs.

E.Howard (1850-1928) est une des personnalités les plus marquantes de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. M. Ragon lui attribue « la première théorie scientifique de l'urbanisme moderne ». Au-delà des considérations socialistes de Howard il développe en 1889 un des principes de forme urbaines les plus connus à ce jour : « la cité-jardin ». Visant à effectuer une synthèse entre la ville et la campagne il donne la part belle aux surfaces vertes. Sur 2400 hectares réservés à la cité, 400 seulement sont destinés à la construction. Tout le reste est conçue comme une ceinture verte. Le modèle de la forme urbaine proposée par Howard est un plan radioconcentrique. Il récuse donc le plan en échiquier adopté par la plupart des « utopistes » de l'époque.

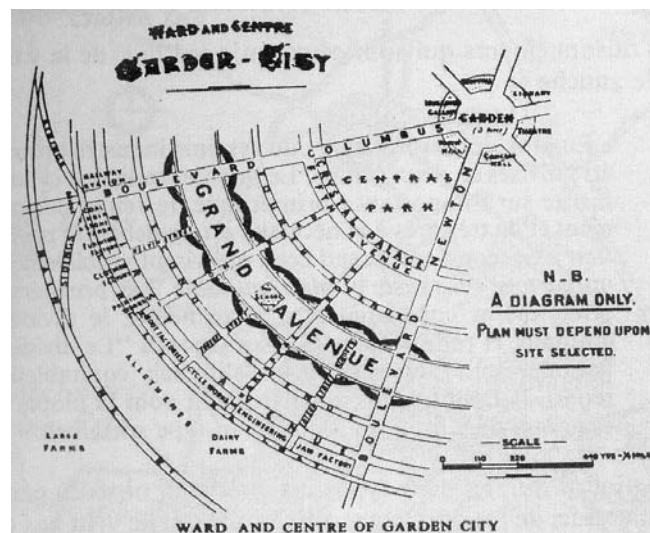


Figure 1.15 : Esquisse de la cité jardin par E.Howard [Ragon 1986]

Regardons de plus près ce qu'il propose (fig. 1.14) :

« Six magnifiques boulevards – chacun de 36 mètres de large – traversent la ville en partant du centre et la divisent en six parties égales, ou quartiers. Au centre, une espace circulaire d'environ 2,2 hectares est occupé par un beau jardin bien irrigué. Autour de ce jardin sont disposés les grands édifices publics... Tout autour du parc central – sauf à l'intersection des boulevards – circule une large galerie vitrée dénommée « Crystal palace », ouverte sur le parc..., il sert de jardin d'Hiver, ...sa forme circulaire le met à la portée de toute la population de la ville, l'habitation la plus éloignée étant au plus distante de 550 mètres ». [Ragon 1986]

Howard évoque donc comme Fourier l'idée de rues promenades couvertes pour permettre l'usage des espaces urbains même en temps de pluie. Howard préconise l'usage de l'électricité comme force motrice et réduit ainsi la pollution de l'air. Un des aspects novateurs de la forme urbaine préconisée par Howard est la mixité des fonctions urbaines, puisqu'il préconise de situer dans un même organisme l'habitat, le loisir, les études et le travail.

### 3.1.2. La ville fonctionnelle

Une autre conception des nouvelles villes répondant aux mêmes intentions sociales et hygiénistes, mais presque opposée à celle de Fourier et de Owen dans sa mise en forme, est celle que Etienne Cabet (1788-1856) nomme « Icarie ». Si Owen voyait dans la mécanisation quelques

avantages, Cabet la traduit de façon systématique en une standardisation et une répétition des mêmes bâtiments (à partir d'un modèle défini par concours) et des mêmes îlots coupés à angles droits avec comme seuls traits distinctifs les couleurs des portes et des fenêtres. Dans son ouvrage « Voyage en Icarie » publié en 1840, il écrit :

*« Toutes les rues que j'ai parcourues sont droites, larges, parfaitement propres, garnies ou plutôt de portiques à colonnades. Toutes les maisons que j'ai vues sont charmantes, toutes à quatre étages [...] Tous les bâtiments d'une même rue sont pareils, mais les rues sont différentes ». [Ragon 1986]*

La question de l'hygiène chez Cabet est très explicite. En effet l'ordre qu'il veut introduire dans la ville est au nom, certes de la circulation, mais aussi au nom des impératifs sanitaires :

*« Dans l'intérieur de la ville, point de cimetières, point de manufactures insalubres, point d'hôpitaux, tous ces établissements sont aux extrémités, dans les places aérées [...] Jamais aucune ordure n'est jetée des maisons ou des ateliers dans les rues ». [Ragon 1986]*

Contrairement à Charles Fourier qui propose des passages qui lient les zones de la ville, Cabet ne systématise pas la fermeture des rues. Il conçoit la coexistence des rues ouvertes et des rues couvertes au-dessus des trottoirs ou pour traverser les rues « [...] pour protéger les piétons des intempéries de l'air ». Il conçoit même la présence de rues jardins dans sa ville, et définit des parcours piétons selon le temps qu'il fait :

*« On peut parcourir toute la ville d'Icara, en Voiture quand on est pressé, par les jardins quand il fait beau, et sous les portiques quand le temps est mauvais, sans avoir jamais besoin ni de parasol ni de parapluie ». [Ragon 1986]*

Cette conception machiniste de la forme urbaine dont Cabet est l'un des précurseurs sera reconduite dès la 2<sup>ème</sup> moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle avec des urbanistes comme l'Espagnol Soria y Mata (1844-1920) et le Français Tony Garnier (1869-1948). Le tracé de la forme urbaine chez ces auteurs est intimement lié à des besoins fonctionnels relevant surtout des exigences de déplacements (le chemin de fer métropolitain dans le cas de Soria et le tramway ainsi qu'une place très réduite à l'automobile chez Garnier). La ville linéaire de Soria y Mata se déroule en ruban de part et d'autre de la voie ferrée qui la dessert. La voie principale a 50m de large et la bande construite a une épaisseur figée. La croissance de la ville ne pouvait suivre que la direction longitudinale de la voie principale<sup>69</sup>. La verdure était fortement présente et l'auteur disait même que sa ville était aussi une cité jardin en faisant référence aux travaux de Howard.

Tony Garnier adopte quant à lui une disposition en damier, prévoit des rues intérieures plantées réservées aux seuls piétons, d'autres pour la circulation « mécanique », il généralise le toit terrasse et l'usage du béton armé dans tous les édifices. Il n'adopte pas de cours ni de courettes et les parois de quelques édifices comportent des brises soleil en béton. Les espaces construits occupent la moitié de la ville alors que les espaces verts occupent l'autre moitié. Ces derniers sont destinés à créer un lien organique entre les différents édifices. Dans un projet de logements élaboré en 1905<sup>70</sup>, il précise un peu plus ces idées sur l'hygiène des maisons. Il inscrit en effet sur le plan sous l'intitulé lois d'hygiène les principes d'ouverture des fenêtres, leurs orientations ainsi que la proscription des cours et courettes. Tony Garnier fait ainsi le lien direct dans ses préconisations hygiéniques entre trois échelles : la forme urbaine, l'îlot et la façade.

<sup>69</sup> La ville linéaire n'a pu être réalisée que sur 05 kilomètres seulement à Madrid. Edifications qui seront vite noyées dans la grande croissance de la ville. C'est en URSS vers 1930 que la ville linéaire (composée de 06 bandes parallèles) sera réalisée avec le plus de succès en raison de la nationalisation du sol. Elle s'étend sur 65 kilomètres de long.

<sup>70</sup> Voir Jean Pierre Peneau sur le projet de logement économique pour le concours de la fondation Rotschild en 1905. [Peneau ND, pp.4-5 chp. VIII]



### 3.1.3. Critiques et consensus

Les deux types de propositions que nous venons d'évoquer sont les principales qui vont se dessiner tout au long du XX<sup>ème</sup> siècle. Entre proposer une nouvelle forme urbaine située entre le passé et le présent et celle basée exclusivement sur un déterminisme fonctionnaliste, le choix de la majorité des architectes s'est porté vers la deuxième. Sans doute parce que moins coûteuse de part sa nature minimaliste, mais aussi parce que celui dont les écrits ont été les plus publiés sur cet urbanisme et sur l'urbanisme tout court reste « Le Corbusier » qui fut comme on le sait un fervent défenseur du fonctionnalisme.

Avant de spécifier les propositions formelles de la ville moderne qui vont se répandre en France et à travers le monde à partir de la conception machiniste, revenons d'abord sur les critiques qu'ont subies les deux conceptions de la forme de la ville, et cela dès le XIX<sup>ème</sup> siècle.

En dehors du déterminisme fonctionnaliste, c'est la notion de ville nouvelle qui pose problème. Motivés par la même crise du logement et les inégalités sociales qui ont poussé à l'imagination des villes idéales, Frederic Engels et Karl Marx vont rejeter l'idée même d'une ville créée de toutes pièces. Ils pensent au contraire que l'avenir de la ville est dans la ville. Engels pense par exemple dans son livre *La question du logement* écrit en 1872 que :

*« Ce qui est certain, c'est qu'il y a dans les grandes villes déjà suffisamment d'immeubles à usage d'habitation pour remédier sans délai par leur emploi rationnel à toute véritable crise du logement ». [Ragon 1986]*

Engels réfute l'opposition entre la ville et la campagne, joignant ainsi les positions de Fourier et de Owen (qu'il cite), et il admet la transformation des villes existantes comme l'a fait Haussmann, mais il dénonce les destructions-reconstructions visant par exemple à élargir les rues qui ne profitent en définitive qu'aux bourgeois.

*« Le résultat est partout le même : les ruelles et les impasses les plus scandaleuses disparaissent (évoquant les travaux d'Haussmann à Paris) et la bourgeoisie se glorifie hautement de cet immense succès – mais ruelles et impasses resurgissent aussitôt ailleurs et souvent dans le voisinage immédiat ». [Ragon 1986]*

De la synthèse de ces deux points, on peut supposer que Engels conçoit plutôt une croissance et une transformation de la ville existante en introduisant les avantages hygiénistes de la campagne dans la ville existante. Pour cela il propose d'agrandir ses espaces. Il semble donc pencher plus pour une volonté d'actualisation de la ville existante en y intégrant les idées dominantes de l'époque sur l'hygiène, plutôt que pour l'invention d'une nouvelle ville. Idée assez proche des directives contemporaines sur le retour aux édifications dans les villes existantes. En résumé on peut dire que pour Engels, les ajustements morphologiques, à condition qu'ils touchent tous les espaces de la ville et en y ajoutant une touche de campagne, suffisent à améliorer la qualité des villes.

Eugène Henard (1849-1923), un urbaniste français pourtant très imprégné des problèmes que pose la circulation automobile dans les villes, sera l'un des rares urbanistes « progressistes » qui vont proposer de ré-urbaniser la ville ancienne. Entre 1903 et 1909, il publie huit fascicules contenant des études précises et des solutions rationnelles pour Paris et applicables aux grandes agglomérations urbaines. C'est à lui que l'on doit par exemple « le carrefour à voies superposées » (1906) que Le Corbusier va revendiquer en 1922 dans son plan Voisin [Ragon 1986]. Parmi ces préoccupations, la volonté de sauvegarder de grands espaces libres dans les villes. Il s'élève contre les plans en damier des villes américaines et rejoint le point de vue pittoresque sur les villes de Camillo Sitte. Il préconise « des alignements brisés », alternés d'arbres et de maisons, créant ce qu'il appelle « des boulevards à Redans » [PENEAU ND]. Ce type nouveau de boulevards permet de placer dans ces redans des arbres qui étaient jusque là jugés trop proches des maisons. Cela permet aussi, Selon Hénard, d'avoir un développé de façade ensoleillé plus grand et d'éviter les cours enclavées des immeubles haussmanniens.

Il ressort de tous ces écrits un « consensus » sur les dispositifs hygiénistes. Plus que cela, une complémentarité semble se profiler d'un auteur à un autre quant aux propositions qui vont conduire à l'amélioration du microclimat urbain. On atteint même une proposition, qui connaît beaucoup de succès de nos jours, c'est celle des toits jardins que propose Richardson. Les directives sont assez claires ; dans presque toutes les propositions il faut densifier la ville en vertical ou favoriser sa croissance horizontale en y introduisant plus de vide et plus de nature.

Nous venons de voir brièvement, que les propositions urbanistiques des auteurs les plus connus du XIX<sup>ème</sup> siècle convergent vers le refus de la ville héritée du passé avec ses inégalités et son insalubrité. Les solutions proposées sont de deux types : construire une nouvelle ville de toute pièce en alliant ville et campagne ou transformer (actualiser) la ville existante de telle sorte à obtenir une nouvelle ville. C'est surtout la première proposition que la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle va retenir. Mais c'est la deuxième qui est actuellement préconisée pour nos villes. Ces réflexions alimenteront ainsi les questionnements sur la forme urbaine jusqu'à nos jours.

### **3.2. Les nouvelles compositions de l'urbanisme moderne**

Avant d'évoquer les questionnements contemporains sur la forme urbaine qui sont liés aux préoccupations microclimatiques et environnementales, on ne peut passer sous silence les principales propositions de la période dite moderne. Les méthodes de l'urbanisme moderne se réduisent, de façon générale, aux mêmes points de vues que ceux déjà évoqués chez les « utopistes ». Le premier courant prêche un « désurbanisme », qui va commencer avec les propositions de Ebenezer Howard et Frédéric Geddes et se prolonger avec F.L.Wright, et le deuxième, plus répandu, développera une rationalisation de la forme urbaine selon les procédés techniques de l'industrie, se rapprochant plus du travail des ingénieurs que de celui d'une conception artistique du métier d'architecte.

#### **3.2.1. Entre besoin de nature et persistance de la ville ancienne**

La première conception de la forme urbaine et de la ville comme un organisme historiquement constitué et non une machine revient sans doute à Patrick Geddes (1854- 1932). Il affirmait en effet que tout élément de la ville faisait partie d'un tout et que pour comprendre un élément il fallait comprendre la place qu'il prend dans cette totalité, ses influences sur cette dernière et l'influence de la totalité sur lui. De par sa profession (professeur en botanique), il était attaché à comprendre les interactions existantes dans un environnement en analysant ses évolutions et ses croissances. Il pensait que l'analyse du passé est indispensable pour comprendre le présent et pour pouvoir effectuer des prédictions. Le plan d'une ville selon lui, ne peut pas être le résultat de la réflexion d'une ou de quelques personnes, mais il est le fruit de l'épanouissement de toute une civilisation, d'une communauté et d'une époque.

En France, Marcel Poète publia en 1929 « Introduction à l'urbanisme ». Comme Geddes, il ne voit pas de discontinuité entre la ville ancienne et la ville moderne ; il appellera même la ville *un organisme*. Il met en garde contre la définition de l'urbanisme comme l'art de dessiner des plans et tente une analyse détaillée des phénomènes urbains qui sont enfouis dans le passé des plans. Mais les idées qui ont proposé l'alliance entre la ville existante et la campagne (Fourrier, Owen, Engels, Richardson,...), comme celles qui suggèrent une alliance entre le passé et l'avenir (Geddes, Poète,...), trouveront peu d'échos en Europe à partir du début du XX<sup>ème</sup> siècle.

C'est Franck Loyd Wright, aux Etats Unis, qui va travailler entre 1931 et 1935 sur une ville « organique » qu'il appelle Broadacre City, selon une conception que l'on pourrait qualifier de « mesurée ». La nature y entoure tous les bâtiments, et Wright ne projette que des maisons individuelles pour les habitations. Des tours sont conçues pour abriter des bureaux à condition de ne

pas porter ombre les unes sur les autres. Wright va projeter une autre utopie, celle d'un retour à la prairie des pionniers américains. Il faudra attendre les années soixante pour voir les premières critiques des villes rationalistes avec Lewis Mumford qui écrit en 1961 *The City in History* et surtout les travaux de morphologie urbaine en Italie dont l'architecte Saverio Muratori est le précurseur qui à la fin des années cinquante s'attaquera à la crise que provoque le progrès technique dans la production des bâtiments, la croissance et la transformation des villes.

Raymond Unwin (1863- 1940) est sans doute le premier urbaniste qui a réalisé une cité jardin en s'appuyant sur les villages du passé (ceux d'avant le XIX<sup>ème</sup> siècle). Il imagine un urbanisme de faible densité où la ville est formée par un regroupement astucieux de maisons en bande et de pavillons (fig. 1.16). Il considère aussi que l'entassement vertical n'est pas rentable en soi. Dans les plans de la cité jardin de Hampstead (1907), il délimite la densité maximum à 20 maisons à l'hectare. Comme Camillo Sitte, il réfute l'idée que tout espace libre pourrait constituer une place :

*« les édifices éparpillés au hasard dans toute la ville ne produisent aucune impression [...] les bâtiments groupés, au contraire se font voir mutuellement »*

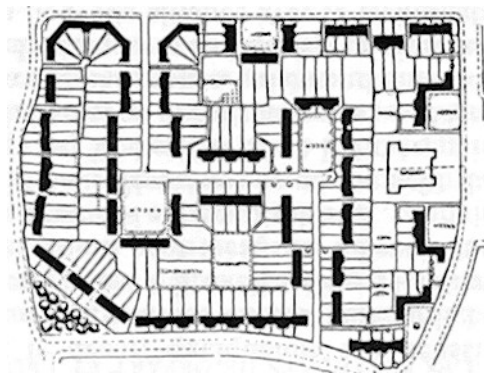


Figure 1.16 : Cité-Jardin de Letchworth réalisée par B. Parker et R. Unwin [THIBERGE 2002]

Ces diverses tentatives de retour à la nature et au passé, sont considérées par les rationalistes comme un signe d'impuissance de l'homme devant la nature et contraire au sens même du progrès. La ville médiévale en est souvent donnée pour exemple. Sa forme est contrainte par la topographie des terrains dans laquelle elle est implantée, contrainte par la répartition des espaces malsains en ville, contrainte par son microclimat humide. Les rationalistes proposent donc de suivre la logique industrielle, et de... « oser »<sup>71</sup>. Puisque ce sont ces idées qui vont mener à la forme la plus répandue de l'urbanisme moderne (les grands ensembles), voyons de plus près en quoi consistent les propositions hygiénistes contenues dans ces dernières.

### 3.2.2. Rationalisation du besoin d'air, de soleil et de lumière dans la forme urbaine « moderne » : Le Corbusier et la charte d'Athènes

Comme l'avait déjà envisagée Cabet, la standardisation, héritée de la logique machiniste, va considérablement influencer l'urbanisme rationaliste moderne, dont Le Corbusier sera le « héros » et qui aboutira à la constitution du CIAM<sup>72</sup> et à la formulation de la célèbre Charte d'Athènes.

Commençons par relire quelques articles de cette dernière qui font une grande place aux questions liées à l'hygiène et aux qualités requises du microclimat urbain. En 1957 le Corbusier résume, sous l'intitulé « La Charte d'Athènes », l'ensemble des principes urbanistiques des CIAM.

<sup>71</sup> [LE CORBUSIER 1925].

<sup>72</sup> Congrès International des Architectes Modernes.

On peut supposer qu'à cette date, les idées rationalistes qui commencèrent à prendre une forme claire avec les ouvrages de Le Corbusier et sa proposition d'une ville contemporaine ont mûrit et atteignirent une certaine certitude.

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les constats relatifs au microclimat urbain, les effets qui lui sont reprochés et les propositions en terme de forme urbaine qui sont inscrites dans l'ouvrage récapitulatif de la Charte d'Athènes :

Observations	Effets et intentions Microclimatiques	Solutions
Art. 09 : Densité de population trop importante à l'intérieur du noyau historique des villes et dans certaines zones d'expansion industrielle du XIX <sup>ème</sup> siècle.	Absence de soleil (orientation Nord, ombre portée dans la rue ou dans la cour). Vétusté et présence permanente de germes morbides. En périphérie un air de qualité.	La densité peut être totalement modifiée par la hauteur des bâtiments.
Art. 10 : peu d'espaces et peu de surfaces vertes	Résultat : des rues sombres et un manque d'oxygène fourni par les arbres.	
Art. 11 : La croissance de la ville dévore les surfaces vertes.	Cet éloignement augmente le désordre de l'hygiène. Absence de soleil, d'espace et de verdure qui sont définis comme des besoins aussi bien physiologique que psychologique.	
Art. 12 : Les constructions destinées à l'habitation sont réparties sur la surface de la ville, en contradiction avec les nécessités de l'hygiène.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour le soleil qui devrait pénétrer à l'intérieur de chaque logis.</li> <li>- Pour l'air pur, dont la qualité est assurée par la verdure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'espace doit être largement dispensé (en opposition à l'étroitesse des rues et l'étranglement des cours)</li> <li>- Le Corbusier rappelle en cela le postulat du 4<sup>e</sup> congrès CIAM, tenu à Athènes : « le soleil, la verdure et l'espace sont les trois premiers matériaux de l'urbanisme ».</li> </ul>
Art.13 : Dénonce les constructions dans des zones mal orientées, humides, subissant les brouillards et les pollutions industrielles.	Art.14 : Pour des constructions aérées, à l'abri des vents hostiles, assurées de vues et de dégagements et d'une insolation abondante.	
Art. 16 : Les constructions élevées le long de voies de communication et autour de carrefours sont préjudiciables à l'habitation.	Ils reçoivent trop de bruit, de poussières et de gaz nocifs (pollution).	Circuler et habiter dans des zones indépendantes
Art. 17 : Condamne l'alignement des habitations sur le bord des rues. Et le dimensionnement restreint des cours intérieurs.	<p>Car il n'assure l'insolation qu'à une partie minime des logis.</p> <p>Cela produit une portion de bâtiments non ensoleillés dans les villes entre 50 et 75%.</p>	
<p><b>Synthèse des propositions liées à la forme urbaine : Art. 23 à 29</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les quartiers d'habitation doivent occuper dans l'espace urbain les meilleurs emplacements, tirant parti de la topographie, faisant état du climat, disposant de l'ensoleillement le plus favorable et de surfaces vertes opportunes (Art. 23). La détermination des zones d'habitations doit être dictée par des raisons d'hygiène (Art. 24).</li> <li>- Des densités raisonnables doivent être imposées selon les formes d'habitation proposées et selon la nature du terrain (Art. 25). Un nombre minimum d'heures d'ensoleillement doit être fixé pour chaque logis (Art. 26). L'alignement des habitations au long des voies de communication doit être interdit (Art. 27).</li> <li>- Il doit être tenu compte des ressources des techniques modernes pour élever des constructions hautes (Art. 28). Les constructions hautes implantées à grande distance l'une de l'autre, doivent libérer le sol en faveur de larges surfaces vertes (en critiquant l'étroitesse des rues américaines) ( Art. 29).</li> </ul>		

Tableau 1.1 : tableau récapitulatif des observations liées au microclimat urbain des villes anciennes et les propositions pour y remédier, contenues dans la charte d'Athènes.

A la lecture de ce tableau, nous ne pouvons trouver que deux propositions explicites pour la nouvelle forme urbaine : Densifier en hauteur pour libérer l'espace et répandre les surfaces vertes. Est ce vraiment les seules propositions de Le Corbusier en terme de forme urbaine ?. La lecture du

plan de ville que Le Corbusier propose dès 1925 (fig. 1.17), nous fait dire que sa position contre la ville ancienne n'est pas si tranchée qu'il ne le paraît<sup>73</sup>. Mais ce sont les textes et les images de Le Corbusier qui vont faire le tour du monde et non ses plans commentés. La plupart des architectes qui vont dessiner des grands ensembles à travers le monde n'auront aucun contact avec lui. Au fur et à mesure ses idées de même que celles du Bauhaus ou du constructivisme russe vont se réduire à des solutions très schématiques qui produiront les déserts de béton que l'on retrouve dans les banlieues aujourd'hui.

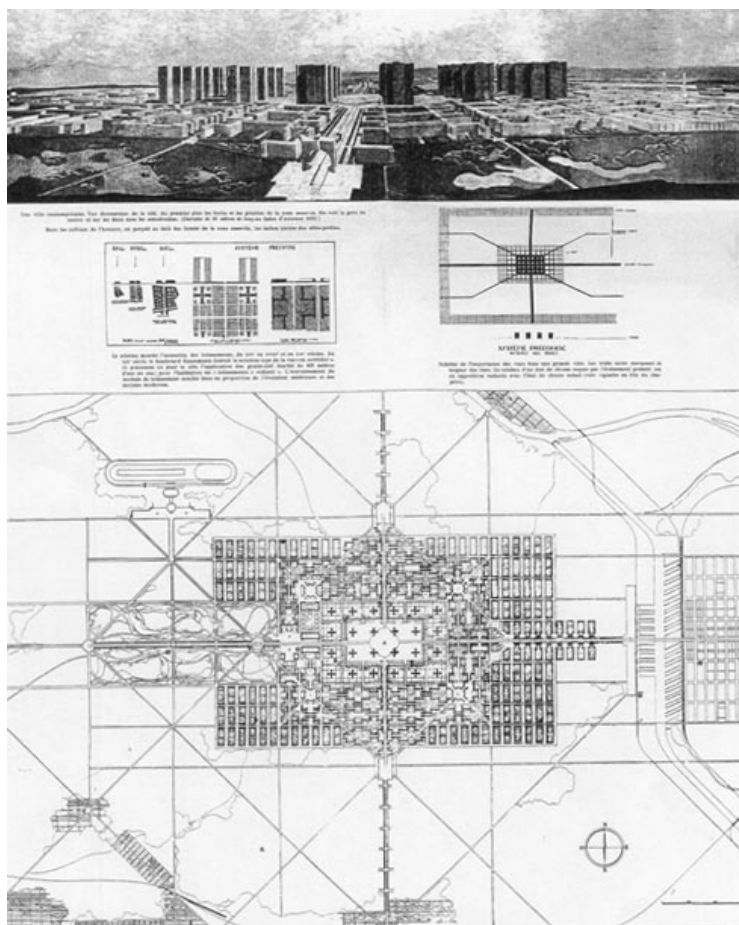


Figure 1.17 : La ville contemporaine selon Le Corbusier [Le Corbusier 1925].

Les écrits multiples et séduisants de Le Corbusier<sup>74</sup> et les rencontres du CIAM aidant, c'est la pensée rationaliste qui aura le plus de retentissement à travers la planète. Peut être aussi n'est elle pas celle qui est la plus simple à détourner en un objectif simple et simpliste compréhensible par tous les architectes, c'est à dire : *une disposition aléatoire d'édifices sur un vide indéfini occupé par les espaces verts*.

<sup>73</sup> Le plan de la ville Contemporaine que Le Corbusier propose, à première vue, est un mélange savant de tours, de barres et d'îlots à grande cours entourés d'espaces verts. Plus on se rapproche du centre et plus le vide prend de l'importance. Mais la rue, au sens classique, c'est à dire un vide bordé de parois bâties, n'est pas abolie. Elle est surdimensionnée. Le plan de Le Corbusier paraît donc plus nuancé que ses positions contre la ville ancienne.

<sup>74</sup> Selon Michel Ragon, c'est principalement aux écrits de Le Corbusier, à ses images chocs, à ses formules imagées et à ses publications dans un style accessible à tous, qu'est due la propagation des idées rationalistes. [RAGON 1986]

### 3.2.3. Etalement de l'espace ouvert et mystification de l'espace vert : points de vues critiques sur « l'ouverture exagérée » des grands ensembles

La critique théorique de la vision du mouvement moderne sur l'espace ouvert s'effectue à partir de deux prises de conscience. La première s'oppose à la banalisation de l'espace ouvert sans limites et la seconde s'oppose à la séparation des fonctions urbaines par le zoning. La réalisation des espaces ouverts introduit un changement d'échelle qui va conduire à une perte des repères dimensionnels. La taille des opérations réalisées ne connaîtra pas de limite ; parfois une seule « barre » de logements peut atteindre le demi-kilomètre de longueur (à Nancy). Il est bien explicité dans la Charte d'Athènes que l'ouverture du vide urbain vise l'introduction de la nature, de la lumière, de l'air et du soleil dans les logements. Le point de vue privilégié de ces projets modernes est souvent le plan de masse ou la maquette vue de haut. En d'autres termes la perception de l'espace urbain à partir de la hauteur d'un piéton n'est presque jamais un argument des projets. En résumé l'espace urbain de la ville ancienne qui a été construit à partir du sol n'est conçu dans l'urbanisme moderne que vu d'avion par des plans masses. [THIBERGE 2002]

Les tentatives pittoresques, dont Camillo Sitte est l'un des précurseurs, qui relient « la beauté des villes » aux séquences vues par un piéton sont réfutées par les architectes modernes. A partir d'une perspective piétonne l'architecte est, pour ces derniers, plus contemplateur qu'acteur. On peut le comprendre en effet, comment pourrait-on introduire l'air, le soleil et la lumière dans les espaces de la ville si on ne portait pas une représentation de plus grande échelle, de sorte à prendre en considération, la direction des vents, la course du soleil ... ? C'est ce que vont faire avec excès les théoriciens de l'urbanisme rationaliste moderne. En voulant introduire de l'ordre dans la forme urbaine, au sens machiniste, ils se posent comme objectif la maîtrise de l'ensemble des éléments de la ville. Cela ne peut évidemment se faire, puisque les plans sont souvent l'œuvre d'une seule personne, par la répétition des mêmes modules et des mêmes éléments à grande échelle. En voulant tout maîtriser, on ne laisse rien au hasard, et la forme urbaine est pensée comme figée, c'est à dire sans évolution possible. Donc par définition « morte ».

Oscar Niemeyer va réaliser à Brasilia (1956-1961) avec force, dans la place des trois pouvoirs (fig. 1.18), ce changement d'échelle du vide urbain préconisé par Le Corbusier. Ce dernier fait une série de conférences à Rio et Niemeyer ne cachera pas l'influence de l'enseignement de Le Corbusier sur son architecture [RAGON 1986]. Le vide domine, et les bâtiments semblent ne constituer que de minces aiguilles disposées transversalement à l'axe de la place. Le vide de la place n'est à aucun moment clos. Niemeyer admet tout de même dans son architecture des dispositifs appelés « modulateurs climatiques » qui sont au nombre de trois : les auvents qui suivent les parcours piétons, les galeries et péristyles sous les immeubles, et les brises soleil sur les façades des bâtiments, pour réguler les effets du climat sur les usagers des espaces urbains et des bâtiments [LUIGI 1987].

La charte d'Athènes et les écrits de Le Corbusier, sont sans doute les instruments théoriques les plus répandues de l'époque moderne. Ils vont avoir une influence considérable sur des architectes du monde entier<sup>75</sup>. Ces derniers à l'exemple de Brasilia ne réaliseront que les idées générales contenues dans ces documents. Cela est tout aussi vrai en France. Les réalisations des grands ensembles ont introduit une coupure avec la ville ancienne en terme de forme urbaine que les projets urbains contemporains s'attèlent à réduire. Le vide urbain fonctionnaliste ne peut être approprié, et « habiter en ville » s'arrête à la porte du logement. Les vides extérieurs sont désertés, et se réduisent au strict nécessaire, circuler en voiture et stationner. En résumé, la nouvelle forme urbaine, basée sur un déterminisme fonctionnel et hygiéniste, est vouée à l'échec, car le projet

<sup>75</sup> Même dans les pays du tiers monde, qui ont importé les procédés de fabrication et de standardisation. Ces procédés sont en effet les seules solutions au problème du logement posé dans ces pays.

urbain répond à des données multiples et complexes. Le Corbusier lui-même le pensait. Lorsqu'il dessine le projet « Obus » pour Alger en 1930, il le dessine à partir d'une vue d'Alger depuis un bateau et il propose une « auto-route habitée » qui court à mi-pente tout autour de la rade d'Alger. Il prend en compte ainsi la spécificité du site. L'unité formelle de la ville relève donc d'un niveau différent de celui lié aux seuls éléments hygiéniste et fonctionnaliste. Mais comme on l'a dit, les continuateurs de Le Corbusier ne reprendront que les intentions les plus simplistes et les plus simples à imaginer et à réaliser.



Figure 1.18: Brasilia : place des trois pouvoirs [LUIGI 1987].

Les critiques du mouvement moderne vont ainsi, dans leur majorité, aller dans le sens du point de vue de Marx et de Engels qui réfutaient l'idée même de création d'une ville nouvelle. La ville ne peut faire l'objet d'un projet urbain. Les données à prendre en compte sont trop complexes à cerner. Parmi ces critiques il y a ceux qui, comme dans le courant de Morphologie urbaine, vont voir la ville comme un organisme. Si l'on veut le recréer, il faut, comme le préconisait Geddes, le connaître dans toutes ses interactions, ce qui est, il faut le noter difficile, voire impossible. En d'autres termes, l'ouverture extrême du vide urbain, qui est la principale innovation du mouvement moderne en terme de forme urbaine, devrait être modérée et différente d'une situation à une autre. Seule la connaissance de tous les effets de cette ouverture peut conduire à sa conception et à son « dessin ».

### 3.3. Persistance des ajustements morphologiques

#### 3.3.1. La reconstruction des villes en France 1945-1955

Après la deuxième guerre mondiale, un grand nombre de villes françaises se retrouvent devant des fragments urbains entiers rasés par les bombardements. L'idéologie de la table rase préconisée par le mouvement moderne aurait pu trouver là une occasion idéale pour réaliser les idées novatrices sur la ville. Mais il n'en sera presque rien. L'urbanisme de la reconstruction va poursuivre dans la plupart des cas les ajustements de la forme urbaine existante. Le besoin d'air, de soleil et de lumière, pourtant proclamé par les auteurs de cette reconstruction, ne va engendrer que des élargissements de voies et des dé-densifications d'îlots bâtis. La reconstruction, selon Claudius Petit, ministre du MRU<sup>76</sup> à l'époque de la reconstruction n'était pas perçue par les autorités comme

---

<sup>76</sup> Ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme.

une occasion de repenser l'environnement urbain. Elle restait liée dans une certaine mesure aux structures anciennes des villes.

Les propositions de Le Corbusier et des CIAM, n'auront en effet aucun échos, si ce n'est dans des reconstructions de petits fragments urbains détruits par la guerre. Pourtant les idées modernes étaient écrites et diffusées. Les autorités étaient plus préoccupées à retrouver le patrimoine ancien, perdu par la guerre, que de mettre en forme une ville nouvelle, que l'on laissa volontiers aux périphéries vierges des villes.

Dans leur ouvrage, Anatole Kopp, Frédérique Boucher et Danièle Parly [Kopp et al. 1980], en retraçant l'histoire de cet urbanisme de la reconstruction, relèvent six attitudes différentes envers les tracés anciens des villes. Ces attitudes varient entre une reconstruction historique à l'identique et un refus total des traces anciennes. Mais ces deux extrêmes ne sont en réalité que des exceptions qui confirment la règle. Celle-ci consiste dans la plupart des cas à un ajustement « raisonnable » de la forme urbaine existante. Le projet de reconstruction le plus connu de cette dernière catégorie est sans doute celui du centre ville du Havre élaboré par l'architecte Auguste Perret.

Le Havre de par ses fonctions portuaire et industrielle, fut très endommagée et presque complètement détruit par la guerre. Le centre ville, totalement détruit, fut confié à l'architecte Auguste Perret, connu pour son architecture en béton armé. Se retrouvant architecte en chef de ces opérations de reconstruction, il concevait son projet comme une architecture à grande échelle plus que de l'urbanisme à proprement parlé. Malgré les conditions réunies de la table rase, il propose une forme urbaine basée sur l'îlot et la rue. Le principal changement par rapport à la ville ancienne c'est la largeur des rues qui devient importante, la hauteur des bâtiments qui est limitée pour préserver l'accessibilité du soleil aux habitations, le centre des îlots qui est évidé de toute construction, et les espaces libres qui sont créés dans la trame urbaine. Cette dernière est entièrement orthogonale et les bâtiments qui forment les îlots répondent à une logique de préfabrication. L'architecte affirmait vouloir recréer le centre du Havre et non le reconstruire [TA-7/8 1946]. La nouveauté réside donc non pas dans la structure urbaine, mais dans les ajustements de la forme urbaine ancienne, qui sont dans ce cas poussés jusqu'à l'ajustement de la trame urbaine. Auguste Perret voit donc la nouveauté dans l'actualisation de la structure ancienne, non dans sa négation.

L'objectif de ces reconstructions est assez clair :

*« [...] remplacer avant tout la construction ancienne des immeubles par un système de constructions aérées et ensoleillées qui assure aux habitations des conditions d'ensoleillement plus salubres »<sup>77</sup>*

Cette volonté d'améliorer la qualité microclimatique de la ville, sans « métamorphoser » la structure urbaine existante, est presque une constante dans la reconstruction des villes. Ce qui va différencier ces reconstructions c'est le changement qu'elles vont induire sur l'ancien tracé de la forme urbaine comme le montrent ces quelques exemples que l'on expose ici. Ainsi, dans le centre intra-muros de Saint-Malo (à l'intérieur des remparts construits par Vauban), c'est une reconstruction à l'identique qui est adoptée. Mis à part quelques simplifications du réseau de voirie (ruelles et passages sous immeubles), la reconstruction de cette partie de la ville va jusqu'à reconduire les matériaux anciens (le granit pour les murs et l'ardoise pour le toit). Dans la plupart des villages et petites agglomérations, les caractéristiques de l'ancien parcellaire étaient respectées et les seules modifications ne concernaient que les largeurs des voies<sup>78</sup>.

Ces ajustements sont préférés aux bouleversements de la forme urbaine proposés par les urbanistes modernes. Ce choix est parfois partagé tant par les architectes et urbanistes que par les habitants et les commerçants comme c'est le cas à Saint Lô. Ce sont tout autant les commerçants

<sup>77</sup> [KOPP et al. 1980].

<sup>78</sup> L'architecte en chef G. Stoskopf pour la reconstruction du village d' Anmeschwihl affirmait : « prévoir des rues larges sans leur retirer leur caractère ». Cité dans [KOPP et al. 1980].



que les habitants de la ville qui voudront retrouver leurs anciennes parcelles. André Messier l'architecte en chef va proposer une amélioration du système de voirie, des ordonnances architecturales et quelques zones non aedificandi. La structure ancienne sera donc préservée, de même qu'à Amiens et à Caen.

Les seuls projets de reconstruction ayant complètement ignorés la ville ancienne au nom des principes de l'urbanisme moderne (ensoleillement maximum, orientation optimale, espaces verts...), concernent des surfaces de terrains assez restreintes. Dans la banlieue immédiate de la ville de Rouen, ce sont uniquement six immeubles qui seront construits sur le principe des grands ensembles en ignorant la trame urbaine. C'est aussi le cas à Valenciennes, Dunkerque ou dans d'autres villes quand il s'agissait de reconstruire des petits terrains. On laissait à ces architectes modernes, selon l'expression utilisée par A.Kopp, la possibilité de « boucher les trous ».

Toujours dans la perspective d'une amélioration modérée de la forme urbaine ancienne, une alternative originale voit le jour dans la ville de Maubeuge dont plusieurs quartiers sont endommagés ou entièrement détruits. Alternative que l'on peut situer entre forme urbaine moderne et ancienne. L'urbaniste A.Lurçat en charge de la reconstruction, d'une partie totalement détruite, ignore le tracé de la ville ancienne, qui est fait de rues sinueuses. Pour dessiner son projet de reconstruction il va faire participer les habitants au nouveau plan. En préconisant une cité-jardin urbaine, sa proposition s'articule autour d'un axe principal bordé de bâtiments sous forme de barres et de rues transversales ponctuées de places et entourés d'édifices. La forme urbaine qu'il propose se base sur la rue mais en introduisant une ouverture significative à cette dernière. Les places qui sont construites en périphéries, seront à leur tour ouvertes partiellement sur leurs côtés. On se retrouve donc à Maubeuge devant une expérience de l'urbanisme démocratique qui va conduire à allier besoin de rationalité (les bâtiments répondent à la logique du chantier) et exigences des habitants. En terme de bâti, cela amène à proposer des fragments bâtis composés d'îlots ouverts ; une proposition que l'on retrouvera dans les projets urbains qui vont succéder aux grands ensembles et dans ceux des villes contemporaines.

Les idées du mouvement moderne ne trouveront donc de succès que dans les grands ensembles et dans l'urbanisme de « la construction ». Là où le patrimoine bâti est inexistant. La reconstruction privilégie encore « une transformation » assez modérée des formes urbaines de la ville ancienne, même si un consensus existait à propos de la nécessité d'introduire plus d'hygiène dans les espaces des villes.

### **3.3.2. Retour aux ajustements du vide urbain dans les projets urbains contemporains : *Entre cloisonnement et ouverture***

Les nouvelles formes bâties, proposées par les architectes modernes dans les grands ensembles, ne sont en définitif qu'une poussée à l'extrême des propositions hygiénistes. En d'autres termes, les architectes modernes ne changent pas de registre, ils passent d'un ajustement de l'ouverture du vide urbain à son éclatement.

La preuve de cette continuité « d'ouverture-fermeture » du vide urbain, pour des préoccupations hygiénistes, est donnée aujourd'hui à travers les divers projets urbains qui reviennent à la notion d'îlot et de rue. La notion même « d'îlot- ouvert » est donnée par Christian de Portzamparc, par exemple, pour définir l'élément principal de la forme urbaine qu'il appelle « la ville du troisième âge »<sup>79</sup>, située entre le modèle formel de la ville ancienne et celui de la ville moderne. Mais cette idée de pouvoir trouver des relations entre le modèle moderne et celui de la ville ancienne est sans doute le mieux exprimé dans l'ouvrage co-écrit par P.Panerai, J. Castex et J-C Depaule intitulé « Formes urbaines de l'îlot à la barre » [Panerai et al. 1997]. Ces auteurs proposent en effet une

---

<sup>79</sup> [Portzamparc 1995].

rationalisation de l'îlot, et son ouverture modérée vers la rue. En stigmatisant « l'îlot vertical » des unités d'habitations de Le Corbusier, qui est jugé comme trop bouleversant, on lui reconnaît néanmoins sa capacité à allier exigences individuelles et collectives en superposant des duplex profitant du soleil, de l'air et de la lumière et isolé du bruit des voisins. Bienfaits, qui ont trouvé un écho en grande Bretagne avec le projet d'Alton West à Londres en 1959. La forme urbaine contemporaine devrait, selon ces auteurs, se construire à partir d'une double relecture :

*« Celle des œuvres du mouvement moderne qui ont su allier la prise en compte de la situation urbaine et l'affirmation de la modernité, celle des architectures plus anciennes qui ont expérimenté des solutions ou des dispositions qui rejoignent nos interrogations actuelles »<sup>80</sup>*

Cette tendance se confirme, dans plusieurs projets urbains contemporains en France. Les exemples abondent dans ce sens. Il suffit de parcourir les différents numéros de la revue « Projet urbain », éditée par le ministère de l'Équipement, des transports et du logement. Les mots d'ordre semblent converger vers les deux objectifs : une ouverture modérée du vide urbain et une introduction de la nature à l'échelle humaine. Autrement dit réaliser les intentions de l'urbanisme rationnel de façon modérée, en tenant compte des spécificités morphologiques des différents lieux où se réalisent les projets.

La forme urbaine réalisée depuis les années 70 et 80, est un mélange entre les formes urbaines closes de la ville ancienne et les formes urbaines ouvertes à l'extrême de la ville moderne. Le troisième âge de la ville selon Portzamparc est celui de l'îlot ouvert, de la rue multiforme et de l'espace vert maîtrisé. L'une de ses caractéristiques serait à la fois la variété et l'unité. Ville complexe donc, qui par cette alliance échapperait à toute tentative de « normalisation ». La forme urbaine se fait désormais au coup par coup, par soudure, tissage, additions et soustractions. Le projet urbain a remplacé le projet de ville. La taille des édifications ne dépasse que très rarement celle d'un fragment bâti.

Cette unité de la ville, qui par le passé était réglée par des normes dimensionnelles qui fixaient la taille des rues, des bâtiments, des fenêtres. etc., et qui à l'époque moderne était presque indéfinie si ce n'est par les exigences constructives des nouvelles techniques, est aujourd'hui définie de manière flexible. C'est désormais la qualité des formes urbaines qui fait l'objet des règlements. La définition de règlements flexibles, dans certains cas et des règlements sans prescriptions dimensionnelles à priori, dans d'autres, semblent refléter cette perspective pour la planification des villes. Cette recherche d'une réglementation minimale qui puisse s'adapter aux variations du contexte liées à la réalisation des projets, se traduit en terme de forme urbaine par une qualification du bâti et des vides urbains. Concrètement on se retrouve dans une situation d'ouverture et de verdissement modéré des vides urbains et des parois bâties.

Un des projets les plus controversés de la fin du siècle passé confirme ce retour au cloisonnement du vide urbain, malgré l'ampleur de son échelle<sup>81</sup>. C'est le projet Euralille élaboré par Rem Koolhaas. A l'intersection de la gare et du centre commercial, une place est conçue au milieu d'un désordre apparent. Une place avec des parois construites avec le ciel comme unique ouverture. Au milieu de la fluidité de tous ces déplacements, Koolhaas prévoit donc de créer un vide urbain clos. Sans aménagements pour les piétons ni arbres, ce sont les détails des constructions qui font la richesse de cette place.

Le projet pour l'île de Nantes conçu par Alexandre Chemetoff et J-L Berthomieu et adopté par la ville en octobre 1999 confirment ces deux tendances : Le refus d'anticiper le projet urbain à long terme, en ne proposant pas des formes figées mais des lignes directrices évolutives, et la

<sup>80</sup> Cité dans [PANERAI et al. 1997].

<sup>81</sup> Le projet regroupe un ensemble complexe rassemblant un centre commercial régional, une école de commerce, des hôtels, des immeubles de bureaux, autour de la nouvelle gare TGV de Lille.

prééminence de rues, de boulevards, d'îlots ouverts tout plantés d'arbres y compris parfois sur les terrasses. [Chemetoff et al. 1999].

La coupure sociale introduite par l'opposition des deux formes anciennes et modernes est donc aujourd'hui en quête de résorption. La réduction des différences entre le modèle de la ville ancienne et celui des grands ensembles devient à son tour un objectif nouveau. Les problèmes de la réhabilitation urbaine se posent aujourd'hui avec les directives de densification liées aux nouveaux PLU<sup>82</sup>.

L'ajustement des vides des grands ensembles devient ainsi d'actualité comme cela fut le cas des ajustements des vides urbains de la ville ancienne évoqués dans le chapitre précédent. Mais il s'agit d'un ajustement qui va dans le sens d'une « fermeture » des grands vides urbains des grands ensembles. On se retrouve donc confronté aujourd'hui à un ajustement qui tend à combler le vide urbain. Mais de le combler de manière à en maîtriser les effets relatifs à ce qui nous préoccupe dans cette thèse c'est à dire les questions liées à la qualité environnementale et microclimatiques de ces vides. Toute la question est de savoir mesurer ces effets et les corrélés aux types d'aménagements proposés. Aujourd'hui les questions liées à l'hygiène et au microclimat urbain connaissent de nouvelles préoccupations liées à la grande problématique du développement durable et que la conception des constructions mais également des vides urbains devra prendre en compte.

Avant de résumer notre lecture historique qui s'est étalé sur une longue période historique, présentons brièvement dans le chapitre suivant ces nouvelles préoccupations environnementales, et les interrogations qu'elles posent quant à la mise en forme des projets urbains.

---

<sup>82</sup> Plan Local d'Urbanisme.

#### **4. LA VILLE CONTEMPORAINE ET LE MICROCLIMAT URBAIN : NOUVEAUX ENJEUX, NOUVEAUX SAVOIRS, QUEL SAVOIR-FAIRE ?**

Il est question aujourd'hui avec la formulation de nouveaux enjeux liés au développement durable de problématiques nouvelles pour les projets urbains qui s'ajoutent aux problématiques exposées jusqu'ici. Cependant l'aspect contemporain des débats ne nous permet pas de trouver des positions clairement exprimées sur les interactions entre ces enjeux et la forme urbaine. Par conséquent nous n'évoquerons ici que les nouvelles directives urbanistiques liées à ces nouvelles problématiques environnementales.

L'image la plus illustratrice de la prise en compte des menaces que peuvent présenter les villes envers l'environnement, au sens écologique du terme, est sans doute celle de la pollution atmosphérique. Le Conseil de l'Europe organisa en 1964 une conférence sur ce thème. En 1965 l'organisation mondiale de la santé demandait à Michel Ragon de faire un rapport sur « l'homme dans la grande ville ». L'étude comportera un chapitre sur les « agressions contre l'homme » du fait de l'urbanisation<sup>83</sup>. Le « retour à la nature » devient ainsi d'actualité de même qu'il a été une des intentions des utopistes du XIX<sup>ème</sup> siècle et des urbanistes fonctionnalistes du XX e. Mais ce retour relève d'enjeux assez nouveaux. Alors que la création même de la ville était destinée à créer un environnement « artificiel » pour se protéger de la nature et de ses éléments, aujourd'hui c'est la nature qu'il faut protéger des dangers de l'homme. La révolution industrielle avait donné conscience à l'homme qu'il pouvait, par les techniques nouvelles, domestiquer la nature. Au fil du temps la domestication s'est transformée en une domination qui tend à détruire la nature et l'environnement biologique nécessaire à la survie de l'homme de demain.

Les transformations hygiénistes s'inscrivaient déjà dans cette logique puisqu'elles visaient une amélioration du microclimat urbain des villes. Cela a pris, comme on l'a vu, deux directions : ajuster la forme urbaine existante ou en inventer une nouvelle. Ce qui est nouveau désormais c'est un changement d'échelle spatiale et temporelle dans les préoccupations. Ce n'est pas tant la ville qui pose problème, mais le devenir de la planète. Au sein de cette dernière, les villes et les procédures d'urbanisation sont perçues comme les principales sources de nuisance. « Le développement durable » est devenu le leitmotif de l'urbanisme contemporain. L'objectif est assez clair : transmettre aux générations futures une planète viable. Ce n'est pas seulement le microclimat des villes d'aujourd'hui qu'il faut améliorer mais il devient indispensable d'anticiper le climat que connaîtront les villes dans le futur. Le Sommet de la terre de Rio de Janeiro en 1992 va alerter l'humanité contre l'effet de serre et la dégradation des équilibres écologiques provoqués par l'industrialisation et le développement des villes.

Nous énonçons dans ce chapitre les principaux éléments contemporains liés aux préoccupations environnementales de régulation du microclimat urbain et examinons dans le cadre de cet enjeu global, les nouveaux questionnements sur la forme urbaine ?.

##### **4.1. Nouveaux enjeux de la qualité environnementale et microclimat urbain**

Les enjeux qui concernent directement les questions liées aux préoccupations microclimatiques en milieu urbain relèvent de deux constats : le réchauffement climatique combiné à l'effet de serre, et la dégradation des milieux naturels.

- Le réchauffement climatique a d'abord été observé avec scepticisme (c'est d'ailleurs toujours la position officielle des états unis). Les experts du GIEC<sup>84</sup> ont cependant confirmé, à partir de 1996 dans

---

<sup>83</sup> Ce rapport fit l'objet d'un numéro spécial de la revue de l'OMS, Santé du monde, en février-mars 1966.

<sup>84</sup> Groupe Intergouvernementale d'experts sur l'Evolution du Climat.

la deuxième conférence sur le changement climatique, qu'au XX<sup>ème</sup> siècle la terre s'est réchauffée de 0,3 à 0,6°C. Ces derniers prévoient une aggravation du phénomène dans les prochaines décennies si des mesures importantes ne sont pas prises. On pourrait ainsi voir un réchauffement de 2 à 5°C au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle. La cartographie de la tendance séculaire en France confirme une augmentation des températures minimales pouvant atteindre 1,4°C (fig. 1.19). Le réchauffement de la planète a des conséquences multiples dont la remontée du niveau des océans, les inondations, les désertification, etc., qui peuvent avoir un impact considérable sur l'économie des pays les plus pauvres. Une des raisons principales qui induisent ce réchauffement de la planète est le phénomène d'effet de serre. Inutile de l'expliquer ici, mais rappelons surtout qu'il est dû, à 60%, à la concentration du dioxyde de carbone émis par les villes et qui a augmenté de 30% depuis les débuts de l'ère industrielle [Gauzin-Muller 2001]. D'autres gaz sont responsables de l'effet de serre, mais le CO<sub>2</sub> est celui qui est directement lié à l'urbanisation. Ce sont en effet, les industries polluantes, la circulation automobile et le chauffage ainsi que la climatisation des bâtiments par le gaz naturel qui produisent ce CO<sub>2</sub>.

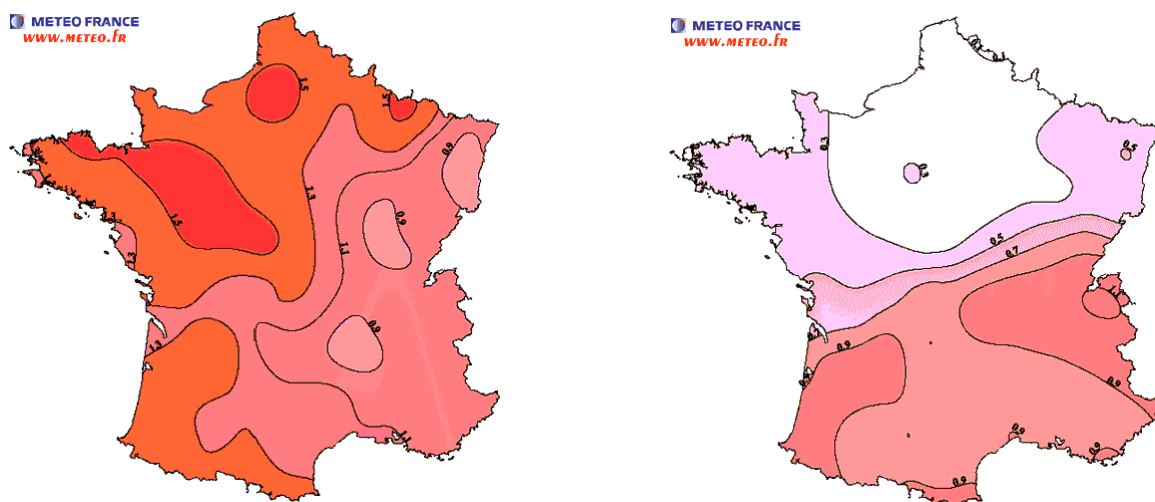


Figure 1.19 : Cartographie de la tendance séculaire des températures annuelles minimales et maximales, relevées entre 1901 et 2000<sup>85</sup>.

- Un deuxième enjeu, qui va avoir aussi son effet sur les directives d'urbanisation contemporaine, c'est la dégradation des milieux naturels. Cette dernière est attribuée à quatre causes : l'accroissement rapide de la population, le gaspillage des matières premières et fossiles, la dégradation de l'air, de l'eau et du sol et enfin l'abondance des déchets. Ces deux derniers points ont des conséquences considérables sur la santé des populations des villes. Pour cela la voiture est considérée, en plus de son impact sur l'effet de serre, comme un danger aussi pour les habitants des villes et les usagers des espaces de la ville. L'habitant des villes est donc à « protéger » à son tour.

#### 4.2. Directives pour des formes urbaines « durables »

Face à ces nouveaux enjeux, qui redéfinissent les enjeux posés par l'hygiénisme au cours des deux siècles précédents, la forme urbaine doit de nouveau être repensée. Mais commençons par les intentions. C'est d'abord la notion de développement durable qui est introduite, par opposition au modèle économique des pays industrialisés qui ne porte aucune attention à la nature. Ce concept, introduit en 1987 lors de la 42<sup>e</sup> session des Nations Unies, repose sur trois objectifs annoncés lors du sommet de Rio : la prise en considération de tout le cycle de vie des matériaux ; le développement de

<sup>85</sup> Cette cartographie réalisée à partir de près de 70 longues séries homogénéisées montre un réchauffement net des températures minimales plus important à l'Ouest (1,5°C) qu'à l'Est (0,9 à 1,1°C). Voir : <http://www.ac-toulouse.fr/histgeo/meteo/pages/climato>

l'utilisation des matières premières et des énergies renouvelables, et, enfin, la réduction des quantités de matière et d'énergie, depuis leur extraction à leur destruction (ou recyclage) en passant par leur usage. Ces objectifs sont associés à un programme appelé Agenda 21 ou Action 21, qui regroupe dans une approche globale des engagements tant sociaux qu'économiques. Depuis cette date plusieurs collectivités territoriales européennes ont préparé leur Agenda 21 Local.

Ce Sommet qui annonça les grands principes et les objectifs généraux, va être complété par celui de Kyoto en 1996 qui va avoir une dimension plus opérationnelle avec trois types d'actions préconisées : réduire la consommation d'énergie ; remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables et stocker le carbone. D'autres rencontres auront lieu, à la Haye en 2000 et Johannesburg en 2002. Mais les divergences entre le point de vue européen et celui des Etats Unis n'aideront pas à la formulation de nouvelles directives.

Quelles sont au juste les modifications attendues ou prévues des formes urbaines et de la planification des espaces construits ? La question posée aux urbanistes devient donc concrètement la suivante : comment économiser de l'énergie et quels matériaux recyclables utilisés ? Mais bien entendu, ces questionnements liés directement aux nouveaux enjeux environnementaux, sont indissociables des autres préoccupations urbaines liées aux aspects économiques et sociaux, et ceux liés à la perception de la ville en général. La recherche d'une qualité environnementale et microclimatique des formes urbaines ne peut pas se faire au détriment des autres éléments déterminants du projet urbain. Les échecs du déterminisme fonctionnaliste de l'urbanisme moderne nous l'a bien enseigné. La prise en compte d'un nouvel enjeu qui se traduira par de nouveaux objectifs ne doit pas nous faire oublier les autres objectifs qui peuvent découler des connaissances liées aux sciences humaines et sociales.

Gauzin-Muller relève dans son ouvrage trois objectifs consensuels quant aux orientations sur les formes urbaines de demain répondant au critère de qualité environnementale [Gauzin-Muller 2001] :

- **Une ville compacte**

L'urbanisme des années 60 et 70 préconisait l'extension de la ville sur les terres agricoles. Après cela, ce sont les « lotissements », zones d'habitations sans équipements, qui vont s'éloigner encore plus des villes existantes. En raison de la pression foncière, les terrains les moins coûteux sont les plus éloignés des villes. Cet *étalement* sur le territoire se fait sur des zones naturelles et il augmente les déplacements automobiles, et là par conséquent la pollution. Une des directives liées au développement durable est de réinvestir les villes existantes pour éviter cet étalement. En France la réduction de l'étalement urbain a été introduite par la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbain (loi SRU) élaborée en décembre 2000. On préconise donc la densification urbaine et, à long terme, pousser à l'abandon de la maison individuelle au profit de l'habitat collectif.

- **Un habitat dense**

La densification en un même volume bâti de plusieurs logements au lieu de les étaler en surface est une disposition préconisée pour l'économie de l'énergie consommée pour le chauffage des logements (fig. 1.20). Au-delà de l'économie d'énergie, elle permet aussi d'économiser les matériaux, l'emprise au sol et le coût de la construction.

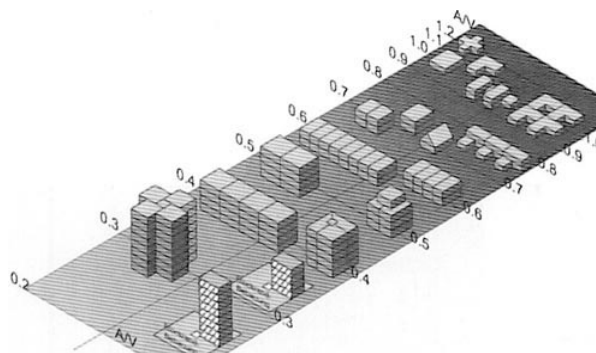


Figure 1.20 : Potentiel d'économie d'énergie selon la densité des bâtiments (plus la valeur est importante plus le bâtiment consomme de l'énergie) [Gauzin-Muler 2001]

#### - Verdissement des vides urbains et des toitures

Humidification de l'air, abaissement des températures, stockage du carbone et libération de l'oxygène, fixation des poussières, affaiblissement de la propagation du bruit et réduction de l'impression de densité..., sont quelques-unes des plus importantes fonctions régulatrices des arbres en milieu urbain. Mettre le plus d'arbres possibles est le troisième objectif énoncé pour atteindre un développement environnemental des villes.

Ces espaces verts foisonnent sur les terrasses, dans les cours intérieurs des îlots ou encore sur les rues et boulevards des villes. En d'autres termes mettre des espaces verts dans les interstices des vides urbains et là où l'on peut en mettre.

En résumé, les orientations pour l'avenir des villes qui répondent aux nouveaux enjeux de la qualité environnementale semblent converger vers un retour aux structures bâties existantes comme l'avait déjà formulé Engels et comme l'avait fait Haussmann ou encore comme cela s'est réalisé dans les projets d'ajustement morphologiques. La solution est donc récurrente, mais pour des enjeux nouveaux formulés explicitement par des objectifs d'économie d'espace et d'énergie et d'augmentation des surfaces plantées.

#### 4.3. Une Situation Problématique : Densification et accessibilité de l'air, du soleil et de la lumière dans les espaces urbains et les habitations.

Les propositions « rationnelles », que nous venons d'exposer brièvement, rejoignent le point de vue de Le Corbusier sur la ville moderne. Ne cherchait-il pas en effet à construire une sorte d'individuel vertical avec ses logements en duplex et ses terrasses ensoleillées. N'avait-il pas préconisé des espaces verts partout, et localisé les équipements et les bureaux à proximité (à quelques centaines de mètres) des habitations. Il ne lui manquerait que l'économie de l'espace. Les directives du développement durables que nous venons d'exposer confortent l'idée selon laquelle, il est aujourd'hui question de trouver une forme urbaine intermédiaire entre celles de la ville ancienne celle et de l'urbanisme moderne.

Aux enjeux hygiénistes et microclimatiques développés depuis la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle et diffusés dans la première moitié du XX<sup>ème</sup>, s'ajoute donc des préoccupations « énergétiques » et d'autres liées à la réduction des nuisances au sens général du terme. Sauf que la satisfaction de ces objectifs nécessiterait la mise en place de solutions contradictoires (antagonistes).

Par définition, l'accessibilité du soleil, de l'air et de la lumière ainsi que le rejet des nuisances vers l'atmosphère exigent des solutions contraires à la densification et la compacité de la ville. La question qui se poserait aujourd'hui serait de savoir jusqu'à quelles limites il faudrait densifier le bâti et réduire le vide dans les villes héritées du passé proche et lointain ?

C'est exactement dans ces termes que nous avons terminé le chapitre précédent. Les architectes se posaient les mêmes questions pour satisfaire des objectifs toutefois différents (faire entre l'air et la lumière pour assainir les espaces urbains). En préconisant une ouverture modérée du vide urbain, ils ne définissaient pas selon qu'elle « quantités » il devait le faire. Nous avons là deux formes à ne pas reproduire, les grands ensembles et la ville ancienne, il nous faut trouver un entre deux.

En alliant deux objectifs contradictoires, la question de la définition de la limite d'ouverture optimale se pose désormais avec acuité. Si l'on veut densifier et compacter pour économiser l'espace, l'énergie et les émanations polluantes, on doit aussi savoir sauvegarder l'ensoleillement, la lumière naturelle, et l'air pour les usagers des espaces urbains et les habitations. C'est pour contribuer à résoudre cet antagonisme auquel seront confrontées les transformations urbaines que nous allons interroger les outils de la climatologie urbaine dans les deux prochains chapitres. Nous reviendrons sur ce point dans le dernier chapitre.

### **CONCLUSION : VERS LA QUANTIFICATION DES EFFETS MICROCLIMATIQUES**

Nous avons pu analyser, progressivement tout au long de ce chapitre, comment la régulation du microclimat urbain par les éléments de la forme urbaine a été effectuée au cours de l'histoire urbaine et cela en fonction, à chaque période, d'un contexte historique spécifique. D'abord, par adaptation aux variations spatiales du microclimat urbain sans aucune intervention, puis par des ajustements de la forme urbaine qui ont consisté en des interventions sur les éléments de la forme urbaine sans en modifier le type ni la structure, et enfin, par une intervention « innovante » avec le mouvement moderne qui a proposé de nouvelles compositions de la forme urbaine. Mais sur quel savoir-faire se sont appuyés les auteurs successifs des différents types d'interventions sur la forme urbaine pour juger de la pertinence microclimatique de leurs transformations et leurs innovations ?

Nous sommes tentés de répondre « des intuitions de différences qualitatives ». En effet les architectes et urbanistes qui ont prescrit des transformations des états existants de la forme urbaine se sont principalement basés sur des niveaux de différence morphologique. La proposition majeure de l'urbanisme moderne, malgré quelques tentatives de rationalisation des questions liées à l'ajustement climatique<sup>86</sup>, reste la proposition d'une nouvelle forme urbaine opposée à la ville ancienne. En effet, les ajustements climatiques de l'urbanisme moderne, ont conduit dans la plupart des cas, non pas à un ajustement morphologique mais à une innovation.

Les propositions interventionnistes sur la qualité de l'air et le microclimat urbain en général peuvent être réduites des interventions sur le vide urbain. Ces interventions vont d'une modification mineure du vide urbain (alignements, élargissements, limitation des hauteurs, prescription des prospects) à une modification majeure qui consiste à une opposition systématique à la forme ancienne et qui va conduire à l'inversion des rapports du vide et du construit. Les savoirs scientifiques préconisaient en effet des interventions, mais n'étaient pas en mesure de proposer une quantification de ces interventions sur la forme urbaine. On savait par exemple qu'un élargissement était bénéfique pour l'aération des espaces de la ville, mais on ne connaissait pas selon quel prospect de rue cet élargissement devenait problématique. On ne savait pas non plus qu'en dépassant une certaine limite, l'élargissement en question qui, à la base, visait des questions d'hygiène et de densité, pouvait avoir des répercussions considérables sur la vie sociale dans ces nouvelles formes urbaines.

La qualité microclimatique des transformations urbaines et des éléments nouveaux de la forme urbaine était donc principalement mesurés en regard de leur différence par rapport à la forme urbaine

---

<sup>86</sup> Parmi ces travaux les épures d'ensoleillement d'Unwin, de Terragni, de Marboutin, de Le Corbusier, diagrammes des vents de Unwin et de Rey, schémas de dispersion des fumées d'Hilberseimer, etc. Mais seul l'analyse de l'ensoleillement a été investi par des instruments de mesures rationnels intégrant la question de l'orientation des édifices. Voir [Péneau 98 et Péneau ND]



existante. Les espaces construits existants constituaient en effet un état de référence dont les effets microclimatiques étaient plus ou moins connus.

De nouvelles connaissances scientifiques permettent aujourd'hui d'envisager avec d'avantage de précisions une analyse des effets microclimatiques et environnementaux<sup>87</sup> résultant de la mise en œuvre des projets urbains. C'est ce que nous allons aborder dans le prochain chapitre et cela en répondant à une question précise : est-ce que ces nouvelles connaissances nous permettent d'évaluer, voire de quantifier, les effets microclimatiques d'une intervention sur un cadre bâti ?

Types d'intervention	Périodes	Intentions microclimatiques	Interventions sur la forme urbaine	Modalités
<b>1. Adaptation spatiale</b>	... Jusqu'au XVII <sup>ème</sup> siècle	Eloignement des sources et des espaces malsains	Choix d'une situation spatiale pour habiter dans la ville intra-muros selon : - La hauteur des édifices (abandon des RDC) - La rue (voir toponymie) - Le quartier (ouvriers, religieux...) - La topographie (rivière, hauteurs de la ville)	- Différenciation spatiale de la qualité du microclimat urbain : d'un étage à un autre, d'une rue à une autre, d'un quartier à un autre, ou d'une situation topographique à une autre. - Différenciation foncière des parcelles selon leur qualité microclimatique.
<b>2. Ajustements morphologiques</b>	Des Lumières au XVIII <sup>ème</sup> à la reconstruction des villes au XX <sup>ème</sup> siècle	Améliorer l'accessibilité de l'air, du soleil et de la lumière naturelle	- Destruction des saillies - Elargissement des rues selon une ligne droite (alignements) - Limitation des hauteurs de rues selon leurs largeurs (prospects) - Percées de rues nouvelles avec des directions nouvelles	- Ouverture progressive des vides urbains
		Favoriser le rejet de l'air polluée vers l'extérieur des villes	- Pavage des sols - Comblement des fossés - Comblement des cours d'eau malsains (égouts à ciel ouvert) - Enterrement des réseaux d'évacuation d'eau	- Minéralisation et imperméabilisation des surfaces
<b>3. Nouvelles formes urbaines<sup>88</sup></b>	XIX <sup>ème</sup> et XX <sup>ème</sup> siècle	+ de soleil + d'air naturel + de lumière + de verdure  + de logements	- Densification verticale - Inversion des rapports « plein-vidé » - Choix des orientations des parois	- Nouvelle forme d'ouverture du vide urbain (étalement)  - Espaces verts considérables
<b>4. La ville contemporaine ?</b>	XX <sup>ème</sup> siècle	- Réduire l'étalement des espaces bâtis - Economiser l'énergie - Augmenter les surfaces plantées	- Economiser l'espace - Densifier la ville existante - Optimiser la constructibilité des vides urbains existants	- <b>Nécessité d'optimisation</b> - <b>Quels connaissances ?</b> - <b>Quels outils ?</b>

Tableau 1.2 : tableau synthétique des modes d'intervention sur la forme urbaine visant la régulation du microclimat urbain évoquées

<sup>87</sup> Il existe un rapport très étroit entre le développement d'outils scientifiques et la formulation des enjeux du développement urbain. Les outils de la climatologie urbaine ne sont pas apparus en réponse à ces nouveaux enjeux, mais c'est la mesure du réchauffement climatique par exemple qui a permis de formuler comme enjeu la nécessité de réduire ce réchauffement.

<sup>88</sup> Nous avons vu qu'à la même période des auteurs ont proposé de continuer dans les ajustements morphologiques. Mais vu que cela relève d'un point déjà abordé dans ce tableau nous ne présentons que le point de vue innovant de cette époque qui se détourne du model de la ville ancienne et dont les grands ensembles sont l'aboutissement extrême.

## Chapitre 2

# ELEMENTS DE QUANTIFICATION DU MICROCLIMAT URBAIN ET CHOIX D'UN MODELE DE SIMULATION

---

Nous allons dans ce chapitre examiner les possibilités que nous offrent les connaissances scientifiques actuelles pour l'évaluation du rapport entre transformations urbaines et les paramètres physiques du climat urbain à l'échelle d'un ensemble bâti. Les techniques permettant la quantification de ces paramètres ont considérablement évolué depuis les années 70 dans le cadre de la climatologie urbaine. Les mesures *in situ*, les observations satellites et les performances des modèles de simulation ont contribué à constituer un ensemble de connaissances qui nous permet d'envisager une mise en relation quantitative des variations de la forme et de celles des paramètres physiques du microclimat.

Ce chapitre est structuré autour de trois parties. Nous exposons dans chacune les éléments de connaissance développés en climatologie urbaine qui permettent de quantifier la régulation des paramètres physiques par les éléments de la forme urbaine. Il existe ainsi trois approches complémentaires pour appréhender cette régulation :

- La « conceptualisation » : ce qui est appelé forme urbaine ou espace urbain en urbanisme ou en architecture trouve une conceptualisation différente en climatologie urbaine. Cette conceptualisation est en rapport avec les échelles spatiales et temporelles des phénomènes physiques étudiés. Nous expliciterons dans la première partie de ce chapitre les concepts de surface, d'échelle, celui de canyon et d'îlot de chaleur et d'humidité. Nous présenterons aussi les éléments de la surface urbaine caractéristiques de l'échelle climatique locale qui s'appliquent en climatologie urbaine à l'analyse d'un ensemble urbain.
- Les « mesures expérimentales » : les mesures *in situ*<sup>1</sup> des phénomènes physiques liés à la régulation des paramètres climatiques par le cadre bâti est la principale méthode d'observation et de validation de ces phénomènes. Ces mesures qui étaient d'abord localisées dans l'espace et dans le temps, ont été développées, depuis quelques années, par les images satellites. Malgré le développement d'images satellitaire de plus en plus fines ces dernières restent d'une échelle spatiale trop grande (échelle d'une ville) qui ne permet pas d'analyser les variations locales de la forme urbaine. Nous évoquerons dans la deuxième partie de ce chapitre des mesures *in situ* qui ont permis la quantification des effets liés à des éléments de la forme urbaine assez proches des transformations historiques que nous avons évoquées dans le premier chapitre. Cela permettra une évaluation de l'importance des effets physiques pouvant être provoqués par les transformations historiques.
- Les « modélisations numériques » : les modélisations constituent la troisième approche des phénomènes physiques en milieu urbain. Celle ci traduit, dans une certaine mesure, une maîtrise de l'ensemble des éléments impliqués dans la propagation des phénomènes physiques. Les modèles constituent une « reproduction » de la réalité selon un certain nombre de paramètres jugés représentatifs des mécanismes de propagation. Nous présenterons dans cette partie du chapitre les

---

<sup>1</sup> Les mesures par satellites qui s'appliquent à l'état actuel des connaissances à des échelles spatiales très grandes (échelle de la ville) ne seront pas abordées du fait de cette échelle qui dépasse celle de notre objet de recherche.

principaux modèles existant qui traitent des phénomènes physiques liés à l'échelle spatiale d'un ensemble urbain, ainsi que les modèles physiques appliqués dans la plupart de ces modèles sont basés sur le principe de conservation de l'énergie et des masses.

## 1. DEFINITIONS ET CONCEPTS

### 1.1. Le concept de surface

En réalité aucune surface de sol n'est complètement plane. Les surfaces sont composées d'un certain nombre d'éléments « rugueux » (déformations de sol, arbres, objets divers, etc.) qui altèrent leur aspect planimétrique. En milieu urbain, les éléments rugueux de surface étant très importants du fait de la présence de bâtiments, la surface de la ville est ainsi considérée comme étant un « volume d'air construit » [OKE 1987].

D'un point de vue conceptuel, la surface est un plan qui sépare deux milieux dans des états différents (eau, gaz, solide). En climatologie urbaine elle s'applique à une couche d'une hauteur donnée qui sépare le sous-sol de l'atmosphère. Cette couche de surface ne contient ni masse ni énergie, mais elle est le lieu de très importants échanges et conversions de masses et d'énergie. Cette interface est définie par T.R. OKE par le terme « surface active » :

*« Dans le cadre d'objectifs climatiques, on définit la surface « active » comme le plan principal des activités climatiques dans un système »*

La surface urbaine est l'espace de régulation principale des phénomènes physiques. Elle induit quatre modifications majeures des paramètres climatiques [OKE 1987, p.33] :

- Absorption, réflexion et émission de La majorité des rayonnements solaires et thermiques et lumineux
- Transformation de la plus grande part d'énergie et de masse
- Interception des précipitations
- Forte résistance au mouvement des flux d'air

Plus on se rapproche du sol et plus les interactions entre le sol et l'atmosphère sont considérables. La couche de surface (plus ou moins 10 m au-dessus du sol) est caractérisée par d'importantes turbulences dues à la rugosité du sol et au phénomène de convection. Pendant le jour, cette couche peut atteindre une hauteur de 50m, alors qu'en phase nocturne, du fait du phénomène de tassement de la couche atmosphérique, elle ne dépasse pas quelques mètres de hauteur. Son importance et notamment sa hauteur dépendent toutefois des caractéristiques de surface du sol. La surface urbaine n'est donc pas définie comme étant une surface plane, mais comme étant une couche dont l'épaisseur dépend fortement de la morphologie des différents éléments du sol urbain.

Compte tenu des différentes formes d'urbanisation qu'elle accueille<sup>2</sup>, la surface urbaine constitue une interface d'échange spécifique avec l'atmosphère. Selon la nature des surfaces (morphologie, types de sol et matériaux) les propriétés physiques des surfaces diffèrent. On peut distinguer par exemple par l'utilisation des images satellites que cela peut produire des températures de surfaces différentes selon les spécificités morphologiques et anthropologiques de la surface urbaine (fig. 2.1). Le processus d'urbanisation produit donc des changements importants sur la nature des surfaces et les propriétés atmosphériques des régions urbanisées. Cela a pour effet une modification des caractéristiques radiatives, thermiques, aérauliques et d'humidité, de ces territoires. La densification des constructions urbaines et l'usage de matériaux à forte inertie renforce l'emmagasinement de la chaleur dans les espaces urbains et contribue à l'imperméabilisation de la surface du sol ; la géométrie et la disposition des constructions créent des possibilités de piégeage radiatif et de stagnation de l'air; la chaleur et l'eau libérées par ces zones

<sup>2</sup> Contrairement à un « état naturel » de surface, la couche « superficielle » urbaine, par la densité de ses constructions et l'étendu de ses revêtements de sols, modifie de manière importante les échanges sol- atmosphère.

urbanisées – dissipées par le produit des activités humaines (appelés sources anthropogéniques) - s'additionnent aux sources naturelles de chaleur et d'humidité de ces régions.

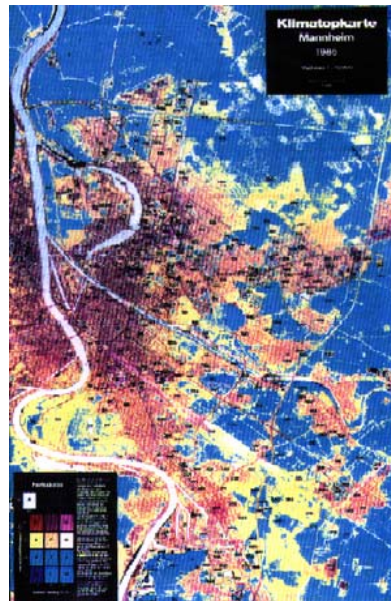


Figure 2.1 : Photo satellite extraite de « Klimatop »<sup>3</sup>

## 1.2. Le concept d'échelle

Pour maîtriser la description des phénomènes liés à l'interaction des différents éléments de la surface urbaine avec l'atmosphère, le climat urbain (ou ce qui résulte de l'interaction des données climatiques avec la surface urbaine) est décomposé en trois échelles dimensionnelles qui interagissent entre elles. L'atmosphère urbaine est ainsi décomposée en plusieurs couches qui traduit chacune l'effet d'une échelle spatiale de la surface urbaine. Des échelles dimensionnelles de la surface urbaine sont donc associées à des champs d'influence verticaux sur l'atmosphère urbaine représentés par une stratification de couches (fig. 2.2).

### 1.2.1. Les échelles spatiales de la surface urbaine

- Micro-échelle : toute surface ou tout objet crée son propre microclimat qui influe à la fois sur l'objet ou la surface en question ainsi que sur leur environnement immédiat. Les températures d'air et de surface peuvent varier sur des distances très faibles (même à quelques millimètres) et les flux d'air peuvent être à leur tour perturbés par des objets relativement petits. La plus petite échelle caractéristique de la variation des paramètres climatiques à la surface du sol ou des objets en contact avec l'air est l'échelle micro. Les échelles spatiales typiques de ce que l'on appelle en climatologie urbaine le microclimat urbain (relatif à l'échelle micro) sont liées aux dimensions des champs d'influence d'éléments isolés comme les bâtiments, arbres, rues, routes, cours intérieures, jardins, etc. La distance associée à cette échelle est généralement comprise entre 1m et 100m.

---

<sup>3</sup> La carte Klimatop a été développée par Spacetec pour l'étude du climat urbain. Cette carte permet « une cartographie quantitative reproductible et objective du comportement microclimatique des surfaces d'occupation du territoire ». Voir le rapport intitulé: « application de la carte Klimatop de Spacetec à l'aménagement urbain », Spacetec Salstrasse Freiburg, traduction de « Die anwendung der Spacetec Klimatopkarte in der bauleitplanung », Spacetec, 21p. Disponible à la documentation du CERMA.

- Echelle locale : cette échelle traduit les variations introduites par les éléments de l'environnement comme la topographie et dépasse l'échelle des effets microclimatiques. Elle englobe les champs d'influence résultant de la régulation des paramètres climatiques à l'échelle d'un ensemble urbain aux caractéristiques homogènes (matériaux de surface, taille et espacement entre bâtiments, activités, etc.). Les distances typiques de cette échelle se situent entre 01 et quelques kilomètres.
- Meso échelle : les influences d'une ville sur les paramètres climatiques et sur les conditions météorologiques sont analysées à l'échelle Meso. Cette dernière s'étend à quelques dizaines de kilomètres.

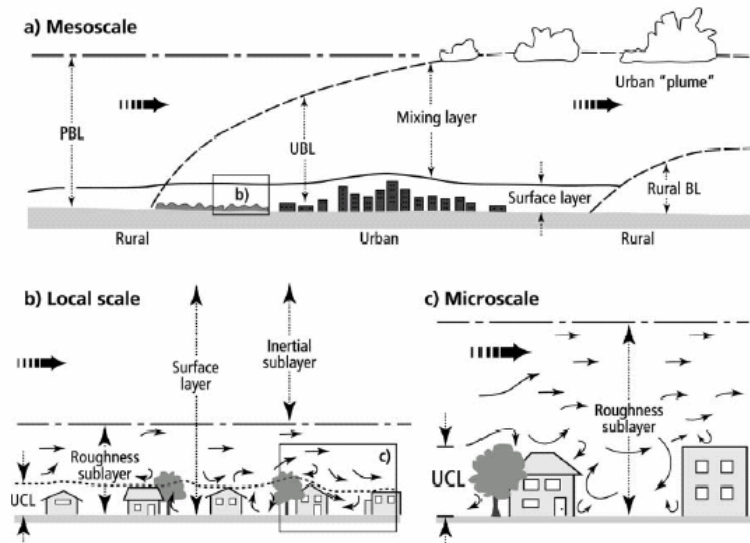


Figure 2.2 : Représentation schématique des échelles climatiques et des couches verticales dans une surface urbaine [OKE 1987]<sup>4</sup>

### 1.2.2. Les couches verticales associées aux échelles spatiales

Les effets microclimatiques sont localisés dans une couche située entre le sol et le sommet des obstacles situés sur une surface. Cette dernière est appelée couche de canopée urbaine (Urban Canopy Layer). Sa hauteur est approximativement équivalente à la hauteur moyenne des éléments de rugosité (bâtiments et arbres). L'influence microclimatique des éléments de la surface urbaine persistent sur une distance limitée puis ils sont mélangés aux effets de plus grande échelle.

Le passage des effets microclimatiques à ceux de l'échelle locale dépend de la magnitude du microclimat urbain et de la vitesse du vent et sa stabilité. L'influence de la canopée urbaine s'étend verticalement sur une couche appelée « Roughness Sublayer » qui commence au niveau des toits et atteint une hauteur où la canopée n'a plus d'effet sur la couche supérieure (relative à l'échelle Meso). Cette hauteur atteint en moyenne une fois et demi celle de la canopée dans des ensembles urbains denses et homogènes.

Une troisième couche au-dessus des deux précédentes est à son tour influencée par la surface urbaine. La hauteur de celle-ci dépend des conditions générales de rugosité à l'échelle de la ville et de la stabilité des conditions atmosphériques. C'est cette couche qui est généralement prise en compte pour caractériser l'effet des villes sur l'atmosphère. Elle est appelée couche limite urbaine (Urban Boundary Layer). Au-delà de cette couche on se retrouve dans les mêmes conditions

<sup>4</sup> Dans : [http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft\\_chapter\\_11.pdf](http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft_chapter_11.pdf)

Les abréviations sont à interpréter comme suit :

UCL : couche de canopée urbaine ; UBL : couche limite urbaine ; PBL : couche limite planétaire.

climatiques que celles d'un site rural non influencé par les conditions de rugosité, c'est à dire celles de la couche limite terrestre.

### 1.3. Le canyon urbain

La présence des bâtiments est l'une des caractéristiques principales de la surface urbaine. Les vides entre bâtiments qui résultent de cette présence produisent des effets physiques spécifiques qui ont des répercussions considérables à l'échelle locale et microclimatique. Parmi ces effets le phénomène de piégeage radiatif et la stagnation de l'air. Le vide créé est conceptualisé sous le terme « Canyon urbain ».

L'implantation des bâtiments induit une déformation de la surface plane qui provoque le phénomène de piégeage radiatif qui concerne à la fois les rayonnements solaires et les rayonnements de grande longueur d'onde provenant du sol en direction de l'atmosphère (fig.2.3). La régulation des rayonnements de courtes longueurs d'ondes peut s'effectuer par l'intermédiaire d'une manipulation de la géométrie des surfaces réceptrices afin de favoriser la loi « de radiosité »<sup>5</sup>.

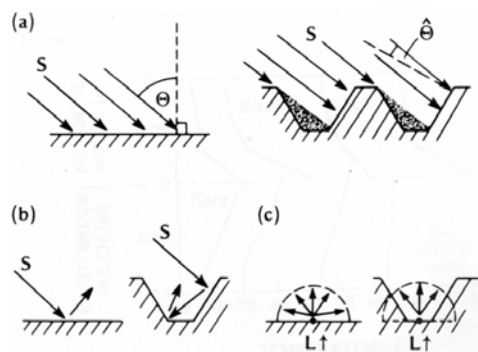


Figure 2.3 : Rôle de la géométrie de surface dans les échanges radiatifs. [OKE 1987]

Le piégeage consiste en la réflexion des rayonnements reçus par une surface, qui au lieu de se diriger vers l'atmosphère comme dans un cas classique de surface plane, il est au contraire réfléchi une deuxième fois, voire plusieurs, par les surfaces voisines avant de se diriger vers l'atmosphère. Ceci augmente les chances d'absorption et réduit du coup l'albédo global de la surface. D'un autre côté les émissions thermiques du sol sont assez réduites du fait de la réduction du facteur de vue du ciel. Pour tous les points du sillon appelé « canyon » le facteur de vue du ciel est moins que l'unité, puisque la vue totale de l'hémisphère du ciel est obstruée par les autres faces du canyon. Ainsi le piégeage des rayonnements solaires durant le jour tend à augmenter la température des espaces urbains et des faces qui les définissent, et le piégeage de rayonnements thermiques depuis le sol, la nuit, tend à réduire le refroidissement des surfaces. Ce qui permet d'affirmer, dans le cas d'un climat tempéré ou froid, que, de façon générale, le système géométrique constitué d'espaces urbains entourés de bâtiments (rues, places, etc.) augmente la température du sol et celle de l'espace par conséquent.

Dans l'environnement immédiat aux constructions, les températures de l'air et du sol sont plus chaudes que dans les régions « ouvertes » non bâties, du fait des pertes de chaleur depuis ces bâtiments que l'obstruction au vent que forment les bâtiments viendra renforcer. Le bilan hydrique

<sup>5</sup>  $S = S_i \cos \theta$ . S représente la densité de flux du rayonnement au niveau de la surface ;  $S_i$  est la densité de flux selon une direction normale à la surface ; et  $\theta$  l'angle entre la direction du rayonnement solaire et celle de la normale à la surface.

autour des édifices est inversé, à cause de la variation spatiale dans la réception des précipitations, du drainage au sol, et de l'évaporation.

D'importantes modifications sont apportées aussi à l'écoulement du vent, principalement sur sa direction et sa vitesse, lorsque les bâtiments sont assez espacés pour permettre un écoulement entre ces derniers. La « forme d'écoulement » et la variation de sa vitesse, est un élément contribuant à la distribution des autres caractéristiques microclimatiques. La configuration de ces mouvements d'air est donc associée à la fois à la hauteur des bâtiments et à la distance qui les sépare.

Les géométries présentées dans les travaux de climatologie urbaine pour décrire les surfaces bâties sont souvent réduites à des profils types des canyons défini par leur prospect (fig. 2.4). La ville est le plus souvent assimilée, dans les modèles de la climatologie urbaine, à un système de rues canyon [NUNEZ et al. 1977, OKE 1987, HUNTER et al. 1992, PIGNOLET 1996, MILLS et al. 1993, SINI et al. 1996, ARNFIELD et al. 1998]. On considère ainsi que la forme urbaine peut être réduite à une agrégation de rues similaires ayant une forme linéaire avec une longueur infinie. Mais l'adoption d'un tel modèle simplificateur de la forme urbaine, considère une homogénéité parfaite de la forme urbaine : même rues, symétrie parfaite des deux côtés de la rue, absence d'intersections et d'ouvertures latérales, etc. Le seul paramètre H/L du canyon (hauteur/ largeur) suffit à décrire, dans ces cas, la forme urbaine.

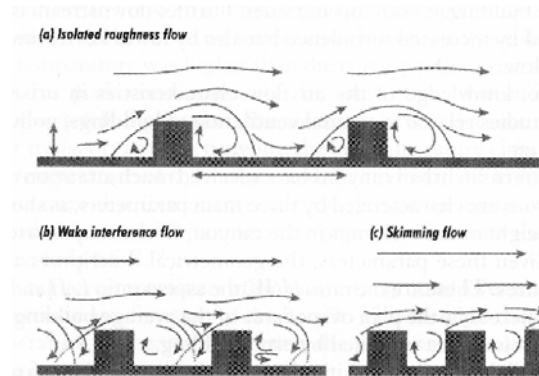


Figure 2.4 : Régimes de flux associés à différentes géométries urbaines [OKE 1987, p. 267]

#### 1.4. Le concept « d'îlot » appliqué à la description spatiale des champs thermiques et d'humidité : îlot de chaleur et îlot d'humidité

L'agrégation des différents éléments de la surface urbaine produit un phénomène physique associé que l'on ne retrouve qu'à une échelle spatiale considérable. Ces phénomènes sont « l'îlot de chaleur et l'îlot d'humidité ». La notion d'îlot (« Island » en anglais) traduit un effet homogène et hiérarchique sur la distribution de la chaleur et de l'humidité dans la surface urbaine. Ce sont aussi des phénomènes qui ont un effet rétroactif sur les espaces urbains (un îlot de chaleur important contribue au réchauffement des espaces urbains) de même qu'ils ont des effets à grande échelle sur la couche atmosphérique.

L'îlot de chaleur urbain traduit les variations de température d'air dans la surface urbaine à l'échelle d'une ville (fig. 2.5). L'écart maximum de température entre la surface urbaine et la surface rurale traduit l'intensité de l'îlot de chaleur. La température maximum de l'air est généralement associée au centre ville (généralement le plus dense). L'îlot de chaleur est généralement représenté en plan par des « isothermes » qui sont des courbes reliant les différents points de même température d'air. La distribution des isothermes dépend fortement des conditions de rugosité et de la porosité de la canopée urbaine au vent (fig. 2.6).



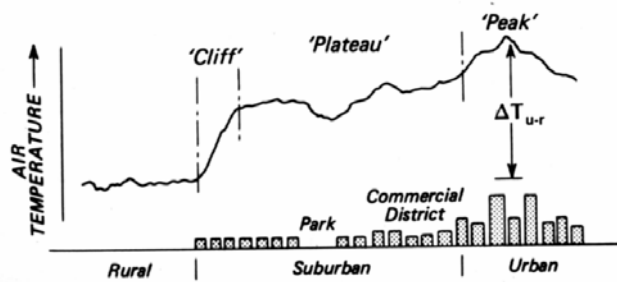


Figure 2.5 : « Coupe représentative du profil d'un îlot de chaleur urbain [OKE, 1987]

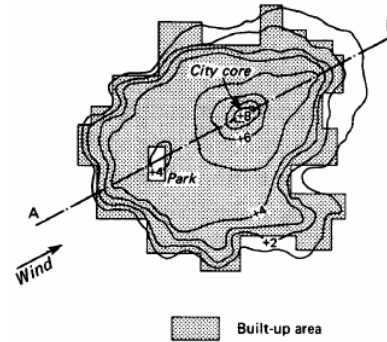


Figure 2.6 : Représentations des isothermes traduisant l'îlot de chaleur urbain et l'influence de la direction du vent

Des travaux de référence nous expliquent les processus physiques pouvant mener à la génération de l'îlot de chaleur [OKE 1987, MESTAYER et al. 1994]. On peut les résumer à partir des actions (aux actions) suivantes : accumulation de la chaleur dans les constructions ; altération du bilan hydrique (surtout au travers la réduction de l'évapotranspiration des surfaces) ; altération du bilan radiatif et production des gaz à effet de serre ; altération du cycle diurne des flux de chaleur sensible (par rayonnement et par conduction) ; production de chaleur sensible anthropogénique (transport, chauffage et industries) ; et réduction de la vitesse du vent.

La configuration tridimensionnelle de la surface urbaine, est un paramètre déterminant pour la modification et le contrôle de l'îlot de chaleur urbain. En effet, T.R.Oke, après avoir étudié les centres urbains de 31 villes, donne une formulation de l'îlot de chaleur urbain [OKE 1987] qui dépend uniquement de la variation des prospects des rues ou selon les facteurs de vue du ciel.

$$\Delta T_{u-r(max)} = 7.54 + 3.97 \ln (H/L) \text{ ou } \Delta T_{u-r(max)} = 15.27 - 13.88 \psi_{ciel}$$

Par extension aux études sur l'îlot de chaleur urbain, quelques travaux ont mis en avant la notion d'« îlot d'humidité urbain ». Ceci est dû au fait que les variations d'humidité relative et absolue paraissent « moins importantes » que la température et plus complexes à mesurer dans l'espace et dans le temps. [GOLDREICH 1999]. La distribution de l'îlot d'humidité dans un centre urbain dépend à la fois de la disponibilité de l'eau et du potentiel d'évapotranspiration<sup>6</sup> des surfaces. Il nous faut distinguer concernant l'humidité des phases d'études critiques, comme les moments qui suivent une précipitation sur une surface imperméable ou la formation d'un brouillard. L'augmentation des surfaces urbaines (pour la plupart composée de revêtements imperméables) contribue en effet à augmenter les surfaces d'interception des eaux pluviales et de ce fait accroît les surfaces évaporantes.

La deuxième source d'humidification de l'air provient du processus d'évapotranspiration des sols. [GRIMMOND et al. 1999] en observant l'évapotranspiration réelle de plusieurs villes Nord américaines, sur des échelles spatiales locales (entre 102 et 104 m), ont constaté que l'évapotranspiration dans les espaces urbains est un flux important<sup>7</sup>, et que dans plusieurs cas elle

<sup>6</sup> Le transfert d'eau du système sol -végétation vers l'atmosphère peut s'effectuer selon deux modalités : soit par évaporation directe de l'eau du sol ; soit par évaporation de l'eau par transpiration des végétaux, préalablement prélevée dans le sol par leur système racinaire ou par l'évaporation d'eau à travers un sol poreux. Ces processus concernant les sols poreux et les végétations se produisent simultanément et de manière telle qu'il est difficile de les distinguer, si bien qu'ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration.

<sup>7</sup> Dans les zones résidentielles elle constitue un apport d'énergie de 22 à 37% sur l'ensemble des rayonnements journaliers (toute longueurs d'onde confondues). Dans les zones industrielles et le centre ville, elle est beaucoup moins importante.

dépasse celle due aux précipitations, par le fait de l'alimentation en eau canalisée vers la ville depuis le sous-sol, les rivières, etc.

Il existe d'énormes variations spatiales du taux d'évapotranspiration. Elle est nulle quand il n'y a pas de couvert végétal et quand la surface est complètement asséchée, et peut atteindre des valeurs très importantes en présence de surfaces végétales irriguées et soumises à la convection (exp. 600 w/m<sup>2</sup> pour un parc) et aux surfaces d'eau<sup>8</sup> [GRIMMOND et al. 1999]. La majorité des données d'été ont montré que l'évapotranspiration constitue un flux important dans les espaces urbains. Dans les quartiers résidentiels elle contribue à une réduction des rayonnements net de courtes et grandes longueurs d'ondes pouvant aller jusqu'à 22 à 37% pendant le jour et 28 à 46% en 24 heures.

Les concepts d'îlot d'humidité et d'îlot de chaleur traduisent donc une échelle d'analyse de la température et de l'humidité qui s'étend à l'ensemble de la ville. Leur distribution spatiale est intimement liée au type de sol existant, aux matériaux utilisés, au prospect des rues et à l'ouverture des espaces de la ville ainsi qu'aux densités bâties.

### 1.5. Eléments de la surface urbaine caractéristiques de l'échelle climatique locale

D'un point de vue dimensionnel, l'échelle climatique qui correspond à l'analyse du centre ancien de la ville de Nantes est celle de l'échelle locale, puisqu'elle englobe un territoire de plus d'1 km<sup>2</sup> aux caractéristiques bâties assez homogènes. Voyons donc selon quelques références de travaux de climatologie urbaine qu'elles sont les éléments de la surface urbaine qui caractérisent cette échelle climatique.

Les éléments les plus influents à l'échelle locale sont selon un article publié par l'IAUC (International Association for Urban Climate)<sup>9</sup> :

- La structure urbaine : hauteur des bâtiments et l'espacement entre ces derniers. La largeur des rues ainsi que leurs espacements.
- Le type de recouvrement de la surface urbaine : bâtiments, pavage, végétation, sol naturel ou surface d'eau.
- Les matériaux des surfaces : matériaux de construction ou matériaux naturels.
- Le métabolisme urbain : chaleur, eau et pollutions produites par les activités urbaines.

Il n'existe pas de schéma reconnu pour la classification des surfaces urbaines selon leurs effets climatiques à l'échelle locale. Mais des tentatives ont été faites. On peut citer à ce titre celle de Ellefsen (1990/1991) qui a identifié différents types de zones urbaines (Urban Terrain Zone « UTZ »). Cette classification, que T.R.Oke a repris dans un récent article (tableau 2.1), fait dépendre les effets climatiques à l'échelle locale de trois données de surface :

- La classe de rugosité : la classification de la rugosité est basée sur celle établie par Davenport (tableau 2.2).
- Le prospect du canyon : le prospect DU canyon est égal à ZH/L. Il correspond au rapport de la hauteur moyenne des éléments de rugosité ZH (bâtiments et arbres) par leur espacement moyen. Cette valeur a un effet direct sur le régime des flux et les échanges thermiques et radiatifs.
- La fraction de surface bâtie : Cette valeur représente la proportion de surface couverte par les éléments construits (bâtiments, rues, pavage et autres revêtements imperméables). Le reste de la

<sup>8</sup> Les moyennes journalières mesurées sur des piscines en été à Tucson (USA) étaient de 9.8 mm/j = 275 w/m<sup>2</sup>. [GRIMMOND et al. 1999]

<sup>9</sup> Voir : <http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/>

surface urbaine est considéré recouvert par des éléments perméables (espaces verts, eau, et autres surfaces). La perméabilité a un effet sur l'humidité de l'air et sur le potentiel d'humidification et d'évaporation provenant du sol.

Zone climatiques urbaines UCZ	Image	Classe de rugosité	Prospect du canyon	% construit (imperméable)
Croissance urbaine intense avec des variations importantes des hauteurs de bâtiments (présence de tours)		8	>2	>90
Croissance intense à forte densité avec hauteurs homogènes et bâtiments proches (Utilisation de la brique et de la pierre)		7	1.0-2.5	>80
Croissance importante, densité moyenne, Bâtiments espacés (habitations urbaines...)		7	0.5-1.5	65-85
Croissance importante, densité moyenne, bâtiments bas, sols pavé (centres commerciaux...)		5	0.05-0.2	75-95
Croissance moyenne, densité faible avec 01 à 02 rangées de maisons (périphérie urbaine)		6	0.2-0.6 (plus de 1 avec arbres)	35-65
Paysage ouvert, succession d'espaces verts et de bâtiments étendus, usages divers (aéroports, universités...)		5	0.1-0.5 dépend des arbres	<40
Site semi-rural avec des habitations éparpillés sur un sol agricole (fermes...)		4	>0.05 dépend des arbres	<10

Bâtiments    Arbres    — Sol imperméable    ..... Sol perméable

Tableau 2.1 : Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat à l'échelle locale par T.R.Oke d'après Ellefsen<sup>10</sup>

Catégories	Z0 (m)	Description du paysage correspondant
4. « Rugueux ouvert »	0.10	Territoire modérément ouvert avec des obstacles occasionnels (bâtiments bas isolés ou arbres) avec une distance entre obstacles égale à 20 fois leur hauteur
5. « Rugueux »	0.25	Obstacles réguliers avec des distances égales entre 8 à 12 fois leur hauteur pour des objets assez bas (exp. Bâtiments) (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
6. « très rugueux »	0.5	Surface modérément couverte par des bâtiments bas séparés par une distance égale entre 3 à 7 fois le leur hauteur et sans arbres hauts (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
7. « skimming »	1.0	Surface bâtie dense sans grande variation de hauteur (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
8. « Chaotique »	2.0	Centres villes composés de bâtiments avec une forte variation de hauteur

Tableau 2.2 : Classification de la rugosité effective de terrains selon Davenport (classes 4 à 8)<sup>11</sup>

La figure suivante (fig. 2.8) nous représente de manière assez claire les différents éléments de la forme urbaine qui sont pris en compte dans une analyse climatique à l'échelle locale. Les éléments d'information contenus dans cette fiche d'analyse visent à décrire l'environnement urbain avant d'effectuer une campagne de mesure. Ces éléments traduisent donc dans un cas opérationnel de mesure ce qui est potentiellement influent sur le climat local.

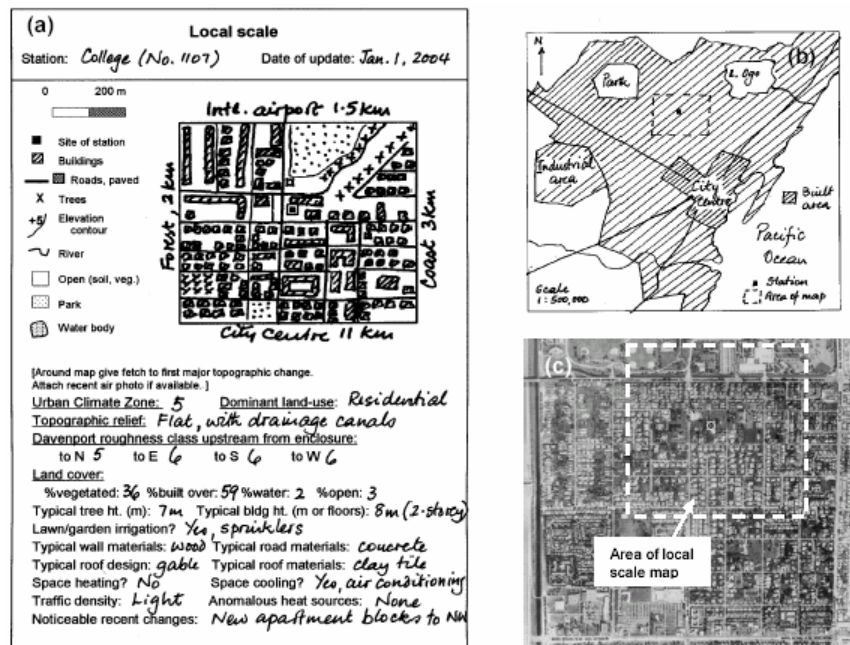
<sup>10</sup> T.R. Oke, selon article non publié. Voir : [http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft\\_chapter\\_11.pdf](http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft_chapter_11.pdf)

<sup>11</sup> Cité dans : [http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft\\_chapter\\_11.pdf](http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft_chapter_11.pdf)

Les classe 1 à 3, non citées dans le tableau, concernent des surfaces non-urbanisées.

Les données de l'échelle climatique locale relevées sur site sont constituées par les éléments suivantes :

- Couverture de surface (en %) : végétation, bâtiments, eau, espaces ouverts
- Hauteurs typiques des éléments de rugosité : bâtiments, arbres, etc.
- Matériaux typiques : façades, sols, et toitures
- Forme typique des toitures
- Renseignements sur l'usage, le climat, et la situation : zone climatique, usage dominant, l'état du relief topographique, classe de rugosité, densité du trafic, anomalies, etc.



Informations minimums pour la description d'un environnement pour effectuer des mesures à l'échelle locale :  
 a) description de l'environnement ; b) plan de situation de la zone ; c) photo aérienne [IAUC2003]<sup>12</sup>

Figure 2.8 : Exemple de fiche d'analyse à l'échelle climatique locale<sup>13</sup>

<sup>12</sup> <http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/>

<sup>13</sup> [http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft\\_chapter\\_11.pdf](http://www.geography.ohio-state.edu/UrbanClimate/newsletter/draft_chapter_11.pdf)

## 2. MESURE DES VARIATIONS DU MICROCLIMAT URBAIN EN RELATION AVEC LES ELEMENTS DE LA SURFACE URBAINE

Nous présentons dans les développements qui suivent quelques travaux qui visaient l'évaluation des effets sur les échelles climatiques micro-locales et locales de modifications de la forme urbaine. Nous mettons l'accent pour cela sur les effets liés à des éléments de la forme urbaine assez proches des différentes interventions sur la forme urbaine que nous avons recensées dans le premier chapitre, à savoir : la modification des prospectes de rues qui a été une des interventions répondant à une intention salubriste explicite ; la modification de la quantité de surface d'eau qui nous rapproche des effets liés aux comblements ; la modification des surfaces des espaces verts ; la perméabilisation ou l'imperméabilisation des surfaces du sol des rues qui nous renseigne sur les effets potentiels liés au pavage des rues et enfin la modification des matériaux et des couleurs des parois urbaines qui sont des éléments déterminants du bilan énergétique de la surface urbaine.

### 2.1. Variation du prospect des rues

Différents travaux ont eu pour objet la mesure des paramètres microclimatiques à l'intérieur de la rue canyon. A Athènes [SANTAMOURIS et al. 1999], on a pu constater que les températures maximales des surfaces à l'intérieur du canyon peuvent atteindre 53°C, alors que les minimales (en situation climatique équivalente) ne dépassent pas 25°C. Les deux surfaces opposées peuvent avoir une différence de température de l'ordre de 19°C. Ce qui montre bien qu'avec les mêmes types de rues, l'orientation de ces dernières peut avoir une grande influence.

Le rapport H/L peut à son tour contribuer à différencier les paramètres microclimatiques dans les rues. T.R.Oke a démontré que des valeurs spécifiques de ce rapport peuvent permettre d'atteindre des objectifs de maîtrise des paramètres microclimatiques, même si a priori le plus souvent ceux ci sont conflictuels<sup>14</sup>. Ses travaux appliqués à des villes de latitude moyenne ont permis de faire ressortir les résultats suivants : pour une meilleure protection des vents et une préservation de l'îlot de chaleur, le rapport H/L devrait être inférieur à 0,4, alors qu'une valeur proche de 0,6 et 0,65 permet de dissiper la pollution et de favoriser l'ensoleillement de la rue (fig. 2.9) [OKE 1987].

Il est reconnu aujourd'hui que l'urbanisation engendre une augmentation des températures des espaces urbains par rapport aux périphéries non urbanisées des villes, par le phénomène d'îlot de chaleur. Ce réchauffement peut être un avantage en hiver (réduction de la demande de chauffage) mais peut poser un problème dans les saisons chaudes en augmentant la facture due à la climatisation (cas propre aux climats chauds). Des études américaines [AKBARI et al.1992] ont montré qu'une augmentation de température de l'ordre de 0,5°C peut affecter une augmentation des demandes en air conditionné de 1,5 à 2%. Lors des saisons chaudes lorsque cette augmentation est de 1 à 2°C, la consommation en énergie électrique peut augmenter de 3 à 8% et encore plus en cas de brouillard.

Dans la canopée urbaine (zone située entre le sol et les toits des bâtiments), les causes du réchauffement sont les suivantes [MESTAYER et al. 1994, CSTB 1995<sup>2</sup>] : Augmentation de l'absorption du rayonnement solaire par les matériaux urbains (albédo faible) ; augmentation des rayonnements de grande longueur d'ondes ; augmentation du stockage de chaleur par les surfaces ; réduction de la consommation de chaleur latente du fait de la réduction des surfaces évaporantes ou évapotranspirantes ; diminution de la réflexion des rayonnements solaire du fait du piégeage radiatif ; et existence de sources anthropogéniques de chaleur et d'énergie.

---

<sup>14</sup> Comme le fait de vouloir créer des zones de protection pour le confort des piétons tout en favorisant la dispersion des polluants ou encore rechercher une chaleur optimale la nuit en saison froide et l'inverse en saison chaude, etc.

L'albédo de surface est à son tour associé au prospect du canyon et à la disposition des bâtiments sur une surface urbaine. Des travaux ont ainsi établi un modèle évaluant l'albédo, comme dépendant de ces deux éléments, à travers des expérimentations sur maquettes [MASARU 1982] (fig. 2.10).

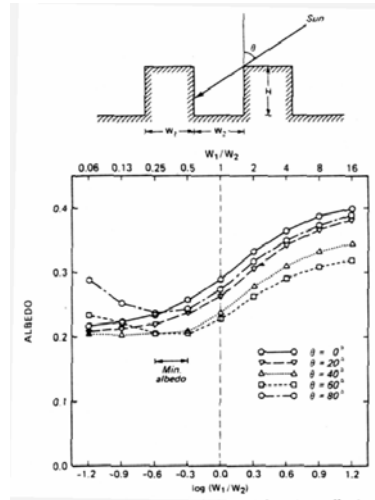


Figure 2.9 : Rapport de l'albédo à la géométrie décrite comme rapport de hauteur du bâtiment et largeur du canyon, incluant l'angle zénithal du soleil par simulations. [OKE 1987]

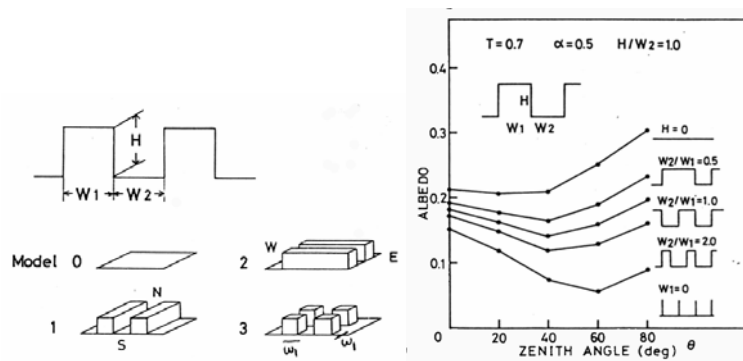


Figure 2.10 : Modèles d'expérimentations pour l'évaluation de l'albédo et évaluations de l'albédo en fonction de la variation des profils et du zénith solaire [MASARU 1982]

## 2.2. Modification de la fraction de surface d'eau

L'impact de l'eau est plus complexe par des mesures. Nous avons vu, dans la ville « pré-hygiéniste », comment l'abondance de l'eau dans les villes situées dans un climat tempéré pouvait devenir problématique et même dangereuse pour la santé des citoyens. Par contre l'usage de l'eau est plus bénéfique dans les climats chauds. Dans ces derniers on reconnaît en effet le potentiel rafraîchissant de l'air que peut procurer une surface d'eau ou une fontaine. A Lisbonne en 1998 lors de l'exposition mondiale et à Séville en 1992 avec l'exposition universelle, les architectes ont largement utilisé ce moyen naturel de rafraîchissement de l'air. Ce n'est évidemment pas le seul fruit de l'architecture et de l'urbanisme contemporains, à Grenade, l'eau était un élément architectural de composition des jardins andalous.

Des sources d'eau isolées, comme les fontaines, ont un effet très ponctuel. La faiblesse de la fraction de surface d'eau n'entraîne pas un refroidissement de l'air, sauf dans le cas de grands jets d'eau où l'on a des effets d'humidification et de refroidissement remarquables [ABC. 1997]

L'évaporation de l'eau et l'abaissement des températures sont des mécanismes physiques qui représentent une réaction aux sollicitations d'équilibre du système énergétique globale « atmosphère – eau ». En effet du fait de l'albédo très faible des surfaces d'eau la fraction d'énergie solaire réfléchie ne dépasse pas les 3% quand les rayonnements sont à leur niveau maximal [Alvarez et al. 1989]. En conséquence une grande part de l'énergie est absorbée par la surface d'eau.

Le changement de phase de l'eau d'un état liquide à un état de vapeur nécessite donc une part importante d'énergie (appelée chaleur latente de vaporisation) qui est estimée à 2450 kJ par Kg d'eau évaporée (équivalent à une épaisseur d'1 mm d'eau par m<sup>2</sup> de surface). Ainsi une part importante des apports énergétiques est perdue sous la forme de chaleur latente, ce qui provoque un abaissement de la température de l'eau. Ensuite le flux de chaleur dit « sensible » tend à équilibrer l'écart de température entre la surface d'eau et l'air. C'est ce mécanisme qui provoque un rafraîchissement de l'air. Il est accentué avec la vitesse de l'écoulement aéraulique.

Hormis l'effet rafraîchissant qui peut résulter de la présence des surfaces d'eau sur l'air des villes, les étendues importantes d'eau comme les rivières, les fleuves où les mers, peuvent influencer de façon notable non seulement leur environnement immédiat (comme pour les surfaces d'eau ponctuelles) mais aussi l'ensemble des composantes du climat local. [FERNANDES et al. 1998] ont étudié par une analyse numérique l'étendue spatiale du microclimat due à l'existence de la rivière du Tage à Lisbonne. La plus forte modification s'étend jusqu'à 100 mètres des berges et correspond à un abaissement des températures de l'ordre de 6 à 7°C (à une hauteur de 1.75m du sol) et s'étend de façon moindre sur plusieurs centaines de mètres.

### **2.3. Variation de la fraction de surface végétale**

Les effets liés à la présence des espaces végétaux et des arbres sont généralement abordés à travers le potentiel de modification de la température de l'air. Les effets sont différents selon qu'il s'agisse de parcs, de squares ou de rues plantées.

Concernant les parcs, quelques travaux ont étudié l'écart pouvant exister entre la température de l'air dans ces derniers et celle des espaces urbains construits. Cela dépend dans la plupart des cas de la taille du parc et de la distance entre l'espace urbain et le parc en question. Les écarts de températures nocturnes vont de 1°C à 6,8°C [UPMANIS et al. 1998]. L'étendue spatiale du microclimat modifié par le parc dépend de la taille de ce dernier, et bien entendu de la nature du climat (plus il est chaud et sec plus l'effet est important). Les effets de jour sont moins évidents. A Athènes, des chercheurs [KLITSIKAS et al. 2000] ont mesuré les écarts de température entre le parc National (le plus important du centre ville) et l'environnement bâti ainsi que les variations de températures à l'intérieur même du parc. On en a conclu que selon la nature du feuillage et de l'importance des zones ombragées la différence de température à l'intérieur du parc pouvait atteindre 1,5°C et 3°C entre le parc et les espaces urbains construits. L'effet se ressent immédiatement le plus à la sortie du parc, la température baissant d'1°C. L'effet du parc sur le centre ville demeure assez faible, du fait de la densité bâtie, et du taux de chaleur anthropogénique important.

La présence de végétation et d'arbres a aussi des effets importants sur l'environnement microclimatique des espaces urbains. Des études menées à Marseille [Artopos 1997, ABC 1997] ont montré que les espaces urbains végétalisés sont plus chauds que la station météo de 0,3°C et les espaces minéraux de 0,8°C. A l'ombre une pelouse et une surface minérale ont presque la même température de surface à 1°C près, alors qu'au soleil l'écart peut atteindre 11°C. Selon une étude menée sur la ville de Barcelone [DE LA TORRE et al. 1998] l'écart entre la température de l'air et celle de la surface d'une pelouse ensoleillée peut atteindre 14°C, alors qu'il serait de plus de 25°C pour les surfaces minérales (sols et murs ensoleillés). L'écart de température à 1,2m du sol entre

une rue sans arbres et une autre contenant des arbres est égal en moyenne à 0.7°C, et peut atteindre un maximum de 2°C (selon l'importance des zones ombragées). La nuit on ne note généralement aucune différence [GAO et al. 1995].

Les espaces verts et les arbres contribuent aussi à absorber une part importante de l'énergie solaire. Ils sont donc un moyen naturel d'économie d'énergie pour la climatisation à la fois des espaces extérieurs mais aussi indirectement des espaces intérieurs des bâtiments. Des études américaines ont démontré que l'augmentation de la densité des arbres dans les rues de 10% pouvait induire à une réduction des charges résidentielles dues au chauffage entre 5 et 10% [SAILOR et al. 1992]. Des méthodes numériques ont permis d'évaluer le potentiel des arbres à constituer un moyen de rafraîchissement passif des bâtiments. Après comparaison des résultats de simulation avec le cas d'une maison situé à Shiraz en Iran, les résultats ont indiqué que les charges de conditionnement d'air pouvaient être diminuées de 10%, en cas d'ombrage uniquement et de 40%, en présence d'ombre et d'évapotranspiration (qui réduit la température d'environ 3°C) selon les plantations appropriées d'arbres [RAESSI et al. 1999]. Une autre étude menée sur plusieurs villes américaines nous montre aussi que les économies annuelles d'énergie liées à une addition de trois arbres par maison vont de 17 à 57% pendant l'été [AKBARI et al. 1992]. Mais il faut noter cependant que le choix du type d'arbre est primordial, pour équilibrer entre le besoin de refroidissement de l'air en été et le besoin de chauffage en hiver, par le choix, par exemple, d'arbres aux feuillages caducs.

On peut considérer l'effet des arbres et des surfaces végétales, comme un effet intermédiaire entre les surfaces d'eau et les surfaces minérales, de par le mécanisme d'évapotranspiration. Dans le cas d'un sol végétal (ou même naturel non imperméabilisé) les végétaux forment une sorte de conduit d'eau du sous-sol vers l'atmosphère. Pour passer de la surface minérale, complètement imperméable aux échanges hydriques, à une surface d'eau, il existe plusieurs situations intermédiaires. La plus proche de cette dernière est celle liée aux surfaces végétales. Mais selon la porosité hydrique des matériaux utilisés pour le revêtement des sols en milieu urbain, il existe un potentiel plus ou moins important d'évapotranspiration qui peut contribuer à humidifier et à rafraîchir l'air.

#### **2.4. Choix des matériaux de construction et de revêtement des sols**

L'un des paramètres de modification intentionnelle du microclimat est la disposition d'une barrière à l'évaporation ou au transfert de chaleur entre le sol et l'atmosphère. Les procédés de couverture (revêtement) du sol, peuvent être constitué de couches bien aérées (poreuses) et faiblement conductives ou de surfaces imperméables à l'air et aux échanges hydriques. La disposition d'un type de revêtement peut avoir un effet à la fois sur le sous-sol et sur l'air extérieur. Les effets sur le sous-sol intéressent l'agriculture, puisque selon le type de surface on peut conserver l'humidité du sol en réduisant l'évaporation, augmenter le réchauffement du sol ou prévenir son rafraîchissement excessif. Le type de revêtement a aussi des effets très importants sur les propriétés physiques de l'air. Les bilans énergétique et hydrique de la surface urbaine peuvent en être sensiblement modifiés.

L'albédo de surface ( $\alpha$ ) est une propriété de surface pouvant être facilement modifiée par des modifications de surfaces assez simples. Les interventions qui conduisent à des variations des valeurs de l'albédo entraînent une réaction en chaîne considérable. Par exemple pour un apport solaire ( $K\downarrow$ ), l'albédo régule l'absorption des courtes longueurs d'ondes par la surface ( $K^*$ ), et ceci en retour domine le bilan des échanges radiatifs net durant le jour ( $Q^*$ ). Ceci affecte le bilan d'énergie à la surface, et les échanges hydriques qui en dépendent, et ainsi contrôle donc la température et humidité de la surface et les couches d'air et de sol qui lui sont adjacents. Dans une expérience assez similaire on a comparé l'humidité de la surface naturelle, à celle d'une surface



recouverte de poudre de talc blanc, et à une troisième recouverte de carbone noir. Après trois semaines on nota que la surface noire contenait 50% de moins d'humidité que la surface naturelle, alors que la surface blanche était de 50% plus humide [OKE 1987].

Le tableau suivant (tableau 2.3) montre par exemple la variation des différents termes des bilans énergétique et radiatif produits par trois différents matériaux de surface sur une surface plane sablonneuse au Connecticut aux Etats Unis (plastique noir, papier et 60mm de foin).

	Sol naturel	Plastique noir	Papier	Foin
Bilan radiatif				
K*	819	993	631	840
L*	-177	-282	-199	-233
Q*	642	711	432	607
Bilan énergétique				
Q <sub>H</sub>	363	635	349	488
Q <sub>E</sub>	195	0	42	84
Q <sub>G</sub>	84	77	42	35
Termes dérivés				
α+	0.24	0.08	0.42	0.22

Tableau 2.3 : Tableau comparatif du comportement radiatif et du bilan énergétique entre un sol nu et des sols recouverts de couches superficielles [OKE 1987]

Les surfaces urbaines sont cependant composées non pas d'une seule surface mais de trois types de surfaces différentes : le sol, les murs et les toits des bâtiments. La réflexion des rayonnements de courtes longueurs d'onde depuis une surface bâtie dépend à la fois de l'albédo des surfaces du sol et des bâtiments, ainsi que de leurs propriétés géométriques. L'albédo des matériaux urbains typiques (tableau 2.4) est nettement inférieur à celui des sols ruraux :

Surface	Albédo	Emissivité	Surface (suite)	Albédo	émissivité
1. Sol de rues en asphalte	0.05-0.2	0.95	Toits - chaume :	0.15-0.20	
2. Murs : - briques - pierre - bois	0.10-0.35	0.71-0.90	- tôle ondulée	0.10-0.16	0.13-0.28
	0.20-0.40	0.90-0.92	4. fenêtres avec vitres claires :	0.08	0.87-0.94
	0.20-0.35	0.85-0.95	- angle zénithal à moins de 40° - angle zénithal entre 40 et 80°	0.09-0.52	0.87-0.92
3. Toits : - terre et gravier - tuile - ardoise	0.08-0.18	0.92	5. peinture :	0.50-0.90	0.85-0.95
	0.10-0.35	0.90	- blanc	0.20-0.35	0.85-0.95
	0.10	0.90	- Rouge, marron, vert - Noir	0.02-0.15	0.9-0.98

Tableau 2.4 : Propriétés radiatives de matériaux et espaces urbains typiques<sup>15</sup>

En pratique un changement de couleur des façades peut résulter soit d'un ravalement soit d'une restauration de bâtiments. Pour ce dernier cas des travaux visant l'évaluation des effets liés au changement de couleur dans une paroi nous montrent par exemple les variations des températures qui résultent de la restauration des façades [BECKENSTOW 1987]. Cette variation peut atteindre en effet près de 40°C à la surface des parois « blanchies » (après restauration) par temps ensoleillé, et près de 35°C par temps couvert à mi-journée. Si la réduction de la température s'étale sur toute la journée par présence de soleil, elle devient remarquable, seulement entre 11h et 15h en temps couvert. (fig. 2.11)

<sup>15</sup> Tableau construit à partir de 05 ouvrages différents écrits entre 1962 et 1982 par T.R. Oke. [OKE 1987 p.281]

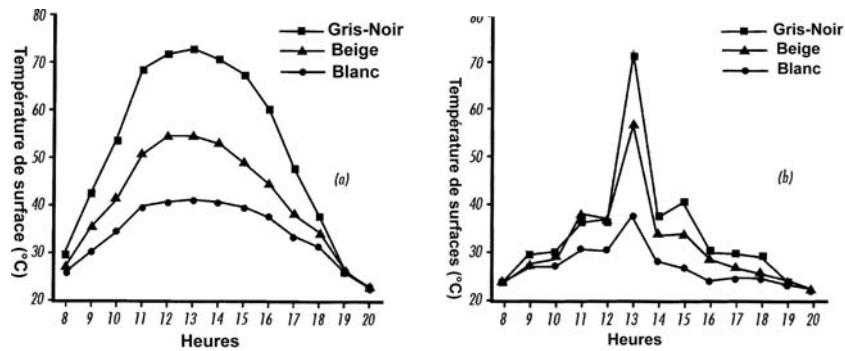


Figure 2.11 : Température des surfaces selon les couleurs : (a) par temps ensoleillé ; (b) par temps couvert [BECKENSTOW 1987]

## 2.5. Cas particuliers des effets liés à l'utilisation de matériaux imperméables ou poreux

Le pavage du sol des rues réduit l'évapotranspiration et augmente la quantité d'eau retenue en surface puisque le pavé est imperméable. Cette imperméabilisation des sols, qui fut rappelons le une des transformations majeures de l'urbanisme hygiéniste, produit des effets sur l'humidification et la variation des températures de l'air et des surfaces.

Des travaux récents ont étudié les effets de l'arrosage<sup>16</sup> des surfaces du sol des rues en saison chaude, et l'effet de rétention d'eau par les pores de ce revêtement. L'objectif était de décrire les caractéristiques du bilan d'énergie et la température de surface. Le revêtement du sol par des matériaux comme l'asphalte ou le béton rend le sol plus absorbant à la chaleur par le phénomène de stockage. Cela induit une augmentation de la température de surface jusqu'à près de 70°C durant l'été et provoque des variations sur le microclimat urbain et l'environnement thermique. [KINOCHI et al. 1998], [FUJINO et al 1994]

Pour faire varier cette température de surface il faut intervenir sur les paramètres physiques qui augmentent ou réduisent le stockage thermique. Parmi ceux ci : l'albédo de surface, la conductivité thermique, la perméabilité hydrique ou encore réduire augmenter ou réduire les surfaces ensoleillées (arbres, plantes, ouverture des espaces vers le ciel, etc.)

[FUJINO et al 1994] ont défini, dans une étude de l'efficacité de la perméabilisation du sol, qu'un revêtement imperméable ne réduirait la température de surface que de 2°C, alors qu'un sol poreux la réduit de 8°C en été. Ces auteurs se sont aperçus aussi qu'entre 10h30 et 11h30, quand le rayonnement solaire est au maximum, la température d'air entre les deux sites, l'un arrosé et l'autre non, est réduite de 1.0°C et l'humidité moyenne plus forte de 4% dans le site arrosé. (fig. 2.12).

Pour mettre en valeur l'importance de ces variations sur le piéton, ces auteurs ont calculé la différence de température globale entre les deux sites. Elle atteint 4°C sous un rayonnement solaire maximale. La décroissance de la température globale est attribuée à l'abaissement de la température à la surface de la rue. La température maximale du site sec atteint 50°C, alors qu'elle ne dépasse pas 30°C dans le second, car la température de surface varie avec le flux d'eau (fig 2.13).

<sup>16</sup> Les observations ont concerné la comparaison de deux sites d'une même rue (distant de 30 m l'un de l'autre). L'arrosage a été réalisé sur 500m de rue, de 10h du matin à 14h, puis des mesures ont été effectuées du bilan énergétique de surface, de la température de l'air, de l'humidité relative, ainsi que de la vitesse et la direction du vent.

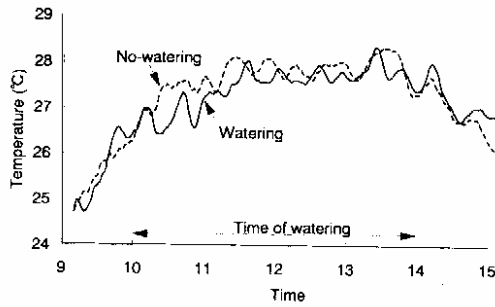


Figure 2.12 : Distribution temporelle de la température de l'air

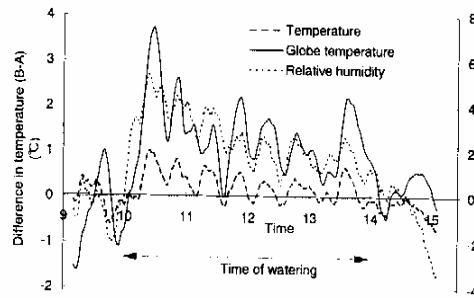


Figure 2.13 : Effet de l'arrosage sur la micro-météorologie du site [FUJINO et al. 1994]

La rétention d'eau a donc un effet considérable sur la température de surface. Une expérience a été menée par les mêmes auteurs pour clarifier la durée de cet effet et évaluer l'augmentation de la température de surface (combien cet effet dure t il et de combien la température de surface est augmentée). [KINOUCI et al. 1998]

Les éléments observés sont : le rayonnement solaire, le rayonnement atmosphérique, la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent à une hauteur de 65cm au-dessus du pavage, la température à quatre profondeurs du sol ainsi que les températures de surface. L'eau a été rajoutée en surface entre le 13 et le 15 août, alors que les mesures ont été effectuées entre le 11 et le 17 août. Durant l'expérience la température maximale est réduite, du fait de la surface d'eau, de 18°C. Quand il n'y a plus d'eau en surface la température de surface atteint 55°C (fig. 1.15). Le résultat montre que la modification la plus remarquable est la réduction de près de 80% du rayonnement net le 15 août à midi. Ce qui démontre que la réduction de la température est largement due à la chaleur latente plus qu'au stockage de la chaleur. (fig. 2.14)

Généralement sur les sols des rues, les hautes températures de surface sont dues au processus de réchauffement d'une surface. Durant la journée, un revêtement de surface imperméable absorbe une grande part des rayonnements solaires, et dès que l'évaporation n'est plus possible, cela rend la température des surfaces du revêtement imperméable sensiblement supérieure à celle de l'atmosphère. Cette hausse de température produit un échange de chaleur sensible entre la surface et l'atmosphère et des rayonnements infrarouge assez importants se dégagent de cette surface, induisant une température de l'air de l'espace urbain plus importante, comparée aux températures d'espaces urbains environnants avec des surfaces de sols non revêtues ou à revêtement perméable. La température des revêtements de surfaces perméables ne s'accroît pas énormément ainsi le stockage thermique en sous-sol et l'échange de chaleur sensible entre la surface du sol et l'atmosphère diminue. Pour les surfaces de sol non revêtues (état naturel), le réchauffement de l'atmosphère par la libération de chaleur sensible depuis la surface du sol est présente uniquement pendant la journée. Après le coucher de soleil, la température de surface décroît rapidement et devient inférieure à celle de l'atmosphère, et la surface ainsi commence à refroidir l'atmosphère.

Pour obtenir une évaluation de l'interaction entre les chaussées poreuses et l'atmosphère, des expérimentations ont été effectuées avec différents types de matériaux de chaussées. La surface poreuse représente à la fois une source et un conduit pour la chaleur et l'humidité vers (à partir du sous-sol) et depuis l'atmosphère.

L'expérience fut conduite entre août 1994 et juillet 1995 à 70 km au nord de Tokyo (36° N, 139° 36' E). Durant l'expérience, 04 échantillons de surfaces aux caractéristiques différentes<sup>17</sup> (de

<sup>17</sup> Les propriétés hydriques et thermiques de ces matériaux, tel que la porosité, la conductivité hydraulique, la densité sèche, la chaleur spécifique, et la conductivité thermique furent estimées en laboratoire.

2m x 2 m) ont été retenus<sup>18</sup>. L'évaluation des différents termes du bilan énergétique à la surface du sol est assez révélatrice de l'influence de la porosité des matériaux de revêtement (fig. 2.16). L'utilisation d'un matériau en céramique composé de pores de faibles dimensions permet à la fois l'évapotranspiration du sol mais il freine la vitesse de dissipation de l'eau en surface. Son comportement est presque équivalent à celui d'une pelouse. L'asphalte ne produit pas de chaleur latente et il est celui qui stocke le plus de chaleur.

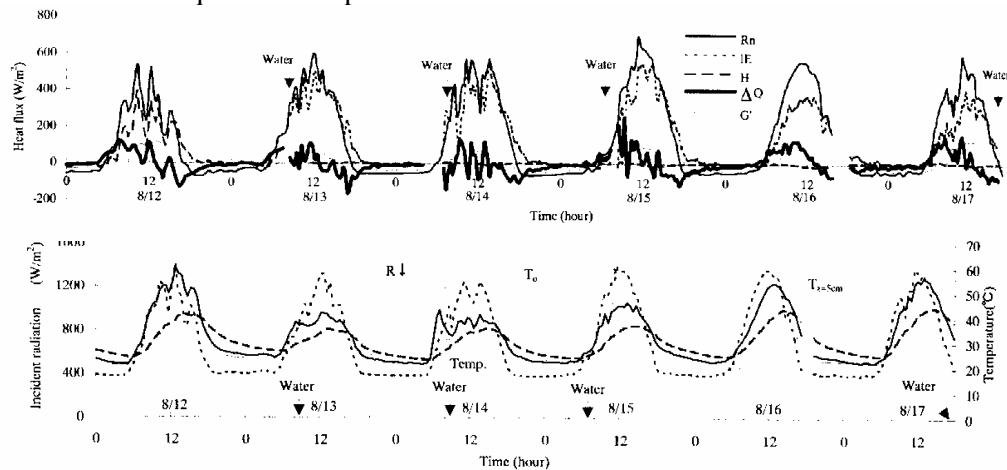
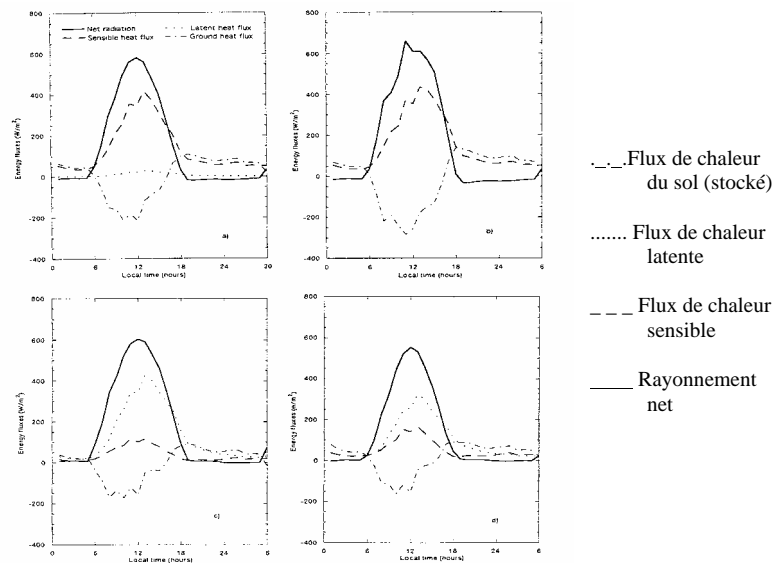


Figure 2.14 – 2.15 : Les effets de rétention d'eau d'un pavage en béton sur : 1. les flux de chaleur ; 2. les températures de surface [KINOCHI et al. 1998]



2. 8. Heat balance at the surface of four samples: (a) porous pavement (Sample A); (b) asphalt pavement (Sample D); (c) grass surface (Sample F) and (d) ceramic pavement (Sample H).

Figure 2.16 : Bilan thermique à la surface du sol pour quatre types de revêtement. De gauche à droite et de haut en bas : pavage poreux ; pavage en asphalt ; pavage végétal et pavage en céramique.

<sup>18</sup> Les matériaux utilisés sont : un block de chaussée poreux perméable à l'eau et propice pour le drainage (pores de grande taille) ; un block d'asphalte sombre et non poreux (composé de calcaire imprégné de bitume) ; un block de pelouse naturelle composé d'un sol naturel avec couche de pelouse de 1 à 3 cm d'épaisseur ; et un block de chaussée en céramique poreuse perméable mais permettant de retenir l'eau (pores de petite dimension).

### 3. MODELISATIONS ET SIMULATIONS NUMERIQUES

Après les mesures in situ, la deuxième approche de l'interaction entre les éléments de la forme urbaine et l'atmosphère urbaine que nous présentons ici, intéresse la modélisation des phénomènes physiques et l'utilisation de la technique informatique pour développer des modèles, débouchant sur des outils de simulation numérique. La puissance de calcul et les capacités de mémoire des ordinateurs sont ainsi utilisées pour résoudre les équations complexes et multiples des différents modèles physiques développés en climatologie urbaine.

Nous allons présenter en un premier temps les modèles physiques de base utilisés en climatologie urbaine pour évaluer le bilan énergétique et hydrique d'une surface urbaine. Ces bilans sont basés sur le principe d'équilibre entre ce qui est apporté et ce qui ressort d'une surface urbaine. Les paramètres morphologiques de la surface urbaine vont à leur tour être modélisés en tant que paramètres influents sur les différents termes de ces bilans.

Nous présenterons ensuite les modèles de simulation numériques qui traitent d'échelles spatiales assez proches de celle du centre ancien de Nantes. Ces modèles de simulation nous intéressent ici dans le sens où ils permettent une évaluation des phénomènes physiques associés aux différentes échelles climatiques à partir d'une base de données simplifiée. Cette dernière contient des informations sur la morphologie du bâti et les matériaux utilisés en surface urbaine, sur les données énergétiques et hydriques produites par les usages (transports, chauffage, industries, etc.) de la surface urbaine ainsi que sur les données climatiques relevées dans les stations météorologiques. Ces modèles de simulation, lorsqu'ils sont conçus comme des outils, peuvent être facilement utilisés et permettent de quantifier les phénomènes physiques sans avoir à en maîtriser tous les processus.

#### 3.1. Le bilan énergétique et hydrique d'une surface urbaine à l'échelle locale

La modélisation des transferts d'énergie et de masse est fondamentale pour la description des échanges sol-atmosphère aux différentes échelles climatiques. L'équilibre énergétique du système sol-atmosphère dépend des bilans relatifs aux transferts radiatifs (courte et grande longueur d'ondes), convectifs et conductifs. Quant au bilan hydrique, il traduit les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur.

Le calcul du bilan d'énergie d'un système répond à la loi de conservation de l'énergie qui prend comme hypothèse que l'apport extérieur en énergie est soit absorbé soit ré-émis vers l'environnement du système. Ce qui donne :

$$\dot{E}_{\text{entrante}} - \dot{E}_{\text{sortante}} - \dot{E}_{\text{stockée}} = 0$$

Les échanges radiatifs sont principalement dus aux rayonnements solaires et atmosphériques. Ces derniers constituent la principale source d'énergie pour le système sol-atmosphère (fig. 2.17). Ils se décomposent en deux parties : les rayonnements de la bande solaire ( rayonnements de courte longueur d'onde, comprenant les rayonnements visibles et le proche infra rouge et les échanges infrarouges (rayonnement de grande longueur d'onde)<sup>19</sup> [OKE 1987].

Le bilan des échanges radiatifs à la surface du sol s'exprime par le rayonnement net, qui est défini par la somme des rayonnements de courtes et de grandes longueurs d'ondes. Ces rayonnements correspondent à la somme des rayonnements solaires incident  $K_{\text{Ex}} \downarrow$  et réfléchi  $K \uparrow$ , et

---

<sup>19</sup> L'énergie solaire diffuse et directe atteignant une surface dépend des données astronomiques et géométriques faisant intervenir : La latitude du lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour, l'orientation et l'inclinaison de la surface. En France, une surface perpendiculaire aux rayons solaires, située au niveau du sol, reçoit au maximum 700W/m<sup>2</sup> en hiver et 1000W/m<sup>2</sup> en été (par ciel clair).

des rayonnements terrestres émis par la terre  $L_E\uparrow$  et ceux réfléchis par les nuages et émis par l'atmosphère  $L\downarrow$  (fig. 2.18).

$$Rn = (K_{Ex}\downarrow - K\uparrow) + (L\downarrow - L_E\uparrow)$$

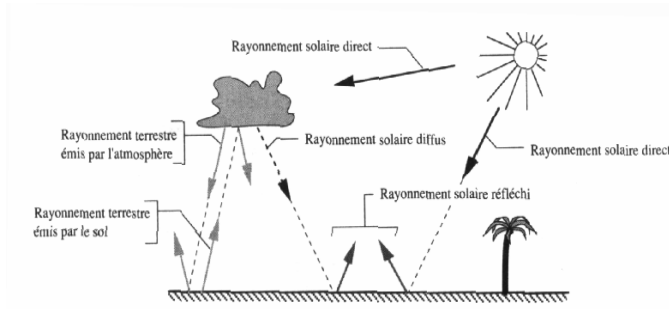


Figure 2.17 : Schéma représentatif des échanges radiatifs entre le sol et l'atmosphère [GUYOT 1997]

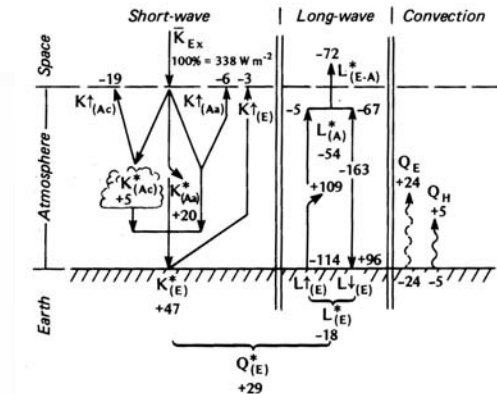


Figure 2.18 : Schéma représentant les différents termes du bilan énergétique [OKE 1987]<sup>20</sup>.

Les échanges convectifs entre une surface et l'air relèvent de deux types de convection. Tout d'abord, une convection naturelle qui se produit sous l'effet d'une différence de pression due à un écart de température ; en second lieu, une convection forcée qui est due à une force externe (comme le vent). Selon la nature des surfaces, le coefficient d'échange convectif permet de traduire l'effet spécifique de la surface sur ces mouvements d'air. La chaleur produite généralement par ce processus est appelée chaleur sensible. Les échanges conductifs sont dus à un transfert de chaleur dans un solide ou dans un fluide au repos. Ce transfert correspond à une propagation des énergies moléculaires internes dans les milieux sans mouvement. On distingue deux régimes de conduction : un régime permanent où la température ne varie pas dans le temps et un régime transitoire dans lequel l'inertie intervient et provoque une phase de stockage et de déstockage. Les échanges hydriques vont induire à leur tour un échange de chaleur dû au changement de phase de l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur. Ce changement de phase consomme une quantité importante de chaleur (solaire ou thermique) qui se diffuse sous la forme d'un flux de chaleur latente. Ce flux peut résulter soit de l'évaporation de l'eau ou de l'évapotranspiration du sol naturel ou des végétaux.

Le bilan énergétique d'une surface urbaine (fig. 2.19) est modélisé par la formulation suivante :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad [OKE 1987]$$

$Q^*$  : le rayonnement Net (bilan radiatif toutes longueurs d'ondes)

$Q_F$  : le flux de chaleur émanant des sources anthropogéniques lié au rythme des activités urbaines.

$Q_H$  : le flux de chaleur sensible.

$Q_E$  : le flux de chaleur latente.

$\Delta Q_S$  : le flux de chaleur stocké dans les constructions et l'air du volume étudié.

$\Delta Q_A$  : bilan des flux de chaleur échangés par advection (échangée avec les volumes construits voisins).

Il est généralement négligé dans les modèles de climatologie urbaine.

La valeur de  $Q_F$  (que l'on n'a pas évoqué lorsque l'on a traité des mesures in situ) est basée sur l'estimation de l'énergie utilisée en ville à partir de toutes les sources (électricité, gaz, charbon,

<sup>20</sup> Les valeurs sont exprimées en pourcentage du rayonnement solaire extra-terrestre selon [ROTY et MITCHELL, 1974], dans [OKE, 1987, p. 18]

conversion de l'énergie solaire, bois, etc.) relatives aux chauffages des édifices, aux activités industrielles, aux transports, à l'éclairage, etc. Elle dépend donc de la densité de la population urbaine. Il apparaît que QF est une source d'énergie significative, parfois dépassant même le rayonnement net, surtout en hiver. Les zones urbaines sont sensiblement plus chaudes la nuit que leur environnement rural d'une part du fait de cette production anthropogénique de chaleur et d'autre part du fait de la restitution de la chaleur stockée le jour.

Le bilan hydrique d'une surface urbaine est établi aussi sur le principe d'équilibre entre les apports et les pertes en eau. Il est donné selon la formulation suivante :

$$P + F + I = E + \Delta r + \Delta S + \Delta A \quad [Oke 1987]$$

- P : apport d'eau relatif à la pluviométrie du site
- F : apport d'eau dus à la production anthropogénique
- I : apport d'eau venant de l'environnement avoisinant
- E : perte en eau par évaporation et évapotranspiration
- $\Delta r$  : perte vers les volumes construits avoisinants (par drainage)
- $\Delta S$  : partie d'eau stockée dans l'unité construite
- $\Delta A$  : bilan des apports d'eau échangés avec l'environnement avoisinant

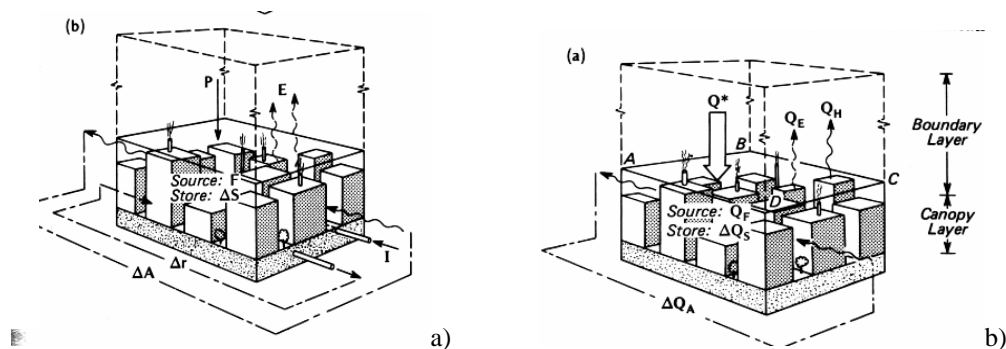


Figure 2.19 : Description schématique des flux impliqués dans le bilan hydrique(b) et le bilan d'énergie (a) d'une surface bâtie [Oke 1987]

Le processus d'évapotranspiration est avec l'évaporation des surfaces d'eau une source importante d'humidification de l'air et de production de chaleur latente. Il est conditionné d'une part par la demande évaporative<sup>21</sup> de l'air, et de l'autre par la capacité du système (de surface) à satisfaire cette demande. Celle-ci résulte de divers facteurs relevant essentiellement de la disponibilité en eau dans le sol ou sous-sol, de la physiologie des végétaux, et de la porosité des surfaces. Selon l'intensité du brassage de l'air, le transfert de la vapeur peut s'effectuer plus rapidement et concerner des quantités importantes.

La limitation du taux d'évapotranspiration à un niveau inférieur à son niveau potentiel (niveau maximum théorique) peut provenir de l'insuffisance des réserves en eau disponibles pour couvrir la demande ou de l'incapacité de la couverture végétale à transmettre cette eau vers l'atmosphère à un rythme adéquat (tel que l'énergie disponible soit entièrement absorbée). La description analytique

<sup>21</sup> La demande évaporative de l'air exprime la capacité d'extraction de la vapeur d'eau exercée par l'atmosphère. Elle est déterminée d'une part par les *apports énergétiques* permettant la vaporisation de l'eau et de l'autre par les *capacités de transfert vers l'atmosphère* de la vapeur produite. Elle est en partie conditionnée par la *différence de pression partielle de vapeur existant entre l'air de la zone d'évaporation et l'air atmosphérique* ; elle sera d'autant plus forte que ce dernier est sec. Les apports énergétiques sont déterminés par le bilan des échanges radiatifs.

du processus d'évapotranspiration peut reposer soit sur « une approche hydrodynamique » (transfert de masse) ou une « une approche thermodynamique » (transferts d'énergie).<sup>22</sup>

Les écoulements d'air constituent un paramètre de forçage important des paramètres du bilan d'énergie et du bilan hydrique. En milieu urbain les caractéristiques du vent sont d'autant plus importantes que les transferts de chaleur, d'humidité et de polluants dans l'atmosphère sont essentiellement guidés (forcés) par le mouvement des masses d'air. La vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur  $Z$ , la rugosité du sol et la topographie éventuelle des sites. Pour quantifier le phénomène vent et notamment sa force, on utilise une vitesse moyenne de référence. Par convention, cette vitesse est prise à 10m du sol, en site plat et à faible rugosité<sup>23</sup> puis elle est recalculée de manière à prendre en compte les effets de la rugosité de la surface urbaine.

### 3.2. Les modèles numériques

Les modèles de simulation numériques en climatologie urbaine qui s'appliquent à l'échelle de la canopée prennent en compte la surface urbaine selon deux méthodes différentes :

- *Par discrétisation spatiale* : C'est une méthode qui s'applique généralement à des échelles spatiales limitées qui sont plus proches de l'échelle microclimatique que de l'échelle climatique locale. Il s'agit dans ces modèles de prendre en compte l'aspect tridimensionnel des espaces urbains en prenant en compte le tracé et les hauteurs réelles des espaces et des bâtiments. Ensuite un maillage assez fin est appliqué aux surfaces et aux éléments de la canopée urbaine pour permettre d'analyser les mécanismes de propagation des phénomènes physiques d'une maille à une autre. La finalité de ces modélisations est de quantifier les propriétés physiques des surfaces et de l'air correspondant à l'échelle de la canopée qui peut aller d'un espace urbaine à un ensemble bâti (quelques centaines de mètres).
- *Par paramétrisation* : La discrétisation spatiale exige des temps de calculs trop importants qui ne permettent pas de l'appliquer à l'échelle climatique locale et encore moins à l'échelle Meso. Pour pallier cela les modèles physiques qui s'appliquent à ces échelles ont été contraints de réduire la complexité morphologique de la surface urbaine à un certain nombre de paramètres représentatifs de l'influence de cette dernière sur les échanges sol-atmosphère. Le plus connu de ces paramètres est le concept de canyon. La finalité de ce type de modélisation de la canopée urbaine est généralement de prendre en compte l'effet de cette dernière sur les échelles climatiques locales et Meso. Ce sont donc des modèles qui donnent une évaluation globale et non discrétisée de la canopée.

Nous évoquons en ce qui suit quelques modèles représentatifs de ces deux types d'approche afin de caractériser les données de la surface urbaine nécessaires aux simulations et les résultats que l'on peut en obtenir. Cela nous permettra d'argumenter le choix d'un modèle de simulation que nous utiliserons pour l'appliquer à l'analyse des transformations de la ville de Nantes.

#### 3.2.1. Modélisations par discrétisation spatiale

Les modèles basés sur une discrétisation spatiale s'appliquent généralement à des phénomènes physiques particuliers. Du fait de la complexité de la surface urbaine prise en compte dans ces

<sup>22</sup> Les formulations analytiques de l'évapotranspiration comprennent une série de formules de type pseudo empirique et quelques formules à base physique. L'une des plus simples est la formule de *Blaney-Criddle*, alors que la formule de *Turc* est la mieux adaptée aux conditions caractéristiques d'un climat tempéré. On peut citer aussi deux méthodes de calculs basées sur une approche thermodynamique : la formule de Bowen et celle de Penman-Monteith (la plus utilisée). Voir [VINET 2000] pour une comparaison entre les différentes approches.

<sup>23</sup> La variation de la vitesse avec la hauteur et la rugosité peut s'écrire selon une loi logarithmique:  $U_z = k U_{ref} \text{Log } Z/Z_0 = C_z U_{ref}$ . Les valeurs de  $k$  et de  $Z_0$  sont définis selon des classes de rugosité. Voir sur cette question [VINET 2000].



modèles, il reste actuellement difficile de reconstituer l'ensemble des mécanismes liés aux échanges entre la surface urbaine et l'atmosphère. On s'intéresse ainsi soit aux phénomènes radiatifs et thermiques (le modèle Solene) soit aux phénomènes hydriques (le modèle EHU) ou aux phénomènes aérauliques, etc. Même si les différents phénomènes physiques interagissant entre eux, on admet dans ces modèles une réduction de l'interaction entre ces phénomènes à quelques paramètres représentatifs.

- **Le modèle thermo-radiatif « Solene » [GROLEAU 1987 ; GROLEAU 2001]**

Ce modèle, développé au laboratoire CERMA, depuis plusieurs années vise l'analyse des aspects environnementaux des projets urbains. Reposant sur un modèle 3D des volumes construits, il intègre un certain nombre de modules de calcul qui permettent de prendre en compte les aspects solaires, lumineux et thermiques dans les espaces urbains. Le modèle permet d'évaluer le comportement thermo-radiatif d'un ensemble bâti en le soumettant aux conditions météorologiques. Il s'applique à une échelle spatiale proche de celle de l'espace urbain. L'aspect thermique concerne l'analyse des températures des surfaces de l'enveloppe des bâtiments ; elles résultent des différents échanges produits au niveau de la surface externe avec l'air, le ciel, l'intérieur des murs et les autres surfaces environnantes. L'algorithme de calcul de la température de surface est basé sur une évaluation du bilan thermique appliqué aux différentes mailles du modèle géométrique représentant les espaces construits. Cette évaluation dépend donc de l'espace et du temps. Le modèle géométrique est composé de facettes planes formées par des polygones, qui représentent les surfaces extérieures des bâtiments, les toits, les façades, et le sol des cours intérieures et des rues. Le modèle géométrique est associé pour chaque surface à un modèle de matériau dont les propriétés physiques (albédo, émissivité...) sont fixées. Une application récente du modèle sur un îlot situé dans le centre de Marseille [GROLEAU et al. 2003] a permis de valider la pertinence du modèle quant aux aspects thermo-radiatifs. (fig. 2.20)

Solene n'intègre pas encore les bilans hydriques qui relèvent comme on l'a vu dans les ajustements des villes anciennes de transformations majeures de la surface urbaine<sup>24</sup>. L'utilisation du modèle reste très intéressante pour observer les effets de variations locales des éléments de la forme urbaine à des échelles spatiales réduites sur les ambiances thermo-radiatives, ce qui avec les modèles paramétriques ne peut être obtenu.

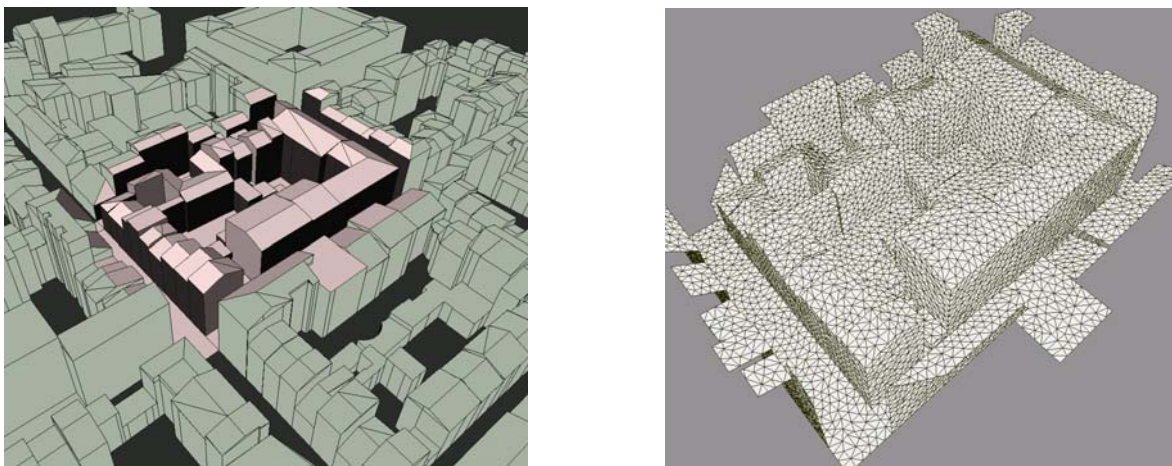


Figure 2.20 : Modèle 3D d'un îlot et des rues alentours et maillage du modèle avec Solene [Groleau et al. 2003]

<sup>24</sup> Des projets de développement du modèle sont en cours pour le coupler avec des simulations aérauliques et pour intégrer les aspects liés à l'humidification des espaces urbains.

- Le modèle « HIP » (Heat Island Potentiel) [HOYANO et al. 1996]

Développé par une équipe de recherche japonaise, ce modèle a pour objectif de prédire la température des surfaces des sols et des parois d'un ensemble urbain. Il est basé sur un système d'information géographique et prend en compte les fragments urbains de manière presque réaliste (fig. 2.21). En analysant le schéma relatif aux données d'entrées de ce modèle (fig. 2.22) on s'aperçoit qu'il intègre à la fois les échanges énergétiques et hydriques. Cependant, le modèle étant basé sur une discrétisation spatiale assez fine, nécessite un niveau poussé de la modélisation géométrique de la surface urbaine. Ce qui est difficile à constituer dans le cadre d'une reconstitution historique. Il permet néanmoins d'évaluer l'ensemble des termes du bilan d'énergie. Il inclut dans la modélisation le volume des arbres qui est simplifié selon des volumes réguliers.

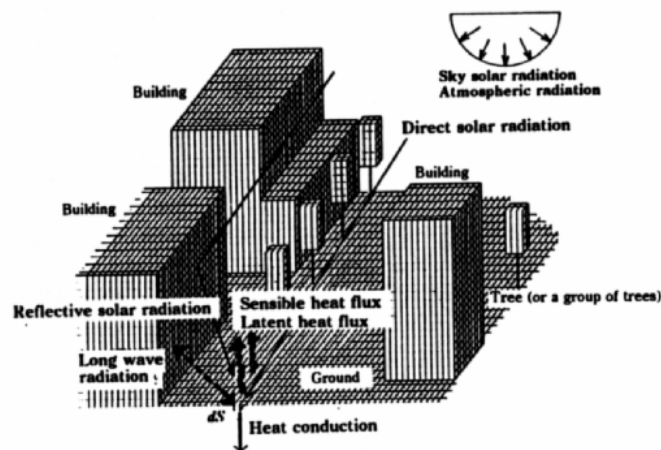


Figure 2.21 : Le modèle de canopée discrétisé au mètre [HOYANO et al. 1996]

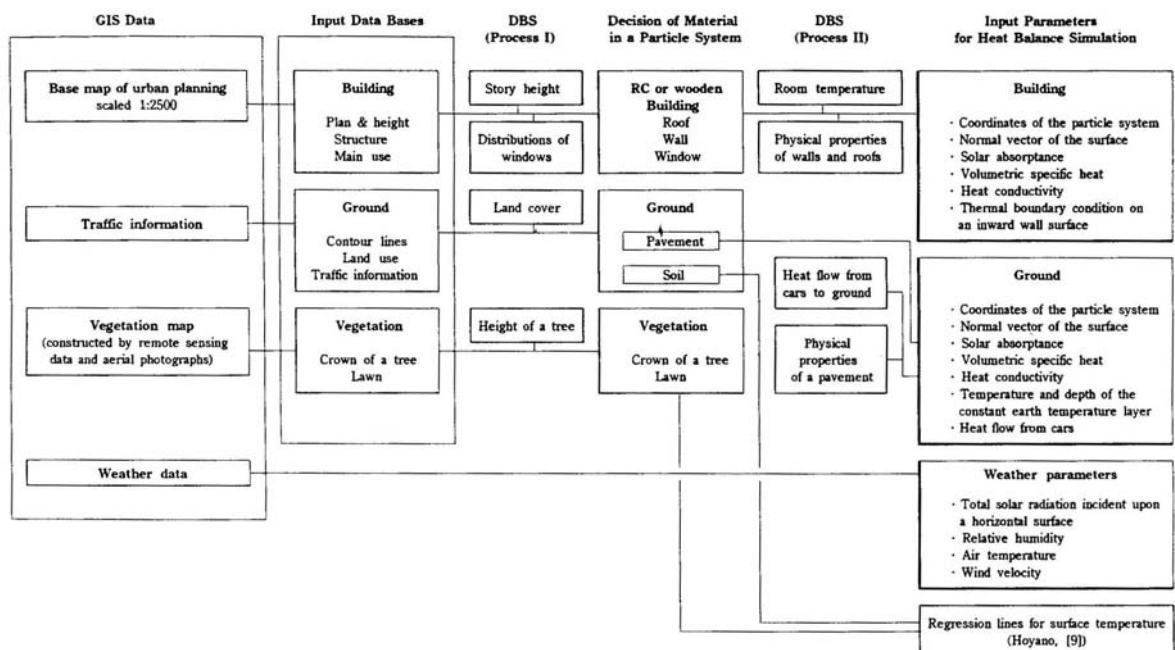


Figure 2.22 : Schéma de base des données d'entrées nécessaires au modèle « HIP » [HOYANO et al. 1996]

- Le modèle « EHU » (Elément Hydrologique Urbain) [BERTHIER 1999]

Ce modèle a été développé au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussés) de Nantes. C'est l'un des rares modèles qui permet de simuler le cycle hydrique sur une unité urbaine composée d'une unité bâtie, d'une voie et d'une surface naturelle. L'objectif visé consiste en une modélisation « détaillée » des différents flux d'eau échangés en milieu urbain. Le modèle élaboré est basé sur une schématisation bidimensionnelle du milieu urbain à l'échelle d'une parcelle cadastrale (fig. 2.23). Les lois et processus physiques gérant le comportement du système sont résolus à l'aide d'un code de calcul par éléments finis. Cette modélisation, selon son auteur, « a permis de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu urbain ». Appliquée au cas d'un bassin versant, elle a apporté des informations sur le comportement hydrologique de ce dernier.

Applicable à une unité urbaine réduite, composée d'une parcelle bâtie avec une voie et un sol périphérique, le modèle permet d'évaluer l'évapotranspiration en période estivale ou hivernale, ainsi que l'établissement d'une moyenne annuelle, voire décadaire (selon la disponibilité des bases de données). Les résultats recherchés concernent le proche sous-sol urbain et s'arrêtent au niveau de la surface du sol.

L'évapotranspiration est analysée par une articulation entre approche « atmosphérique » et approche « hydrologique (du sol) ». Les simulations (validées par des mesures sur site) ont permis d'observer que plus de 64% du volume des apports hydriques provient de l'évapotranspiration. Mis à part la quantification de l'évapotranspiration de l'unité urbaine en question, le modèle nous permet de visualiser les écoulements d'eau à l'intérieur de l'élément « sol+surface » et la variabilité des flux évapotranspirés sur les surfaces non imperméabilisées (fig. 2.24 et 2.25).

Une des limites actuelles de ce modèle, réside dans sa prise en compte bidimensionnelle de la forme urbaine, en dépit de son application à une échelle réduite et à dispositif simplifié : voie + bâtiment + surface naturelle de part et d'autre du bâtiment (cas du tissu pavillonnaire). S'il permet d'estimer les effets d'une imperméabilisation du sol par exemple, il reste qu'il est limité aux phénomènes hydriques (dans notre cas l'utilisation d'un autre modèle deviendrait nécessaire) et il est peu adapté à une analyse à l'échelle des fragments urbains plus complexes.

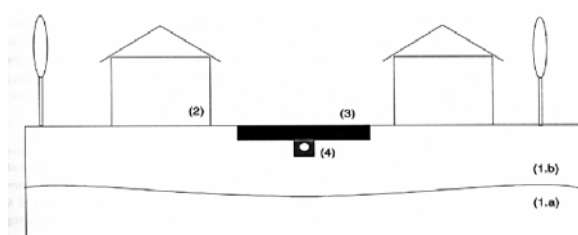


Figure 2.23 : Schématisation élémentaire bidimensionnelle du milieu urbain utilisée par le modèle « EH » [Berthier 1999]

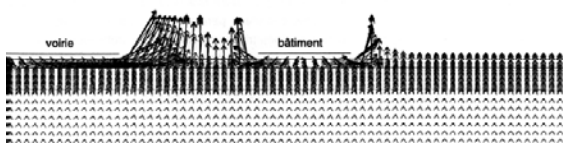


Figure 2.24 : Ecoulement d'eau simulé à l'intérieur de l'élément hydrologique (le 07/09/1996 à 12 heures) échelle des flux 1.8mm/h

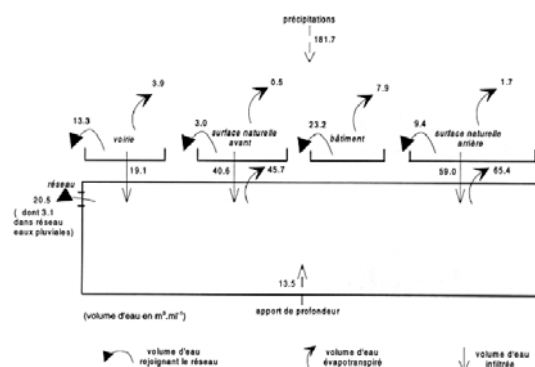


Figure 2.25 : Volumes d'eau globaux échangés dans le modèle (entre le 01/01/1991 et le 31/12/1997) [BERTHIER 1999]

### 3.2.2. Les modélisations paramétriques de la surface urbaine

La forme urbaine est pour les études climatiques à l'échelle locale ou Meso l'élément le plus complexe à modéliser, car les formes changent d'une ville à une autre et même au sein d'une même ville. Face à l'impossibilité de reproduire la forme urbaine dans toute sa complexité, ce qui nécessiterait des temps de calcul considérables, des hypothèses ont été donc admises pour réduire cette complexité à un certain nombre de paramètres jugés suffisamment représentatifs de la forme urbaine. Ainsi ces dernières années, un certain nombre de schémas de paramétrisation de la surface urbaine ont été développés pour évaluer le bilan énergétique et les autres paramètres de la couche limite urbaine, à partir des données météorologiques. La principale question posée par les recherches qui tentent de définir ces paramètres est de savoir quels sont, parmi ces paramètres, ceux qui - tout en réduisant le plus possible la complexité de la forme urbaine - permettent de reproduire le plus fidèlement possible la régulation des phénomènes physiques.

Nous allons présenter en ce qui suit ce que nous qualifions de modèles paramétriques, c'est à dire ceux qui réduisent la forme urbaine à un certain nombre de paramètres. On peut distinguer dans l'histoire de ces modèles deux types. D'abord des paramétrisations 2D qui négligent la troisième dimension de la forme urbaine et, plus récemment, des paramétrisations 3D. Ces derniers tentent de reproduire l'effet de la troisième dimension qui s'est avérée avec l'évolution des techniques de mesure assez influente sur les résultats des simulations.

#### *Modélisation paramétrique 2D*

Un des objectifs des modélisations en climatologie urbaine c'est la traduction des effets de la surface urbaine sur l'atmosphère. Pour envisager ce « couplage » entre modèles de surface urbaine et modèles atmosphériques, des méthodes ont été définies. La plus connue est celle qui consiste à adapter le modèle de transfert « atmosphère - végétation » à une situation urbaine. Les villes sont ainsi modélisées soit comme un sol dénudé soit comme une surface de béton quand la surface en question est urbanisée. Cette analogie entre les deux modèles « végétation- atmosphère » et « atmosphère -surface urbaine », par ses simplifications négligeait dans les premiers modèles un bon nombre de paramètres importants des phénomènes physiques lié à la troisième dimension de la surface urbaine.

#### **- Le modèle SM2U [DUPONT 2001]**

Un modèle qui peut paraître intéressant dans le cadre d'une évaluation de transformations urbaine est le modèle SM2U (Sub-Meso Soil Model Urbain) développé à l'Ecole Centrale de Nantes. Ce modèle permet de simuler à la fois les échanges thermiques et hydriques. Ce modèle permet l'évaluation des échanges hydriques, thermiques et radiatifs entre le sol et l'atmosphère, partant de l'échelle Sub-Meso (entre l'échelle locale et l'échelle Meso) jusqu'à l'échelle Meso (fig. 2.26 et 2.27).

Le modèle comporte deux parties. La première définit à travers les termes du bilan thermo-hydrique, l'évapotranspiration du sol urbain et l'humidification de l'air par les divers types de surfaces urbaines et la deuxième partie évalue des températures de surfaces selon le mode de recouvrement du sol à partir des échanges des flux d'énergie (par la prise en compte des flux de chaleur sensible, latente et anthropique). Le modèle de sol urbain SM2U est une extension du modèle appliqué à un sol naturel, appelé SM2 (Sub-Meso Soil Model).

Le modèle utilise 5 modes de recouvrement du sol urbain : Naturel (11 variantes de sol nu) ; Végétal (11 variantes) ; Bâtiment (seuls les matériaux de toitures sont pris en compte. 4 variantes de couverture sont utilisées) ; Artificiel (2 variantes) et des surface d'eau (3 variantes).

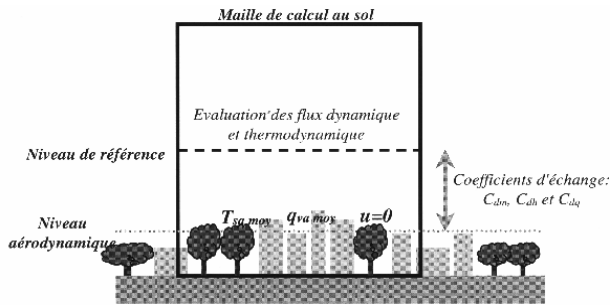


Figure 2.26 : Le modèle de sol, et position des flux calculés par SM2U [DUPONT 2001]

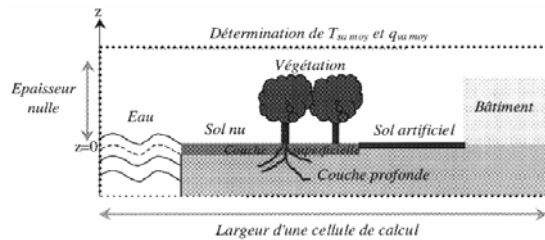


Figure 2.27 : Schémas des types de recouvrement dans la cellule de calcul du modèle SM2 [DUPONT 2001]

Le modèle SM2U permet d'évaluer l'ensemble des termes entrant dans la formulation des bilans thermiques et hydriques. Mais comme la plupart des modèles « climatologiques », son objectif affiché est la connaissance des effets de ces bilans sur les données climatiques à grandes échelles ; il adopte de ce fait une modélisation à deux dimensions (planimétrique) de la forme urbaine. Les échanges entre le sol et l'atmosphère ont lieu dans un volume comprenant la couche de canopée urbaine et la partie supérieure du sol. La couche de canopée est considérée sans épaisseur (donc sans prise en compte de la hauteur du bâti, et les échanges horizontaux sont négligés sauf pour le ruissellement).

La température de surface et l'humidité spécifique de l'air sont calculées pour chaque type de sol, puis une moyenne est effectuée pour l'ensemble. Le calcul de l'évapotranspiration dans le modèle intègre la transpiration des végétaux (avec prise en compte des résistances stomatiques et aérodynamiques au transfert de vapeur d'eau à l'échelle du couvert végétal.), l'évaporation des surfaces d'eau et l'évapotranspiration des surfaces de sol naturel. La disponibilité en eau sur les surfaces de sol imperméables et sur les toitures est évaluée selon le calcul d'un réservoir d'eau au-dessus des surfaces (sol et toitures).

L'avantage principal de ce modèle est qu'il permet de simuler à la fois les données hydriques, radiatives et thermiques. Cependant il ne prend pas en compte les informations liées à l'épaisseur de la surface urbaine. En effet nous avons bien vu que les prospectes des rues interviennent sensiblement dans l'estimation de ces bilans. Aucune information, représentant les hauteurs des bâtiments, n'est prise en compte dans SM2U.

- **Le modèle LUMPS "Local-scale Urban Meteorological pre-processing Scheme" [GRIMMOND et OKE 2002]**

Le schéma LUMPS est basé sur le principe d'évaluation du bilan énergétique en prenant les rayonnements Net comme la principale source d'énergie. Il diffère des approches classiques appliquées aux surfaces rurales par sa prise en compte du flux de chaleur stockée dans les ensembles bâtis du fait de la présence des bâtiments et des surfaces minérales. La répartition entre les flux de chaleurs sensible et latente dépend de l'état d'humidification de la surface. Cette dernière dépend du pourcentage de surface occupé par la végétation.

Le modèle nécessite uniquement des données générales sur la surface urbaine. Ce sont principalement la hauteur moyenne des bâtiments et les fractions de surfaces occupées par chaque type de sol (minéral, naturel, végétal, eau, bâti). A partir des données météo standards il peut générer l'ensemble des termes du bilan d'énergie résultant de la surface urbaine.

LUMPS a été testé sur des données des villes américaines et il est en cours de validation sur des villes européennes notamment Basel, Birmingham, Graz et Marseille.

Contrairement au modèle SM2U, le modèle LUMPS prend en compte une hauteur moyenne de la surface urbaine (hauteur moyenne des bâtiments), mais sans considérer le phénomène de piégeage radiatif ou les réflexions dans les rues.

### **Modélisation paramétrique 3D**

La prise en compte de la troisième dimension dans les modèles de climatologie urbaine appliquée à des échelles locales et Meso s'est d'abord faite par l'intermédiaire du concept Canyon introduit par T.R.OKE dès les années soixante. Des modèles numériques de surfaces urbaines ont été ainsi construits en considérant la forme urbaine comme étant une agrégation de rues canyons. Divers travaux ont étudié la pertinence de ce concept pour traduire le phénomène de piégeage radiatif des rues et le bilan énergétique des surfaces urbaines (utilisant de multiples facettes pour chaque surface) [JOHNSON et al. 1991<sup>25</sup> ; MILLS 1993<sup>26</sup> ; ARNFIELD et al. 1998<sup>27</sup>]. La prise en compte de la troisième dimension à l'échelle locale ou Meso n'a été réalisée que lors de ces dernières années. Parmi ces modèles, nous en retenons trois qui ont été récemment développés.

#### **- Paramétrisation de la turbulence de la surface urbaine : [MARTILLI 2001]<sup>28</sup>**

Le premier objectif de ce modèle est d'évaluer l'impact de la surface urbaine sur les échanges turbulents entre la ville ou une partie de ville et son climat. Il constitue donc une paramétrisation des échanges de surface en milieu urbain pour alimenter les modèles Meso échelle. Cette paramétrisation prend en compte l'impact des surfaces horizontales (toitures et routes) et verticales (murs) sur la quantité de mouvement, la température et l'énergie cinétique turbulente pour tous les niveaux de la grille numérique de la canopée urbaine. Le modèle prend en compte les effets d'ombre et de réflexion de la radiation à l'intérieur des rues canyons.

Principale originalité de ce modèle dans la paramétrisation de la surface urbaine c'est la prise en compte de la « distribution verticale de la densité des bâtiments » (fig. 2.28). En effet ce n'est pas une hauteur moyenne qui est appliquée à tout le territoire analysé mais plusieurs hauteurs selon leur densité. Cette densité verticale est calculée à partir de couches disposées à des hauteurs différentes depuis le sol. Pour chaque couche on calcule donc la densité bâtie par rapport à la surface totale étudiée.

L'auteur propose de représenter planimétriquement la forme urbaine par une combinaison de différentes classes. Chaque classe étant caractérisée par un réseau de bâtiments de même largeur B espacés selon les mêmes distances l'un de l'autre par la largeur du canyon W. La longueur des rues canyons est supposée égale à la distance horizontale du territoire analysé.

Comparés à des mesures, les résultats du modèle ont démontré qu'une prise en compte plus détaillée de la surface urbaine permet de modéliser avec plus de précision les profils verticaux des champs turbulents ainsi que l'évolution temporelle des flux de chaleur stockés dans la surface urbaine (fig. 2.29).

<sup>25</sup> Johnson, G.T., Oke, T.R., Lyons, T.J., Steyn, D.G., Watson, I.D., and Voogt, J.A. : 1991, Simulation of surface urban heat islands under « ideal » conditions at night. Part I : theory and tests against field data, *Boundary-layer meteorol.* 56, pp. 275-294.

<sup>26</sup> Mills, G.M. : 1993, Simulation of the energy budget of an urban canyon-I. model structure and sensitivity test, *Atmos. Environ.* 27B, pp. 157-170.

<sup>27</sup> Arnfield, A.J., Herbert, J.M. Johnson, G.T. 1998. A numerical simulation investigation of urban canyon energy budget variations. Preprints Second Symposium on the Urban Environment. Amer. Meteorol. Soc., Boston MA, pp. 2-5.

<sup>28</sup> [http://lpas.epfl.ch/MOD/staff/alberto/these\\_rep.pdf](http://lpas.epfl.ch/MOD/staff/alberto/these_rep.pdf)

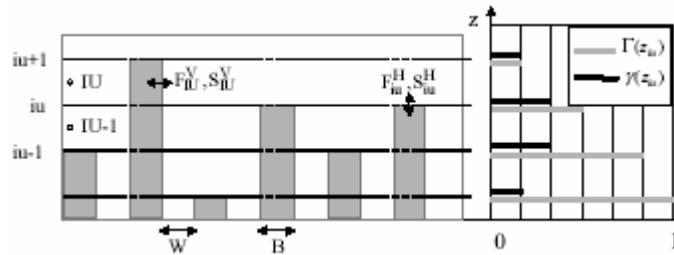


Figure 2.28 : Représentation schématique de la grille numérique représentant la surface urbaine [MARTILLI 2001]

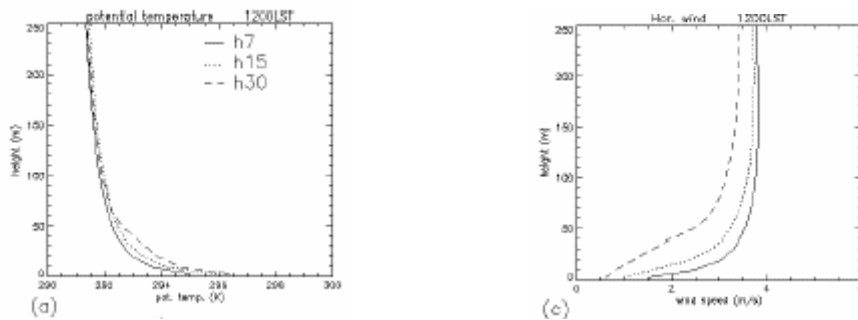


Figure 2.29 : Exemple de résultats donnés par le modèle pour différentes hauteurs de bâtiments [MARTILLI 2001]

- Le modèle SM2U-3D [Dupont et al. 2004]

Le modèle de sol urbain SM2U a été développé ces deux dernières années vers un modèle de sol appelé « SM2U-3D » qui vise à tenir compte de la troisième dimension de la surface urbaine pour obtenir les flux d'énergie et d'humidité émis par les éléments de la canopée. L'épaisseur de la surface urbaine est principalement caractérisée par le concept de rue canyon. En effet le modèle de sol 3D cherche à mieux prendre en compte les phénomènes de piégeage lié à l'existence du canyon. C'est donc un modèle thermodynamique de la canopée urbaine qui prend en compte la nature des surfaces et la hauteur des bâtiments. Le piégeage et les réflexions sont aussi pris en compte dans cette version 3D de SM2U (fig. 2.30)

L'approche classique qui tendait à prendre en compte la surface urbaine dans les modèles Meso échelle par un simple paramètre de rugosité est ici discutée et comparée à une approche appelée « drag-force approach » ou approche multicouche. Cette dernière permet de transmettre directement à l'atmosphère les effets dynamiques, thermodynamiques et turbulents des éléments de la canopée (végétation et bâtiments) en changeant les équations de conservation du modèle Meso échelle. [DUPONT et al. 2004]

La résolution spatiale de la maille d'analyse est horizontalement de l'ordre de 1km<sup>2</sup> et de 1m dans le sens vertical. La description des éléments de la forme urbaine repose sur les informations suivantes :

- La hauteur moyenne des bâtiments
- La densité bâtie au sol
- La densité des surfaces végétales
- Densité de surface des toitures
- Densité frontale des bâtiments
- Densité frontale de la végétation
- Fraction de surface des murs par rapport à celle de la maille analysée
- Prospect moyen des bâtiments

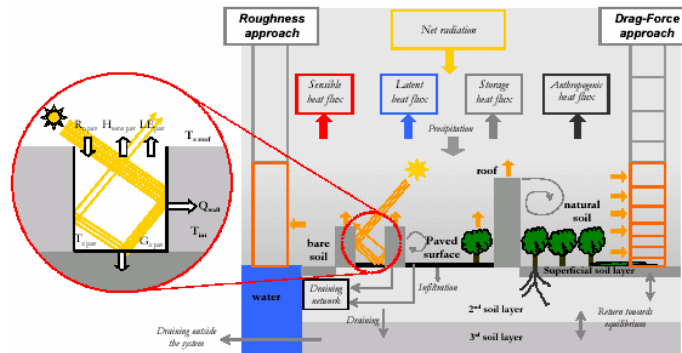


Figure 2.30 : Schéma représentatif de la paramétrisation de la canopée urbaine selon DA-SM2-U basée sur une approche multicouche en utilisant le modèle de sol SM2-U(3D) [DUPONT et al. 2004]

- “Architecture-Urban-Soil- Simultaneous Simulation Modèle” [HAGISHIMA et al. 2003]

Pour mieux prendre en compte les échanges entre les bâtiments et l’espace extérieur, ce modèle développé par une équipe japonaise décompose les bâtiments en hauteur selon différents compartiments. Il prend en compte les matériaux des murs ainsi que leur épaisseur et celle des fenêtres (fig. 2.31).

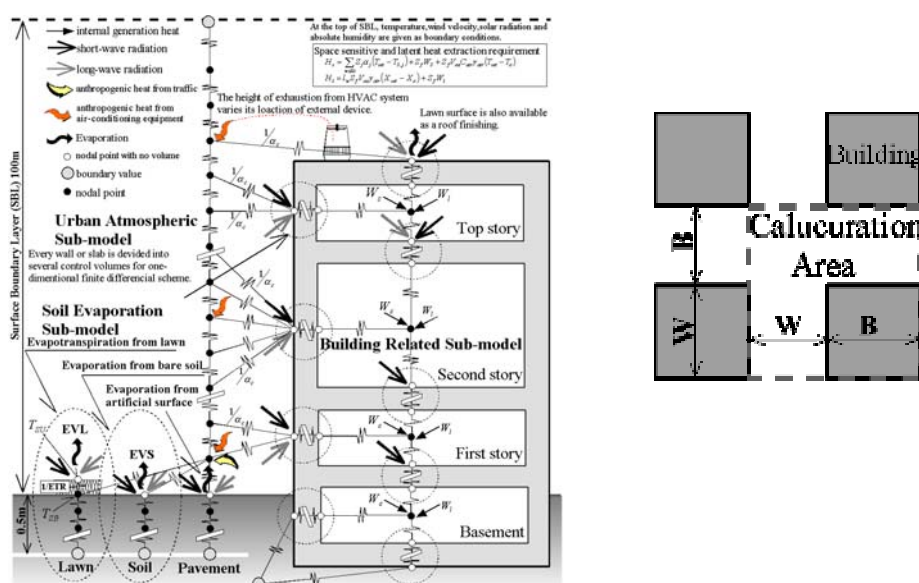


Figure 2.31 : Représentation schématique en profil et en plan des principaux paramètres de AUSSSM<sup>29</sup>

L’objectif de cette décomposition de la canopée et de l’intérieur des bâtiments en couches vise une expression plus proche de la réalité de l’influence du canyon sur les aspects aérodynamiques et thermodynamiques. Ce modèle contrairement aux précédents ne cherche pas seulement à constituer un sous modèle pour évaluer les entrées du modèle Meso échelle. L’objectif du modèle est aussi de clarifier l’effet quantitatif sur l’îlot de chaleur urbain de décisions liées à la planification urbaine et aux projets urbains. Le modèle utilise plusieurs sous-modèles pour évaluer les échanges thermiques, thermodynamiques et hydriques out en négligeant les échanges advectifs. On considère dans ce modèle que la forme urbaine répond au schéma en damier. C’est à dire constitué de bâtiments de forme carrée séparés par des rues identiques. Les données d’entrées traduisant la configuration

<sup>29</sup> <http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/e/UHI/aussm1/aussm1.htm>



planimétrique sont la largeur de la rue  $W$  et celle des bâtiments  $B$ . Le module de calcul inclut la surface d'un bâtiment et celle des deux rues adjacentes.

- **Le modèle « TEB » (Town Energy Budget) [MASSON 2000] ; [MASSON et al. 2001]**

Le modèle que nous avons choisi pour effectuer les simulations numériques du climat urbain appliqué à l'échelle du centre ancien de la ville est le modèle « TEB » (Town Energy Budget) développé par le CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) de Toulouse. Comme l'indique son nom, ce modèle traite du bilan énergétique d'une ville (ou d'une partie de ville), dont le module d'analyse peut atteindre les quelques centaines de mètres de côté. Il s'applique à des fragments urbains construits et il permet un couplage avec le modèle (rural) ISBA (Interaction Soil-Biosphere atmosphère) [NOILHAN et al. 1989] pour traiter des parties végétales et hydriques qui peuvent se situer à l'intérieur de ces fragments urbains.

Pour prendre en compte l'ensemble des surfaces composant la surface urbaine, le calcul des flux à l'échelle de la ville se fait par le calcul de la moyenne des flux pondérés par la fraction de surface qu'occupe chaque type de surface (bâtie, végétale, eau, naturel, minéral), en utilisant le modèle TEB pour les surfaces urbaines bâties et les surfaces minérales, et le modèle ISBA pour les simulations des surfaces végétales, hydriques et de sol naturel (non revêtus)<sup>30</sup>. Le modèle vise à coupler deux schémas de surface. Ceux utilisés pour simuler le climat urbain à l'échelle micro (bâtiments et/ou rue canyon) [MILLS 1997<sup>31</sup>, Arnfield et Grimmond 1998<sup>32</sup>, Arnfield et al. 1998] et ceux appliqués à l'échelle Meso à partir d'une transposition des modèles de transfert végétation-atmosphère sur un environnement bâti [BEST 1998<sup>33</sup> ; TAHA 1999<sup>34</sup>]. Pour cela il adopte le concept de canyon pour modéliser la morphologie de la surface urbaine.

TEB a pour objectif principal de simuler les flux turbulents à la surface du modèle atmosphérique Meso-échelle recouvert par les bâtiments, sols de rues ou toute autre matière artificielle et cela en utilisant selon la formulation de base donnée par T.R.Oke pour le calcul des bilans d'énergies que nous avons évoqué plus haut dans ce chapitre. Les flux calculés sont : les flux de chaleur latente et sensible ( $W/m^2$ ), les flux radiatifs en haut des rues ( $W/m^2$ ), les flux radiatifs des surfaces ( $W/m^2$ ), et les flux dynamiques ( $m^2/s^2$ )<sup>35</sup>.

La prise en compte de la hauteur des bâtiments et la décomposition de la surface urbaine en sols, murs et toits permet, permet d'évaluer le bilan des flux d'énergies et des flux dynamiques à l'intérieur des rues (objet de notre préoccupation) et donc de simuler les phénomènes physiques liés à l'échelle climatique locale. Les paramètres énergétiques et microclimatiques calculés par TEB sont :

---

<sup>30</sup> Nous présentons dans le détail le modèle TEB utilisé pour la simulation de la partie urbaine. Quant au modèle ISBA, nous avons choisi de ne pas l'exposer ici, tant ce modèle est assez connu et utilisé depuis plusieurs années.

<sup>31</sup> Mills, G., 1997 : An urban canopy-layer climate model. *Theor.Appl.Climatol.*, 57, pp. 229-244.

<sup>32</sup> Arnfield, A.J., and C.S.B.Grimmond, 1998 : An urban canyon energy balance model and its application to urban storage heat flux modelling. *Energy and Build.*, 27, pp. 61-68.

<sup>33</sup> Best, M., 1998 : Representing urban areas in numerical weather prediction model. Preprints Second Symposium on the Urban Environment. Amer. Meteorol. Soc., Boston MA, pp. 148-151.

<sup>34</sup> Taha, H. : 1999, Modifying a Mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage : A Bulk parametrization approach, *J.Appl. Meteorol.* 38. pp. 466-473.

<sup>35</sup> Voir en annexe les différentes équations utilisées pour le calcul des températures et des différents flux.

$S_R^*, S_r^*, S_w^*$	Bilan du rayonnement solaire Net des Toits, sols et murs	$W m^{-2}$
$L_R^*, L_r^*, L_w^*$	Bilande du rayonnement Infra-rouge Net des Toits, sols et murs	$W m^{-2}$
$H_R, H_r, H_w$	Flux de chaleur sensible des toits, sols et murs	$W m^{-2}$
$LE_R, LE_r, LE_w$	Flux de chaleur latente des toits, sols et murs	$W m^{-2}$
$G_{R_{k,k+1}}, G_{r_{k,k+1}}, G_{w_{k,k+1}}$	Flux de chaleur par conduction entre k et k+1 des tois, sols, et murs	$W m^{-2}$
$H_{town}$	Flux de chaleur sensible moyen pour l'ensemble de la ville	$W m^{-2}$
$LE_{town}$	Flux de chaleur latente moyen pour l'ensemble de la ville	$W m^{-2}$

Tableau 2.4 : Flux d'énergie calculés par le modèle « TEB ». [MASSON 2000]

$T_{can}$	Temperature moyenne de l'air dans la rue (canyon)	K
$q_{can}$	Humidité spécifique de l'air dans la rue	$kg kg^{-1}$
$U_{can}$	Vitesse de l'air le long de l'axe de la rue	$m s^{-1}$
$\alpha_{town}$	Albédo effectif sur l'ensemble de la ville	–
$T_{town}$	Temperature moyenne de surface sur l'ensemble de la ville	K

Tableau 2.5 : Paramètres calculés par le modèle TEB dans les rues et à l'échelle de la ville [MASSON 2000]

Le modèle approxime et représente la ville selon les hypothèses suivantes :

1. Les bâtiments ont la même hauteur
2. Les bâtiments sont localisés le long de rues identiques, dont la longueur est considérablement plus importante que la largeur. L'espace contenu entre les faces des bâtiments est défini comme un « canyon ».
3. Toutes les orientations des rues sont possibles (le maillage n'est pas fonction de la direction du vent) et elles existent toutes avec la même probabilité. Cette hypothèse permet d'intégrer un forçage moyen selon toutes les directions.

Ces hypothèses, ainsi que les formulations physiques choisies permettent le développement d'un modèle relativement simple. Les paramètres descriptifs des surfaces urbaines sont résumés dans le tableau ci-dessous (tableau. 2.6)

Symboles	Designation des symboles	Unités
<b>Paramètres géométriques</b>		
$a_{town}$	Fraction de surface occupée par "la ville"	–
$a_{bld}$	Fraction de surface occupée par les bâtiments	–
$1 - a_{bld}$	Fraction de surface occupée par les rues	–
$h$	Hauteur des bâtiments	m
$h/l$	Prospect des bâtiments	–
$h/w$	Prospect des rues (hauteur / largeur)	–
$z_{0,town}$	Longueur de rugosité dynamique pour le système bâtiment / canyon	m
<b>Paramètres radiatifs</b>		
$\alpha_R, \alpha_r, \alpha_w$	Albédos des toits, sols et murs des rues	–
$\epsilon_R, \epsilon_r, \epsilon_w$	Emissivités des toits, sols et murs des rues	–
<b>Paramètres thermiques</b>		
$d_{R_k}, d_{r_k}, d_{w_k}$	Epaisseurs des couches de toitures, sols, et murs	m
$\lambda_{R_k}, \lambda_{r_k}, \lambda_{w_k}$	Conductivité thermique des couches de toits, sols et murs	$W m^{-1} K^{-1}$
$C_{R_k}, C_{r_k}, C_{w_k}$	Capacité thermique des couches de toits, sols et murs	$J m^{-3} K^{-1}$

Tableau 2.6 : Les paramètres de surfaces (données d'entrée) du modèle TEB : paramètres géométriques, paramètres radiatifs et paramètres thermiques [MASSON 2000]

Les murs et sols de rues sont traités séparément, car ils réagissent différemment aux différents phénomènes physiques (vue du ciel, structure thermique, source de chaleur à l'intérieur des bâtiments ou la présence d'eau ou de neige sur le sol). L'ensoleillement et l'ombrage des murs sont traités conjointement, en supposant que lorsqu'un côté de la rue est à l'ombre l'autre serait au soleil. Rappelons aussi que c'est la valeur moyennée sur les deux murs qui est calculée par TEB.

V.Masson a effectué avec T.R.Oke et C. S. Grimmond un essai de validation du modèle par la comparaison des résultats de simulation avec des mesures directes de températures de surface et de bilans d'énergie sur deux sites aux formes urbaines assez simples. L'un est une partie du centre historique de la ville de Mexico et l'autre un site industriel situé dans la ville de Vancouver. Dans les deux cas la végétation couvre moins de 5% de la surface de chaque site, dans le but de ne tester que les formulations de TEB pour la partie urbaine bâtie. Sans revenir sur les détails des données d'entrées (voir à ce sujet [Masson et al. 2001]), les auteurs, après comparaison des mesures avec les simulations ont conclut à un niveau de prédiction des réponses thermiques et de flux par le modèle TEB assez proches des mesures (fig. 2.32 et 2.33).

Sur le site de Mexico, le modèle TEB a été testé non seulement pour le calcul des flux (rayonnement net, flux de chaleur sensible et flux de chaleur stocké) mais aussi pour le calcul des températures de surfaces (toits et sol des rues). Dans la simulation des bilans d'énergies, la correspondance est tout aussi importante entre le cycle calculé et celui mesuré des différents flux. En ce qui concerne le site de Vancouver les correspondances sont moins évidentes, mais les bilans des flux ont tout de même des profils similaires. Alors que les températures de surfaces, et surtout celles des sols des rues, sont très proches des mesures.

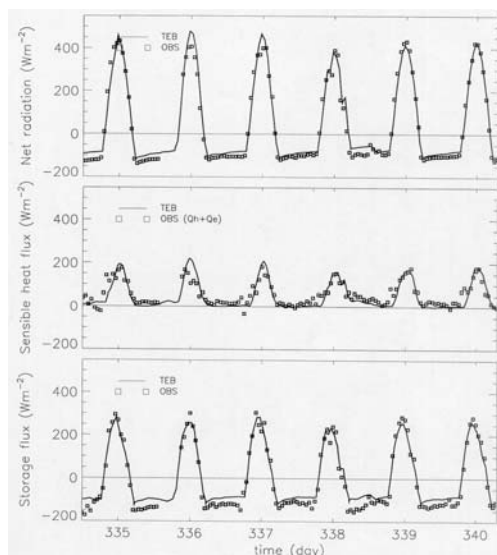


Figure 2.32 : Comparaison des bilans d'énergie entre les résultats donnés par TEB et les mesures effectuées sur Mexico [Masson et al. 2001]

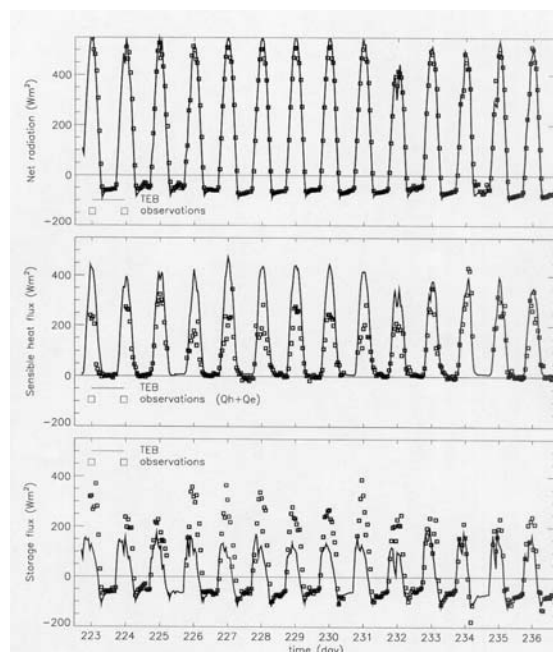


Figure 2.33 : Comparaison des bilans d'énergie entre les résultats donnés par TEB et les mesures effectuées sur Vancouver [Masson et al. 2001]

Les températures de surfaces ont été mesurées sur deux rues, l'axe de l'une est dirigée nord-sud et celui de l'autre est-ouest. TEB ne prenant en compte qu'une direction moyenne les résultats des modélisations ont été comparés à la valeur moyenne des mesures sur les deux rues. La correspondance est assez importante (fig. 2.34).

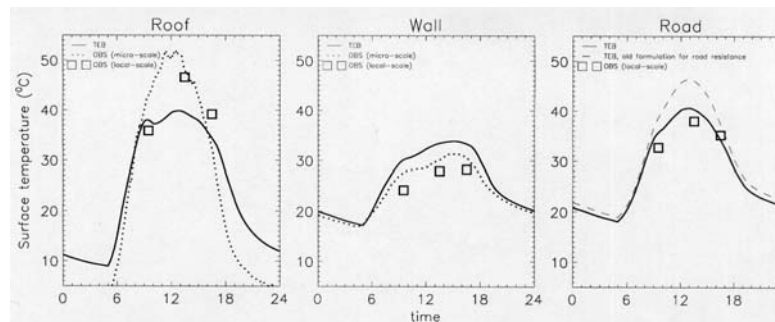


Figure 2.34 : Comparaison des températures de sol, des toits et des murs des rues entre les résultats donnés par TEB et les mesures sur le site de Vancouver [MASSON et al. 2001]

De ce travail de validation il ressort ainsi, et c'est le propos même des auteurs, que le modèle TEB peut être utilisé sans craindre de grandes erreurs pour calculer (simuler) les différents flux d'énergies et les températures de surfaces. En d'autres termes le modèle TEB reproduit correctement la réponse de la surface urbaine aux paramètres climatiques. Bien que, la précision des résultats ne soit pas une exigence fondamentale, dans la mesure où se sont uniquement les aspects relatifs des changements qui nous intéressent, il reste que celle-ci apporte un intérêt supplémentaire qui est celui de corrélérer des états et des valeurs quantifiées des flux d'énergie et des paramètres microclimatiques. Plus récemment [Masson et al. 2003], des expérimentations ont été menées sur le centre ville de Marseille en couplant le modèle TEB au modèle ISBA dans le cadre de la campagne de mesure ESCOMPTE (Experiments to Constraint Models of Atmospheric Pollution and Transport of Emissions). Cela a permis de valider quelques résultats du modèle et d'en recalibrer d'autres<sup>36</sup>.

## CONCLUSION : LE MODELE TEB COMME MODELE DE SIMULATION

L'approche expérimentale, si elle donne des valeurs indicatives des niveaux de variation des paramètres climatiques en milieu urbain, à la fois à l'échelle de l'espace urbain et à celle du fragment de ville, reste cependant limitée à une situation bien précise. Elle est aussi limitée à la modification d'un seul paramètre de la surface urbaine à la fois. La principale difficulté dans la quantification des effets physiques relatifs aux modifications des éléments de la forme urbaine par l'utilisation « des mesures » sur site réside dans la difficulté à détacher les éléments mesurés de leur contexte. En effet pour pouvoir juger de l'influence du pavage par exemple sur les températures d'air, on doit avoir des « contextes de mesure » identiques, avec comme seule variation un sol pavé dans un cas et un sol naturel dans l'autre, ce qui évidemment est difficile à obtenir. D'un autre côté, notre objectif étant d'analyser une situation réalisée historiquement dans une ville comme Nantes, ces références de mesures s'avèrent insuffisantes, car d'autres paramètres urbanistiques et climatiques font que les situations diachroniques ne sont pas similaires. En d'autres termes les travaux présentés peuvent nous éclairer sur des « effets potentiels », mais non sur les effets « situés ».

La complexité des phénomènes physiques et la variété des éléments qui constituent une forme urbaine dans l'espace et dans le temps rendent donc difficile toute tentative de mise en correspondance systématique entre états de la surface urbaine et le microclimat urbain. Une simple combinaison linéaire des phénomènes, même connus, ne suffit pas pour définir séparément les effets des transformations urbaines. Les modèles numériques paraissent en ce sens une alternative intéressante. Les modèles numériques permettent en effet d'effectuer des simulations avec des entrées de type « morphologiques » en ayant comme données de sortie une quantification des phénomènes physiques. Ce sont les seuls outils qui permettent à la fois d'avoir un aperçu global et

<sup>36</sup> Nous n'avons pas pu utiliser cette dernière version, car elle fut déposée pour publication en 2003.

détaillé des phénomènes physiques, puisqu'ils synthétisent toute la mécanique des échanges physiques. Il suffit ainsi de comprendre les entrées, les sorties, les limites et les hypothèses des modèles pour pouvoir en faire un usage pertinent.

L'évaluation de situations passées ne peut être abordée que par la modélisation paramétrique de la surface urbaine. Car les modèles utilisant une discrétisation spatiale exigent une reconstitution qui ne peut pas se faire de manière réaliste à l'échelle d'un fragment urbain (manque des sources historiques permettant une reconstitution détaillée). L'un des critères qui a guidé le choix du modèle de simulation est donc celui de la possibilité d'effectuer ces simulations à partir de données assez sommaires. D'un autre côté le modèle doit nous permettre d'évaluer l'ensemble des interventions sur la forme urbaine que nous avons évoqué dans le chapitre précédent.

La phase de « quantification » proprement dite des effets des transformations urbaines devra utiliser un modèle de simulation « global » incluant l'ensemble des phénomènes physiques liés à l'échelle climatique locale tout en permettant de prendre en compte les différentes interventions salubristes. La modification des prospectes des rues et la régulation de l'ouverture des rues étant l'une des interventions salubristes les plus importantes, nous avons dû utiliser un modèle paramétrique 3D qui est le modèle TEB. Ce modèle est en effet un modèle simple basé sur des informations sommaires de la forme urbaine, prenant en compte la troisième dimension, et permettant l'évaluation des bilans énergétiques ainsi que les paramètres microclimatiques dans les rues. C'est aussi un modèle qui a été relativement validé par des mesures. La relative simplicité de la géométrie est compensée par une prise en compte complète des processus physiques. Toutes les conditions atmosphériques peuvent être prises en compte en période diurne ou nocturne, ainsi que les diverses conditions de précipitations. Le piégeage radiatif fait l'objet d'un traitement original et les flux calculés sont validés en comparaison à des mesures spécifiques.

*« Le modèle TEB est destiné à être le plus général possible, pour représenter n'importe quelle ville, à n'importe qu'elle temps ou époque, et pour n'importe qu'elles conditions climatiques (rafraîchissement nocturne de l'îlot de chaleur, évaporation après pluie, et effets de la neige) [...] Il est destiné à simuler les flux turbulents de surface dans le modèle atmosphérique Meso-échelle dans lequel la surface est couverte par des constructions, des routes ou toute autre matière artificielle.... » [MASSON 2000].*

En résumé le choix du modèle TEB a été dicté par les trois critères suivant :

- *Prise en compte de la troisième dimension des espaces urbains* : c'est parmi les premiers<sup>37</sup> modèles numériques qui ont permis la simulation des paramètres microclimatiques à l'intérieur des rues d'un tissu urbain en se basant sur le concept de la rue canyon. Les autres modèles développés depuis TEB reprennent pour la plupart les mêmes critères de modélisation de la surface urbaine.
- *Simplicité d'utilisation et validité relative du profil des résultats* : Base de donnée d'entrée du modèle, assez sommaire, qui peut être reconstituée dans le cadre d'une lecture historique. Il ne s'attache pas aux particularités (différences entre les bâtiments ou entre les parois d'un fragment urbain) de la forme urbaine et des états de surface, car cela suppose une monographie du tissu urbain très poussé (et ce n'est pas l'objet de notre préoccupation ici), mais aux « caractéristiques globales » à l'échelle d'un tissu urbain.
- *Disponibilité de l'outil et aide à l'usage du modèle* : les membres du laboratoire MC2 (équipe de recherche GMME du CNRM de Toulouse) et le concepteur de l'outil TEB (V. Masson) ont permis une coopération fructueuse pour effectuer les simulations appliquées aux transformations urbaines du centre de Nantes.

---

<sup>37</sup> Lorsque l'on avait utilisé ce modèle en 2001, il n'existait pas encore de modèles connus appliqué à l'échelle locale et prenant en compte l'épaisseur de la surface urbaine.

## Chapitre 3

# **SIMULATION DES EFFETS MICROCLIMATIQUES LIES AUX TRANSFORMATIONS DU CENTRE ANCIEN DE NANTES.**

---

Nous abordons dans ce chapitre la quantification des effets microclimatiques liés aux transformations urbaines du centre ancien de la ville de Nantes. L'intérêt principal d'une analyse prenant en compte l'histoire d'une ville, rappelons le, c'est de prendre en compte la complexité des interventions sur la forme urbaine et les interactions entre leurs effets. Les analyses qui adoptent des modèles théoriques simplificateurs de la forme urbaine sont assez éloignés de la réalité, car ils préjugent le plus souvent d'un processus linéaire, où les interventions se succèderaient une à une ; cette visée évacue toute combinatoire entre les effets de ces interventions. L'analyse de l'histoire d'une ville spécifique nous permettra donc de nous confronter à la complexité spatiale et temporelle des interventions sur la forme urbaine et de leurs effets.

Les transformations analysées ici s'appliquent uniquement au territoire du centre ancien de la ville de Nantes. Nous avons choisi en effet de n'énumérer que les « ajustements morphologiques » sans prendre en compte les innovations du mouvement moderne. Cette limitation est due à deux motifs : d'abord parce qu'il est difficile d'évoquer un modèle stable de forme urbaine relatif aux grands ensembles. La seule constante dans ces derniers étant la prédominance du vide sur le construit. D'un autre côté le modèle TEB, étant basé sur le concept de canyon, ne s'applique qu'à des ensembles urbains formés de rues. Il ne sera donc question dans ce chapitre que des ajustements successifs du centre ancien de la ville de Nantes.

Pour pouvoir effectuer les simulations, nous devons passer de l'information historique sur les transformations urbaines, qui se présente sous différentes formes, à la quantification numérique des données d'entrées du modèle TEB. Le développement des méthodes et des hypothèses adoptées pour ce passage fera l'objet des trois premières parties de ce chapitre. La quatrième partie va contenir les résultats proprement dits des simulations ainsi qu'une ouverture critique qui introduira le dernier chapitre de cette thèse. Nous avons donc structuré ce chapitre en quatre parties complémentaires :

- Les principales transformations des états de surface réalisées dans le centre ancien de la ville de Nantes sont présentées dans la première partie. Ce sont des transformations qui ont été relevées à partir de textes anciens. Ces textes permettent en effet de donner à la fois des précisions sur les modalités de réalisation de ces transformations ainsi que sur leur période de réalisation, ce qui est indispensable pour une analyse diachronique.
- Dans la deuxième partie nous constituons des états représentatifs de ces transformations urbaines auxquels nous appliquerons les simulations. Ces états seront définis principalement à partir de la lecture des sources historiques disponibles dans les archives de la ville et que nous présentons dans cette même partie.
- Nous aborderons ensuite dans la troisième partie la quantification proprement dite des données d'entrée nécessaires aux simulations. Pour cela nous avons interprété les sources historiques, pour constituer des données numériques utilisables par le modèle TEB. Les sources disponibles ne permettant pas de connaître toutes les données des états anciens de la ville, nous avons émis

quelques hypothèses complémentaires pour combler les lacunes de ces sources, notamment en ce qui concerne l'évolution des hauteurs des bâtiments et des densités bâties.

- Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, nous présenterons et discuterons les résultats des simulations qui regroupent des bilans d'énergie et une quantification de quelques paramètres physiques du microclimat urbain. Cette partie se terminera par une ouverture critique sur la pertinence et les limites de la démarche de modélisation adoptée, ce qui introduira le dernier chapitre de cette recherche.

## 1. LES TRANSFORMATIONS DU CENTRE ANCIEN DE LA VILLE DE NANTES

La ville de Nantes au XIX<sup>ème</sup> siècle, de même que la plupart des villes françaises, connaît une insalubrité importante des espaces urbains et des habitations. Ainsi, en 1852 les membres de la commission des logements insalubres déclarent inhabitables, pour cause d'insalubrité, 24% des habitations des faubourgs et du centre ancien. L'insalubrité des logements est principalement due à des causes externes à l'état des habitations.

*« L'insalubrité des logements tient non-seulement à des conditions d'être particulières à chacun d'eux, mais, [...] , très souvent aussi à des causes extérieures et permanentes. La commission a été conduite à reconnaître que la gravité des causes intérieures d'insalubrité était presque toujours en rapport avec celle des causes extérieures. C'est dans les quartiers mal aérés humides et sales que l'hygiène des logements est la plus négligée. C'est là encore que les mesures partielles d'assainissement auront le moins d'efficacité ».*<sup>1</sup>

Ce sont en effet la forme des espaces urbains et la structure d'ensemble de la ville qui sont les plus mis en cause par la commission. A. Demoget, membre de cette dernière qui s'occupe des quartiers du centre, énumère les trois principales causes d'insalubrité urbaine<sup>2</sup>. Ce sont : le manque d'air et de lumière du fait de l'exiguïté et la longueur excessive des rues (deux personnes ont parfois peine à passer en même temps) ; l'humidité excessive causée par l'insuffisance du système d'égout (quand il existe) et l'étroitesse des cours et ruelles où se déversent les eaux ménagères ; et le voisinage de foyers permanents d'infection et d'exhalaisons délétères souvent proches des habitations du rez-de-chaussée<sup>3</sup>. Face à ces causes, directement liées à la morphologie des espaces urbains, les interventions ponctuelles sur les habitations sont donc jugées inefficaces. La priorité des interventions, selon Demoget, doit donc être donnée à une transformation des espaces et de la structure urbaine. L'assainissement des habitations passe par l'assainissement des espaces de la ville sur lesquels s'ouvrent ces habitations :

*« Il faut effectuer des percements dans les quartiers, élargir les rues, ouvrir les habitations, rétablir le pavage des rues et assainir les égouts ».* [CHEROT et al. 1852]

Les directives de la commission sont pratiquement celles qui se réalisent à Nantes tout au long du XIX<sup>ème</sup> siècle et au début du XX<sup>ème</sup>. Ce sont aussi, pour quelques-unes une d'entre elles, celles qui ont commencé à se réaliser à Nantes depuis le XV<sup>ème</sup> siècle comme c'est le cas notamment du pavage des rues.

Nous allons présenter dans cette première partie du chapitre l'ensemble des transformations urbaines qui auraient pu conduire, au vu des connaissances actuelles de la climatologie urbaine, à la modification du microclimat urbain. Parmi ces transformations on trouvera celles qui ont été formulées explicitement pour assainir l'air des espaces urbains, alors que d'autres répondaient à des priorités techniques et sécuritaires. Pour présenter ces transformations nous avons choisi de les classer selon les quatre données principales nécessaires au modèle TEB et qui traduisent les éléments de la forme urbaine, à savoir :

- les interventions sur le sol urbain : nous incluons dans cette catégorie l'ensemble des transformations non bâties du sol urbain.
- Les interventions sur la morphologie des espaces urbains : seront inclus dans cette catégorie toutes les interventions ayant modifié la forme des espaces urbains. Ce sont principalement les alignements et élargissement de rues.

---

<sup>1</sup> [CHEROT et al. 1852, p.17]

<sup>2</sup> Une seule cause d'insalubrité est attribuée aux logements : la malpropreté des habitations.

<sup>3</sup> Du fait de la capacité insuffisante des fossés, les eaux débordent sur le sol des rues. Les eaux ménagères en croupissant sur le sol mal ou non pavé infectent par leurs exhalaisons les habitations voisines.



- La modification des densités bâties : il sera question ici des transformations qui augmentent ou réduisent la surface bâtie dans le centre ancien.
- La modification des matériaux de construction des édifices: enfin on analysera les principales modifications des matériaux utilisés pour la construction des édifices.

### 1.1. Les interventions sur le sol urbain

Les états de surface du sol urbain pris en compte par le modèle TEB concernent principalement : le sol des rues et des cours, les surfaces d'eau ainsi que les surfaces de sol naturel et de jardins. Dans le centre ancien de la ville de Nantes la modification des états de surfaces correspondant à ces trois types de sols s'est réalisée successivement par la minéralisation du sol des rues, le comblement des fossés et des cours d'eau de l'Erdre et de la Loire et par l'enterrement des réseaux d'évacuation d'eau. Nous présentons en ce qui suit l'histoire de ces trois types d'intervention sur les états de surface du sol urbains. Le sol des rues et des cours sera progressivement minéralisé. D'abord par le pavage du sol des rues ensuite par leur recouvrement en bitume. Les interventions sur les surfaces d'eau sont de deux types : les comblements des fossés et des cours d'eau et l'enterrement des réseaux de canalisation d'eau en surface.

#### 1.1.1. Pavage des rues

Sur la nécessité de paver les rues de la ville de Nantes, les textes les plus anciens disponibles aux archives de la ville remontent au dernier quart du XV<sup>ème</sup> siècle. Un texte datant de 1475 stipule de:

*« ... bien nectoyer et curer, faire baulcer et paver en manière que les eaux et infections n'y demeurent, et faire es deux boutz d'icelle rue et faczon que l'on ny puisse porter ne mectre aucuns bourriers ne infections (...) A Nantes, par le duc, le 14e jour d'avril, l'an 1475 ... »*<sup>4</sup>

Puis, selon une ordonnance présidiale du 27 janvier 1576, l'incommodité des pavés et le manque d'entretien se font sentir sur l'ensemble de la ville de Nantes, au centre de la ville et dans ses faubourgs. Les premières prescriptions à propos du pavage concernent la nécessité de son rétablissement et son entretien. Ces prescriptions seront rappelées dans les règlements successifs à partir de l'édit royal de 1607 qui s'appliquait à l'ensemble du territoire français :

*« Voulons et nous plaît, que le dit grand voyer et ses Commis ayent l'œil et connaissance du pavement desdites rues, Voyes, Quais et chemins ; et où il se trouvera quelques Pavés cassés, rompus ou enlevés, qu'ils les fassent refaire et rétablir promptement, ... aux dépends des détenteurs des dites maisons »*<sup>5</sup>

Il faudra attendre le premier quart du dix-huitième siècle pour aller au-delà de ces opérations ponctuelles de rétablissement du pavage en mauvais état et de leur remplacement. Désormais des arrêtés font obligation de paver l'ensemble des rues de la ville et donnent une réglementation précise, sur l'étendue, la disposition, et le coût du pavage. Des précautions constructives doivent être prises pour assurer la résistance du pavé à l'usure due au trafic des voitures et charrettes, en augmentation à cette époque.

En 1721, les pavés des rues du centre de Nantes étaient, selon M. de Brou intendant de Bretagne à cette époque, parmi les plus mal construits et les moins entretenus :

*« Il y a peu de villes dont les pavez soient plus mal construits et plus mal entretenus que ceux de la ville et faubourgs de Nantes, (...), on ne peut qu'approuver la résolution prise par les maires et échevins, actuellement*

---

<sup>4</sup> [A.M.N, DD. 293] (Archives Municipales de Nantes)

<sup>5</sup> Cité dans [BIENVENU 1989]

*en charge, de pourvoir au bon état du pavé si nécessaire pour l'embellissement de la ville et pour la commodité des voitures et des particuliers qui l'habitent et de ceux que le commerce y attire... »<sup>6</sup>*

Le maire de Nantes ordonnera la même année, suite à diverses polémiques sur les coûts exorbitants du projet de pavage des rues de la ville, dans une lettre datant du 12 août d'effectuer le « toisé » exact des rues de Nantes en vue du rétablissement général des pavés. Les relevés sont effectués par le géomètre François Cacault en 1756 qui réalisera la même année le premier plan géométrique de la ville. Le toisé effectué en longueur de rue, sans les faubourgs, s'élevait à l'équivalent de 17960 mètres<sup>7</sup> de pavés à rétablir.

*« Il y a près de deux mois, Mgr, que j'ay fait travailler avec attention et assiduité à dresser un toisé exact de toutes les rues de cette ville ;...La récapitulation revient à 9502 toises 03 pieds, 10 pouces..., on n'y a pas compris les faubourgs ... »<sup>8</sup>*

En 1782<sup>9</sup>, dans un extrait du registre d'audience de police, datant du 19 décembre, une réglementation détaillée rend également obligatoire le pavage des rues dans les faubourgs et banlieue de la ville et impose leur entretien aux riverains. Dans cette perspective une liste des rues à paver est établie et actualisée en fonction de la croissance de la ville. C'est ainsi que l'Arrêté de la mairie de Nantes concernant le pavage, son rétablissement et son entretien, du 27 juin 1807 précise :

*« ...Vu la lettre de M. le Maître des Requêtes, Préfet de ce département, en date du 5 de ce mois, portant qu'il devient nécessaire de prendre un nouvel arrêté, qui rappellera les obligations (de pavage) imposées aux propriétaires par le règlement du 19 décembre 1782, et fera mention des changements survenus depuis dans les limites de la ville »*

En 1854 l'architecte Voyer en chef de la ville de Nantes, H. Driollet, établit un cahier des charges pour la confection du pavé dans lequel il précise le matériau et les dimensions des pavés. Il est recommandé de choisir une pierre très dure située dans une carrière proche de la ville. Cette pierre est de couleur Bleue et Bleu gris. Les dimensions du pavé sont données dans un tableau. Elles répondent à trois configurations différentes avec une recommandation pour la première et la deuxième [DRIOLLET 1854] : 0.14m à 0.17m x 0.17m à 0.20m pour 0.20m d'épaisseur ; 0.12m à 0.14m x 0.14m à 0.17m pour une épaisseur de 0.18m ; 0.08m à 0.14m x 0.10m à 0.14m pour 0.15m d'épaisseur. Les pavés sont posés sur un lit de sable et assemblés par des joints de 1cm. Cette technique de pose et ces dimensions du pavé qui seront les plus utilisés dans la confection et la réalisation du pavage des rues de Nantes s'appliqueront aussi aux rues dont on doit remplacer les pavés existants.

Dans le chapitre consacré aux aspects sanitaires du règlement de voirie de 1899, il est stipulé que les cours intérieurs doivent aussi être pavées. Si, avant ce règlement, il était surtout question de faciliter, par le pavage, le déplacement et le lavage des rues, dorénavant c'est « l'imperméabilité » des pavés qui sera mise en avant pour juger de leur efficacité.

*« Le revêtement de sol des cours et courettes sera imperméable et formera des pentes pour l'évacuation des eaux pluviales »*

Comme les autres villes françaises, Nantes connaîtra au milieu du siècle dernier, sa phase de « goudronnage » des rues. Le pavé est peu à peu remplacé dans les principales rues de circulation automobile. Quelques rues resteront néanmoins pavées principalement dans le quartier historique.

<sup>6</sup> Ordonnance de M. de Brou, intendant de Bretagne, le 22 avril 1721. Le texte est précédé par : « Arrest du conseil d'Etat du Roy, qui ordonne qu'il sera procédé à l'adjudication du rétablissement général des pavez de la ville et faubourgs de Nantes, sujets à l'entretien des particuliers ». [A.M.N, DD. 296]

<sup>7</sup> La distance a été calculée en convertissant celle calculée en toises par Cacault : 9502 toises, 03 pieds et 10 pouces. En mettant : une toise = 06 pieds = 1,89 mètres ; 1 pied = 30,48 cm ; 1 pouce = 27 mm.

<sup>8</sup> [A.M.N, DD. 297]

<sup>9</sup> [A.M.N, DD. 298]

### 1.1.2. Les comblements des fossés et des bras de l'Erdre et de la Loire

Le comblement des fossés Est et ouest entourant le centre ancien de Nantes (fig. 3.1) ainsi que la canalisation de l'Erdre sont envisagés pour la première fois par Ceineray (architecte de la ville) dans son plan « *pour la commodité et l'embellissement de la ville de Nantes* » (fig.3.2).

L'Erdre, rivière au cours très lent en raison de sa largeur, ne permettait pas d'évacuer facilement toutes les matières que l'on pouvait y jeter à cette époque. L'Arrêt du conseil d'état du 10 mai 1723 pour le nettoyage de la rivière d'Erdre précise :

« *Remplie d'immondices, par le fait des ouvriers des basses œuvres, qui auraient porté les matières qu'ils en tirent et les jetaient journellement [...] et que les bouchers d'un côté de la dite rivière y jettent pareillement les débris des tueries qu'ils font en sorte que ces immondices empêchent le cours de l'eau et le virement des moulins* »<sup>10</sup>

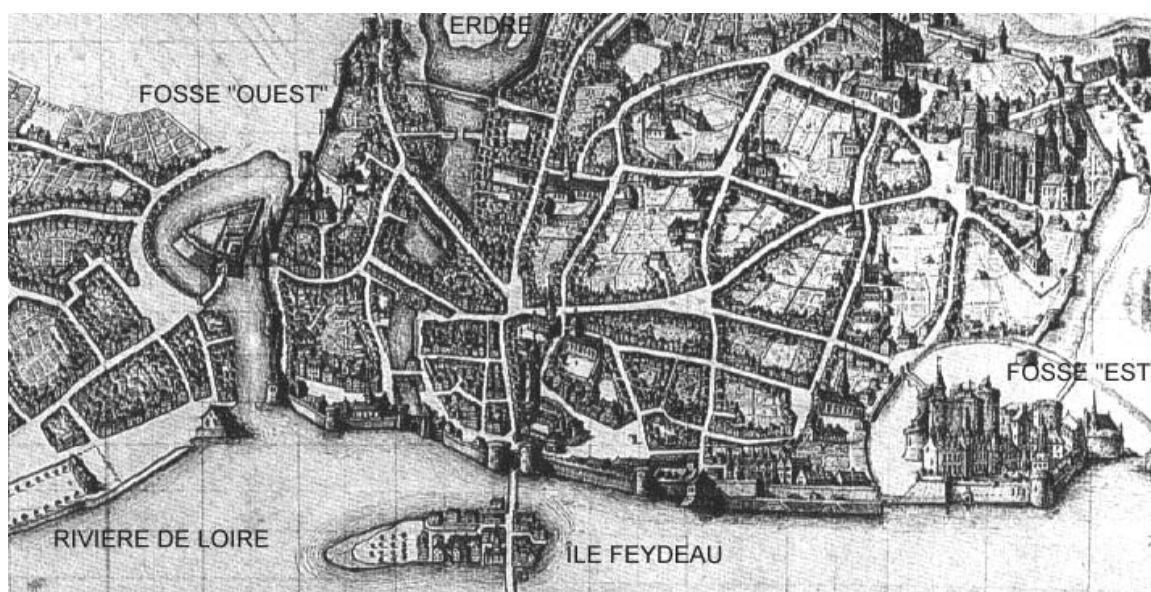


Figure 3. 1 : Localisation des remparts et fossés sur la partie sud d'une iconographie datée de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle<sup>11</sup> (avant la canalisation de l'Erdre et le comblement des fossés)

Le comblement des fossés et la canalisation de l'Erdre s'opéreront donc progressivement selon les transformations prévues par Ceineray dans son plan général. Les surfaces d'eau des fossés Est et Ouest seront comblées successivement par : à l'est, un cours immense nord-sud est planté d'arbres avec un sol en terre battue; une place et des voies de circulation sont pavées ; et d'importantes parties situées sur les anciens remparts sont remplacées par des îlots bâtis. A l'ouest, le fossé saint Nicolas est remplacé par des places, des rues pavées, et des îlots bâtis (fig.3.2). La canalisation de l'Erdre, qui est une opération d'alignement du cours de la rivière, entraînera la destruction de nombreuses constructions le long de la rive du canal, mais aussi du fait de la destruction des bâtiments situés sur les ponts habités qui traversaient la rivière d'Erdre (comme au pont Rousseau). Ceineray va prévoir aussi dans son plan d'embellissement de remplacer les anciennes surfaces de l'Erdre par des arbres et des surfaces de jardins dans les parties Nord (fig.3.3). De nouveaux îlots, se superposent aux anciens remparts de la ville, et l'ancien lit de la rivière, très large du fait du

<sup>10</sup> On projète, dans ce même article, non seulement de nettoyer la rivière d'Erdre mais aussi de l'élargir de 12 pieds et de la creuser de 2 pieds. [AMN, DD 167]

<sup>11</sup> L'iconographie originale ne contient pas les écritures que nous avons rajoutées pour localiser les fossés, la Loire, l'Erdre ainsi que l'île Feydeau.

mouvement des marées, sera soit bâti soit planté. La surface d'eau et ses surfaces attenantes vont ainsi être remplacées par : des surfaces minérales, végétales et bâties.

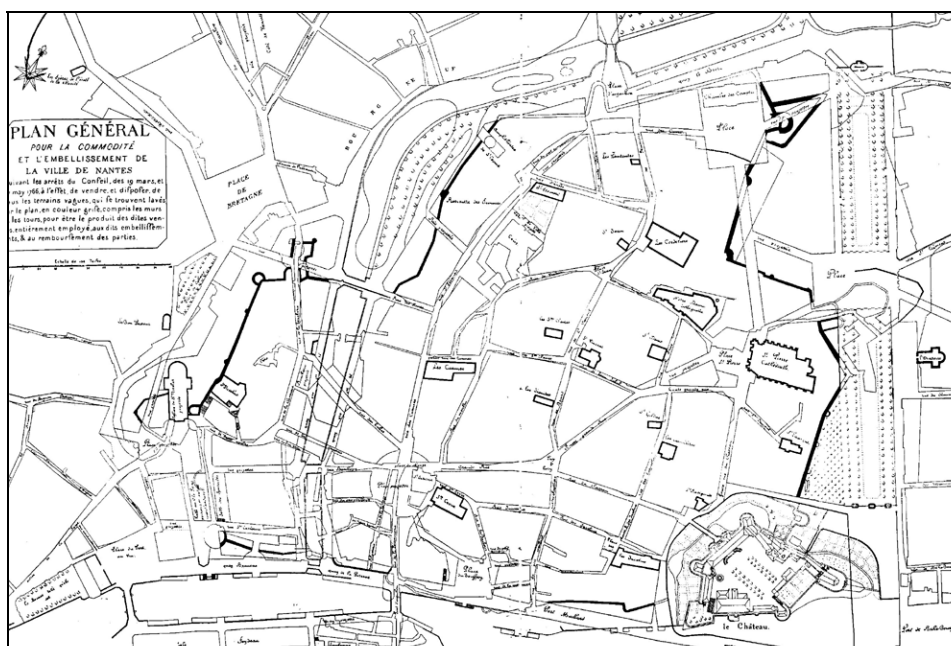


Figure 3. 2 : Plan proposé par Ceineray en 1766 pour l'embellissement de la ville de Nantes [LELIEVRE 1988]

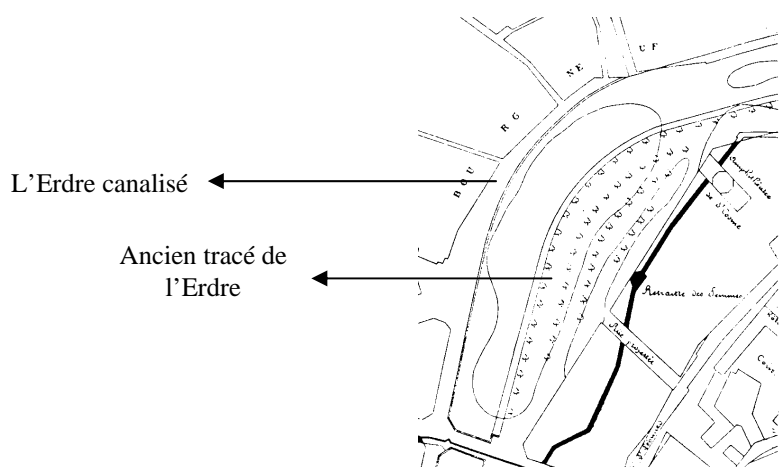


Figure 3. 3 : Canalisation de la partie Nord-Ouest de l'Erdre dans le plan Ceineray

Mais la canalisation s'avérera insuffisante. Le comblement de l'Erdre s'imposera par nécessité d'hygiène. Un rapport sur l'assainissement de la ville datant du 1er juillet 1859 rappellera les problèmes posés par ce cours d'eau :

*« L'infection des eaux de l'Erdre dans la traverse de Nantes a éveillé depuis quelques années et notamment pendant l'été de 1858 les préoccupations de l'opinion publique [...] En présence des conditions de force majeure inhérentes d'une part au développement de la population et de l'industrie et d'autre part à la communication directe de l'Erdre avec les égouts chargés de matières fécales, de résidus de tanneries, de liquides ammoniacaux et goudronneux, d'eaux ménagères, [...] on peut dire que ce cours d'eau constitue dans*

*les périodes de sécheresse et de chaleur un véritable cloaque, en réalité un prolongement des conduites de latrines de tout un quartier populaire* ». <sup>12</sup>

En ce qui concerne la Loire, la lenteur de ses eaux en ville et le rejet de matières diverses devenaient problématiques dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle pour la bonne navigation des bateaux commerciaux que recevait le port de Nantes<sup>13</sup>. L'ingénieur du Roi Mangin, qui fut chargé en 1757 de la réalisation de 570 toises de digues pour accélérer le cours de la Loire<sup>14</sup>, faisait remarquer dans un mémoire datant de 1762 que :

*« Depuis plus de vingt ans, la navigation de la Loire Dépérissait journellement, la rivière se comblait de toute part, le commerce de Nantes en était alarmé, et n'était occupé en 1754 que de conserver au moins le reste de sa navigation »* <sup>15</sup>.

Hormis ces opérations ponctuelles de canalisation des parties de l'Erdre et de la Loire qui intéressaient le centre ville, le comblement restait partiel. Il faudra attendre la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle pour voir son achèvement.

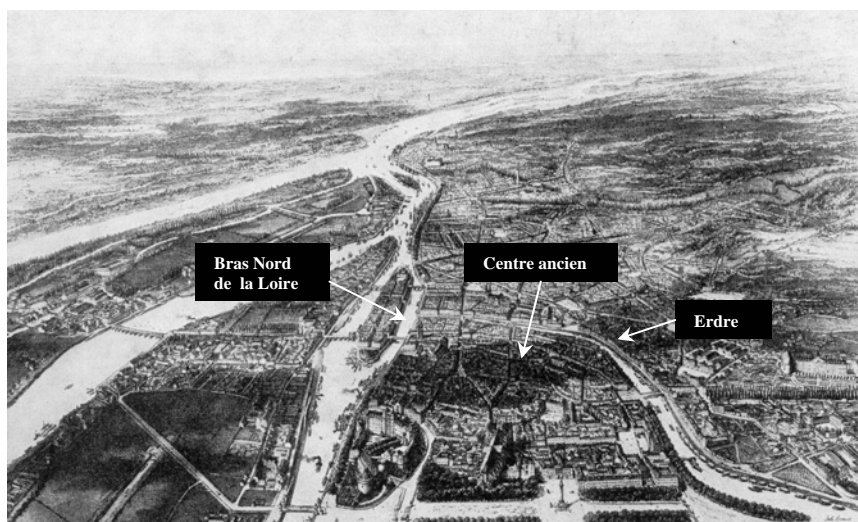


Figure 3.4 : Vue aérienne de l'Erdre et des bras de la Loire autour de l'île Feydeau datant de 1846 [COSNEAU 1973]

Le comblement du bras Nord de la Loire (fig.3.4) est surtout dû à un problème d'aménagement urbain et de sécurité. Son faible débit provoquait un très fort ensablement qui mettait en danger la vocation portuaire de la ville. En plus de cela de nombreux ponts et quais présentaient des fissurations importantes [BLOYET 1999]. Tout l'espace occupé par l'eau représentait un frein à l'urbanisation et un obstacle à la circulation. Après avoir envisagé diverses solutions comme le creusement du lit de la Loire, la municipalité a décidé le détournement de l'Erdre et le comblement du bras Nord de la Loire. Les travaux commencent en 1926 avec le comblement du bras de la Bourse, entre la place du Commerce et l'île Feydeau. En 1928 débute le comblement du bras de l'hôpital, entre l'île Feydeau et l'île Gloriette. En 1929, le creusement du canal de détournement de l'Erdre est commencé, sous les cours Saints Pierre et saint André (inauguré en 1934). En 1938, l'ancien cours de l'Erdre et la partie amont du bras nord de la Loire sont comblés (fig.3.5 et 3.6).

<sup>12</sup> [AMN, O3-C9-D3]

<sup>13</sup> On en compte 712 navires en 1743, selon [AMN, DD 160]

<sup>14</sup> Mémoire de l'ingénieur de Roi Lesieur Mangin, p. 329 du 15 décembre 1762. [AMN, DD. 161]

<sup>15</sup> Idem, note précédente.

Arrêtés pendant la guerre, les comblements ne seront définitivement achevés qu'en 1945. [DENIZEAU 1980]



Figure 3.5 : Vues du bras Nord de la Loire avant comblement et aujourd'hui [AMN]<sup>16</sup>



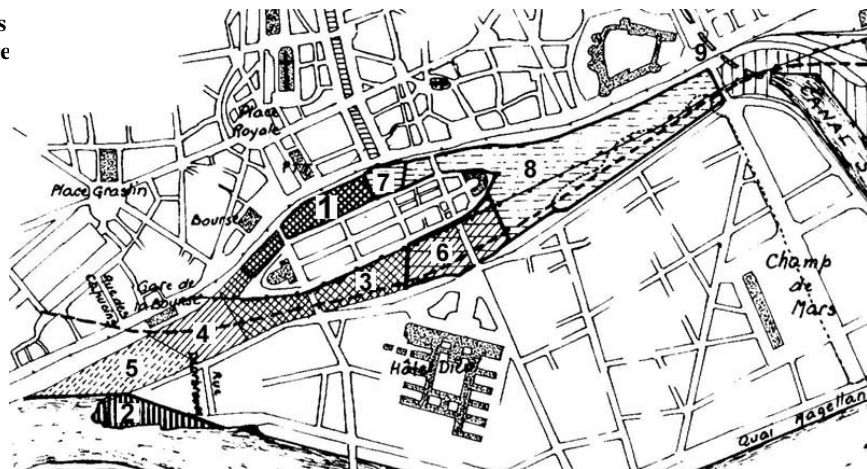
Figure 3.7 : Travaux de comblement de l'Erdre datant du 15 octobre 1940



Figure 3.8 : Tracé du détournement de l'Erdre selon un plan tracé par les ponts et chaussées le 29/04/1927 [DENIZEAU 1980]<sup>17</sup>

Figure 3.6 : Les phases comblement de la Loire [DENIZEAU 1980]

1. 1926-1927 ;
2. 1928 ( rescindement de l'île Gloriette)
3. 1929-1931
4. 1931-1934
5. 1957 (remise des terrains à la ville)
6. 1930-1936
- 7-8. 1938 ; 9. tracé partiel du détournement de l'Erdre.



<sup>16</sup> (AMN : Archives Municipales de Nantes) Le bâtiment à colonnade est l'ancienne bourse de Nantes (actuel FNAC).

<sup>17</sup> 1) Partie comblée de l'Erdre ; 2) Limite de la partie non comblée ; 3) Axe de détournement : canal souterrain de 740m de longueur

### 1.1.3. Enterrement du réseau d'évacuation d'eau

La maîtrise des écoulements hydriques est une préoccupation ancienne. Dès 1539, l'art. 8 des « usances » des villes, faubourgs et comté de Nantes, donne des précisions techniques sur les gouttières qui doivent rejeter l'eau vers le sol des rues, pour ensuite la canaliser en surface par un ruisseau central. Une ordonnance de police du 17 juillet 1721 rappelle la nécessité d'enlever tout obstacle pouvant gêner l'écoulement des eaux dans ce ruisseau :

*« Les habitants, tant des rez-de-chaussée que des chambres hautes affectent de faire apporter les ordures de leurs maisons sur la rue, même au milieu du ruisseau [...] Défenses sont faites à tous les habitants de la ville et faubourgs [...] d'apporter et faire mettre leurs ordures au milieu du ruisseau mais bien à côté de leur porte »*<sup>18</sup>

En 1743 il est prescrit à Nantes de désencombrer les rues des gouttières qui débordent excessivement des murs. On y précise aussi la pente des sols que doit constituer le pavé. Elle est définie selon une dénivellation de six pouces pour deux toises de largeur depuis la façade des maisons de manière à conduire convenablement l'eau vers le ruisseau central.

Jusqu'en 1870, toutes les eaux provenant des habitations et des activités urbaines se déversaient sur le sol des rues avant de rejoindre les quelques canalisations qui existaient de manière isolée (fig. 3.9). Ce n'est qu'à partir du règlement de police du 10 juin de cette même année, qu'il a été explicitement envisagé d'enterrer l'ensemble du réseau d'évacuation des eaux. Mais on peut supposer que le texte succède à une technique déjà existante et mise en œuvre antérieurement :

*« L'écoulement des eaux pluviales est interdit sur les trottoirs, il doit être acheminé vers le ruisseau au moyen de gargouilles sous trottoir, et les eaux usées doivent être collectées au réseau en sous-sol, si non, stockées dans une fosse étanche à l'intérieur de la parcelle »*<sup>19</sup>

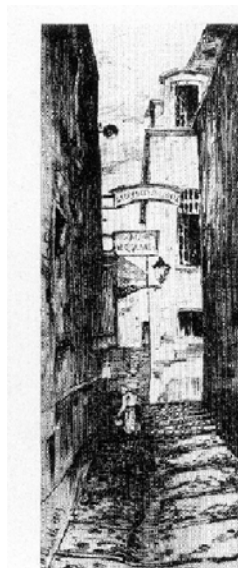


Figure 3.9: Ruelle du quartier de la Fosse avec une évacuation d'eau dans l'axe de la rue (XIX<sup>ème</sup> siècle) [COSNEAU 1973]

La quantité de surface d'eau présente à la surface du sol des rues, malgré le réseau d'assainissement, était tout de même considérable. Cela pour deux raisons : les avaloirs n'étaient pas disposés de manière régulière le long des chaussées et le réseau ancien d'évacuation souterrain était largement insuffisant. L'insuffisance de ce réseau est affirmée en 1883 par l'architecte en chef de la ville A. Demogot dans son rapport sur l'assainissement de la ville :

*« Il existe des égouts particuliers qui sillonnent nos rues dans tous les sens et qui sont, à cause, de leurs sections insuffisantes, des réceptacles infectes de déjections de toutes sortes que l'on est obligé d'enlever et de faire circuler dans les rues, pour les déboucher »*<sup>20</sup>

<sup>18</sup> [DENIZEAU 1978, p. D4b]

<sup>19</sup> Selon l'article 50 du règlement [AMN]

Ce rapport a été commandé par le maire de Nantes, M. Colombel, dans le but de vérifier la validité du système d'assainissement du « tout à l'égout » recommandé par la compagnie des eaux pour la ville de Nantes. En citant les expériences anglaises, russes, allemandes, italiennes et belges, Demogot fait l'éloge de ce système d'assainissement pour évacuer l'ensemble des eaux usées de la ville. Il préconise de réaliser sur 75 km de long, des collecteurs de sections ovoïdales ou rectangulaires (pour les rues en pente), et comme pour les autres villes de province, récuse le principe des canalisations visitables utilisées à Paris à cause de leur coût trop élevé. L'ensemble des canalisations devait se déverser dans de grands égouts collecteurs qui sont conduits hors de la ville. [DEMOGET 1883]

Malgré les recommandations de Demogot, Nantes va tarder à mettre en application ce système d'assainissement. Un document sur l'assainissement de la ville établi en 1895 le confirme et le regrette. Cette fois ce sont les bienfaits sanitaires du système qui sont mis en avant<sup>21</sup> pour convaincre les autorités de la ville à d'adopter le « tout à l'égout ». En rappelant que le taux de mortalité est de 29,4 pour 1000 à Nantes, ce qui dépasse le seuil maximal de 18 pour 1000 toléré par les règles d'hygiène de l'époque, Nantes reste, selon l'auteur, à cause de son assainissement défectueux, une des villes françaises les plus malsaines. Comme Demogot, il rappellera les défaillances du réseau de la ville. [s. n. 1895]

Il faudra attendre le premier quart du XX<sup>ème</sup> siècle pour voir se réaliser de manière systématique le réseau du « tout à l'égout » et voir, de ce fait, disparaître les surfaces d'eau qui stagnaient encore dans les rues de la ville.

## 1.2. Les interventions sur la morphologie des espaces urbains

### 1.2.1. Le processus d'alignement des rues

Les rues, avant les transformations de leurs tracés, étaient trop étroites (fig. 3.10). Le Règlement de police de mars 1696 fait ainsi remarquer :

*« ... par le peu de régularité qui a été observé anciennement dans l'Architecture et construction des maisons, la plupart des rues sont extrêmement resserrées, l'entrée de celles ci étroite, qu'il n'est pas possible d'y tourner les carrosses et les charrettes... »<sup>22</sup>*

Les premières décisions réglementaires qui vont permettre d'ouvrir progressivement les rues vers le ciel sont celles relatives à l'alignement des parois des édifices. Ces alignements se font selon deux configurations successives : un alignement vertical des parois puis un alignement horizontal du tracé des rues.

La rue droite et large est d'abord jugée « commode » pour éviter les encombrements dus aux déplacements urbains et aux débordements des activités en rez-de-chaussée des bâtiments<sup>23</sup>. Elle

---

<sup>20</sup> [DEMOGET 1883, p.22]

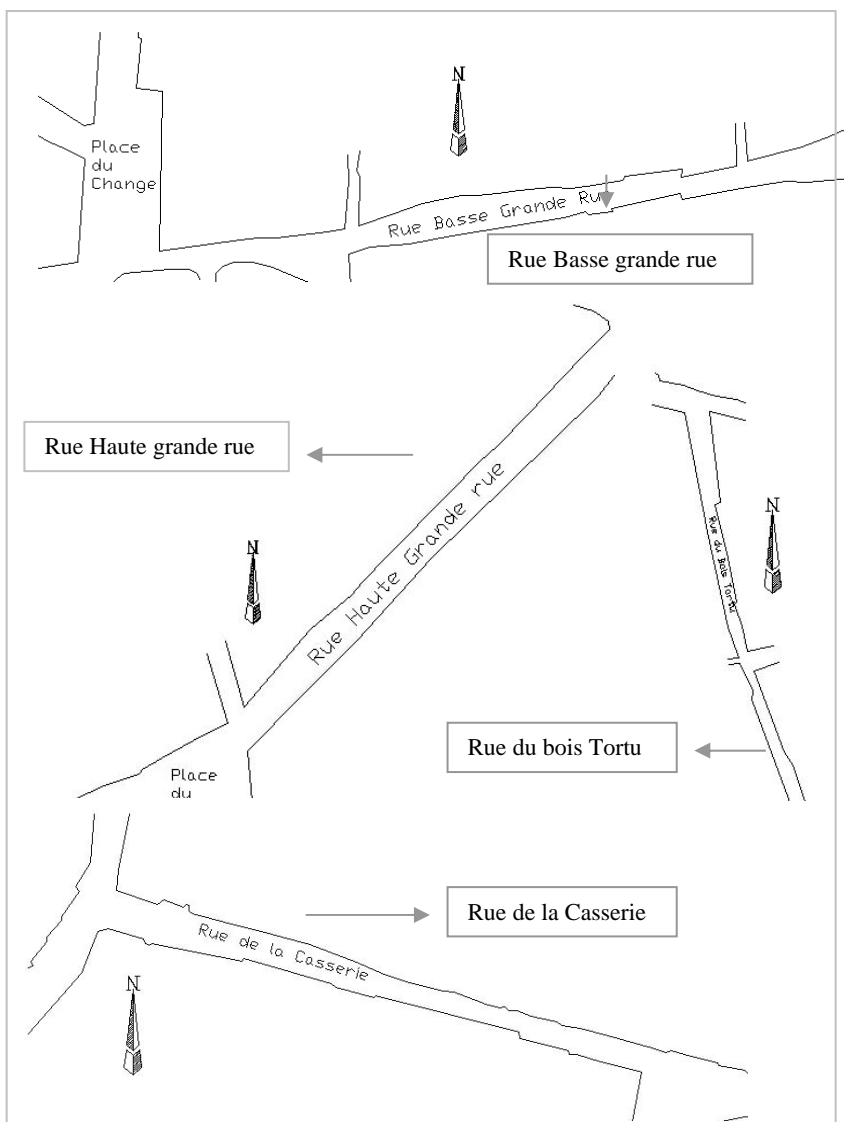
<sup>21</sup> En s'appuyant sur des statistiques, l'auteur affirme que ce système a considérablement réduit le taux de mortalité à Londres, Bruxelles et Berlin.

<sup>22</sup> [AMN, DD 45]

<sup>23</sup> C'est à 1482, dans un mandement du Duc de Bretagne François II, que remonte l'un des plus anciens textes (disponibles aux archives de la ville) relatifs à la réglementation des formes de l'édification sur la « voie publique » : Il est prescrit « de retirer les seuils de leurs maisons à l'alignement des autres pour élargir le passage » [AMN, CC 99]. La motivation première de cette réglementation des rues fut d'abord la volonté « d'élargir le passage ». Dès le début du XVI<sup>ème</sup> siècle, on commence à Nantes par proscrire les débordements liés aux étalages des différents commerces qui réduisaient sensiblement le passage des citadins. Voir : Ordonnance de police du 1<sup>er</sup> février 1571. [AMN, DD 45]



sera obtenue à la fois par réduction des saillies et par avancement des maisons, comme en 1724 lors des travaux d'aménagement du quai de la Fosse à Nantes<sup>24</sup>.



**Figure 3.10 : Tracé de rues à la même échelle: Illustration des variations de largeurs des rues et du manque d'alignement** (Reconstitution sur AUTOCAD selon le plan Cacault de 1756)

Maire de Nantes en 1720 et subdélégué de l'intendant, Gérard Mellier aura entre ses mains l'essentiel des pouvoirs qui permettent d'agir sur la ville. Ses projets prendront forme dans les faubourgs où l'intervention est moins contraignante. On oblige ainsi les propriétaires du quartier de la Fosse à démolir les « avances en forme de lanternes » de leurs maisons, en évoquant une raison esthétique puisque sont principalement concernés par ces alignements les saillies : « qui offusquent la vue ». Mellier avait déjà écrit dès 1709 un « traité du droit de Voirie » où s'affirme son idéal urbain :

*« Une ville aux rues droites et alignées semblant n'être bordées que d'une seule et même maison ».*<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Cette possibilité d'alignement du tracé des rues, soit par avancement ou par reculement des bâtiments existants, sera rappelée dans le règlement concernant les permissions de grande voirie établi le 30 octobre 1858 à Nantes. Voir [BIENVENU 1989, p.4]

<sup>25</sup> Cité dans [BIENVENU 1989].

Sous sa magistrature, Nantes connaît sa première période d'extension concertée et contrôlée à l'extérieur des remparts. La recherche de régularité concerne les nouvelles extensions : l'aménagement de la motte saint Pierre à l'Est, la création du lotissement de l'île Feydeau et l'embellissement du quai de la Fosse à l'Ouest. La ville intra-muros est tout aussi concernée par ces alignements.

Dans les années 1740, on cherche à se doter d'outils pouvant conduire à une rectification des anciens tracés de rues. Touros, ingénieur du roi, produit les plans d'alignement de plusieurs rues de la vieille ville et les rassemble en 1742 dans un premier plan général<sup>26</sup>. Si les nouveaux alignements sont définis, le renouvellement des maisons ne se fera qu'en fonction de leur vétusté<sup>27</sup>.

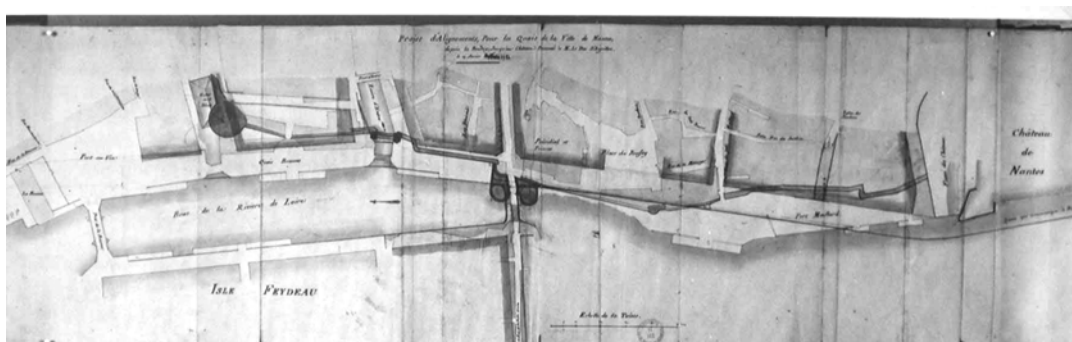


Figure 3.11: Alignement d'un quai de la Loire au sud de la ville Intra-muros établi en 1761 [AMN, 5Fi 85 et II 164-25].

Le règlement de police du 6 juin 1743 prescrit les conditions à respecter pour « la réédification des maisons de la ville et Faubourgs de Nantes ». Les saillies sur l'espace public restent pour la plupart interdites et celles que l'usage impose sont limités par des normes. Les maisons reconstruites dans les rues du quartier du Bouffay et du Piloni rendent compte aujourd'hui de son application, avec leurs façades sans saillies et leurs balcons au nu des murs de façade<sup>28</sup>.

Après l'interdiction puis la réglementation des saillies, on entame assez tardivement à Nantes, en dehors des projets ponctuels, un élargissement des rues par l'intermédiaire d'une réglementation des largeurs de voies. L'obligation d'une largeur minimale pour les rues existantes ne verra le jour qu'avec le règlement de voirie de 1870 qui stipule explicitement une largeur de 10m en centre ville et de 8m en banlieue. La réglementation des largeurs de rues sera ensuite rapidement associée à celle des prospect des rues.

Détaillons à présent chacun des deux types d'alignement : celui relatif à la réglementation des saillies et celui concernant le prospect des rues.

<sup>26</sup> Un arrêt du conseil d'état du roi établi le 23 août 1741 ordonne : « ... l'exécution de trois plans dressés le 8 mai 1741 par le sieur Touros, ingénieur du Roi en chef à Nantes, concernant la réduction, alignements des maisons et élargissements des rues » [A.M.N, D.D. 246].

<sup>27</sup> Un arrêté datant de la même année précise le type de modifications apportées aux rues : « Avant la réduction des maisons et l'élargissement de la rue Barillerie, suivant le plan de M. Touros [...], cette rue avait du côté du carrefour de la Casserie, [...] , 10 pieds sept pouces d'ouverture ; par la suppression de 08 pieds à cette maison, la rue Barillerie a 18 pieds de large ; au milieu elle n'avait qu'environ 14 pieds, aujourd'hui elle a de large 19 pieds. A l'autre bout, du côté de la rivière, où il y avait un porche et une maison qui traversait et obscurcissait cette rue, elle n'avait d'ouverture que 12 pieds 6 pouces. Aujourd'hui (1743), par la suppression du porche et de la maison que la ville a remboursé aux propriétaires, cette rue a au moins de large 30 pieds... » [AMN, DD 250].

<sup>28</sup> Règlement de police de 1743, [AMN, DD 301].

## - Contribution de la régulation des saillies à l'ouverture des rues

La réglementation progressive des saillies des constructions, produira, compte tenu de la largeur réduite des rues de l'époque, une ouverture des rues vers le ciel parfois considérable. Pourtant cette transformation des saillies est rarement citée dans les travaux des historiens qui ont traité des interventions hygiénistes sur la forme urbaine.

De nombreux textes anciens transcrivent une lutte continuelle contre les saillies de tout genre : seuils, trappes de cave, auvents, enseignes...<sup>29</sup>. On cherchait leur normalisation dans des dimensions maximales à ne pas dépasser. Ces normes étaient explicitement associées aux largeurs de voies, ce qui dénote une certaine conscience du rapport entre ces dernières et les dimensions des saillies.

La recherche de verticalité sans saillie de chaque paroi de bâtiment apparaît dès 1539, où il est exigé de réparer des murs non droits et de construire « à plomb et à la ligne » les nouveaux bâtiments :

*« murailles et pans de bois ou terrasses qui ne sont droits, mais sont pendantes, ventruës, ou contre plombées, doivent être redressées aux dépends de ceux à qui ils appartiennent à droit plomb et ligne... ».*<sup>30</sup>

Le texte du règlement comporte la première proscription de toute saillie. Mais cela ne concernait que les nouveaux bâtiments ou les reconstructions de bâtiments :

*« [...] qui bâtit ou refait de pied maison de nouveau doit la bâtir à plomb et à la ligne sans aucune saillie. Et s'il ne rebâtit des le pied, doit tenir à plomb depuis l'étage où il réédifie.. ».*<sup>31</sup>

L'édit de 1607 s'appliquant à l'ensemble des villes françaises, va rappeler la nécessité de l'alignement vertical des parois et interdira les saillies (sauf les auvents des bâtiments existants dans le cas où ils seraient situés à plus de 10 pieds du sol). En 1675 les premiers dimensionnements des saillies sont donnés. On limite les saillies des auvents à 3 pieds (97,4cm) à une hauteur minimale de 12 pieds (3,90m), celles des enseignes ne doivent pas dépasser 2 pieds ½ (81cm) et ne sont admis qu'à partir d'une hauteur de 15 pieds (4,87m). Trente ans plus tard, la réglementation des enseignes dans l'ordonnance du 4 juillet 1705 sur la voirie de Nantes va jusqu'à définir les cotes d'emplacement des saillies et leurs dimensions limites<sup>32</sup>.

En 1720, Gérard Mellier énumère dans un ouvrage les différents types de saillies pouvant exister à cette époque<sup>33</sup>. Une année après, les autorités policières de Nantes énumèrent, 29 espèces de saillies prohibées en vue : « d'établir le bon ordre de police et l'alignement des maisons » et pour « conserver la beauté des rues et voies publiques ».<sup>34</sup>

Les règlements vont ainsi tour à tour, autoriser, interdire, puis autoriser à nouveau les saillies. En 1743, les enseignes sont interdites dans les rues de moins de 15 pieds de largeur (4,65m) et les

---

<sup>29</sup> G. Bienvenu [BIENVENU 1989], en parcourant la liste des saillies que Mellier établit, distingue deux sortes de saillies : *Les saillies « rapportées »* ; non liées au plan des façades, ces dernières sont constituées d'éléments rajoutés « accrochées » à la façade, comme les balcons soutenus par des consoles en fer. La deuxième catégorie est constituée par des saillies dites « architectoniques » qui font partie du corps des parois bâties, tels les balcons en pierre sur une paroi de pierre.

<sup>30</sup> Les usances des villes, faubourgs et comté de Nantes, Reçues par messieurs les commissaires réformateurs, approuvées et insérées dans le livre coutumier de Bretagne en 1539. [BIENVENU 1989].

<sup>31</sup> Idem note précédente, art. 19.

<sup>32</sup> Elles doivent être placées à une hauteur de 15 pieds, à un écartement de 2 pieds (60,96 cm) de la façade, et devront avoir 18 pouces (48,6 cm) de haut sur 12 pouces (32,4 cm) de large et qu'elles soient le plus alignées que possible. Cité dans [BIENVENU 1989, p.8]

<sup>33</sup> On peut retrouver la liste des « différentes espèces de saillies » qui existaient à l'époque, dans l'ouvrage de Gérard Mellier, intitulé : traité de droit de voirie. Ecrit en 1709, cet ouvrage fait état des saillies de parois suivantes : « les Eviers, les Bornes, les Marches, les Seuils des ponts, Croisées, ouvertures des Caves, Echoppes et Abajours, Balcons, Cintres, Travaux de Maréchaux, les Pieux, les Etays et les Jardins ou Terreaux qui sont attachés aux fenêtres, les Contrevents, Etablis, Comptoirs, Etaux, Dossânes, Platfonds, Auvents, Jambes de force ». [BIENVENU 1989]

<sup>34</sup> Extrait des registres de Greffe de la police de Nantes, 6 février 1721. [AMN DD 301]

balcons sont autorisés dans les rues assez larges à une hauteur de 4,87m en 1743. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, ces derniers sont autorisés même dans les rues de 7,50m et 8,00m de largeur à une hauteur minimale de 4m à condition que la saillie soit comprise entre 70cm et 1m. Le 10 janvier 1829, un extrait des registres de la mairie, dans sa réglementation des saillies, décompose pour la première fois toute forme de saillie en fonction de la largeur des rues<sup>35</sup>. En 1858<sup>36</sup>, dans le règlement concernant les permissions de grande voirie, on définit une réglementation détaillée des saillies autorisées dans ce type de voie. En 1899 la hauteur minimale d'implantation des balcons sera de 4,20 m dans les rues dont la largeur est comprise entre 8 et 10m, avec une saillie maximale de 50 cm. Pour les rues plus larges, les balcons sont alors autorisés entre 2,80 m et 4,20m de hauteur à condition que la saillie ne dépasse pas 60cm.



Rue Belle  
image  
(iconographie  
de 1860).

Rue des  
Carmes  
(iconographie  
de 1837)



Figure 3.12 : Iconographies de rues avec saillies [COSNEAU 1973]

Les règlements successifs définissent ainsi un « volume » d'emprise des saillies qui préserve une ouverture optimale de la rue. Au XX<sup>ème</sup> siècle, le règlement du 25 août 1944 définit explicitement ce volume d'emprise, par une enveloppe à l'intérieur de laquelle il est admis d'établir des saillies de tout type, ce qui procure une certaine liberté architectonique à la façade. La zone de développement de saillies est décomposée en deux parties superposées. La saillie supérieure atteint 8% de la largeur de la voie, pour les voies de moins de 10m de large et 2% pour les voies de largeur supérieure, avec une limite à 1,20m de saillie définie pour des raisons constructives.

Pour évaluer la pertinence de la définition du volume d'emprise des saillies dans l'amélioration de l'ouverture d'une rue, nous avons calculé la fraction de ce volume autorisé dans quatre règlements successifs, par rapport à celui du prospect des rues (fig. 3.13).

Ce calcul appliqué aux différents règlements de rues en fonction des rapports hauteur/largeur fait apparaître une convergence de ces règlements à l'ouverture progressive des rues à 3% près lorsque les rues sont très étroites alors que la différence peut atteindre 10% du volume de la rue, lorsque les rues sont larges. L'évolution la plus notable est celle qui concerne la réglementation des balcons. Entre 1743 et 1899 pour un rapport hauteur/largeur égal à 2, on peut noter un volume de saillie réduit tout de même de 10% par rapport à celui de la rue. Néanmoins avant le règlement de 1743 il était courant de rencontrer des rues dont les saillies occupaient plus de la moitié du volume de la rue.

<sup>35</sup> Lorsque ces dernières ont une largeur dépassant 6,80m leurs saillies ne doivent pas dépasser 16 cm. Pour les rues de largeur inférieure les saillies ne devront pas dépasser 11 cm à partir du nu du mur.

<sup>36</sup> Règlement concernant les permissions de grande voirie établi le 30 octobre 1858 à Nantes

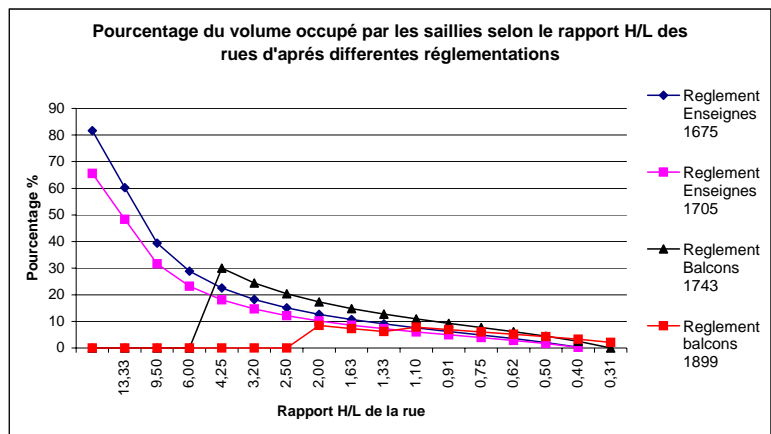


Figure 3.13 : Graphe représentatif de l'évolution du volume occupé par les saillies selon les ordonnances de 1675 et 1705 et les règlements de 1743 et 1899.

**- Evolution des seuils réglementaires des prospectes des rues**

En 1781, un arrêt du conseil d'état du roi, par une description du quartier du Commerce et de celui de la Fosse, révèle l'étroitesse des rues et l'obscurité (fig. 3.14) qui résultait de la surélévation des bâtiments en raison du prix très élevé des terrains (fig. 3.15) :

« [...] il n'est peut-être point cependant de ville en France, où l'on ait autant ménagé le terrain par le besoin qu'on avait de logement et de magasins. Les maisons y sont très élevées, les rues étroites, les places publiques petites ; et, ce qui causera encore plus d'étonnement, c'est que dans tout le quartier du commerce, qui est celui de la richesse, des maisons louées aussi chèrement qu'à Paris [...], on n'y entre (aux maisons) que par des allées que la petitesse des cours, suite de la même économie de terrain, rend très obscures. [...] Mais, comme avant 1766<sup>37</sup>, on ne suivait aucun plan, on n'a ménagé aucune issue charretière dans toute la longueur de ce quai (quai de la Fosse) pour la communication des terrains qui sont dans les derrières. Ce ne sont que des ruelles étroites, presque impraticables et même dangereuses, n'ayant que trois, quatre et cinq pieds de large »<sup>38</sup>.



Figure 3.14 : Rue de la vierge du quai de la Fosse, au XVIII<sup>ème</sup> siècle [COSNEAU 1973]

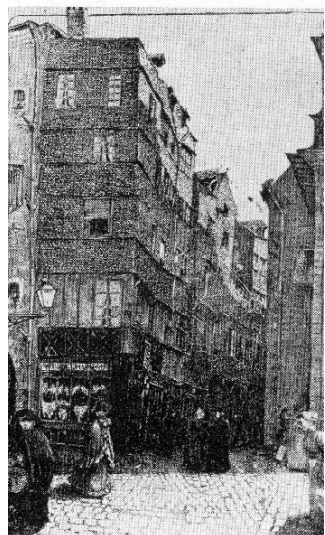


Figure 3.15 : Rue petite sainte croix iconographie du XIX<sup>ème</sup> siècle [COSNEAU 1973]

<sup>37</sup> Cette date correspond à la réalisation et l'adoption du plan Ceineray pour l'alignement des rues de Nantes.

<sup>38</sup> Arrêt du conseil d'état du roi du 24 avril 1781. [A.M.N, DD. 225]

Mais ce ne sera qu'à partir du règlement de 1870 que sera établi sur l'ensemble de la voirie urbaine à Nantes un système de gabarit, qui est « *une adaptation simplificatrice du règlement parisien de 1784* »<sup>39</sup>. On définit dans ce règlement trois types de rues : les rues d'une largeur inférieure à 8m avec une hauteur maximum de 12m ; les rues de largeur comprise entre 8m et 10m dont le gabarit maximum est de 15m ; et les rues de largeur supérieure ou égale à 10m avec une hauteur maximum de 18m<sup>40</sup>.

En 1899, le règlement de voirie définit des hauteurs plus précises pour les bâtiments, en prenant en compte les hauteurs des étages (dont la superposition donne difficilement des chiffres ronds) et définit une nouvelle catégorie de voies dont la largeur atteint 20m<sup>41</sup>. Le règlement de 1904 reconduit les mêmes dispositions, alors que le règlement sanitaire de 1914 conserve ce système de seuils avec une réduction importante des hauteurs des constructions : pour les rues de 8m de large la hauteur sera de 10m au lieu de 12,6m de hauteur, celles qui ont une largeur entre 8m et 10m auront 16m de hauteur au lieu des 15,50m et celles qui ont une largeur comprise entre 10 et 20m auront 18 à 19m de large.<sup>42</sup>

La comparaison des prospectus de rues autorisés par les règlements de voirie de 1870 et les règlements sanitaires de 1899, 1904 et 1914 fait apparaître une variation assez faible de la hauteur des constructions pour les rues d'une largeur dépassant 10m. Tandis que pour les rues étroites l'ouverture introduite par l'absence des saillies peut être considérable. Le règlement de 1914 va par exemple introduire une ouverture supplémentaire des rues de 8m de large qui atteint près de 17% (fig. 3.16).

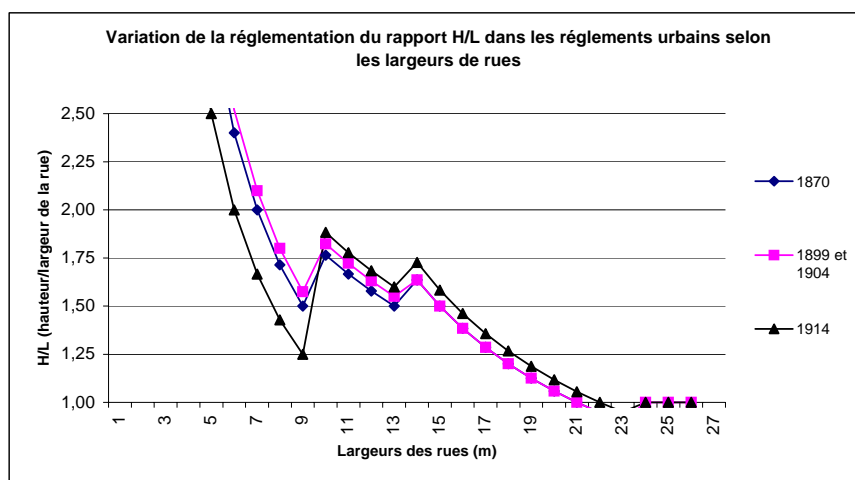


Figure 3.16 : Les variations du rapport Hauteur /Largeur admises dans le règlement de voirie de 1870 et les règlements sanitaires de 1899, 1904 et 1914.

Après 1914, les hauteurs admissibles des bâtiments dans le centre ancien ne verront pas de changement notable. En 1920, c'est un changement dans la définition des hauteurs de bâtiments qui va s'opérer. Désormais, les hauteurs ne seront plus mesurées à l'égout des toits mais à la ligne de faîte. Ce qui laisse penser que l'on est conscient de l'impact des toitures sur l'ouverture à l'air et à la lumière des rues.

<sup>39</sup> [BIENVENU 1989, p.23]

<sup>40</sup> La pente de toiture est, dans ces trois configurations, réglementée à 45° sans limitation de hauteur.

<sup>41</sup> Quant au toit, sa réglementation intègre la possibilité d'un retrait par rapport à l'alignement. Son gabarit doit s'inscrire dans un arc de cercle dont le rayon est compris entre 5 et 8,50m sans pouvoir dépasser la moitié de la largeur de la rue.

<sup>42</sup> Si à Nantes ce système de seuils indicatifs est conservé, à Paris on passe avec le règlement Bonnier à un système proportionnel qui fait dépendre la hauteur des bâtiments de la largeur des rues. [BIENVENU 1989]



### 1.2.2. Délimitation du prospect des cours intérieures des îlots

La densification progressive du centre de Nantes à partir de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle a produit un rétrécissement important des cours intérieures des îlots. Pour lutter contre l'existence de cours trop exigües, qui ne permettent ni un bon éclaircissement ni une bonne aération des espaces habités, on verra apparaître, avec les règlements sanitaires de la ville, une réglementation spécifique sur la taille des cours et des courettes. Pour évaluer la surface occupée par ces cours, par rapport à la surface moyenne des îlots, nous avons reconstitué un quartier représentatif du centre ancien de Nantes : le quartier du Bouffay (fig. 3.17).

Nous avons pour cela calculé la fraction de surface des cours intérieures et celle des vides de ce quartier ainsi que la fraction des surfaces construites par rapport à la surface totale du quartier. Nous nous sommes appuyés pour cela sur le plan cadastral de 1835, le premier plan qui représente ces cours intérieures. En calculant les surfaces des vides urbains du quartier du Bouffay sur ce plan, on a pu constater qu'une fraction de 10% de la surface de ce quartier est occupée par les rues, 13% par les cours intérieures et les chemins internes aux îlots (ces derniers représentent 7% de la surface du Bouffay), alors que le bâti occupe une densité de 77%. Cette importante densification ne pouvait que s'aggraver en l'absence de règlements.

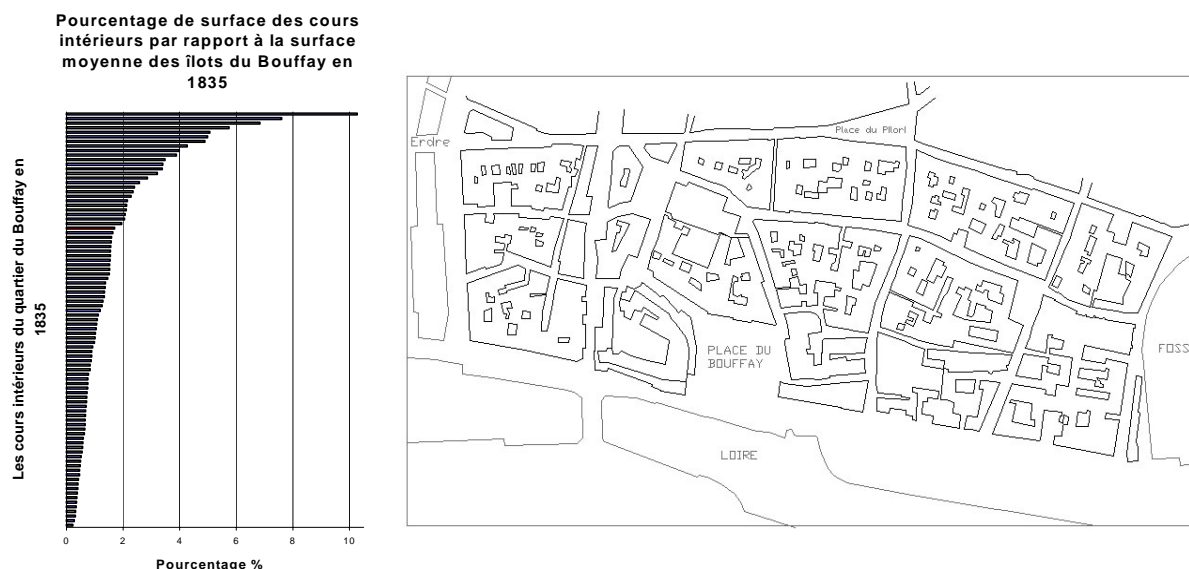


Figure 3.17 : Analyse de la densification de la partie Sud du quartier du Bouffay et extrait du cadastre de 1835 (reconstitution numérique avec AUTOCAD)

Il faut attendre le règlement de voirie de 1899 puis la série de règlements sanitaires qui commence en 1902, pour voir apparaître dans la réglementation un autre objectif que la seule « commodité » des espaces urbains. En effet, à partir de ces règlements c'est aussi « la qualité sanitaire des logements » qui est recherchée. En plus du réseau de voirie, les cours intérieures sont considérées comme source importante d'air et de lumière pour les habitations et font à leur tour objet de réglementation. Ainsi, dans le chapitre relatif à la salubrité du règlement de 1899, il est envisagé un dimensionnement normalisée des cours et des courettes :

*« La cour intérieure devra être suffisamment spacieuse, son plus petit côté aura au moins 04 mètres » (art.. 79).*

Les courettes n'étaient autorisées que dans le cas où elles éclairaient ou aéraient les cuisines, les cabinets d'aisances et les cabinets de toilettes ou toute autre pièce secondaire<sup>43</sup> dans les habitations. Les cours se distinguent donc des courettes par leur rôle principal d'aération et d'éclairage des espaces habités alors que les courettes ne constituent qu'un puits d'air et de lumière pour les parties de service des logements. Après plusieurs réglementations sur la taille des cours et courettes basées sur la définition d'une surface et d'un côté minimums, on va finir en 1920 par adopter une réglementation par la définition de prospects des cours et des courettes. Conscient de l'influence de la hauteur des bâtiments sur la capacité des cours à éclairer ou aérer les habitations, le règlement sanitaire de février 1902 ainsi que les dispositions de l'arrêté du 15 décembre 1904<sup>44</sup> sont jugés en 1920 comme n'étant pas assez étendus ni assez précis. Ils sont donc abrogés et remplacés par des dispositions plus détaillées prenant en compte la hauteur des bâtiments donnant sur les cours.

Les cours auront une largeur minimale calculée perpendiculairement aux fenêtres selon la hauteur des façades donnant sur les cours. Cette largeur mesurera respectivement au moins 4m, 5m, et 6m selon que la hauteur de l'immeuble est respectivement inférieure à 15, 18, et 20 mètres. Les courettes auront au minimum 4m<sup>2</sup> dans les maisons à étage (de hauteur inférieure ou égale à 10m), et 8m<sup>2</sup> dans les maisons à plusieurs étages. La hauteur admissible des bâtiments est à son tour légèrement modifiée : 10m pour les voies de 8 mètres de large, 16m pour les voies de 10 à 20m de large et 20m de hauteur pour les voies de plus de 20m de large. On définit explicitement, toujours en 1920, un rapport direct entre la fonction d'aération des ouvertures et le vide sur lequel ces dernières doivent s'ouvrir. Une largeur minimale des cours est définie. Elle est de 4m pour les immeubles de 15m de haut, de 5m pour les immeubles ayant entre 15m et 18m de haut et de 6m pour les immeubles plus hauts (avec une hauteur maximale de 20m).

En 1943, les courettes seront explicitement interdites pour faire place à une seule cour intérieure pour l'ensemble des parcelles d'un même îlot dont les dimensions dépendront du niveau de densité du tissu urbain. Les surfaces minimales définies sont : 40m<sup>2</sup> en zone dense et 60m<sup>2</sup> en zone moyenne ; les bâtiments en zone d'extension doivent être isolés ou en bande.

Dans le graphe ci-dessous (fig. 3.18), nous traduisons l'évolution considérable dans la réglementation du rapport hauteur/largeur (rapport H/L) des cours intérieures des îlots entre le règlement de 1899 et celui de 1943 pour des zones de densités moyenne. Cela permet d'observer que la réglementation introduit une ouverture des cours intérieures qui atteint des niveaux beaucoup plus importants que ceux précédemment calculés pour les rues.

Les règlements urbains qui ont régulé le bâti tout au long de l'histoire de la ville de Nantes ont longtemps été des interdictions plus que des prescriptions. Le long processus de régulation de la forme urbaine a instauré petit à petit un « véritable projet de mise en forme » qui favorise l'ouverture des vides urbains principalement constitués par les rues et les cours intérieures des îlots. Jusqu'à la période d'après guerre et à partir de l'arrêté spécial pour la réglementation de la voirie du 25 août 1944, il a toujours été question de définir des seuils concernant le prospect des rues et des cours, avec, comme seul critère de distinction, leur situation au centre ou en périphérie.

La forme urbaine classique formée de rues restera donc d'actualité même pendant la reconstruction et cela jusqu'au début de l'apparition des grands ensembles, où la forme urbaine change radicalement de « modèle ». Le plan de la ville moderne devient le « négatif » de celui de la ville classique. Alors que le construit prévalait sur le vide dans la ville ancienne, le rapport entre le plein et le vide se trouve inversé dans l'urbanisme des grands ensembles.

---

<sup>43</sup> Elles pouvaient être recouvertes de châssis vitrés à condition de laisser 0,50m d'espace libre. (Article 79).

<sup>44</sup> L'article 32 du règlement sanitaire de 1902 fixera la surface minimale des cours à 30m<sup>2</sup> avec des côtés de plus de 4m et celle des courettes à 15m<sup>2</sup> avec le plus petit côté fixé au moins à 2m. Avec le règlement sanitaire de 1904, on considère que les pièces d'habitations ne peuvent ouvrir sur des courettes que si ces dernières répondent aux mêmes normes que celles fixées en 1902 pour les cours.



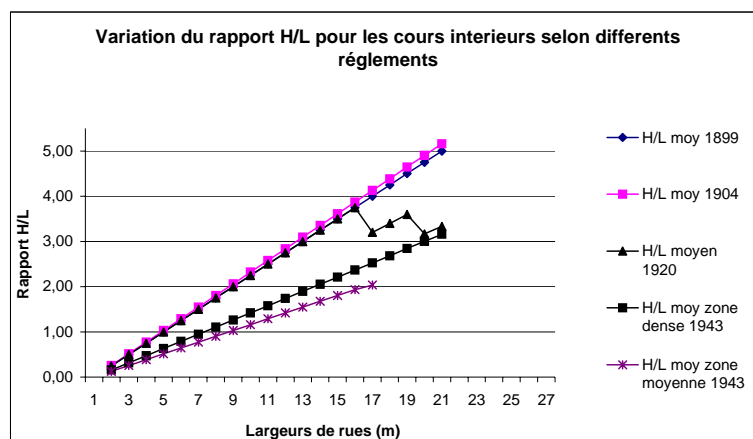


Figure 3.18 : Graphe représentatif de l'évolution dans la réglementation du rapport Hauteur /Largeur des cours intérieurs

### 1.3. La modification des densités bâties

Après avoir présenté les textes relatifs à la transformation des espaces urbains de la ville, nous allons à présent évoquer les transformations qui se sont appliquées à l'échelle du centre ancien. Ces interventions concernent principalement : les percées, qui traversent plusieurs îlots construits ; et la limitation des densités bâties avec l'instauration d'un système de zones auquel le centre était soumis.

#### 1.3.1. Percement des fragments urbains et des îlots

Le plan général d'alignement de la ville de Nantes est mis en chantier en 1808. Il est achevé en 1818 et revu puis adopté par le conseil général des bâtiments civils en 1835. Ce plan ne sera définitivement homologué par ordonnance royale que le 05 septembre 1839<sup>45</sup>. Il préconisera principalement l'élargissement des rues en effectuant des retranchements sur les édifices existants. Mais la ville de Nantes ne se contentera pas des alignements préconisés par ce plan. Des percées de rues nouvelles non prévues par le plan (elles sont décidées par le pouvoir central) ainsi que de nouveaux élargissements seront réalisés tout au long du XIX<sup>ème</sup> siècle (fig. 3.19).

Les nouvelles rues qui seront réalisées ont des largeurs pouvant atteindre jusqu'à 15m de large, comme c'est le cas de la grande percée de l'actuelle rue de Strasbourg. Dans le quartier du Bouffay, le plus faible élargissement ne dépassera pas les 5m de large, à cause sans doute de la densité de cette partie de la ville. Une largeur moyenne des rues de 10m est tout de même recherchée pour la plupart des rues du centre. [DARIN 1987]

Avant même la réalisation de la grande percée, les divers retranchements dus aux élargissements et les destructions dues aux percées locales vont réduire la densité bâtie du centre et donc augmenter la fraction de surface non bâtie. Il apparaît, en calculant la taille du vide créé par les retranchements des parois et celui créé par les percées par rapport à l'ensemble du centre ancien, que l'alignement libère presque le double de la surface libérée par les percées (fig.3.20 et 3.21). Les percées prévues occupent 3,5% de la surface totale du centre intra-muros alors que les alignements représentent 6,5% de cette surface. Par rapport aux îlots percés, le rapport s'inverse. Le taux de « dédensification » produit par un alignement pouvait atteindre jusqu'à 17% de la surface moyenne d'un îlot, et les percées pouvaient créer un vide occupant près de 25% de la surface d'un îlot moyen.

<sup>45</sup> Nantes n'est pas la seule ville à avoir du retard dans la réalisation de son plan général d'alignement. La plupart des villes françaises n'auront un plan équivalent qu'entre 1840 et 1845 [DARIN 1984, p6].



Figure 3.19 : Les alignements (en noir) et les percées (en pointillés) des rues dans le centre de Nantes, proposés dans le plan général d'alignement des rues établi par Peccot, et en gris les percées non réalisées (à partir de [DARIN 1987])

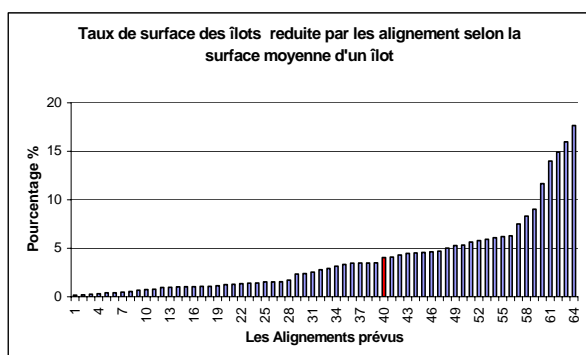


Figure 3.20 : Pourcentage de surface des retranchements par rapport à une surface moyenne d'îlot (le retranchement moyen = 4%)

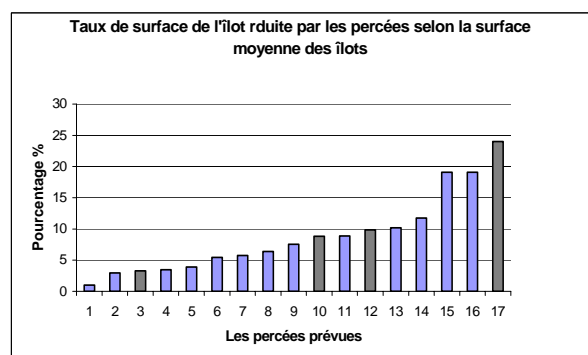


Figure 3.21 : Pourcentage de surface occupée par chaque percée prévue dans le plan d'alignement par rapport à une surface moyenne d'îlot (en gris les percées non réalisées)

Ces alignements ont donc produit une dé-densification du centre de la ville, qui va s'ajouter plus tard à l'effet de la grande percée et à celui liée à la réduction des hauteurs de bâtiments dans tout le centre ancien. Ces deux faits importants vont contribuer à augmenter ce que l'on pourrait appeler « la perméabilité » du tissu urbain aux différents paramètres climatiques, permettant à l'air de mieux circuler et à la lumière de pénétrer davantage dans les rues.

Une vingtaine d'années après le plan général d'alignement, la décision de créer une "grande percée" dans le centre de Nantes est prise. Sources de grands débats entre les autorités municipales et le pouvoir central, la création de cette percée ne satisfaisait pas les autorités de la ville qui, plus favorables à une percée Est-Ouest, compte tenu de la croissance de la ville vers l'Ouest, se sont fortement opposés à une percée Nord-Sud.<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Le 10 avril 1862 un membre du conseil municipal s'exprime dans ces termes: "Si on avait été libre, on n'aurait jamais dressé un semblable plan qui ne satisfait que la grande voirie" Délibération du conseil municipal du 10 avril 1862 [DARIN 1981].

La percée se réalise selon une direction en diagonale par rapport aux directions des rues existantes sur une longueur de 560m (fig.3.22). Elle coupe 9 îlots en totalité et produit dans cette traversée, 16 îlots “nouveaux” [DARIN 1981]. La surface moyenne des îlots percés passe de 6300m<sup>2</sup> pour l’ancienne structure à 3600m<sup>2</sup> pour la nouvelle (fig.3.24). En utilisant la reconstitution que DARIN avait effectué pour calculer les surfaces des îlots après et avant la percée (fig. 3.25), il apparaît, après calculs, que la nouvelle rue réduit la densité de la zone constituée par les îlots percés de plus de 20%. Ce qui illustre bien le degré de “dé-densification” qu’a apporté cette percée au niveau local. A l’échelle du centre, la grande percée ouvre un vide équivalent à 2.42% de l’ensemble de la surface. La comparaison de l’importance des élargissements et celle des percés sur le réseau de voirie montre que les transformations dues aux alignements de rues sont majoritairement responsables des effets de dé-densification du tissu urbain.

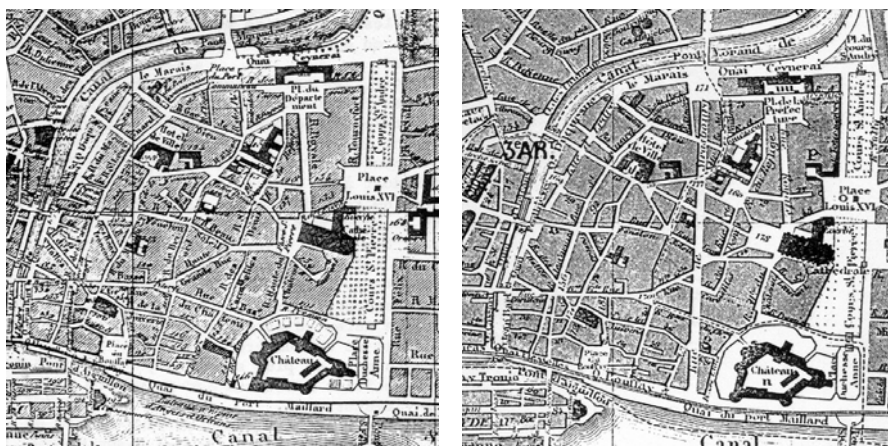


Figure 3.23 : Le centre ancien avant et après la percée de la rue de Strasbourg

Figure 3.22 : Les parcelles démolies par la percée [DARIN 1881, p. 208]

Ilot	Surface avant percée (m <sup>2</sup> )	Surface après percée (m <sup>2</sup> )	Ecart m <sup>2</sup>	Ecart en %
A1	5400	5300	100,00	1,85
A2 + A3	550+900	1200	250,00	17,24
A4	450	400	50,00	11,11
A5	650	550	100,00	15,38
A6	2600	950+900	750,00	28,85
A7	1800	1300+150	350,00	19,44
A8	1300	1100	200,00	15,38
A9	2500	450+700+350	1000,00	40,00
A10	100	0	100,00	100,00
A11	2700	2200	500,00	18,52
A12	1000	750	250,00	25,00
A13	5500	3000	2500,00	45,45
A14	950	1000	-50,00	-5,26
A15	5300	4800	500,00	9,43
<b>Total</b>	<b>31700,00</b>	<b>25100,00</b>	<b>6600,00</b>	<b>20,82%</b>

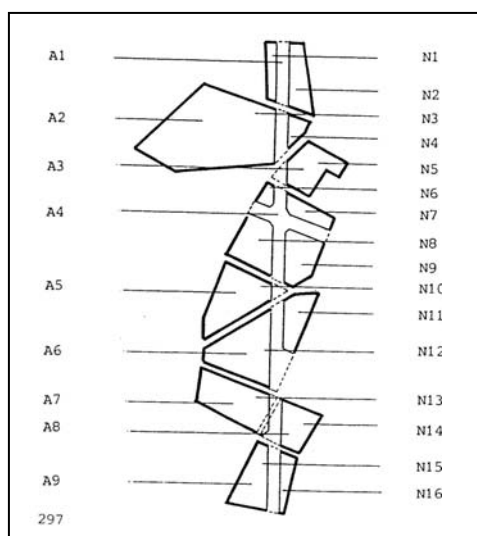


Figure 3.24 : Les surfaces des îlots avant et après la percée [DARIN 1981, p.235] et représentation des îlots traversés par la percée [DARIN 1881, p. 318]

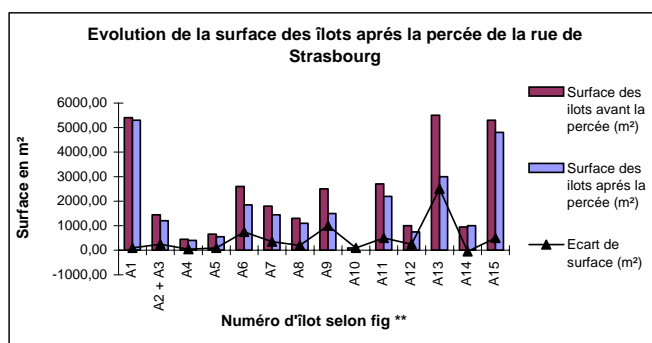


Figure 3.25 : Evaluation des écarts de surfaces des îlots après la percée de la rue de Strasbourg selon les données de [DARIN 1981]

Le plan de reconstruction et d'aménagement de la ville de Nantes de 1948 (fig. 3.28) comporte l'ensemble des percées qui forment l'état du tissu urbain du centre ancien de la ville dans l'état qu'on lui connaît aujourd'hui. Les percées de la ville s'achèveront donc après la reconstruction qui fera suite aux bombardements de la deuxième guerre mondiale [BLOYET 1999].

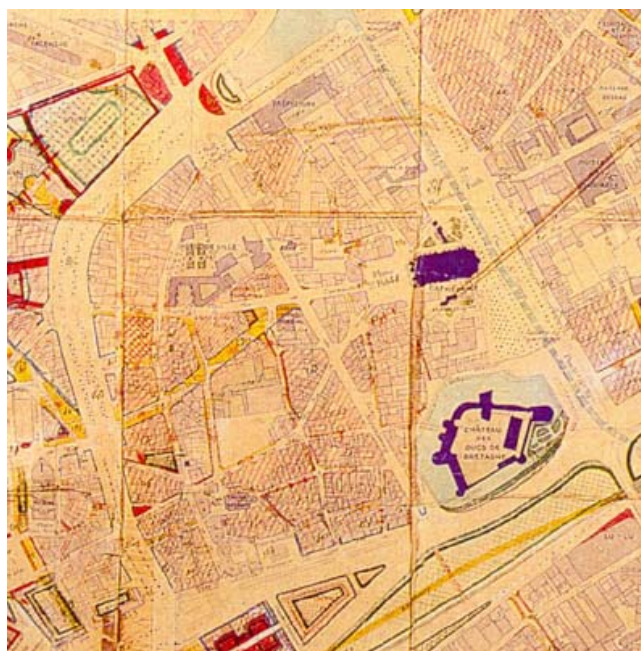


Figure 3.26 : Extrait du plan de reconstruction de 1948 du centre de Nantes [ARDEPA 1991]

### 1.3.2. Réglementation des densités bâties, définition des vides de servitude et constructibilité des parcelles

En 1935, un dossier réglementaire est établi sous la signature de l'architecte-urbaniste Georges Sébille<sup>47</sup> et un programme de servitudes est élaboré. Pour la première fois à Nantes, la réglementation des bâtiments met en relation la question des hauteurs avec celle des densités bâties. L'introduction des densités comme critère de réglementation de la forme urbaine inaugure les premiers dépassements de la forme urbaine classique qui était basée sur la réglementation des rues et de cours.

<sup>47</sup> Architecte et urbaniste conseil de la ville dans l'élaboration du plan. Voir , à propos de ce programme [BIENVENU 1989, p.25]

En plan le nouveau règlement définit « la proportion de terrain à bâtir » fig. 3.27). Pour cela un coefficient d'utilisation des sols est fixé. Il est établi suivant cinq zones réparties sur ce qui est appelé « le territoire de la ville de Nantes » et distinguées par leurs « fonctions » urbaines :

- Une zone dense destinée à l'habitation et au commerce, où la proportion de terrain bâti est limitée à 66%.
- Une zone moyenne destinée prioritairement à l'habitation et dont la densité bâtie est limitée à 50% des terrains constructibles.
- Une zone d'extension, destinée aussi à l'habitation, mais dont la densité ne doit pas dépasser 40%.
- Une zone rurale où le terrain bâti n'excède pas 5%.
- Enfin, des zones industrielles, qui peuvent contenir jusqu'à 80% de surface bâtie.

La hauteur des édifices, à partir de ce règlement, est donc corrélée aux densités bâties permises dans chaque secteur considéré. La hauteur constructible est ainsi limitée selon chaque zone à :

- 17m en zone dense ; ce qui est en dessous des hauteurs de bâtiments existants à cette époque dans le centre ancien ; cette limite sera de ce fait revue à la hausse dans le prochain règlement.
- 15m en zone moyenne ; cette zone comprend les boulevards périphériques établis à la fin du 19e siècle.
- 9m en zone d'extension qui contient principalement les espaces au-delà des boulevards périphériques.
- 7m en zone rurale.

En plus de la réglementation des densités bâties, on assiste aussi dans le règlement de 1935 à la définition de zones de servitudes qui, en imposant un recul sur alignement des façades, contribuent de manière sensible à la réduction des densités bâties. Ces zones de servitudes sont de 15m de l'axe des boulevards de ceinture (zone moyenne), de 25 mètres de l'axe des routes nationales, de 15m de l'axe des chemins de grande communication et de 06 mètres de l'axe des autres voies (zones d'extension et zone rurale).

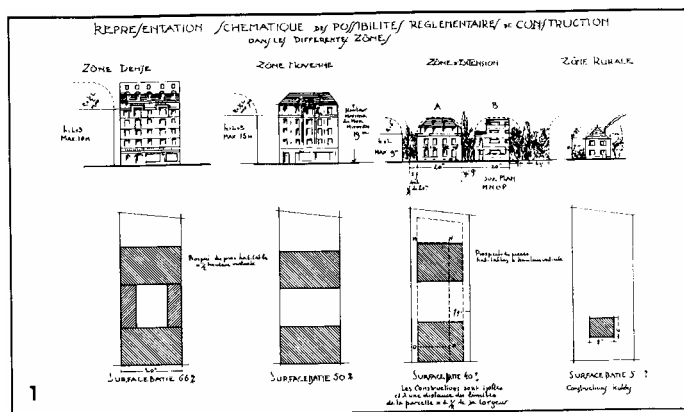


Figure 3.27 : Représentation schématique des possibilités réglementaires de construction des parcelles selon les zones urbaines dans le règlement de 1835 [ARDEPA 1991]

Ce programme de servitudes a pour effet que la fraction de surface urbaine occupée par le vide urbain est réglementée au même titre que celle des surfaces construites. Le rapport de surfaces entre le bâti et le non bâti se trouve ainsi normalisé selon des niveaux progressifs allant du centre ancien dense à la périphérie rurale de la ville. Ce système de zones est définitivement établi dans le

règlement sanitaire adopté en 1943<sup>48</sup>. Puis en cette même année, c'est la constructibilité des parcelles qui devient problématique. Les parcelles pour être constructibles doivent avoir une surface assez importante et une longueur de paroi conséquente, selon leur situation dans les cinq types de zones. Elles doivent avoir une surface de plus de 150m<sup>2</sup> et plus de 10m de façade en zone dense ; plus de 180m<sup>2</sup> de surface et plus de 10m de façade en zone moyenne ; plus de 300m<sup>2</sup> de surface et plus de 24m de façade en zone d'extension. Dans certaines voies, des zones non-aedificandi ont été définies, ainsi que des « marges d'isolement et d'aération ».

Ce règlement de 1943 reprend pour l'essentiel les gabarits définis en 1935 en rehaussant les hauteurs admissibles des zones<sup>49</sup> (tableau. ). Le règlement de 1943 est accompagné dans sa présentation par de nombreux schémas illustrant les cas particuliers, comme l'intersection de voies de largeurs inégales, les carrefours, et les places. Il semble ainsi accorder plus d'attention aux variations de la forme urbaine. Si les hauteurs admissibles sont rehaussées par rapport au précédent règlement, c'est principalement parce que la plupart des bâtiments sont déjà à cette hauteur dans le centre ancien. Dans cette même logique et pour des considérations de continuité du bâti, on autorise de construire devant un immeuble existant d'une hauteur de plus de 19m (hauteur limite en zone dense). La densité construite des parcelles est peu modifiée par rapport à 1935. Elle passe de 66% à 60% en zone dense, elle est de 10% en zone rurale, voire 13% pour les constructions à rez-de-chaussée, et les sites industriels peuvent atteindre une densité de 100% (par dérogation).

Objet du règlement	catégories	Zone 01 : dense	Zone 02 : moyenne	Zone 03 : d'extension	Zone 04 : rurale	Zone 05 : industrielle
<b>1. Gabarit des constructions : cas généraux.</b>	Gabarit gros œuvre.	L <sup>50</sup> + 3m, 19m maxi	L + 3m, 15,80m maxi	9,40m maxi	9,40m maxi	30m ou + si autorisation.
	Profil de combles	- Sur rue : L < 8m ⇒ R <sup>51</sup> = 4m. / si L ≥ 8m ⇒ R = L/2 avec des maxi de 8, 6, 5, 4 et 5m selon les zones 1,2,3,4 et 5. - Sur cour : pente de 45° (voir figure du règlement) <sup>52</sup> .				
	Surfaces bâties	60% 70% (cas de terrain angle, 400m <sup>2</sup> maxi)	50%	40% : 800m <sup>2</sup> maxi par groupe de construction.	5% 8% : cas d'1 RDC.	80%, voire + si autorisation.
	Bâtiments commerciaux	- Les RDC peut occuper toute la surface du lot (filot), s'il est commercial - Si tout le bâtiment est d'un usage public ou commercial il peut occuper à tous les niveaux l'ensemble de la surface du lot.				
<b>2. cas d'une occupation en fond de parcelle :</b>	Distance avec bâtiment de rue :	4/3 H <sup>53</sup>	2 H	3 H	04 / 05 Catégories non concernées par les objets de réglementation s : 2, 3 et 4.	
	Distance au fond de parcelle :	2/3 h	1 h	3/2 h <sup>54</sup>		
<b>3. le gabarit sur cour :</b>	Hauteur de façades :	- La hauteur des façades sur cour est la même que celle sur rue.				
	rapport espace libre et gabarit.	Verticale = 1 fois ½ la profondeur de la cour.		Verticale = 1 fois la profondeur de la cour.	Verticale = au 2/3 de la profondeur de la cour.	
<b>4. les espaces libres et cours :</b>	Surface mini de l'espace libre et sa profondeur minimum.	- 40m <sup>2</sup> mini. (20m <sup>2</sup> si elle éclaire des pièces secondaires). - Profondeur ≥ 2/3 de la hauteur bâtie, 4m mini du plus petit côté..		- 60m <sup>2</sup> mini - Profondeur ≥ à la hauteur du bâtiment sur rue, 6m mini pour le plus petit côté.	- Eloignée des limites latérales de propriété d'au moins 1/8 de la largeur de la parcelle. (4m maxi et 2m mini).	

Tableau 3.1 : tableau récapitulatif du règlement sanitaire de 1943

<sup>48</sup> Le règlement sanitaire, arrêté par délégation spéciale du 9 septembre 1943, abroge les dispositions de l'arrêté du 25 février 1914.

<sup>49</sup> Elles seront de 19m en zone dense ; 15,80m en zone moyenne ; 9,40m en zones d'extension et rurale. On admet pour cette dernière un étage supplémentaire.

<sup>50</sup> L ; représente la largeur de la voie, en comprenant les zones non aedificandi.

<sup>51</sup> R ; représente le rayon maximum que forme l'arc de cercle tangent entre le mur vertical et la pente de toiture.

<sup>52</sup> Voir, p.20 du règlement sanitaire [Bienvenu 1989].

<sup>53</sup> H ; est la hauteur verticale du bâtiment donnant sur la rue.

<sup>54</sup> H ; représente la hauteur de la construction en fond de parcelle.



Les dispositions du règlement sanitaire de 1943 sont reprises dans un nouveau règlement de voirie du 25 août 1944. La nouveauté réside dans la présentation de tableaux réglementant le gabarit des façades et des saillies selon la zone de situation du bâtiment et selon les largeurs de rues. Le règlement adopte un système de dimensionnement proportionnel faisant dépendre la hauteur de la rue de sa largeur et définissant un dimensionnement précis du volume de la rue pouvant être occupé par les saillies. La réglementation du gabarit des bâtiments et de leurs saillies est ainsi explicitement rapportée à la réglementation du prospect des rues (fig.3.28).

Une analyse des possibilités données par ce dernier règlement dans le dimensionnement du prospect des rues et des saillies (l'exemple de la fig.3.28 représente les zones denses<sup>55</sup>) nous permet d'évaluer, après calcul, les variations du prospect des rues dans chaque zone. Le règlement n'autorise des rues étroites que dans le cadre d'une conservation de rues existantes, pour le reste, les prospects de rues ne dépassent pas un rapport Hauteur /Largeur de 1,5. Quant aux saillies, elles occupent un volume assez important (9% du prospect) lorsque les rues sont étroites (fig. 3.29).

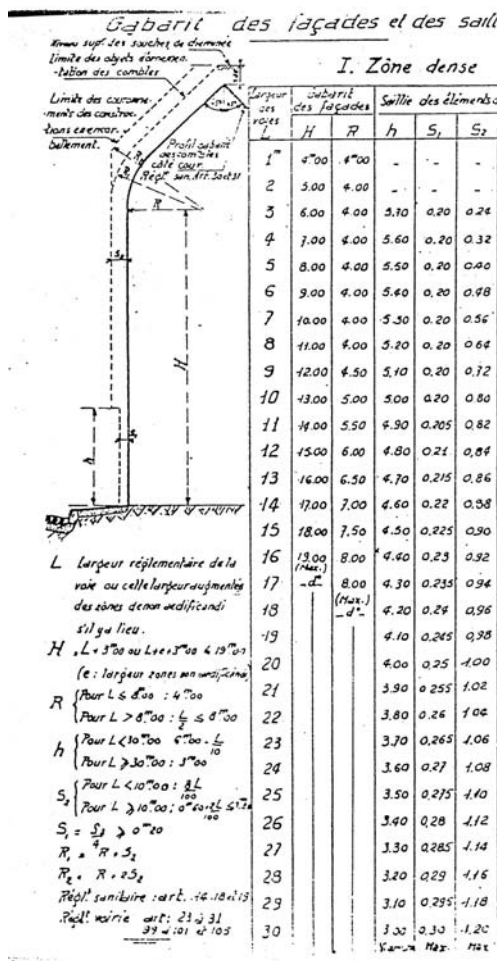


Figure 3.28 : Extrait du règlement de 1944 : réglementation des gabarits de façades et de saillies en zone dense [Bienvenu 1989, p. 199]

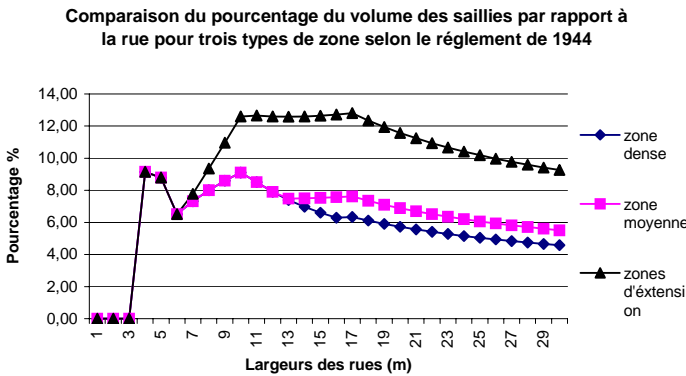


Figure 3.29 : Comparaison du pourcentage de volume des rues occupé par les saillies selon le règlement de 1944

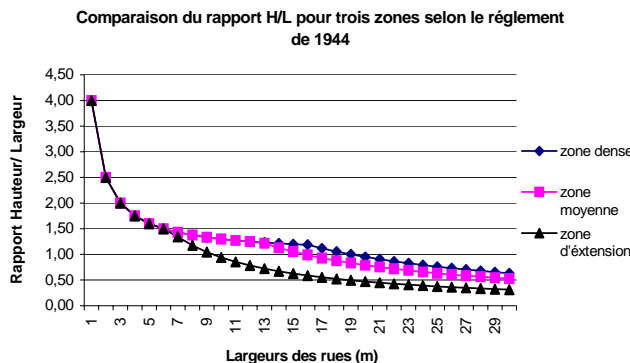


Figure 3.30 : Le rapport Hauteur /Largeur admis dans le règlement de 1944 selon les zones : dense, moyenne, et d'extension

<sup>55</sup> Cela est valable aussi pour les zones de densité moyenne et pour les zones rurales, à la seule différence que la hauteur des édifices est limitée à 15.80m dans la première et à 9.40m dans la deuxième.

Il existait, dans le règlement de 1944, une faible différence entre les prospects autorisés en zone dense et ceux admis en zone moyenne (fig.3.30). Les valeurs de ces prospects sont d'ailleurs les mêmes pour les rues de moins de 8m de large. En revanche, en zone d'extension, les prospects diffèrent considérablement des autres. On observe aussi dans ce règlement une certaine indifférence aux prospects très importants des rues étroites. En effet les prospects des rues d'une largeur inférieure à 7m sont considérables car on considère que ce sont des rues héritées du passé et qui de ce fait peuvent être conservées en l'état. Quant à la réglementation des saillies, elle sera inverse à celle des prospects. Moins la zone est dense, plus les saillies autorisées sont importantes mais selon des variations assez faibles. Pour les rues de 16m de large par exemple, les prospects atteignent 6% de la section de rue en zone dense et 8% en zone moyenne et un peu plus de 12% en zone d'extension (fig. 3.29).

Entre les règlements de 1835 et 1944 les hauteurs admissibles sont considérablement rehaussées et les densités bâties augmentées en zone dense et en zone rurale (fig.3.31). Cette augmentation des normes admissibles est principalement due à la confrontation du texte de 1935 à la réalité de l'époque. Il s'est en effet avéré que la réglementation des hauteurs et des densités était trop en deçà de la réalité bâtie (surtout en ce qui concerne le centre). L'application du règlement aurait supposé de trop grandes transformations. Le règlement va ainsi être adapté, dans une certaine mesure, à la réalité construite avec le règlement de 1943 qui sera repris en 1944.

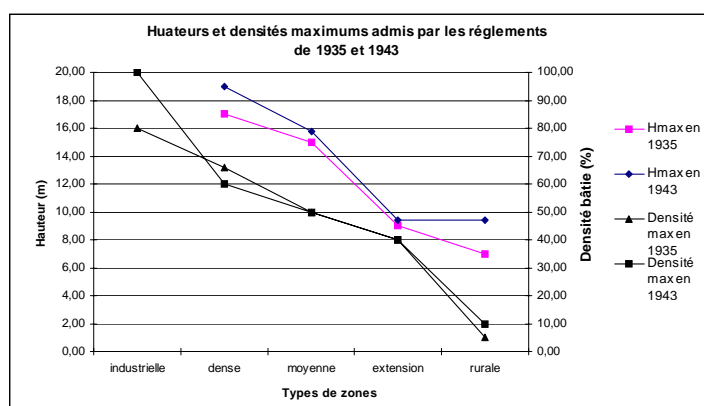


Figure 3.31 : Les densités et les hauteurs maximales admises dans les règlements de 1935 et 1943

Dernier règlement perpétuant le modèle de la ville classique, avant les débuts des réalisations du mouvement moderne<sup>56</sup>, le programme du projet de reconstruction et d'aménagement de la ville de Nantes qui date du 27 août 1948. On y définit un nouveau « zonage » qui regroupe trois zones : une zone dite d'habitation collective, divisée en deux secteurs (la zone dense et la zone moyenne), une zone d'extension et une zone industrielle. La zone précédemment appelée zone rurale, fait partie du territoire communal externe au périmètre de l'agglomération. La hauteur maximale admissible de la zone moyenne a été augmentée à 19m (alors qu'elle était de 15,80m). Après une adaptation à la réalité du bâti en 1943, c'est une adaptation aux besoins futurs de la ville que le règlement de 1948 va prendre en compte.

### 1.3.3. L'ouverture de la surface bâtie dans les projets d'extension non réalisés

En dehors des transformations réalisées que sont les alignements, les percées et les dédensifications, on retrouve dans l'histoire de Nantes des projets non réalisés qui expriment avec plus de vigueur les intentions salubristes. Ces derniers vont proposer des tracés urbains qui visent

<sup>56</sup> C'est la réalisation de l'unité d'habitation de LE CORBUSIER à Rezé, situé au sud de Nantes, qui va annoncer le début de la « ville moderne » énoncé par le CIAM. Elle sera achevée en 1955.



l'ouverture des vides urbains et vont de ce fait améliorer l'accessibilité de l'air, du soleil, et de la lumière dans la ville.

Les idées hygiénistes peuvent se lire en effet plus facilement dans les extensions des villes et les propositions utopistes que font des architectes comme Ledoux. La qualité des formes urbaines se mesure comme l'avaient prescrit les auteurs des villes idéales et comme le préconise explicitement C.N.Ledoux : à la dépense d'espace, d'air et de lumière.

Nantes connaît aussi ses projets hygiénistes non réalisés. Le projet de l'architecte Rousseau à Nantes reflète assez bien l'influence des idées hygiénistes fortement influencées par les textes des médecins de l'époque. Ils vont en effet jusqu'à dicter un tracé des plans explicitement lié à des éléments anatomiques. L'architecte propose en 1760 un plan d'embellissement de la ville, avec une voie périphérique autour de la vieille ville sous la forme d'un cœur (fig.3.32). P.Lelièvre qui reproduit ce plan dans son ouvrage s'interroge à ce sujet : « Est-il absurde de penser que l'idée même de « circulation » a pu inspirer cette figure anatomique sillonnée d'artères ? ».



Figure 3.32 : Plan Rousseau établi en 1760 [AMN]

Moins contraignant que les centres villes, où les transformations restent tout de même mineures, les projets sur des terrains vierges, comme on l'a vu dans le premier chapitre, offrent l'avantage de ne présenter aucune ou peu de résistance aux idées de l'époque sur la ville « modèle ». C'est le cas pour les projets d'embellissements de la ville de Nantes. Ainsi, l'extension au sud de la ville sur l'île Gloriette a fait l'objet de plusieurs propositions où l'on voit se dessiner les idées aëristes de l'époque sur la forme urbaine. J.P.Peneau en étudiant ces nouvelles extensions n'y dénote aucune influence directe des préoccupations hygiénistes liées au climat (orientation quelconque des rues). Cependant une constante peut y être dégagée, c'est l'adoption du modèle de ville en damier avec des îlots de forme proche du carré et des rues élargies [PENEAU 1998].

Cette île a d'ailleurs sa place, selon P.Lelièvre : « dans l'histoire de l'urbanisme de Nantes au XVIII<sup>ème</sup> siècle, moins par les travaux qui y furent effectivement réalisés que pour les projets qu'elle a suscités ». <sup>57</sup> Jusqu'au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle cette île était non cultivée, inhabitée et inutilisée. Traversée par la route de Vendée, elle se composait de deux parties, à l'Est la prairie de la Madeleine, et à l'Ouest une partie moins sujette aux inondations où se situait l'Hôpital de la ville.

C'est l'architecte Vigné De Vigny qui le premier s'intéressa à l'aménagement de l'île. Il dessine de grands jardins et des allées plantées pour la promenade dans la partie Est, et conçoit un réseau de

<sup>57</sup> [LELIEVRE 1988, p. 106].

rues en damier dans la partie Ouest de l'île, pour constituer un vaste quartier pour le commerce et les activités maritimes fait d'entrepôts et de magasins. Mais ce projet reste sur le papier<sup>58</sup>. Pour argumenter son plan (fig. 3.33), De Vigny décrit l'espace urbain Nantais de l'époque :

« ... Les passages par les portes d'entrée, et les rues y sont étroites, incommodes, tortueuses, peu s'enfilent, les ponts y sont aussi trop étroits. [...] ; les places des marchés journaliers sont petites ; au lieu de fontaines publiques, on n'y voit que des puits ; nulles promenades proportionnées à une ville si célèbre. Le peuple qui y est nombreux et mal logé et chèrement. Les places qui sont l'ornement des villes, y sont petites et irrégulières [...] . J'ay fait deux plans, l'un de l'état de la ville comme elle est actuellement, l'autre avec les augmentations, embellissements et changements en projets...<sup>59</sup> ».

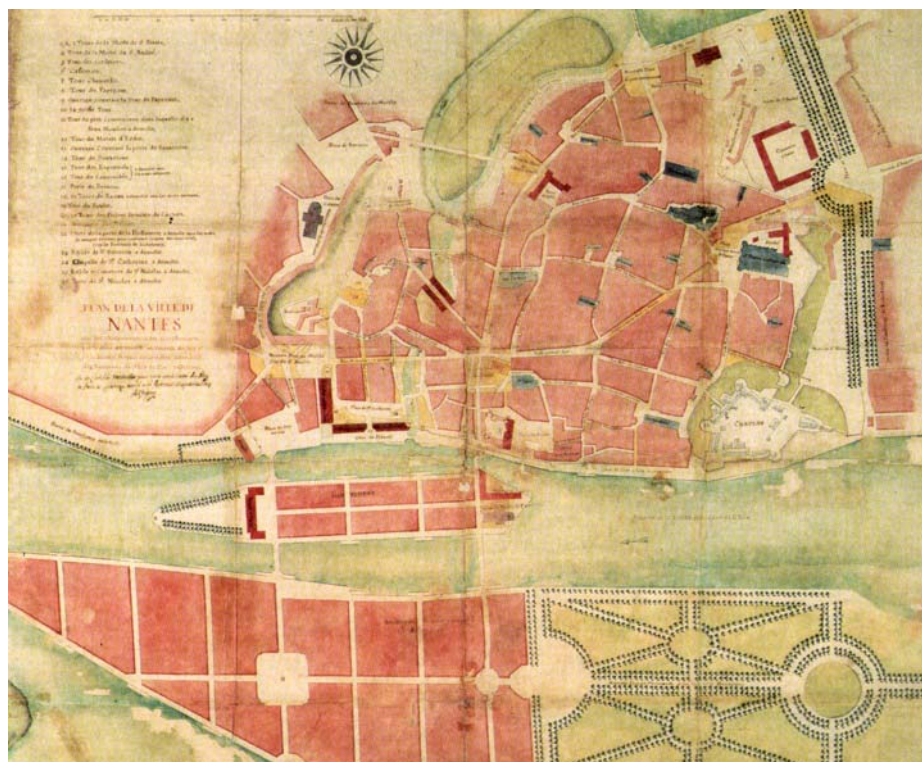


Figure 3.33 : Plan établi par De Vigné de Vigny en 1755. Intitulé : « plan pour l'embellissement et la commodité de la ville de Nantes »<sup>60</sup>

Après De Vigny, c'est l'intendant de la Bove et l'ingénieur Perronet qui tenteront de persuader les autorités de la nécessité d'édifier l'île. Perronet dessinera en 1778 pour l'île un réseau d'îlots en damier, et proposera, à cette époque déjà, de tracer une percée qui traverse toute la ville ancienne, et qui sera pratiquement celle qui se réalisera plus d'un siècle plus tard (fig.3.34).

L'architecte Crucy proposera à son tour un aménagement de l'île qui sera le dernier du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Dans cette proposition les rues y sont assez étroites, comparées au plan Perronet, et les orientations, en suivant la direction perpendiculaire à la rive sud, diffèrent de l'orientation des rues proposée par De Vigny et Perronet. C'est donc une orientation moins optimale que ce soit du point de vue de l'ensoleillement ou de la protection des vents que propose Crucy (fig. 3.35).

<sup>58</sup> Mais l'obstacle principal à l'urbanisation de l'île reste toujours la crainte des inondations.

<sup>59</sup> Arrêt du conseil d'état du Roy qui ordonne l'exécution du plan dressé par le sieur de Vigny, architecte de S. M., pour l'embellissement et la commodité de la ville de Nantes, 22 avril 1755. Seul le plan comportant les transformations à apporter est encore conservé dans les archives de la ville. [AMN]

<sup>60</sup> Source : AMN, voir aussi [LELIEVRE 1988, p.57]

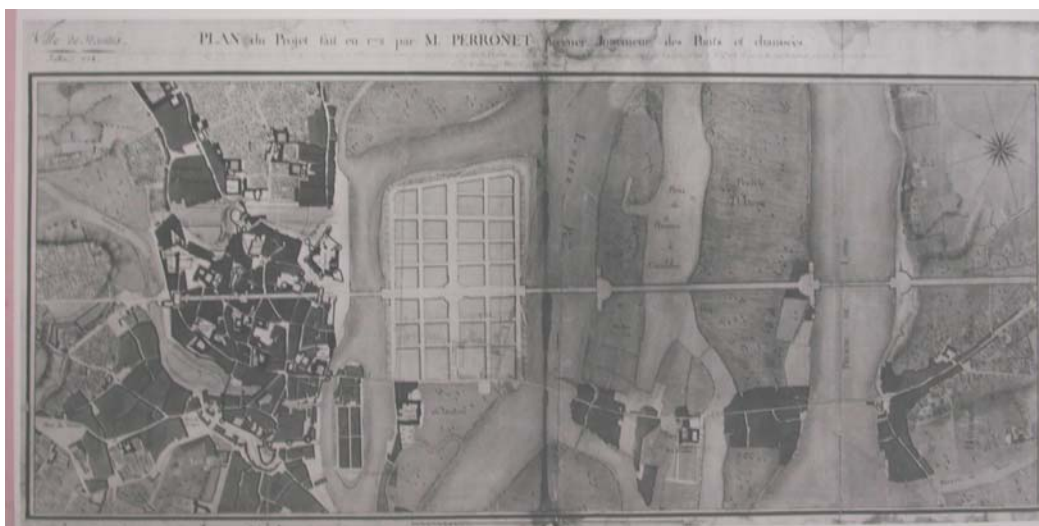


Figure 3.34 : Plan établi par Perronet en 1778 [AMN, 5Fi 571]

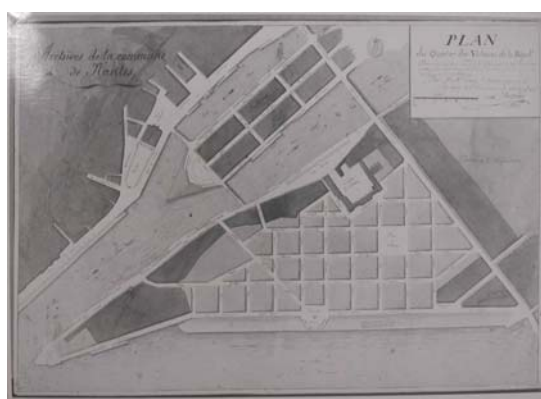


Figure 3.35 : Plan d'aménagement de l'île Gloriette par Crucy [AMN, Fi]

Au regard de ces différents projets d'extension de la ville vers l'île, il en ressort une même information : un réseau de rues en damier, des îlots de forme carrée, avec des rues assez larges, et une proposition d'espaces verts, pour le cas du plan De Vigny et celui de Perronet. Crucy, quant à lui, propose de commencer par édifier la partie Ouest de l'île, en gardant à l'état naturel la rive Nord.

Hormis ces trois plans assez connus dans l'histoire de Nantes au XVIII<sup>ème</sup> siècle, les autres projets dits « d'embellissement de la ville » concernent des projets ponctuels d'aménagement, d'alignement ou d'extensions assez localisées. C'est le cas notamment du plan d'embellissement de la ville établi par Ceineray entre 1761 et 1766.

Au XIX<sup>ème</sup> siècle, l'architecte voyer en chef de Nantes Henri Driollet, qui voyait dans la normalisation de l'ouverture des parois une façon d'améliorer la salubrité des espaces habités, propose en 1860 (fig. 3.36) de percer la ville de Nantes par plusieurs voies, dont la principale était la même que celle prévue par Perronet dans son plan. Le plan de Driollet, qui n'a pas été réalisé, est la dernière manifestation de la volonté radicale de transformer le centre ancien « aux quartiers insalubres »<sup>61</sup> par l'ouverture de onze percées et la démolition de secteurs entiers afin de remodeler et d'assainir les tissus anciens<sup>62</sup>.

<sup>61</sup> Il vient en réponse aux suggestions de la commission des logements insalubres.

<sup>62</sup> Mais de ce plan, qui date de 1860, les ingénieurs des Ponts et Chaussées n'en prennent, que la percée centrale (déjà projetée par Perronet au XVIII<sup>ème</sup> siècle) réduite à 15 mètres de large et amputée de la vaste esplanade qui aurait formé le carrefour central de la ville (rue de Strasbourg), la percée de la cathédrale et l'ouverture d'une place d'une soixantaine de mètres au carré.

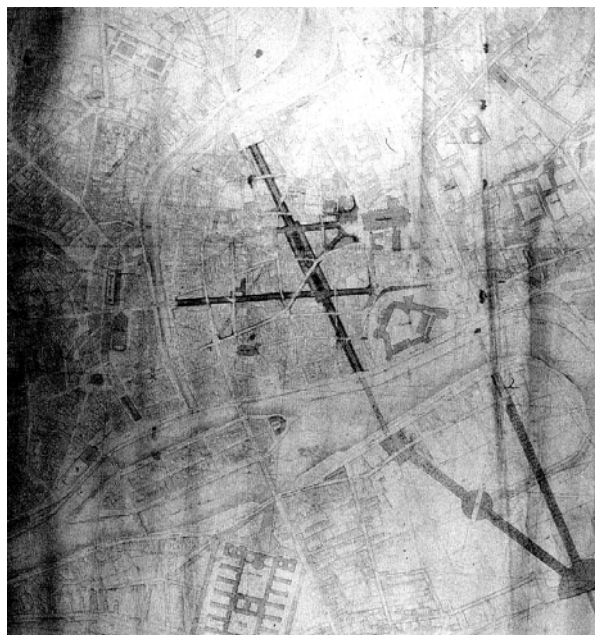


Figure 3.36 : Le plan établi par Driollet en 1860 [AMN]

#### 1.4. La modification des matériaux des enveloppes bâties

Enfin, les dernières transformations à l'échelle du centre ancien qui peuvent avoir un effet sur l'environnement climatique concernent la modification des matériaux constituant les enveloppes bâties. Nous allons donc évoquer, en ce qui suit, les principaux matériaux qui ont composé les façades des bâtiments des fragments anciens de la ville le long de la période historique dont nous traitons. Il est question de deux transformations importantes : la modification des matériaux de parois ; et celles de la taille des fenêtres. La première relève d'une décision municipale pour lutter contre les incendies et pour l'économie de la construction et la deuxième dépend de la typologie bâtie et des règlements sanitaires qui adopteront, à partir de 1902, des normes dimensionnelles pour les fenêtres des habitations.

##### 1.4.1. Modification des matériaux de parois

Le règlement de police de Nantes du mois de mars 1696, concernant « la construction des maisons », évoque pour la première fois dans le cadre d'un règlement général, la nécessité de construire en pierre. Malgré le fait que ce matériau soit jugé par les autorités de l'époque plus économique et plus solide, il restait peu utilisé par les constructeurs qui lui préféraient la construction en pan de bois. Selon cet arrêté, l'une des raisons qui font persister la technique du pan de bois est le gain d'espace à l'intérieur des habitations. Les murs en pan de bois en effet, contrairement aux murs en pierre, d'un côté sont moins épais en façade et de l'autre permettent des encorbellements pouvant augmenter la taille des espaces habités.

*« Quoique la pierre propre à bâtir soit plus commune en cette dite ville de Nantes qu'aucune du royaume, et que les incendies y soient plus fréquents : que le bois y soit rare et très nécessaire pour la construction des vaisseaux, quelques-uns des dits habitants affectent de rebâtir leurs maisons à Pans de bois, quoi qu'ils n'y puissent trouver aucune utilité que de gagner quelque peu de terrain dans le dedans de leurs maisons, par rapport aux différentes épaisseurs des murs de pierre... ».*<sup>63</sup>

<sup>63</sup> Ordonnance de police du 8 mars 1696, cité dans [Bienvenu 1989, p.12].



Mais le motif principal évoqué pour substituer la pierre au bois était la lutte contre les incendies. Le texte du règlement de 1696 qui tient plus de l’observation que de la réglementation, sera complété dès 1725 par l’arrêt du conseil d’état du roi, qui interdit explicitement la construction ou la réparation des maisons en pan de bois autrement qu’avec des matériaux non inflammables comme la pierre :

« défenses à toutes personnes de bâtir à neuf, réparer ou réédifier à l’avenir les maisons de la ville de Nantes, et notamment celles du quartier de la Fosse, autrement qu’avec des maçonneries de pierre froide, de briques et autres matières non sujettes à s’enflammer, parce que l’usage des constructions en bois opère deux maux, l’un la facilité des progrès des incendies qui consomment fort souvent plusieurs quartiers d’une ville, comme on l’a vu malheureusement arriver les années dernières à la ville de Rennes ; et l’autre à maintenir le prix des bois de charpente plus haut qu’il ne devrait estre... »<sup>64</sup>.

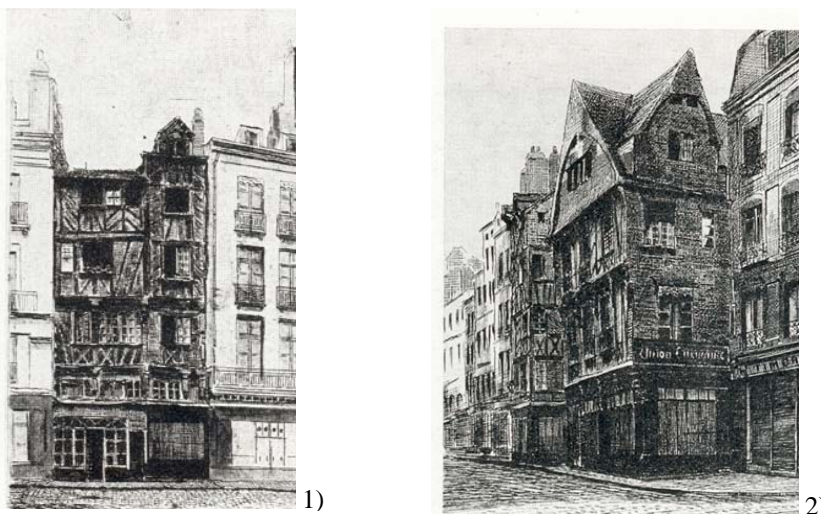


Figure 3.37 : Maisons en pan de bois à Nantes du XV<sup>ème</sup> siècle : 1) Haute grande rue ; 2) Place du change. [COSNEAU 1973]

La construction en pan de bois, apparue en France au Moyen Age, fait reposer la construction sur les éléments porteurs d’une structure en bois (fig. 3.38)<sup>65</sup>. Elle permet la construction de plusieurs étages avec des épaisseurs de murs assez réduites selon le principe d’une cage. Les remplissages entre les pièces de bois sont effectués de divers matériaux, comme le torchis, les briques et les moellons.

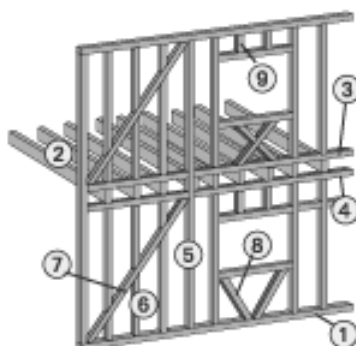


Figure 3.38: Éléments constructifs d’une ossature en pan de bois

<sup>64</sup> règlements spéciaux concernant le mode de construction des maisons. Daté du 9 décembre 1725. [AMN, DD 329]

<sup>65</sup> La structure repose sur un élément de base horizontal : la sole ou sablière (1) qui repose elle-même généralement sur un élément maçonné rehaussé du sol ou sur un rez-de-chaussée entièrement maçonné. Un deuxième élément horizontal se situe à hauteur d’étage : la sablière d’étage (4) reçoit les solives (2). Le sol de l’étage supérieur commence au niveau de la sablière de chambrée (3). D’autres éléments de la structure portent des noms issus du langage du compagnonnage : poteau de fond (5), tournisse (6), décharge (7), guette (8), potelet ou tiers-poteau (9) ou encore croix de Saint-André.

Les ossatures en pan de bois sont généralement de deux types [GRANCHAMPS 1999] :

- Des bâtiments à « façade-écran » ; dans ce cas, seule la façade donnant sur les rues est composée de pan de bois. Les autres murs de refond et d'enveloppe sont fait de maçonnerie. La façade en pan de bois peut être détachée des murs latéraux (fixée au planchers) ou reliés à ces derniers par les sablières. Le rez-de-chaussée peut aussi être en pierre (fig. 3.39.1).
- Des bâtiments à « cage en bois » ; dans ce cas, très peu répandu en ville à cause des mitoyennetés, c'est l'ensemble des murs d'enveloppe qui est composé de pans de bois (fig. 3.39.2).



1



2

Figure 3.39: Deux types de maisons à pan de Bois dans le centre ancien de la ville : 1) rue Bossuet, RDC en pierre ; 2) rue des Carmes, tout en pan de bois.

On doit cependant noter que dans la construction d'un bâtiment l'usage du pan de bois n'est pas exclusif. Deux hypothèses s'opposent quant à l'utilisation combinée du bois et des maçonneries en pierre dans les bâtiments à pan de bois. La première suppose une mixité constante et originelle des deux matériaux. La deuxième privilégie une évolution progressive vers l'utilisation de la pierre [TOULLIER 1993]. En tout état de cause, le plus souvent le bois et la pierre semblent coexister dans les villes françaises :

*« Il existe des corps de logis en bois sur solins de pierre et d'autres en pierre avec pan de bois en façade et à l'étage seulement. Les cas sont fréquents de façades en pan de bois entre murs pignons en dur ou de murs latéraux en bois sur rez-de-chaussée en pierre, entre des façades en dur ; [...] certaines demeures pratiquent une autre forme de mixité en associant des parties en dur et d'autres en bois... »<sup>66</sup>*

A Nantes, les iconographies anciennes de la ville, et la répétitivité des ordonnances qui prescrivait le remplacement des maisons en pan de bois, dont quelques-unes subsistent encore aujourd'hui, par des bâtiments en pierre, nous laissent supposer que la technique de construction en pan de bois était assez répandue dans le centre ancien.

Le premier texte ordonnant le remplacement des pans de bois par de la pierre dans la reconstruction des bâtiments à Nantes, daterait de 1680, suite à l'incendie de maisons construites dans la rue de la Casserie<sup>67</sup>. Cette disposition « réglementaire » locale est élargie par la suite à toute la ville :

*« défenses à toutes personnes de faire aucun bâtiment en cette ville et faubourgs, si ce n'est à pierre »<sup>68</sup>*

La priorité de la reconstruction en pierre est donnée aux quartiers les plus denses de la ville de Nantes, à cause du danger de propagation du feu qui peut augmenter avec l'étroitesse des rues.

<sup>66</sup> [GRANCHAMPS 1999].

<sup>67</sup> Selon : le Règlement de police de NANTES au sujet des maisons incendiées dans la rue de la Casserie le 2 mai 1680. Rapport de Gérard Mellier, *Recueil des Ordonnances de la police de Nantes. 1723*. [AMN, BB 73] cité dans [BIENVENU 1989, p. 16]

<sup>68</sup> Cité dans [BIENVENU 1989, p. 17]

Le règlement de police du 6 juin 1743 rappelle, dans son deuxième article l'interdiction d'utiliser des matériaux inflammables, ce qui prouve de nouveau que le règlement n'est pas encore totalement respecté à cette date. Ce règlement restera d'actualité jusqu'en 1870.

« *La ville en pierre a définitivement remplacé la ville en bois* » à la moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle<sup>69</sup>, et la propagation des incendies d'une maison à une autre ne devient plus problématique, ce qui n'empêche pas d'anciennes dispositions d'être reconduites.

Le règlement de 1899 maintient l'interdiction, à Nantes, des façades en pan de bois ou en encorbellement sur la voie publique (art. 22) et interdit aussi les matériaux inflammables pour les toitures en préconisant :

« *Des matériaux durs incombustibles, tels que tuiles, ardoises, cuivres, zinc ou tôle* » (art. 23).

Le règlement sanitaire de la ville de Nantes en application de la loi du 15 février 1902 sur la protection de la santé publique, traduira en terme qualitatif la réglementation des matériaux de constructions. Pour la première fois, il n'est plus question de seulement se protéger contre les incendies, mais aussi d'apporter une meilleure hygiène et confort à l'intérieur des habitations. Ainsi, il est nécessaire que ces murs de façades soient construits :

« [...] *de façon à protéger les appartements contre l'humidité et les variations de température* » (art. 17)

Voici donc une préoccupation liée à la salubrité et le confort des habitations vis à vis des fluctuations des paramètres climatiques : « la température et l'humidité ». Cette préoccupation qualitative dans la réglementation des matériaux des parois sera plus explicite dans le chapitre V du règlement sanitaire de 1943 :

« *L'épaisseur des murs et la qualité des matériaux employés à la construction, à la couverture, à l'aménagement des parois et cloisons des bâtiments destinées à l'habitation devront être suffisants pour assurer la salubrité de l'édifice et la protection des occupants contre l'humidité et les variations atmosphériques* ».

#### 1.4.2. La réglementation de la taille des fenêtres

La surface des ouvertures dans une façade peut considérablement réduire la quantité de matériau utilisée pour les murs des rues. La taille et la répartition des percements dans les parois font l'objet de réglementations particulières qui évoluent avec le temps. Ils sont d'abord fortement basés sur les aspects formels des compositions de façade, ensuite ils sont définis selon les ordonnances urbaines et enfin par une réglementation en rapport avec le volume des habitations.

En 1741<sup>70</sup> on prescrit à Nantes la nécessité d'une demande d'autorisation avant tout projet de maison nouvelle accompagnée par les plans et les façades. Il est demandé aux propriétaires de :

« *présenter au Maire et échevins de la dite Ville les plans des réédifications de leurs maisons pour être approuvées par eux* » [AD. C 326]<sup>71</sup>.

L'architecte voyer examine ainsi les façades des édifices avant d'autoriser leur construction. En 1770 on impose aux propriétaires des bâtiments du cours saint André de se conformer aux façades conçues par Ceineray, et on impose même en 1772 pour une parcelle située au fond de la place du Bouffay l'obligation de suivre le plan de façade dessiné par Ceineray [Ardepa 1991].

Les raisons évoquées pour prescrire l'utilisation d'ouvertures similaires à celles des places et quais déjà existants sont le plus souvent d'ordre décoratif. Il faudra attendre le XIX<sup>ème</sup> siècle pour voir émerger des préoccupations hygiénistes dans la prescription des ouvertures de façades. En 1852, la société des architectes de Nantes présidée par Henri Driollet est consultée pour le rapport

---

<sup>69</sup> [BIENVENU 1989, p.16]

<sup>70</sup> Selon l'arrêt du conseil d'état du 23 août

<sup>71</sup> Cette obligation sera renouvelée dans le règlement de police du 6 juin 1743 et l'arrêt du conseil du 22 septembre 1755.

de la commission des logements insalubres. Une réponse est donnée, par ce dernier, en fixant des normes nécessaires à la salubrité en reconsidérant à la baisse<sup>72</sup>, des directives qu'il avait déjà établies deux ans auparavant. Il recommande cette fois des pièces de 20m<sup>2</sup> sur 2,30m de haut avec des fenêtres de 1,20m sur 1,77m pour un maximum de chambres limitées à 20 par maison. Mais cela ne sera pas pris en compte.

Ce n'est qu'avec les règlements sanitaires arrêtés en application de la loi de 1902 que l'on verra apparaître en 1904, 1920, et 1943 des normes d'habitabilité minimum mises en vigueur. Le règlement sanitaire arrêté en 1904 commence dans son premier article par déclarer que :

« les habitations seront aérées et éclairées largement... ».

Le règlement sanitaire de 1902 va mettre en rapport, pour la première fois à Nantes, le type d'espace extérieur sur lequel s'ouvre une habitation avec la taille des fenêtres et le volume habité<sup>73</sup> qui va être à son tour réglementé. Le volume habitable sera d'au moins 25m<sup>3</sup>, et on donne l'obligation pour chaque pièce de puiser l'air et la lumière sur rue ou sur cour par une fenêtre dont la taille est pour la première fois réglementée : « une surface d'au moins 2m<sup>2</sup> »<sup>74</sup>. Cette surface sera modifiée en 1920. Les ouvertures des habitations donnant sur les courettes feront 2/3 des 2m<sup>2</sup> (fixés pour les fenêtres des pièces principales) tout en étant supérieure à 1m<sup>2</sup>.

Une autre conception, plus ancienne, de la régulation des façades, a eu un effet considérable sur le dimensionnement des parois, c'est ce que l'on a appelé « les ordonnances architecturales », dont l'intention de base était exclusivement esthétique.

G. Bienvenu<sup>75</sup> rétablit les premières prescriptions relatives à l'aspect des façades à l'année 1710 lors de la création d'un quai à la Fosse et où une certaine « unité de façade » est recherchée. Le premier projet de façade regroupant plusieurs édifices remonterait en effet à 1723 (fig. 3.40), lors du projet de lotissement de l'île Feydeau. Gérard Mellier, devenu maire de Nantes, avait fait dessiner par Goubert<sup>76</sup> un « projet de 24 maisons régulières avec façade uniforme ». Mais avec le rythme lent des édifications, ce ne sera qu'en 1740 que les premières maisons verront le jour, sans respect strict de la façade imposée [LELIEVRE 1988].

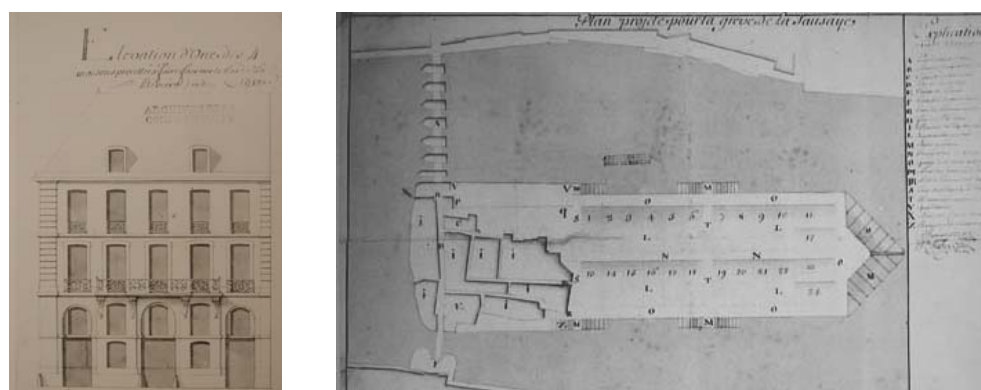


Figure 3.40: Façade et plan pour l'île Feydeau par Goubert en 1723 [AMN, 5Fi 61]<sup>77</sup>

<sup>72</sup> Les tentatives d'Henri Driollet de normaliser le volume des pièces d'habitations en rapport avec les ouvertures en façade vers 1850 n'avaient pas eu d'échos favorables. Il avait en effet, après son étude sur « l'amélioration des logements d'ouvriers et d'indigents » établi un minimum de 25m<sup>2</sup> sur 3m de hauteur par chambre, et 1,25m sur 2m pour les fenêtres, les maisons ne pouvant avoir plus de 25 chambres. [AMN]

<sup>73</sup> Le volume habité a déjà fait l'objet de normalisation en 1899.

<sup>74</sup> Article 2 du règlement.

<sup>75</sup> [BIENVENU 1989, p.35]

<sup>76</sup> Nommé inspecteur des travaux des ponts par arrêt du conseil le 28 mars 1723 [LELIEVRE 1988, p. 276]

<sup>77</sup> « ...Voilà un des embellissements les plus considérables que l'on pouvait procurer dans le centre de cette ville... » le 23 juillet 1723. [AMN. DD 223]



L'architecte-voyer J.B.Ceineray, reprend la thématique de la façade linéaire dans des projets situés à la limite de la ville ancienne au-dessus des anciennes fortifications (que l'on est en train de démolir à cette époque). Ses projets sont élaborés entre 1760 et 1780. L'objectif n'est pas d'imposer l'édification de façades de chaque parcelle, mais de définir « des ordonnancements urbains », dont l'objet est de constituer une sorte de paroi continue, ordonnée et hiérarchisée, sans tenir compte de ce qu'il y a derrière chaque façade, voire même sans mettre en valeur le passage d'une parcelle à une autre. Il ne s'agit donc pas de façade représentative d'un immeuble, mais de « façades urbaines » dont le souci est d'agrémenter la perception depuis les espaces urbains, alors, promenades, places et quais prennent place sur les anciennes fortifications ou encore sur les nouveaux terrains résultant des comblements et de la canalisation de l'Erdre. Le respect des proportions de l'architecture savante prévaut dans la composition des façades sur le programme des édifices. [ARDEPA 1991]

L'architecte voyer Mathurin Crucy<sup>78</sup> après 1780, ira encore plus loin dans ce détachement de la façade de l'immeuble, puisqu'il élimine toute hiérarchie entre façades, et reprend par répétition, une même travée pour constituer des continuités urbaines de rues et de places. Il n'y a plus de contraste entre le monument public et l'immeuble privé. Les façades obéissent à une même structure et les immeubles accompagnent le monument, comme c'est le cas pour la place Graslin, voire même le long des nouvelles rues dont les façades néoclassiques sont presque aussi importantes que celle de la place et cela malgré l'étroitesse des rues. [ARDEPA 1991]

La dernière place ordonnancée dans le centre de Nantes est celle de la cathédrale saint Pierre (fig. 3.41). Elle est créée dans le cadre du programme de percées du centre ville et de mise en valeur des monuments. Elle est le résultat d'un concours de façades lancé en 1868.<sup>79</sup>

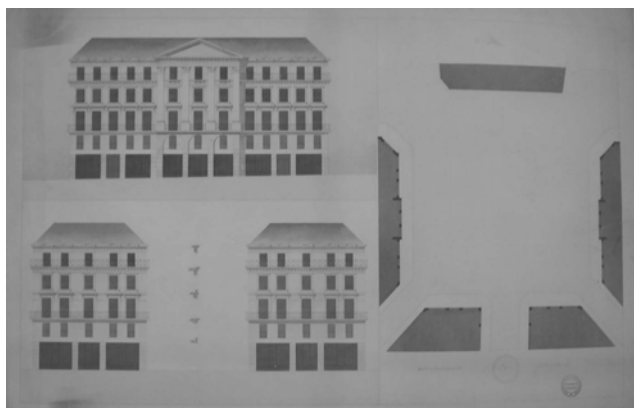


Figure 3.41 : **Projet pour le concours de la place saint Pierre** [AMN 1Fi 20]

L'analyse de quelques images anciennes des parois de bâtiments situés dans le centre ancien de la ville, nous permet d'évaluer l'importance des ouvertures, dans quelques édifices construits au XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècles. Le pourcentage d'ouverture de ces parois varie entre 18% pour le cas de maisons à Rez-de-Chaussée datant du début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, 20% pour le cas de la maison en pan de bois situé au centre du quartier du Bouffay et atteint entre 25% et 34% pour les maisons en pierres à usage d'habitation datant du début du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Le réaménagement de la place saint Pierre va conserver ce rapport de surfaces pour les parois de la place. Concernant les édifices publics, le taux d'ouverture varie entre 17,3%, et 43,8%. Néanmoins selon les exemples que nous

---

<sup>78</sup> Architecte-voyer de la ville de Nantes.

<sup>79</sup> La ville va jusqu'à vendre les terrains à très bas prix pour amortir le coût des façades sur les nouveaux propriétaires, afin de s'assurer de leur réalisation.

avons pris dans ce tableau, il ne semble pas y avoir de rapport direct entre la situation des bâtiments et la fraction de surface des fenêtres (tableau. 3.2 ).

Type d'espace urbain	Quai	Places			Rues			
Situation	Port Mallard 1761	Place d'armes 1773	Place Royale 1788	Place St Pierre 1868	Rue île Feydeau 1723	Rue St Clément 1779	Pan de bois Bouffay	Pont Rousseau 1711
Taux d'ouverture des façades	41.96%	17.26%	36.59%	35.75%	34.80%	25.72%	19,6%	18%

Tableau 3.2 : Comparaison entre les ouvertures des parois selon le type d'espace urbain (voir annexe pour les iconographies ayant servi à ce calcul)

L'ordonnement des façades disparaît ensuite des préoccupations des architectes et urbanistes ; les cités jardins des années vingt et les groupes d'habitation H.B.M. des années trente répondent à de nouveaux critères de conception.

Lumière et aération conduisent à réexaminer le dimensionnement des ouvertures des habitations. Le règlement sanitaire de 1943 aborde ainsi les questions de l'éclairage et de l'aération des habitations en établissant un minimum de surface de 2m<sup>2</sup> pour les pièces d'un volume supérieur à 60m<sup>3</sup>, la surface d'ouverture sera au moins égale au 1/30<sup>ème</sup> du volume. Une formulation assez précise permet le calcul de la surface d'ouverture dans le cas de la présence de saillies. C'est la capacité de l'ouverture à éclairer l'intérieur des pièces qui est recherchée. Le règlement définit le concept de « hauteur utile » ; cette hauteur est mesurée à partir de la projection, selon une ligne à 45°, de l'extrémité extérieure de la saillie sur l'ouverture (fig. 3.42).

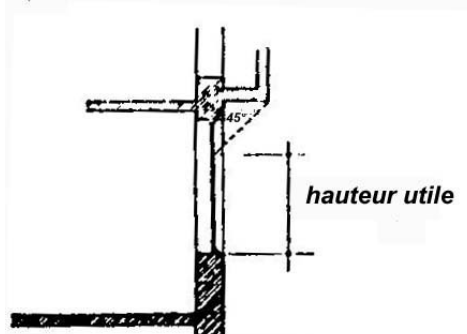


Figure 3.42 : Définition de la hauteur des fenêtres en prenant en compte les saillies (Extrait du règlement de 1943, p.36)

Dans ce même règlement, la question de l'éclairage est à nouveau évoquée lors de la réglementation des dimensions des pièces d'habitation (2,80m de hauteur mini et 9m<sup>2</sup> de surface mini), où on notifie que la surface de la section ouvrante égale au moins au 1/6<sup>ème</sup> de la surface du sol de la pièce éclairée (art. 59).

En 1948 le programme d'aménagement annexé au projet de reconstruction et d'aménagement de la ville s'attribue la possibilité d'imposer le dessin des façades et leurs matériaux, et annonce ainsi le début de la conservation de la ville dans un état figé :

« En cas de démolition et de reconstruction, ou de transformation d'un ou de plusieurs de ces immeubles, la composition de ces façades et leurs détails ainsi imposés devront être rétablis ou maintenus dans les mêmes matériaux »<sup>80</sup>.

<sup>80</sup> Le programme d'aménagement annexé au projet de reconstruction et d'aménagement de la ville de Nantes est approuvé et déclaré d'utilité publique par l'arrêté interministériel du 27 août 1948. (Article 9-1).

### 1.5. Arrêt des transformations et débuts de la conservation du centre ancien

A partir du règlement de voirie de 1935, on assiste avec la définition des « servitudes esthétiques » aux débuts des préoccupations de conservation des bâtiments du centre ancien. Ces servitudes vont chercher à conserver l'aspect des façades et leur ordonnancement architectural même en cas de transformation. Elles sont présentées selon une liste précise de rues, de places, de cours et de quais situés dans le centre ancien, dont il faut.

Le programme du projet de reconstruction et d'aménagement de la ville de Nantes de 1948 définit de nouvelles ordonnances architecturales pour : la place Bretagne, l'île Feydeau et les façades qui lui font vis à vis au nord et au sud, la nouvelle place Pirmil et les voies nouvelles reliant les places Bretagne et Viarme. Ce programme interdit aussi « toute modification de l'architecture des façades » de places, cours et quais dont la liste est donnée dans le texte (art. 9/1). Cet élargissement progressif de la liste des bâtiments à préserver liée à la préservation des monuments historiques aboutira quelques années plus tard et comme d'autres villes en France à la délimitation d'un secteur sauvegardé.

Il était aussi question, dans ce même programme, de restreindre le territoire constructible dans la ville, en interdisant par exemple d'édifier dans les bras de la Loire comblés ou sur l'île de Versailles. Des zones non aedificandi sont aussi établies le long des cours d'eau. Face à ces directives de préservation de l'existant, le processus de transformation du centre ancien tel qu'il est retracé au travers les règlements est quelque peu stoppé. Désormais le centre ancien de Nantes ne se transformera que par des interventions très ponctuelles. Il sera uniquement « entretenu ». Ce secteur sauvegardé<sup>81</sup> sera défini par le plan de sauvegarde et de mise en valeur établi en 1981 et publié en 1983 (fig. 3.43). Même si l'on admet des parcelles constructibles, elles devront l'être dans le respect des bâtiments sauvegardés. Ce qui signifie que les espaces urbains resteront de même forme et de mêmes dimensions.

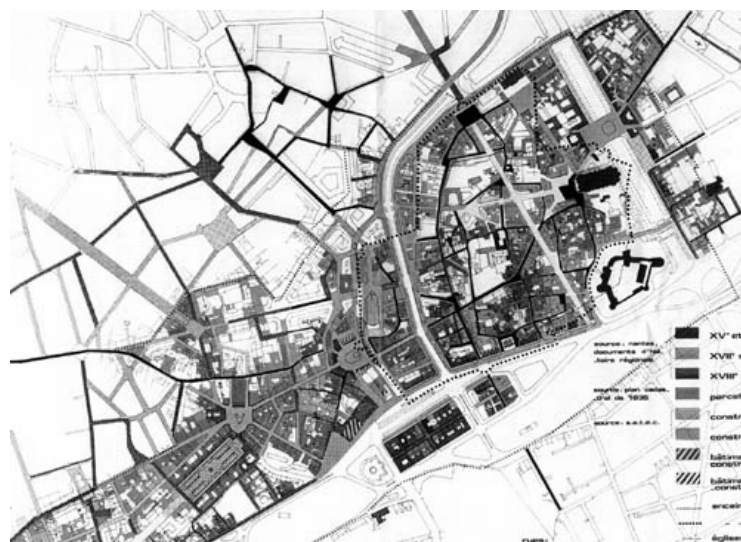


Figure 3.43 : Plan du secteur sauvegardé ou « le coup d'arrêt aux transformations » [BIENVENU 1991]

Toutefois, avant la nécessité de conserver les structures bâties, il était apparu nécessaire de conserver les espaces verts, ce sont d'abord les espaces verts qui étaient à conserver. En effet, le règlement de voirie de 1899 on précisait clairement :

<sup>81</sup> L'arrêté de création de ce secteur viendra officialiser cette attitude conservatrice en 1972, sous l'impulsion d'André Malraux (ministre de la culture dès 1962).

« Interdiction d'abattre les arbres et plantations sur la voie publique, boulevards, cours, squares, jardins, ou promenades ».

Le règlement sanitaire de 1943 précisera par la suite que les zones non-aedificandi doivent être aménagées d'espaces verts et d'arbustes et constituer des jardins.

Face à la « patrimonialisation » du centre ancien de la ville, une nouvelle typologie de tissus voit néanmoins le jour mais à l'extérieur du centre ancien et cela dès la reconstruction. Avec la construction du quartier des Hauts-Pavés par l'architecte Michel-Roux Spitz, architecte en chef de la reconstruction, le modèle de la forme urbaine « classique » dont l'élément de base était la rue bordée de bâtiments parallèles à son axe, est abandonnée. Le plan masse de ce projet comporte des immeubles en barre perpendiculaires aux voies principales de circulation. Mais c'est là une exception. La reconstruction du centre ancien va reconduire la forme urbaine ancienne avec des rues alignées. Les seules modifications apportées concernent des élargissements de rues et quelques percées. En dehors de la ville, au Nord-Est de Nantes (quartier du « Grand Clos ») et toujours dans cette phase de reconstruction, un nouveau quartier constitué de maisons individuelles construites en pierre et entourées de jardins voit le jour (fig. 3.44).

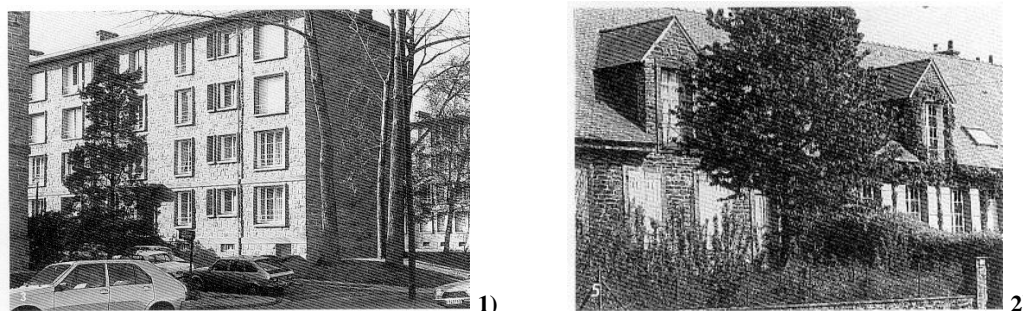


Figure 3.44 : Immeubles barre des Hauts Pavés (1) et maisons du Grand Clos (2) [ARDEPA 1991]

Puis, le modèle des « grands ensembles » va opérer une rupture définitive avec la ville traditionnelle. Un nouveau paysage urbain apparaît en périphérie des villes. Les nouvelles édifications répondent aux idéaux de la modernité : « air, soleil, espace », en ayant comme anti-modèle à ne pas reproduire celui de la ville ancienne insalubre et sombre.

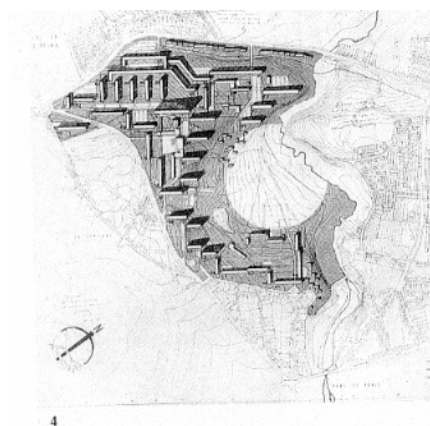


Figure 3.45 : Plan masse des Dervallières [ARDEPA 1991]



Figure 3.46 : ZUP de Bellevue à l'Ouest de Nantes [ARDEPA 1991]

Les premières réalisations inspirées de ces principes sont à Nantes les quartiers des Dervallières (1952) (fig. 3.45) et celui du Breil Malville édifiés à l'Ouest du centre ville. La fin des années 50 verra construire, avec l'instauration des ZUP<sup>82</sup>, les autres grands ensembles de la ville (Bellevue, Malakoff...) (fig. 3.46). En 1972, une circulaire nationale (circulaire Guichard) va officiellement instaurer l'arrêt de ce mode d'urbanisation en limitant le nombre de logements pouvant être réalisés et en définissant des contraintes réglementaires applicables aux constructions en opposition à la relative liberté de conception des grands ensembles.

### **1.6. Synthèse des transformations urbaines du centre ancien de Nantes : un processus d'ouverture et de minéralisation**

Nantes n'échappe pas à la règle. Elle connaît, au même titre que les autres villes françaises, une transformation salubriste sur des éléments de la forme urbaine similaires à ceux que l'on a présenté dans le premier chapitre. A Nantes, comme ailleurs, on savait en effet sur quoi il fallait intervenir pour assainir l'air des villes et l'environnement climatique urbain.

Les transformations urbaines que nous venons d'exposer dans cette partie du chapitre comme étant des modifications potentielles de l'environnement climatique relèvent d'un côté d'intentions explicitement salubristes (au vu du témoignage des textes anciens) et de l'autre, de préoccupations diverses, parmi lesquelles des considérations techniques, sécuritaires et économiques. Nous savons aujourd'hui, au vu des travaux de la climatologie urbaine, que ce sont là des interventions pouvant avoir un effet sur l'environnement climatique.

L'analyse des différentes transformations urbaines que nous venons d'effectuer nous conduit, dans une certaine mesure, à confirmer les deux principales catégories d'intervention sur la forme urbaine qui caractérisent l'action diachronique sur l'environnement climatique jusqu'à l'époque contemporaine. Cette action peut en effet s'inscrire dans deux catégories descriptives qui peuvent coexister ou se succéder selon des échelles spatiales et temporelles différentes. Ces deux catégories se résument de manière générale à deux niveaux d'intervention :

- Des interventions sur l'ouverture du vide urbain : en alignant les rues, les élargissant ou en normalisant leur prospect et celui des cours intérieurs ; en limitant les densités bâties et en imposant des zones de servitudes aux parcelles ou en définissant des seuils au-dessous desquels les parcelles ne sont pas constructibles ; ou encore lorsque le centre ancien se densifie de manière spontanée ou lorsque le pouvoir central décide de percer le centre ancien ; c'est l'accessibilité de l'air, de la lumière et du soleil dans les espaces urbains et les habitations et la dissipation de la pollution urbaine qui se trouvent progressivement améliorés. Le centre ancien a vu se développer progressivement depuis les premiers textes sur l'alignement vertical des parois un processus d'ouverture du vide urbain depuis l'échelle de la rue à celle de l'ensemble urbain qui va se poursuivre et ce jusqu'à l'instauration du secteur sauvegardé. Mais on ne peut pas réduire ces différentes formes d'ouverture du vide urbain à un but exclusivement salubriste. L'usage des espaces urbains est souvent intimement lié aux intentions salubristes visant à améliorer l'environnement climatique.

- Des interventions sur la minéralisation des surfaces du sol et des enveloppes bâties : les différentes interventions sur le sol urbain ainsi que celles sur les matériaux des enveloppes bâties ont répondu à divers objectifs, liés à la fois à des impératifs d'hygiène, de sécurité d'économie et d'usage. Nous avons vu que les différentes formes de minéralisation des surfaces appliquées à l'échelle du centre ancien étaient principalement : le pavage du sol des rues, le comblement des fossés et des cours d'eau qui conduira à remplacer les surfaces d'eau pas du pavé, du bitume et du

---

<sup>82</sup> Zones d'Urbanisme Prioritaire.

bâti, et la modification des matériaux de parois. Ce sont toutes des transformations qui ont concerné l'interface matérielle entre le sous-sol et le vide urbain ou entre le vide et l'intérieur des édifices. Etant des lieux d'échanges important des paramètres physiques du climat urbain leur modification peut entraîner un important changement du microclimat urbain.

Les transformations salubristes ont été confrontées, lors de leur réalisation, à la complexité de la réalité bâtie et à l'inertie au changement des citadins. Une adaptation devient souvent nécessaire et les changements réalisés n'atteignent pas les niveaux souhaités dans les textes. Nous l'avons vu lors du passage du règlement de 1935 à celui de 1943 par exemple, les transformations salubristes, même si elles proposent de modifier un état existant et non sa substitution (ce que proposera plus tard l'urbanisme moderne), elles se trouvent réadaptées à la fois à l'état existant de la ville et aux besoins de croissance et de densification de cette dernière. Les intentions salubristes et les besoins de croissance du bâti apparaissent en effet en confrontation. Les premières suggèrent un agrandissement des vides urbains alors que les deuxièmes traduisent leur rétrécissement.

Cette résistance aux transformations salubristes va non seulement réduire les changements mais elle va étaler ceux qui se réalisent sur un temps assez long. On l'a vu par exemple avec les renouvellements successifs des textes sur les alignements et les élargissements des rues. Les transformations qui concernent la réduction des surfaces bâties et, de ce fait, celles qui visent la croissance du vide urbain sont des transformations mineures et lentes. Ce qui n'est pas le cas de la modification des surfaces du sol urbain. Le comblement des fossés et des cours d'eau, la plantation d'arbres et la réalisation des cours ou encore le pavage des rues vont en effet se réaliser dans un temps très court. En d'autres termes, la minéralisation des sols urbains se réalise plus rapidement que la modification de la forme des espaces urbains. Les échelles temporelles de réalisation des transformations urbaines sont donc variables du fait de la résistance que ces transformations rencontrent lorsqu'elles sont confrontées à la réalité du terrain<sup>83</sup>.

Les différentes formes d'ouverture et de minéralisation se réalisent parfois simultanément, leurs effets sur l'environnement climatique vont, de ce fait, interagir de manière difficilement prévisible. Les auteurs des transformations urbaines, s'ils savaient sur quoi agir, ils ne pouvaient donc pas, au regard des interactions des différentes transformations, prévoir les effets de leurs interventions. Pour tenter de quantifier ces effets et évaluer la pertinence des transformations urbaines à réguler l'environnement climatique, nous allons dans les prochaines parties de ce chapitre effectuer une modélisation des transformations urbaines et effectuer des simulations numériques par l'utilisation du modèle TEB.

Plutôt que d'adopter une approche exhaustive, de toutes les interventions sur la forme urbaine, nous ne retiendrons qu'un certain nombre d'états représentatifs du centre ancien. Ces états seront révélateurs des principales transformations que nous venons d'exposer. La définition de ces états dépendra à la fois de la nature des données d'entrées du modèle TEB et de la disponibilité des sources historiques qui nous permettent d'évaluer ces données. La liste des transformations urbaines présentées dans ce chapitre et résumées dans le tableau ci-dessous (tableau 3.3) va ainsi être réduite à « des états représentatifs » dont on peut reconstituer les données de surface.

---

<sup>83</sup> Cette confrontation des intentions à la réalité était l'une des raisons qui nous ont poussées à choisir d'analyser une ville en particulier. Cela traduit en effet le niveau de pertinence des intentions salubristes. C'est à dire ce qui fait qu'une intention devient réalisable.

Les transformations urbaines	Hypothèses de datation	Les paramètres « TEB » à reconstituer
<b>Etat Initial avant transformation :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bâtiments en pan de bois</li> <li>- Sols de rues non ou mal pavés : sol naturel compacté</li> <li>- cœurs d'îlots en jardins</li> <li>- fossés recouverts d'eau et l'Erdre non canalisé</li> <li>- Prospects de rues assez important</li> <li>- les bras Nord de la Loire en eau</li> </ul>	Avant la Fin du XVII <sup>ème</sup>	Tous les paramètres d'entrées TEB sont à définir.
<b>Pavage du sol des rues :</b> Modification des matériaux de la surface de voirie considérée dans l'état précédent comme un sol naturel compacté.	Fin XVII <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de la fraction d'eau dans les rues</li> <li>- Augmentation de la taille de la maille urbaine « a<sub>down</sub> ».</li> <li>- Réduction de l'albédo et de l'émissivité du sol</li> <li>- Augmentation de sa conductivité et capacité thermique</li> </ul>
<b>Interdiction (réduction) des saillies :</b> Nous considérons que l'interdiction des saillies va introduire un facteur d'augmentation du prospect des rues	Début XVIII <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La réduction du facteur de vue du ciel par le sol et les murs à des niveaux différents selon le prospect des rues (trouver un h/w équivalent).</li> </ul>
<b>Modification des matériaux de parois et rehaussement des bâtiments :</b> Le remplacement du pan de bois par de la pierre augmente les épaisseurs des murs, et les bâtiments à RDC ou à R+1 sont rehaussés.	Début XVIII <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de la surface des murs sur cours et sur rue</li> <li>- Augmentation de l'albédo et de l'émissivité des murs</li> <li>- Augmentation des épaisseurs de murs</li> <li>- Augmentation de leur conductivité et capacité thermique</li> <li>- Augmentation du rapport h/w</li> </ul>
<b>Alignement et élargissement des rues :</b> Ce sont là deux interventions qui vont réduire le prospect des rues et réduire celui des bâtiments	Fin XVIII à la fin XIX <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution du rapport h/w</li> <li>- Augmentation du rapport h/l</li> <li>- Diminution légère de la surface des murs</li> <li>- Diminution de la fraction de surface bâtie</li> <li>- Augmentation de la fraction de surface des rues</li> </ul>
<b>Comblement des fossés et canalisation de l'Erdre</b> Ces deux transformations réduisent les quantités d'eau à la surface	Fin XVIII <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution de la surface d'eau dans la maille :</li> <li>- Augmentation des surfaces de sol pavé et du sol végétal</li> <li>- Augmentation de la taille de la maille urbaine « a<sub>down</sub> »</li> </ul>
<b>Prescription des prospects des rues :</b> A partir du règlement de voirie de 1870, les rues font objet d'une réglementation de leur hauteur en fonction de la largeur (près d'un siècle après paris). Ils seront actualisés avec de légères modifications en 1899, 1904, 1935 et 1943.	Début XVIII <sup>ème</sup> jusqu'à fin XVIII <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diminution du rapport h/w</li> </ul>
<b>Densification « spontanée » des îlots :</b> Jusque là les règlements ne se préoccupaient que de la voirie. Il faudra attendre les règlements sanitaires pour voir les cours intérieures faire l'objet de prescriptions. En attendant les îlots se densifient et la taille des cours se réduit.	Début XVIII <sup>ème</sup> à la fin XIX <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de la surface de la maille urbaine « a<sub>down</sub> »</li> <li>- Diminution de la surface de sol végétal.</li> <li>- Augmentation de la fraction de surface bâtie.</li> <li>- Augmentation du rapport « h/l »</li> </ul>
<b>Réglementation des prospects des cours intérieures et minéralisation de leurs sols :</b> Ce n'est qu'en 1899 que les cours intérieures commencent à être réglementées, suite à une réduction exagérée de leurs dimensions. On leur reconnaît un rôle d'aération et d'éclaircissement. Ce ci va contribuer à dé-densifier le tissu urbain et réduire la largeur des bâtiments.	Fin XIX <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation du rapport h/l</li> <li>- Réduction de la fraction de surface bâtie</li> <li>- Réduction de la surface du sol naturel</li> <li>- Augmentation de la fraction de surface des sols pavés</li> </ul>
<b>Percées de rues nouvelles :</b> Les percées réduisent la densité bâtie et augmentent la surface des rues pavées.	Fin XIX <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction de la fraction de surface occupée par le bâti</li> <li>- Augmentation de la fraction de surface occupée par les rues (avec les mêmes constituantes que précédemment)</li> </ul>
<b>Comblements des cours d'eau :</b> Cette transformation est celle qui va réduire le plus la quantité d'eau en surface. Celles ci vont pratiquement disparaître du centre ville.	Début XX <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Idem pour le comblement des fossés</li> <li>- Utiliser les propriétés thermiques et radiatives de l'asphalte au lieu du pavage, pour les surfaces comblées</li> </ul>
<b>Introduction des isolants dans bâtiments :</b> Depuis la crise énergétique on a commencé à introduire dès la fin des années 70 des isolants thermiques dans le bâtiment, nous supposons qu'ils s'appliquent à l'ensemble des bâtiments (ce qui ne se vérifie pas sur le terrain)	XX <sup>ème</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de l'Albédo des murs</li> <li>- Rajout d'une couche de paroi à l'intérieur des bâtiments avec de nouvelles propriétés</li> </ul>

Tableau 3.3 : tableau récapitulatif des transformations à analyser et des paramètres du modèle « TEB » à reconstituer

## 2. ANALYSE DES SOURCES ET DEFINITION DES ETATS REPRESENTATIFS DES TRANSFORMATIONS URBAINES

Dans cette partie du chapitre nous allons exposer les informations qui nous ont permis de définir les états successifs du centre ancien de la ville en rapport avec les transformations urbaines. Ces informations proviennent en majorité des sources historiques (plans et iconographies). Quand celles-ci sont insuffisantes ou inexistantes un certain nombre d'hypothèses seront émises. On s'appuiera par exemple sur les textes réglementaires en admettant qu'ils traduisent des réalisations urbaines. Ce sera le cas pour la prescription du pavage des rues, ou l'usage de la pierre pour reconstruire les édifices, ou encore lors de la limitation des hauteurs de bâtiments.

Pour quantifier les effets des transformations urbaines nous devons définir des états représentatifs de l'évolution du centre ancien de la ville de Nantes. L'intérêt d'une approche historique est en effet d'analyser l'effet simultané de plusieurs interventions sur la surface urbaine. Pour définir ces états nous sommes tributaires de deux limites :

### - *Les simplifications de la reconstitution historique :*

La reconstitution des états anciens de la forme urbaine dépend surtout de la disponibilité et de la nature des sources historiques dont on peut disposer. Il est en effet inutile de s'attacher à simuler l'effet d'une densification par exemple si l'on ne peut pas reconstituer les dispositions anciennes. Lors de nos investigations dans les archives de la ville de Nantes nous avons rencontré trois types de difficultés :

- Absence de sources sur des périodes longues :
- Difficulté de superposition des sources : les différents plans et images qui existent sont souvent dessinés dans des échelles graphiques différentes.
- Méconnaissance des périodes de réalisation des transformations : nous ne savons pas quand ont été réellement réalisées les transformations à l'échelle de l'ensemble du territoire du centre. Les témoignages dont on dispose sont généralement locaux et fragmentaires.

### - *Les simplifications du modèle TEB :*

La deuxième limite à laquelle nous avons été confrontés est celle du modèle TEB. Les données d'entrée de la surface urbaine utilisées par le modèle sont, comme on l'a vu, des données moyennées sur l'ensemble du territoire analysé. Les valeurs de ces données sont donc réduites à une échelle spatiale importante et ne prennent pas en compte la complexité de la surface urbaine. Cette limite du modèle vient ainsi relativiser la première limite qui concerne le manque de sources historiques. Puisque pour pouvoir effectuer des simulations il suffit de reconstituer uniquement les données nécessaires à la mise en œuvre du modèle. Ce sont principalement : les surfaces des différents types du sol urbain ; les densités bâties et les hauteurs des bâtiments.

La combinaison de ces limites rend inutile toute approche exhaustive et nous incite donc à définir des états représentatifs des transformations urbaines. Ces états seront définis en fonction des informations que l'on peut retrouver dans les sources disponibles dans les archives et en fonction des données nécessaires au modèle TEB. L'objet de cette partie du chapitre est de présenter les sources historiques que nous avons recensées dans les archives de la ville de Nantes et qui peuvent nous renseigner sur ces états de surface du centre ancien de la ville.

Ces sources relèvent de trois catégories :

- Les plans de voirie : ces plans nous renseignent sur le tracé des voies et leurs largeurs ainsi que sur les états du sol urbain non bâti. Leur histoire a connu deux phases importantes. La première a produit



des plans dessinés sans levé sur terrain et la deuxième, qui commence avec le plan établi par François Cacault, produit des plans géométriques assez précis de la ville de Nantes et de son centre.

– Les plans des surfaces bâties : il existe dans les archives de la ville de Nantes des plans nous permettant, contrairement aux plans de voiries, d'évaluer la densité bâtie de centre ancien. Ces plans représentent les bâtiments de chaque îlot du centre ancien.

– Les images iconographiques : La troisième dimension du centre ancien peut être obtenue à partir de deux sources : les images iconographiques anciennes et les témoignages des anciens bâtiments encore présents dans la ville d'aujourd'hui. Nous développerons ici surtout des exemples de la première modalité.

Nous allons donc présenter en ce qui suit, selon chaque catégorie, les principales sources sur lesquelles nous nous sommes appuyées pour définir les états représentatifs des transformations urbaines que nous avons exposés dans la partie précédente du chapitre. Nous concluons cette présentation par la définition de ces états et des transformations urbaines qu'ils représentent.

## 2.1. Les plans de voiries

Les plans de voirie comportent trois types d'informations pouvant nous renseigner sur l'état des surfaces urbaines :

– Le réseau de voiries : appartenant au centre ville ou aux terres agricoles, il structure le site et constitue des parcours d'urbanisation à différentes échelles depuis les voies territoriales, jusqu'aux voies de dessertes locales. L'urbanisation suit souvent les abords des voies « territoriales » les plus anciennes de la ville (route de Rennes, route de Vannes, route de Paris, route de Poitiers...). Les voies représentées sur les plans sont de deux types : celles qui définissent les îlots du centre ville (les rues), et celles qui desservent les terres agricoles dans la périphérie immédiate de la ville (chemins).

– Les surfaces non urbanisées : elles sont constituées des cours d'eau et fossés ainsi que les terres agricoles et jardins externes à la ville qui sont clairement représentés dans ces plans.

– Les îlots bâtis : représentés par une couleur foncée, ils sont délimités par le réseau de voirie. Cette représentation ne fait aucune distinction entre le bâti et le non bâti.

Ce type de plan était établi pour deux raisons : représenter un état existant ou proposer un embellissement. Les plans de voirie sont assez nombreux au XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècles. C'est notamment le cas des plans établis par : Defer en 1716, Cacault entre 1756 et 1757, Coulon en 1795, Peccot en 1818, Bilange en 1833, Amouroux en 1849, Driollet en 1860, Demoget en 1877, et Delattre en 1909<sup>85</sup>.

### 2.1.1. Les premiers plans du centre

Sur l'état de la ville avant le XVIII<sup>ème</sup> siècle, on dispose aujourd'hui de très peu de plans. Le plus ancien est celui établi par Nicolas Tassin et publié en 1632<sup>86</sup> (fig.3.47). La représentation de la forme urbaine y est très sommaire on y voit seulement une surface bâtie, équivalente au centre intra-muros et au faubourg du Marchix (situé au Nord-Ouest) à l'intersection de deux cours d'eau : l'Erdre et la Loire.

---

<sup>85</sup> Seuls les plans établis par Cacault et Coulon donnent une importance au tracé des voies internes aux jardins périphériques de la ville, alors que des représentations comme celle de plan Demoget et celle du plan Amouroux ne distinguent pas les voies « urbaines » des voies « agricoles ».

<sup>86</sup> L'ouvrage porte le titre : « plans et profils des principales villes et lieux considérables de France ». Malgré son imprécision il servira à une représentation militaire de la ville en 1706. [BIENVENU 1999]

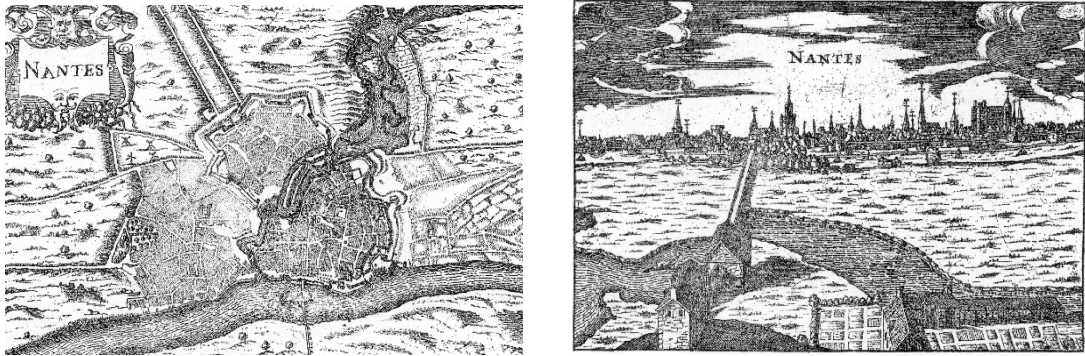


Figure 3.47 : Plan et iconographie de Nantes par N.Tassin 1632 [AMN]

Après le plan de Tassin et jusqu'à la moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle, seuls deux plans ont été dessinés. Le premier est celui établi par Defer (fig. 3.49) et le deuxième a été dessiné par Louis Jouanoux en 1722 (fig. 3.48). Le plan Defer est le plus représentatif de l'état de la surface de la ville au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Ce plan distingue les îlots, les rues, et les places des surfaces d'eau des fossés et cours d'eau<sup>87</sup>. Mais le plan Defer étant un plan effectué sans arpentage, il ne peut nous renseigner sur les quantités de surfaces. C'est le cas aussi du plan établi par Jouanoux, que Lelièvre qualifie comme étant : « l'image la plus fidèle que nous possédions de la ville au XVIII<sup>ème</sup> siècle »<sup>88</sup>.



Figure 3.48 : Plan de Nantes établi par Jouanoux en 1722 [AMN]

La précision dont veut parler Lelièvre est sans doute celle de la représentation des monuments que Jouanoux prend le soin de faire figurer en volumétrie dans leur emplacement sur le plan. Mais ce plan par cette double représentation (en plan et en volumétrie) sur le « tracé » des voies ne permet pas un tracé précis. Ce ne sera qu'avec le premier plan géométrique de la ville établi à partir de 1756 que l'on verra la première représentation « mesurée » d'un plan de voirie à Nantes.

<sup>87</sup> Un autre plan, qui daterait du XVII<sup>ème</sup> siècle, représente de façon presque identique que le plan Defer l'état de la ville de Nantes. Dessiné par un certain JEFREY'S, la planche originale présente deux parties. Une grande partie de la planche représente le plan de la ville avec le titre : « plan of the city of Nantes », et une autre en partie basse intitulée « course of the river Loire from Nantes to the sea ». La seule nuance avec le plan Defer est dans la représentation des remparts du Marchix. G. Bienvenu dit de cet état de fortification représenté par Defer qu'il n'a jamais été atteint. [BIENVENU 1999, p.17].

<sup>88</sup> [LELIEVRE 1988, p. 45].

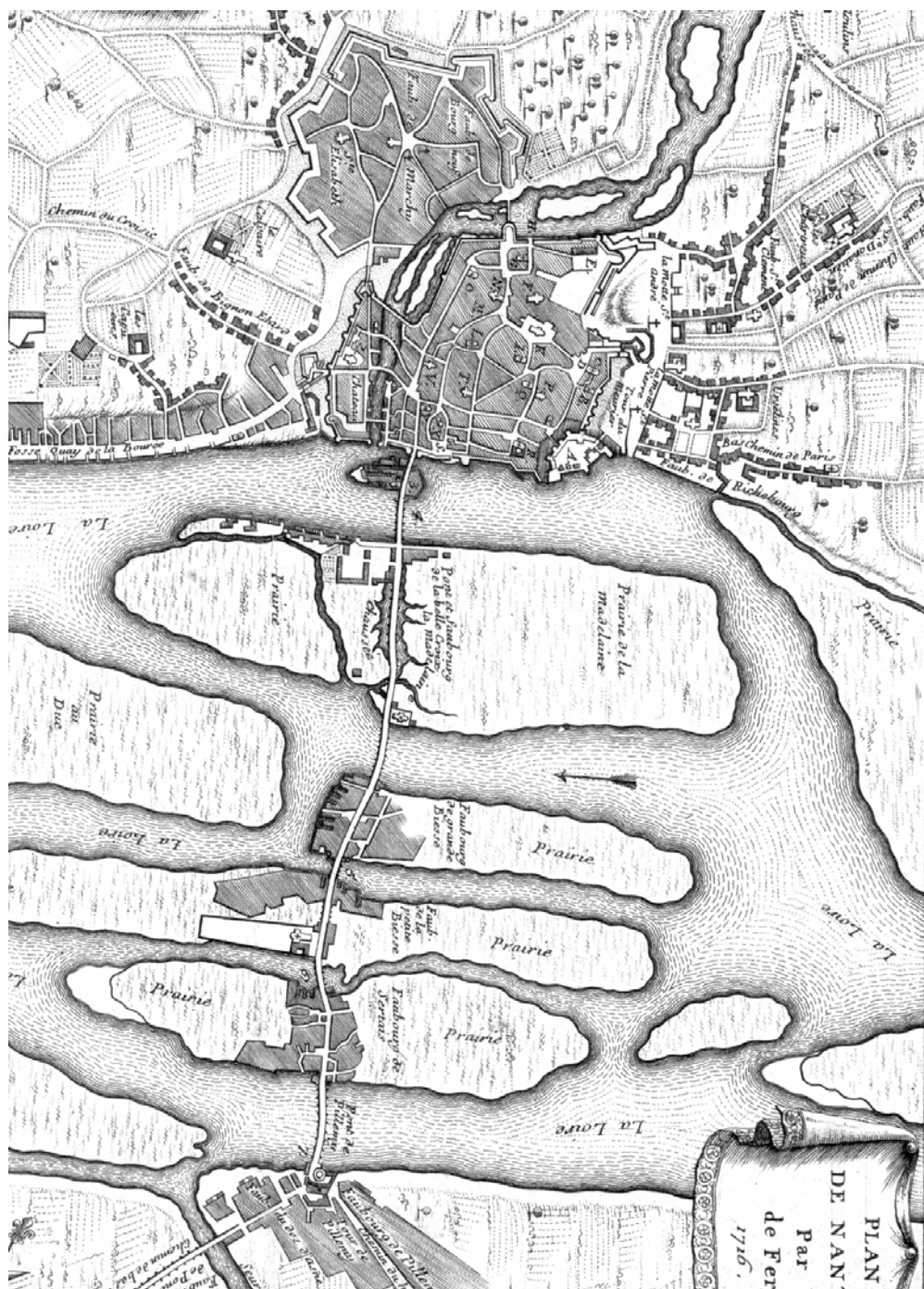


Figure 3.49 : Plan de Nantes établi par Defer en 1716 [AMN]

### 2.1.2. Les plans « géométriques »

- **Le Plan Cacault** : le plan géométrique de référence pour le tracé des voies

Le premier plan géométrique de Nantes, levé sur le terrain par « un professionnel de l'arpentage et de la topographie »<sup>89</sup>, est établi par François Cacault entre 1756 et 1757 (fig. 3.50). Il serait le premier plan qui trace avec le plus d'exactitude le tracé de la ville de l'époque.<sup>90</sup>

Le plan représente une surface importante de la ville qui regroupe l'ensemble des îles de Nantes et s'étend aux jardins et terres agricoles des alentours de la ville. Il distingue le tracé des voies de la ville intra et extra muros ainsi que la surface des terres agricoles et celles des jardins autour de la ville. Les monuments (au nombre de seize) sont aussi identifiés ; ce sont en effet les seuls bâtiments représentés sur le plan en couleur foncée (fig. 3.51).

Cette volonté de réaliser un levé exact de la ville est exprimée par Cacault lui-même :

*« ...Le Bureau après avoir ouy le procureur-syndic, est convenu d'une voix unanime, que cette ville étoit assez considérable pour donner satisfaction à ses citoyens d'en voir le plan exactement levé et gravé ; .... Il a donc arrêté : que par les sieurs Portail, architecte de la ville, Suet, dessinateur, Cacault, arpenteur, il seroit travaillé incessamment à lever avec attention le plan des faubourgs de cette ville, pour joindre au plan qui a été levé par le sieur Touros, ingénieur du Roy après que la vérification en aura été faite ; qu'il sera pareillement levé des plans des édifices les plus considérables tant de la ville que des faubourgs ; (...); que ces édifices seront mis dans la bordure du plan ; (...); que le tout réuni ensemble sera présenté dans un plan bien levé pour être arrêté par le Bureau de la ville... »<sup>91</sup>*

Comparée à l'état représenté dans le plan Defer, la ville intra muros a peu changé contrairement aux faubourgs et quartiers périphériques. Même si le plan établi par Defer n'est pas aussi exact que celui de Cacault, on peut tout de même y lire une certaine proportionnalité des distances. On notera en observant les deux plans les transformations suivantes :

- L'île Feydeau a considérablement évolué : la surface de l'île a augmenté et cela sans doute, en raison d'un abaissement du niveau d'eau des bras de la Loire<sup>92</sup>. Quatre grands îlots rectangulaires « bâtis » (d'après le dessin) occupent cette nouvelle surface de l'île.
- Les remparts commencent à disparaître : la représentation que donne Cacault des faubourgs périphériques de la ville, et précisément les faubourgs St Clément et celui de Richebourg qui se situent à l'Est de la ville, ne nous permettent pas, contrairement au plan Defer, de distinguer les éléments bâtis. Par contre les surfaces des remparts et les Fossés commencent à être remplacés par des espaces urbanisés.

Après le plan établi par Cacault dont l'objet était le relevé d'un état existant de la ville à la moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les plans qui lui succéderont, répondent à deux préoccupations : celle d'un relevé de la ville à une époque donnée, et celle de « la projection » d'un état futur sur un plan existant.

<sup>89</sup> [BIENVENU 1998]

<sup>90</sup> Les ingénieurs de la marine ainsi que l'architecte Ceineray lors de leur vérification du plan « s'étonnent de la précision extraordinaire, tout ce qu'ils ont examiné se trouvant « aussi juste que le plan d'un cabinet » [BIENVENU 1999].

<sup>91</sup> Délibération, pour confier l'exécution du plan générale de la ville à MM. Portail, architecte, Suet dessinateur, Cacault, arpenteur, 29 avril 1754 [A.M.N, DD.246]. Le résultat de ce travail fut le beau plan connu sous le nom de Plan Cacault, portant le titre de : Plan de la ville de Nantes et de ses faubourgs levé par ordre MM. Les Maire Echevins et Procureur-sindic de ladite ville par le sieur François Cacault, en 1756-1757, gravé par Jean Lattré en 1759. Ce plan fut approuvé par délibération du 10 novembre 1757.

<sup>92</sup> On peut remarquer sur le plan Cacault que de nouvelles petites îles apparaissent dans le bras Nord de la Loire, suite à une probable baisse du niveau d'eau.





Figure 3.50 : Le plan établi par Cacault en 1756-1757 [AMN] (avec le projet du cour des états, à l'est du centre ville)



Figure 3.51 : Partie centrale du plan Cacault 1756-1757 [AMN] (sans le projet du cour des états)



Comparée à l'état représenté dans le plan Defer, la ville intra muros a peu changé contrairement aux faubourgs et quartiers périphériques. Même si le plan établi par Defer n'est pas aussi exact que celui de Cacault, on peut tout de même y lire une certaine proportionnalité des distances. On notera en observant les deux plans les transformations suivantes :

- L'île Feydeau a considérablement évolué : la surface de l'île a augmenté et cela sans doute, en raison d'un abaissement du niveau d'eau des bras de la Loire<sup>93</sup>. Quatre grands îlots rectangulaires « bâtis » (d'après le dessin) occupent cette nouvelle surface de l'île.
- Les remparts commencent à disparaître : la représentation que donne Cacault des faubourgs périphériques de la ville, et précisément les faubourgs St Clément et celui de Richebourg qui se situent à l'Est de la ville, ne nous permettent pas, contrairement au plan Defer, de distinguer les éléments bâtis. Par contre les surfaces des remparts et les Fossés commencent à être remplacés par des espaces urbanisés.

Après le plan établi par Cacault dont l'objet était le relevé d'un état existant de la ville à la moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les plans qui lui succéderont, répondent à deux préoccupations : celle d'un relevé de la ville à une époque donnée, et celle de « la projection » d'un état futur sur un plan existant.

#### - **Plan Lerouge et plan Coulon : tracé du comblement des fossés**

Avec le plan d'embellissement de Ceineray (1761-1766), tout autour de la ville, quais, places et promenades remplacent les murailles. Le plan Cacault a servi de base au plan d'embellissement de Ceineray. Avec la destruction des murailles et le comblement des fossés, la ville peut se relier à ses faubourgs. Places d'entrée de ville, promenade, ligne de quais, canalisation de l'Erdre, annoncent la ville moderne<sup>94</sup>. En 1766, Lerouge établit un plan qui confirme la disparition presque complète des remparts et représente les cours qui remplacent les fossés Est et Ouest (fig. 3.52).



Figure 3.52 : Plan établi par Le Rouge en 1766 [AMN]

Un nouveau plan de la ville est dessiné en 1795 par l'architecte Coulon (fig. 3.53). Ce plan est « le document officiel représentant Nantes pendant la période révolutionnaire »<sup>95</sup>. Il contient le nouvel état

<sup>93</sup> On peut remarquer sur le plan Cacault que de nouvelles petites îles apparaissent dans le bras Nord de la Loire, suite à une probable baisse du niveau d'eau.

<sup>94</sup> Le plan a été présenté en première partie de ce rapport

<sup>95</sup> [BIENVENU 1999, p. 41]

de la ville avec les nouvelles extensions ainsi que les rues à projeter. Les projets de Ceineray autour de la ville paraissent alors complètement réalisés. La rivière d’Erdre est canalisée et la ville étendue à l’Ouest au-dessus du port par Graslin sur les plans de l’architecte Crucy. Quelques projets non encore réalisés figurent dans le plan Coulon : une place devant la cathédrale à l’Est et le quartier de l’entrepôt à l’Ouest<sup>96</sup>.

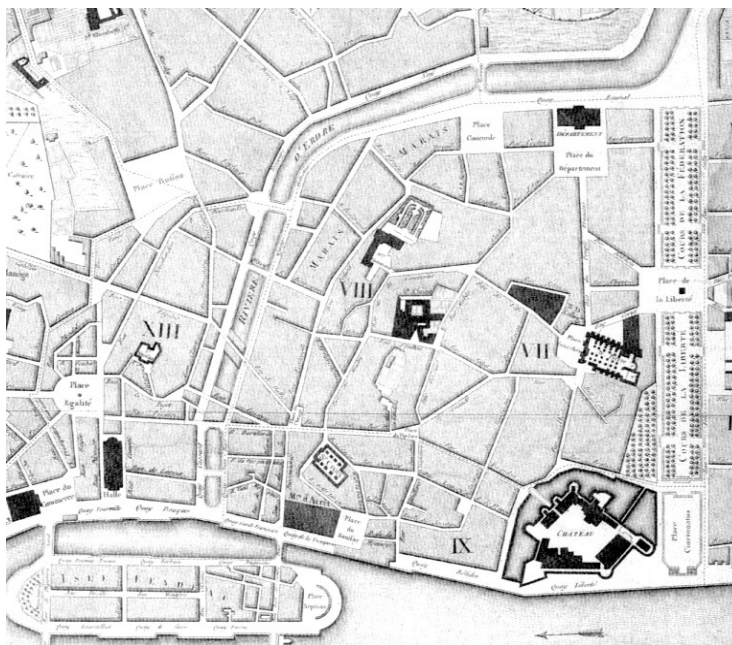


Figure 3.53 : Extrait du plan établi par Coulon en 1795 [AMN]

- **Les plans de Jouanne et Demoget : représentation des alignements et percées**

Le premier plan de Nantes au XIX<sup>ème</sup> siècle ne voit le jour qu’en 1818. Ce plan est celui établi par Peccot<sup>97</sup>. En 1833, Bilange, élève breveté de l’école des mines de St Etienne<sup>98</sup>, réalise un nouveau plan de la ville représentant un territoire semblable à celui du plan établi par Coulon, sans mentionner les jardins. En 1849, L. Amouroux architecte, dessine à son tour un autre plan de Nantes sur un territoire plus étendu que ses prédécesseurs. Mais dans l’ensemble de ces plans nous ne pouvons distinguer avec clarté ce qui fut réalisé de l’alignement des rues ou des percées car au moment où ces plans sont dessinés les alignements continuent encore à se réaliser.

C’est un certain Jouanne, qui dessine à Nantes deux plans de voirie, le premier en 1838 (fig. 3.54) et le deuxième en 1894 (fig. 3.55), qui va nous permettre de comparer l’état des alignements et des percées. Ces deux représentations nous permettent en effet d’identifier assez clairement les évolutions apportées entre les deux dates au réseau de voirie du centre ancien (fig. 3.56).

<sup>96</sup> [BIENVENU 1999]

<sup>97</sup> Devenu architecte voyer de la ville entre 1800 et 1815, il est chargé de réaliser un plan exact de cette dernière. Les autorités de l’époque considéraient en effet que Nantes n’en a pas connu un depuis celui effectué par Cacault. Peccot réalisa deux plans de la ville, un pour y retracer l’état exact et l’autre pour y figurer le plan d’alignement des voies de la ville. Voir au sujet des conditions d’établissement de ce plan [BIENVENU 1999 p. 45]

<sup>98</sup> Comme il est inscrit sur le cartouche du plan.

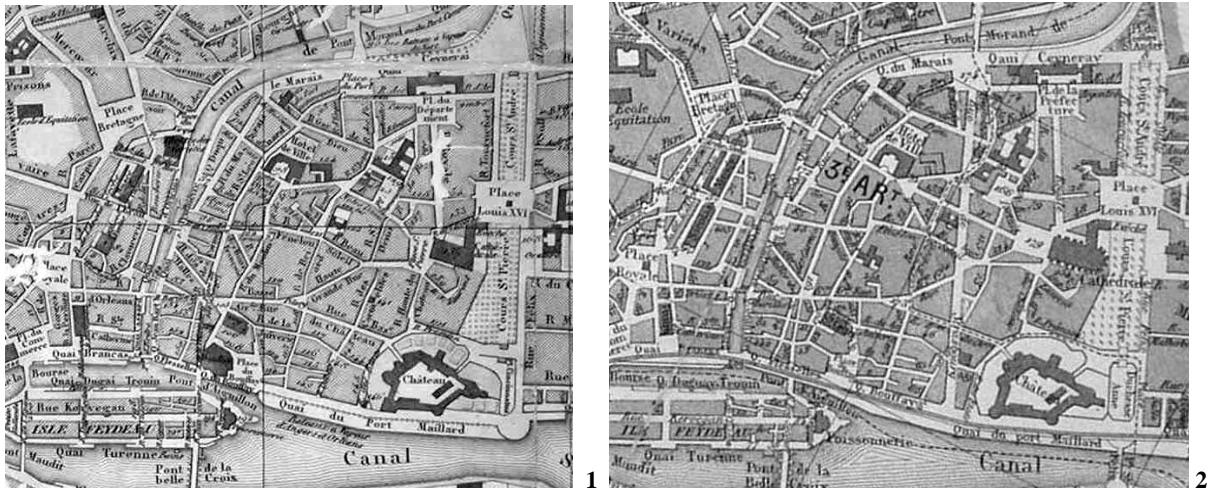


Figure 3.54 et 3.55 : Extraits des plans établis par Jouanne en 1838 (1) et 1894 (2) [AMN]

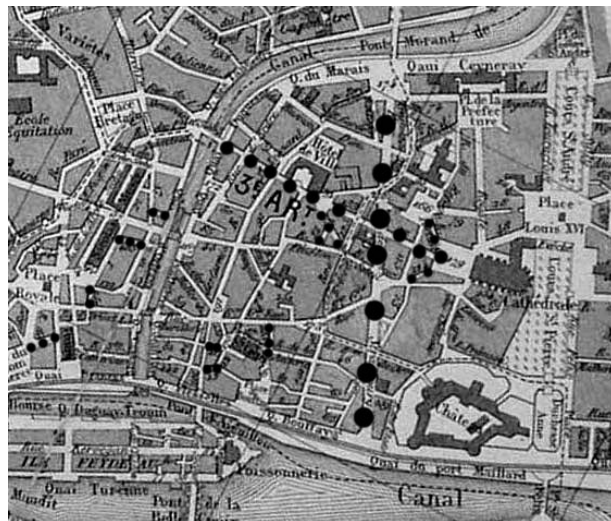


Figure 3.56 : Représentation en pointillés des rues percées entre 1838 et 1894 sur le plan établi par Jouanne en 1894

Après la proposition de Driollet en 1860, l'architecte en chef de la ville A. Demogot établit en 1877 un plan de voirie de la ville sans distinguer la nature des îlots. L'échelle du dessin (1/2000) donne une bonne lisibilité des largeurs de voies et des superficies des îlots. Le plan fait figurer également les rues qui devaient être alignées, ce qui signifie qu'elles ont résisté aux différents règlements et projets d'alignement adoptés jusque là. Le plan de Demogot est le plus explicite quant à la représentation des alignements, puisqu'il représente à la fois l'état des rues avant et après alignement (fig. 3.57).

Les plans de Nantes qui suivront n'auront pas cette clarté du tracé que contient le plan Demogot. Ils seront pour la plupart d'une échelle trop petite pour nous renseigner sur la voirie ou sur l'état des îlots. Dessinés au 1/10.000 et au 1/20.000, ces plans ne servent qu'à délimiter le territoire de la commune et à distinguer les zones urbaines des zones rurales. Le plan établi par Vincent en 1900 confirmera la réalisation des alignements contenus dans le plan Demogot.



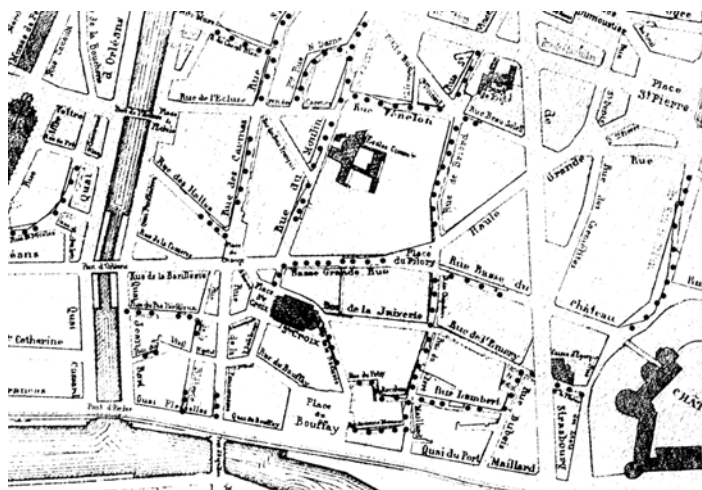


Figure 3.57: Représentation en pointillés des rues faisant l'objet d'un alignement sur le plan établi par Demoget en 1877 [AMN]

## 2.2. Les plans du bâti

Le manque d'information sur la densité du bâti concerne une grande période de l'histoire de Nantes. Il faudra en effet attendre l'année 1835, avec le cadastre Napoléonien, pour voir un plan relevé sur site distinguant ce qui est construit de ce qui ne l'est pas. Les plans représentant les états successifs du bâti sont peu nombreux, ce sont ceux eux qui vont nous servir pour définir les principaux états représentatifs de la ville dans les modélisations. Les plans que nous utilisons, au nombre de cinq, traduisent chacun un changement notable dans la forme urbaine.

### 2.2.1. Le plan Iconographique de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle

La source la plus ancienne qui peut nous renseigner sur la densité des surfaces bâties est une iconographie du centre de Nantes datant de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle<sup>99</sup> et dont les archives ne disposent que d'une reproduction incomplète (fig. 3.58). En comparant le plan Defer à cette iconographie, on est frappé par le contraste existant entre les deux représentations « en plan » et en « trois dimensions » de la ville. On s'aperçoit, selon l'iconographie, que les îlots du centre ville ne sont bâtis qu'en bordure de voirie, et que le reste de la surface de ces îlots est dans la plupart des cas constitué de jardins. La représentation spécifique des plans de voiries pouvait en effet laisser supposer que l'intérieur des îlots était construit ce qui, au vu de ce plan, n'était pas le cas.

<sup>99</sup> Les services des archives municipales font dater cette iconographie de l'année 1680 et Pierre Le Lièvre la situe à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle [LELIEVRE 1988].



Figure 3.58 : Iconographie de Nantes datée de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle [AMN]

### 2.2.2. Le Cadastre Napoléonien de 1835

En juillet 1807 l'Empereur Napoléon Ier déclare la nécessité de mettre en place un cadastre parcellaire, en remplacement de celui en application depuis 1802 et appelé « cadastre des cultures » (faisant référence aux cultures des terres agricoles). L'Empereur ambitionne de faire du cadastre le complément du code civil. Il devrait constituer la garantie de la propriété individuelle. Il ordonne ainsi :

*"... de faire procéder sur-le-champ au dénombrement général des terres, dans toutes les communes de l'Empire, avec arpentage et évaluation de chaque parcelle de propriété. Un bon cadastre parcellaire sera le complément de mon code, en ce qui concerne la possession du sol. Il faut que les plans soient assez exacts et assez développés pour servir à fixer les limites de propriété et empêcher les procès." <sup>100</sup>*

En 1809, la France sera pour cela décomposée en douze divisions cadastrales dirigées chacune par un inspecteur général des contributions directes et du cadastre (instruction ministérielle du 28 février 1809).

Nantes ne verra son cadastre établi qu'en 1835. Il s'étend sur l'ensemble du territoire de la ville et comporte plusieurs sections. Dans chaque section, le bâti y est clairement représenté. C'est le premier plan « géométrique » qui distingue les surfaces bâties des surfaces non bâties à l'intérieur des îlots (fig. 3.59). Ce plan cadastral dit « cadastre napoléonien » est la seule source, pour la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, qui va rendre compte de l'emprise du bâti.

<sup>100</sup> Histoire du cadastre, Recueil méthodique des lois, décrets, règlements, instructions et décisions sur le cadastre de la France, Imprimerie impériale, 1811. 183p. (pp. 3) [AMN]



1. Section représentant le quartier de la place St Pierre



2. Section du cadastre représentant le quartier de la place Royale



3. Section du cadastre représentant Un îlot des quartiers Est de la ville.



4. Section du cadastre représentant le quartier de la place du Bouffay

Figure 3.59 : Extraits du cadastre Napoléonien de la ville de Nantes [AMN]

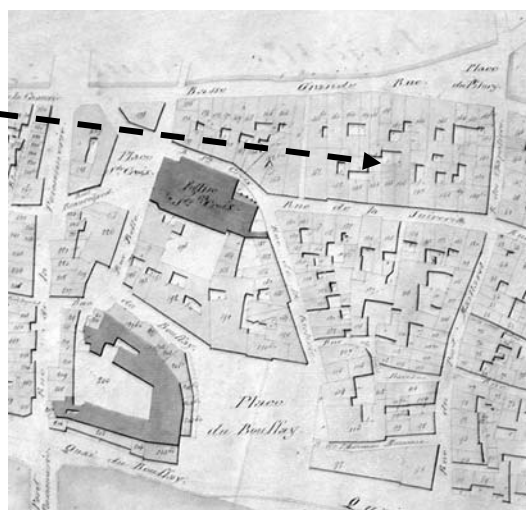
L'examen du plan nous livre une ville beaucoup plus dense qu'à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle. Le quartier du Bouffay, partie la plus ancienne de la ville d'aujourd'hui, est le quartier le plus dense. Il subsiste à l'extérieur du centre ancien des îlots très peu densifiés, qui ressemblent à l'état des îlots du centre représenté dans le plan iconographique. Ceci nous permet d'avoir une idée du taux d'occupation du bâti, lorsque les îlots ne sont édifiés qu'en bordure des voies. Les deux sections du cadastre représentant un îlot du quartier Est et les îlots du quartier du Bouffay illustrent bien cette différence de densité bâtie entre les parties intra-muros et extra-muros (fig.3.59 – 3 et 4).

Le développement « spontané » de la ville, produit des rues de plus en plus étroites et des îlots de plus en plus denses. Il est même étonnant de voir un niveau de densification des îlots du centre intra-muros aussi important au bout d'une centaine d'années seulement.

Alors que le quartier du Bouffay avait à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle des îlots constitués uniquement de bâtiments longeant les voies, en 1835, date de réalisation du cadastre Napoléonien à Nantes, les îlots sont déjà « saturés ». Les seuls espaces qui restent libres à l'intérieur des îlots sont les cours intérieures qui se trouvent réduites au strict minimum. (fig. 3.60)



*Ilots du Bouffay en 1680 :  
« édification en bordure de voie »*



*Ilots du Bouffay en 1835 :  
« édification sur la surface de l'îlot »*

*Figure 3.60 : Extraits de l'iconographie de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle et du cadastre Napoléonien de 1835 : « Quartier du Bouffay ».*

Ce plan servira donc pour le calcul des densités bâties du centre ancien ; de même il nous permettra d'évaluer les largeurs des rues et la surface de sol occupée par le réseau de voirie. Il servira aussi, par l'exactitude de son tracé (il s'agit bien d'un plan géométrique levé sur terrain), d'évaluer les densités de la ville à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle en comparaison avec l'image iconographique, puisque cette dernière n'est pas représentée en plan.

Le cadastre napoléonien constitue donc un plan de référence pour l'évaluation des paramètres TEB, relatifs à la voirie, et aux densités bâties pour la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.

### 2.2.3. Le plan de F.J.Pinson établi en 1880

F.J.Pinson<sup>101</sup> établit en 1857 le premier plan général de Nantes, qui représente clairement les surfaces bâties de la ville. Le plan cadastral ne représentait le territoire de la ville que par des sections référencées à un plan d'assemblage global, alors que Pinson dessine un plan distinguant, sur une même planche et sur tout le territoire de la ville, les surfaces bâties des surfaces non bâties. Ce plan constitue une nouvelle étape dans la représentation des surfaces urbaines, après le premier plan géométrique établi par Cacault et le premier plan cadastral représentant le bâti, mais qui nécessitait « un assemblage » des planches des différentes sections. Il est donc le premier plan global de la ville distinguant le bâti du non bâti.

Après le plan de 1857 (fig. 3.61-1 et 3), Pinson va en réaliser deux autres successivement en 1869 et en 1880. Celui de 1869 ne diffère que légèrement du premier, notamment en périphérie, alors que celui de 1880 (fig. 3.61-2) représente les nouvelles percées orthogonales de la ville. Ce dernier représente ainsi le nouvel aménagement de la place saint Pierre qui est encore au stade de projet, mais qui se réalisera conformément au projet quelques années plus tard. Réalisé 50 ans après le cadastre Napoléonien, ce plan nous permet donc une lecture précise des densités horizontales dans les tissus bâtis, ainsi qu'un examen précis des secteurs urbains concernés par les percés.

<sup>101</sup> Félix Joseph Pinson était agent voyer de la Loire inférieure ancien géomètre de 1<sup>ère</sup> classe.



Partie centrale du plan de 1857

Partie centrale du plan de 1880



Figure 3.61 : Parties centrales des plans de 1857 et 1880 établis par PINSON



Que ce soit en terme de précision du tracé ou en terme de nature de l'information représentée, le plan établi par J.F.Pinson est le plus représentatif de l'état de la surface de la ville et le seul qui distingue les surfaces bâties dans les îlots dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Il constituera de ce fait un plan de référence pour les reconstitutions de l'état du bâti pour la simulation de l'environnement climatique à la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle.

#### 2.2.4. Le Plan – projet de reconstruction de 1945

Nantes est victime, en 1943 et 1944, des bombardements de la seconde guerre mondiale. Un plan monumental (représentant en volumétrie détaillée les monuments) a été dressé en 1945 pour reconstruire les bâtiments touchés par les bombardements<sup>102</sup> (en marron dans le plan) et réaménager, par la même, les espaces urbains (fig. 3.62). Ce plan représente distinctement le bâti, les espaces verts et les arbres ainsi que les surfaces d'eau. La partie intra-muros de l'Erdre et les bras de la Loire sont comblés, et remplacés par des cours plantés d'arbres.



Figure 3.62 : Extrait du plan de reconstruction et d'aménagement de 1945<sup>103</sup> (en gris ce qui est à conserver, en marron à reconstruire)

Les parties historiques du centre ancien, détruits par les bombardements vont être reconstruits à l'identique surtout dans les secteurs urbains ayant fait l'objet d'ordonnancement de façades, comme la place Royale. Les voies du centre sont traitées sur le modèle de la ville ancienne et les bâtiments reconstruits respectent toujours les anciens alignements avec, quand cela est possible, un léger élargissement des rues.

L'intérêt du plan de la reconstruction réside dans sa représentation des différents types de surfaces. En le comparant à l'état actuel du centre de la ville, nous n'y trouverons aucune modification notable. Il sera alors représentatif de l'état « final » des transformations de la forme des

<sup>102</sup> Déclarée commune sinistrée à la suite des bombardements de 1943, Nantes engage la reconstruction dès 1945. Sans repenser la forme de la ville, on s'oriente vers une actualisation du plan d'alignement et on multiplie les projets d'élargissement des voies et de création des percées en centre ville.

<sup>103</sup> Ce plan a été peint par les services municipaux.

espaces urbains. Les modifications ultérieures ne concerneront que les matériaux des sols et des murs et quelques interventions ponctuelles comme la tour de Bretagne construite en 1969. On peut donc assimiler ce plan au dernier état des surfaces bâties dans le centre ancien de Nantes.

### 2.2.5. Le plan « numérique » de la ville actuelle

La ville de Nantes s'est dotée d'un plan numérique en 1999. Ce dernier représente, sous forme de calques numériques, les différents éléments de la surface urbaine dont ; les îlots, les bâtiments, les espaces verts, les arbres, les surfaces d'eau et les cours d'eau (fig. 3.63).

L'existence de ce plan sous forme numérique permet de calculer les fractions occupées par chaque type de surface du sol urbain ainsi que les la fraction de surface bâtie à l'échelle du territoire du centre ancien. Ce plan constituera en raison de son exactitude, le plan de référence pour la superposition des différents états de la ville. Ainsi le tracé des plans cités précédemment devra être ajusté pour se caler au plan numérique de la ville actuelle, puisque, à partir de 1945 nous pouvons considérer qu'il n'y a pas eu de transformations notables du bâti.

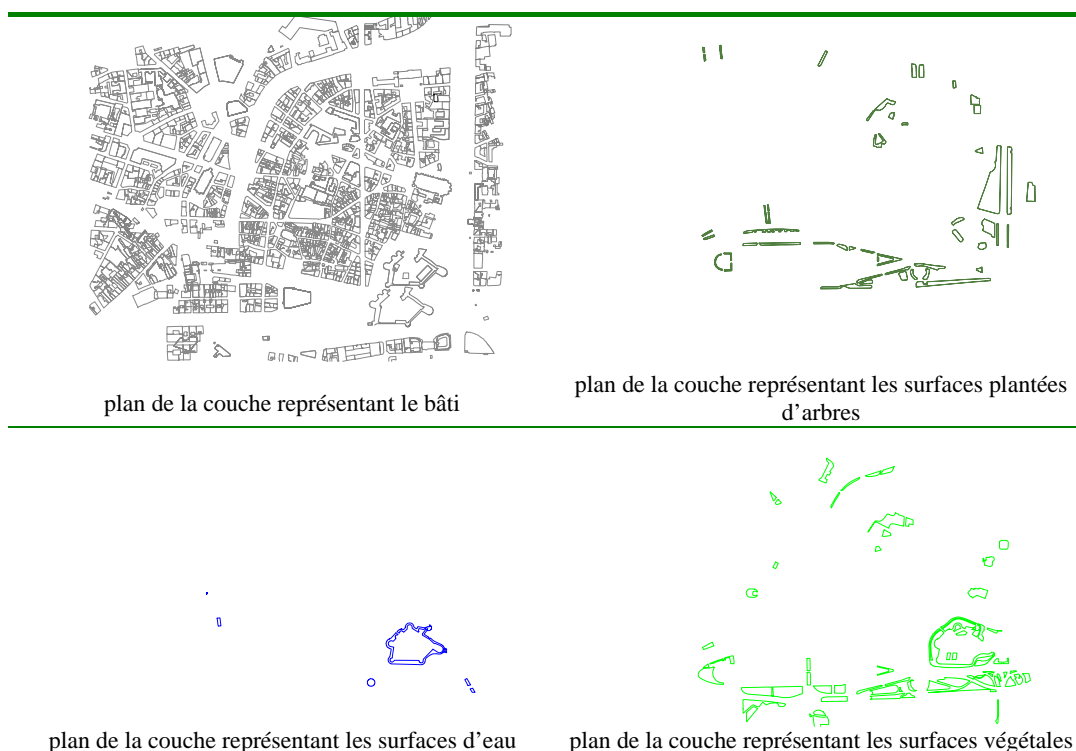


Figure 3.63 : Les différentes couches du fichier numérique de la ville de Nantes de 1999 selon l'étendu du centre ancien

### 2.3. Les images iconographiques et la troisième dimension des surfaces bâties

Les sources citées précédemment ne nous permettent de relever que des informations sur l'état planimétrique du centre ancien de la ville de Nantes. Voyons à présent à partir de quelles sources il est possible d'évaluer la hauteur des bâtiments sur le territoire urbain de notre analyse ?

Rappelons, en premier lieu, que le modèle TEB permet d'effectuer des simulations à l'échelle d'un territoire urbain homogène. De ce fait le modèle ne permet de prendre en compte que des valeurs de hauteur moyennées sur l'ensemble de territoire analysé.

Nous pouvons considérer que les hauteurs des bâtiments étaient assez homogènes sur le territoire du centre ville et ceci quelles que soient les époques. Ceci est dans une certaine mesure confirmé par

les données iconographiques dont nous disposons aujourd'hui des bâtiments et des rues de la ville [COSNEAU 1973]. De ce fait nous supposons que la connaissance des hauteurs de quelques bâtiments devrait suffire pour représenter l'état de l'ensemble des bâtiments d'un secteur à une époque.

Les sources nous permettant de relever les hauteurs du bâti dans le centre ancien de Nantes sont les suivantes : le plan iconographique de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, les façades des projets de bâtiments et les iconographies de rues ou de parties de rues du centre ancien.

### 2.3.1. L'image aérienne du plan iconographique de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle

La plus ancienne source traduisant la hauteur des bâtiments est le plan iconographique que nous avons précédemment présenté parmi les plans du bâti. Ce plan donne, malgré son échelle sommaire, une lecture intéressante du nombre d'étages des édifices. C'est en tout cas la seule image que nous possédons aujourd'hui de la troisième dimension du centre ancien dans toutes les époques. Sur l'extrait ci-dessous (fig. 3.64), représentant quelques îlots autour de la place du change, nous pouvons constater par exemple que les bâtiments de ce quartier sont composés soit uniquement d'un rez-de-chaussée soit d'un rez-de-chaussée et d'un étage. Seuls quelques édifices ont deux étages au-dessus du rez-de-chaussée.

Certes ce n'est pas une échelle métrique qui nous renseigne sur les hauteurs, mais ce plan nous permet une lecture du nombre d'étage ce qui est déjà une information très importante, surtout que ce plan est appliqué à tout le territoire du centre ancien.



Figure 3.64 : Extrait du plan iconographique de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle représentant quelques rues près de la place du change

### 2.3.2. Les façades des projets de bâtiments

Les bâtiments du centre ancien vont bien entendu subir un processus de surélévation dont l'aboutissement peut s'observer aujourd'hui quand on parcourt les rues du centre ancien. Ce processus, qui résulte de la densification progressive de la ville, va conduire à rajouter un, puis deux et parfois même trois étages supplémentaires. Mais nous il est assez difficile de définir quand cela se réalise sur l'ensemble du centre ancien et selon quelles phases.

Ce dont on dispose en effet dans les archives ce sont des iconographies sur des bâtiments isolés. P.Lelièvre fait figurer par exemple dans son ouvrage [LELIEVRE 1988] la façade d'une boutique située sur la rue « Petite Rue Notre Dame », dont la propriétaire demandait de réaliser une surélévation dès 1765 (fig. 3.65), ce qui nous montre qu'à cette date le centre ville n'est pas encore entièrement rehaussé.



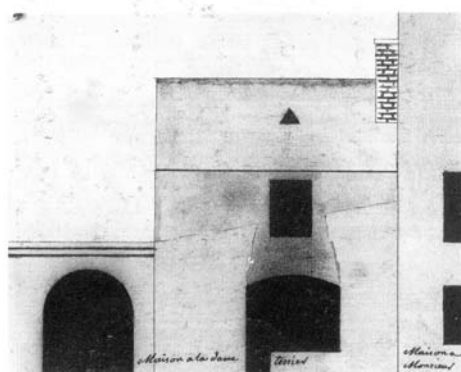


Figure 3.65 : Façade d’une boutique : petite rue notre dame, 1765 [LELIEVRE 1988, p.255]

D’un autre côté, toujours au XVIII<sup>ème</sup> siècle, des architectes comme Crucy et Ceineray multipliaient les projets de bâtiments privés et publics dont la plupart subsistent encore aujourd’hui. Les bâtiments projetés par ces architectes s’élèvent pour la plupart à deux ou trois étages au-dessus du rez-de-chaussée.

Ceineray dessine en 1779 une façade de bâtiment situé sur le quai de l’Hôpital (fig. 3.66) qui atteint une hauteur à l’égout du toit de 16,44 mètres. Il y précise, à droite de la planche d’élévation, les hauteurs de chaque étage :

- 17 pieds et 2 pouces pour le rez-de-chaussée : soit **5,24** mètres
- 25 pieds et 8 pouces pour le corps composé du deuxième et troisième étage : soit **7,83** mètres
- Et 11 pieds et 2 pouces pour le troisième et dernier étage : soit **3,37** mètres

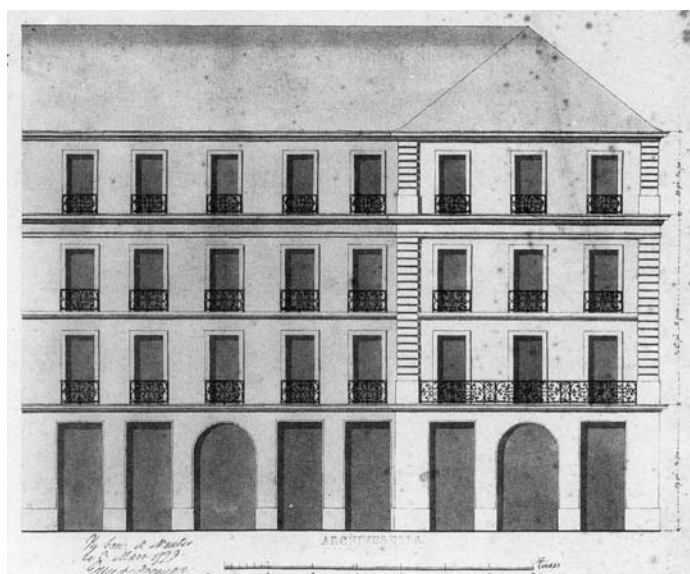


Figure 3.66 : Elévation des maisons du Quai de l’Hôpital, établit par Ceineray en 1779 [LELIEVRE 1988, p. 261]

La deuxième moitié du XVIII<sup>ème</sup> est une période de construction importante. C’est à partir de cette période que la plupart des édifices vont commencer à être rehaussés. La surfaces bâties sont donc en pleine transformation et ne connaissent pas encore d’homogénéisation. L’iconographie d’une maison située sur le pont Rousseau, et détruite après l’élargissement de ce dernier en 1777, nous le montre bien (fig. 3.67). Au moment où Ceineray dessine ses édifices à deux et trois étages et aux façades ouvertes, la maison sur le pont Rousseau, comme quelques autres maisons du centre ancien, ne dépassait pas un étage et avait des petites ouvertures en façade.

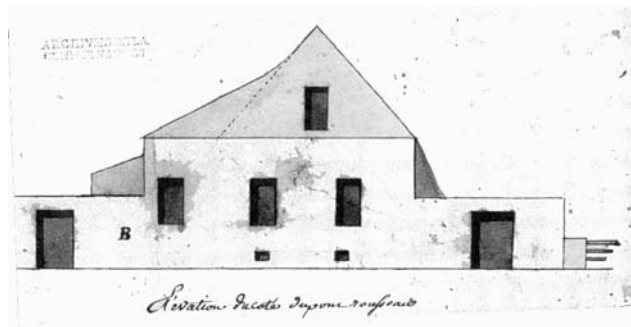


Figure 3.67 : Maison de la rue Dos-d'Âne<sup>104</sup>, maison située sur le pont Rousseau, détruite en 1777 après son élargissement

Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, c'est le savoir-faire des architectes qui, en respectant les mêmes principes architecturaux, pouvait conduire à la construction de bâtiments d'une hauteur homogène. Ceineray nous offre un exemple de ce type d'édifice avec l'élévation des maisons du Quai de l'hôpital établi en 1779. L'architecture du XVIII<sup>ème</sup> avec une même typologie de construction produira ainsi des édifices aux façades similaires. On l'avait évoqué avec les ordonnances architecturales, des architectes comme Ceineray vont appliquer une même façade de bâtiment à toute une rue ou toute une place et cela quel que soit l'usage du bâtiment.

Nous déduisons de cette deuxième catégorie source que la hauteur des surfaces bâties au XVIII<sup>ème</sup> siècle était dans une phase intermédiaire entre celle de la fin du XVII<sup>ème</sup> et celle qui verra rehausser à une même hauteur moyenne tous les bâtiments du centre ancien. Nous supposons que le bâtiment dessiné par Ceineray avec une hauteur approximative de 16 mètres est assez représentatif des bâtiments qui existaient à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle.

### 2.3.3. Les iconographies de rues ou de parties de rues du centre ancien

Une série d'iconographies du centre ancien de Nantes, dessinés pour la plupart au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle, nous donne une image à la fois différente de ce que nous venons de présenter et différente des hauteurs des bâtiments actuels (fig. 3.68 et 3.69). Les iconographies, de la grande rue vieille (fig. 3.68-6), celle de la petite rue Sainte Croix (fig. 3.68-4) ou encore celle de la rue Belle image (fig. 3.68-5), nous montrent en effet une ville sur-densifiée plus haute que la ville actuelle. On peut supposer que ces densifications trop poussées ont été une des raisons qui ont conduit à l'élargissement des rues ou à la limitation des hauteurs des bâtiments dans les règlements de la ville. La plupart de ces bâtiments ont été détruits et remplacés par des bâtiments moins hauts et sans saillies.

A partir de ces informations sur la surélévation importante des bâtiments nous admettons que la ville a atteint des hauteurs de bâtiments plus importantes que celles de la ville d'aujourd'hui. Les hauteurs de bâtiments qui suivront cette période que nous situons à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, seront donc moins importantes.

<sup>104</sup> [LELIEVRE 1988, p. 257]



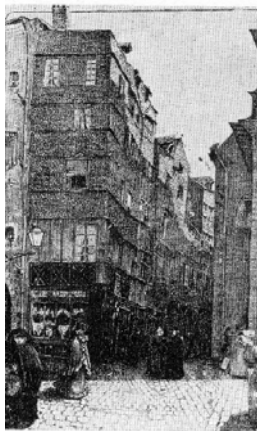
1. Rue des Carmes. Image publiée en 1837



2. Place du change : maisons du 15<sup>ème</sup> siècle



3. Maison des enfants nantais (non datée)



4. Petite rue Ste Croix 19<sup>ème</sup> siècle



5. Rue Belle image publiée en 1860

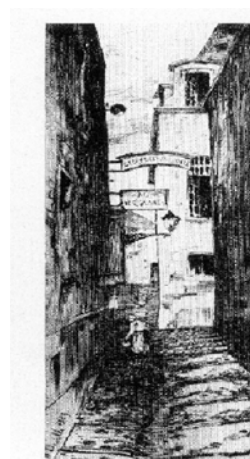


6. Grande rue vieille, image publiée en 1866

Figure 3.68 : Images iconographiques du quartier du Bouffay [Cosneau 1973]



1. Rue de la vierge datant du 18<sup>ème</sup> siècle



2. Rue Dancin en 1928.

Figure 3.69 : Images iconographiques de deux rues du quai de la Fosse [Cosneau 1973]

## 2.4. Synthèse des transformations urbaines selon cinq états représentatifs

Finalement, pour la reconstitution des transformations urbaines, cinq états peuvent être identifiés. Les sources sur lesquels nous nous appuyons pour cette reconstitution sont au nombre de cinq : le plan iconographique ; le plan Cacault ; le cadastre napoléonien ; le plan Pinson de 1880 ; et enfin le plan de la ville actuelle. Parmi ces plans, seul le plan Cacault ne représente pas le bâti. Mais nous le prenons en compte pour deux raisons : d'abord au titre du premier plan géométrique de la ville, il nous permettra d'évaluer l'état initial des largeurs de rues avant les élargissements et les alignements des rues. Ensuite parce que sa date de réalisation correspond à quelques années près aux transformations urbaines qui ont touché au pavage des rues et à la substitution des édifices en pan de bois par des bâtiments en pierre. Ce sont donc uniquement des changements de matériaux de surfaces que le plan Cacault permet de reconstituer.

Les dates d'établissement de ces cinq plans seront donc celles qui représentent les dates clés des transformations urbaines. Nous faisons ainsi l'hypothèse d'un rapport direct entre un plan représentatif d'un état de la ville et la définition d'une phase de transformation des éléments de la forme urbaine. Une phase peut être définie comme un regroupement d'un certain nombre d'interventions qui ont lieu dans un intervalle de temps donnée. Nous considérons cet intervalle de temps comme étant celui qui sépare la date d'établissement d'un plan de la date d'établissement du plan suivant.

N'ayant pas d'informations précises sur la datation de la réalisation des différentes transformations urbaines, qui le plus souvent s'opèrent simultanément et sur des durées parfois longues, on s'est donc référé aux plans de la ville, sur lesquels on peut lire les changements apportés à la forme urbaine. Ce qui signifie que chaque plan devra représenter un ensemble de transformations qui se sont réalisés dans une période assez proche de la date réalisation du plan. En d'autres termes les cinq plans représentent des séquences de l'évolution de la forme urbaine. Ainsi pour analyser les effets des transformations urbaines à Nantes, cinq états représentatifs regroupent l'ensemble des interventions que nous avons analysées en première partie de ce chapitre.

Hormis la densification des surfaces bâties et la modification des prospectes de rues qui vont changer à chaque état (sauf le dernier), les autres transformations dans ces cinq états sont (fig. 3.70) :

1. Premier état ; la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle : cet état représente l'état initial du centre ancien de la ville avant toute intervention, tel qu'il est représenté dans l'iconographie datant de 1680. Les éléments déterminants de cet état initial de la ville sont les rues non pavées, les édifices en pan de bois, la faible hauteur des bâtiments ainsi qu'une très faible densité bâtie. Pour la reconstitution du tracé des voies nous nous appuyerons sur le plan Cacault.
2. Deuxième état ; XVIII<sup>ème</sup> (1756) : cet état représentera trois principales transformations : le pavage des rues ; la substitution des édifices en pan de bois par des édifices en pierre ; et la surélévation des bâtiments. On supposera la réalisation de cette phase entre la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle et la fin du XVIII<sup>ème</sup>. Le plan représentatif de cette transformation reste le plan Cacault.
3. Troisième état ; début du XIX<sup>ème</sup> (1835) : entre la date de réalisation du plan Cacault est celle relative au plan cadastral, les alignements et les élargissements de rues commencent à se réaliser, les fossés périphériques du centre sont comblés et les îlots densifiés. Nous admettons aussi dans cette phase que l'enterrement du réseau des eaux drainées en surface est réalisé, même s'il ne l'est pas complètement dans toutes les rues. A ces transformations salubristes, le centre ancien connaît aussi à la même époque une densification de l'intérieur des îlots qui, selon le plan iconographique, étaient formés de jardins à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle.

4. Quatrième état ; fin du XIX<sup>ème</sup> (1880) : depuis le plan cadastral jusqu'au dernier plan établi par Pinson en 1880, on assiste à la réalisation sur l'ensemble du centre ancien des alignements et des élargissements de rues ainsi qu'à la création des percées. Dans cette même période, les cours intérieures sont pavés.
5. Cinquième état ; l'après guerre et la ville actuelle : ce dernier état représentatif de la réalisation des transformations urbaines du centre ancien résulte du comblement de l'Erdre et des bras Nord de la Loire. Nous introduisons aussi dans cet état une donnée plus récente, mais qui touche désormais toute construction c'est l'introduction des isolants thermiques dans les édifices<sup>105</sup>.

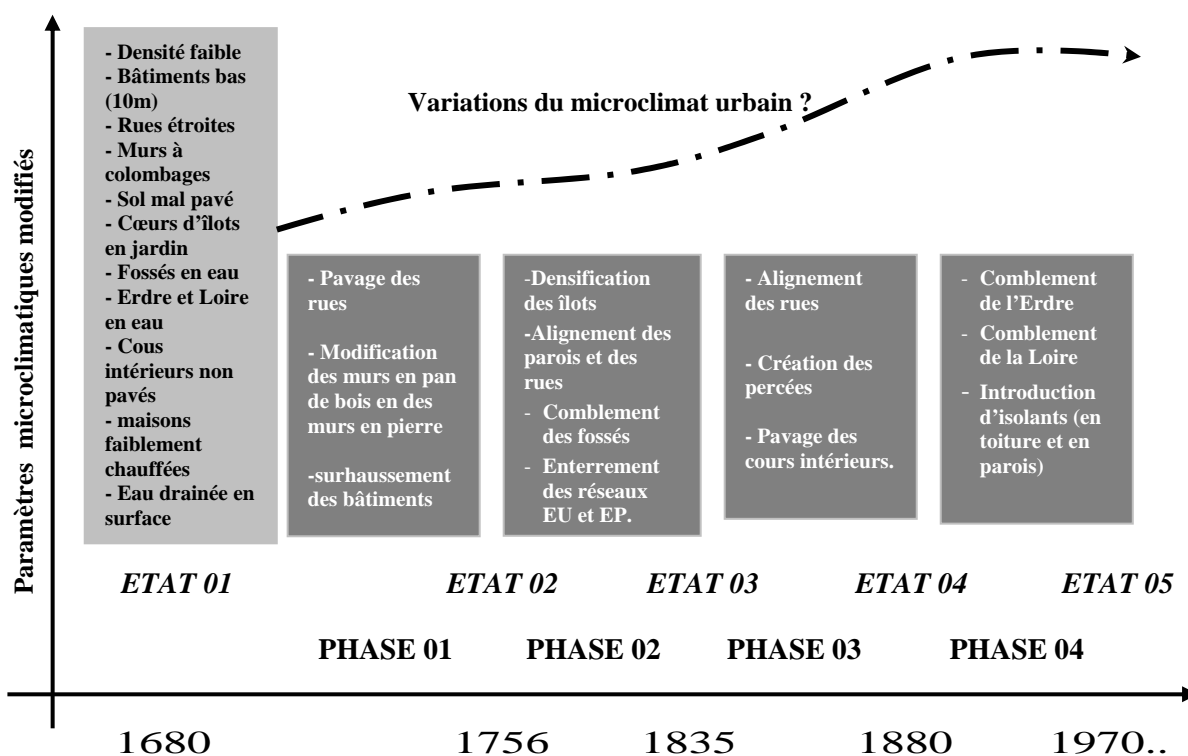


Figure 3.70 : Schéma synthétique des états représentatifs du centre ancien de Nantes et les phases de transformation analysés pour les simulations

<sup>105</sup> La prise en compte de l'isolation thermique nous paraît importante car elle est la dernière transformation « irréversible » à l'échelle de l'ensemble des fragments bâtis du centre. En effet les bâtiments du centre ancien ont introduit (on admet que cela s'est réalisé sur l'ensemble des bâtiments) une nouvelle épaisseur dans les murs qui correspond à celle des isolants thermiques.

### 3. RECONSTITUTION HYPOTHETIQUE DES ETATS ANCIENS DU CENTRE DE NANTES

Avant de constituer les états représentatifs des différentes transformations urbaines, rappelons, tout d'abord, que la reconstitution de ces états vise la simulation de l'environnement climatique physique, et non une présentation muséographique. Cette reconstitution a donc pour objectif de caractériser :

- d'une part, la mise au jour et la représentation cartographique des principales caractéristiques de la surface urbaine au travers une liste de variables qui constituent les entrées du modèle TEB, utilisé pour la modélisation de la surface urbaine et ceux du modèle ISBA, utilisé pour la modélisation des surfaces non urbaines.

- D'autre part, leur quantification numérique pour pouvoir effectuer les simulations

En d'autres termes, nous devons transposer les informations inscrites dans les différentes sources en des valeurs numériques traduisant les cinq états représentatifs, dans un même territoire, des transformations du centre ancien de Nantes.

Les données d'entrées nécessaires aux simulations sont de deux types :

- Les fractions de surface composant chaque type de sol non urbain : Ce sont des fractions de surface liées au types de sol étudié. Elles englobent trois types de sols :
  - la fraction de surface naturelle (a) : espaces verts + sol en terre plein
  - La fraction de surface d'eau (b) : toutes surfaces d'eau
- Les paramètres en relation avec la surface urbaine : il s'agit de deux types d'informations :
  - des informations géométriques concernant le plan et les hauteurs des surfaces bâties :
    - la fraction de surface urbaine (c) : surfaces de bâtiments + sol minéral. avec la condition suivante :  $(a)+(b)+(c) = 100\%$  de la surface du territoire étudié
    - La densité bâtie : elle correspond à la fraction de surface occupée par les bâtiments par rapport à la surface du sol urbain.
    - Le prospect des rues : Le rapport moyen Hauteur/Largeur de l'ensemble des rues (h/w dans le modèle)
    - Le prospect moyen des bâtiments: Le modèle, dans la version utilisée pour les simulations<sup>106</sup>, prend en compte le prospect moyen des bâtiments qui est le rapport Hauteur moyenne des bâtiments / leur largeur. (h/l dans le modèle)
  - Des informations physiques et anthropogéniques :
    - les paramètres physiques : (voir liste des variables dans le chapitre précédent)
    - Les paramètres anthropogéniques : Le modèle prend en compte les paramètres anthropogéniques qui sont la production des flux de chaleur et des flux hydriques du fait des usages de la ville (transport, chauffage et industries). Mais en ce qui concernera les simulations nous ne prendrons en considération que :
      - Le chauffage : en supposant une température minimum constante à l'intérieur des bâtiments.
      - La fraction de surface du sol des rues occupée par le réservoir d'eau : habituellement cette valeur n'est pas donnée comme entrée dans le modèle pour les simulations de villes contemporaines. L'existence d'un réseau de drainage en surface dans les états anciens de la ville, nous a conduit à donner une fraction de surface d'eau présente sur le sol en permanence. Cette valeur, comme on le verra, doit être spécifiée dans le code du modèle.

<sup>106</sup> Dans la version la plus récente du modèle TEB (2004) ce paramètre a été remplacé par celui de la fraction de surface des murs qui est égal à la surface des murs/la surface du territoire analysé.

Pour évaluer l'ensemble de ces paramètres nous nous appuyons à la fois sur des reconstitutions numériques, sur des hypothèses définies à partir des textes et règlements anciens, ou dans les témoignages sur la ville actuelle ou encore sur une reconstitution hypothétique du processus de transformation de la ville provenant des travaux de morphologie urbaine.

### 3.1. Principe de reconstitution numérique des plans anciens de la ville

La reconstitution des états anciens du centre de Nantes a été réalisée en partant de l'état actuel de ce dernier. Le format numérique du plan actuel de la ville permet d'avoir une représentation « exacte » de la ville à laquelle seront superposés les différents états « antérieurs ». Le territoire analysé reste identique dans les cinq états étudiés. Il inclut les surfaces bâties du centre ancien et sa périphérie immédiate composée des anciens fossés à l'Est et à l'Ouest, des bras Nord de la Loire au sud et de l'ancien cours de l'Erdre au nord. L'étendue de la surface et du périmètre de ce territoire (fig. 3.71) sont successivement : 1,64 km<sup>2</sup> et 5,13 km.

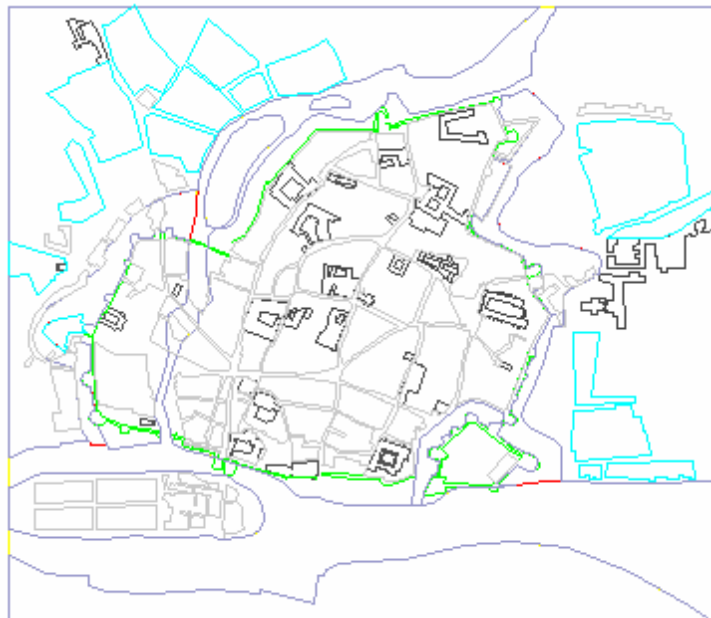


Figure 3.71 : Etendu de la maille d'analyse représentée sur la reconstitution numérique en filaire du plan Cacault (taille de la maille : 1,64 km<sup>2</sup>)

Pour pouvoir traduire les différents plans historiques représentatifs des états successifs de la surface urbaine, un calcul de l'emprise des diverses occupations du sol urbain a été effectué (zones non bâties, rues, jardins, cours...). Compte tenu de la complexité géométrique de la forme des différentes surfaces et des échelles dimensionnelles différentes d'un plan à un autre, il a été indispensable d'utiliser un modèle numérique qui puisse à la fois calculer les surfaces des polygones complexes de chaque surface et effectuer des opérations d'homothétie de ces polygones pour pouvoir superposer les échelles des différents plans. Pour réaliser ces opérations, on a utilisé le logiciel AUTOCAD versions 14 et map 2000.

La reconstitution numérique s'appuie sur deux méthodes. La première, que l'on pourrait qualifier d'ascendante, part de la numérisation des plans historiques pour remonter à l'état actuel de la ville ; et la seconde « descendante », qui, à l'inverse de la première, s'appuie sur le plan de la ville actuelle, pour reconstituer les états anciens. En partant du plus ancien pour aboutir au plus récent, on garantit la représentation de tous les éléments contenus dans les plans mais sans garantie d'une bonne superposition des différents états. En partant de l'état actuel, on résout le problème de superposition,



mais on ne peut garantir l'exactitude de l'implantation des éléments reconstitués. Les deux démarches sont donc complémentaires. Nous avons ainsi procédé à une reconstitution des cartes anciennes, puis à la modification de leur échelle de représentation, de telle sorte à ce qu'elles se superposent « le plus possible »<sup>107</sup> à l'état actuel de la ville. La reconstitution des plans a été effectuée à partir d'une digitalisation des cartes historiques, puis une reconstitution filaire des polygones correspondant aux différentes surfaces à l'aide du logiciel AUTOCAD. La première phase de reconstitution a donc concerné la numérisation des différents plans anciens correspondant à l'étendue du territoire analysé. La deuxième phase a consisté à les caler au plan de la ville actuelle qui existe au format numérique et de s'assurer ainsi de leur exactitude géométrique.

Le principal obstacle à une reconstitution diachronique de la forme urbaine est en effet celui du décalage d'échelle pouvant exister entre les plans anciens. Pour le cas de l'histoire de Nantes, il existe très peu de travaux qui ont tenté de réaliser la superposition des différents plans du centre ancien de la ville. J. Bienvenu, par exemple, dans sa récente description diachronique de la ville et de son centre [BIENVENU 1999], n'a pas dépassé le stade du recueil commenté des différents plans anciens.

Mentionnons cependant, parmi les rares travaux qui ont tenté cette superposition des plans, des plans de reconstitution de l'état du centre intra-muros datée de l'année 1680 que l'on retrouve dans les archives municipales de la ville de Nantes<sup>108</sup>. La principale source ayant servi à cette reconstitution est le plan Cacault de 1756 (comme nous l'avons supposé lors de la définition des deux premiers états du centre ancien, l'auteur du plan a considéré à son tour que l'état de la voirie a été conservé entre 1680 et 1756). Ce travail a le mérite de reconstituer le plan Cacault selon une échelle dimensionnelle précise (fig. 3.72).



Figure 3.72 : **Reconstitution par A. Des Beauvais du centre Intra-muros en 1680 [AMN]**  
(représentant les activités urbaines réparties par parcelle)

<sup>107</sup> Même si dans le cadre de notre problématique, la superposition effectuée suffit amplement, il reste que d'un point de vue géométrique elle n'est pas parfaite. Car, ne disposant pas d'outil permettant d'effectuer des homothéties automatiques, nous avons procédé manuellement selon les possibilités de l'outil de dessin utilisé.

<sup>108</sup> Voir [AMN, Plan Des Bauvais].



Signalons aussi, une autre superposition (fig. 3.73), effectuée par les services municipaux de la ville de Nantes lors de l'établissement du plan du secteur sauvegardé, qui fait figurer sur une même carte le tracé du plan Cacault et celui de la ville actuelle. Ce plan nous permet donc de mesurer, en terme de surface de voiries, ce qui s'est transformé entre l'état du centre ancien de la ville en 1756 et son état aujourd'hui.

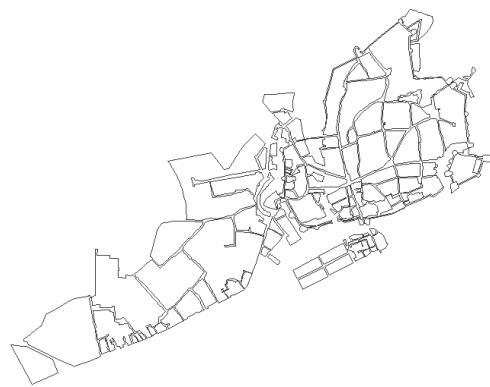


Figure 3.73 : Extrait de la Superposition du plan Cacault (gris) et du plan actuel (traits blanc)

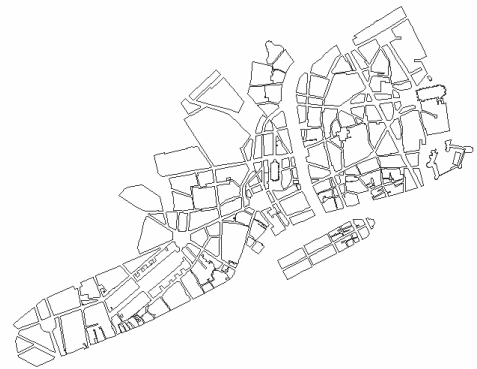
Mais il reste que ce sont là des reconstitutions relatives à un seul état de la ville qui sont insuffisantes dans le cadre de notre analyse diachronique. Le calage des plans anciens au plan numérique de la ville actuelle, permet de s'assurer d'une exactitude géométrique de ces plans, largement suffisante pour les besoins de cette analyse. Nous avons donc reconstitué les différents plans représentatifs des quatre états anciens avant celui de la ville actuelle puis nous les avons superposés au plan actuel et modifié leur échelle selon celle de ce dernier. Cette superposition des plans et leur ajustement ont fait apparaître des différences assez notables, comme celles résultant par exemple des reconstitutions du plan Cacault et du plan établi par Pinson en 1880 (fig. 3.74).

Les informations numérisées à partir des différents plans de voiries sont les contours d'îlots, les contours des îles et par conséquent le tracé de l'Erdre et de la Loire. Les voies urbaines sont la conséquence du tracé de contours d'îlots. Le fichier numérique pour chaque plan est constitué d'un nombre de couches correspondant aux différents types de surfaces pris en compte par le modèle TEB et représentés dans les plans anciens (fig. 3.75).

Cette reconstitution vise à calculer : la surface de la maille urbaine intra-muros, la surface totale du réseau de voirie, la mesure (cotations avec le logiciel AUTOCAD) des largeurs de rues, la surface des îlots, la surface de l'Erdre et de ses îles ainsi que la surface des Fossés autour des remparts et autour du Château (en bas à droite). Ensuite on émettra certaines hypothèses pour l'évaluation des densités bâties, et des prospects des rues. L'ensemble des valeurs des variables pris en compte dans les simulations sera résumé à la fin de cette partie du chapitre.



Reconstitution partielle du plan Cacault (état 02)



Reconstitution partielle du plan Pinson (état 04)



Figure 3.74 : Exemple de superposition des reconstitutions numériques du plan de Cacault (état 02, couleur foncée) et celui de 1880 (état 04)

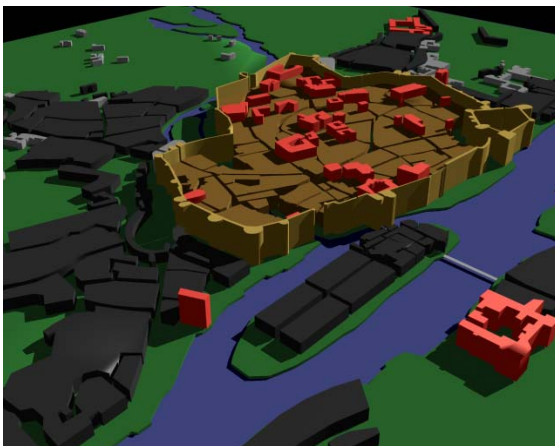


Figure 3.75 : Exemple de reconstitution numérique selon le plan Cacault (vue 3D et plan)

### 3.2. Calcul des paramètres géométriques de surface

#### 3.2.1. Calcul des fractions de surface selon le type de sol

Après avoir calé la modélisation numérique du plan Cacault sur le plan numérique de la ville actuelle, nous avons calculé les surfaces correspondant aux différents types de sol urbain. Nous avons ainsi décomposé le plan en autant de couche que de type de sol représenté sur le plan. Il en est ainsi résulté quatre couches qui représentent chacune successivement :

- les surfaces d'eau qui sont composées des fossés et des cours d'eau ;
- le sol des rues qui est représenté par le réseau de voirie ;
- les îlots bâtis qui sont délimités par la voirie ;
- les surfaces non bâties qui sont représentés dans le plan comme étant des surfaces plantées<sup>109</sup>.

La quantification de ces surfaces selon la reconstitution numérique du plan Cacault a été ensuite modifiée en fonction des différents plans représentant les quatre états succédant le plan Cacault. L'évolution des quantités de surface de chaque type de sol est compensée par l'évolution d'un autre type de façon à ce que la somme des quantités de surface soit toujours la même et égale à la surface totale du territoire analysé. En définitive nous obtenons les résultats contenues dans le tableau 3.4.

Le tableau ci-dessous résume le calcul de cette évolution des quantités de surface (tableau 3.5) :

<i>Etats successifs</i>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b> de 1945 à aujourd'hui
	« 1680 » <sup>110</sup>	« 1756 »	« 1835 »	« 1880 »	
<i>Surfaces en m<sup>2</sup></i>					
Surface totale	<b>1 637 266</b>				
Surface urbanisée	<b>729 678</b>	<b>886 550</b>	<b>1109 773</b>	<b>1 158 248</b>	<b>1 572 425</b>
Surface naturelle intra-muros	338 692	336 021	203315+66353 <sup>111</sup> = 269 668	385002 - 124574 <sup>112</sup> = 260428	37 240+ext= 64 841
Surface naturelle extérieure aux remparts	571 566	414 695	257 825	209 350 <sup>113</sup>	0.00
Surface du pavé	134 243	174 430	199 348 <sup>114</sup>	257 262 <sup>115</sup> + 124574 <sup>116</sup> = 381 841	381841+239168 <sup>117</sup> + 172515 <sup>118</sup> = 793 524
Surface naturelle totale	<b>910 258</b>	<b>750 716</b>	<b>527 493</b>	<b>469 778</b>	<b>64 841</b>
Surface cours d'eau	257 151				17 983
Surface des fossés et bassins	<b>78 870</b> fossés		<b>12 517</b> bassin de « sainte Anne » (autour du château)		<b>13 609</b> <sup>119</sup> bassins

Tableau 3.4 : Calcul des surfaces à partir des reconstitutions de plans historiques<sup>120</sup>

<sup>109</sup> Voir la copie originale du plan Cacault dans la partie consacrée à la présentation des sources. Partie 2 de ce présent chapitre.

<sup>110</sup> C'est le plan Cacault qui a été utilisé pour le calcul des fractions de surface mentionnées dans l'iconographie de 1680.

<sup>111</sup> Surface de comblement des fossés remplacé par des espaces de promenade.

<sup>112</sup> Surface de pavage des cours intérieurs des bâtiments.

<sup>113</sup> Surface naturelle non urbanisée = surf nat ancienne (257 825m<sup>2</sup>) – extension bâtie (40 396m<sup>2</sup>) – extension voirie (8079 m<sup>2</sup>)

<sup>114</sup> surface de voirie après les premiers élargissements de rues.

<sup>115</sup> surface de voirie après l'achèvement de l'ensemble des élargissements et percées des rues.

<sup>116</sup> Surface de pavage des cours intérieurs des bâtiments.

<sup>117</sup> Surface de comblement de l'Erdre et des bras Nord de la Loire, remplacée par du pavé (puis au XX<sup>ème</sup> siècle par du bitume)

<sup>118</sup> Surface de voirie due à l'extension entre voirie et cours intérieurs

<sup>119</sup> Cette surface correspond aux fontaines et bassins qui ont été implantés dans le centre urbain, lors du cinquième état.

En terme de fractions de surfaces, l'évolution des états de surface peut être résumée selon le tableau (tableau 3.5) et la figure (fig. 3.76) ci-dessous:

	ETAT 01	ETAT 02	ETAT 03	ETAT 04	ETAT 05
<u>Surb</u>	0,45	0,54	0,68	0,71	0,96
surf_nat_urbaine	0,21	0,21	0,16	0,16	0,04
surf_nat_rurale	0,35	0,25	0,16	0,13	0,00
Ssol_minéral	0,08	0,11	0,12	0,23	0,48
<u>Snat</u>	0,55	0,46	0,32	0,29	0,04
Seau	0,16	0,16	0,16	0,16	0,01
Sfossés	0,05	0,05	0,01	0,01	0,01
Seau-totale	0,21	0,21	0,16	0,16	0,02

Tableau 3.5 : Calcul des fractions de surfaces selon les types de sols

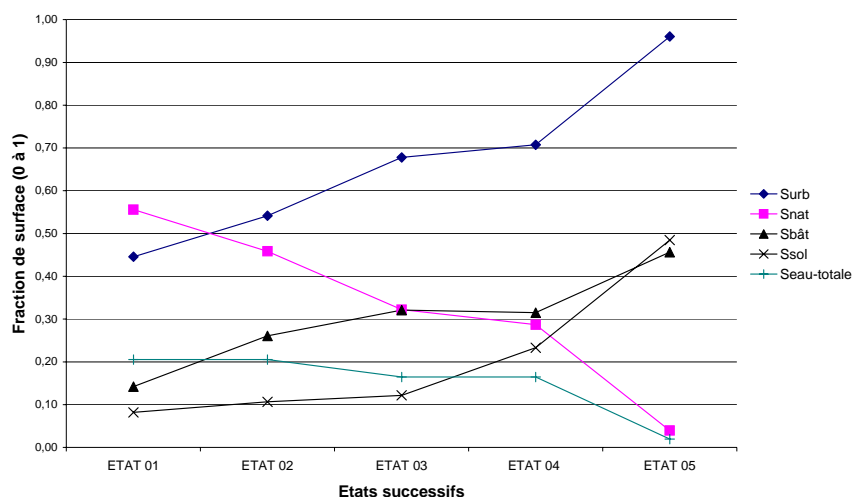


Figure 3.76 : Graphe représentatif de la variation des fractions de surfaces selon les cinq états de la ville

### 3.2.2. Calcul des densités bâties

En dehors du calcul des fractions de surfaces, le modèle TEB nécessite comme donnée d'entrée l'évaluation des densités bâties. Mais cela reste difficile à évaluer dans les états anciens d'avant 1835 au sujet desquels nous ne disposons que de plans de voirie.

L'inconvénient principal de ces plans réside dans la non-distinction des espaces bâtis de ceux non bâtis à l'intérieur des îlots. Pour pallier ce manque d'informations nous avons tenté de reconstruire le processus de densification des îlots qui sépare l'état de la ville tel que le présente l'iconographie de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle (première source) de celui représenté dans le cadastre napoléonien. Pour cela nous avons émis des hypothèses quant aux deux états antérieurs à 1835 ; à savoir :

- La densité du centre ancien à la ville à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle : si l'iconographie représente clairement la forme d'édification du centre ancien de Nantes, il reste néanmoins qu'elle ne nous permet pas de quantifier la densité bâtie, puisqu'il n'est pas question dans ce cas d'un plan « géométrique ».

<sup>120</sup> Les calculs de surface ont été effectués à partir du logiciel AUTOCAD (dessin des polygones régions correspondant à chaque type de surface et classés par couches), puis par un programme appliqué au logiciel SOLENE pour calculer les surfaces cumulées par couche.

- La densité du centre ancien à la ville vers 1756 : cette densité correspond à un niveau de densification intermédiaire entre une occupation de l'îlot en bordures des voies avec un « cœur d'îlot » de grande taille représentée par l'iconographie de 1680, et une occupation sur toute la surface de l'îlot avec une multitude de cours intérieures représentée dans le plan de 1835.

Pour combler ce manque d'information, nous avons constitué un plan 2D correspondant à l'iconographie de 1680. Pour cela nous avons considéré que l'état de la voirie était identique à celui donné par Cacault dans son plan. Quant au plan du bâti, pour le constituer, nous avons adopté l'hypothèse de travaux de morphologie urbaine selon laquelle il serait possible de reconstituer des états anciens à partir de plans plus récents en condition que la densification se fait par « additions successives » et non par « substitution ». En d'autres termes les édifices déjà construits selon l'iconographie en bordure de voie vont persister en 1835 et à ceux ci se rajouteront d'autres bâtiments.

Les travaux de « morphologie urbaine », engagés surtout en Italie par des enseignants comme G.Caniggia et P.L.Maffei, considèrent en effet que le processus qui mène du stade d'un îlot édifié uniquement en bordure de voies à un îlot édifié sur toute sa surface peut être reconstitué. Cette conclusion a été fondée à partir d'une superposition des plans anciens des villes italiennes établie dans le cadre des travaux sur les centres historiques. Il ne s'agit pas ici de discuter des fondements théoriques du modèle morphologique de Caniggia et Maffei, mais d'exploiter ses conclusions opérationnelles déduites de la lecture des transformations urbaines. Ce modèle morphologique [Caniggia 1979 ; Malfroy et al. 1988] définit le processus d'édification d'un tissu urbain comme une succession de phases pouvant être reconstituées et vérifiées (fig. 3.77)<sup>121</sup>.

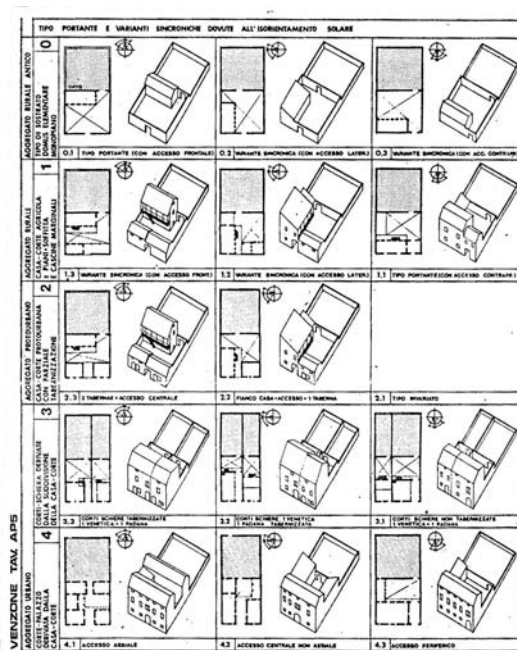


Figure 3.77 : Les quatre phases d'occupation de la parcelle selon les quatre phases d'urbanisation<sup>122</sup> [CANIGGIA, 1979 p. 257]

<sup>121</sup> Ce modèle, traduisant le processus de formation du tissu urbain, a été appliqué à plusieurs villes et s'est avéré applicable aux villes constituées de rues. Cette applicabilité potentielle du modèle nous permet donc de combler le manque d'informations historiques relatives au cas de Nantes, comme celles relatives au processus de densification d'un îlot.

<sup>122</sup> Les quatre phases sont les suivantes :

- Un état rural ancien: caractérisé par des édifices isolés dans le fond des parcelles. Comme c'est le cas aujourd'hui dans le pavillonnaire non mitoyen.

Selon ce modèle, nous pouvons supposer que le tracé des édifices situés en bordure des voies dans le plan de 1835 serait celui des édifices représentés dans l'iconographie de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle avec des additions en fond de parcelle. Selon les travaux de reconstitution de Caniggia (fig.3.78 et 3.79), les cours intérieurs correspondent le plus souvent (lorsque l'ancien bâtiment est suffisamment profond pour nécessiter une cour) au tracé de la limite de l'ancien bâtiment avant extension. C'est ainsi que l'on retrouvera la trace des anciennes limites des bâtiments (fig. 3.80).

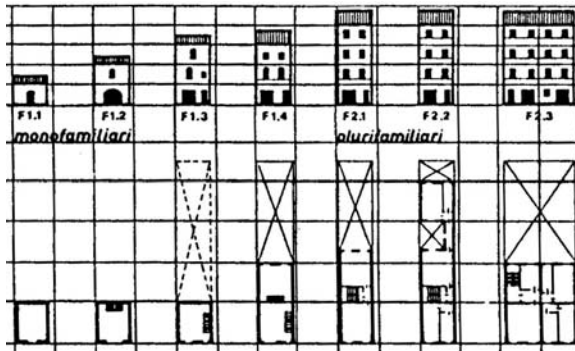


Figure 3.78 : Transformations d'un édifice à Florence. Création de la cour intérieure (entre la phase 2.1 et 2.2) [CANIGGIA 1988, p. 257]

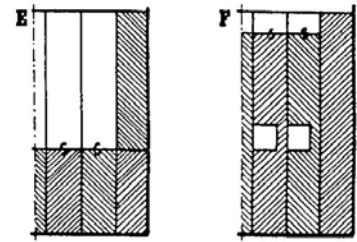
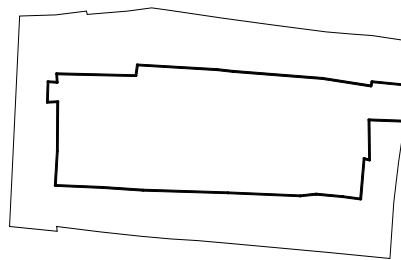
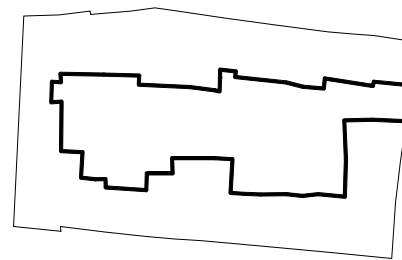


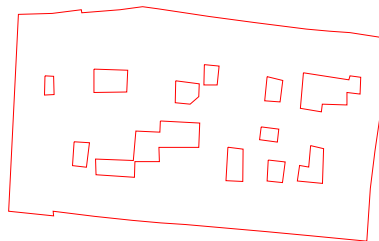
Figure 3.79 : Deux phases successives d'occupation de la parcelle : avant et après la création des cours [CANIGGIA 1988, p. 257]



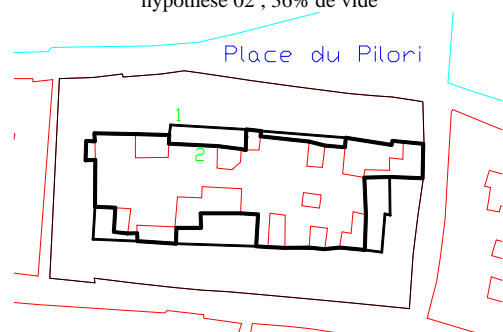
1. Reconstitution d'un îlot de l'iconographie (en gras le cœur d'îlot) : hypothèse 01 ; 44% de vide



2. Reconstitution du même îlot (en gras le cœur d'îlot) : hypothèse 02 ; 36% de vide



Le même îlot selon le cadastre de 1835 (à l'intérieur de l'îlot, les cours intérieurs) ; 12% de vide



Superposition des trois états de densification de l'îlot

Figure 3.80 : Schéma hypothétique du processus de densification des îlots du centre ancien pour le plan de la fin du XVII<sup>ème</sup> et celui de 1756.

- Un état rural développé : caractérisé par des additions de bâtiments par rapport à l'état ancien, le long des rues et mitoyenneté entre quelques nouveaux édifices de parcelles contiguës.
- Un état « proto-urbain » : mitoyenneté de l'ensemble des édifices d'un même îlot (bâti en bande), et apparition de quelques commerces au rez-de-chaussée.
- Un état urbain : densification maximale des îlots et systématisation des commerces dans les rez-de-chaussée des parcours les plus importants du centre ville (partie la plus ancienne de la ville).

Sur cette base, nous avons considéré pour l'ensemble des îlots édifiés en bordure de rue, que les édifices (avant la formation des cours intérieurs) s'arrêtaient à la limite de ces cours. Le bâti correspond à une « bande attenante » à la rue d'une profondeur assez régulière dont la taille dépend de l'implantation des bâtiments par rapport à la voie. Lorsque l'implantation est perpendiculaire à la rue (Axe du faîtage de toiture perpendiculaire à la voie), les bâtiments sont plus étroits et plus profonds que dans le cas d'implantation parallèle à la rue (faîtage parallèle à la voie). Dans le premier cas la bande bâtie attenante à la voie est d'une profondeur de 10 à 12 mètres, alors que dans le deuxième elle ne dépasse pas 8m<sup>123</sup>.

La ville intra-muros comptait selon cette iconographie une cinquantaine d'îlots de surfaces très variables. Le calcul de la densité globale de cette partie de la ville conduit à trouver une valeur de densité située entre 56% et 64% selon les deux cas hypothétiques représentées dans la figure ci-dessus (fig. 3.80- 1 et 2). Le calcul des densités pour l'ensemble de la surface urbaine a été ensuite appliqué à chaque îlot. On obtient ainsi pour l'ensemble de la surface urbaine une densité de 31.8% pour 1680 et 48,1% pour 1756.

Pour le reste des phases de transformation de la ville, nous nous sommes appuyés sur les plans disponibles, celui établi par J.F.Pinson en 1880 et enfin celui de la ville actuelle, que nous considérons équivalent à celui du plan de reconstruction de 1945. Les transformations entre la période de la reconstruction et l'état actuel de la ville ne concernent pas les surfaces bâties, mais les autres types de surfaces : sol naturel, sol des rues, arbres, eau et espaces plantés, dont les fractions de surface vont passer d'un type de surface à un autre (tableau 3.6).

	Etat 01	Etat 02	Etat 03	Etat 04	Etat 05
Surface urbanisée	729 678	886 550	1109 773	1 158 248	1 572 425
Surface bâtie	232 564	427 272	525 423	515 979 <sup>124</sup>	747 309
Surface des remparts	24 179	0.00	0.00	0.00	0.00
Fraction de surface bâtie	0.318	0.481	0.71	0.67	0.64

Tableau 3.6 : récapitulatif des surfaces bâties et des fractions de surface de la partie urbaine

L'évolution des densités bâties est en nette augmentation jusqu'en 1835. Elle est en légère diminution dans les deux phases suivantes. Cette diminution est principalement due à l'alignement des rues (voir évolution de la surface du pavé dans le tableau 3.5).

### 3.2.3. Calcul des propriétés géométriques des rues

#### - Les largeurs des rues

Pour évaluer les largeurs des rues tout en observant les variations pouvant exister au sein d'une même rue, nous avons effectué avec le logiciel AUTOCAD des cotations systématiques des largeurs de rues (fig. 3.82). 3 à 6 mesures de largeur par rue ont été effectuées puis la moyenne de toutes les rues a été calculée pour évaluer le prospect moyen.

<sup>123</sup> L'épaisseur de la bande attenante, dépend, d'après les travaux de G.Caniggia, de « la valeur foncière » des rues. Le long des rues commerçantes les plus importantes d'un centre ville, ce sont des édifices étroits et profonds qui s'implantent le long de cette rue, alors que dans les rues qui leurs sont perpendiculaires ou loin du centre, les édifices s'implantent en longueur sur la voie, puisque le terrain est moins coûteux. Il ne s'agit bien évidemment pas de discuter ni de prouver ce modèle, mais nous notons tout de même une similitude avec le cas de la ville de Nantes tel qu'il est représenté dans l'iconographie.

<sup>124</sup> Surface bâtie = bâti ancien (525 423m<sup>2</sup>) + extension bâtie (40 396m<sup>2</sup>) – démolition due aux élargissements (49 840m<sup>2</sup>)





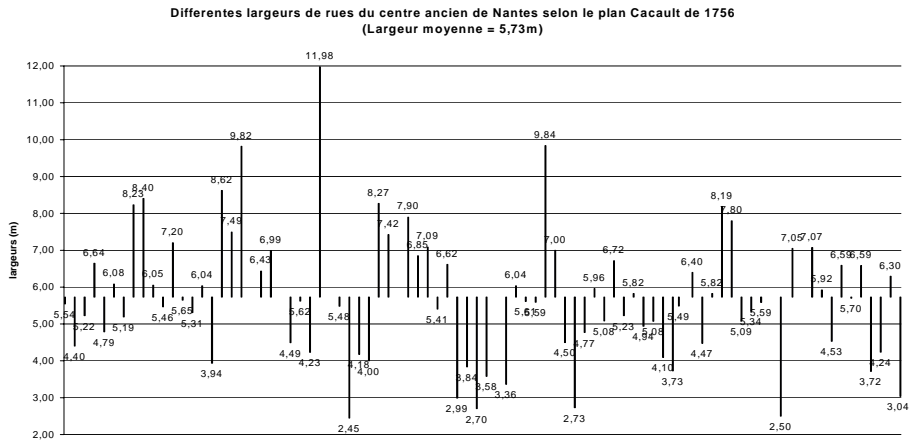


Figure 3.84 : Graphe représentatif de la variation des largeurs de rues selon le plan de Nantes établi par Cacault par rapport à la moyenne

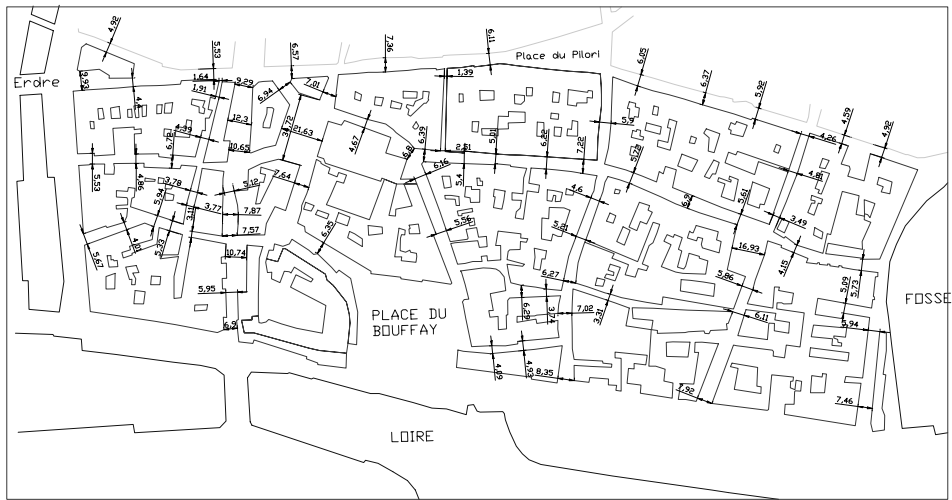


Figure 3.85 : Cotation des largeurs de rues sur le plan de reconstitution du cadastre Napoléonien (partie Sud)

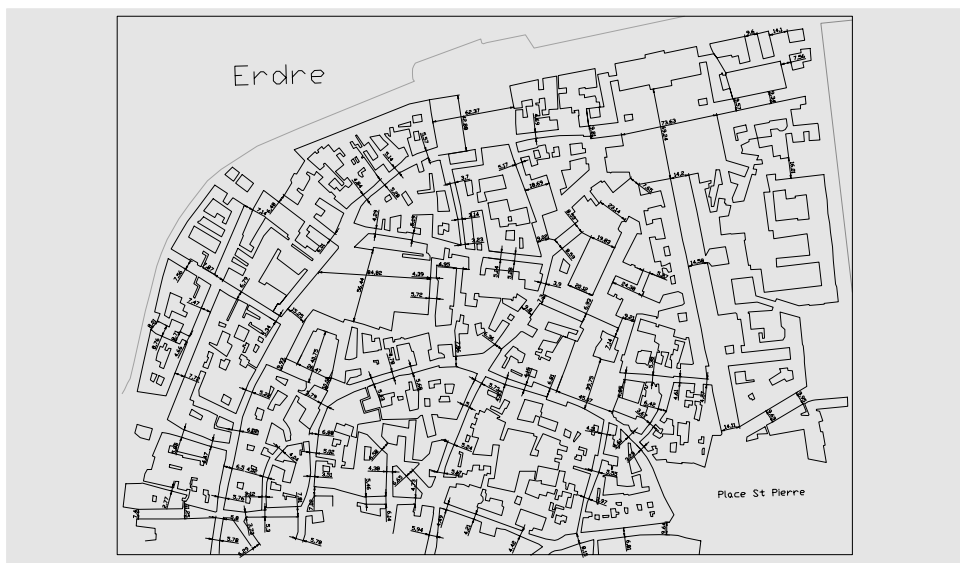


Figure 3.86 : Cotation des largeurs de rues sur le plan de reconstitution du cadastre Napoléonien (partie Nord)



**- Le prospect moyen des rues**

L'effet des élargissements est rapporté dans le modèle à celui du prospect des rues. Pour évaluer ce dernier il nous faut évaluer les hauteurs des bâtiments dans les différents états.

Pour cela, et de fait du manque des sources ou de travaux pouvant nous renseigner sur la hauteur des rues de la ville, nous nous appuyons principalement sur les règlements urbains que nous considérons comme étant réellement appliqués dans l'édification et la transformation des rues du centre ville.

Nous savons ainsi qu'à partir des règlements de voiries que la hauteur maximale autorisée est de 19m. Nous allons donc considérer que cette hauteur qui est en vigueur depuis 1870, date du premier règlement de hauteur est celle appliquée à toutes les rues du centre ancien de la ville. Cependant, si le règlement a été imposé à cette date nous émettons l'hypothèse que cela a été en réaction à des hauteurs excessives, comme le montre les iconographies de rues comme celle de la rue Belle Image. Nous supposons ainsi que la hauteur des bâtiments aurait pu atteindre 21m avec les édifications nombreuses de la deuxième moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle<sup>126</sup>. Quant aux phases avant cette réglementation on les considérera selon deux états différents : le premier, celui de l'état le plus ancien, équivaut à une hauteur moyenne d'un rez-de-chaussée surmonté de deux étages, ce qui équivaut à 10m, et le deuxième selon la hauteur la plus faible admise par le règlement de 1870 c'est à dire 15m.

Selon les hypothèses prises en compte pour l'évaluation des hauteurs bâties et en considération de l'évolution des largeurs de rues, nous obtenons pour chaque état les prospects moyens résumés dans le tableau suivant (tableau 3.8).

	Etat 01	Etat 02	Etat 03	Etat 04	Etat 05
Largeur des rues (L)	5,73m	5,73m	6,80m	8,55m	8,55m
Hauteurs moyenne (H)	<b>10m</b>	<b>15m</b>	<b>21m</b>	<b>19m</b>	<b>19m</b>
Le prospect moyen (H/L)	<b>1.74</b>	<b>2.61</b>	<b>3.08</b>	<b>2.22</b>	<b>2.22</b>

Tableau 3.8 : Tableau synthétique de l'évolution des prospects des rues selon les cinq états analysés

**- Le prospect moyen des bâtiments**

Pour obtenir le prospect moyen des bâtiments dans chaque phase nous nous sommes appuyés sur la reconstitution que nous avons faite des densités bâties. Le prospect moyen des bâtiments dépend de la hauteur des rues (déjà évaluées) et de l'épaisseur des bandes bâties.

Pour calculer cette dernière, nous l'avons corrélé à l'évolution de densification des cœurs d'îlots. Nous avons en effet défini plus haut (fig. 3.80) dans le scénario de densification, des épaisseurs successives proches de : 10m, 10 à 12m, et pour le cas des îlots avec plusieurs cours (cas de la plupart des îlots en 1835), nous avons converti la surface des cours d'un îlot représentatif, en une surface unique équivalente pour retrouver l'épaisseur du bâti, ce qui nous donne une bande équivalente à près de deux fois la bande de 8m, c'est à dire une épaisseur bâtie de près de 16m. Mais ce ne sont pas tous les îlots qui sont dans cet état en 1835. Il reste encore près de 20% des îlots avec des bandes de 10m d'épaisseur. Ce n'est qu'en 1880 que cette épaisseur de 16m est atteinte dans tous les îlots.

<sup>126</sup> Cette hypothèse peut paraître hasardeuse, mais, faute de références et de sources, elle nous permet d'évaluer l'impact de la réglementation des hauteurs qui s'orientaient à cette époque vers un abaissement des hauteurs des édifices.

En résumé, avec une même hauteur bâtie, plus les cœurs d'îlots se densifient plus le prospect des bandes bâties va se réduire. On obtient en résumé les valeurs suivantes des épaisseurs et des prospects des bandes bâties (tableau 3.9) :

	Etat 01	Etat 02	Etat 03	Etat 04	Etat 05
Hauteur moyenne	10m	15m	21m	19m	19m
Largeur des bandes bâties	8m	10m	14.8	16m	16m
<b>Prospect moyen des bâtiments</b>	<b>1.25</b>	<b>1.5</b>	<b>1.41</b>	<b>1.187</b>	<b>1.187</b>

Tableau 3.9 : Tableau synthétique des prospects moyens des bâtiments

### 3.3. Evaluation des données physiques et anthropogéniques

#### 3.3.1. Les sources anthropogéniques

Nous n'avons intégré dans les simulations, parmi les sources anthropogéniques, que les sources émanant du chauffage des édifices. Cela parce que nous considérons que ce dernier est une composante permanente<sup>127</sup> et irréversible des édifices au même titre que le bâti. En effet la création d'un bâti habité aujourd'hui signifie, dans tous les cas, l'édification d'un bâti « chauffé » en hiver, avec une température interne que nous considérons égale à 19°C (considérée comme une valeur de chauffage assez confortable).

Avant l'introduction du chauffage, nous avons supposé une température intérieure des bâtiments égale à 10°C. Cette valeur de forçage a été définie en considérant la possibilité de présence des foyers ponctuels servant à réchauffer les maisons. Ces foyers étant localisés aux cheminées n'avaient pas de capacité de rayonnement importante vers toute la surface de la maison, mais nous supposons qu'il en existait suffisamment pour éviter un refroidissement trop important en hiver. L'utilisation systématique du chauffage est supposée, pour les simulations, débiter dès le quatrième état simulé de la ville (la fin du XIX e siècle)<sup>128</sup>.

Le deuxième autre paramètre source, relatif à l'anthropogénie urbaine, dont nous avons pris en compte l'évolution concerne le mode de drainage des eaux urbaines. En effet nous avons bien vu au travers les iconographies urbaines que le réseau d'assainissement était à la surface du sol dans l'axe des rues. Ce système de drainage des eaux à l'air libre, laisse supposer l'existence presque permanente (puisque ce sont toutes les eaux, propres et impropres, qui coulaient dans le ruisseau des rues) d'une fraction de surface de la rue recouverte d'eau.

Avant l'enterrement du réseau et la disparition de la fraction d'eau à la surface du sol, cette dernière a d'abord été modifiée du fait du pavage des rues de la ville. Le pavage systématique du sol des rues contribue à imperméabiliser le sol qui était jusque là soit non pavé soit « très mal pavé ». Nous avons ainsi supposé que cette imperméabilisation du sol contribue à augmenter la fraction de surface occupée par l'eau.

<sup>127</sup> Cette température interne est depuis, l'introduction du chauffage, une composante permanente du microclimat urbain lié au bâti. Que ce soit en ville ou en campagne, une température optimale « artificielle » accompagne la production des bâtiments.

<sup>128</sup> L'évolution des techniques de chauffage dans les habitations, dépasse notre objet de recherche qui s'attache à l'évaluation des transformations morphologiques. Pour quelques renseignements basiques sur la question, voir : [Buisson et al. 1994]

Au vu de l'étroitesse des rues on peut supposer que la fraction de surface qui était en contact avec l'air, et qui disparaîtra de la surface des rues après la création des réseaux souterrains constitue une fraction assez conséquente. En mesurant sur une rue étroite située sur le quai de la fosse et qui garde encore la trace du ruisseau qui était aménagée en surface, on s'aperçoit que ce ruisseau atteint une fraction de surface équivalente à 1/5<sup>ème</sup> de largeur de la rue<sup>129</sup>. Cette fraction semble encore plus importante dans une iconographie datant de 1928 de la rue Dancin (fig. 3.90). Nous situons la période d'enfouissement de ces réseaux en synchronie avec le plan du cadastre Napoléonien (Le texte imposant l'enterrement des réseaux datant de cette époque nous avons donc supposé que la technique existait avant cette date).



Figure 3.91 : Ruisseau d'évacuation des eaux en surface ; rue Ste Croix (vue actuelle)<sup>130</sup>

Notre objectif étant d'analyser l'évolution de l'environnement climatique urbain lié aux transformations morphologiques (formes et matériaux), nous avons écarté la production anthropogénique liée au transport et à l'industrie, puisque leur présence n'est pas irréversible dans les centres anciens. En effet il existe bien aujourd'hui des centres anciens où la présence de la voiture est encore problématique. Ajoutons à cela que les transports et l'industrie ne sont pas une donnée permanente dans l'histoire de la ville, puisqu'ils peuvent faire l'objet d'aménagements particuliers dans l'espace et dans le temps (zones piétonnes, industries à l'extérieur des villes, etc.), contrairement au chauffage qui accompagne systématiquement tout bâtiment habité. Si les transports dépendent de ce que l'on pourrait appeler « les aménagements urbains en ville », donc une sorte de « mobilier » urbain en mouvement et produisant la chaleur, le chauffage interne est une composante indissociable de l'immobilier urbain.

### 3.3.2 Evaluation des paramètres thermiques et radiatifs des surfaces

Les propriétés thermiques et radiatives des matériaux utilisés dans les différentes phases de transformation de la ville sont pour la plupart assez connues et on retrouve dans la littérature leurs propriétés thermiques et radiatives. Seules exceptions le cas des édifices en pan de bois, et celui d'un sol « mal » ou « non pavé ».

Pour le premier cas nous avons présenté la technique de construction relative à ce type d'édifice. De ce système de construction nous avons retenu un ratio de surface pour chaque type de matériau utilisé. Sur la partie occupée par la maçonnerie, les pièces de bois verticales, horizontales et obliques,

---

<sup>129</sup> Le ruisseau en question est de 0,75cm sur une largeur de voie de 3,80m.

<sup>130</sup> [http://photos.pagesjaunes.fr/h/ad?type=s;ville=03344000;nomvoie=Bouffay;numero=;templ=pjphoto\\_frame;templ\\_photo=pjphoto\\_photo;fwdto=/1/f;/interactif=1](http://photos.pagesjaunes.fr/h/ad?type=s;ville=03344000;nomvoie=Bouffay;numero=;templ=pjphoto_frame;templ_photo=pjphoto_photo;fwdto=/1/f;/interactif=1)

occupent près de 30% du volume, le reste est constitué de briques et l'épaisseur du mur ne dépasse pas 30 cm.

Les fenêtres occupent une surface assez importante<sup>131</sup> des murs pour être prise en compte. Que ce soit dans le cas des maisons en pan de bois ou en pierre, dans le cas des rues, nous avons pu constater que la fraction de surface occupée par les fenêtres est égale à près de 25%. C'est cette fraction que nous avons retenue, puisque les autres fractions sont variables, et les parois les plus ouvertes correspondent le plus souvent à celles des bâtiments situés sur les quais. Dans tous les cas nous considérons les fenêtres vitrées<sup>132</sup>.

En ce qui concerne les toitures, la seule modification que nous avons retenue, est celle relative à l'introduction d'un isolant, d'une épaisseur égale à 15cm, lors de la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> siècle.

L'ensemble des valeurs utilisées ont été extraites de références bibliographiques et pondérées en fonction des surfaces de vitrage<sup>133</sup>.

### 3.3.3. Les données de forçage « météo »

Nous supposons que les données « climatiques » sont restées inchangées. Ce postulat nous permet d'évaluer uniquement l'effet des variations des états de la surface urbaine sur le microclimat urbain.

Les données météorologiques utilisées dans les simulations ont été relevées par la station de l'aéroport « Nantes Atlantique » à Nantes. Ils concernent :

- La pluviométrie (relevé de la météo Nationale)
- L'E.T.P « Evapotranspiration potentielle »
- La température de l'air (moyenne, minimum et maximum)
- La pression atmosphérique
- Force et direction du vent
- Tension de vapeur d'eau et humidité
- Température dans le sol (à 10, 20, 50, et 100 cm)

Ces données nous ont été gracieusement fournies par l'équipe GMME du CNRM de Toulouse qui utilisaient ces données pour une validation du modèle TEB sur le site de REZE (à Nantes), en le comparant aux résultats du modèle EHU du LCPC appliqué et validé sur un même bassin versant situé à REZE. Les données sont recueillies selon un pas de temps horaire et sont étalées sur une période de 06 (six) années, entre 1993 et 1998.

### 3.3.4. Synthèse des paramètres d'entrées du modèle « TEB »

Nous venons d'exposer à la fois les méthodes utilisées et les hypothèses sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour calculer l'ensemble des paramètres d'entrées du modèle TEB. Nous avons ainsi considéré un certain nombre de raccourcis qui peuvent paraître excessifs pour un historien de la ville, mais rappelons encore une fois que nous ne faisons pas de la reconstitution muséographique. Il est question d'états représentatifs qui ont été définis à partir d'un certain nombre d'informations dont nous disposons aujourd'hui.

<sup>131</sup> Voir première partie au sujet du ratio de surface occupée par les fenêtres dans les bâtiments à pan de bois, ainsi que les annexes pour le mode de calcul à partir des iconographies.

<sup>132</sup> Dans les maisons à pan de bois, les fenêtres n'avaient en un premier temps (jusqu'au XV<sup>ème</sup> siècle) que des volets de bois pleins que l'on refermait la nuit. L'apparition du verre à vitre, transparent et plat, n'a fait son apparition qu'au cours de la deuxième moitié du XVII<sup>ème</sup> siècle, se répandit progressivement dans les villes. [Buisson et al. 1994].

<sup>133</sup> Les valeurs des paramètres thermiques et radiatifs ont été extraites des références suivantes : [SACADURA 1982, p.429-435-439] ; [P. LAVIGNE et al., annexe 04]. ; [OKE 1987, p. 259] ; [MASSON et al. 2000 p. 21-22] ; [MILLS 1993] et le site : [http://iusti.univ-mrs.fr/THERMAL\\_TOOLS/](http://iusti.univ-mrs.fr/THERMAL_TOOLS/).

Ces informations témoignent de deux transformations majeures :

- Une modification du volume du vide urbain: Celle ci s'est réalisée par les interventions suivantes :
  - une augmentation du volume bâtie (surfaces et hauteurs) ;
  - une fermeture puis ouverture progressive des rues ;
  - un rétrécissement des cours intérieurs des îlots.
  
- Une modification des états de surfaces : Celle ci connaît trois modifications majeures :
  - un accroissement des surfaces minérales ;
  - une réduction des surfaces plantées ;
  - une diminution (disparition) des surfaces d'eau.

Les tableaux ci-dessous résument l'ensemble des paramètres nécessaires aux simulations avec le modèle TEB, que nous exposerons dans la partie suivante du chapitre. Le tableau 3.10 représente les paramètres géométriques, thermiques et radiatifs de la surface urbaine ainsi que les paramètres anthropogéniques. Le tableau 3.11 représente les paramètres thermiques des toits, murs et du sol des rues, utilisés dans les simulations pour les différentes phases de transformations. Les épaisseurs sont divisées en trois couches, la première est celle située en surface. Les paramètres  $d$ ,  $C$  et  $\lambda$  sont successivement : l'épaisseur des couches (m), leur capacité thermique (MJm-3 K-1) et leur la conductivité thermique (W m-1 K-1).

Paramètres	Unité	Etat 01	Etat 02	Etat 03	Phase 04	Etat 05
Paramètres géométriques						
Fraction bâtie	-	0.318	0.481	0.71	0.67	0.64
Hauteur des bâtiments	m	10	15	21	19	19
Prospect du bâti	-	1.25	1.5	1.41	1.187	1.187
H/L : prospect des rues	-	1.745	2.62	3.08	2.22	2.22
Longueur de rugosité	m	1.0	1.5	2.1	1.9	1.9
Paramètres radiatifs						
Albédo du toit		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Albédo des murs		0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
Albédo du sol		0.15	0.11	0.11	0.11	0.08
Emissivité des toits		0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Emissivité des murs		0.88	0.85	0.85	0.85	0.85
Emissivité du sol		0.92	0.95	0.95	0.95	0.95
Paramètres thermiques <sup>134</sup>						
Matériaux du toit		ardoise	ardoise	ardoise	ardoise	ardoise + isolant
Matériaux murs		pan de bois +	Pierre	Pierre	Pierre	Pierre + isolant
Matériaux sol		terre sol compact	pavé	pavé	pavé	bitume
Paramètres anthropogéniques						
Température intérieure	°C	10	10	10	19	19
Température du sol profond	°C	19	19	19	19	19
Fraction d'eau sur le sol		0.15	0.2	0.00	0.00	0.00

Tableau 3.10 : les valeurs des paramètres d'entrée de TEB, utilisées dans les simulations selon les états successifs transformés

<sup>134</sup> Voir le tableau 3.11. pour les propriétés thermiques des trois types de surfaces.

	Etat 01			Etat 02			Etat 03			Etat 04			Etat 05		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Toit :	ardoise	bois	bois	Sans modification			Sans modification			Sans modification			ardoise	bois	isolant
d	0.01	0.05	0.05										0.01	0.10	0.15
C	2.00	0.52	0.52										2.00	0.52	0.04
λ	2.1	0.19	0.19										2.1	0.19	0.03
Murs	Pan de bois/verre <sup>135</sup>	Pan de bois/verre	Pan de bois/verre	Pierre/verre	Pierre/verre	Pierre/verre	Sans modification			Sans modification			Pierre/verre	Pierre/verre	Isolant/verre
d	0.10	0.10	0.10	0.02	0.15	0.33							0.02	0.48	0.10
C	1.47 <sup>136</sup>	1.47	1.47	1.54	1.54	1.54							1.54	1.54	0.04
λ	0.68 <sup>137</sup>	0.68	0.68	0.88	0.88	0.88							0.88	0.88	0.03
Sol :	Sol comprimé	Sol comprimé	Sol naturel	Pavé de pierre	Pavé de pierre	Sol naturel	Sans modification			Sans modification			bitume	Pavé/béton	Sol naturel
d	0.05	0.1	1.00	0.05	0.1	1.00							0.05	0.2	1.00
C	1.30	1.30	1.40	2.00	2.00	1.40							1.74	2.00	1.40
λ	1.00	1.00	0.40	2.10	2.10	0.40							0.82	2.10	0.40

**Tableau 3.11 : les valeurs des paramètres thermiques des toits, murs et du sol des rues utilisées dans les simulations pour les différents états de transformation**

<sup>135</sup> 75% du mur est en maçonnerie, 25% en fenêtre, 25% de la maçonnerie est en bois et 75% en brique.

<sup>136</sup>  $\{[(0.25 \times 1.52) + (0.75 \times 1.37)] \times 0.75\} + (1.66 \times 0.25) = 1.475$

<sup>137</sup>  $\{[(0.25 \times 0.19) + (0.75 \times 0.83)] \times 0.75\} + (0.74 \times 0.25) = 0.687$



#### **4. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DE SIMULATION**

Les simulations numériques ont pour objet d'évaluer les paramètres physiques de l'environnement climatique dans chaque état ancien du centre de Nantes. Rappelons, avant de présenter les résultats de simulation, les faits marquants contenues dans chacun de ces états et les principales procédures de simulation.

Comme on l'a vu, les transformations urbaines qui font passer la surface urbaine d'un état à un autre, s'articulent autour de deux catégories majeures : une minéralisation progressive des surfaces et une ouverture à différents degrés des vides urbains. Ces catégories majeures se réalisent dans l'histoire de la ville par différentes interventions qui vont progressivement modifier la surface urbaine de son état initial (état 1) à son état le plus récent (état 5). Rappelons que, les cinq états représentatifs de l'évolution de la surface urbaine soumis aux simulations numériques sont caractérisés par ce qui suit :

- Le premier état analysé représente l'état initial du centre ancien avant toute transformation salubre. Les éléments déterminants de cet état, qui date approximativement de la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle, sont : un sol aux rues non pavées, des édifices en pan de bois, des surfaces d'eau abondantes comprenant les fossés et les cours d'eau, des surfaces végétales (très importantes à l'intérieur des îlots) et une grande perméabilité des vides urbains aux échanges climatiques (faible hauteur des bâtiments et très faible densité bâtie).
- Le deuxième état, que nous situons entre la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle et la fin du XVIII<sup>ème</sup>, connaît deux changements importants : Une première phase de minéralisation du sol des rues et des bâtiments (les rues sont pavées et les édifices en pan de bois sont remplacés par des constructions en pierre) et une première réduction de l'ouverture des rues aux paramètres climatiques (surélévation des bâtiments).
- Le troisième état, datant du début du XIX<sup>ème</sup>, connaît des transformations importantes qui vont considérablement modifier la surface urbaine. On assiste en effet à une diminution considérable des surfaces d'eau et des surfaces végétales (comblement des fossés, enterrement des réseaux d'évacuation d'eau, et édification des cœurs d'îlots qui étaient jusque là constitués de jardins), et à une réduction considérable de la taille des vides urbains et de leur ouverture (par l'édification des cœurs d'îlots et la surélévation des bâtiments).
- Le quatrième état, qui correspond à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle connaît une importante perméabilisation du centre ancien aux paramètres climatiques. On voit en effet se réaliser, sur l'ensemble du centre ancien, les alignements et élargissements de rues ainsi que les percées. On y assiste aussi dans ce quatrième état au pavage de l'ensemble des cours intérieurs et à l'introduction du chauffage dans les maisons.
- Le cinquième et dernier état que nous avons étudié s'étend entre la période d'après guerre et la ville actuelle. Cet état comprend la plus importante modification du sol urbain (en quantité de surface concernée) de l'histoire de la ville, puisque c'est dans cet état que le comblement de l'Erdre et des bras Nord de la Loire va se réaliser. A cette minéralisation majeure du sol nous avons aussi inclus l'introduction des isolants thermiques (même si cela ne se fait pas dans l'ensemble des édifices) et le recouvrement des pavés utilisés pour le revêtement du sol des rues par de l'asphalte.

Ces cinq états ont ainsi été soumis aux simulations numériques du modèle TEB (et du modèle ISBA pour les parties non construites), en utilisant les données de surfaces résumées dans la partie précédente de ce chapitre. Les périodes temporelles choisies pour observer les variations du microclimat urbain sont de deux types : des observations journalières moyennées sur les saisons et des observations sur des journées types.

- Les observations par saison et surtout la comparaison entre l’hiver et l’été permettent d’avoir une évolution globale, en omettant les effets liés à une variation météorologique. Ces observations saisonnières ont ainsi été construites sur la base d’un calcul moyen des six années de relevés météo (entre 1993 et 1998).
- L’analyse de journées types permet d’observer l’effet des évènements climatiques locaux comme la hausse des températures, la pluviométrie ou l’effet d’un ciel clair ou couvert de nuages.

Les simulations permettent de calculer les différents termes du bilan d’énergie ainsi que les paramètres microclimatiques. Le bilan d’énergie permet en effet d’analyser à l’aide de simples graphes l’évolution des flux de chaleur sensible, latente ou stockée relatifs au passage d’un état ancien de la ville à un autre. L’évolution d’autres paramètres comme la température de l’air et des surfaces ou encore l’humidité spécifique et la vitesse du vent dans les rues peut également être analysée.

Dans la présentation des résultats, nous mettons l’accent sur le poids des divers facteurs de la forme urbaine et de leur évolution dans la modification du microclimat urbain. Ces résultats sont présentés de manière à mesurer l’intensité de variation des paramètres physiques engendrée par le passage d’un état de la surface urbaine à un autre. Pour mettre en valeur cette variation nous utilisons deux types de graphes :

- des graphes comparant les flux et les paramètres de chaque état : cela en superposant dans un même graphe les courbes évaluant chaque état ancien (exemple fig. 3.92).
- Des graphes évaluant les variations provoquées par les transformations urbaines qui font passer le centre ancien d’un état à un autre : Pour cela nous représentons dans un même graphe des courbes qui mesurent les écarts (en quantité de flux) entre les états successifs (exemple fig. 3.93). Nous mettons aussi en évidence cette évolution en calculant le pourcentage de variation des paramètres microclimatiques dont les valeurs quantifiées sont très faibles (exemple fig. 3.106) ou encore pour une information plus synthétique, en représentant l’évolution d’un paramètre le long des cinq états de la surface urbaine (fig. 3.98).

Après la présentation des résultats des simulations et des enseignements que l’on peut retenir pour le développement et la transformation des villes contemporaines, nous discuterons, à la fin de cette partie du chapitre, les limites de la démarche de modélisation des effets microclimatiques que nous avons adopté. Ces limites feront l’objet d’une proposition d’ouverture dans le dernier chapitre de cette thèse.

#### 4.1. Evolution des bilans d’énergie

Le modèle TEB utilise la formulation de base du bilan énergétique que nous avons présenté dans le deuxième chapitre. En négligeant les échanges advectifs et les apports anthropogéniques, elle s’écrit :

$$Q^* = Q_h + Q_e + \Delta Q_s$$

Avec :

$Q^*$  : le rayonnement Net (bilan radiatif toutes longueurs d’ondes).

$Q_h$  : le flux de chaleur sensible.

$Q_e$  : le flux de chaleur latente.

$\Delta Q_s$  : le différentiel du flux de chaleur stocké (différence entre le flux stocké et le flux restitué) dans la surface urbaine (sols et édifices).

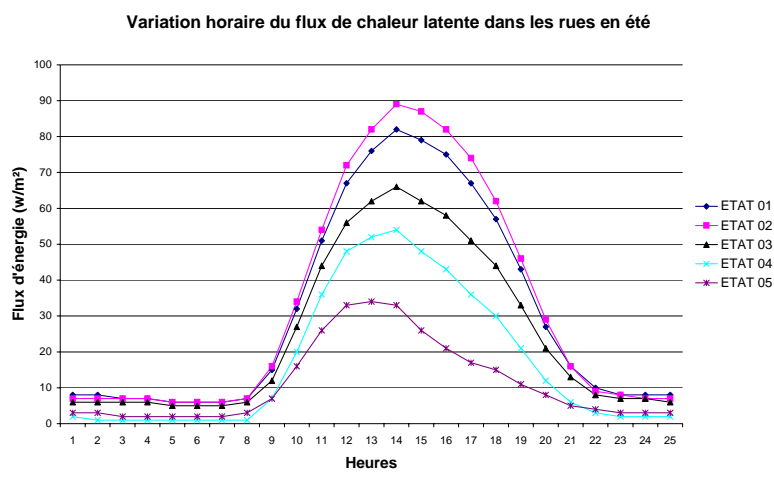
La simulation des bilans d’énergie produit donc une quantification des différents termes de cette équation en tenant compte de la variation des états de surface étudiés. Nous présentons ici les résultats obtenus des simulations pour ces différents termes du bilan, en insistant sur les flux directement liés à la nature et aux états de la surface urbaine, c’est à dire les flux de chaleur latente, sensible et stockée.

### 4.1.1. Variation du flux de chaleur latente

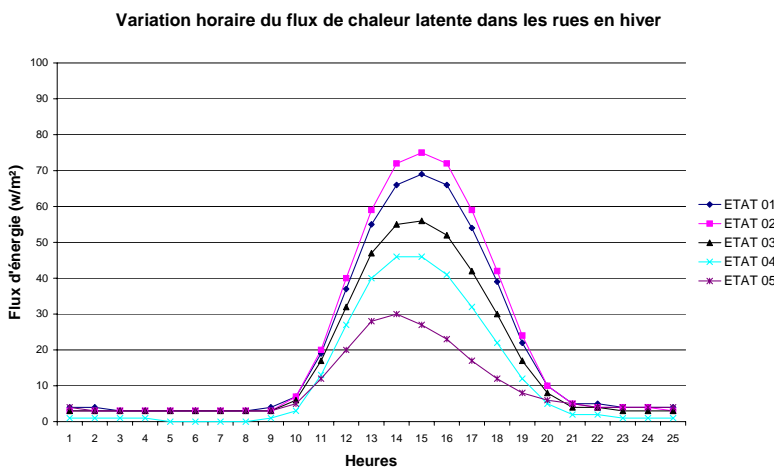
La production du flux de chaleur latente (énergie dépensée pour l'évaporation de l'eau) dépend directement de la disponibilité de l'eau en surface. Le flux latent provient principalement de l'évaporation de l'eau ou de l'évapotranspiration du sol naturel et des végétaux. Comme nous l'avons déjà évoqué, ce flux induit un abaissement de la température de l'eau puis un abaissement de la température d'air du fait des échanges convectifs entre la surface de l'eau et l'air.

En comparant les valeurs numériques obtenues dans les différents états anciens, on s'aperçoit des variations suivantes :

- la variation maximale de la chaleur latente le long de la période historique analysée atteint - 57w/m<sup>2</sup> en été, soit une réduction de deux tiers entre le deuxième (le flux latent le plus important) et le cinquième état (le flux le plus faible) (fig. 3.92-1). En hiver la chaleur latente connaît une évolution comparable (-44w/m<sup>2</sup>) (fig. 3.92-2). Cette diminution considérable qui résulte des transformations du centre ancien entre le deuxième et le dernier état est principalement due à la disparition des surfaces évaporantes et évapotranspirantes de la surface urbaine. En effet, l'enterrement des réseaux d'évacuation d'eau, le comblement des fossés et des cours d'eau réduisent de plus de 90% alors que la minéralisation des sols et la densification des cœurs d'îlots vont pratiquement faire disparaître les surfaces végétales.



1.



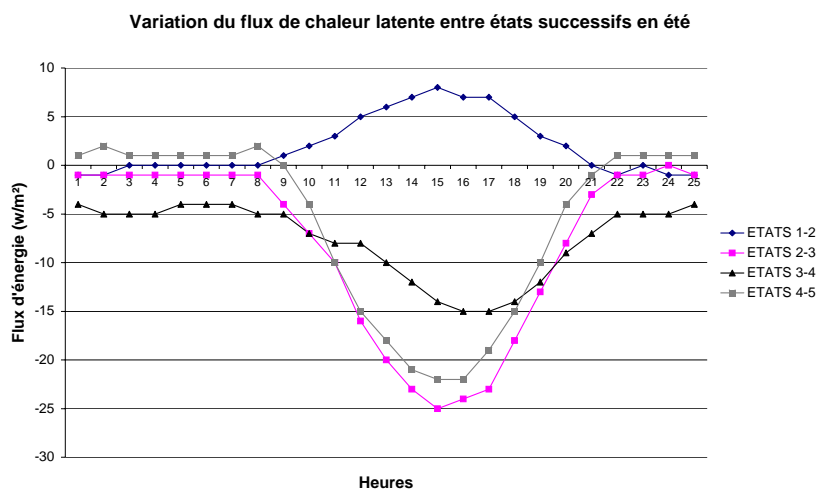
2.

Figure 3.92 : Evolution journalière moyenne des flux de chaleur latente selon chaque état en été et en hiver

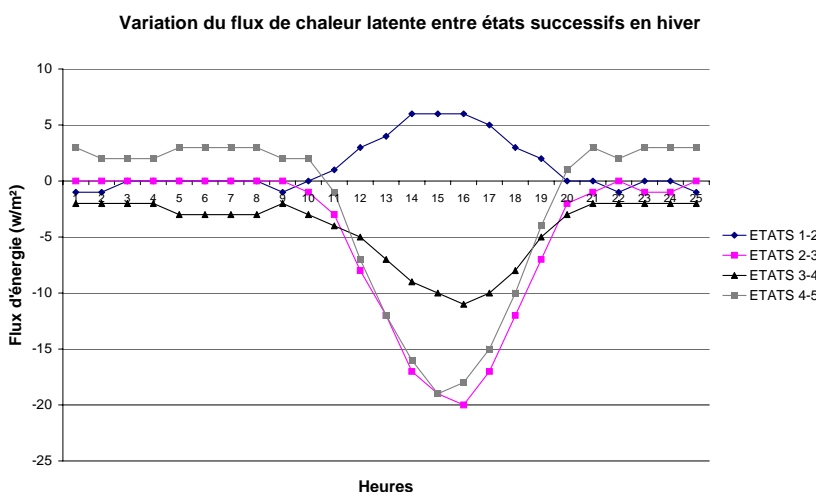
- La seule phase de transformation qui fait augmenter le flux de chaleur latente est celle qui correspond au pavage des rues (état 2 ; +8w/m<sup>2</sup>). En effet, la minéralisation des sols induit un accroissement du réservoir d'eau en surface puisqu'elle augmente l'imperméabilité du sol. Sachant

que le réseau de drainage était à cette époque en surface, l'imperméabilisation augmente d'avantage la fraction d'eau à l'air libre, et par conséquent production du flux de chaleur latente et l'humidification de l'air. On s'aperçoit mieux de cet effet, ainsi que de l'effet de chaque état par rapport à son précédent, lorsqu'on évalue la différence du flux latent entre les états successifs (fig. 3.93). On observe ainsi que les quatre états succédant le premier vont tous conduire, que ce soit en été ou en hiver, à la diminution de la chaleur latente.

– En comparant les quatre états qui vont succéder au premier, on observe que le passage de l'état 2 à l'état 3 (Etat 2-3) induit la plus forte diminution de la chaleur latente (-25 w/m<sup>2</sup> à mi-journée). L'état 3 du centre ancien est principalement caractérisé par l'enterrement des réseaux, le comblement des fossés et l'édification des cœurs d'îlots qui étaient dans les états précédents constitués de surfaces végétales l'ensemble de ces transformations réduisent les surfaces évaporantes et évapotranspirantes. Le comblement des cours d'eau dans l'état 5 induit à son tour une diminution importante de la chaleur latente (-22 w/m<sup>2</sup> à mi-journée).



1.



2.

Figure 3.93 : Evolution des écarts des flux journaliers moyens de chaleur latente en été et en hiver entre les états successifs (Etat 1-2 représente la variation qui résulte du passage de l'état 1 à l'état 2).

– En période nocturne l'état 2 et l'état 3 ne provoquent pas de changement notable, tandis que l'état 04 induit la plus forte diminution du flux de chaleur latente. L'état 5 quant à lui provoque une augmentation du flux. Augmentation qui est encore plus accentuée en hiver (fig. 3.93-2). Cette dernière pourrait être due à un effet secondaire de l'augmentation des flux turbulents la nuit (déstockage et chaleur sensible due au chauffage) qui vont induire plus d'échanges avec l'atmosphère

après chaque événement pluvieux. Les états, avant l'état 5, du fait de la faible température et la faiblesse des flux déstockés et sensibles, provoquaient une température de surface d'eau plus faible et donc s'évaporaient moins que l'état 5.

L'évolution du flux de chaleur latente s'avère donc en diminution constante (hormis lors du passage de l'état 1 à l'état 2, qui est tout de même un cas spécifique du fait du réseau de drainage qui était en surface). Cette diminution aura des répercussions à la fois sur les autres termes du bilan d'énergie qui, pour rétablir l'équilibre énergétique, seront en augmentation, mais aussi sur l'humidité de l'air. L'air va ainsi progressivement se déshumidifier au fur et à mesure que la surface urbaine s'assèche et s'artificialise par les comblements et les minéralisations des sols.

#### 4.1.2. Variation du flux de chaleur stockée

Le modèle TEB prenant en compte l'inertie des matériaux permet d'évaluer dans la simulation des flux stockés par la surface urbaine, des phases de stockage (le jour) et de déstockage (la nuit) de chaleur. Le stockage de la chaleur connaît, en fonction de l'urbanisation, des variations contraires au flux latent mais beaucoup plus importante en valeur absolue.

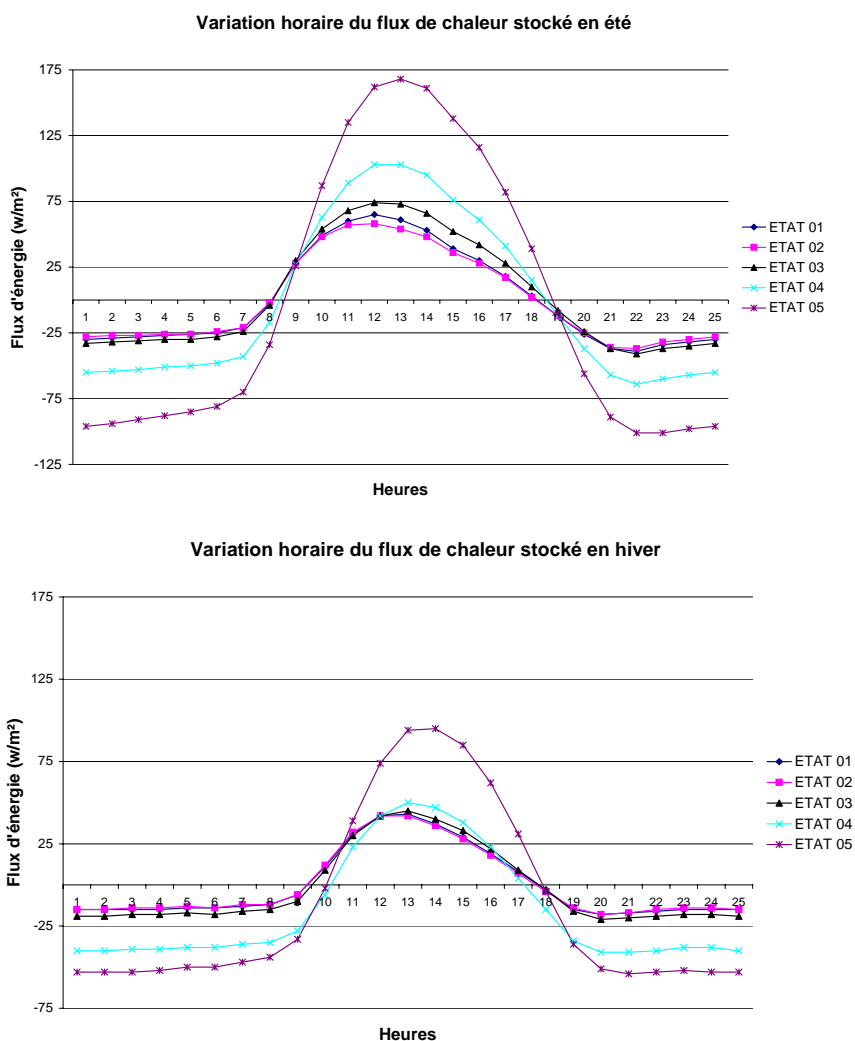


Figure 3.94 : Evolution journalière moyenne des flux de chaleur stockée selon chaque état en été et en hiver

La densification progressive et la minéralisation des sols augmentent en effet progressivement l'inertie des matériaux de surface et donc la quantité de chaleur stockée puis restituée (flux négatifs).

La restitution de la chaleur se fait proportionnellement à la chaleur stockée le jour. Plus cette dernière est importante plus la surface urbaine va contribuer au réchauffement de l'air la nuit. En superposant les graphes représentant les flux moyens journaliers stockés à chaque état, on observe que (fig. 3.94) :

- Le changement des matériaux de construction et des matériaux de surface du sol provoque une évolution importante du flux stocké. L'évolution la plus remarquable est celle qui concerne le passage au dernier état (+ 67w/m<sup>2</sup> à 14h) et de manière moindre celle du passage au deuxième (+30w/m<sup>2</sup> à 14h). Cette dernière augmentation est due à la minéralisation de toutes les surfaces du sol urbain y compris celles des cours intérieures des îlots. Les surfaces plantées disparaissent ainsi pratiquement du centre ville.
- L'évolution très importante de la quantité de surfaces minérales fait varier l'inertie du sol et donc la quantité de chaleur stockée. La chaleur stockée en période diurne est restituée la nuit vers les espaces urbains et l'atmosphère (jusqu'à -90 w/m<sup>2</sup> dans le cinquième état), ce qui conduit la nuit à un réchauffement de l'air du fait du phénomène de déstockage.
- Le comblement des cours d'eau va à son tour augmenter le flux de chaleur restituée la nuit. C'est une forme de minéralisation qui va induire en hiver un déstockage (restitution de chaleur) de près de 14w/m<sup>2</sup>.

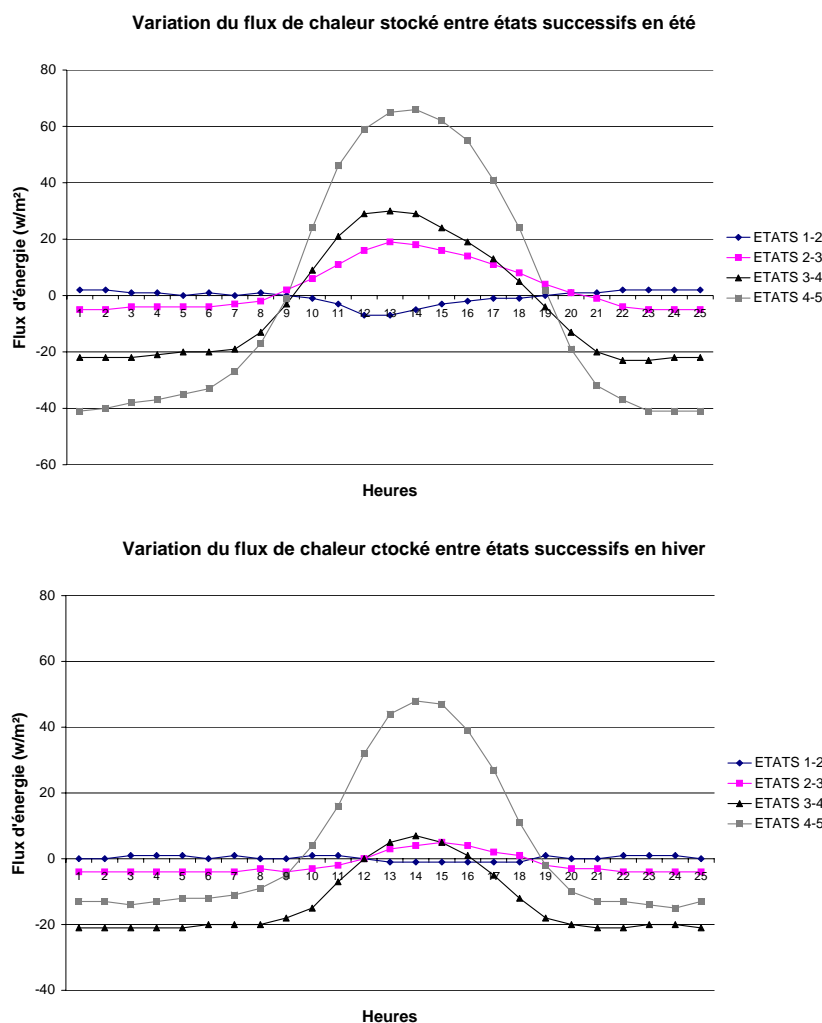


Figure 3.95 : Evolution des écarts des flux journaliers moyens de chaleur stockée en été et en hiver entre les états successifs

Lorsque l'on superpose les graphes représentant les écarts entre les états successifs (fig. 3.95) on observe mieux l'amplitude des variations que chaque phase de transformation va induire. Mis à part la première phase de transformation, les phases qui vont succéder vont induire pendant la journée une augmentation de plus en plus importante du flux surtout en été (état 2-3 :  $+20\text{w/m}^2$  ; état 3-4 :  $+30\text{w/m}^2$  ; état 2-3 :  $+65\text{w/m}^2$ ). L'inverse (restitution de chaleur) va se produire la nuit dans des proportions tout aussi importantes. En hiver l'évolution provoquée par les états 03 et 04 est moins nette le jour. De par la diminution des rayonnements solaires, ce sont les rayonnements infrarouges ainsi que le chauffage des habitations qui réchauffent, lors de l'état 4, les surfaces urbaines. L'écart le plus important en chaleur restituée en phase nocturne en hiver est celui relatif au passage du troisième au quatrième état ( $-20\text{ w/m}^2$ ). Cela est dû à l'introduction du chauffage dans les habitations lors de cette phase de transformation. En été, c'est le passage de l'état 4 à l'état 5 qui va restituer le plus de chaleur. Cela revient principalement au comblement des cours d'eau et à l'introduction des isolants thermiques dans les murs qui vont augmenter la chaleur stockée le jour.

L'évolution du flux stocké est donc fortement liée à l'évolution de l'état de minéralisation de la surface urbaine, surtout en été, du fait des apports solaires en énergie. En hiver, la variation des flux stockés est assez faible le jour (sauf pour le dernier état) alors qu'elle est assez importante la nuit. Ces variations nocturnes dépendent à la fois de la minéralisation mais aussi de l'introduction du chauffage dans l'état 04 sans isolation thermique.

Le phénomène de stockage provoque une augmentation des températures de surface qui induit une élévation des écarts de températures avec les surfaces d'eau et les surfaces végétales, ce qui provoque une augmentation du troisième terme du bilan d'énergie : le flux de chaleur sensible.

#### **4.1.3. Variation du flux de chaleur sensible**

Les échanges convectifs (naturels ou forcés) produisent des flux de chaleur sensibles (énergie qui sert à chauffer l'air) du fait des écarts de températures entre les surfaces et l'air ou entre les masses d'air. Les données météo étant considérées inchangées, si une surface se réchauffe ou se refroidit cela conduira au réchauffement ou au refroidissement relatifs de l'air par le biais des échanges convectifs.

Concrètement lorsque l'on compare l'évolution des flux de chaleur sensible entre les états successifs (fig. 3.96) on s'aperçoit des variations suivantes :

- Le dernier état du centre ancien qui comprend à la fois des comblements et des densifications induit l'augmentation la plus importante du flux de chaleur sensible. En été cette augmentation s'élève à  $+58\text{w/m}^2$  le jour et  $+30\text{w/m}^2$  la nuit, et en hiver elle atteint  $32\text{ w/m}^2$  le jour et  $10\text{ w/m}^2$  la nuit.
- Le passage du deuxième au troisième état fait augmenter à son tour la chaleur sensible car la résistance aérodynamique<sup>138</sup> a diminué du fait du début des alignements. Mais cette augmentation est assez mineure par rapport aux précédentes.

L'évolution des flux de chaleur sensible connaît une variation assez comparable au flux stocké et pratiquement inverse à celle du flux de chaleur latente. L'augmentation du flux stocké faisant augmenter la température de surface, les mouvements convectifs vont donc produire un flux de chaleur sensible dissipant cette chaleur de la surface vers l'air. En résumé, on peut conclure que l'ensemble des transformations urbaines (hormis le passage du premier au deuxième) contribuent au réchauffement de l'atmosphère urbaine que ce soit le jour ou la nuit, en hiver ou en été.

---

<sup>138</sup> Voir les formulations mathématiques des différents termes du modèle en annexe.

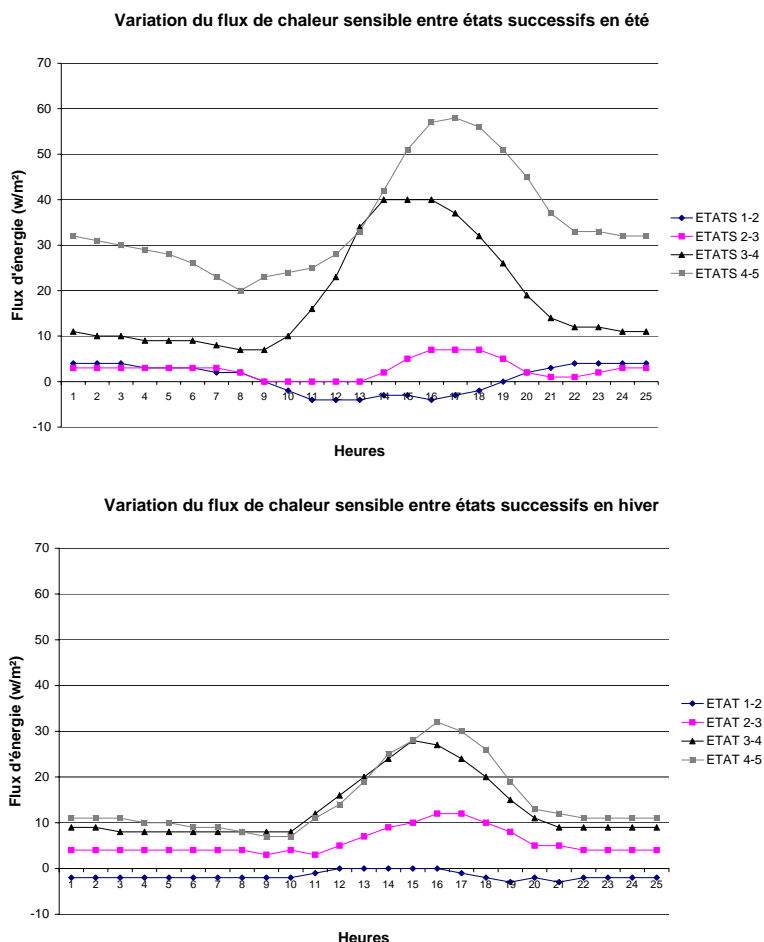


Figure 3.96 : Evolution des écarts des flux journaliers moyens de chaleur sensible en été et en hiver entre les états successifs

#### 4.1.4. Le bilan énergétique journalier en été et en hiver<sup>139</sup>

Après avoir évalué l'évolution de chaque flux de manière spécifique, comparons à présent dans un même graphique (fig. 3.97) les différents termes du bilan énergétique à chaque état ancien. De manière globale on remarquera une stabilité relative du rayonnement net entre le premier et le deuxième état puis entre le troisième et le quatrième. Seule le dernier état va induire une augmentation du flux net, et cela du fait de l'augmentation importante de l'écart entre le flux stocké et le flux restituée la nuit (puisque le flux net égal à la somme du flux latent, du flux sensible et de l'écart entre le flux stocké et restitué).

On peut ainsi résumer les principales observations aux éléments suivants :

- Quel que soit l'état considéré, en début de journée d'été, le flux de chaleur stocké par le sol des rues et les bâtiments est plus important que les flux de chaleur sensible ou latente. Cela est dû aux rayonnements émis dès le lever du soleil qui sont d'abord stockés. Ensuite c'est le flux de chaleur sensible qui devient dominant et son maximum est deux à trois fois plus grand que les autres flux provenant de la surface urbaine<sup>140</sup> (la chaleur stockée est progressivement restituée).

<sup>139</sup> Voir en annexe les tableaux récapitulatifs des bilans horaires d'énergie en été et en hiver selon les cinq états du centre ancien de la ville de Nantes.

<sup>140</sup> Ces comportements sont assez proches de ceux évoqués dans des travaux de climatologie urbaine [GRIMMOND et al. 1999 ; MASSON 2000].



– Le flux de chaleur stocké devient au fur et à mesure des transformations plus important que celui de la chaleur latente en été. En effet, alors que c’est le flux latent qui est plus importante dans le premier et le deuxième état, les deux flux sont presque de même intensité dans le troisième, puis c’est le flux stocké qui devient prépondérant. Cette inversion progressive est surtout due à la réduction des surfaces d’eau et des surfaces évapotranspirantes au bénéfice des surfaces minérales. En hiver, l’écart entre les flux de chaleur sensible et latente est réduit à une valeur presque nulle en hiver dans le troisième état de la ville. Dans cette phase, on assiste en effet à l’enterrement des réseaux d’évacuation d’eau et au comblement des fossés, ce qui réduit le flux de chaleur latente qui était plus important jusque là en hiver. Du fait de la largeur des rues, encore faible à cette époque, les échanges convectifs restent assez faibles dans la rue. Cet écart va ainsi augmenter au bénéfice du flux de chaleur sensible dès que les alignements se réalisent de manière plus intense.

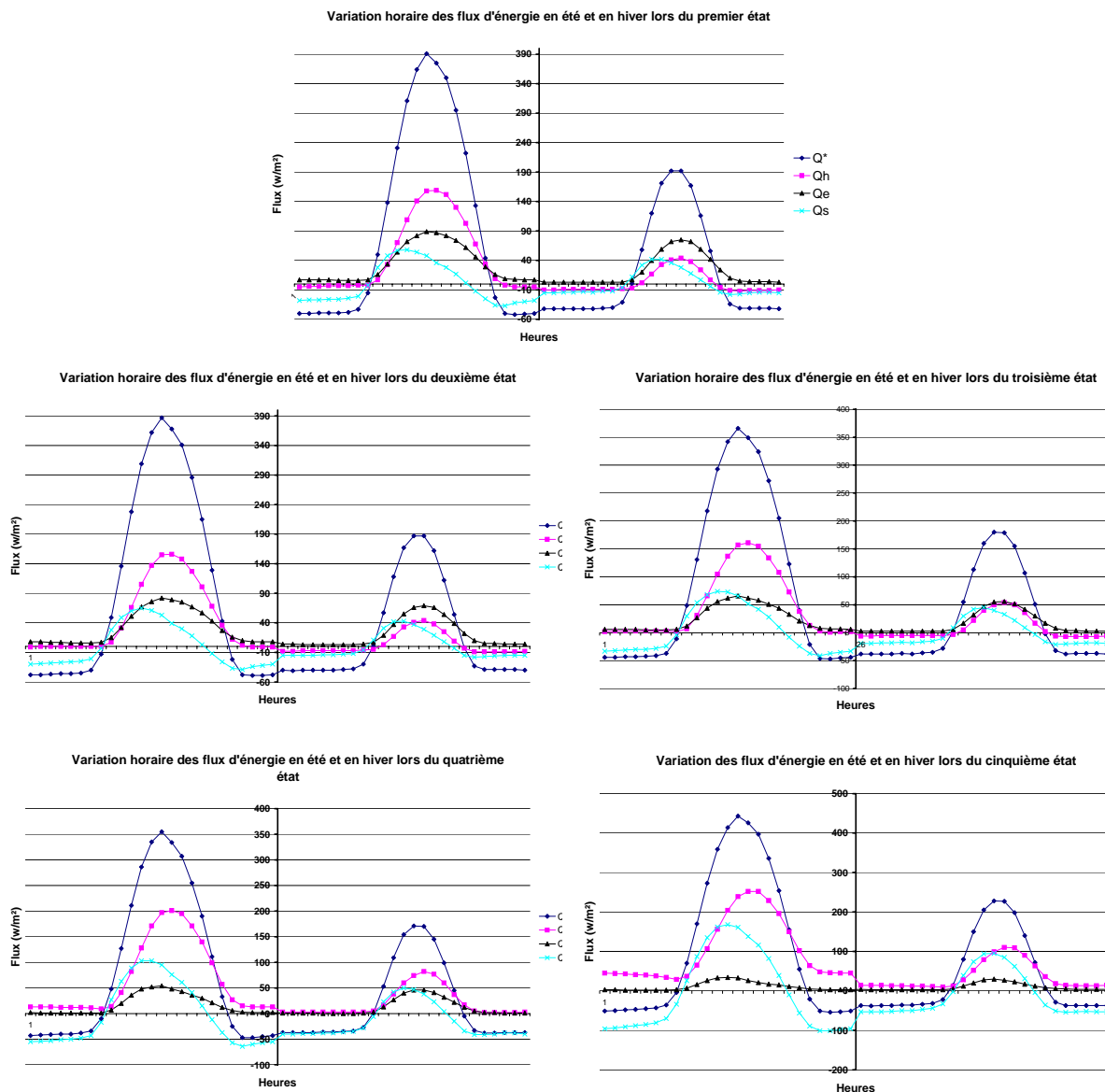


Figure 3.97 : Variation journalière moyenne des flux de chaleur en été et en hiver aux différents états

Pour avoir un aperçu synthétique de l’évolution des termes du bilan d’énergie nous avons comparé l’évolution des fractions de flux de chaleur stockée, sensible et latente par rapport au flux net (fig. 3.98). On observe ainsi que la fraction du flux de chaleur sensible et celle de la chaleur

stockée sont en augmentation considérable au cours des différentes saisons lorsque la ville passe d'un état à un autre, tandis que la fraction du flux de chaleur latente est en baisse importante.

	ETAT 01	ETAT 02	ETAT 03	ETAT 04	ETAT 05
<b>flux net moyen la nuit en W/m<sup>2</sup></b>					
Moyenne	-39	41.	-36	-35	-38
Hiver	-36	-38.	-34	-34	-34
Printemps	-43	-45.	-40	-38	-43
Été	-43	-45.	-40	-39	-45
Automne	-35	-36.	-33	-32	-32
<b>flux sensible moyen la nuit en W/m<sup>2</sup></b>					
Moyenne	-4	-7	-2	6	24
Hiver	-8	-10	-6	3	13
Printemps	0	-3	3	13	40
Été	0	-3	3	13	42
Automne	-7	-9	-6	1	10
<b>flux net moyen le jour en W/m<sup>2</sup></b>					
Moyenne	195	200.	186	179	217
Hiver	134	138	128	123	150
Printemps	244	249	232	224	274
Été	240	245	228	219	272
Automne	104	107	99	95	116
<b>flux sensible moyen le jour en W/m<sup>2</sup></b>					
Moyenne	62	62	68	96	125
Hiver	27	27	35	58	75
Printemps	79	78	90	125	173
Été	96	98	98	126	163
Automne	13	12	17	34	46
<b>flux latent moyen le jour en W/m<sup>2</sup></b>					
Moyenne	65	71	52	40	22
Hiver	52	56	42	34	20
Printemps	93	102	72	53	26
Été	56	61	45	34	20
Automne	47	51	39	33	21

Tableau 3.12 : Tableau récapitulatif des différents flux de chaleur selon les différents états de surface par saison

	ETAT 01	ETAT 02	ETAT 03	ETAT 04	ETAT 05
<b>Ratio QS/Q* moyen le jour en %</b>					
Moyenne	14	13	17	22	30
Hiver	20	19	22	23	35
Printemps	11	9	14	19	26
Été	13	12	17	24	31
Automne	23	22	26	28	40
<b>ratio QH/Q* moyen le jour %</b>					
Moyenne	32	31	37	53	58
Hiver	20	19	27	47	50
Printemps	33	31	39	56	63
Été	40	40	43	58	60
Automne	12	11	18	35	40
<b>ratio QE/Q* moyen le jour %</b>					
Moyenne	33	36	28	22	10
Hiver	39	41	33	28	13
Printemps	38	41	31	24	9
Été	23	25	20	16	7
Automne	45	48	40	35	18

Tableau 3.13 : Tableau récapitulatif des différents pourcentages de flux par rapport au rayonnement Net selon les différents états de surface par saison.

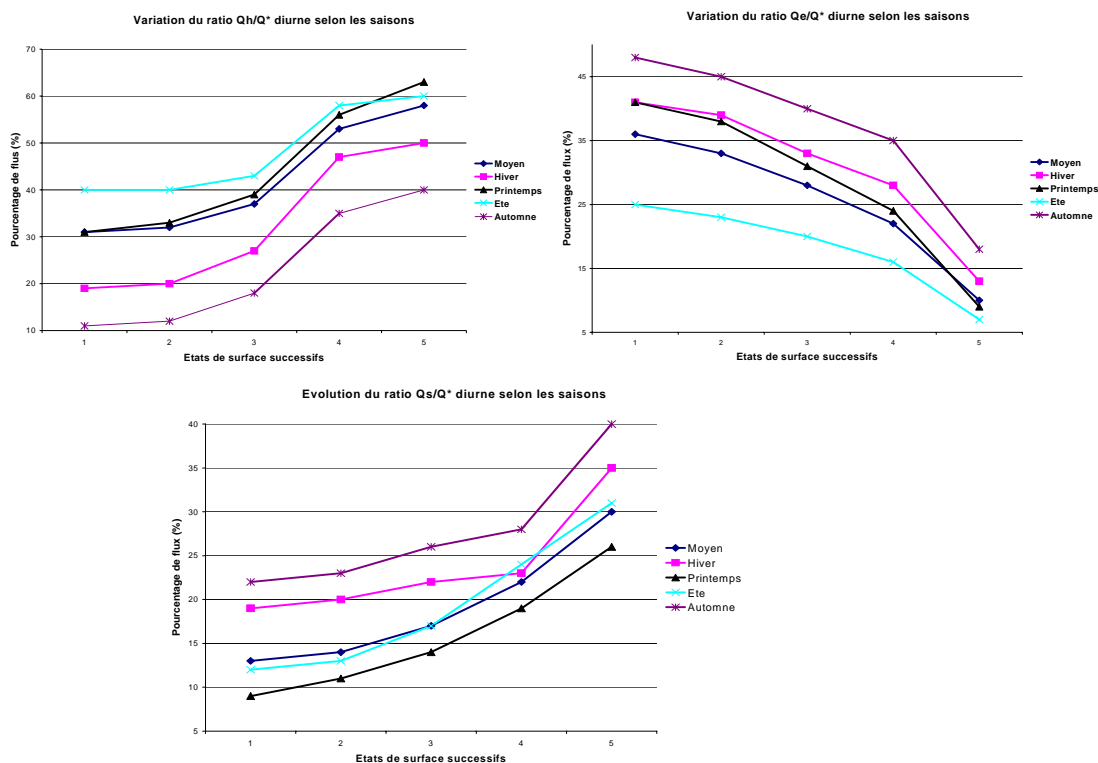


Figure 3.98 : Graphes représentatifs de l'évolution des ratios d'énergie Qh/Q\*, Qe/Q\* et Qs/Q\* selon les cinq états successifs du centre ancien

Finalement, on peut conclure que l'évolution de la surface urbaine a considérablement contribué à l'émission d'un ratio de flux de chaleur émis vers l'atmosphère qui est dans le dernier état de la ville trois fois plus important qu'au premier. Cet échange de flux avec l'atmosphère allant dans le sens d'un réchauffement est dû à la fois au processus de minéralisation mais aussi au processus d'ouverture des espaces urbains qui contribue à augmenter les échanges convectifs entre la surface urbaine et l'atmosphère.

## **4.2. Evolution des paramètres microclimatiques dans les rues**

L'évolution très importante des flux de chaleurs en plus des effets sur l'atmosphère (et donc sur l'évolution du climat urbain en général) a aussi des répercussions sur le microclimat des espaces de la ville. Les simulations par le modèle TEB, nous permettent de mesurer dans les rues du centre ancien de Nantes l'évolution des paramètres suivants : les températures d'air et de sol, la vitesse du vent et l'humidité spécifique de l'air.

### **4.2.1. Evolution des températures d'air et de sol**

La température de l'air calculée par le modèle TEB correspond à celle située approximativement à deux tiers de la hauteur de la rue. Cette température est donc plus influencée, dans les procédures de calcul du modèle, par la température de l'air au sommet des rues (qui est rappelons le considérée comme étant constante) que par les transformations de la rue. En effet le fait de calculer une température à 2/3 de la hauteur de la rue implique que cette dernière est plus influencée par les caractéristiques de la couche limite que par le microclimat de la rue. Cela se traduit dans les résultats de simulation par une faible variation des températures de rues simulées dans les différents états de la ville. Les valeurs calculées par TEB sont des valeurs moyennées entre les surfaces à l'ombre et celles au soleil et l'orientation des rues n'est pas réellement prise en compte, ce qui, ne permet pas de mettre en avant les effets de contraste pouvant provenir d'un ensoleillement important des rues.

Les simulations nous permettent néanmoins de mesurer deux types de température moyenne : les températures des surfaces (sol, murs et toits) et les températures de l'air. Nous présentons ici l'évolution de la températures de l'air et la température du sol dans les rues. La première traduit de manière relative les effets des transformations de la rue dans sa globalité, et la deuxième met en avant dans une certaine mesure les températures enregistrées près du sol.

Les températures du sol des rues sont principalement influencées par le type de matériaux utilisé pour les revêtements des sols et par le prospect des rues. On notera ainsi que (fig. 3.99) :

- le pavage systématique des sols lors de la première phase des transformations urbaines (entre le premier et le deuxième état), provoque la plus importante augmentation de la température des surfaces. Cette substitution d'un sol naturel compacté par du pavé produit en effet une élévation de température du sol des rues en hiver de l'ordre de 3 à 4°C la nuit et de plus de 2,5°C à mi-journée.
- La plus forte réduction des températures est due au passage du deuxième au troisième état (fig. 3.100). En été la température de surface est réduite de près de 2°C. Cela est principalement dû au surhaussement des bâtiments (qui passent d'un R+2 à R+4) ; les rues ont alors le plus important rapport H/L de l'histoire de la ville. Ce fort prospect contribue à augmenter les surfaces à l'ombre et donc à réduire la température moyenne du sol. En hiver, un refroidissement se produit à nouveau mais de manière moins spectaculaire. La température des sols n'est réduite que de 0,8°C à mi-journée par rapport à l'état précédent.

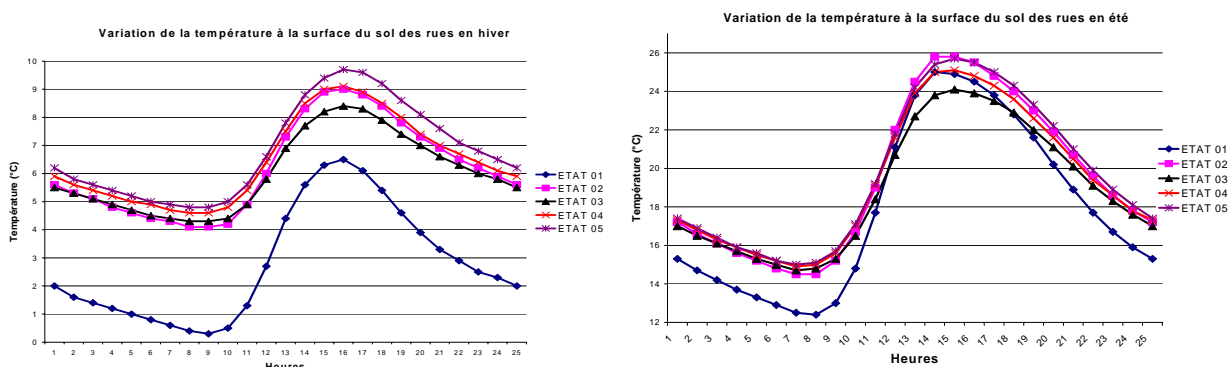


Figure 3.99 : Evolution des températures de surface du sol dans les rues en hiver et en été

– Les deux dernières phases (quatrième et cinquième état) font augmenter successivement la température de surface de 0,8°C et 0,7°C à la mi-journée.

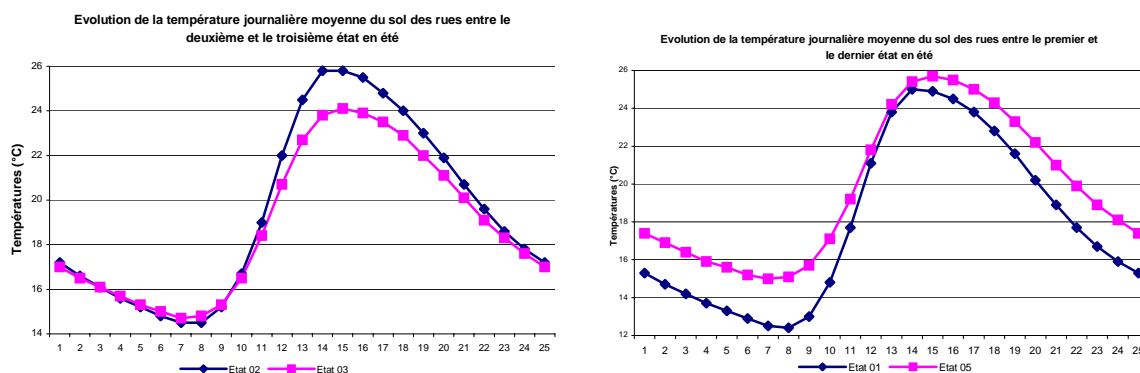


Figure 3.100 : Variation des températures de surface du sol des états 02 et 03 et des états 01 et 05 en été

Quant à l'évolution de la température moyenne des rues, calculée par TEB, que ce soit en hiver ou en été, elle ne dépasse pas 0,85°C la nuit et 0,65°C le jour (fig. 3.101 et fig. 3.102). Mais comme on l'a déjà évoqué cette faible estimation de la variation des températures est surtout due aux hypothèses du modèle.

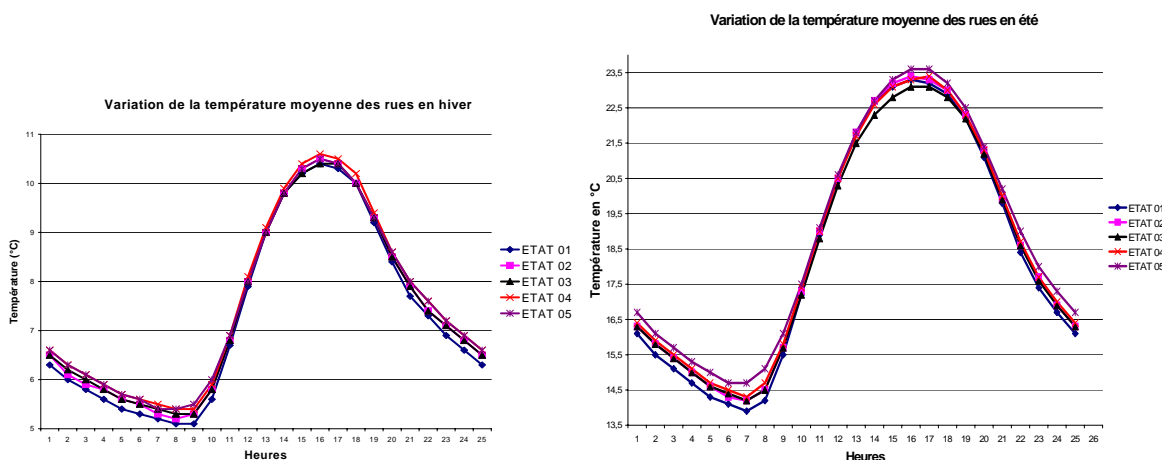


Figure 3.101 : Variation de la température moyenne des rues en été et en hiver (calculée à 2/3 de H)

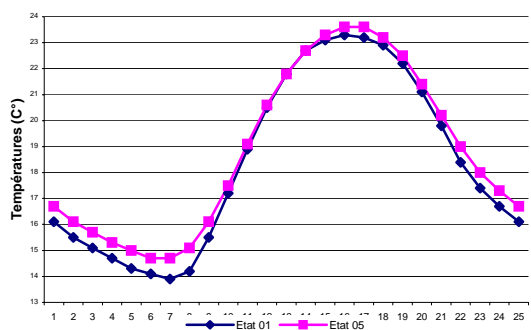


Figure 3.102 : Températures d’air moyenne journalière des états 01 et 05 en été

Les écarts de température d’air entre les différentes phases sur une journée sont plus importants. En effet en prenant comme exemple une journée d’été avec des températures d’air élevées (données météo du 17 août 1995) on note une évolution plus importante entre les températures d’air dans les rues (fig. 3.103). En période diurne les écarts de température entre le deuxième et le troisième état restent les plus importants. En effet l’augmentation des hauteurs des rues engendre une réduction de plus de 1,7°C pour une température météo de 27°C. En phase nocturne la dernière phase se distingue des autres avec une augmentation de plus de 2°C du fait du phénomène de déstockage de chaleur qui est très important pour cette configuration de la ville.

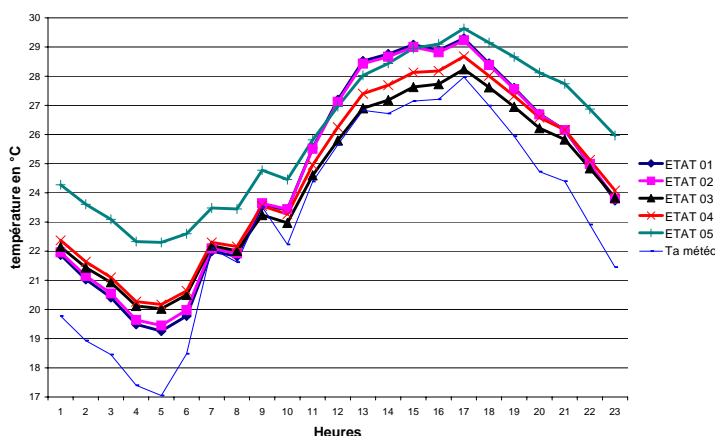


Figure 3.103 : Les températures d’air dans les rues le 17 août (donnés météo de 1995)

Pour évaluer les variations de température maximales (que TEB ne permet pas d’obtenir) dans les rues, en fonction des élargissements de ces dernières, nous pouvons utiliser le modèle de T.R.Oke qui définit l’intensité de l’îlot de chaleur urbain. Ce modèle a été obtenu à partir d’une comparaison d’un certain nombre de villes. La formulation de l’intensité de l’îlot de chaleur utilisée, dépend principalement du rapport H/L des rues. Elle permet d’évaluer l’écart maximum de température pouvant exister entre les températures des rues d’une ville et celle d’une surface rurale.

$$\Delta T_{u-r(max.)} = 7.54 + 3.97 \ln (H/L) [OKE 1987]$$

En appliquant à cette formulation plusieurs valeurs du rapport H/L (fig. 3.104), il apparaît que les variations de températures moyennes dans les rues calculées par le modèle TEB sont inférieures à celles relatives à l’application de la formulation de T.R.OKE. En comparant une ville avec des rues de rapport H/L=1.25 et d’autres avec un H/L=3, la différence atteint près 4°C. Ce modèle de Oke nous permet ainsi d’avoir un ordre de grandeur des évolutions de températures maximales pouvant résulter d’un changement du prospect des rues. Ce qui est le cas du passage du deuxième au troisième état de la ville.

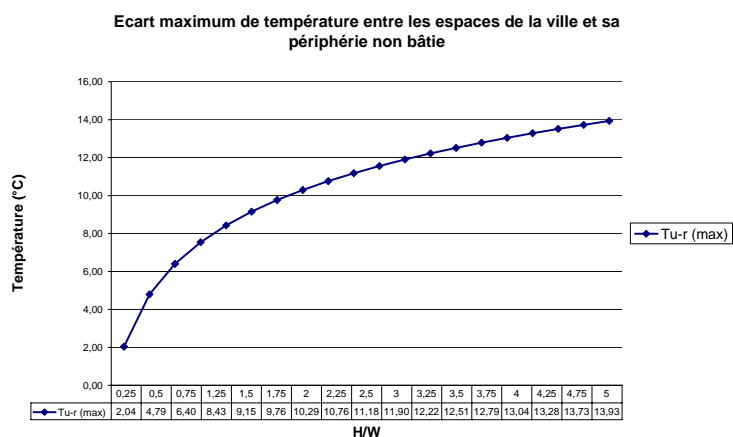


Figure 3.104 : Evaluation de «  $\Delta T_{u-r (max)}$  » selon différents cas de «H/L» d’après la formulation de OKE

#### 4.2.2. « Déshumidification » de l’air et vitesse du vent dans les rues

Le modèle TEB permet d’appréhender également l’humidité spécifique de l’air. Celle ci dépend directement de la quantité des surfaces évaporantes ou évapotranspirantes.

Le pavage des rues en rendant les surfaces du sol des rues imperméables fait augmenter la quantité d’eau drainée (avant l’introduction du système d’assainissement souterrain). De ce fait, et si l’air n’est pas saturé en eau, un processus d’évaporation s’enclenche depuis les surfaces d’eau au sol. Puisque cette eau provient des multiples usages quotidiens, et ne provient pas seulement de la pluie, elle constitue une source permanente d’humidification de l’air dans les rues. L’augmentation de l’humidité spécifique de l’air est d’abord due au pavage du sol des rues. Ce dernier augmente la surface d’eau drainée et induit ainsi une augmentation du rapport de mélange de l’air de près de 5% (fig. 3.105).

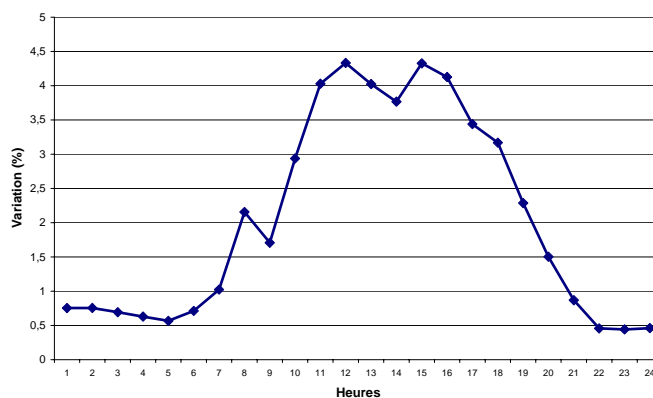


Figure 3.105 : Variation (en%) de l’humidité spécifique de l’air après pavage des rues (le 22 juin)

On peut observer aussi une variation de l’humidité de l’air après les alignements et élargissements des rues de la ville. Cette transformation de la morphologie des rues va relativement augmenter la vitesse du vent dans les rues et donc forcer encore plus le processus d’évaporation de l’eau depuis les surfaces mouillées. Mais ce sera surtout l’enterrement des réseaux qui produit la plus importante réduction de l’humidité de l’air dans les rues. En effet, lors d’une journée d’été sans pluie (données météo du 22 juin 1995), celle ci est réduite de près de 18% lors d’une journée d’été (fig. 3.106). Cette réduction de l’humidité de l’air est assez proche de celle qu’avaient mesuré les membres de la commission du logement insalubre en 1852. Cette diminution de l’humidité était estimée à 10% entre les rues étroites des faubourgs de Nantes et le Boulevard Delorme, ce qui est

comparable à la diminution de l'humidité moyenne calculée par TEB en prenant en compte l'enterrement des réseaux et l'élargissement des rues.

L'introduction des réseaux souterrains d'évacuation des eaux font donc disparaître la fraction d'eau qui était constamment en surface. Contrairement à une fraction d'eau permanente, les eaux pluviales disparaissent par évaporation après la fin d'un épisode pluvieux. Et selon l'importance du vent, cette humidité de l'air provenant de l'évaporation des eaux pluviales est réduite après le renouvellement d'air.

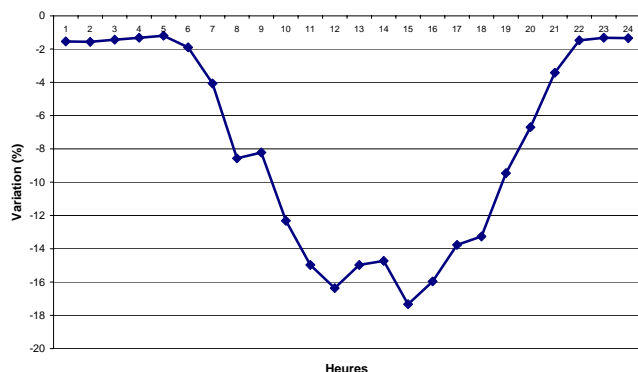


Figure 3.106 : Evolution (en%) de l'humidité spécifique des rues après l'enterrement des réseaux (le 22 juin)

Même si le modèle TEB ne permet pas d'appréhender les variations maximales de la vitesse du vent, puisqu'il s'agit de considérer un tissu avec une « équiprobabilité » des orientations des rues, on peut cependant évaluer l'évolution de la vitesse moyenne faisant suite à un changement du rapport H/L qui correspond aux élargissements des rues. On atteint ainsi une variation maximale de 0,2m/s entre l'état le premier et l'avant dernier état de la ville. Cependant si on évalue cette variation en terme de ratio représentant le taux de modification de la vitesse du vent, la modification devient significative puisqu'elle correspond à augmentation de la vitesse du vent de l'ordre de 15% (fig. 3.107).

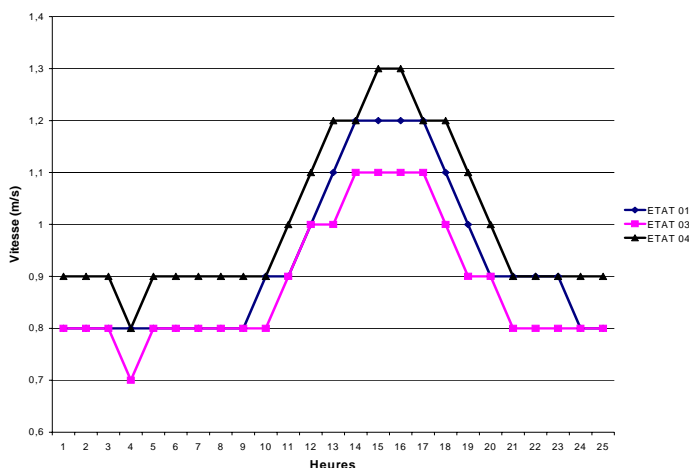


Figure 3.107 : Variation de la vitesse du vent des les rues après rétrécissement (phase 3) puis élargissement (phase 4) des rues

### 4.3. Synthèse des résultats

La quantification de l'évolution du microclimat urbain à travers l'histoire des transformations du centre ancien de la ville de Nantes nous permet d'observer deux échelles temporelles de variation. Des tendances globales, s'affirmant sur le long terme et des variations localisées dans des périodes courtes. Ces variations ponctuelles peuvent aller dans le sens de la tendance comme elles peuvent avoir un effet contraire, mais leur succession à long terme traduit une tendance homogène. Les tendances sont donc constituées des effets convergents des différentes transformations, alors que les variations peuvent être convergentes ou divergentes.

#### Des Tendances globales

Les tendances globales sont constituées des variations des paramètres physiques qui convergent vers les mêmes effets microclimatiques. Dans l'histoire des transformations urbaines nous en déduisons trois :

- *Le réchauffement de la surface urbaine* : l'évolution du bilan d'énergie à travers les différents états analysés (fig. 3.108) témoigne d'une augmentation du flux de chaleur sensible qui atteint près de 45% et d'une réduction du flux latent qui dépasse les 70%. Quant au flux stocké il augmente de plus de 53%. Cela traduit par un réchauffement important de la surface urbaine. Beaucoup de transformations urbaines convergent vers cet effet de réchauffement. Les principales parmi celles ci sont : la minéralisation des sols, le comblement des surfaces d'eau, et la densification de la surface urbaine.

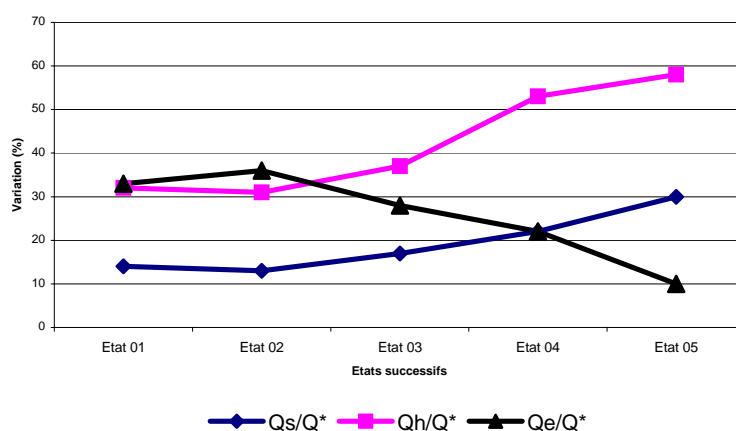


Figure 3.108 : Evolution à travers les états successifs de  $Q_s/Q^*$ ,  $Q_h/Q^*$  et  $Q_e/Q^*$  selon une moyenne établie sur six années de données météo

- *La déshumidification de l'air* : le deuxième effet majeur vers lequel convergent les transformations urbaines c'est la réduction de l'humidité de l'air. La diminution importante des surfaces d'eau et des surfaces végétales va ainsi réduire la source principale de l'humidification de l'air. L'état final de minéralisation de la surface urbaine va réduire presque complètement ces surfaces. La seule source de l'humidité reste donc constituée par les surfaces d'eau et les surfaces végétales dans la périphérie du centre<sup>141</sup>.

- *L'aération des rues* : Troisième tendance importante traduisant l'évolution du microclimat urbain: l'augmentation progressive de la porosité au vent de la surface urbaine à partir des premières

<sup>141</sup> Le modèle TEB, ne tenant pas compte des échanges advectifs, l'effet de ces surfaces situées en périphérie du centre n'a pas été pris en compte dans les simulations.



prescriptions sur l'alignement des rues. En effet en réaction à la densification importante de la ville et l'augmentation du prospect des rues, un processus de perméabilisation des espaces urbains aux écoulements d'air est entamé par le biais des différentes formes d'alignement (interdiction des saillies, recherche de la ligne droite élargissements et percées...). Si le réchauffement et la déshumidification commencent dès le deuxième état, le processus de perméabilisation de la surface urbaine n'est réalisé que dans les états 3 et 4. Avant ces états c'est l'inverse qui s'est produit. Le besoin de densification a conduit plutôt à réduire la perméabilité des rues aux écoulements d'air (augmentation des hauteurs des bâtiments). Mais il reste que cette perméabilisation produit entre les états 3 et 4 une augmentation de la vitesse du vent des rues qui atteint 18%, ce qui est, et ce malgré la non prise en compte de la direction des rues par TEB, une variation microclimatique considérable.

### **Des variations ponctuelles**

Les variations ponctuelles dans le temps contribuent à la fois aux tendances globales mais peuvent également aller dans un sens contraire à ces dernières. Les deux principales variations (propre à un ou deux états) qui vont dans le sens inverse aux tendances d'évolution globales du microclimat sont principalement dues :

- *au pavage des rues* : qui provoque une humidification de l'air et une augmentation du flux de chaleur latente, alors que la tendance qui suivra est plutôt à la déshumidification. Cette exception est surtout due au réseau de drainage qui était à cette époque à la surface du sol.
- *A l'augmentation de la hauteur des bâtiments* : qui en augmentant les surfaces à l'ombre réduit les apports solaires dans les rues en été et réduit, par la même, la vitesse du vent dans les rues de près de 6%.

En mettant en parallèle les effets de chaque transformation urbaine analysée dans les différents états avec la variation qu'elles induisent sur les paramètres physiques simulés par le modèle TEB, on observe mieux ces tendances globales et ces variations ponctuelles du microclimat urbain (fig. 3.110). Ainsi en comparant le sens de variation de ces paramètres dans une phase de transformation (passage d'un état à un autre) avec celui des interventions composant cette phase on peut constater les variations ponctuelles qui vont dans un sens inverse à la tendance. Pour définir une tendance il suffit d'observer la répétitivité d'un même sens de variation dans les différentes phases.

Les graphes et le tableau ci-dessous (fig.109 et 3.110 et tableau 3.14) montrent en effet le poids que peut avoir chaque transformation dans la modification des paramètres physiques modélisés par le modèle TEB. On peut mesurer ainsi, selon une échelle traduisant le poids de chaque phase allant de -4 à +4, les variations engendrées par les différentes transformations urbaines qui font passer la surface urbaine d'un état à un autre.

En résumé, les simulations numériques nous permettent d'affirmer l'existence d'un réchauffement et d'une déshumidification de l'air considérables et une augmentation des écoulements d'air. Même si ces tendances sont ponctuées de variations aux effets contraires, elles restent néanmoins des tendances qui caractérisent l'évolution à long terme du microclimat urbain. L'urbanisme salubriste, sans disposer d'outils de quantification et malgré les résistances qu'il a pu rencontrer dans la réalisation des transformations urbaines a permis de réduire l'humidité importante et à augmenter relativement les mouvements d'air dans les rues. Mais cet assainissement s'est fait au dépend d'un réchauffement important de l'atmosphère urbaine. Réchauffement qui aujourd'hui devient une problématique prioritaire de l'aménagement urbain durable.

Après avoir quantifié l'évolution des principaux paramètres physiques du microclimat urbain, et après avoir mis en évidence le poids des transformations urbaines dans cette évolution, nous allons, pour terminer ce troisième chapitre et introduire le suivant, émettre quelques observations en ce qui

concerne l'approche que nous avons adoptée pour quantifier le microclimat urbain, c'est à dire l'usage de « la modélisation numérique » par le biais du modèle TEB.

L'usage de la modélisation numérique, s'il permet de quantifier le microclimat urbain, suppose néanmoins un certain nombre de simplifications à la fois du fait du manque des données historiques mais aussi du fait des simplifications de la forme urbaine adoptées par le modèle TEB lui-même. Nous voulons discuter ici de ces dernières simplifications, qui nous ont paru quelque peu décalées par rapport à la complexité et la diversité de la forme urbaine. Discussion qui nous permettra de définir les limites de cette simplification de la forme urbaine et d'introduire le contenu du dernier chapitre de cette thèse dans lequel nous faisons un certain nombre de propositions méthodologiques pour dépasser ces limites.

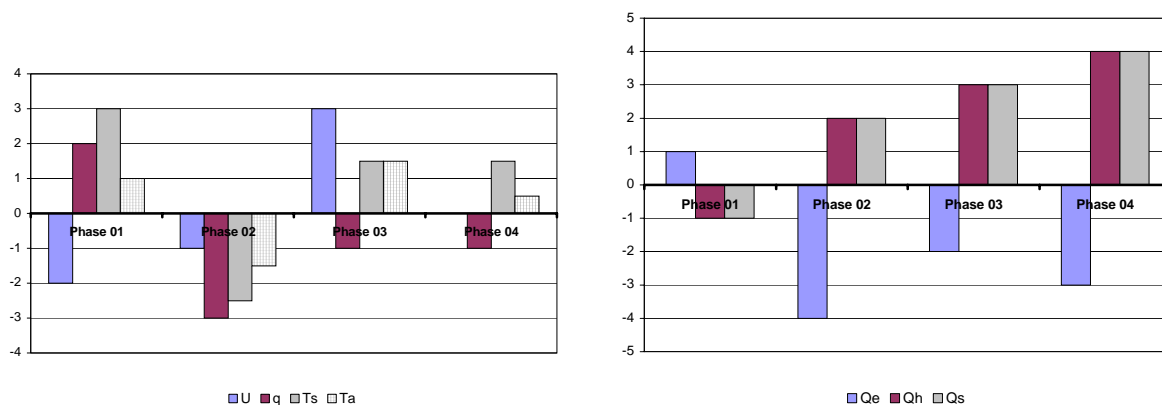


Figure 3.109 : Variation des paramètres microclimatiques et des flux de chaleur dans chaque phase de transformation selon une échelle d'influence de -4 à +4.

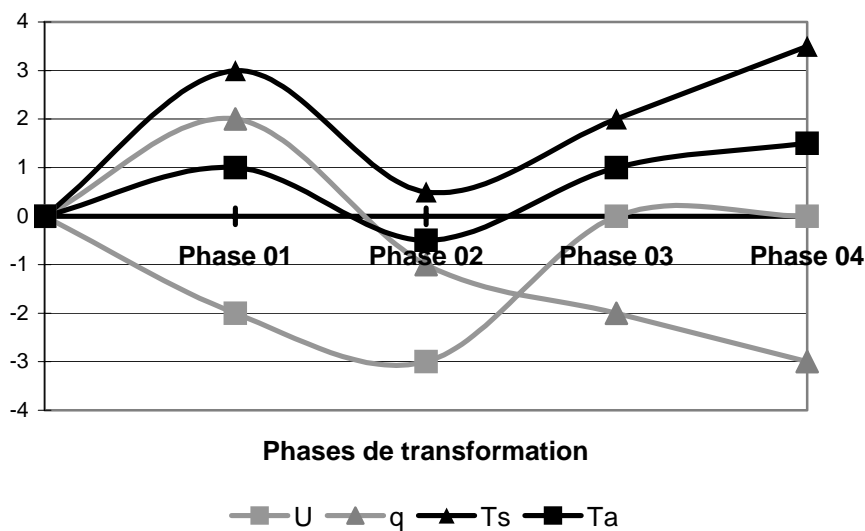


Figure 3.110 : Evolution à travers les états successifs de : U, q, Ts, et Ta selon une échelle d'influence de -4 à +4.

	<b>Qe</b> Chaleur latente	<b>Qh</b> Chaleur sensible	<b>Qs</b> Chaleur stockée	<b>U</b> Vitesse du vent	<b>q</b> humidité	<b>Ts</b> T (surface)	<b>Ta</b> T (air)
<b>Phase 01 (1-2)</b>	<b>+ 1</b>	<b>- 1</b>	<b>- 1</b>	<b>- 2</b>	<b>+ 2</b>	<b>+ 4 (hiver)</b> <b>+ 2 (été)</b>	<b>+ 1 (hiver)</b> <b>+ 1 (été)</b>
pavage	+	-	+	sc	+	+	+
Rehaussement des bâtiments	-	-	+	-	+	-	-
Substitution des pans de bois par la pierre	sc	sc	+	sc	sc	+	+
<b>Phase 02 (2-3)</b>	<b>- 4</b>	<b>+ 2</b>	<b>+ 2</b>	<b>- 1</b>	<b>- 3</b>	<b>- 2 (hiver)</b> <b>- 3 (été)</b>	<b>- 1 (hiver)</b> <b>- 2 (été)</b>
Enterrement réseaux	-	+	+	sc	-	+	+
Rehaussement des bâtiments et début des alignements <sup>142</sup>	-	-	+	-	+	-	-
Moins de surface végétale et plus de bâti	-	+	+	sc <sup>143</sup>	-	+	+
Enterrement des fossés	-	+	+	sc	-	+	+
<b>Phase 03 (3-4)</b>	<b>- 2</b>	<b>+ 3</b>	<b>+ 3</b>	<b>+ 3</b>	<b>- 1</b>	<b>+ 1 (hiver)</b> <b>+ 2 (été)</b>	<b>+ 2 (hiver)</b> <b>+ 1 (été)</b>
Moins de hauteur du bâti dans les rues	+	-	-	+	+	+	+
Réalisation des alignements	+	-	-	+	+	+	+
La grande percée	+	-	-	+	+	+	+
Pavage systématique des sols	-	+	+	sc	-	+	+
<b>Phase 04 (4-5)</b>	<b>- 3</b>	<b>+ 4</b>	<b>+ 4</b>	<b>sc</b>	<b>- 1</b>	<b>+ 2 (hiver)</b> <b>+ 1 (été)</b>	<b>- 1 (hiver)</b> <b>+ 1 (été)</b>
Comblement des cours d'eau	-	+	+	sc	-	+	+
Introduction d'isolants (hypothèse)	sc	+	+	sc	sc	+	+

Tableau 3.14 : tableau synthétique de la variation des paramètres physiques simulés par TEB les différentes phases de transformations et les différentes interventions constituant chaque phase, selon une échelle entre -4 et +4.

<sup>142</sup> Cette transformation augmente le prospect des rues, car le rehaussement des édifices reste plus important que l'élargissement des rues qui résulte des alignements.

<sup>143</sup> La densité bâtie, qui touche au cœur d'îlots, n'altère pas la vitesse du vent dans les rues, car elle ne suppose pas de changement du rapport H/L dans le modèle.

#### 4.4. Discussion sur la prise en compte par le modèle TEB de la diversité des formes urbaines

Lors de la reconstitution des données d'entrées nécessaires aux simulations, nous avons dû émettre un certain nombre d'hypothèses. Concrètement il a fallu par exemple définir un prospect moyen pour toutes les rues sachant qu'elles ont des prospects différents. En effectuant les modélisations de la forme urbaine, nous avons donc constaté que le passage d'une forme urbaine réalisée à son modèle (celui pris en compte par TEB) pose quelques problèmes d'interprétation. En transformant les états anciens de la ville en des valeurs numériques (paramètres de surface du modèle urbains dans TEB) nous avons adopté une description simplifiée de la forme urbaine. Ainsi deux simplifications retenues par le modèle TEB, nous ont paru particulièrement réductrices par rapport à la réalité de la forme urbaine (ce qui n'enlève rien à la validité du modèle à une échelle globale)<sup>144</sup> :

- La forme urbaine composée de rues canyons au prospect identique ;
- Equiprobabilité des orientations des rues.

Dans le cas de la ville de Nantes, qui est un tissu urbain au tracé organique et au schéma de forme urbaine basée sur la rue, ces simplifications pouvaient cependant être envisagées. Mais dans le cas d'un tissu en damier par exemple avec une direction préférentielle des rues ou avec des prospects de rues non homogènes cette simplification devient problématique. Ainsi, plus le modèle de la forme urbaine s'éloigne du schéma urbain adopté par TEB, plus l'utilisation du modèle suppose une réduction de la complexité de la forme urbaine. Pour clarifier notre propos développons les deux hypothèses évoquées ci-dessus :

##### 4.4.1. La forme urbaine composée de rues canyons au prospect identique

Les simplifications que le modèle TEB adopte à propos de la morphologie de la ville, tout en prenant en compte les hauteurs des espaces bâtis, ont été, comme on l'a déjà dit, les principales raisons de son choix comme modèle de simulation. D'abord parce qu'il fut récemment validé, mais aussi parce que cette simplicité réduit les informations nécessaires à la reconstitution des états de surface du centre ancien de la ville. Ce que l'on veut aborder ici c'est l'applicabilité du modèle TEB ou des autres modèles basés sur une analyse paramétriques à des formes urbaines plus complexes et moins homogènes que celles du centre ancien de Nantes. C'est même examiner le cas où le tissu urbain n'est pas constitué de rues, comme c'est le cas dans les grands ensembles par exemple, ce qui rend la notion de rue canyon peu applicable.

Dans le cadre d'une étude élaborée par le laboratoire CERMA et « Air Pays De La Loire » [Benzerzour et al. 2003], un relevé des rues de la ville de Nantes a été effectué (une trentaine dans le centre, et plus d'une cinquantaine de rues situées entre le centre ancien et la première ceinture des boulevards périphériques). Les modélisations étaient destinées à constituer une base de données pour un modèle de simulation de la pollution atmosphérique et les paramètres morphologiques relevés étaient: la hauteur des bâtiments, les largeurs et les orientations des rues ainsi que le pourcentage de continuité des fronts bâtis dans les rues. Des discontinuités et des irrégularités qui s'écartent plus ou moins du schéma canyon ont ainsi été constatées.

<sup>144</sup> Nous rappelons que cette simplification est due à l'objectif premier du modèle, qui n'est pas d'évaluer les variations des paramètres microclimatiques au sein d'un fragment urbain, mais de calculer la valeur moyenne de ces paramètres pour en traduire une entrée aux modèles Meso-échelle. Une fois ces valeurs moyennes calculées, elles serviront pour étudier les effets de la zone urbanisée sur la couche atmosphérique.

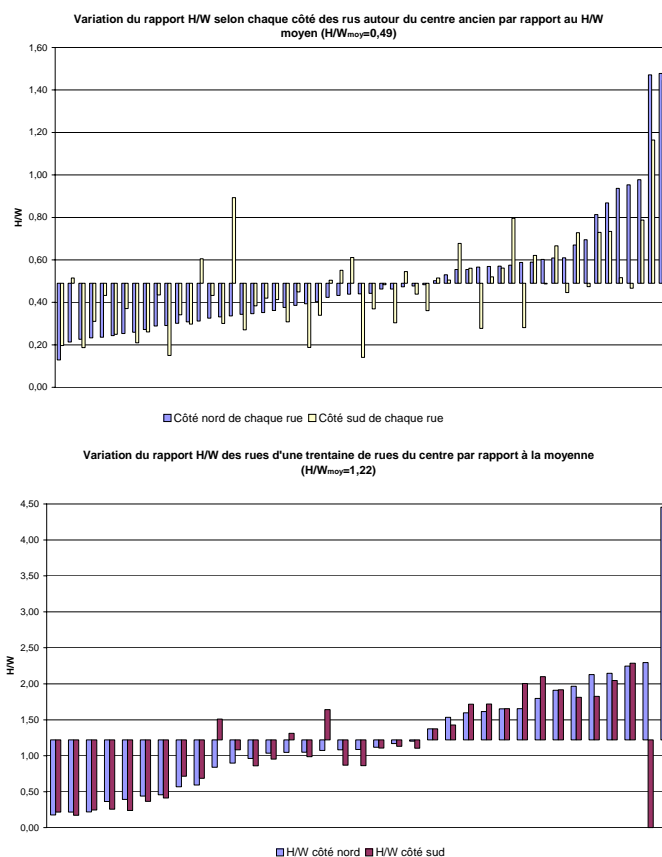


Figure 3.111: Variation du rapport H/L selon les hauteurs de chaque côté de rue (en haut les rues autour du centre ancien, en bas les rues du centre)

Une première analyse de la variation des rapports H/L des rues étudiées montre à la fois l'écart entre la valeur moyenne de l'ensemble des rues et celle de chaque rue ainsi que le contraste existant entre les deux parois des différentes rues (fig. 3.111). Ces écarts augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre ancien de la ville ; les quartiers périphériques perdent peu à peu le caractère homogène du centre.

Au-delà de la variation du prospect des rues, la discontinuité des fronts bâtis dans les quartiers peu denses éloigne d'avantage la forme urbaine du schéma canyon. En effet, une rue canyon est, par définition, composée de fronts bâtis continus. La partie du boulevard Lelasseur représentée ci-dessous (fig. 3.112) est par exemple difficilement traduisible dans le schéma canyon. On voit ainsi sur ce boulevard une variation des hauteurs bâties, des discontinuités des fronts bâtis, et une asymétrie importante entre les deux côtés de la rue. Alors comment traduire cette rue en une rue canyon ? Quel prospect lui moyen attribuer ? . C'est à l'auteur de la modélisation de répondre à ces questions de manière intuitive, sachant que cela induit une réduction importante de la forme de la rue.

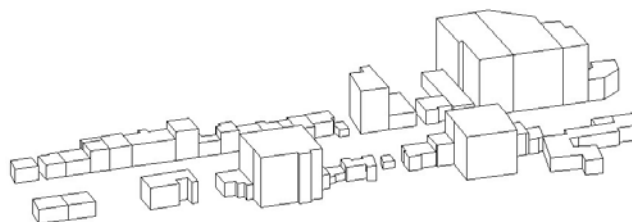


Figure 3.112 : Vue 3D simplifiée d'une rue assez éloignée du concept Canyon (une partie du boulevard Lelasseur à Nantes)

Cette « complexité » des rues n'est pas le seul fait de rues isolées. A l'échelle d'une quarantaine de rues autour du centre ancien de Nantes, on peut observer (fig. 3.113) la variation qui peut exister par exemple entre les deux côtés de chaque rue. Il s'avère qu'assez peu de rues ont des fronts bâtis continus sur toute leur longueur, et que la plupart des rues ont une fraction de continuité bâtie (Longueur du bâti/ Longueur de la rue) différente entre un côté et un autre de la rue.

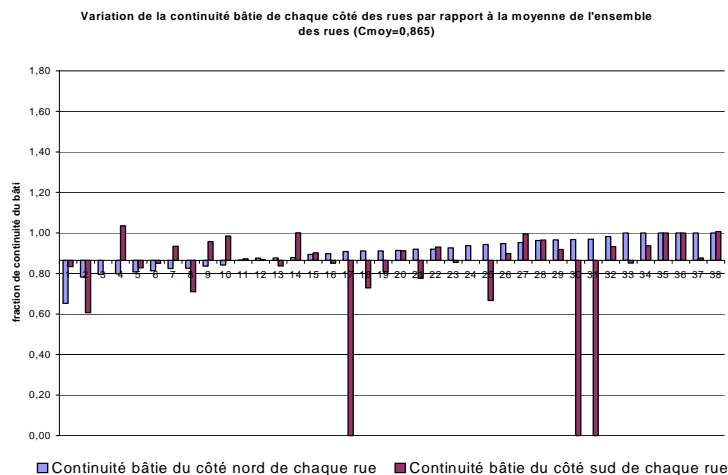


Figure 3.113 : Variation de la continuité bâtie de chaque côté de rue par rapport à la valeur moyenne calculée sur une quarantaine de rues autour du centre ancien

Cette complexité (irrégularité) de la forme urbaine est encore plus accentuée dans les quartiers périphériques (fig.3.114) et dans les grands ensembles. La ville se construisant par une succession de transformations qui ne s'opèrent pas de manière simultanée sur un tissu urbain en entier, Il est donc difficile de trouver à un instant donné de l'histoire d'une ville des propriétés morphologiques homogènes. Même les villes dites planifiées où les tissus bâtis, créés dans le cadre d'un seul projet global selon un certaine « idée de la ville » comme les grands ensembles par exemple, subissent des transformations pour les adapter aux besoins changeants de chaque époque. Concrètement il y a peu de tissus urbains constitués d'une répétition des même caractéristiques. Les quartiers homogènes, comme c'est le cas du centre ancien à Nantes, sont plutôt une exception dans une ville en transformation. Les écarts entre la valeur moyenne des propriétés morphologiques à l'échelle du tissu et les valeurs locales de ces mêmes paramètres peuvent donc être parfois importantes.

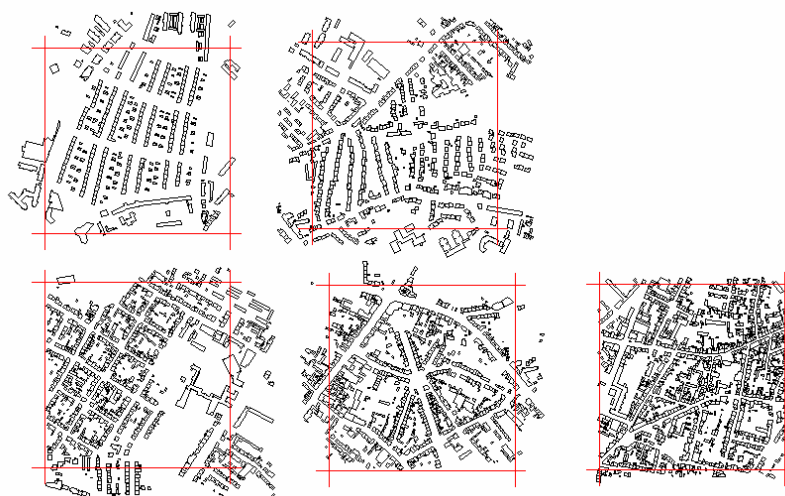


Figure 3.114 : Exemples de différents tissus périphériques au centre ancien (extraits du plan numérique de la ville de Nantes de 1999)

V.Masson le dit bien [Masson 2000] : « TEB est applicable sur des fragments homogènes ». Car en absence d’homogénéisation, il existerait des écarts importants entre les paramètres morphologiques de l’ensemble urbain analysé et les paramètres de situations locales<sup>145</sup>. Mais dans le cas d’une simulation appliquée à des tissus urbains existants, comment mesurer leur degré d’homogénéité ? Et disposons-nous d’outils nous permettant d’estimer ces paramètres morphologiques et leurs variations ? Nous formulerons quelques éléments de réponse de réponse dans le dernier chapitre de cette thèse.

#### 4.4.2. L’hypothèse de l’équiprobabilité des orientations de rues

La deuxième hypothèse du modèle TEB que nous discuterons est celle relative à l’équiprobabilité des orientations des rues. De même que pour les prospectus des rues il nous semble que cette hypothèse est à son tour réductrice de la complexité de la forme urbaine. Cette hypothèse se vérifie – t- elle dans la ville ?

En comparant les directions des rues du centre ancien avec celles de la première périphérie de la ville de Nantes, par secteur d’orientation de 30 degrés<sup>146</sup>, on s’aperçoit que le centre ancien dont les directions de rues sont multiples connaît une distribution assez homogène des directions de rues (fig.3.115-2). Tandis que les rues de quartiers périphériques ont une direction préférentielle de rues qui correspond à l’axe nord-ouest sud-est (fig. 3.115-1).

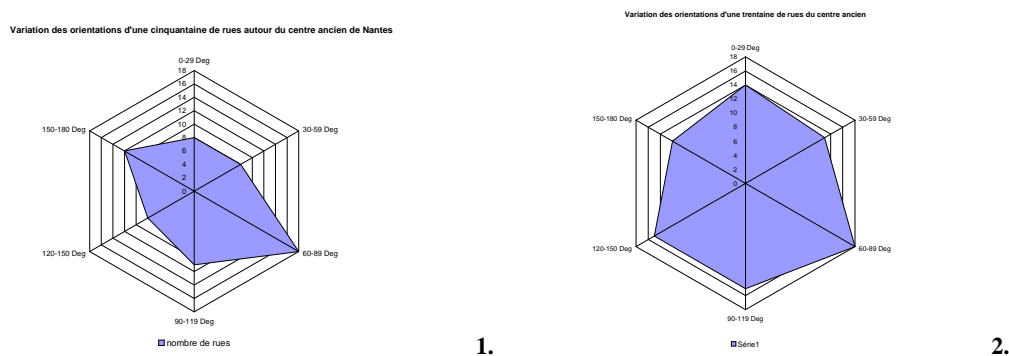


Figure 3.115 : Variation des orientations de rues par plage d’orientation : 1) Rues de la première périphérie ; 2) Rues du centre ancien

Plus il y a de directions de rues, plus la valeur moyenne se rapproche des résultats du modèle TEB. La question qui se pose est de savoir si l’absence de l’équiprobabilité des orientations de rues n’altère pas les résultats des simulations ? Pour répondre à cette question nous avons utilisé le modèle SOLENE développé au CERMA et comparé, à titre indicatif, l’ensoleillement direct reçu par les parois d’une rue selon différentes orientations de rues.

L’illustration ci-dessous (fig. 3.116) montre que dans le cas d’un tissu urbain « mono directionnel » (avec des rues de mêmes orientations), le comportement moyen de la rue est assez éloigné de celui d’un tissu urbain avec plusieurs directions. Le modèle TEB en considérant une équiprobabilité des orientations de rues, écarte cette hypothèse de tissu urbain avec une directionnalité des rues bien déterminée.

<sup>145</sup> Nous pouvons constater par exemple que les campagnes de validation du modèle TEB ont été effectuées sur des fragments urbains très homogènes (Vancouver, Mexico et dernièrement le centre ancien de Marseille).

<sup>146</sup> Le calcul a été effectué sur la base des données relevées dans le cadre de la modélisation des rues de la ville pour le modèle OSPM [BENZERZOUR et al. 2003].

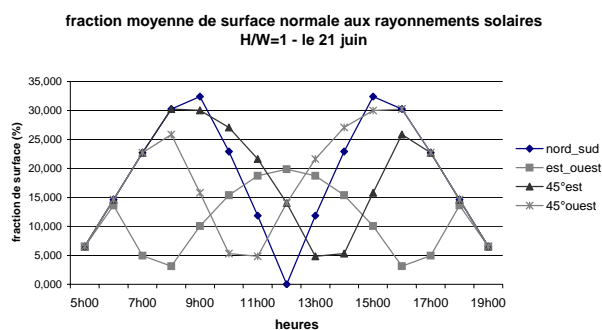


Figure 3.116: Simulation de la fraction de surface perpendiculaire au rayonnement solaire d'une rue avec 04 orientations différentes le 21 juin pour H/L=1

Si l'on compare la moyenne des rayonnements solaires reçus par les deux parois d'une rue (calcul de la valeur moyenne des deux parois) le 21 juin, on constate de même une différence entre les différentes orientations prises de façon isolée (fig. 3.117). Mais dès que l'on considère un cas de tissu urbain avec différentes orientations de rues, on se rapproche de la moyenne calculée par le modèle TEB. On s'aperçoit aussi dans cette même figure, que plus le rapport H/L est grand (c'est à dire plus la rue est étroite), plus les écarts entre les différentes orientations se réduisent et plus l'ensoleillement selon une orientation moyenne se rapproche du cas d'un tissu urbain combinant plusieurs directions (ici 4 directions ont été prises en compte).

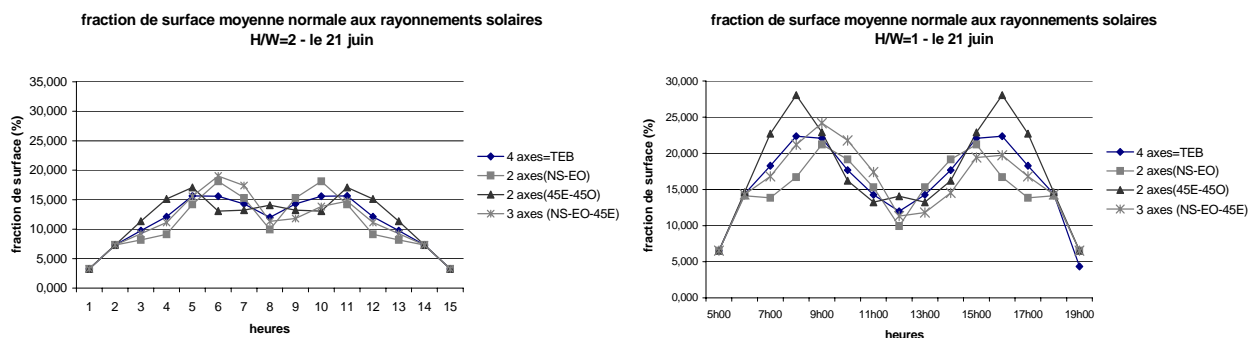


Figure 3.117 : Evaluation de la fraction normale aux rayonnements solaires reçus par un tissu urbain avec différentes combinaisons de directions de rues, le 21 juin pour H/L=2 et H/L=1.

L'écart potentiel pouvant exister entre les résultats de simulation du modèle TEB et les résultats relatifs à un tissu urbain « directionnel » (avec une direction de rue dominante) peut se lire aussi dans la campagne de mesures effectuées par [Masson et al. 2001] sur les rues de la ville de Vancouver.

Les auteurs ont calculé les températures de surface du sol des rues dans deux rues de directions différentes : l'axe de l'une est dirigée Nord-sud et l'autre Est-Ouest. Lorsque l'on compare les résultats de la température du sol moyennée sur les deux directions et ceux des simulations, on constate une grande similitude, mais si l'on compare les résultats des mesures sur chaque direction de rue indépendamment on constate un écart assez important avec les calculs de TEB. L'écart atteint à mi-journée prêt de +10°C pour la rue nord-sud et -13°C pour la rue est-ouest, et la nuit il atteint -3°C dans la rue nord-sud et -8°C dans la rue est-ouest, par rapport au calcul de TEB, qui estime une température de surface de prêt de 28°C à mi-journée et de 11°C la nuit. Cependant les écarts avec la moyenne des deux directions de rues ne dépassent pas -3°C à mi-journée et -4°C la nuit. [Masson et al. 2001].



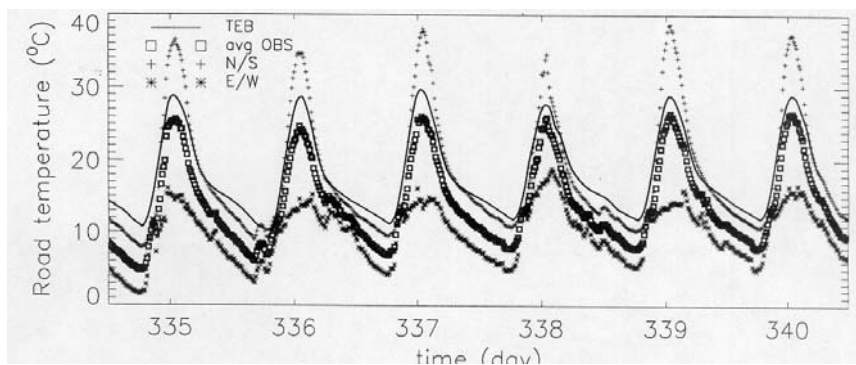


Figure 3.118 : Comparaison des températures de sol des rues entre les résultats donnés par TEB et les mesures sur Mexico au mois de décembre (moyenne, rue Nord-sud et rue est-ouest) [Masson et al. 2001]

Dans le cas de la ville de Nantes et pour le secteur concerné du centre ancien, cette hypothèse est valable puisqu'on trouve plusieurs directions de rues, mais dans le cas d'un tissu à direction « préférentielle », la validité de TEB pourrait être discutée. Pour ces mêmes raisons, le modèle TEB ne peut pas s'appliquer à des situations précises d'espaces urbains si ces dernières sont différentes de la situation moyenne du tissu urbain. L'application du modèle, suppose dans ce cas, une décomposition du territoire analysé en des zones homogènes. Mais rappelons le encore une fois, nous n'avons pas d'outils pour mesurer le degré d'homogénéité d'un territoire.

### CONCLUSION : VERS UNE PRISE EN COMPTE DE LA COMPLEXITE DES ESPACES CONSTRUIITS

La quantification des principaux paramètres physiques de l'environnement climatique dans les différents états du centre ancien de Nantes nous conduit à émettre un certain nombre d'enseignements pour le développement et la transformation des villes actuelles. En effet avec la problématique du développement durable les questions relatives à la densité urbaine et à la minéralisation des surfaces deviennent d'actualité. Nous l'avons évoqué dans le premier chapitre, les directives de l'urbanisme contemporain s'articulent autour de deux priorités : la densification des ensembles bâtis existant (pour réduire l'étalement urbain) et le verdissement des surfaces. Hors, ces deux directives produisent, comme on l'a vu dans l'histoire de Nantes, des effets contraires sur le bilan énergétique et les paramètres microclimatiques. Pour résoudre cet antagonisme des directives de l'urbanisme durable, il paraît indispensable de disposer d'outils de mesures qui permettent d'évaluer l'interaction des effets de densification et de verdissement.

L'urbanisme salubriste et l'urbanisme durable supposent deux approches différentes de la régulation de l'environnement climatique. Les objectifs sous-jacents aux interventions salubristes et relatifs à la régulation du microclimat urbain ont conduit à des transformations urbaines aux effets microclimatiques convergents. En effet pour assainir l'air, faire rentrer le soleil, la lumière et l'air dans les rues, réduire l'humidité ambiante et ériger une barrière contre les remontées des sous-sols, il suffisait de minéraliser les sols et ouvrir les vides urbains. Ces deux principales catégories d'intervention ont conduit, comme on l'a vu, à des variations importantes du microclimat urbain. Du fait de cette convergence, il suffisait, pour les auteurs des transformations urbaines, de savoir ce qu'il fallait modifier de la surface urbaine pour réaliser leurs objectifs de régulation de l'environnement climatique. Par contre, le problème est posé différemment aujourd'hui. Les nouvelles directives antagonistes du développement durable nécessitent de mesurer les effets liés aux transformations urbaines qui allient densification et verdissement, car l'interaction de ces deux catégories de transformation, ne peut être connue sans quantification.

En quantifiant les effets des différentes transformations urbaines on s'est aperçu que l'on pouvait évaluer et donc différencier telle ou telle mode d'intervention pour réguler le microclimat urbain. Si

L'on reposait à l'avenir les mêmes transformations que celles que l'on a analysées dans l'histoire de Nantes on peut en effet s'attendre à ce que le modèle TEB, comme d'autres modèles climatologiques récents<sup>147</sup>, puisse évaluer la pertinence de ces transformations. Les modèles numériques permettent donc, à priori, d'atteindre un objectif nouveau qui est celui de quantifier les effets liés aux variations des éléments de la forme urbaine sur les paramètres physiques du microclimat. Les résultats de la quantification que nous avons obtenus par les simulations physiques confirment le potentiel de la forme urbaine à modifier l'environnement climatique des villes. Cela se fait parfois même de manière très importante (un réchauffement de près de 2°C dans les rues, un jour d'été par exemple). De ce fait ces modèles permettent dans une certaine mesure d'orienter les auteurs des transformations urbaines et des règlements sur les modalités d'interventions les plus pertinentes. Mais vers quels types de modalités nous orientent ces modèles ?.

Pour conclure cette recherche, nous développerons dans le prochain chapitre une question que nous avons déjà posée dans le chapitre introductif et qui nous a conduit à effectuer les simulations numériques. Que peuvent nous apporter ces interventions dans le cadre d'une transformation à venir ? En d'autres termes, si l'on avait une intention similaire à celles des auteurs des transformations salubristes, est-ce que les modèles de la climatologie urbaine, dont TEB est tout de même un représentant récent, validé et assez avancé, peuvent nous orienter vers les interventions permettant de répondre à ces intentions ?.

Le modèle TEB ainsi que les modèles physiques qui sont appliqués à l'échelle d'un fragment ou d'un ensemble de fragments bâtis adoptent un certain nombre d'hypothèses simplificatrices de la forme urbaine que nous avons discutées précédemment. Nous l'avons vu avec TEB, la forme urbaine est réduite à une agrégation de rues canyon aux propriétés similaires où toutes les orientations de rues existent avec la même probabilité. Cette simplification n'est pas le parti pris du seul modèle TEB. Nous avons observé que le concept de Canyon est partagé dans les travaux de la climatologie urbaine comme étant un concept suffisant pour modéliser la troisième dimension de la forme urbaine. On admet en effet dans ces travaux que les villes sont faites de rues, et que les rues se résument à la disposition de deux bâtiments de même hauteur de part et d'autre d'une largeur de sol. Puisque la forme urbaine est réduite à un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, les orientations que vont nous donner ces modèles ne dépasseront pas ces hypothèses. En d'autres termes, si les modèles physiques appliqués à l'échelle des fragments urbains sont consensuels sur la pertinence de la notion de Canyon, ils n'offriront comme modalités d'interventions qu'une intervention sur le canyon proprement dit. C'est à dire sur un rapport H/L des rues.

Nous avons tenté de montrer dans la fin de cette quatrième partie du présent chapitre que les fragments urbains (surtout en périphérie du centre) sont hétérogènes et constitués de formes complexes et qu'ils n'ont pas le caractère homogène que suppose le modèle TEB. Le prospect, l'orientation, de même que la hauteur des bâtiments, la continuité des fronts bâtis ou encore la largeur des rues peuvent varier dans une même rue et d'une rue à une autre. Il existe donc un décalage entre le modèle et la réalité bâtie qui non seulement n'est pas pris en compte, mais que nous ne savons pas comment interpréter. Est-ce qu'en définissant un prospect moyen des rues on caractérise réellement ces fragments urbains ? Comment faire lorsqu'il n'y a pas de rues au sens classique du terme ? Le concept de canyon suffit-il pour caractériser la complexité de la forme urbaine ?

Ce n'est pas une critique du modèle TEB que nous émettons ici mais du concept de canyon qui est aujourd'hui admis en climatologie urbaine comme suffisamment représentatif des formes urbaines. Notre propos dans le prochain chapitre sera de proposer une alternative à ce concept en prenant en compte la complexité de la forme urbaine. On proposera ainsi un indicateur qui serait à la

---

<sup>147</sup> Voir la partie du chapitre 02, sur les modèles de simulation de la climatologie urbaine qui utilisent une modélisation paramétrique de la surface urbaine.

fois plus représentatif de la complexité des dispositions de la ville mais qui permettrait en même temps de vérifier l'applicabilité du concept de canyon dans le cas de fragments bâti existants, voire de la mesurer. Le concept de canyon est donc une interprétation intéressante pour la climatologie urbaine, nous proposerons donc d'adapter le concept de canyon à deux objectifs : prendre en compte la complexité de la forme urbaine et donner des indications de l'environnement climatique puisqu'il un concept commun de plusieurs modèles de la climatologie urbaine appliqués à l'échelle d'un ensemble bâti.

## Chapitre 4

# **PROPOSITION D'UN INDICATEUR MORPHO-CLIMATIQUE POUR LA CARACTERISATION DU POTENTIEL DE REGULATION DU CLIMAT URBAIN DANS UN ENSEMBLE BATI**

---

L'objet de ce chapitre est de développer - à partir des résultats précédents - un outil destiné à informer les concepteurs des projets urbains des effets de leurs interventions sur l'environnement climatique. La construction de cet outil reposant sur les principaux acquis de la lecture historique et physique, il est important de rappeler, à ce stade de la recherche, les deux principales observations qui nous permettront de construire cet outil :

La première observation est relative à l'analyse historique. Celle ci nous a conduit en effet à formuler les deux conclusions complémentaires suivantes :

- *La régulation de l'environnement climatique peut s'effectuer principalement par des interventions morphologiques.* Dans le chapitre précédent nous avons constaté que les interventions et règlements salubristes ont contribué de façon importante à modifier l'environnement climatique et cela sans que leurs auteurs ne disposent d'outils pour anticiper les effets de ces interventions. On savait seulement sur quels éléments de la forme urbaine il fallait intervenir. Cette seule connaissance morphologique des éléments de la forme urbaine dont la variation aurait un effet potentiel sur l'environnement climatique a donc suffi. A partir de là nous supposons que la caractérisation des variations de l'environnement climatique peut s'effectuer à son tour par des connaissances<sup>1</sup> principalement morphologiques.

- *L'ouverture des vides urbains et l'intervention sur l'état des surfaces sont des catégories historiques opératoires qui peuvent constituer l'objet de la caractérisation recherchée.* Ces deux catégories regroupent en effet l'ensemble des phases d'intervention sur la forme urbaine y compris ceux de la période moderne (que beaucoup qualifient comme une rupture avec la ville classique). Nous avons aussi mis en avant, lors du premier chapitre, le fait que les directives de l'urbanisme durable prônent un retour au cloisonnement du vide urbain, à une densification des formes urbaines existantes et à l'abondance des espaces verts dans les interstices non bâtis. Les problématiques de l'ouverture et celle de la minéralisation dans les projets urbains restent donc d'actualité. De là nous émettons une deuxième conclusion. Ces deux catégories (ouverture et minéralisation) que l'on peut qualifier de morphologiques peuvent constituer des indicateurs opératoires de la régulation de l'environnement climatique, au sens où elles incluent la variété des transformations urbaines mais aussi parce qu'elles traduisent les principales données d'entrée morphologiques utilisées par les modèles physiques.

La deuxième observation est liée aux conditions d'application du modèle TEB. L'utilisation de ce dernier (qui est représentatif des modèles paramétriques de la surface urbaine) a permis de constater la difficulté de prise en compte de la complexité de la forme urbaine. Les modèles

---

<sup>1</sup> Cette connaissance morphologique ne vise pas l'explication des phénomènes physiques, elle tente de prédire leur comportement général. Voir à ce sujet l'ouvrage recueillant un entretien avec R.Thom, intitulé « prédire n'est pas expliquer », qui explique le sens à donner à la prédiction des phénomènes qualitatifs par ce qu'il appelle « une quantité approchée » [THOM 1993].

paramétriques réduisent en effet considérablement cette complexité morphologique au bénéfice d'une prise en compte de la complexité des paramètres physiques et de leur propagation. Le concept de canyon illustre bien cette réduction. Il ne rend compte que d'une forme d'urbanisation spécifique, il est donc difficile de l'évaluer lorsque l'on veut étudier un ensemble urbain complexe.

Nous allons dans ce chapitre discuter de l'une des deux catégories évoquées : « l'ouverture du vide urbain ». Nous considérons en effet que cette catégorie descriptive des transformations salubristes pourrait constituer un indicateur permettant la caractérisation de l'environnement climatique. Nous partons ainsi de l'hypothèse suivante :

*Puisque l'ouverture du vide urbain est à la fois un élément de paramétrisation important de la surface urbaine pour les modèles physiques<sup>2</sup> tout en étant un paramètre qui intègre les transformations urbaines ayant visé une régulation du climat urbain, elle peut constituer, à ce double titre, un indicateur morphologique opératoire des variations de l'environnement climatique pour les projets urbains (transformations futures).*

Pour construire cet indicateur, nous procéderons en cinq étapes :

- Nous présentons dans la première étape quelques éléments problématiques que pose la prédiction du climat urbain à l'échelle d'un ensemble urbain. Nous allons discuter pour cela de la pertinence des paramétrisations de la surface urbaine dans les modèles physiques à constituer des indications pour les projets urbains, puis nous exposerons les problèmes que pose la modélisation du confort climatique en milieu extérieur puisque c'est un des éléments déterminants des projets urbains. De là nous mettrons l'accent sur la nécessité de caractériser les variations de la forme urbaine. Nous expliciterons enfin, plus en détail, l'hypothèse de base qui nous a conduit à supposer la pertinence d'une caractérisation morphologique pour anticiper l'environnement climatique d'un ensemble bâti, c'est à dire la possibilité de réduire l'analyse à une analyse morphologique.
- Dans la deuxième, nous exposons quelques travaux qui ont utilisé la caractérisation morphologique en traitant soit du climat urbain soit de la question environnementale. L'analyse critique de ces travaux nous aidera à élaborer un outil de caractérisation pertinent pour anticiper les effets des variations de la forme urbaine et d'en proposer une ouverture.
- Dans la troisième étape, nous donnons une définition « opérationnelle » de l'ouverture des vides urbains ainsi que de son mode de représentation et de calcul en tenant compte des éléments exposés dans les deux parties précédentes. L'indicateur devra ainsi être à la fois : simple à évaluer, opératoire (présenter des résultats explicites) et applicable à toute forme urbaine.
- En quatrième partie, nous analysons l'applicabilité de l'indicateur à trois échelles spatiales différentes et à quelques phénomènes physiques puis nous comparons les indications données par ce dernier avec celles des simulations numériques effectuées pour un quartier du centre ancien de Nantes.
- En dernier lieu, nous définissons les limites de cet indicateur ainsi que les perspectives de son développement.

---

<sup>2</sup> Le concept de canyon traduit en réalité l'ouverture des espaces urbains. Sa définition comme étant un rapport H/L vient d'un parti pris qui considère que la ville est faite de rues.

## **1. NECESSITE DE PRISE EN COMPTE DE LA VARIATION DES ESPACES CONSTRUITS DANS LA PREDICTION DU CLIMAT URBAIN**

### **1.1. Ecart entre les données d'entrée des modèles physiques et la complexité de la forme urbaine**

Nous avons dans le deuxième chapitre de ce document exposé les deux principaux types de modélisation des éléments de la forme urbaine qu'utilisent les modèles d'analyse de l'environnement climatique. Le premier type qui opère par discrétisation spatiale (maillage) ne semble pas être adapté à l'échelle d'un ensemble bâti. Etant basés sur une modélisation « explicative »<sup>3</sup>, les modèles sont dans ce cas trop lourds à mettre en œuvre et nécessitent un dimensionnement assez précis des espaces bâtis. L'objet des modèles de ce type est de reconstituer l'ensemble des mécanismes physiques qui sont susceptibles de reproduire les paramètres de l'environnement climatique (en utilisant par exemple une modélisation par éléments finis comme c'est le cas de la mécanique des fluides). Cette méthode rencontre deux inconvénients : d'un côté les modèles se limitent à des échelles spatiales trop réduites ; d'un autre côté, ils s'appuient sur une modélisation trop détaillée de l'environnement bâti. Ces deux limitations les rendent incompatibles avec l'échelle d'analyse d'un ensemble urbain.

Notre échelle d'analyse est plutôt proche de la deuxième démarche de modélisation ; celle qui opère par paramétrisation de la surface urbaine. Elle est basée sur une démarche « descriptive » qui définit des paramètres numériques pour traduire une forme bâtie. Cette démarche est adoptée dans les modèles de climatologie urbaine appliqués à l'échelle locale et Meso pour réduire la complexité de la surface urbaine. Si elle est moins gourmande en temps de calcul que la première démarche (le modèle TEB peut faire le calcul des bilans d'énergies sur une année selon un pas de temps d'une heure en moins de cinq minutes), elle adopte néanmoins une réduction considérable de la forme urbaine qui présente quelques décalages avec la réalité bâtie.

Le travail rétrospectif sur le cas de la ville de Nantes nous l'a bien montré : la réduction adoptée par le modèle TEB présente un décalage qui ne tient pas compte des disparités pouvant exister dans les caractéristiques d'une forme urbaine construite. En effet les espaces bâtis à l'échelle d'un ensemble urbain ne sont pas toujours homogènes. De par cette absence d'homogénéité, nous avons dû définir une phase de lecture intermédiaire pour traduire la complexité de la forme urbaine dans les termes du modèle. Cette opération « d'adaptation » n'est pas propre au modèle utilisé, elle est souvent nécessaire dans diverses opérations de modélisation paramétrique que nous avons présenté dans le chapitre 02 de cette thèse. L'exemple de la rue canyon en est révélateur. Nous avons constaté que les interventions successives sur la forme urbaine, de même que la variété des fragments urbains de la ville actuelle, sont difficilement réductibles à un simple prospect moyen de rues. Les espaces construits sont généralement constitués d'une agrégation complexe et non homogène d'éléments bâtis et de vides. La ville ancienne qui est constituée de rues aux prospects assez homogènes n'occupe généralement qu'un territoire limité dans les villes. Les périphéries bâties de ces centres ainsi que les territoires bâtis en transformation sont plus complexes que cela. Les modèles physiques qui s'appuient sur le concept de canyon s'écartent donc, dans une certaine mesure, de la réalité complexe de la forme urbaine. Ajoutons à cela que, l'on imagine assez mal la conception d'un projet urbain ou d'un règlement s'appuyer sur la notion de rue canyon pour la mise en forme des espaces bâtis, ce serait trop réducteur pour le concepteur. La prise en compte de la complexité de la surface urbaine s'avère donc insuffisante dans ce type de modèle, que ce soit dans un cadre analytique ou projectuel.

---

<sup>3</sup> N.Bouleau distingue les modèles descriptifs des modèles explicatifs et les modèles qualitatifs des modèles quantitatifs [BOULEAU 1999].

La complexité de la forme urbaine devrait être intégrée dans les modèles non seulement pour s'adapter à tous les espaces construits, mais aussi pour une application plus pertinente d'un point de vue climatologique aux échelles locale et Meso<sup>4</sup>. En effet, un récent travail qui a étudié l'importance de la prise en compte d'un certain niveau de détail de la surface urbaine dans la description des éléments de la canopée confirme cette nécessité [DUPONT et al. 2003]. Deux simulations ont été ainsi effectuées avec le modèle SM2U-3D<sup>5</sup> en faisant varier le niveau de détail de la surface. La première s'appuie sur une évaluation moyenne de l'ensemble des paramètres de la surface urbaine sur tout le territoire étudié et la deuxième applique une grille dimensionnelle pour découper ce territoire en plusieurs zones différentes. Appliqué à la ville de Houston aux Etats Unis, ce travail a permis de montrer (fig. 4.1) qu'une prise en compte plus détaillée de la surface urbaine dans les procédures de modélisation peut mettre en valeur l'hétérogénéité des propriétés physiques de la surface urbaine comme la température de surface (l'affinement de l'échelle a permis d'observer une différence de température de surface de 10 K alors qu'elle n'était que de 3 K avec la modélisation sommaire).

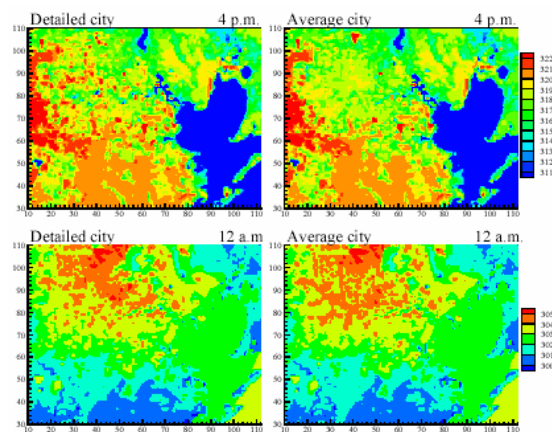


Figure 4.1 : Température moyenne de surface (K) à 4h et 12h selon une modélisation « détaillée » et « moyenne » de la surface urbaine par SM2U(3D) (à gauche ville détaillée, à droite ville moyenne) [DUPONT et al. 2003]

La prise en compte de la complexité de la forme urbaine est donc pertinente à deux titres :

- Pour l'analyse des ensembles urbains existants ou projetés de même que pour formuler une réglementation du cadre bâti : Nous définissons le projet urbain ou la soumission d'un ensemble bâti à un règlement comme étant une variation apportée à un état existant. L'objectif d'une analyse opérationnelle de l'environnement climatique serait donc de pouvoir évaluer cette variation (existante ou projetée).
- Pour une meilleure prise en compte de la surface urbaine dans les modèles climatologiques<sup>6</sup> : si l'on admet que la paramétrisation donnée par les modèles physiques est trop réductrice, il est nécessaire d'adopter une échelle d'analyse plus fine tout en permettant une évaluation à l'échelle des ensembles urbains analysés.

## 1.2. Limites de la prédiction du confort climatique en milieu urbain et nécessité d'une caractérisation des variations spatiales

Une des finalités des analyses de l'environnement climatique (en dehors des questions énergétiques) dans le cadre d'un projet urbain, c'est l'évaluation des conditions de confort des usagers

<sup>4</sup> Voir les échelles climatiques présentées dans le deuxième chapitre.

<sup>5</sup> Ce modèle a été brièvement résumé dans le deuxième chapitre de cette thèse.

<sup>6</sup> Un récent article concernant la validation du modèle TEB et ses développements arrive aussi à cette conclusion. [LEMONSU et al. 2003]. Voir aussi une présentation synthétique de ce même article dans : <http://www.cnrm.meteo.fr/expert/expert.htm>

des espaces urbains. Le confort en milieu extérieur est un objet de recherche inscrit dans le champ de la climatologie urbaine sous la thématique du confort thermique<sup>7</sup> ou hygro-thermique. Sans rentrer dans le détail des modèles physiques traitant du confort, nous voulons interroger ces travaux quant à la prédiction d'une situation de confort mais aussi et surtout sur les éléments de l'environnement bâti pris en compte pour cela.

Les travaux de recherche menés sur la question du confort se sont d'abord focalisés sur la définition des conditions d'inconfort, et ont tenté de définir les paramètres qui créent les situations inconfortables. D'un point de vue physiologique, une ambiance thermique est jugée confortable, lorsque le corps humain n'enclenche aucun mécanisme régulateur pour atteindre un équilibre homéothermique entre les conditions internes et externes au corps humain.

Les modèles qui ont été développés pour prédire le confort thermique ont été principalement conduits dans des espaces intérieurs. L'objet de ces travaux a été en effet, en un premier temps, de définir les paramètres traduisant ce que ressentent les individus. C'est le cas par exemple de l'indice de température Effective (ET) et la température opérative (ou résultante) (Top), qui combinent en une seule valeur les effets de la température de bulbe sec, l'humidité, et la vitesse du vent sur le réchauffement ou le refroidissement ressentis par les individus. On retrouve aussi des concepts comme le (SET) « Standard Effective Température » [GAGGE et al. 1972], qui traduisent des modélisations du confort complétant les précédents en incluant les effets du niveau d'activité et la nature des vêtements portés. En un deuxième temps, on est passé à une tentative de prédiction du jugement que les individus peuvent avoir. Dans La norme ISO standard 7730 [ISO-7730. 1994]<sup>8</sup> par exemple une méthode pour la prédiction du confort thermique (PMV, Predicted Mean Vote) a été développée en se basant sur l'évaluation de l'insatisfaction thermique (PPD, Percentage People Dissatisfied) ressentie par les individus dans un climat modéré. Cette méthode est basée sur le calcul du bilan d'énergie du corps humain en prenant en considération : la production métabolique, l'isolation vestimentaire, la température de l'air, la température globale radiante, la vitesse du vent et l'humidité relative.

Les modèles de confort hygro-thermique en milieu extérieur ont ensuite été élaborés à partir d'une extrapolation de ces travaux effectués sur les espaces intérieurs des bâtiments. Mais cette démarche s'est heurtée à ce qui fait la différence fondamentale des espaces extérieurs par rapport à l'intérieur des bâtiments ; c'est à dire l'aspect dynamique des paramètres physiques, la pluralité des usagers et la variété des configurations spatiales des espaces urbains<sup>9</sup>. Ces éléments rendent difficile toute tentative de modélisation.

Concernant l'aspect dynamique des paramètres physiques, des travaux ont montré la capacité d'adaptation importante des individus tant que le choix de situations spatiales reste possible. Ainsi, et sur la base des travaux de Fanger et la norme ISO 7730, des auteurs ont exploré le concept d'opportunité d'adaptation, qui traduit la capacité des individus à réguler les conditions thermiques par leurs comportements adaptatifs (passer du soleil à l'ombre par exemple) [HUMPHREYS et al. 1998]. Les auteurs ont montré que les occupants d'un espace fermé avaient un grand niveau de tolérance des variations des températures intérieures, tant que les possibilités d'adaptation existaient. La variation des configurations des espaces extérieurs offrant un éventail plus large encore de situations climatiques que les espaces intérieurs, on peut donc supposer la possibilité d'une plus grande

---

<sup>7</sup> Voir à ce sujet deux thèses soutenues au CERMA dans lesquelles il a été question d'un état de l'art assez large sur la notion de confort thermique, et les différents indicateurs permettant d'évaluer la perception physiologique des individus. [TIRAOUI 2000], [VINET 2001].

<sup>8</sup> ISO-7730. (1994), International Standards Organisation, Genève.

<sup>9</sup> Le changement de situations climatiques du fait d'un déplacement s'est avéré par exemple d'un effet important sur les sensations thermiques. Des travaux ont montré qu'un sujet passant d'une zone ensoleillée en air calme (vent de 0.5 m/s) à une zone à l'ombre avec un vent assez fort (de 5 m/s) équivaut à une diminution de la charge thermique de l'ordre de 13°C. [PENWARDEN 1974]



adaptabilité aux ambiances climatiques extérieures de la part des usagers des espaces urbains. Ceux ci vont ainsi soit changer d'environnement soit s'acclimater (puisque'ils s'attendent étant en extérieur, à la possibilité de variation de l'environnement climatique).

Quant à la question de la pluralité des usagers, dans une étude récente on a comparé, entre deux sites de deux villes et deux aires culturelles et géographiques différentes, le PMV et les sensations des usagers des espaces urbains définis par des enquêtes. Le premier se situe à Cambridge en Angleterre et le deuxième à Manille aux Philippines. L'auteur de cette étude a pu constater que le jugement des personnes varie considérablement et que ces jugements diffèrent de la prédiction du PMV (fig. 4.2). Cela montre les limites des modèles de confort lorsqu'ils sont confrontés à la perception des individus et appliqués à des aires culturelles différentes [RAMOS et al. 2002].

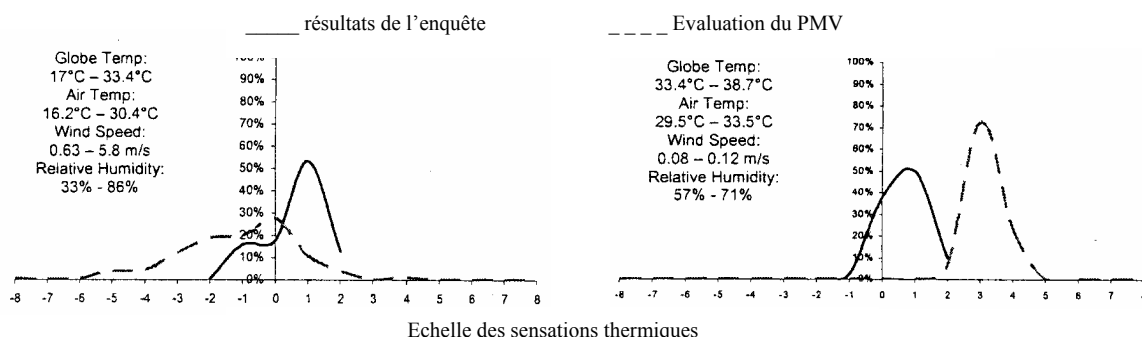


Figure 4.2 : Graphes comparatifs entre le PMV et les résultats de l'enquête : à gauche Cambridge, à droite Manille [RAMOS 2002].

Ces différentes études font donc apparaître l'importance de la prise en compte des aspects spatiaux, psychologiques et culturels dans l'évaluation du confort en milieu extérieur, et remettent en cause la pertinence d'un modèle de confort définis selon des normes universelles. La notion de confort implique non seulement des aspects de l'environnement physique mais aussi des aspects liés à chaque personne et relevant de la psychologie, de la sociologie, voire même de l'anthropologie [LECORRE 2001]. En d'autres termes il faudrait élargir l'évaluation du confort à une approche de « l'ambiance microclimatique » en tenant compte de l'interaction des aspects physique, sensible et spatial.

Par ce bref détour de quelques travaux traitant du confort thermique nous pouvons constater la difficulté de sa quantification et de sa qualification dans les espaces extérieurs. S'il existe un consensus plus ou moins avéré sur les paramètres climatiques pouvant influencer sur la perception thermique des individus, il reste que la combinaison de l'ensemble de ces paramètres, qui de plus sont dynamiques en milieu extérieur, n'est pas maîtrisée. En effet les obstacles à une telle maîtrise sont difficiles à surmonter. Nous pouvons les résumer comme suit :

- Le confort varie selon les individus, les sociétés et les cultures<sup>10</sup>.
- Les individus ont la possibilité de changer d'ambiance thermique en cas de situation inconfortable.
- L'espace urbain connaît de fortes variations spatio-temporelles des paramètres climatiques qui, à l'échelle du piéton, sont assez difficiles à prévoir.
- Enfin, comme nous l'avons noté pour la ville « pré-hygiéniste », la qualité de l'air n'est pas liée uniquement au seul aspect sensoriel (aspect mécanique de la perception) mais à un ensemble de conditions dépendant du contexte de chaque époque.

Dans un cadre anticipatif comme celui de la définition d'un projet ou d'un règlement urbain, il nous semble donc plus pertinent de proposer une variation de l'environnement climatique de façon à permettre des adaptations aux usagers des espaces urbains, plutôt que de chercher à quantifier les

<sup>10</sup> Dans ses dernières recherches Amos Rappoport [RAPPOPORT 2003] écarte toute idée de modèle culturel, qui tenterait une simplification du contexte culturel en vue du projet.

niveaux de confort ou d'inconfort. Ces variations sont en effet parmi les éléments les plus influents sur la capacité d'adaptation des piétons [NIKOLOPOULOU et al. 2003]. Pour appréhender les conditions de confort il faudrait ainsi connaître les variations de l'environnement climatique. Ce sont en effet (fig. 4.3) l'environnement stimulant (interaction entre espace et paramètres physiques) et le temps d'exposition (qui relève de la liberté individuelle des usagers et des conditions d'usage) qui sont les plus influents. L'anticipation dans le cadre d'un projet ou d'une réglementation ne peut concerner que la connaissance (ou la projection) des variations de l'environnement stimulant ; c'est à dire, le vide urbain support des piétons. La caractérisation de la variation de la forme urbaine est donc nécessaire pour approcher le confort en milieu extérieur.

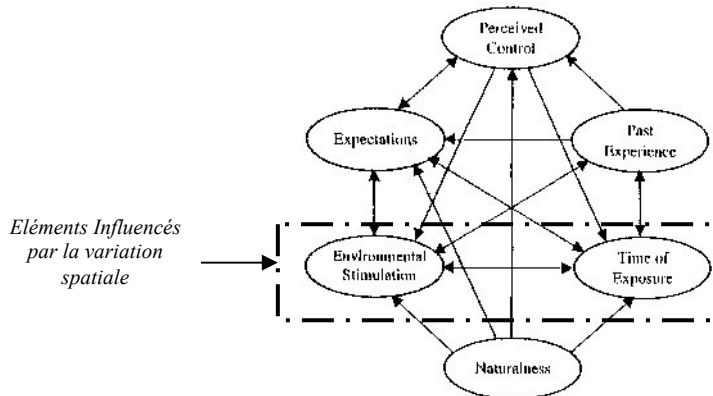


Figure 4.3 : Les lignes d'influence entre les différents paramètres de l'adaptation psychologique [Nikolopoulou et al. 2003]

### 1.3. De la forme urbaine à l'environnement climatique

#### 1.3.1. La réduction morphologique comme approche multicritère du potentiel de régulation du climat urbain

Dans le cadre d'un projet ou d'un règlement urbain, que faut-il analyser pour anticiper les effets des transformations urbaines sur l'environnement climatique ? Doit-on maîtriser l'ensemble des outils de simulation physiques ?

Cette question n'est évidemment pas nouvelle, Vitruve pensait déjà qu'un « bon architecte » devait maîtriser l'ensemble des connaissances de son époque<sup>11</sup> [CHOISY 1971]<sup>12</sup>, mais cet objectif semble de plus en plus difficile à atteindre aujourd'hui.

Les outils qui existent dans le domaine de la prédiction et de l'évaluation des paramètres climatiques et environnementaux, nécessitent des procédures assez complexes et longues à mettre en œuvre. Il faudra multiplier cette complexité par le nombre de paramètres à analyser : pollution atmosphérique, ensoleillement, éclairage naturel, bruit, ventilation, économie d'énergie, etc. Cette complexité est difficilement compatible avec la « maniabilité » des outils dont doit disposer l'intervenant sur le cadre bâti qui - en plus des questions climatiques et environnementales - doit prendre en compte d'autres préoccupations liées à d'autres champs de connaissances sociologiques, culturelles, esthétiques, etc. Malgré cette complexité de l'analyse, la production du cadre bâti est tout de même amenée à réaliser les intentions multiples qui peuvent être liées à ces connaissances. Si

<sup>11</sup> Selon Vitruve, l'architecte : « ... doit être docile à la science, lettré, habile au dessin, connaissant de nombreuses histoires, à l'écoute des philosophes, qu'il sache la musique, qu'il ne soit pas ignorant de la médecine, qu'il sache les décisions des jurisconsultes, et qu'il ait connaissance de l'astrologie et des lois du ciel... » [CHOISY 1971, pp.2].

<sup>12</sup> La référence à la traduction de Choisy ne donne que la date d'une réédition d'une traduction de 1909, la traduction de référence du Livre I de Vitruve est celle de Philippe Fleury aux éditions Les Belles Lettres de 1990.

l'interdisciplinarité devient incontournable, elle rend néanmoins le travail de synthèse de plus en plus difficile, au gré de l'augmentation de la complexité des connaissances associées à l'évaluation de l'environnement bâti.

Pour approcher la multiplicité des paramètres climatiques et environnementaux, nous émettons l'hypothèse simplificatrice suivante, elle s'inscrit (dans une certaine mesure) dans la continuité du savoir-faire salubriste :

*Certes les paramètres comme les rayonnements solaires, le vent, la lumière, le bruit, l'humidité la pollution atmosphérique..., ne répondent pas aux mêmes lois et modèles physiques, et nécessitent des connaissances diverses, mais le cadre bâti à travers lequel se propagent tous ces phénomènes reste le même. Ce dernier disposant d'une certaine autonomie, ne pourrait-il pas renvoyer par sa seule connaissance à l'évaluation simultanée de tous ces paramètres ?*

Les indications morphologiques existantes comme celle des indicateurs actuels rendant compte de certains niveaux de la forme urbaine (c'est le cas par exemple du COS<sup>13</sup>) ne permettent pas d'appréhender l'environnement climatique. Les enjeux liés au contrôle de ce dernier et les préoccupations quantitatives liées à la réduction de la pollution et à l'économie de l'énergie exigent sans doute aujourd'hui des notions plus adaptées permettant l'évaluation des nouvelles directives de l'urbanisme durable. L'objectif des interventions sur le cadre bâti serait de trouver des configurations à la fois denses et permettant une accessibilité de l'air, du soleil et de la lumière dans les espaces de la ville et des habitations tout en économisant l'énergie et réduisant les différentes formes de pollution. La réglementation devra ainsi évaluer les performances des configurations spatiales de la forme urbaine qui permettent cela. En d'autres termes elle devrait permettre d'évaluer l'aptitude des formes urbaines<sup>14</sup> à réguler, selon des niveaux acceptables, les paramètres physiques de l'environnement climatique.

Nous ne sommes pas les premiers, ni les seuls, à voir dans cette « réduction morphologique », un intérêt pour le projet urbain ou la réglementation du cadre bâti. Dans le champ des théories sur la ville, S. Muratori<sup>15</sup>, est parmi les premiers architectes à trouver dans la connaissance morphologique un potentiel permettant la prise en compte d'autres phénomènes urbains dans les projets. Mais ce sera un auteur assez peu connu en France, Gianfranco Caniggia<sup>16</sup>, qui va se poser la question du rapport de l'architecte aux multiples disciplines qui traitent de la ville, et qui va conclure à la nécessité de cette réduction morphologique pour maîtriser la complexité des phénomènes urbains dans le cadre du projet. [MALFROY 1991]

Il n'est pas de notre propos de discuter ici cette position qui tente de définir la spécificité de la « discipline architecturale », mais nous rejoignons l'hypothèse selon laquelle la forme urbaine est analysable par elle-même par des éléments caractéristiques, puisqu'en finalité la production du cadre

---

<sup>13</sup> Le Coefficient d'Occupation des Sols (COS) est l'un des indicateurs de l'occupation des sols le plus utilisé dans la réglementation du cadre bâti. Il traduit le rapport de la densité du bâti d'une parcelle sur la surface de celle-ci. Dans les nouveaux PLU (Plan Local d'Urbanisme) on se pose la question de son remplacement par de nouveaux indicateurs de réglementation environnementale du cadre bâti.

<sup>14</sup> A propos de la pertinence de la réglementation « performantielle », voir la thèse de J. Teller [TELLER 2001].

<sup>15</sup> Saverio MURATORI (1910 – 1973), est un enseignant-architecte italien. Il suit les cours d'architecture à Rome dont ceux de Gustavo Giovannoni pour les études d'histoire urbaine et obtient le diplôme d'architecte au milieu des années Trente. Après avoir pratiqué la profession sur des projets architecturaux et d'urbanisme, il occupe en 1950 le poste d'enseignant à Venise puis à Rome en 1955. Il va retenir du philosophe Benedetto Croce l'identité de l'art et de l'histoire comme traitant d'objets individuels, considérés comme des sujets abordables avec les sciences idéographiques visant à décrire les cas particuliers, et non à énoncer exclusivement des lois générales (ce qui est assez différent des démarches de géographie urbaine).

<sup>16</sup> Gianfranco CANIGGIA (1933-1987), architecte italien, a enseigné dans les facultés d'architecture de Reggio Calabria, Florence, Gênes et Rome. Élève, puis assistant de Saverio Muratori, il a développé de manière originale les aspects de la pensée et de la méthode muratorienne plus directement liées à la lecture des milieux bâtis et à leur transformation cohérente par l'intermédiaire du projet.

bâti s'opère toujours par une « intervention bâtie ». G.Caniggia propose en effet de réduire la complexité de l'analyse urbaine qui peut traiter de phénomènes trop nombreux, le plus souvent abordés dans des termes étrangers à la production du cadre bâti, à une connaissance principalement morphologique [MALFROY et CANIGGIA 1986].

Cette réduction morphologique a été aussi adoptée, dans une certaine mesure, par les auteurs des projets et des règlements urbains de l'urbanisme salubriste. Ces derniers avaient en effet en effet réduits leurs intentions (visant la régulation de l'environnement climatique) à des interventions sur la forme des espaces urbains et les matériaux de surfaces. pour modifier l'environnement climatique. La qualité des interventions se mesurait en quelque sorte aux différences morphologiques apportées, sans pour autant en attendre un effet quantifié. L'effet d'amélioration de la situation climatique s'apprécierait donc par la qualité des interventions sur la forme du vide urbain et/ou des matériaux des faces et surfaces uniquement.

En adoptant l'hypothèse d'une possibilité de réduction morphologique pour analyser et anticiper les paramètres physiques du climat urbain nous formulons le questionnement suivant : puisque le modèle TEB, comme d'autres modèles de simulation paramétrique, nécessite comme données d'entrées des paramètres liés aux états morphologiques de la surface urbaine (les mécanismes physiques qui mettent en rapport les sources, la propagation des paramètres microclimatiques et leur régulation par le cadre bâti, sont toujours les mêmes) et puisque la modification de l'environnement climatique (selon l'histoire des transformations urbaines) est tout aussi basée sur un changement de ces états, est ce que leur connaissance ne permettrait pas de constituer le socle d'une analyse multicritère de l'environnement climatique ?

On proposera ainsi dans les prochains développements de ce chapitre de réduire cette analyse multicritère à une analyse morphologique des espaces construits qui puisse à la fois tenir compte de la complexité de la forme urbaine et donner des indications sur l'environnement climatique urbain. En d'autres termes, à partir « de mesures » morphologiques de l'espace construit caractériser l'environnement climatique.

### **1.3.2. Entre concept et indicateur : vers la définition d'un indicateur morphologique opératoire**

*« ...la véritable fonction du projet urbain c'est produire du temps, de la continuité, de la régularité, d'établir la forme des espaces publics et de fournir un contexte à l'architecture... »<sup>17</sup>*

On assiste ces dernières années, dans les domaines opérationnels liés à la question de la qualité environnementale, à une utilisation de plus en plus persistante du terme « indicateur »<sup>18</sup>. Les indicateurs ont pour vocation principale de simplifier les situations complexes et de traduire leurs implications opérationnelles auprès des intervenants sur le cadre bâti. Cette notion s'est imposée dès lors qu'il fallait rendre accessible, à une communauté non spécialisée, des données complexes provenant de disciplines diverses :

*« Les indicateurs condensent l'information, et simplifient l'approche des phénomènes environnementaux, souvent complexes, ce qui en fait des outils de communication précieux »<sup>19</sup>.*

Les indicateurs contiennent donc une information moins spécialisée et sont de ce fait plus diffusables chez les non-spécialistes des disciplines associées aux questions climatique et environnementale, comme c'est le cas généralement des intervenants sur le cadre bâti.

---

<sup>17</sup> Bernard Huet dans le journal *le monde* du 23/11/1998, article intitulé : Un entretien avec Bernard Huet, le hasard et la nécessité sont la loi du projet urbain.

<sup>18</sup> En décembre 1996, la France s'est proposée comme pays-test des 134 indicateurs de développement durable élaborés par le DPCSD (Department for Policy Coordination and Sustainable Development) du Secrétariat des Nations Unies.

<sup>19</sup> <http://www.ifen.fr/perf/perf2000/indicateur.htm>

Il nous semble cependant nécessaire de distinguer d'emblée la notion de descripteur de celle d'indicateur. Un descripteur, décrit une situation selon le point de vue d'un seul domaine de connaissance comme décrire une forme par les éléments constituant cette forme ou par exemple traduire la réflexion des rayonnements incidents sur une surface par l'albédo. Alors qu'un indicateur tente d'évaluer une situation dans un domaine de connaissance par l'intermédiaire de descripteurs liés (soit directement soit par interprétation) à un autre domaine de connaissance. Comme par exemple définir le confort des piétons par une variation spatiale (la variation spatiale est ici indicateur) ou encore traduire, comme on cherche à le faire, une variation de l'environnement climatique par une variation des paramètres liés à la forme urbaine. L'objectif des indicateurs est de traduire une situation complexe. En cela, ce sont des notions intéressantes pour le concepteur du cadre bâti puisque ce dernier aborde les phénomènes physiques en terme opératoire par une proposition d'espaces construits. En d'autres termes, les indicateurs morphologiques sont des descripteurs morphologiques permettant d'analyser des phénomènes « non morphologiques » comme ceux de l'environnement climatique.

La principale critique que nous avons émise aux modélisations paramétriques de la surface urbaine concernait leur manque de prise en compte de la complexité de la forme urbaine. En effet, s'ils s'appliquent à des modèles de la forme urbaines, ils ne s'appliquent pas pour autant à toutes les formes urbaines. La définition de B.Croce sur ce qu'il appelle des fictions conceptuelles nous semble assez adaptée pour définir le rôle des indicateurs opératoires :

*« Il faut distinguer le concept véritable des simples fictions conceptuelles. Les fictions conceptuelles sont de deux sortes: Représentation sans universalité (concepts empiriques), et universaux sans individualité (concepts mathématiques). Dans la mesure où les fictions conceptuelles (réalités pratiques et non théoriques) sont empiriques et abstraites, elles restent positivement (en opérant des classifications) ou négativement (en maintenant des abstractions) au niveau de la représentation dont le concept exprime la vérité parce qu'il en est le dépassement » B. Croce dans [GIRARD 1986, p.181]<sup>20</sup>*

Cette différenciation que donne Benedetto Croce entre un concept positif et un autre qui serait négatif est intéressante parce qu'elle nous renvoie directement au rapport entre une réalité à décrire et des « représentations » (mots, images, ...) qui tentent de décrire cette réalité. Les concepts traduisant la réalité bâtie (pratique et non théorique) seraient, selon les dires de B.Croce, une représentation positive s'ils permettent des classifications, et une représentation négative s'ils restent au niveau de l'abstraction et s'ils sont des universaux sans individualité comme par exemple les termes de densité, de rugosité ou tout autre paramètre numérique qui interprète une réalité bâtie sans renvoyer à son individualité. Ce n'est pas la réalité construite qui doit s'adapter au modèle mais bien ce dernier qui doit permettre la description de la réalité. Concrètement en ce qui concerne la caractérisation de l'environnement climatique, l'indicateur devra permettre un aller-retour entre le cas individuel et le cas général tout en donnant des informations sur l'environnement climatique (ce qui n'est pas le cas du concept canyon par exemple).

Les indicateurs opératoires seraient donc, comme les concepts pratiques, des fictions (construction de l'esprit) dont la raison d'être est une traduction d'une réalité construite. Ils n'ont pas de valeur théorique (abstraite) en soi. Leur objectif est d'exprimer cette réalité et la dépasser en même temps (ils renvoient à une qualité climatique). Ils sont certes une construction de l'esprit mais attachée à une réalité qu'ils doivent interpréter pour pouvoir construire des généralisations. L'indicateur traduirait donc le cas particulier et sa généralisation sans passer par des évaluations intermédiaires qui peuvent provoquer une perte d'information.

---

<sup>20</sup> Olivier P., « Benedetto Croce », Paris, Seghers, p.38, 1975. Cité dans [GIRARD 1986]

## 2. ELEMENTS DE CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE : *potentialités et limites de quelques indicateurs de l'interaction entre cadre bâti et paramètres physiques*

Avant de définir notre proposition, exposons dans cette deuxième partie du chapitre quelques indicateurs morphologiques existants qui ont pour objectif d'évaluer l'interaction de paramètres physiques et du cadre bâti. Nous trouvons en effet des travaux qui ont tenté de définir des indicateurs liés exclusivement à la description de la morphologie du cadre bâti et des matériaux de surface. La question posée en filigrane par ces travaux est la suivante : *à quelles caractéristiques morphologiques (indicateurs) réduire la complexité de la forme urbaine, pour pouvoir anticiper les différents phénomènes climatiques et environnementaux ?*

On peut ainsi trouver, selon l'approche de l'interaction du physique et du cadre bâti, trois catégories d'indicateurs:

- Des indicateurs de l'interaction du physique et du construit : Cette première catégorie d'indicateurs tente de caractériser dans le cadre bâti ce qui influe sur les phénomènes physiques. Les indicateurs sont construits selon deux approches différentes :
  - La première, « morpho-physique » [GROLEAU et al. 1995 ; AIT AMEUR 2002 ; ADOLPHE 2001], ne fait pas de lien explicite entre le phénomène analysé et les éléments du cadre bâti. Il s'agit de trouver dans le cadre bâti, ce qui pourrait influencer sur l'ensemble des phénomènes physiques. Ce qui se traduit par un nombre important d'indicateurs.
  - La seconde, « physico-morphologique » [BOTTEMA 1998 ; GRIMMOND et OKE 1999], ne caractérise dans le cadre bâti que ce qui influe sur les modèles physiques.
- Des indicateurs « morpho-physico-sensibles » : Cette deuxième catégorie d'indicateurs vise à caractériser ce qui est ressenti par les usagers des espaces urbains et la caractérisation de l'interaction du physique et du bâti ne constitue pas une finalité en soi.
- Des indicateurs morphologiques graphiques : La troisième catégorie d'indicateurs que nous évoquons ici vise en un premier la description de la forme urbaine de telle sorte à en communiquer les performances qualitatives (ensoleillement, vue du ciel, etc.). Ce sont des indicateurs qui peuvent servir pour décrire une interaction entre le physique et le construit mais pas seulement. L'intérêt principal de cette catégorie d'indicateurs est qu'elle s'appuie sur une définition géométrique et une représentation graphique, ce qui les rend plus explicites que les précédentes catégories.

Voyons avec plus de détail ces trois catégories d'indicateurs et interrogeons-nous sur leur capacité à évaluer une transformation urbaine de manière simple et opérationnelle.

### 2.1. Des indicateurs de l'interaction du physique et du construit

#### 2.1.1. Des indicateurs « morpho-physiques » : *de l'espace construit au paramètre physique*

- On retrouve chez des auteurs dont la sensibilité est plus proche de la recherche architecturale et urbaine que de celle des sciences physiques, des travaux ayant pour objet la caractérisation climatique et environnementale des espaces et ensembles urbains. Il est généralement question dans ces travaux de caractériser par des indicateurs morphologiques la variation des paramètres climatiques (direction et vitesse du vent, températures d'air et de surfaces, variation de l'humidité de l'air), des bilans énergétiques, de la pollution atmosphérique ou sonore ou encore de l'éclairement naturel dans les espaces et les ensembles urbains. On citera ici trois travaux [GROLEAU et al. 1995] ; [ADOLPHE 2001] et [AIT-AMEUR 2002].

- D. Groleau et C. Marenne ont tenté de définir dès 1995, « des indicateurs environnementaux » des formes urbaines construites, basés sur une lecture des propriétés morphologiques des tissus urbains [GROLEAU et al. 1995]. Ces auteurs considéraient que les propriétés morphologiques permettraient de donner des indications sur les propriétés solaires des tissus urbains. Les propriétés étudiées étaient : la hauteur moyenne des bâtiments, la densité moyenne, le niveau d'homogénéité (forte ou faible), la directionnalité des rues, l'exposition moyenne des façades, la largeur moyenne des rues, le prospect moyen des rues, et la typologie de l'espace ouvert. L'ensemble de ces indicateurs étaient traduit par des valeurs numériques adimensionnelles. Des simulations solaires appliquées à trois échantillons de tissus urbains Nantais (fig. 4.4) ont été effectuées pour tenter une validation de ces « indicateurs ». Les auteurs ont conclu à la pertinence d'une classification des formes urbaines selon des indicateurs environnementaux, et la nécessité d'élargir le champ des applications à d'autres phénomènes microclimatiques comme la lumière et le vent.



Figure 4.4 : Trois tissus urbains étudiés par [GROLEAU et al. 1995]

- On retrouve aussi des travaux qui ont tenté une validation d'un certain nombre d'indicateurs morphologiques du point de vue de leurs effets microclimatiques. Karima Aît-Ameur [AIT-AMEUR 2002]<sup>21</sup> a présenté dans ce sens, dans son travail de thèse, quatorze indicateurs, appliqués soit à l'espace urbain soit à l'échelle d'un tissu (tableau. 4.1). L'auteur a effectué des mesures sur plusieurs sites de la température de l'air, de l'humidité relative, et de la vitesse de l'air pour tester la sensibilité des variations des indicateurs d'un site à un autre. A l'échelle du tissu urbain, les indicateurs définis étaient : la densité du bâti, le pourcentage de minéralisation, le taux de percement horizontal d'un tissu urbain et sa rugosité. A l'échelle de l'espace urbain elle définissait comme indicateurs: le prospect équivalent d'un espace, la longueur équivalente, les facteurs d'obstruction minérale, le facteur d'ombre portée, la fraction de masque, la densité minérale, la densité végétale, le taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace, le taux de vitrage de la façade et l'albédo des surfaces. K.Ait-Ameur présenta aussi un état de l'art sur les différents indicateurs morphologiques, définis par plusieurs auteurs, qui illustre bien la diversité qui peut découler d'objectifs liés à divers phénomènes physiques dans la formulation des indicateurs « morphologiques »<sup>22</sup>.

- Selon une démarche similaire on notera aussi des travaux dont l'objectif déclaré est de réduire la complexité de la forme urbaine en intégrant les variations morphologiques de la ville. Parmi ces travaux celui de L. Adolphe qui a proposé la définition d'un certain nombre d'indicateurs environnementaux basés sur une lecture morphologique des fragments urbains [ADOLPHE 2001], en se proposant de définir des indicateurs qui prennent en compte les variations « microscopiques »<sup>23</sup> d'un fragment urbain. En opposant la régularité apparente des villes de fondation comme les bastides et les établissements coloniaux à « l'organicité » des plans de villes médiévales, l'auteur conclut que la forme urbaine se présente le plus souvent dans des formes complexes et répond rarement à un schéma répétitif.

<sup>21</sup> Thèse soutenue sous la direction de Luc Adolphe au laboratoire GRECO à Toulouse.

<sup>22</sup> [Ait-Ameur 2002, pp. 91-115]

<sup>23</sup> Rappelons que nous reprochions au modèle TEB, et à la notion de rue canyon qu'elle excluait la complexité de la forme urbaine, et qu'elle ne pouvait inclure, de par sa définition, les possibles variations pouvant exister d'une rue à une autre, comme l'hétérogénéité des parois d'une rue par exemple.

Échelle	Éléments morphologiques				Évaluation			Éléments microclimatiques			
	Critères morphologiques	Indicateurs morphologiques	Sources	Facteurs morphologiques influents	Méthode d'évaluation	Équations	Variabilité	T <sub>a</sub>	T <sub>e</sub>	H	V <sub>a</sub>
tissu urbain	Occupation des parcelles	Densité du bâti	P. Merlin, F. Choay, (1988)	implantation du bâti (emprise au sol)	Morphologie	$DS = \sum_{i=1}^{i=n} A_i p / AS$	espace	+			
		Minéralisation	L. Adolphe (1999)	aménagements minéraux et végétaux	Morphologie	$M = [S_{min} - (\sum_{i=1}^{i=n} S_{vegetale} + \sum_{i=1}^{i=n} S_{min})] / S_{min}$	espace	+		+	
		Taux de pavage horizontal du tissu urbain	K. Ait-Ameur	dimension horizontale des espaces vides	Morphologie	$PH = (S_{vieux public} + S_{vieux privé}) / S_{total}$	espace		+		+
		Porosité du tissu urbain	L. Adolphe (1999)	implantation du bâti (emprise au sol et hauteur, texture et matériaux, variétés et type d'aménagements végétaux (terrace au sol et hauteur végétale), mobilier urbain	Morphologie	$RM = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} A_i * h_i}{\sum_{i=1}^{i=n} A_i + \sum_{i=1}^{i=n} A_i}$ [m]	espace				+
		Prospect équivalent	K. Ait-Ameur	hauteur des façades, largeur de l'espace, longueur de l'espace	relevés sur terrain ou sur SIG	$Pe = H_m / L_p$	espace		+		+
		Longueur équivalente	K. Ait-Ameur	hauteur de la façade, distance du point à la façade	relevés sur terrain ou sur SIG	$Le = S / L_p$	espace				+
		Facteur d'obstruction minérale	K. Ait-Ameur	distances urbaines horizontales, hauteur du bâtiment qui fait ombre, azimut de la rue, trajectoire et azimut et hauteur du soleil	projection aplombique à axe zénithal	$Fm = \cos(\alpha)$	espace		+		+
		Facteur d'ombre portée	K. Ait-Ameur	couverture de l'espace au ciel	projection aplombique à axe zénithal	$Fop = [d \cdot (\tan \alpha \cdot \cos(\alpha - \alpha') / \tan(\beta))] \cdot 1/2$	point dans l'espace, heure de saisie				
		Fraction de masquo	K. Ait-Ameur	ouverture de l'espace au ciel	projection aplombique à axe zénithal	$h = H - [\tan(\beta) / \cos(\alpha - \alpha')] \cdot d$ [m]	point dans l'espace, heure de saisie		+		
		Type d'aménagement dans l'espace	J.-L. Izard, (1997)	répartition des surfaces minérales dans l'espace	projection aplombique à axe zénithal ou horizontal	$min = Aire \text{ du minéral} / Aire \text{ totale de l'espace}$	point dans l'espace				
espace public		Densité minérale	J.-L. Izard, (1997)	répartition des surfaces minérales dans l'espace	projection aplombique à axe zénithal ou horizontal	$Vg = Aire \text{ du végétal} / Aire \text{ totale de l'espace}$	point dans l'espace		+		+
		Densité végétale	J.-L. Izard, (1997)	répartition des surfaces végétales dans l'espace	projection aplombique à axe zénithal ou horizontal	$Te = (\sum_{i=1}^{i=n} S_i \cdot H_i) / \sum_{i=1}^{i=n} S_i$	espace				+
		Taux d'emprise des obstacles urbains dans l'espace	Ait-Ameur K	nombre d'obstacles dans l'espace, hauteur des obstacles	relevés sur terrain	$Vi = Aire \text{ du vitrage} / Aire \text{ totale de la façade}$	point dans l'espace		+		
		Taux de vitrage de la façade	Ait-Ameur K	répartition des surfaces vitrées	projection aplombique à axe zénithal		point dans l'espace				
	Albédo des surfaces		nature des matériaux, disposition des façades	relevés sur terrain		point dans l'espace		+			

Tableau 4.1 : Grille d'analyse des indicateurs morphologiques selon [Ait-Ameur 2002]



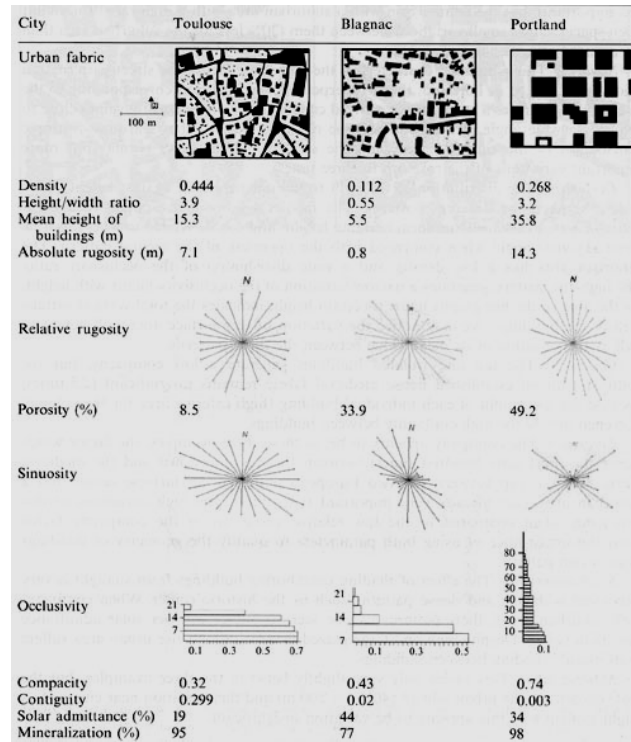


Figure 4.5 : Comparaison de tissus urbains de Toulouse, Blagnac (France), et Portland (USA) [ADOLPHE 2001]

L. Adolphe, pour définir les indicateurs, assimile le fragment urbain à un milieu poreux contenant un « squelette » solide et rigide constitués par les éléments bâtis. De cette analogie il conclut à la possibilité d'appliquer à la forme urbaine des paramètres simplifiés pour étudier ses caractéristiques macroscopiques, et ce à l'exemple de travaux comme ceux de [ZWIKKER ET KOSTEN, 1949]<sup>24</sup>. Il réduit ainsi la complexité de la morphologie urbaine à un modèle défini par neuf indicateurs classés selon les phénomènes physiques dont ils sont caractéristiques : densité, rugosité (absolue et relative), sinuosité, porosité, compacité, continuité, occlusivité, admittance solaire, et minéralisation. Sans aller jusqu'à valider la pertinence de ces indicateurs ou tenter leur application dans une perspective de prédiction des paramètres microclimatiques (perspectives formulées par l'auteur), l'auteur démontre leurs pertinences à différencier des tissus urbains ou à mettre en évidence les variations dues à une transformation urbaine (par exemple l'effet d'une percée « hausmanienne »). Il prend pour cela trois échantillons de tissus : organiques, en damier et un tissu aux éléments bâtis assez isolés (fig. 4.5).

Ces différents travaux, s'ils ont le mérite de définir une certaine « réduction morphologique » des phénomènes physiques, ne nous renseignent pas cependant (du moins pas explicitement) sur l'environnement climatique ni sur la qualité environnementale que l'on peut obtenir par cette réduction. Pourtant L. Adolphe définit de manière assez claire « le cahier des charges » auquel devraient répondre des indicateurs morphologiques pertinents. Selon lui, ils devraient être : complémentaires, non redondants, et opérationnels. L'auteur donne, enfin, une définition intéressante de l'opérationnalité qui est assez proche de ce que nous avons précédemment évoqué. Cette dernière s'obtiendrait en limitant le nombre des indicateurs qui doivent : « avoir une consistance physique, une consistance morphologique, ils doivent être mesurables, lisibles et permettant d'effectuer des comparaisons » [ADOLPHE 2001].

La manque de validation des indicateurs (on ne précise pas assez ce qui influe sur quoi, ni comment ces indicateurs se combinent entre eux ?) et leur nombre assez important, rendent leur application

<sup>24</sup> C.Zwikker, C.W.Kosten, Sound absorbing materials (Elsevier, Amsterdam). Cité dans [Adolphe 2001].

opérationnelle assez difficile. En d'autres termes, et pour ces deux raisons<sup>25</sup>, il paraît difficile de renseigner l'environnement climatique à partir de ces indicateurs.

Ce qui manque à ces indicateurs morphologiques pour constituer une information opératoire c'est de leur donner une formulation explicite. En effet, les indicateurs morpho-physiques que nous venons d'exposer ne renvoient pas systématiquement à ce qu'ils veulent représenter et nécessitent des interprétations (mode d'emploi) que les auteurs ne donnent pas. Cette confusion est encore plus grande lorsque leur nombre est important car les auteurs ne disent pas comment effectuer une synthèse de tout les indicateurs. Synthèse qui est pourtant indispensable pour proposer une intervention.

### 2.2.2. Des indicateurs « physico-morphologiques » : du physique au construit

Des travaux assez récents, réalisés dans le champ spécifique de la recherche en climatologie urbaine, ont à leur tour visé une prise en compte de la complexité de la forme urbaine par des paramètres différents du concept de Cayon. Nous voulons en rappeler ici deux tentatives qui ont visé explicitement la modélisation de la rugosité de la surface urbaine et donc approcher par cela les aspects aérodynamiques de la forme urbaine : la première a été effectuée par Bottema [BOTTEMA 1997] et la deuxième par T.R Oke et S.C. Grimmond [OKE et al. 1999].

Bottema est l'un des premiers à avoir tenté une simplification de la complexité de la forme urbaine par l'intermédiaire d'un modèle dont l'objectif est la prise en compte des éléments de la surface urbaine qui influent sur la rugosité aérodynamique. La forme urbaine est réduite à une surface bâtie décrite selon deux types d'informations (fig. 4.6) : les distances (en abscisse  $d_x$  et en ordonnées  $d_y$ ) séparant les différents bâtiments et les surfaces des fronts bâtis composés des façades de bâtiments. Cette description s'applique à un modèle de forme urbaine assez particulier composé de bâtiments alternés par des espaces vides, de façon à constituer un front bâti assez continu. Il ne s'agit pas ici de discuter la pertinence physique de cette réduction de la forme urbaine, mais nous notons que selon l'auteur qui a intégré cette modélisation de la surface urbaine dans des formulations mathématiques empiriques, c'est une traduction qui se veut assez pertinente dans la modélisation de la rugosité aérodynamique.

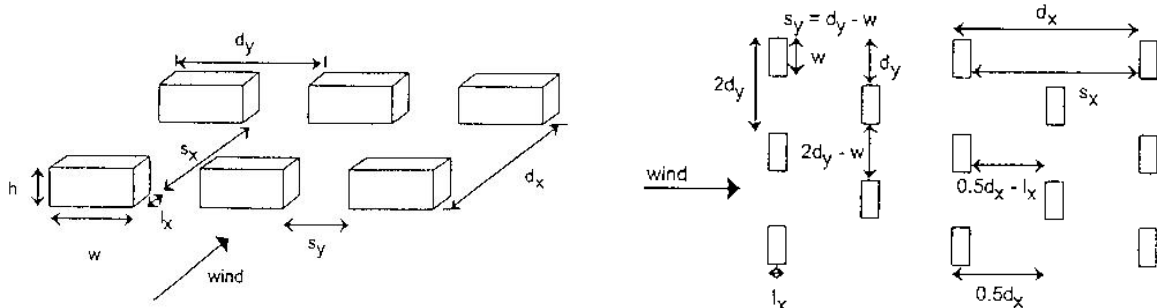


Figure 4.6 : Paramètres d'analyse de la rugosité d'une surface bâtie selon Bottema [BOTTEMA 1997]

Oke et Grimmond ont à leur tour proposé une modélisation de la surface urbaine par des paramètres morphologiques afin d'en évaluer la rugosité aérodynamique. Leur méthode s'appuie sur une représentation « régulière » de la forme urbaine, et permet, selon les auteurs, de prédire les propriétés aérodynamiques des villes. Elle s'appuie sur la définition d'un élément de rugosité comme étant l'unité de base de la forme urbaine. Ce dernier se compose d'un élément bâti (un bâtiment) et de rues périphériques (fig. 4.7). Les auteurs ont pour cela adopté comme modèle de la forme urbaine un damier homogène formé d'îlots à quatre parois parallèles et de rues identiques. Ils définissent leur

<sup>25</sup> Même si K. Ait-Ameur a tenté une validation d'un certain nombre d'indicateurs, du point de vue de leur influence sur les paramètres micro climatiques dans des espaces urbains, la conclusion de cette recherche est restée au stade de « l'énumération ». C'est à dire présenter un tableau regroupant les indicateurs et les paramètres micro climatiques pouvant être influés par ces derniers, selon une certaine échelle d'influence. [AIT-AMEUR 2002]

modélisation de la surface urbaine comme étant une « morphométrie », c'est à dire une mesure de la forme. La description qu'ils font de la forme urbaine s'appuie sur quatre descripteurs : la surface de l'élément bâti  $A_p$ , la surface totale du plan  $A_T$ , la surface de la façade frontale (face au vent), la largeur de la rue  $S$  et la hauteur moyenne de la rue  $H_r$ , ainsi que les dimensions  $W$  et  $L$  de l'élément de rugosité (bâtiment, arbre, mobilier haut.....). De ces descripteurs trois indicateurs adimensionnels permettant de caractériser les propriétés aérodynamiques de la forme urbaine ont été définis : la fraction de surface du toit par la surface du plan de l'élément ; la fraction de surface de la paroi au vent par la surface du plan et la fraction de hauteur de bâtiment par la profondeur du dégagement (ou le prospect moyen des rues).

En dehors des aspects aérodynamiques, les auteurs supposent l'applicabilité multicritère de leur modèle. En effet ce qu'ils appellent, par exemple, « le prospect moyen » (l'équivalent du prospect moyen du canyon que l'on a vu avec le modèle TEB), permettrait d'évaluer l'intensité de l'îlot de chaleur ainsi que le taux d'ouverture au ciel des espaces urbains.

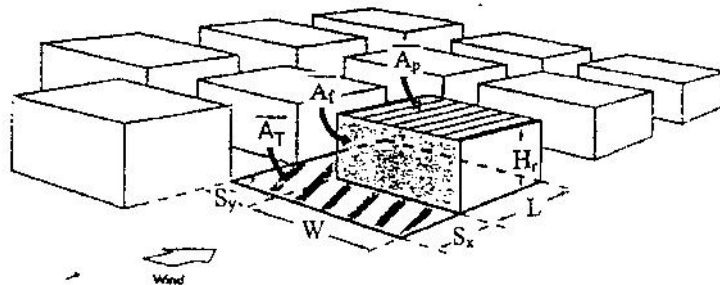


Figure 4.7 : Paramètres de l'analyse « morphométrique » de Oke et Grimmond [OKE et al. 1999]

Ce que nous retenons de ces travaux, c'est que leurs auteurs respectifs tentent une « mesure » des vides urbains et de leurs interfaces bâties. Mais ce sont des travaux qui posent le même problème que celui posé par l'usage du concept de rue canyon. Les indicateurs morphologiques définis par ces auteurs s'appliquent à un modèle prédéfini de la forme urbaine et non à toute forme urbaine. Il semble en effet difficile d'appliquer l'un des deux modèles à des formes urbaines plus complexes. Si ces deux travaux ont le mérite de modéliser une forme urbaine plus complexe que le canyon, cette modélisation reste tout de même limitée à des cas particuliers.

## 2.2. Une indication « morpho-physico-sensible » non quantifiable : Le paradigme d'effet [AUGOYARD et al. 1995]

Le laboratoire CRESSON de l'école d'architecture de Grenoble<sup>26</sup> a développé une notion dont la définition est assez proche de celle que nous avons donnée de l'indicateur mais qui s'applique à l'analyse du perçu plus qu'à l'analyse de l'environnement physique, c'est la notion « d'effet » appliquée à l'analyse du phénomène sonore. L'effet est, comme l'indicateur, la traduction d'une interaction, mais c'est de l'interaction du phénomène physique (tel qu'il est régulé par l'environnement bâti) et de la perception dont il est question.

L'effet est défini comme un concept descriptif transdisciplinaire, que toutes les disciplines concernées par le phénomène sonore pourraient utiliser. L'effet sonore prend la valeur d'un paradigme, « idée à mi-chemin entre l'universel et le singulier, à la fois modèle et guide, il permet un discours général sur les sons mais ne peut se passer d'exemples »<sup>27</sup>. Cette définition de l'effet se rapproche de celle que nous donnions de l'indicateur opérationnel.

<sup>26</sup> Le laboratoire CRESSON fait parti, avec le CERMA, de l'UMR-CNRS 1563 et traite particulièrement des ambiances sonores.

<sup>27</sup> [AUGOYARD et al. 1995]

L'effet est entre la cause et l'évènement perçu et il est de par sa composante perceptive difficilement prédictible. Néanmoins nous notons, lorsque l'on analyse de plus près la définition de chaque effet, qu'il existe ceux dont le contenu est plus proche de la configuration des dispositifs spatiaux que du domaine de la perception. On peut donc considérer qu'il existerait des effets qui seraient par définition plus opérationnels que d'autres<sup>28</sup>.

La définition de chaque effet, donnée par les auteurs, se fait en effet selon six domaines de connaissances hiérarchisés de 1 à 6. Ces domaines sont : l'acoustique physique et appliquée, l'architecture et l'urbanisme, la sociologie et la culture du quotidien, l'esthétique musicale, la psychologie et la physiologie de la perception, et les expressions scripturaires et médiatiques. L'ordre de hiérarchisation de ces domaines de connaissance dans les définitions est important car il permet de situer ceux qui sont les plus proches de chaque effet.

La dimension spatiale (donc architecture et urbanisme) prend place dans deux catégories d'effets : les effets élémentaires, et les effets de composition.<sup>29</sup> En observant le niveau de présence du champ « architecture et urbanisme » dans les différents effets recensés on notera la place que prend la dimension spatiale dans les différents effets<sup>30</sup>. Le premier domaine associé à la définition de l'effet de coupure par exemple est celui de l'architecture et de l'urbanisme. Cet effet est donc plus explicite pour l'auteur d'une transformation urbaine, puisqu'il se définit d'abord selon un état particulier de la forme de l'espace urbain.

Les effets qui représentent de manière plus ou moins claire une disposition spatiale (domaines 01 et 02) traduisent, pour la plupart, un mode de régulation des paramètres physiques acoustiques comme ceux illustrés dans les figures ci-dessous (fig. 4.8 et fig. 4.9). Ces illustrations associent un dispositif spatial à une variation du phénomène physique telle qu'elle est représentée par les graphes. Cette association d'une variation spatiale et d'une variation physique nous paraît intéressante puisqu'elle renvoie aux deux domaines simultanément : à l'espace et au phénomène physique. Mais cette représentation n'est appliquée qu'à des phénomènes mesurés in situ, et l'effet en question n'est pas mesurable en lui-même. Il n'y a pas de mesure de l'effet de coupure mais un phénomène de coupure assez général.

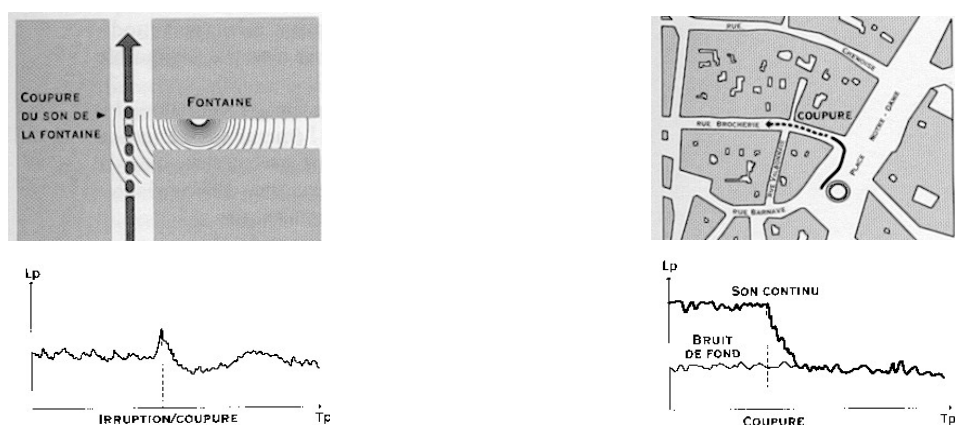


Figure 4.8 : Exemples de représentation de l'effet de coupure [AUGOYARD et al. 1995, p.39]

<sup>28</sup> Cela en faisant l'hypothèse que le travail sur le dispositif spatial est plus opérationnel que le traitement des dimensions de l'usage.

<sup>29</sup> Les auteurs définissent cinq catégories d'effets : les effets élémentaires, les effets de composition, les effets liés à l'organisation perceptive, des effets psychomoteurs, et les effets sémantiques [AUGOYARD et al. 1995, p.16]

<sup>30</sup> Anamnèse : 05 ; Bourdon : 05 ; Coupure : 01 ; Créneau : 02 (le 01 est physique) ; Filtrage : 02 (01 physique) ; Imitation : 05 ; Masque : 02 (01 physique) ; Métabole : 03 (01 psychologie et psychologie de la perception, 02 physique) ; Répétition : 05 ; Résonance : 02 (01 physique) ; Réverbération : 02 lié au matériau (01 physique) ; Sharawandji : 05 ; Synecdoque : 05 (sur 06) ; Ubiquité : 01 (difficulté ou impossibilité de localiser une source sonore) ; Vague : 01/02 (son entendu selon une intensité analogue à la forme d'une vague : crescendo, point maximal, rupture du son rapide ou progressive, et decrescendo).

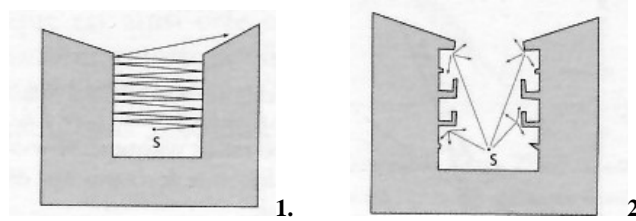


Figure 4.9 : Exemple de mise en relation de la forme d'un espace et d'un effet : l'effet de résonance ; 1. rue moderne, 2. rue d'un tissu ancien classique [AUGOYARD et al 1995, p.114]

Au-delà de la valeur opérationnelle limitée des effets, nous retenons tout de même une mise en relation intéressante du phénomène physique sonore et de la forme des espaces urbains. Celle-ci est traduite par les auteurs par une double représentation : une représentation de la forme urbaine et une représentation graphique du signal physique. Cette double représentation permet dans une certaine mesure de rendre la caractérisation plus explicite que celle qui s'appuierait exclusivement sur des indicateurs numériques. La définition des effets reste néanmoins inopérante dans le cadre d'un projet puisqu'elle ne peut être appliquée à d'autres formes urbaines sans effectuer de mesures physiques.

### 2.3. Des « indications géométriques » explicites

Recherchant une représentation de la forme urbaine qui puisse rendre compte des « performances » de la morphologie d'un cadre bâti à répondre à des intentions explicites, J.Teller [TELLER 2001] s'étonne que la perspective soit toujours considérée comme un outil efficace pour communiquer ces intentions. En faisant le tour des méthodes de représentation qui visent « la représentation d'un espace tridimensionnel sur un support à deux dimensions », il conclut que les projections sphériques sont les plus aptes à rendre compte et à communiquer à l'ensemble des intervenants sur la morphologie urbaine les impacts d'une éventuelle transformation d'un espace urbain (addition ou soustraction du bâti).

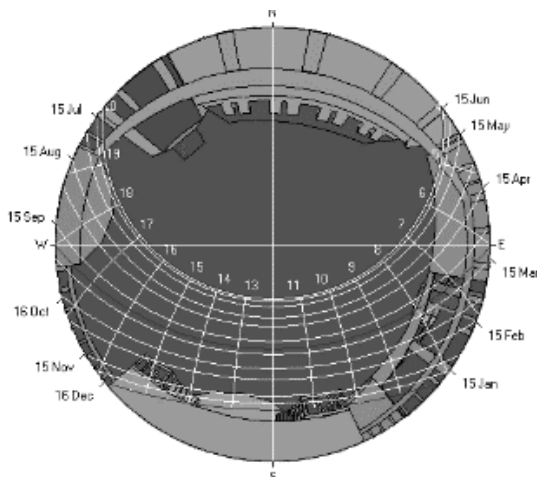


Figure 4.10: Trajectoire solaire selon chaque jour du mois représentée sur une vue stéréographique

Si nous faisons référence à ce travail, qui s'inscrit dans les recherches du laboratoire belge LEMA, c'est parce que les phénomènes associés à l'analyse de la forme sont principalement des phénomènes physiques comme l'ensoleillement d'un espace ou la vue du ciel. Un outil informatique appelé « Townscope » fut ainsi développé par le LEMA pour traduire les qualités potentielles de la forme des espaces urbains. On peut ainsi par exemple représenter, par cet outil, l'effet d'une modification des frontières bâties de l'espace urbain (appelé boîte urbaine dont le toit serait

le ciel). Concrètement, il s'agit d'une représentation qui permet de rendre compte de façon « explicite » de la qualité physique de l'espace urbain, en superposant deux représentations : celle de l'espace et celle du phénomène analysé (Fig. 4.10)<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Image extraite de : <http://www.lemma.ulg.ac.be/tools/townscope/illustrations.htm>

J. Teller va plus loin que cette représentation et propose une « interprétation » de la forme de l'espace ouvert<sup>32</sup>, à partir de l'exploitation des projections sphériques, par des indicateurs numériques. L'objectif est de rendre compte des variations pouvant exister entre plusieurs points de l'espace, selon une démarche proche de l'écologie de la vision développée par Gibson<sup>33</sup> et de la méthode des isovists<sup>34</sup>.

Les indicateurs définis sont : le rapport de masse (basée sur une sorte de cartographie de l'ouverture au ciel de l'espace urbain) ; les profondeurs de vue ; régularité de la ligne de ciel ; anisotropie de l'espace (définie par la compacité, l'étalement et excentricité de l'espace).

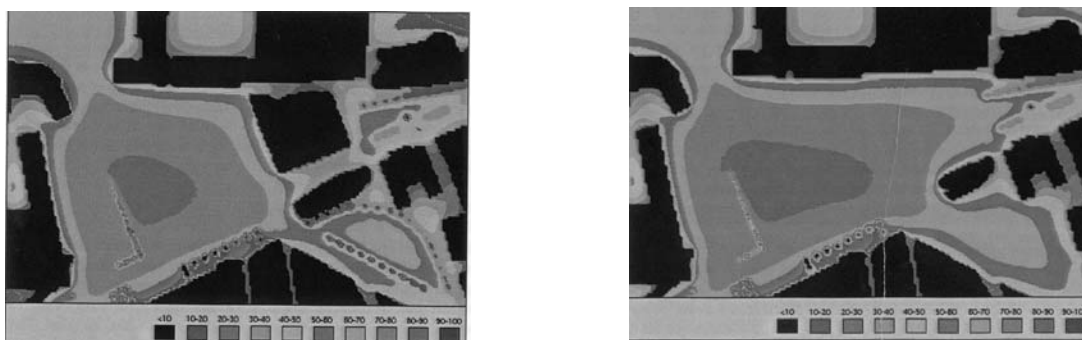


Figure 4.11: Variation de l'ouverture de Ciel sur la place Saint-Lambert avec (à droite) et sans le théâtre [TELLER 2001]

Dans le cas de cette approche, il s'agit d'une représentation combinée à des indicateurs, ce qui traduit une insuffisance de la représentation en elle-même car elle n'est appliquée qu'à un seul point à la fois. Ces indicateurs numériques permettent donc d'appliquer l'analyse à l'échelle de plusieurs points d'un espace urbain (fig. 4.11). Même si l'auteur précise bien qu'il ne s'agit pas là de réduire la complexité de forme urbaine mais de donner une description ouverte à d'autres applications et développements, il reste que les indicateurs définis, comme c'est le cas des indicateurs morpho-physiques, ne facilitent pas l'interprétation. Pour reprendre la définition de B.Croce, ces indicateurs numériques de deuxième degré (ils traduisent une représentation qui elle-même est un indicateur) serait des représentations universelles ne s'appliquant pas aux cas particuliers.

De ce travail on retiendra donc d'un côté l'intérêt d'une représentation superposant une représentation spatiale et une représentation d'un phénomène physique, comme les trajectoires solaires et d'un autre côté l'inconvénient d'une réduction de cette représentation à des indicateurs numériques qui posent en terme d'opérationnalité les mêmes problèmes que les indicateurs morpho-physiques précédemment évoqués.

#### 2.4. Vers la définition d'un indicateur morphologique mesurable, explicite et multi-échelle

Les approches que nous venons de présenter ont une inflexion soit vers le cas particulier (la représentation stéréographique ou la visualisation des facteurs de vues du ciel, ne s'appliquent qu'à des points d'un espace urbain et ne permettent pas de comparaisons entre espaces si ce n'est que par

<sup>32</sup> Il développe aussi un certain nombre de méthodes qui traitent de l'interprétation de l'espace ouvert : comme « la syntaxe spatiale », « les E-partitions » ou encore « les diagrammes de Voronoi » dont il fait le reproche de leur non prise en compte de la troisième dimension du cadre bâti. [TELLER 2001].

<sup>33</sup> J.J.GIBSON, *The perception of visual world*, Greenwood Press Publishers, Westport, 1950, 235p. (cité par l'auteur)

<sup>34</sup> C'est une notion qui traduit le champ de visibilité d'un point par rapport aux frontières du vide qu'il perçoit. Développée à la fin des années 70 par M. Benedikt qui la définit comme « étant donné une figure F comportant éventuellement des obstacles, l'Isovist I d'un point P est représenté par l'ensemble des points de F visibles à partir de ce point » [TELLER 2001, p. 184-185]

l'intermédiaire d'indicateurs numériques non explicites) soit vers le cas général qui reste assez décalé de la réalité bâtie (c'est le cas des indicateurs morpho-physiques et physico-morphologiques).

Que ce soit dans le cadre d'une évaluation par modélisation « descriptive » du type TEB ou dans le cadre d'une évaluation par des indicateurs morpho-physiques, des interprétations « expertes » restent nécessaires pour passer d'une information morphologique à une qualification environnementale (fig. 4.12) :

- Dans le cas des modèles physiques l'interprétation est indispensable pour passer de la forme urbaine aux paramètres d'entrées du modèle.
- Dans le cas des indicateurs l'interprétation est indispensable pour passer de la valeur de l'indicateur numérique à celle des paramètres physiques.

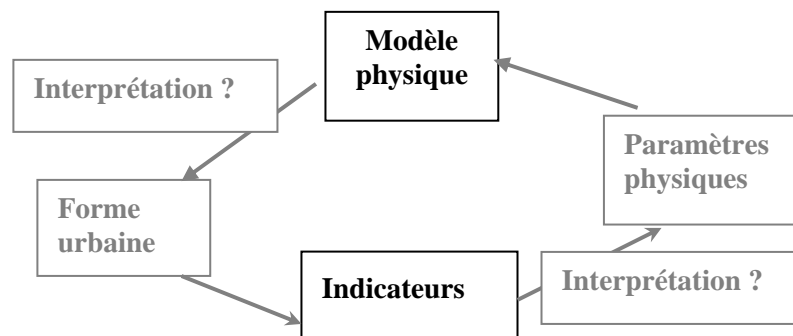


Figure 4.12 : Les niveaux problématiques d'interprétation : selon une évaluation par modèle physique ou par indicateur

Si l'on accepte l'idée selon laquelle une mise en relation directe serait possible entre variation de la forme urbaine et variation de l'environnement climatique (conclusion des chapitres précédents), on devrait disposer d'un indicateur qui permettrait de mesurer cette interaction entre le morphologique et le physique comme le fait, insuffisamment certes, la définition des effets proches du domaine de l'architecture et de l'urbanisme ou la représentation stéréographique de Townscope.

La question que l'on se posera donc, au regard des différents travaux de caractérisation morphologiques de la forme urbaine et au regard de notre conclusion des chapitres précédents à propos de la nécessité de caractériser l'ouverture du vide urbain, est la suivante : serait-il possible de mesurer le vide urbain, et de manière plus spécifique l'ouverture de ce dernier, avec une méthode applicable à toute forme urbaine ? Et ne pouvons nous pas le faire de manière simple sans passer par des évaluations numériques intermédiaires qui entraînent une perte d'information ?

En conclusion, on peut résumer le cahier des charges pour la définition des indicateurs morphologiques de l'environnement climatique aux éléments suivants :

- *Définir des indicateurs mesurables selon une méthode de caractérisation simplifiée* : Cette formulation doit s'effectuer en constituant le moins d'indicateurs possibles pour faciliter l'élaboration d'une synthèse opérationnelle. Pour être valides d'un point de vue physique, les indicateurs doivent s'appuyer sur les modèles physiques déjà validés, et permettre de déterminer les données d'entrées des modèles<sup>35</sup>. Ce qui est en soi un apport important, puisque comme on l'a dit, le passage de la forme réelle aux paramètres d'entrées de ces modèles reste assez problématique.

<sup>35</sup> Puisque les indicateurs ont une consistance physique, comme l'affirme L. Adolphe, pourquoi ne pas utiliser ceux là même qui sont pris en compte dans les modèles physiques traduisant les échanges sol-atmosphère, comme « le prospect du canyon » par exemple, puisqu'ils ont été plus ou moins validé d'un point de vue physique ? Nous avons apporté quelques éléments de réponse, en discutant les résultats des simulations, ce qui manque à ces indicateurs c'est une consistance morphologique.

- *Prendre en compte la complexité de la forme urbaine* : Une évaluation à différentes échelles spatiales est indispensable pour prendre en compte la complexité de la forme urbaine. L'indicateur doit permettre une évaluation d'un ensemble urbain tout en évaluant les variations qui peuvent exister au sein de cet ensemble. Il est en effet nécessaire d'appréhender les effets multi-échelle d'une transformation morphologique sur les caractéristiques microclimatiques. En effet il reste assez difficile de saisir la forme urbaine (et encore moins sa qualité) dans sa complexité en prenant en compte le rapport des parties avec le « tout ».
- *Présenter les résultats de la caractérisation de manière explicite* : Il est aussi une exigence à laquelle doivent répondre les indicateurs morphologiques c'est « leur communicabilité ». S'ils fédèrent plusieurs phénomènes physiques, et s'ils ont pour tâche d'être opérationnels, ils doivent être immédiatement explicites en choisissant le mode de représentation le plus adaptée.



### 3. PROPOSITION D'UN INDICATEUR DU POTENTIEL DE REGULATION DE L'ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE PAR LA FORME URBAINE

Passons à présent à la proposition proprement dite. Il s'agit d'une caractérisation des variations de l'environnement climatique basée sur la définition d'un indicateur morphologique. Ce n'est pas un état « figé » d'une forme prise isolément que nous cherchons à caractériser, mais, comme cela fut le cas tout au long de cette recherche, ce sont les variations morphologiques définies comme le passage d'un état à un autre que l'on doit pouvoir évaluer. Ces variations peuvent être soit synchroniques (différents espaces construits à un moment donné) soit diachroniques (différents espaces construits en évolution). En d'autres termes, la finalité de la caractérisation serait de pouvoir analyser le microclimat d'un état et de comparer entre plusieurs états.

#### 3.1. Eléments de caractérisation

##### - Caractérisation d'un état et d'une variation

*« Dans la conception d'un projet urbain, la notion de continuité est fondamentale. ...Un projet urbain est déjà potentiellement inscrit sur le territoire avant même qu'il apparaisse. Le rôle du concepteur se limite à lire attentivement le contexte existant, à l'interpréter assez finement pour « révéler » le projet caché ». [B.Huet, Journal le monde du 23/11/1998]*

Un projet urbain est donc, selon B.Huet, une modification d'un état existant. Il suffit à l'indicateur, pour être opérationnel, d'évaluer la qualité de cette modification (la caractériser). En d'autres termes, son rôle serait d'évaluer la modification (les différences) de l'environnement climatique qui résulte d'une transformation. D'un point de vue opérationnel l'analyse s'effectue toujours par comparaison de deux à plusieurs états de la forme urbaine. L'approche comparative permet d'effectuer une hiérarchisation et donc de classer par exemple les formes ou les interventions selon une échelle qualitative.

L'approche comparative nous semble adaptée aux besoins d'une analyse de la forme urbaine en transformation. En effet ce dont on a besoin lorsque l'on veut évaluer l'effet d'une intervention morphologique (un projet urbain) sur les phénomènes physiques, c'est d'évaluer la modification apportée par le projet. En d'autres termes pouvoir mesurer la qualité de la variation apportée aux phénomènes physiques par cette transformation. Même lorsque l'on analyse par des modèles physiques un état donné de la forme urbaine, les résultats ne peuvent être explicites s'ils ne sont pas mis en parallèle avec d'autres résultats, et ce pour arriver à des évaluations du type : c'est plus pollué, plus bruyant, moins humide, plus ventilé, etc. Le jugement qualitatif se fait donc le plus souvent sur la base d'une comparaison.

Il n'existe pas d'effet absolu. L'effet est rapporté à une situation connue. Sans référence, l'effet n'a pas de sens. On comprendra mieux le niveau d'ensoleillement, d'éclairement ou de pollution d'un espace urbain lorsqu'on le compare à un espace déjà existant et connu.

En résumé, on doit pouvoir caractériser de manière explicite à la fois les espaces construits existants et le différentiel entre l'espace construit existant et celui projeté.

##### - Le potentiel de régulation de l'environnement climatique comme objet de la caractérisation morphologique

Cette lecture aura comme objet principal la mesure du potentiel d'une variation spatiale (cette variation peut résulter soit des différences entre les séquences successives d'un parcours, soit d'une transformation diachronique, soit tout simplement d'une comparaison entre plusieurs formes) à

modifier l'environnement climatique physique. Il n'est évidemment pas de notre intention de quantifier les phénomènes physiques, qui est d'ailleurs le propre des modèles physiques, mais d'évaluer leur variation potentielle d'une situation à une autre.

Nous proposons donc une méthode de caractérisation de la forme urbaine aux différentes échelles spatiales qui permet d'évaluer le potentiel d'une forme urbaine à réguler les paramètres climatiques et environnementaux, ainsi que la différence de potentiel de régulation de ces paramètres d'une forme à une autre de façon à permettre leur classification. La caractérisation est donc toujours rapportée à une ou plusieurs situations de référence. A différentes échelles d'analyse on peut réduire le contenu des indicateurs à des informations sur « l'intensité d'échange » entre « l'échelle spatiale analysée » et les paramètres climatiques. Plus un point est soumis à un phénomène physique plus il en sera influencé.

#### - Une méthode de caractérisation graphique

Nous avons constaté dans la partie précédente l'intérêt des représentations graphiques pour rendre un indicateur plus explicite. La définition que donne P. Schaffer dans ses recherches sur la musique des critères de caractérisation rejoint ce constat : « *Nous pouvons définir comme critères de caractérisation des sons, des types de graphismes* »<sup>36</sup>. La représentation graphique, lorsqu'elle permet de traduire une information synthétique à la fois sur l'espace construit et sur le phénomène physique analysé, est en effet plus explicite qu'une caractérisation exclusivement numérique. Nous suggérons ainsi une « caractérisation graphique » de la surface urbaine. Cette représentation graphique a l'avantage d'inclure la variation des valeurs numériques, et tend à être plus explicite que des chiffres ou des textes pour les intervenants sur le cadre bâti. Nous proposerons ainsi un indicateur à la fois graphique et numérique. La représentation graphique permettra de corréliser la représentation des paramètres physiques et celle de la forme des ensembles urbains.

### 3.2. Proposition d'un indicateur : « l'indice d'ouverture directionnelle du vide urbain » ou le concept de canyon selon un réseau polaire

*« La qualitatif –disons ce que l'on perçoit par les sens – donne des indications extrêmement importantes. L'orientation scientifique majeure, c'est de donner à ce qualitatif une expression quantitative. Passer au Combien. Cette quantification peut être exprimée par un nombre. Mais la quantification dépasse le numérique de très loin, elle peut être aussi bien jeu sur les formes par un calcul, au sens le plus général que l'algèbre donne à ce terme, calcul associé à une forme, c'est-à-dire, rappelons-le, à une caractéristique particulière de la forme qui a été retenue et démontrée comme pertinente ... . Le nombre et la forme sont deux façons de dire la réalité. C'est dans leur union que réside le progrès » [DHOMBRE 1994].*

L'indicateur que nous proposons élargit le concept de canyon à l'évaluation de l'ouverture (inverse de fermeture ou confinement) d'un point du vide urbain ou d'un ensemble de points composant un ensemble bâti. Plus l'ouverture est importante plus le point ou l'espace analysé est perméable aux paramètres de l'environnement climatique. L'objectif premier de cet indicateur est de traduire « les potentialités de régulation de l'environnement climatique », qui n'apparaissent pas à la seule vue d'un plan, d'un espace ou d'un fragment urbain. Il va ainsi opérer une sorte de « pré-diagnostic » de la qualité des éléments de la forme urbaine qui sera complété par les simulations des modèles physiques.

Ce n'est pas la première fois que l'on évoque la question de l'ouverture et de la fermeture du vide urbain comme traduisant une certaine « qualité de la forme urbaine ». L'auteur le plus connu ayant développé cette notion dans l'histoire de l'urbanisme est sans doute Camillo Sitte qui consacra à cette question, dans son célèbre ouvrage « L'art de bâtir les villes », deux chapitres entiers, intitulés : « le

<sup>36</sup> P. SCHAEFFER, À la recherche d'une musique concrète., Seuil, Paris, 1952, p. 221.

dégagement du centre des places », et « la fermeture des places » [SITTE 1889]. La place, espace urbain par excellence, est ainsi identifiée à son « dégagement » donc à son ouverture et à « sa fermeture » formée par les obstacles bâtis. C. Sitte définit ainsi l'intervention sur la forme urbaine comme un processus « d'ouverture-fermeture ». Même si Le Corbusier verra dans l'ouvrage de Sitte, une attitude « passiviste » et une tendance au « pittoresque urbain », en lui reprochant sa référence à un passé qui préférerait « les accommodements » aux mutations profondes, il n'en demeure pas moins que les deux attitudes, que Choay différencie en situant le premier parmi « les culturalistes » et le second parmi les « rationalistes » [CHOAY 1965], agissent « certes selon des intensités différentes » sur une même entité « l'ouverture du vide urbain ». Sitte préconise son « ajustement » et son « actualisation » au fur et à mesure des besoins, sans toucher à sa structure (et c'est ce qui s'est passé dans le centre ancien de Nantes). Le Corbusier, voit quant à lui dans « le plan libre » par la prédominance du vide sur le plein (le construit), une solution permettant d'apporter « plus d'air, plus de soleil, et plus de lumière » aux habitations et aux espaces de la ville (c'est ce qui a été mis en œuvre dans les grands ensembles). Nous proposons donc de quantifier l'ouverture de telle sorte qu'elle nous renseigne sur l'état potentiel de l'environnement climatique.

### 3.2.1. Définition-représentation de l'indicateur

*« Il n'y a pas de césure entre le souci de représenter et celui de convaincre ... » [BOULEAU 1999, p.348]*

La forme urbaine n'est pas une agrégation de rues canyons au sens strict du terme, et il serait abusif, comme on l'a déjà dit, d'envisager la conception d'un fragment urbain à partir de ce concept, mais d'un autre côté ce concept est pris en compte par plusieurs modèles de la climatologie urbaine. On propose donc de redéfinir ce concept et de l'évaluer non pas selon un profil unique, comme si la forme urbaine avait le même profil dans toutes les directions, mais selon un réseau polaire de profils appliqué à tout les points constituant un ensemble bâti.

Ainsi selon un réseau polaire de profils appliqué à un point ou à un ensemble de points, nous définissons un angle d'ouverture ( $\alpha$ ) ou un angle de fermeture ( $\beta$ ) (fig. 4.13). Ce profil est calculé selon un ensemble de directions comprises entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$  (suivant les directions cardinales ; le nord  $0^\circ$ , l'est  $90^\circ$ , le sud  $180^\circ$  et l'ouest  $270^\circ$ ) et espacées par des pas angulaires constants. Les profils partent donc d'un point et de l'ensemble des points constituant une surface (horizontale ou verticale) jusqu'à atteindre l'obstacle bâti le plus proche, en supposant que les bâtiments qui sont au premier plan sont les plus influents d'un point de vue microclimatique<sup>37</sup> (fig. 4.13 et fig. 4.14). Le nombre de ces profils sera défini en fonction de la complexité du vide urbain analysé.

Les valeurs associés aux profils sont :

- Distances aux obstacles et hauteurs des enveloppes bâties : Pour construire la rose, on s'appuie sur la connaissance des hauteurs moyennes des bâtiments (H) et de la distance (D) qui éloigne le point analysé de l'obstacle qui se trouve dans une direction donnée. Ces deux valeurs sont les seuls valeurs à relever dans un site ou dans une base de donnée numérique pour construire la rose.
- Le rapport H/D dans chaque direction : Le rapport H/D est ensuite calculé dans chaque direction et pour chaque point. La combinaison de deux H/D opposée, par exemple H/D nord et H/D sud, nous donne la valeur du H/L moyen dans la direction analysée (nord-sud dans ce cas). Le calcul de H/D est indispensable pour évaluer l'angle d'ouverture.

---

<sup>37</sup> On suppose que les hauteurs des bâtiments dans une direction donnée sont assez homogènes. L'existence d'un bâtiment situé en arrière plan qui soit plus haut que celui en premier plan est un fait exceptionnel dans les villes. Cela n'existe que dans les centres d'affaires constitués de tours, et cela représente tout de même un territoire insignifiant comparée à la plupart des villes.

- Les angles d'ouverture : Les angles d'ouverture sont calculés à partir du rapport  $H/D$ . Ce rapport nous donne l'angle de fermeture ( $\beta$ ) à partir duquel on peut calculer l'angle d'ouverture ( $\alpha$ ) qui est égal à  $90^\circ - \beta$ .

Le résultat de l'analyse est exprimé par une rose d'ouverture que l'on définit par « ouverture directionnelle », qui ressemble à la rose des vents. Le centre de la rose représente une ouverture nulle (un point collé à l'obstacle ;  $D=0$ ) et dont l'extrémité peut atteindre une ouverture maximale de  $90^\circ$  (en l'absence d'obstacles ;  $H=0$ ). L'ouverture dans chaque direction sera donc comprise entre ces deux valeurs.

Le calcul de l'ouverture directionnelle peut se faire à partir d'une base de données numériques de type SIG comme celle dont disposent beaucoup de villes en France (par exemple le plan numérique de la ville de Nantes) ou à partir d'un relevé sur terrain. Pour calculer automatiquement les rapports  $H/D$  sur un grand nombre de profils et pour un grand nombre de points nous avons utilisé le logiciel « Solene » du CERMA. Ce logiciel a une fonction de maillage conviviale et il permet d'attribuer des hauteurs différentes (sous formes de descripteurs numériques) aux emprises des bâtiments. Pour faire le calcul de l'ouverture directionnelle proprement dite, un nouveau programme a été intégré au logiciel Solene.

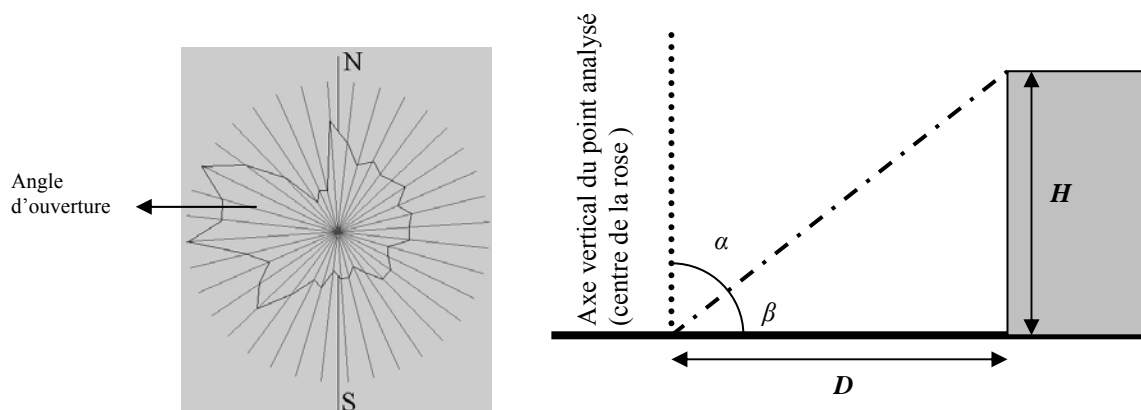


Figure 4.13 : Représentation du diagramme et principe de lecture pour l'analyse d'un point selon un profil

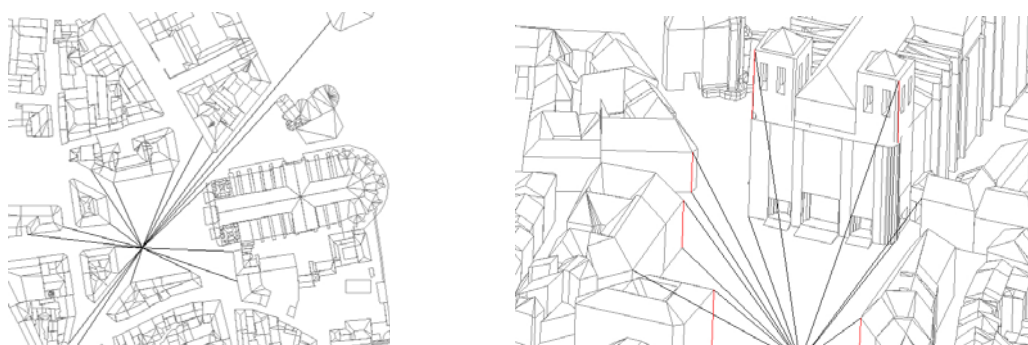


Figure 4.14: Lecture directionnelle des obstacles et des ouvertures d'un point (place St Pierre à Nantes)

L'application de l'ouverture directionnelle à plusieurs espaces et ensembles urbains nous a conduit à définir deux formes typiques d'ouverture directionnelle entre lesquelles se situent toutes les ouvertures directionnelles (fig. 4.15) :

- Une forme circulaire : Une ouverture directionnelle de forme circulaire traduit une homogénéité de l'ouverture dans toutes les directions (par exemple les places rondes avec une enveloppe bâtie de même hauteur).

- Une forme allongée selon un axe passant par le centre : Cette rose traduit la prédominance de l'ouverture selon un axe donné (c'est principalement le cas des rues).

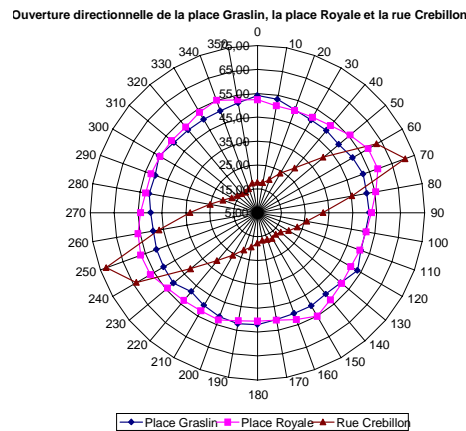


Figure 4. 15 : Les deux formes typiques d'ouverture directionnelles représentant trois espaces urbains connus de Nantes : **Forme circulaire** (place Graslin et place Royale) ; **forme allongée** (rue Crébillon).

L'espace élémentaire pour lequel s'applique l'indicateur est un point quelconque de l'espace urbain. Appartenant aux frontières des espaces urbains « sol, parois, toit » ou défini à la hauteur d'un « piéton » ou à toute autre hauteur, les points analysés par l'indicateur peuvent concerner plusieurs échelles spatiales. L'objectif étant, pour n'importe quel vide urbain, d'évaluer la perméabilité de ce dernier aux paramètres physiques du climat urbain. L'analyse d'un ensemble urbain s'appuie sur l'analyse de l'ensemble des points qui le constituent. L'ouverture directionnelle permettra par exemple de comparer différents points d'un parcours, différentes « ouvertures » de parois ou différents espaces urbains, comme elle peut s'appliquer à l'échelle d'un ensemble urbain de grande taille. Le choix des dimensions du maillage dépendra de l'échelle en question.

Pour passer de l'échelle du point à celle d'un ensemble de points, nous distinguons trois formes d'agrégation possibles produisant chacune une échelle spatiale et une cible de l'analyse microclimatique :

- agrégation selon une ligne : la première forme d'agrégation d'un ensemble de points est une forme linéaire (ligne droite ou courbe). Les lignes en question peuvent correspondre en terme d'aménagement de l'espace au tracé des parcours piétons ou à des passerelles aériennes ou encore à des coursives sur les parois, etc. La ligne en question traduit donc un support significatif d'un usage en milieu urbain, et peut de ce fait constituer une cible de l'analyse microclimatique dont l'objectif principal serait l'analyse du confort microclimatique.
- agrégation selon une surface : La deuxième forme d'agrégation des points correspond à une surface. Il s'agit d'une zone limitée située sur un plan quelconque. Elle peut s'appliquer à l'analyse des murs, toits, sols ou à une surface horizontale définie à une hauteur quelconque (comme celle correspondant à un piéton ou celle représentative d'un étage d'édifice, etc.). La surface en question constitue une cible de l'analyse microclimatique dont l'objectif peut relever soit de l'économie d'énergie (surfaces d'immeubles) soit du confort en milieu urbain (surfaces au sol).
- agrégation selon un plan : La troisième forme d'agrégation des points est le plan. Il s'agit d'une zone qui comprend tout le vide urbain d'un ensemble bâti. Le plan, contrairement à la surface est continue, il ne comprend donc qu'une forme horizontale. Le plan comprend donc tous les espaces urbains d'un ensemble bâti. Cette forme d'agrégation est la cible des analyses de grande échelle comme l'échelle locale et Meso.

Le premier apport de l'ouverture directionnelle est de rédefinir et de représenter la cadre bâti de telle sorte à rendre explicites des indications sur les paramètres microclimatiques qui ne peuvent être lus dans une représentation classique (plan, coupe, etc). L'orsque l'on observe un plan du bâti à une certaine échelle, on ne peut en effet apporter de jugement qualitatif sur ce dernier, car cette représentation répond à un but précis : retranscrire ce qui existe tel qu'on le voit (en perspective ou en projection). L'ouverture directionnelle met en forme un niveau d'information intermédiaire entre le cadre bâti et le phénomène physique, et elle traduit leur interaction.

En résumé, l'analyse de l'ouverture directionnelle est applicable au vide urbain et aux interfaces bâties selon deux niveaux d'analyse :

- Analyse d'un point quelconque
- Analyse d'un ensemble de points

### 3.2.2. Les deux niveaux d'analyse de l'ouverture directionnelle

#### - Analyse des points par discrétisation spatiale

Pour définir les points constituant une surface d'analyse nous utilisons une discrétisation par maillage qui existe dans le modèle Solene. Ce dernier en effet, à partir d'une géométrie quelconque peut définir un maillage dont nous fixons une dimension moyenne de maille. En fonction de la complexité et de l'étendue de la surface analysée cette dimension peut s'adapter au niveau de précision recherchée par l'analyse. Le maillage est constituée par des triangles. Les points dont l'ouverture directionnelle est calculée correspondent aux centres de gravité des triangles. Les obstacles à l'ouverture (les bâtiments) sont importés en tant que géométrie (constituée de faces) dans le modèle Solene. L'ouverture directionnelle est calculée à partir d'un maillage du plan que l'on veut analyser en prenant en compte les géométries masques (les bâtiments délimitant les vides en plan). Chaque centre de maille représente un point de l'analyse. Ce maillage peut être affiné selon la taille de l'ensemble urbain analysé. La taille des mailles s'adapte automatiquement au niveau d'irrégularité du tracé des faces (plus c'est irrégulier, plus les mailles sont petites). On doit aussi préciser le nombre de directions analysées qui peut varier en fonction de la complexité du territoire urbain. Le résultat du calcul est un fichier donnant pour chaque numéro de maille de chaque face analysée les différentes valeurs de l'ouverture en angle pour chaque direction.

#### - Analyse d'un ensemble de points

Les ensembles urbains, étant décomposés en un ensemble de points définis par des données numériques (traduisant l'angle d'ouverture dans chaque direction), on peut donc leur appliquer des grilles d'analyse statistiques en fonction des objectifs spécifiques de chaque analyse. On peut par exemple calculer les ouvertures moyennes, les écarts types, des classes, etc.

Pour rendre compte de la complexité de la forme urbaine et informer de manière synthétique sur le microclimat urbain, nous proposons d'effectuer systématiquement deux analyses statistiques :

#### Calcul de l'ouverture directionnelle moyenne

Une fois que l'ouverture directionnelle est calculée pour tous les points constituant un ensemble urbain qui fait l'objet de l'analyse, on peut établir un calcul de l'ouverture moyenne globale. L'évaluation de l'ouverture directionnelle moyenne à l'échelle de l'ensemble urbain analysé permet ainsi de donner une information synthétique (fig. 4.16). Cette synthèse graphique, en plus de constituer une information globale nécessaire pour une prise de décision à des échelles spatiales importantes (quartier, ville, ...), peut aussi conduire à l'évaluation du rapport H/L équivalent moyen dans le cas où

l'ouverture directionnelle est d'une forme allongée. Car rappelons que le rapport H/L reste une donnée importante pour les modèles physiques de la climatologie urbaine appliqués aux échelles locale et Meso. Ce calcul de la moyenne globale permet donc de caractériser l'ensemble urbain analysé pour : soit le comparer à d'autres ensembles urbains de même échelle ; soit pour l'intégrer dans des analyses de l'environnement climatique de plus grande échelle.

La figure ci-dessous (fig. 4.20) nous renseigne par exemple sur une ouverture assez faible du quartier du Bouffay (40° max) et sur le fait que cette ouverture a deux directions principales, une ouverture dans l'axe (160°-350°) et une autre dans l'axe (70°-250°). L'exploitation de cette information peut être multiple. On peut conclure que le quartier est ouvert à 30° aux vents d'hiver (sud\_ouest), qu'il est surtout ensoleillé en fin de matinée, etc.

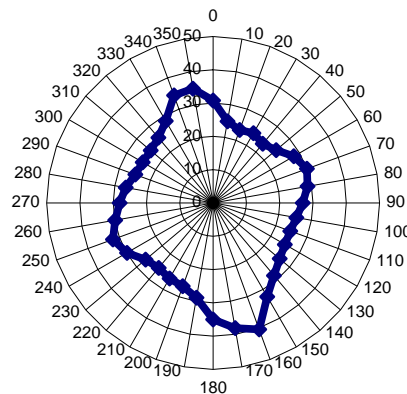


Figure 4. 16 : **Ouverture directionnelle moyenne des rues du quartier du Bouffay à Nantes** (échelle entre 0° et 50°)

#### Définition des classes d'ouverture directionnelle

A partir de l'analyse des points constituant un ensemble urbain on peut effectuer des opérations multiples qui permettront d'interpréter les variations qui peuvent exister entre ces points. On peut par exemple retrouver les profils d'ouverture types qui composent un ensemble urbain en définissant des classes d'ouverture directionnelle. Ces classes permettront :

- de retrouver les espaces urbains dominants qui composent l'ensemble bâti ;
- d'assimiler l'ensemble urbain à des profils types qui vont suggérer des comportements microclimatiques caractéristiques. Cela est d'autant plus utile que la complexité de la forme urbaine est importante.

Cette classification a trois objectifs :

- mettre en évidence les variations pouvant exister dans un ensemble urbain et leur fréquence pour rendre compte de la complexité de l'ensemble urbain analysé ;
- générer automatiquement des classes d'ouverture et les localiser dans l'espace ;
- simplifier l'analyse des ensembles urbains très complexes par l'analyse de leurs classes d'ouverture.

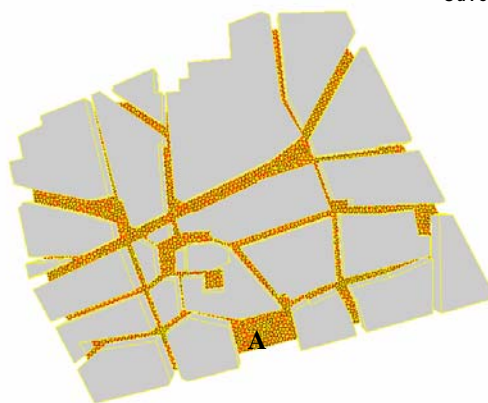
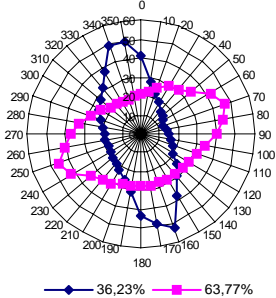
La classification des diagrammes d'ouverture peut être obtenue par des procédures de classification automatique en utilisant des logiciels de statistique comme Matlab ou Statistica. La méthode que nous avons utilisée est appelée « méthode de classification par nuées dynamiques » [LONG 2003]<sup>38</sup>. Cette méthode est une fonction du logiciel de statistique Statistica qui permet de générer

<sup>38</sup> Voir sur les méthodes statistiques permettant cette classification et la méthode des nuées dynamiques, le thèse de [LONG 2003, pp. 104 -107] qui a utilisé cette méthode pour l'analyse et la classification de la rugosité dynamique de tissus urbains.

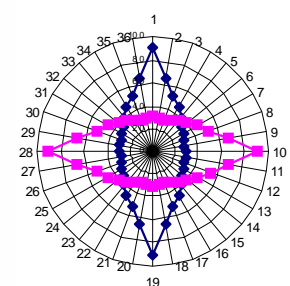
automatiquement, à partir d'un certain nombre d'itérations, des classes en fonction du nombre de variables. Dans notre cas ce nombre dépend du pas angulaire choisi pour l'analyse de l'ouverture directionnelle. En effet les variables sont définies par les directions analysées. Par exemple si l'on a 36 directions analysées, les 36 variables seront :  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 350^\circ$ . Le calcul peut s'appliquer à plusieurs milliers de points avec un temps de calcul très réduit.

Pour générer les classes, il est nécessaire de donner au logiciel le nombre de classes que l'on souhaite obtenir. Selon la complexité de l'ensemble urbain analysé, nous pouvons demander un certain nombre de classes, puis augmenter au fur et à mesure ce nombre, jusqu'à obtenir des fréquences très faibles par classe. Dès que la fréquence d'une classe est très inférieure aux autres classes définies antérieurement cela signifie qu'il n'est plus nécessaire de rajouter des classes d'analyse. On obtient ainsi par exemple pour l'analyse du quartier du Bouffay, 05 classes majeures (fig. 4.17 et 4.18).

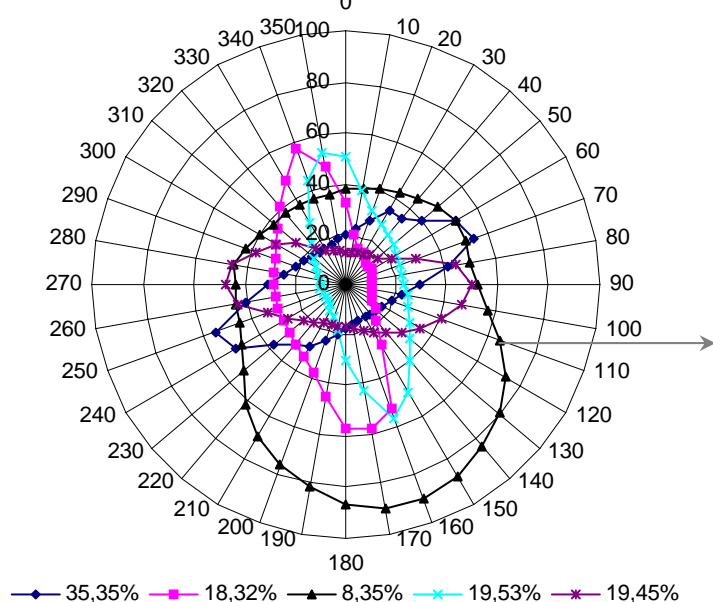
Décomposition de l'ouverture directionnelle du quartier du Bouffay en deux (02) classes



Ouverture directionnelle du tissu en damier selon 02 classes



Ouvertures directionnelles du quartier du Bouffay selon 05 classes



ouverture correspondant à la place du Bouffay, obtenue par classification automatique (A dans le plan)

Figure 4.17 : classification des ouvertures directionnelles calculées dans le quartier du Bouffay (5 classes) et un tissu en damier (2 classes)

Enfin, l'analyse par nuées dynamiques permet d'évaluer la dispersion dans une classe. Pour cela la méthode s'appuie sur le calcul des centres de gravité d'un nuage de points formant une classe. Chaque point est caractérisé par sa distance du centre de gravité du nuage de points. Les distances sont



automatiquement attribuées par le calcul numérique. Plus une distance est réduite plus la classe est représentative du point. Une cartographie représentant les distances du centre de gravité pour chaque point analysé permet de visualiser une graduation de l'ouverture directionnelle allant du centre de la classe (la valeur la plus proche de la moyenne de la classe) à sa périphérie (la valeur la plus éloignée de la moyenne de la classe) (fig. 4.19).

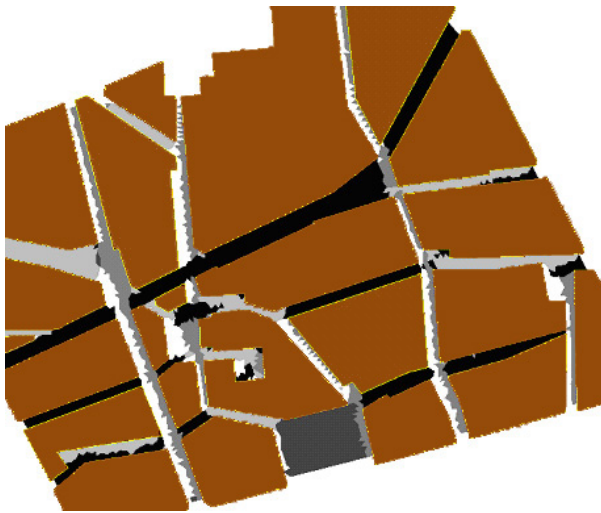


Figure 4.18 : Les cinq classes d'ouverture du sol des rues (ouverture max noir et ouverture min en blanc)



Figure 4.19 : Les écarts des valeurs des points par rapport à celles des 5 classes (min en clair, max en noir)

### 3.3. Eléments de caractérisation microclimatique par l'ouverture directionnelle

Rappelons d'abord le principal objectif de l'indicateur. Il s'agit d'obtenir des indications rapides et synthétiques sans simulations complexes à partir d'une connaissance de la morphologie du bâti. La représentation de l'ouverture directionnelle sous forme de rose permet de représenter la variation des frontières du vide urbain et de superposer à cette représentation les phénomènes physiques qui peuvent être caractérisés à leur tour par une « directionnalité » comme l'ensoleillement, la lumière naturelle ou le vent et la pollution atmosphérique. L'ouverture directionnelle, puisqu'elle traduit une perméabilité d'un environnement bâti, permet, par définition, une interprétation de la propagation des phénomènes directionnels, comme : le vent, la pollution atmosphérique, le bruit, la lumière, ou encore les rayonnements solaires.

Pour pouvoir, par cet indicateur, interpréter le potentiel de régulation des paramètres microclimatiques et environnementaux, on doit superposer l'ouverture directionnelle du fragment analysé à la propagation du phénomène étudié en supposant que cette dernière soit isotropique. L'interprétation de cette superposition dépend de la position de la source qui peut être soit interne au système étudié (émissions à l'intérieur de l'ensemble urbain étudié : bruit, pollution atmosphérique, rayonnements émis ou réfléchis, etc.) soit externe (émission depuis l'extérieur de l'ensemble urbain analysé : vent et rayonnements solaires, lumières naturelles ou toute autre source ponctuelle externe).

Les phénomènes microclimatiques et environnementaux peuvent donc être caractérisés en relation avec l'ouverture directionnelle des fragments ou espaces urbains. Pour le cas du vent, l'ouverture directionnelle peut soit accentuer ou réduire l'effet du vent. Et cela on peut le lire sur chaque direction. De même pour l'ensoleillement, la hauteur et l'azimut du soleil peuvent être tout aussi représentées par l'ouverture directionnelle, puisque les angles directionnels peuvent, dans ce cas, correspondre à l'azimut, et les hauteurs au rapport H/D (il suffit que la hauteur du soleil soit supérieure à l'angle correspondant à H/D pour qu'un point soit ensoleillé). L'ouverture directionnelle peut nous renseigner aussi sur l'ouverture au ciel et donc sur l'éclairement naturel d'un ensemble construit. Lorsque les

sources sont internes au système, l'ouverture directionnelle peut nous renseigner à la capacité de se dernier à évacuer ou à retenir le phénomène émis (bruit, pollution).

### 3.3.1. Application à l'analyse de la perméabilité au vent

Le vent est le principal paramètre de forçage des paramètres microclimatiques et environnementaux à la fois par sa direction et sa vitesse. La connaissance de la perméabilité au vent est important à la fois en terme de caractérisation aéraulique mais aussi en terme d'influence sur d'autres paramètres microclimatiques. La direction et la vitesse du vent influe en effet sur la propagation de phénomènes comme la pollution et le bruit.

La superposition de la vitesse et de la direction du vent à l'ouverture directionnelle est totalement adaptée puisque les deux utilisent une représentation selon différentes directions. Si, à titre d'exemple, les vents dominants arrivent dans un fragment urbain qui a une ouverture directionnelle assez importante dans le sens des vents, ce dernier sera plus « aéré » qu'un fragment dont l'indice d'ouverture est plus réduit dans le sens des vents. La place du Bouffay est par exemple selon son ouverture directionnelle bien protégé des vents dominants (fig. 4.20).

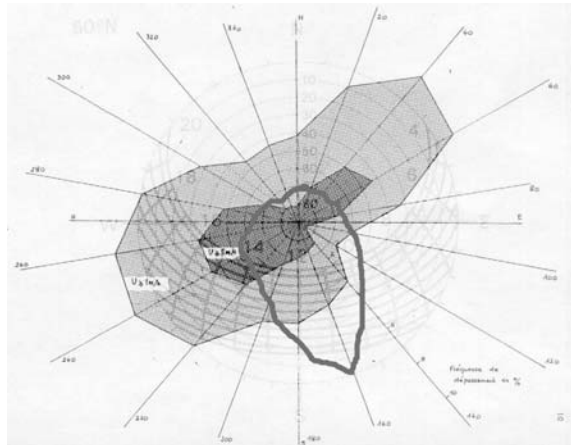


Figure 4.20 : Exemple de superposition d'une rose des vents et de l'ouverture directionnelle d'un ensemble bâti

Pour pouvoir représenter l'influence du vent sur d'autres paramètres, il suffit de définir la perméabilité (ouverture directionnelle) de l'environnement dans lequel se situe la source de ces paramètres et lui superposer la perméabilité au vent de l'ensemble bâti où se situe la source. Le vent opérera ainsi une sorte de forçage directionnel sur ces paramètres.

Nous pouvons traduire la superposition de l'ouverture directionnelle et la rose des vents par un indice d'accessibilité du vent dans l'espace construit. Ainsi une ouverture de  $90^\circ$  suppose une perméabilité au vent de 100% de sa vitesse et une ouverture de  $0^\circ$  signifie un obstacle total au vent dans la direction analysée. Mais cette application potentielle demande d'être validé par des simulations numériques. Concrètement en superposant la rose des vents avec la rose de l'ouverture directionnelle on obtient une indication sur l'accessibilité du vent dans chaque direction. Cette perméabilité au vent peut être représentée par une cartographie dont l'objectif serait par exemple de définir la perméabilité des différents points composant le sol aux vents dominants (fig. 4.21).

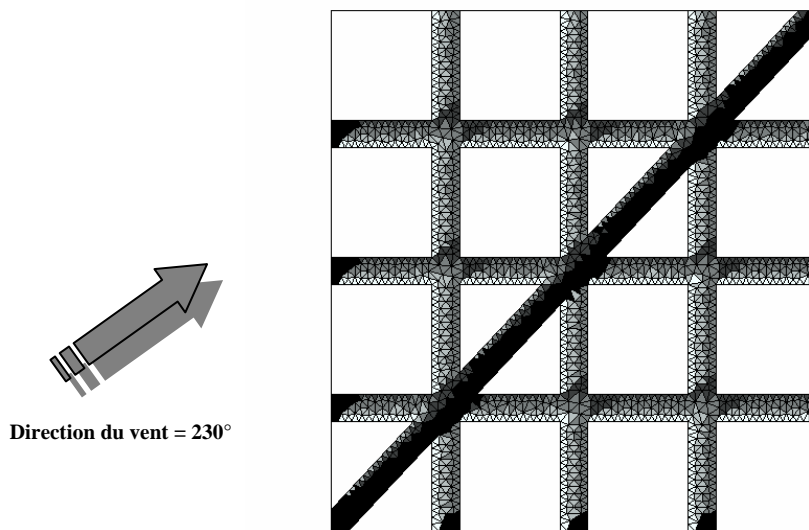


Figure 4.21 : Perméabilité à un vent sud-ouest d'un tissu en damier avec percée (le foncé est le plus perméable au vent).

### 3.3.2. Application à l'analyse de l'ensoleillement

L'ouverture directionnelle permet en effet de définir une durée d'ensoleillement à l'échelle d'un ensemble urbain, puisque l'angle de fermeture ( $90^\circ$ -ouverture) sur chaque direction analysée représente une enveloppe masque à l'ensoleillement. En d'autres termes, il suffit que la hauteur du soleil soit supérieure à l'angle formé par H/D pour que le point ou le fragment analysé soit ensoleillé. L'intérêt d'une telle lecture est de permettre de calculer le temps d'ensoleillement moyen d'un fragment urbain, directement déduit de la rose directionnelle de ce dernier, sans effectuer de simulations trop complexes (fig. 4.22).

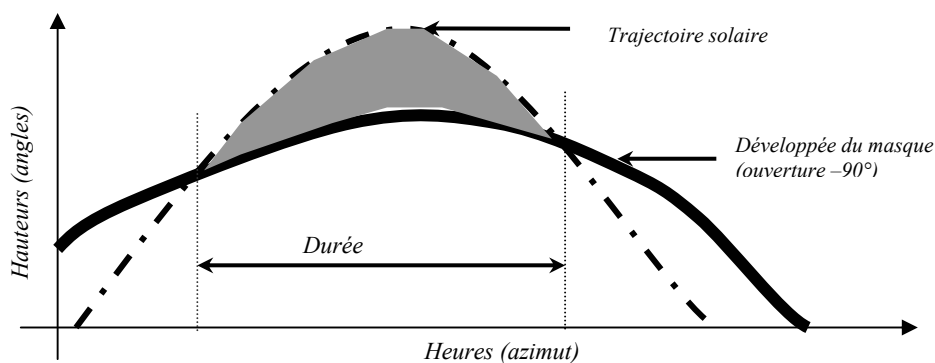


Figure 4.22 : Superposition de la trajectoire solaire et du masque ( $90^\circ$ -ouverture directionnelle)

La représentation de l'ouverture directionnelle, puisqu'elle est basée sur un calcul d'angles, permet d'évaluer directement par l'intermédiaire du diagramme solaire (lui aussi basé sur une représentation d'angles d'ouverture selon les directions cardinales) l'ensoleillement d'un fragment urbain. La seule condition pour cette lecture est de superposer l'ouverture directionnelle à un diagramme solaire utilisant une projection sphérique équidistante (fig. 4.23). En effet, la projection en plan des angles représentant les hauteurs du soleil doivent être équidistants, comme c'est le cas de la représentation des angles d'ouverture sur la rose directionnelle. De cette superposition on peut ainsi évaluer rapidement la durée et les heures d'ensoleillement pour chaque mois de l'année (fig. 4.24). Cette évaluation peut être appliquée à l'échelle des ensembles bâtis (fig. 4.25).

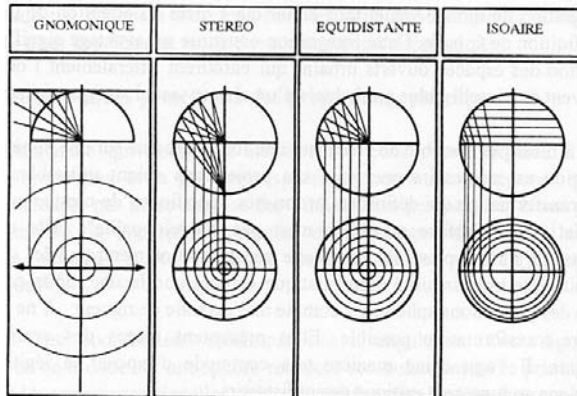


Figure 4.23 : Les quatre principaux modes de projection sphériques [Teller 2001]

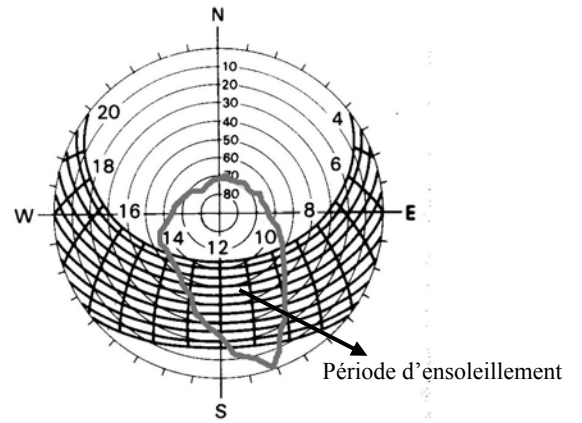


Figure 4.24 : Exemple de superposition d'une ouverture directionnelle d'un ensemble bâti et d'un diagramme de trajectoires solaires selon une projection équidistante

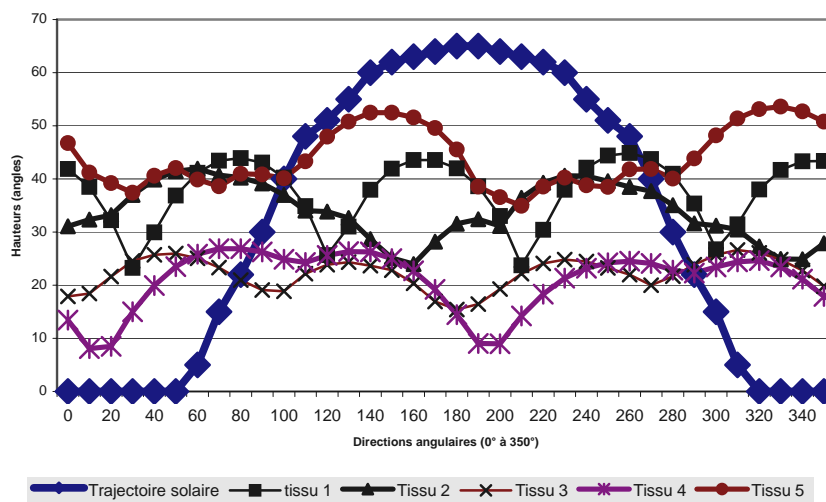
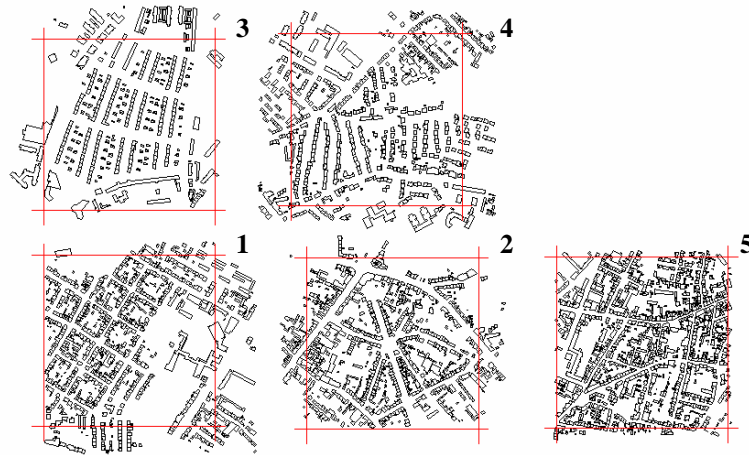


Figure 4.25: Superposition de l'ouverture directionnelle des rues de cinq tissus urbains à Nantes et la trajectoire solaire du 21 juin

### 3.3.3. Application à l'analyse de l'éclairage naturel

La portion de ciel visible par un espace traduit son éclairage naturel (lumière de la voûte céleste). L'ouverture étant un angle d'ouverture vers le ciel selon un réseau profils autour d'un point, permet de traduire l'éclairage naturel de chaque point analysé. On peut interpréter cette éclairage de deux manières différentes :

- En calculant une ouverture au ciel moyennée sur toutes les directions : ce qui équivaut à calculer la fraction de ciel visible (fig. 4.26).

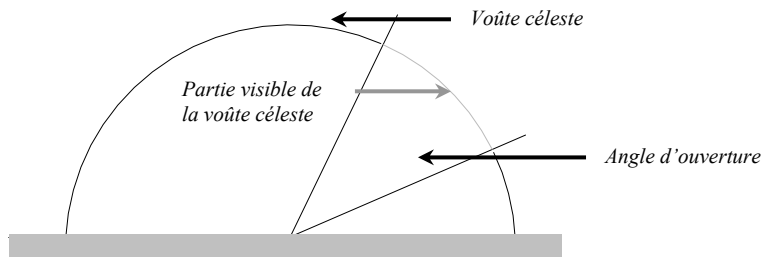
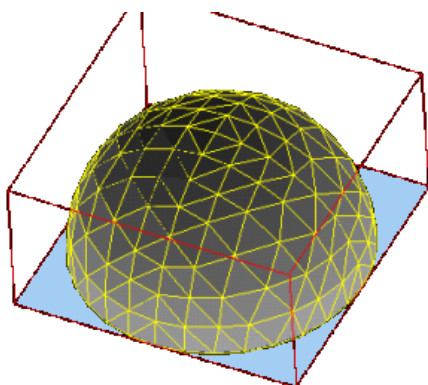


Figure 4.26 : Portion visible du ciel selon un profil d'ouverture

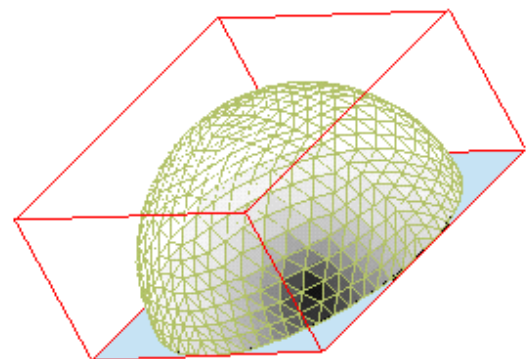
- En localisant sur un modèle de la voûte céleste la partie de la voûte visible tout en prenant en compte le type de ciel. Ce dernier influe en effet sur l'éclairage naturel, puisque selon l'état du ciel (clair, sombre, etc.) la position du soleil peut influencer l'éclairage.

Pour obtenir cette deuxième modalité (la première est assez simple à obtenir) nous avons utilisé la représentation de la modélisation de la voûte céleste effectuée par le modèle Solene. Dans un but illustratif, nous avons utilisé un modèle de ciel clair dans lequel la lumière émise par la voûte céleste est directionnelle (le modèle de ciel: un ciel sombre à couverture nuageuse dense produit une la lumière homogène) (fig. 4.27).

La projection en plan du modèle de la voûte céleste établie par Solene déforme la taille des mailles de cette dernières au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la voûte. Il faut donc définir, comme pour les diagrammes solaires, une projection équidistante de la voûte céleste. Néanmoins, comme pour l'ensoleillement, on peut évaluer directement la partie visible de la voûte céleste, et donc évaluer l'éclairage émis par la voûte et vu par l'espace qui est analysé (fig. 4.28).

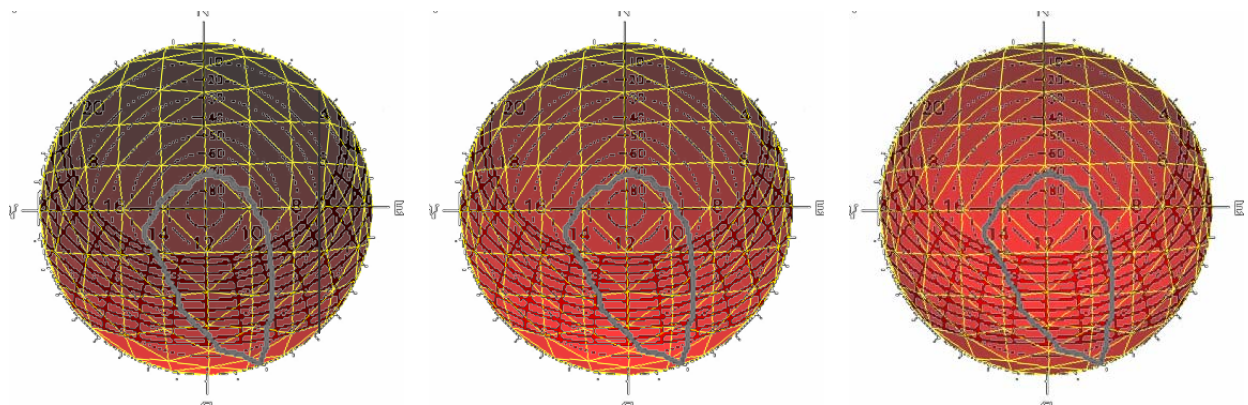


Modèle de ciel sombre,  
(21 décembre à 15 heure)



Modèle de ciel clair  
(21 décembre à 15 heure)

Figure 4.27: Exemple de modèles de ciel tels que représentés par la simulation de la voûte par Solene



Le 21/12 entre 8h et 16h  
(mini=1952 et maxi= 6842 lux)

Le 21/03 entre 8h et 16h  
(mini=4133 et maxi= 13611 lux)

Le 21/06 entre 8h et 16h  
(mini=5841 et maxi= 17735 lux)

Figure 4.28 : Superposition de l'ouverture directionnelle, du diagramme solaire et d'une vue en plan de la voûte céleste selon un modèle de ciel clair (epsilon = 6.3 et delta = 0.12) (nécessité de construire une projection équidistante pour la voûte céleste)

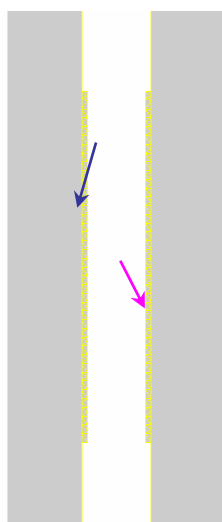


### 3.4. Applications à différentes formes de différentes échelles et sensibilité de l'indicateur à la complexité des espaces bâtis

Pour mettre en évidence l'applicabilité de l'ouverture directionnelle à différents espaces construits à différentes échelles spatiales nous exposons en ce qui suit une application à des formes urbaines « théoriques », pour montrer l'adéquation qui existe entre l'ouverture directionnelle et la forme construite des vides urbains. Ensuite nous en faisons une application à des vides urbains nantais de différentes échelles spatiales. Ces applications concernent en effet l'échelle d'un parcours piéton décomposé en un ensemble de points, l'échelle des espaces urbains et enfin l'échelle des tissus.

#### 3.4.1. Applications à des cas théoriques

##### - Analyse de deux parois de bâtiments opposés dans une rue



Ouverture directionnelle de deux parois opposées selon 02 classes (Rue N\_S)

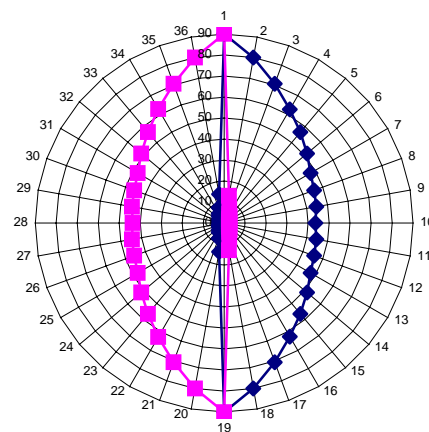
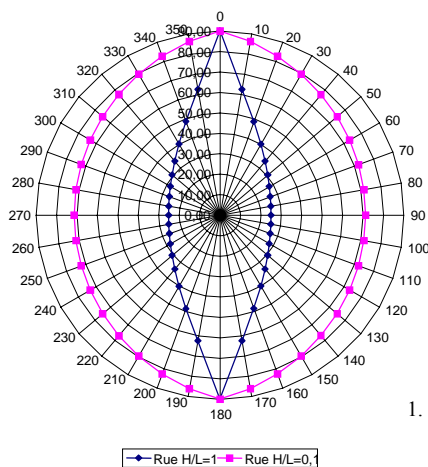


Figure 4.29: Ouverture directionnelle de deux parois opposées dans une rue avec  $H/L=1$

##### - Une rue nord-sud avec différents H/L et avec des parois de différentes hauteurs

Ouverture directionnelle d'une même rue selon  $H/L=1$  et  $H/L=0,1$



Ouverture d'une rue avec des hauteurs asymétrique du bâti (Hcôté1=10m et Hcôté2=20m, Lrue=10m)

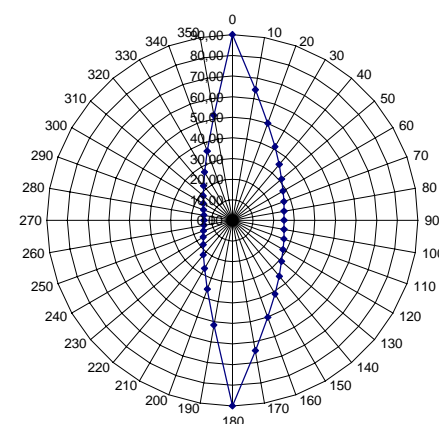
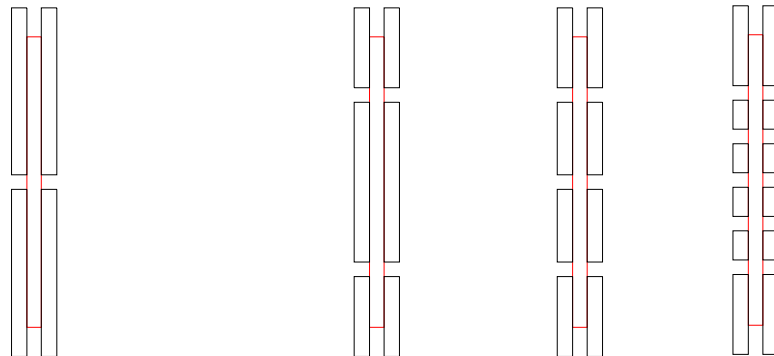


Figure 4.30 : Ouverture directionnelle de rues nord-sud : 1. selon deux rapports  $H/L$  différents ; 2. selon une hauteur différente de chaque côté de rue<sup>39</sup>

<sup>39</sup> La variation des hauteurs et l'asymétrie de la rue peuvent se lire directement sur la forme de la rose.

- Une rue nord-sud avec 1, 2, 3 et 5 intersections de même largeur



Ouverture directionnelle d'une rue N. S selon le nombre d'intersections non bâties (H/L=1)

Comparaison du rapport H/L d'une même surface de rue selon les nombres d'intersections de rues

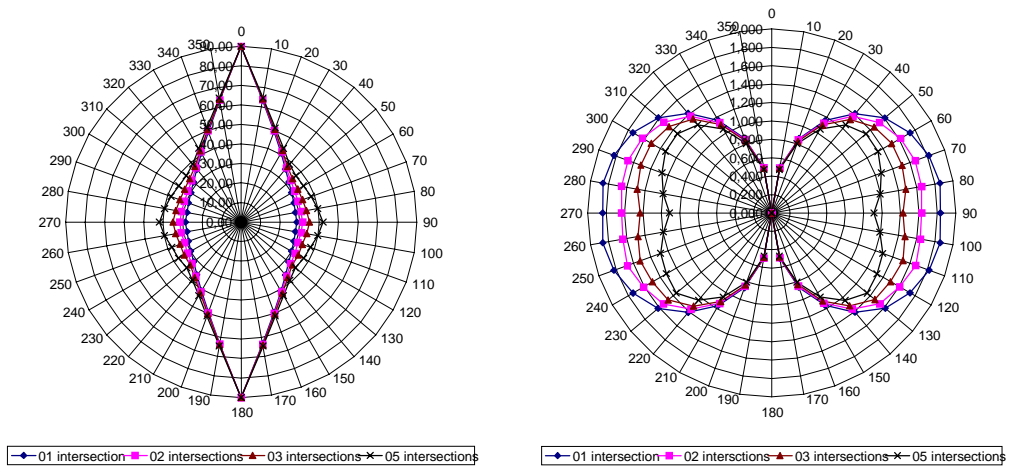


Figure 4.31 : rue ouverte selon quatre configurations<sup>40</sup>

—◆— 25,50% —■— 16,11% —▲— 3,36% —×— 26,17% —\*— 3,02% —●— 25,84%

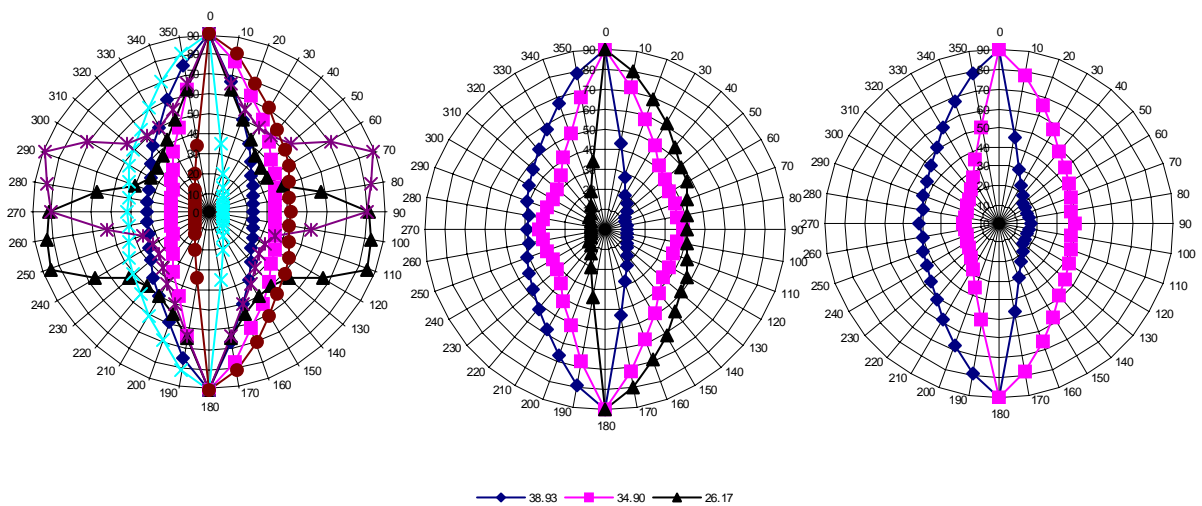


Figure 4.32 : Ouverture directionnelle d'une rue nord-sud avec 01 intersection selon 06, 03 ou 02 classes

<sup>40</sup> La multiplication des intersections le long de la rue, n'altère pas l'ouverture moyenne à l'échelle de la rue, ce qui est loin d'être évident à la vue du plan. Par contre cela a un effet plus important sur le rapport H/D dans chaque direction.



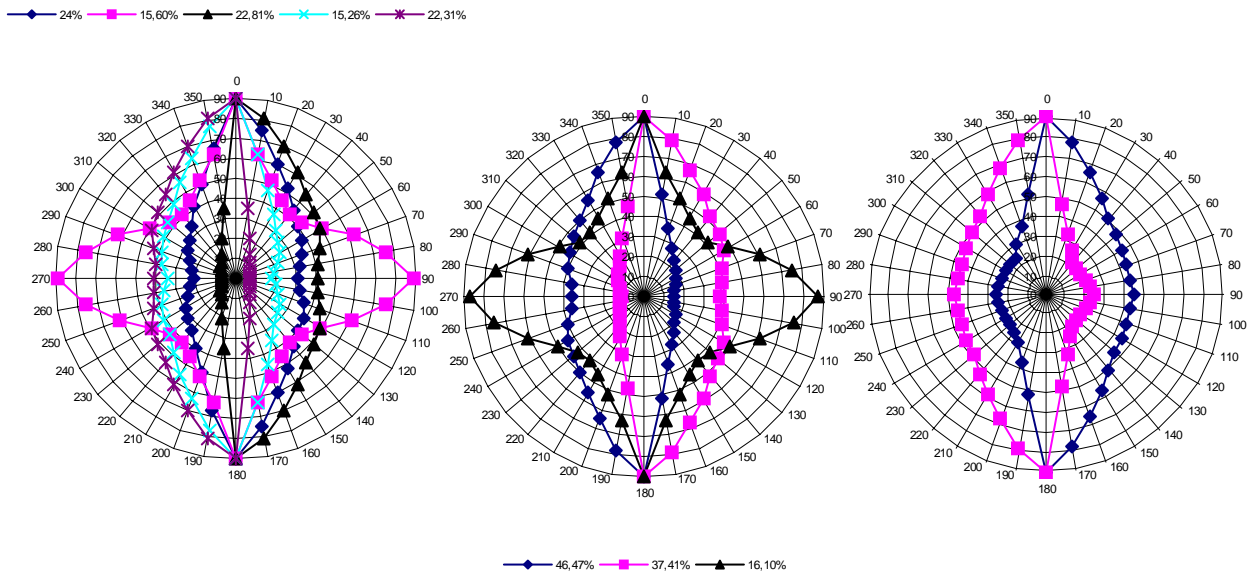


Figure 4.33 : Ouverture directionnelle d'une rue nord-sud avec 03 intersections selon 06, 03 et 02 classes

—◆— 27,68% —■— 23,15% —▲— 13,75% —×— 15,60% —\*— 19,79%

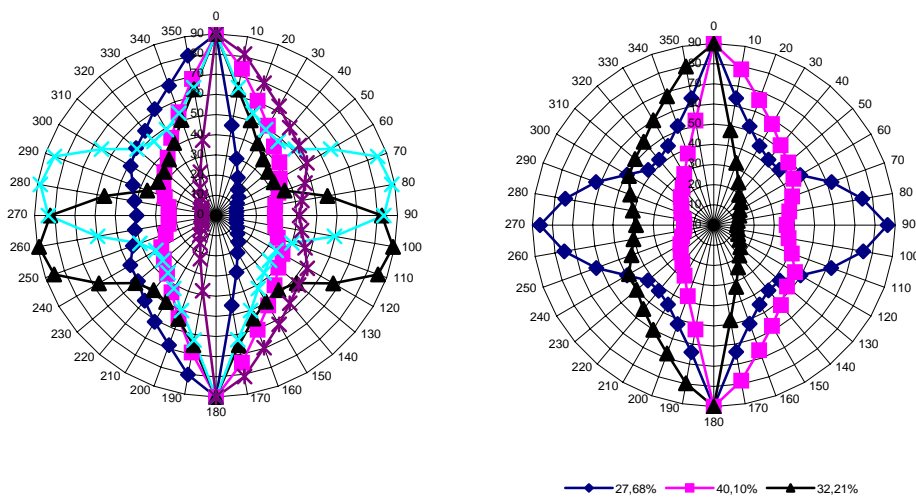
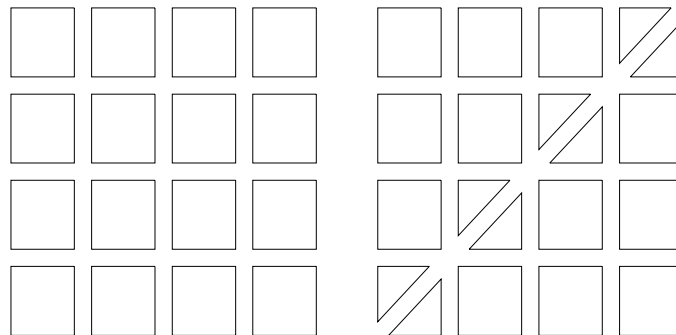


Figure 4.34 : Ouverture directionnelle d'une rue nord-sud avec 05 intersections selon 05 et 03 classes<sup>41</sup>

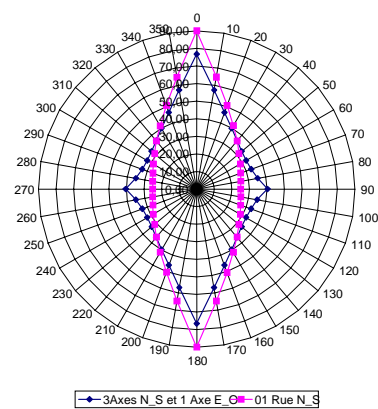
—◆— 27,68% —■— 40,10% —▲— 32,21%

<sup>41</sup> La classe d'ouverture ayant 27,68% de fréquence représente la surface de la rue située au niveau des 5 intersections. Avec 1 seule intersection cette classe n'avait que 3,36% de fréquence (fig. 4.32) et avec 3 intersection 16,10% (fig. 4.33). La classification traduit donc mieux l'effet des intersections que l'analyse de la moyenne.

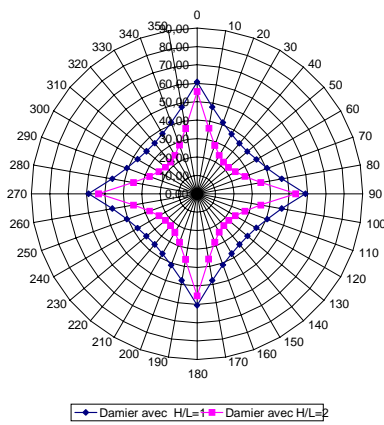
- Un tissu en damier selon différentes configurations et caractérisation de l'effet d'une percée :



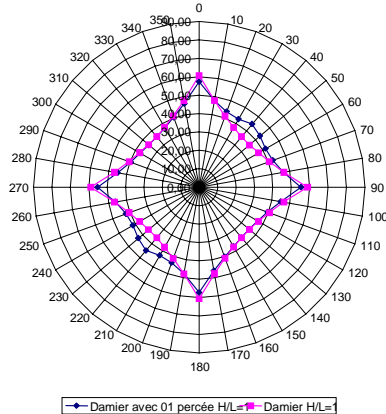
Compraison d'un tissu de 03 Axes Nord\_Sud et 01 Axe Est\_Ouest avec une rue Nord\_Sud pour H/L=1



Ouverture d'un tissu en damier selon deux rapports H/L



Ouverture d'un tissu en damier et d'un damier avec une percée NE\_SO (échelle de représentation 0° à 90°)



Ouverture d'un tissu en damier et d'un damier avec une percée NE\_SO (échelle de représentation entre 30et 70°)

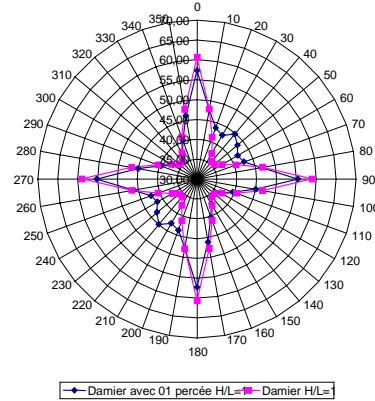


Figure 4.35 : Ouverture directionnelle d'un tissu en damier avec H/L=1 et H/L=2 et analyse de l'effet d'une percée <sup>42</sup>

<sup>42</sup> La rose directionnelle nous renseigne bien sur deux directions principales d'ouverture qui correspondent aux deux directions des voies du damier. L'effet de la percée se traduit par une ouverture de la rose sur l'axe (40°-220°)

- Un tissu type grand ensemble (plus de vide que de construit)

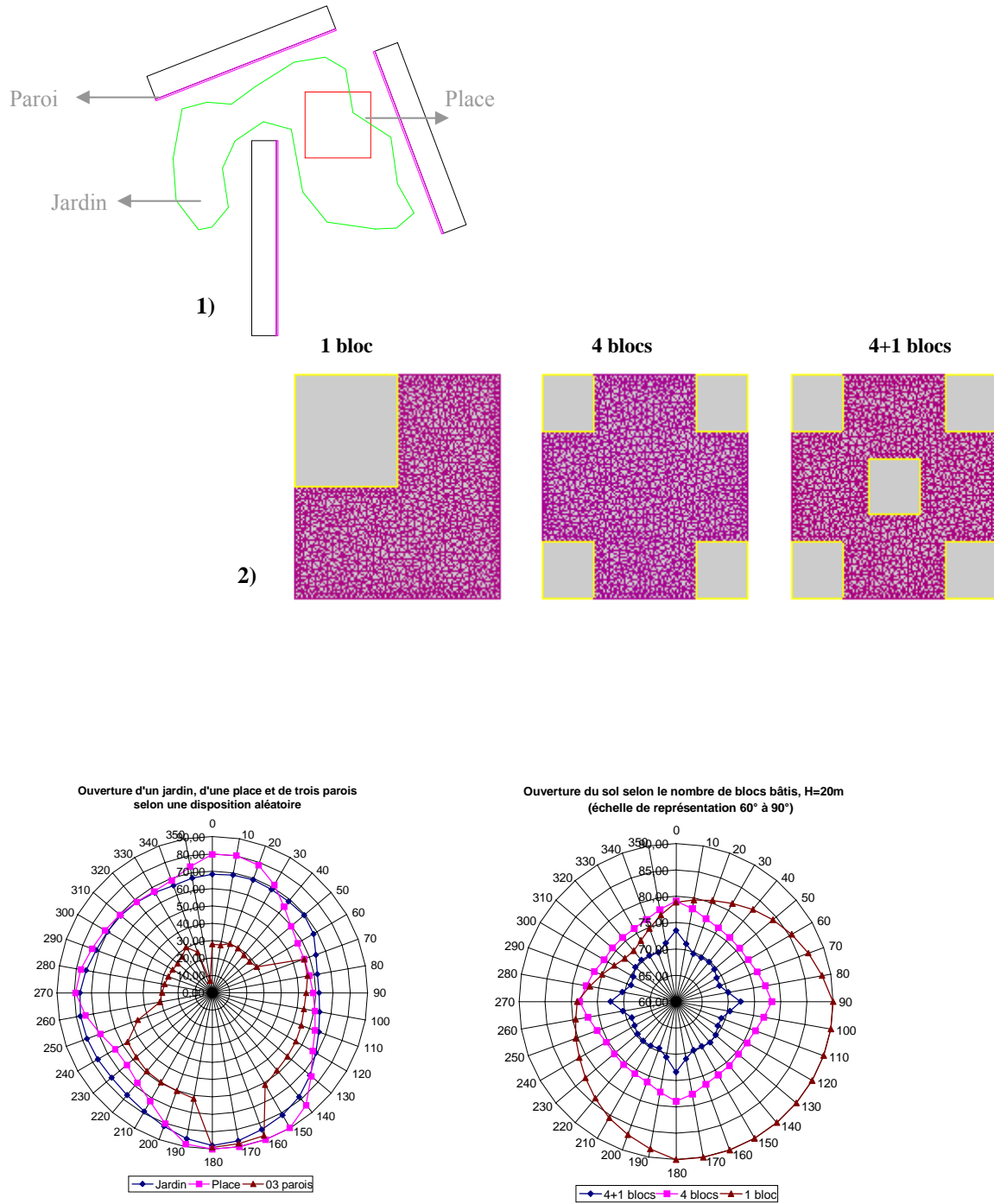


Figure 4.36 : Ouverture directionnelle d'une partie d'un grand ensemble 1) et de trois ensembles bâtis 2) <sup>43</sup>

<sup>43</sup> La symétrie des plans des espaces construits se lit clairement dans la rose directionnelle. L'asymétrie se traduit par une excentricité de la rose par rapport à son centre.

### 3.4.2. Applications à des espaces et fragments urbains de Nantes :

#### - Application à des séquences d'un parcours piéton



Figure 4.37 : Plan de repérage des différents points d'un parcours piéton (25 points calculés)

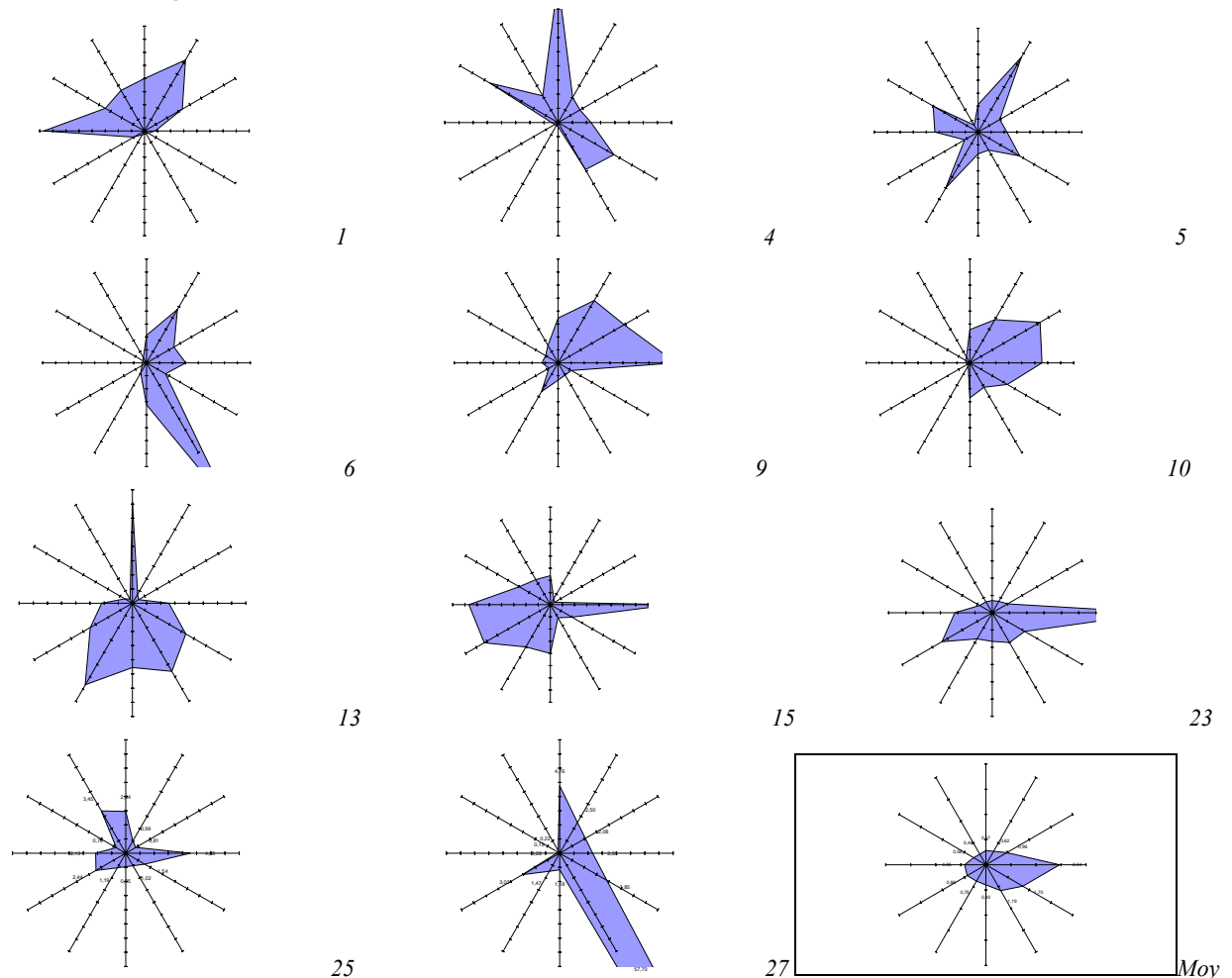


Figure 4.38 : Variation de l'ouverture de points d'un parcours piéton selon un pas angulaire de  $30^\circ$  (numérotation selon le plan) et l'ouverture moyenne du parcours<sup>44</sup>

<sup>44</sup> Les roses des points constituant le parcours explicitent la variation de l'environnement construit tout au long du parcours. La rose moyenne traduit une ouverture principale Est-Ouest excentrée vers l'Est. Cela parce que une grande partie du

- Application à des espaces urbains Nantais

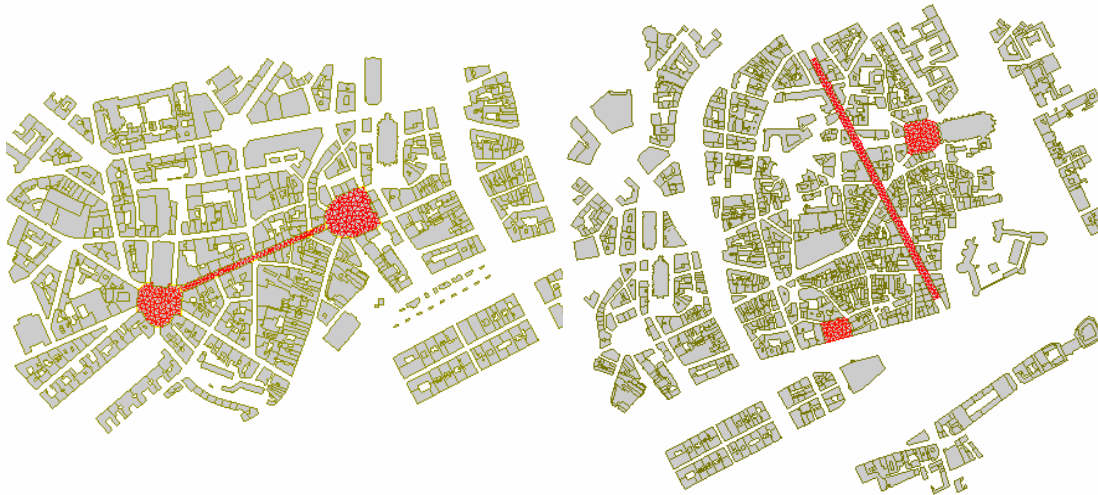


Figure 4.39 : Extraits du plan du centre ancien et représentation de six espaces urbains : de gauche à droite : place Graslin,, rue Crébillon, Place Royale, place du Bouffay, rue de Strasbourg, place Saint Pierre.

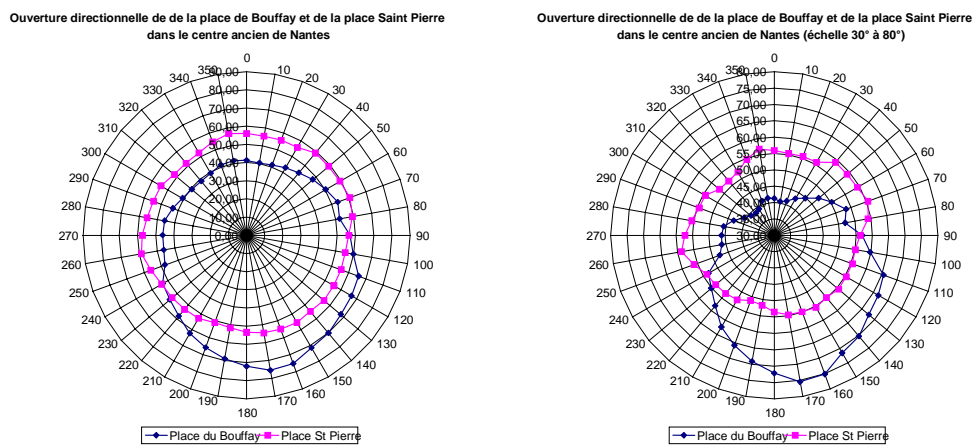


Figure 4.40 : Ouverture directionnelle de la place du Bouffay et de la place Saint Pierre selon deux échelles de représentation<sup>45</sup>

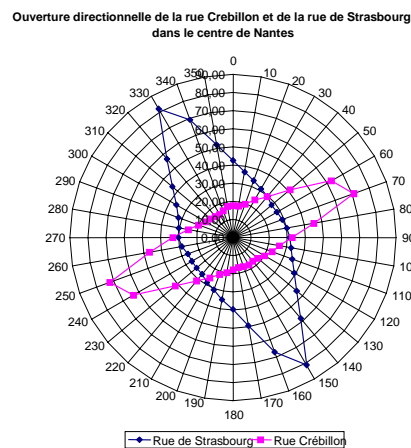
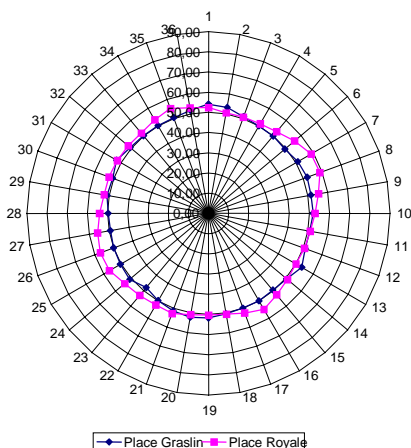


Figure 4.41 : Ouverture directionnelle de la rue Crébillon et de la rue de Strasbourg<sup>46</sup>

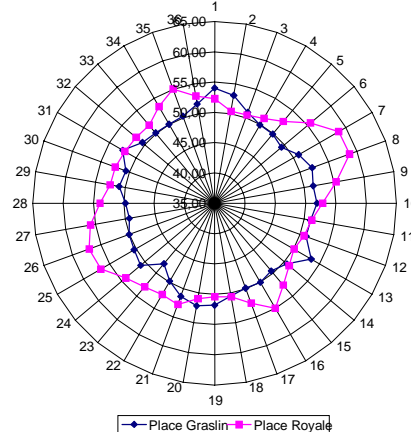
parcours se situe dans une rue Est-Ouest et la plupart des points analysés sont accolés aux parois des bâtiments du côté nord et du côté ouest.

<sup>45</sup> En faisant un zoom sur l'ouverture directionnelle entre 30° et 80°, on s'aperçoit que la place du Bouffay à une ouverture excentrée vers le sud et que la place saint pierre est légèrement allongée sur l'axe (70°-260°)

Ouverture directionnelle de la place Graslin et la place Royale à Nantes



Ouverture directionnelle de la place Graslin et la place Royale à Nantes (échelle de représentation 35° à 65°)



Ouverture directionnelle de la place Graslin, la place Royale et la rue Crébillon

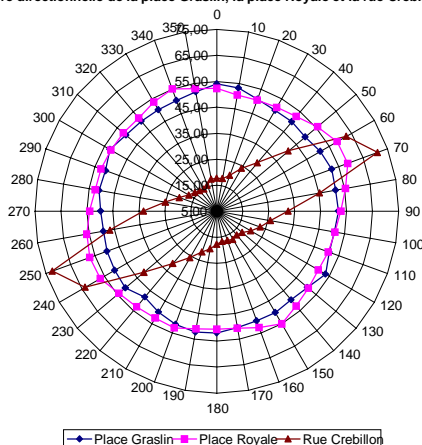
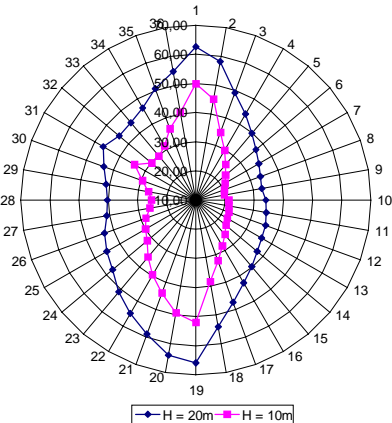


Figure 4.42 : Ouverture directionnelle de la rue Crébillon, de la place Graslin et de la place Royale<sup>47</sup>

Ouverture de la place du Change selon différentes hauteurs du bâti (échelle de représentation 10° à 70°)



Ouverture d'une rue courbe du Bouffay selon deux hauteurs du bâti

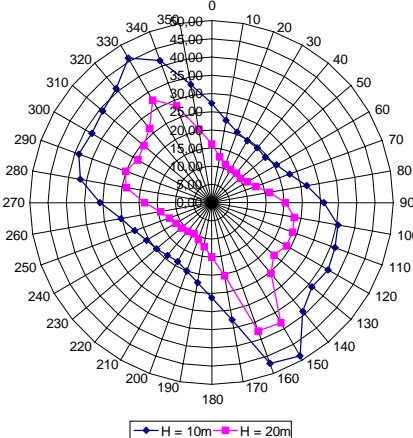


Figure 4.43 : Ouverture directionnelle de deux espaces urbains médiévaux du quartier du Bouffay<sup>48</sup>

<sup>46</sup> La superposition de l'ouverture des deux rues permet de lire directement que la rue de Strasbourg est plus ouverte et plus large (axe 60°-240°) que la rue Crébillon et que les deux rues sont pratiquement perpendiculaires.

<sup>47</sup> La place Graslin et la place Royale ont, selon une vue d'ensemble, pratiquement une même ouverture directionnelle. En opérant un zoom (échelle 35°-65°) on relève une différence notable dans l'enveloppe bâtie de chaque place. Ainsi la place Graslin est plus ouverte dans deux directions et surtout dans l'axe (65°-245°) qui correspond au l'intersection de la place avec la rue Crébillon.



- Application à des ensembles urbains Nantais

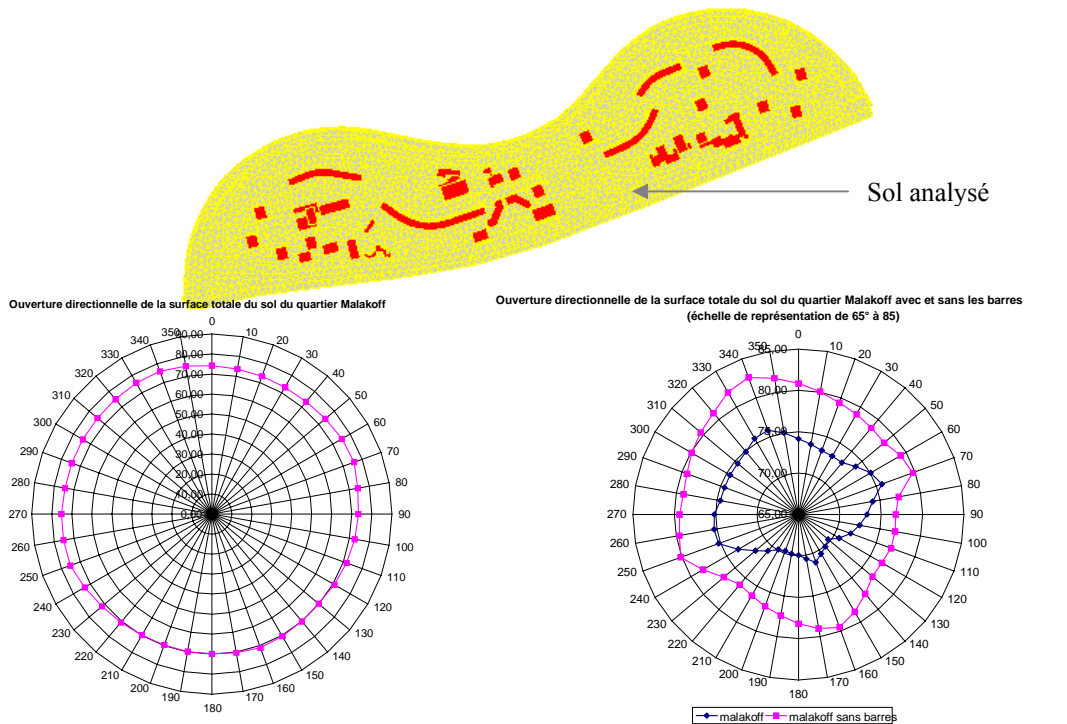


Figure 4.44 : Plan et Ouverture directionnelle d'un fragment du quartier Malakoff<sup>49</sup>

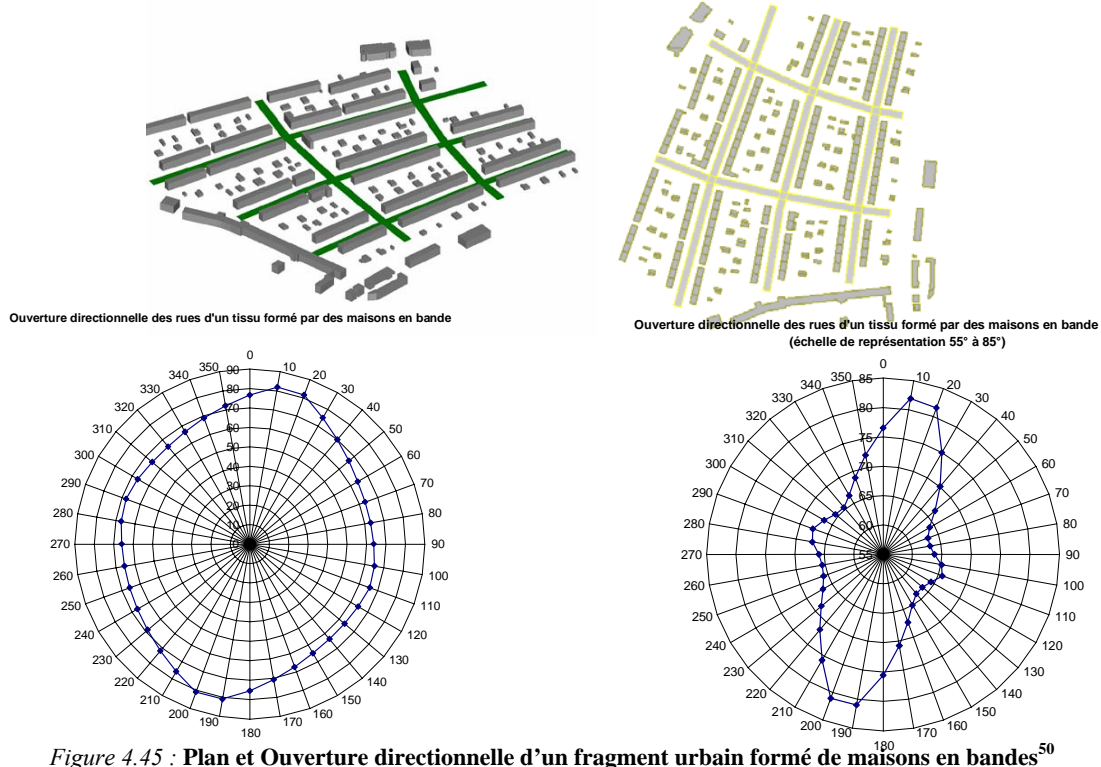


Figure 4.45 : Plan et Ouverture directionnelle d'un fragment urbain formé de maisons en bandes<sup>50</sup>

<sup>48</sup> L'ouverture directionnelle est aussi sensible au tracé des rues. Ainsi la sinuosité du tracé d'une rue ancienne du quartier du Bouffay se traduit dans le tracé de la rose (figure de droite), de même que l'existence d'une ouverture dans l'enveloppe (intersection d'une rue dans l'axe 300°, figure de gauche)

<sup>49</sup> L'ouverture de l'ensemble de la surface sur le sol du quartier Malakoff à Nantes (grand ensemble) équivaut à celle d'une place ronde. Une échelle de représentation plus petite (65° à 85°) fait ressortir l'effet des barres sur cette ouverture (calcul de la rose sans barres et avec barres). Sans les barres l'ouverture devient en effet plus importante surtout dans l'axe (160°-340°).

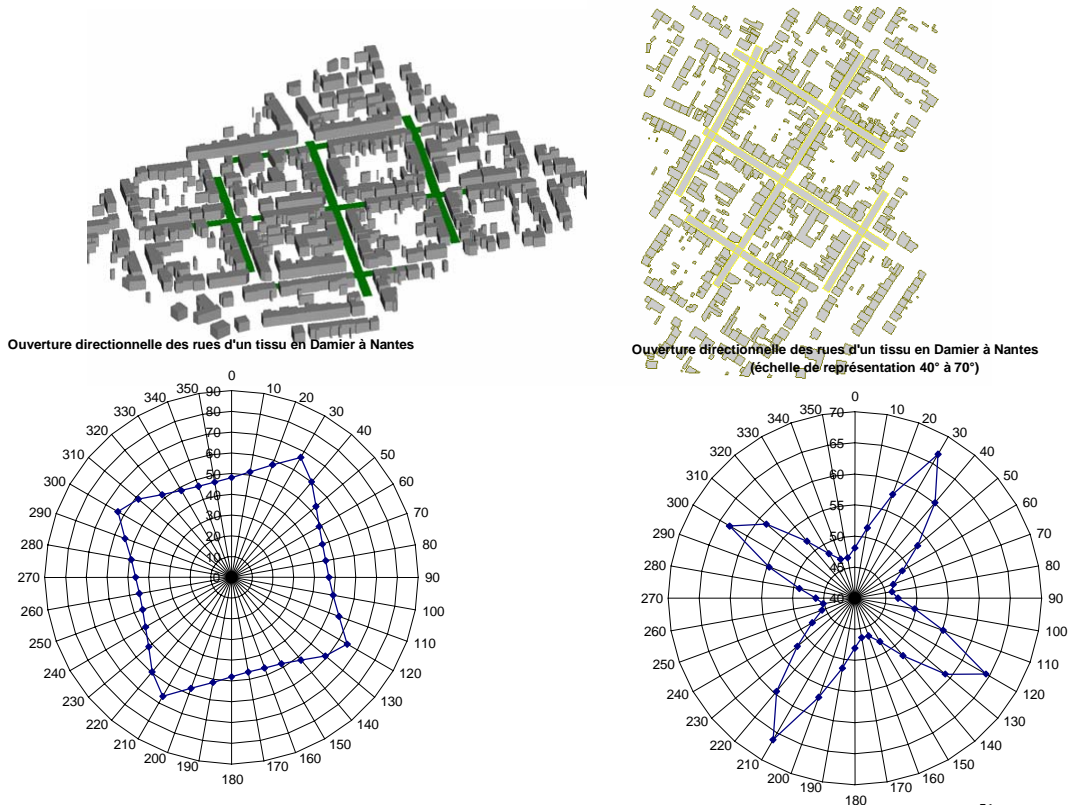


Figure 4.46 : Plan et Ouverture directionnelle des rues d'un fragment urbain en damier<sup>51</sup>

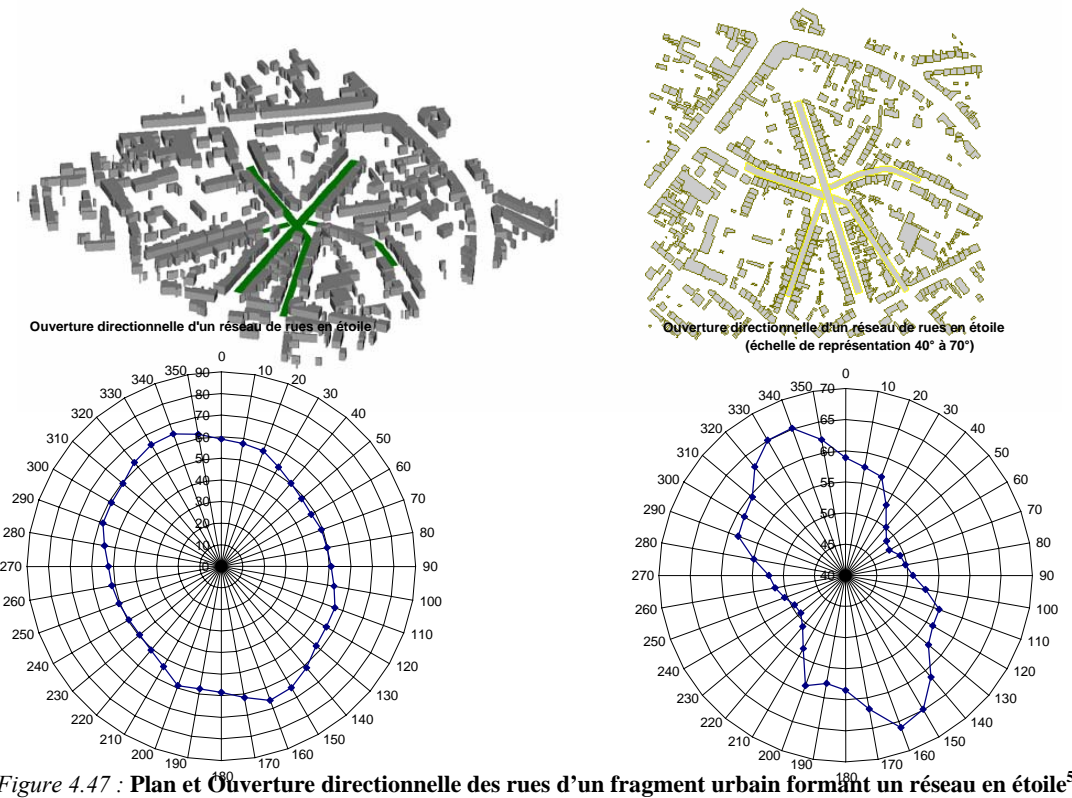


Figure 4.47 : Plan et Ouverture directionnelle des rues d'un fragment urbain formant un réseau en étoile<sup>52</sup>

<sup>50</sup> Il ressort de l'analyse de ce fragment urbain que l'ouverture sur l'axe (15°-190°) est prédominante, ce qui selon la vue en plan n'est pas forcément évident.

<sup>51</sup> La rose directionnelle traduit bien la prédominance de deux directions (type damier)



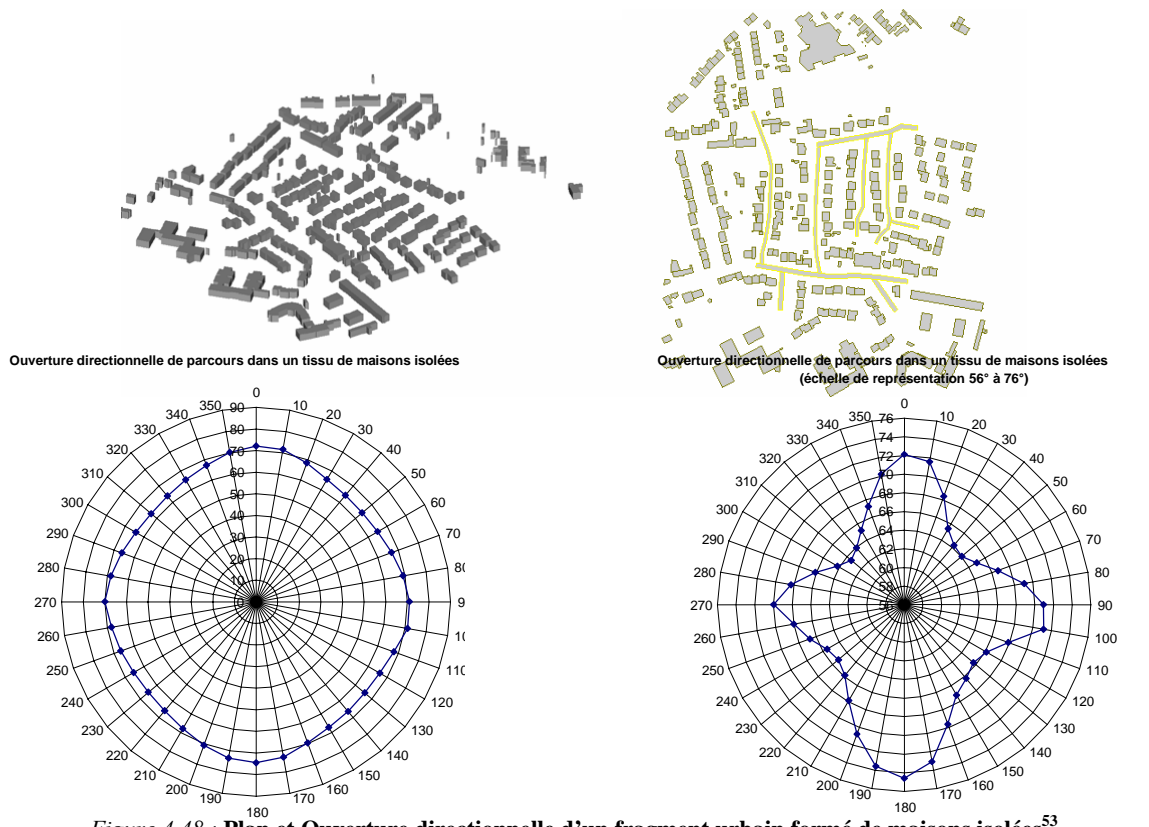


Figure 4.48 : Plan et Ouverture directionnelle d'un fragment urbain formé de maisons isolées<sup>53</sup>

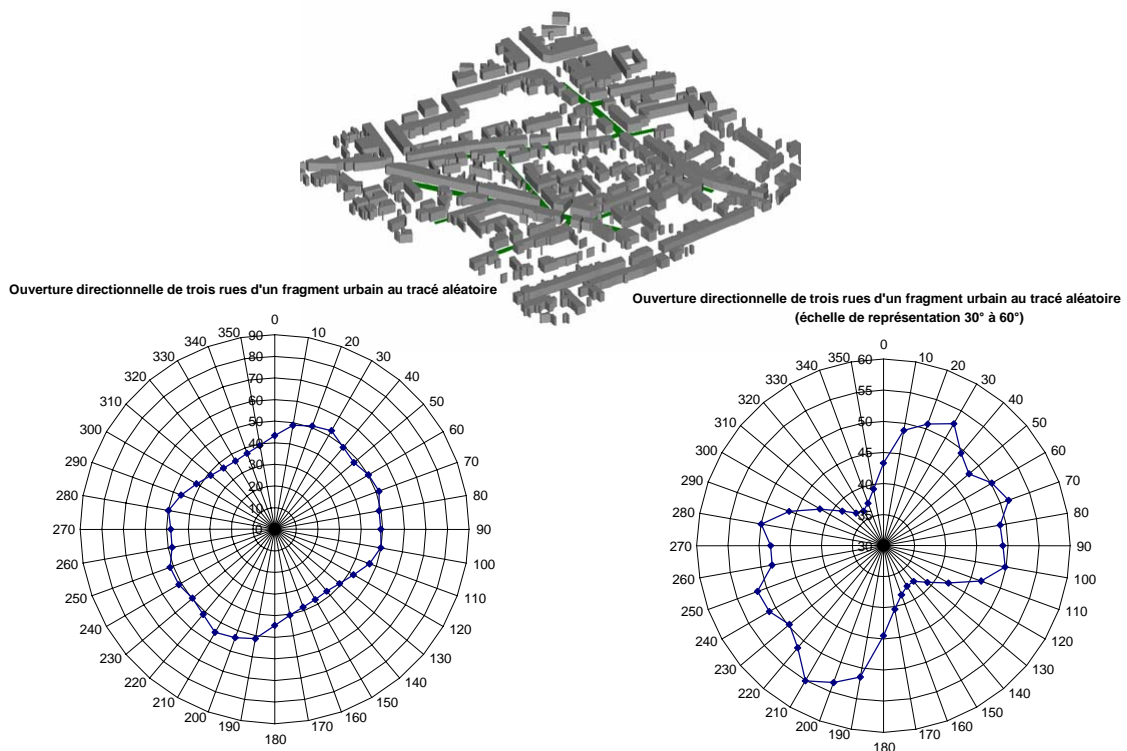


Figure 4.49 : Plan et Ouverture directionnelle d'un fragment urbain dense au tracé aléatoire<sup>54</sup>

<sup>52</sup> Le réseau de voies en étoile fait partie des plans complexes qu'il est difficile d'interpréter en plan. La rose directionnelle permet d'évaluer une légère directionnalité sur l'axe (160°-340°).

<sup>53</sup> La faible hauteur des maisons produit une ouverture presque circulaire avec une légère directionnalité nord-sud ; est-ouest.

<sup>54</sup> Ce dernier exemple permet de définir trois axes principaux d'ouverture : 30°-210°, 70°-240° et 100°-280°.

### 3.4.3. Synthèse

L'application de l'ouverture directionnelle à différents éléments des espaces construits et à différentes échelles spatiales montre l'aptitude de cet indicateur à prendre en compte les formes complexes tout en traduisant cette complexité dans le diagramme.

En terme morphologique, l'indicateur permet :

- *le Calcul d'une ouverture moyenne de formes complexes* : La possibilité de simplifier une forme, paraissant complexe à la seule vue de son plan, est un des principaux intérêts de l'indicateur retenu. Cette faculté est illustrée (fig. 4.44 à fig. 4.49) pour des fragments qui ne répondent pas à des modèles connus de formes urbaines. Cependant, il est indispensable que les objectifs de l'analyse soient adaptés à l'échelle spatiale de l'espace construit pour pouvoir interpréter le diagramme de l'ouverture directionnelle. Ainsi des perturbations locales dans une rue, par exemple, n'auront que très peu d'incidence sur l'ouverture directionnelle à l'échelle de toute la rue (fig. 4. 31).
- *La définition des ouvertures majeures d'un espace construit* : En définissant de manière automatique, avec le logiciel Statistica, une classification des ouvertures directionnelles des points constituant un ensemble urbain, on obtient les types d'ouverture qui caractérisent cet ensemble urbain. Pour effectuer cette classification, il suffit de donner le nombre de classes souhaitées. Plus on veut mettre en évidence la complexité de l'ensemble bâti, plus grand devra être le nombre de classes. Cette classification automatique permet ainsi de définir les « ouvertures directionnelles majeures d'un ensemble urbain » et de mettre en évidence la complexité de ce dernier.
- *La traduction de la forme construite à partir de l'ouverture directionnelle* : la forme de la rose d'ouverture directionnelle appliquée à un espace urbain met en évidence la forme de l'espace en question. Ainsi une forme allongée en ellipse traduit une rue (fig. 4.30), et une forme circulaire traduit une place ronde (fig.4.42). La multitude des formes que peut prendre l'ouverture directionnelle se situe entre ces deux formes typiques : allongée et ronde. Lorsque l'on réalise une classification automatique à l'échelle d'un ensemble urbain, on peut aussi déduire la forme des espaces importants constituant cet ensemble à partir de l'analyse de la rose de chaque classe.
- *La mise en évidence d'une information globale et comparaison entre les ensembles urbains* : L'ouverture directionnelle permet d'obtenir des informations globales sur la taille, l'asymétrie (fig. 4.36 et fig. 4.40), et la directionnalité (ou compacité) de tout espace construit. Par la superposition des roses directionnelles on peut hiérarchiser les espaces analysés selon leur perméabilité aux paramètres microclimatiques et environnementaux (fig. 4.50).
- *La mise en évidence des variations locales* : En fonction de l'échelle dimensionnelle utilisée pour représenter les angles d'ouverture selon chaque direction (qui, rappelons le, va de 0° à 90°), on peut mettre en évidence la complexité de l'espace construit. Il est nécessaire pour cela d'utiliser à chaque analyse deux échelles:
  - la première, entre 0° et 90° pour évaluer le type d'ouverture de l'espace construit et le comparer avec d'autres espaces de même échelle ;
  - la deuxième, entre la valeur minimum et la valeur maximum de l'ouverture, ce qui permet de mettre en évidence la variation des frontières du vide urbain (fig. 4.44 à fig. 4.49).

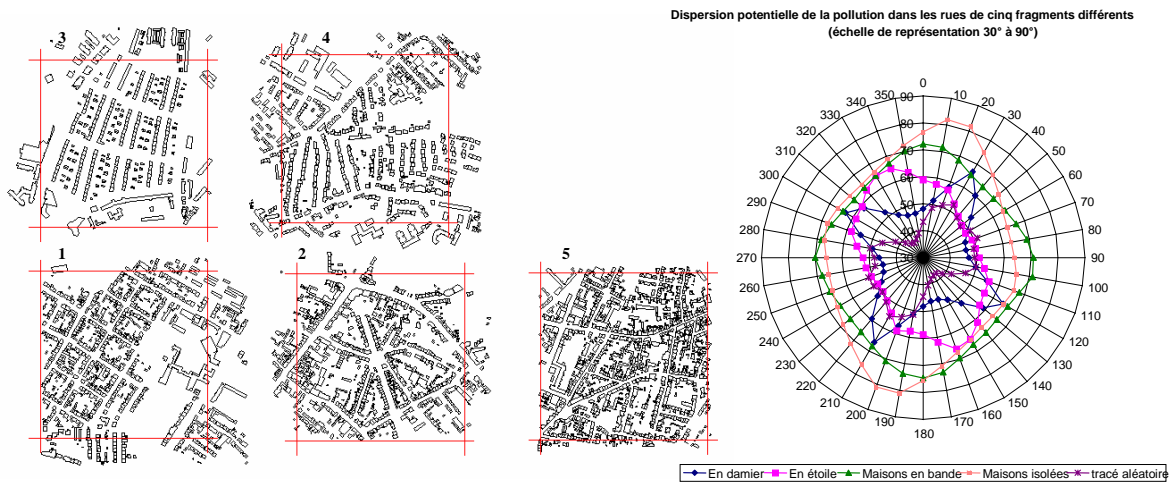


Figure 4.50 : Superposition de l'ouverture directionnelle de cinq fragments urbains (1. en damier ; 2. en étoile ; 3. en bande ; 4. maisons isolées ; 5. aléatoire)

### 3.5. Validation de l'indicateur : Comparaison avec quelques résultats de simulation

Pour valider l'analyse que l'on obtient par l'utilisation de l'ouverture directionnelle, nous proposons en ce qui suit de comparer les résultats donnés par cet indicateur avec ceux que l'on peut obtenir par l'utilisation des modèles de simulation de l'ensoleillement, de l'éclairage naturel et du vent dans un ensemble bâti. Nous avons pris comme exemple pour cela le quartier du Bouffay, situé dans le centre ancien de Nantes. Les modèles de simulation utilisés sont ceux disponibles dans le laboratoire CERMA, c'est à dire le modèle Solene pour la simulation de l'ensoleillement et le facteur de vue du ciel et le modèle Fluent<sup>55</sup> pour la simulation du vent.

#### 3.5.1. Comparaison avec des résultats de simulation de l'ensoleillement avec le logiciel Solene

La première procédure de validation que nous avons effectuée concerne l'analyse de l'ensoleillement et du facteur de vue du ciel. Ainsi nous avons effectué une modélisation numérique du quartier du Bouffay puis l'avons importé sous Solene avec lequel nous avons construit une triangulation assez fine pour le maillage du sol des rues (fig. 4.51).

L'analyse de l'ensoleillement a concerné, à titre démonstratif, la simulation des zones au soleil et à l'ombre à deux moments spécifiques de l'année : le 21 juin à 12h et le 21 décembre à 12h. La mi-journée, comme heure de simulation, a été choisie parce que l'azimut solaire à cette heure correspond à un angle calculé par l'analyse de l'ouverture directionnelle (180°). La rose a été construite selon un pas angulaire de 10°. Pour la caractérisation de la vue du ciel, une ouverture directionnelle moyenne sur toutes les directions a été calculée, et pour l'ensoleillement nous avons constitué une cartographie de l'ouverture directionnelle selon deux couleurs avec comme seuil la hauteur du soleil. Ainsi tous les points qui ont un masque inférieur à cette hauteur sont considérés au soleil (en jaune) alors que les autres sont à l'ombre (en noir).

Le résultat de la comparaison entre la caractérisation de l'indicateur et les simulations du modèle Solene est très satisfaisant (fig. 4.52 à 4.57). Ce que l'on avait supposé en définissant l'indicateur d'ouverture directionnelle se confirme bien. L'ouverture directionnelle permet d'appréhender les

<sup>55</sup> Le logiciel Fluent est un code CFD développé depuis 1983 et utilisé dans le domaine industriel. Depuis l'an 2000 il est commercialisé par Willis Stein & Partners après l'avoir été par Aavid Thermal Technologies, Inc. depuis 1988. Voir : <http://www.fluent.com/>

principaux paramètres physiques liés à l'analyse de l'ensoleillement et l'éclairage naturel. On arrive ainsi à obtenir une évaluation identique des zones ensoleillées qu'avec les simulations, comme on obtient une cartographie de l'ouverture au ciel tout aussi similaire, voire plus réaliste.

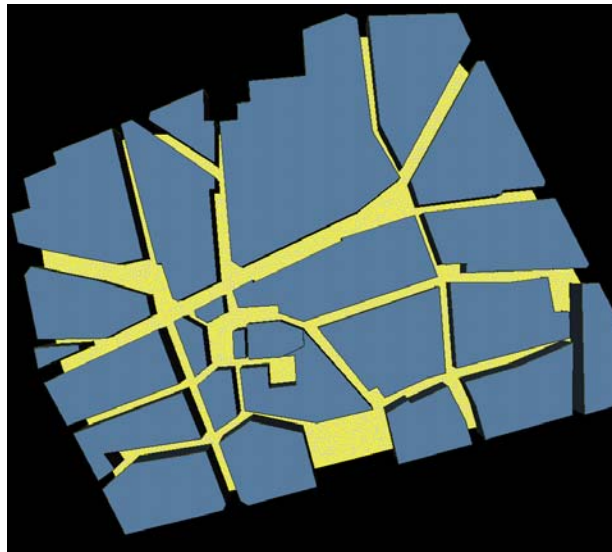


Figure 4.51: Maillage des rues dans Solene pour l'évaluation des Roses d'Ouverture Directionnelle et les simulations d'ensoleillement et du facteur de vue du ciel

Les seuls décalages que l'on obtient en effet, entre les deux calculs concernent l'analyse de l'ouverture au ciel. Dans le modèle Solene, le ciel est considéré comme étant une voûte céleste construite par triangulation. La taille des mailles va donc avoir une incidence sur les résultats. Plus la maille est grande plus le résultat s'éloigne de la réalité (si le centre de la maille est masqué le modèle considère en effet que toute la maille est masquée). Alors que l'ouverture directionnelle se base uniquement sur l'évaluation du masque bâti sans aucune référence à un modèle de ciel.

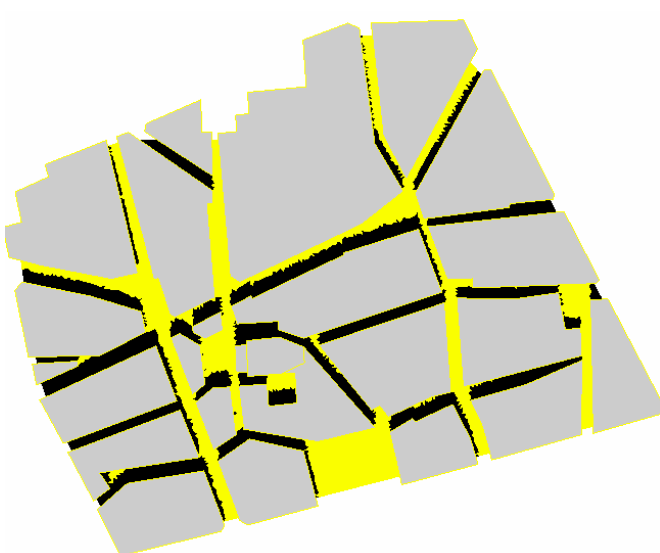


Figure 4.52: Ensoleillement 21 juin à 12h

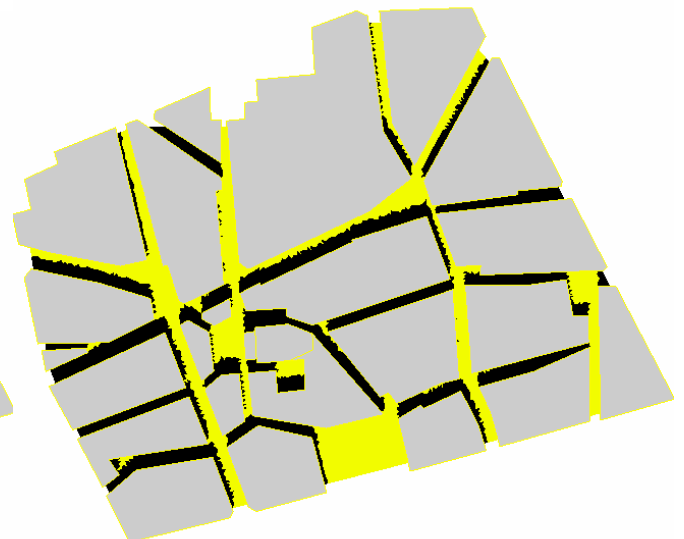


Figure 4.53: Ouverture directionnelle à 180 (pas de 10°)  
(en noir hauteur masque < à H soleil du 21/06 à 12h)

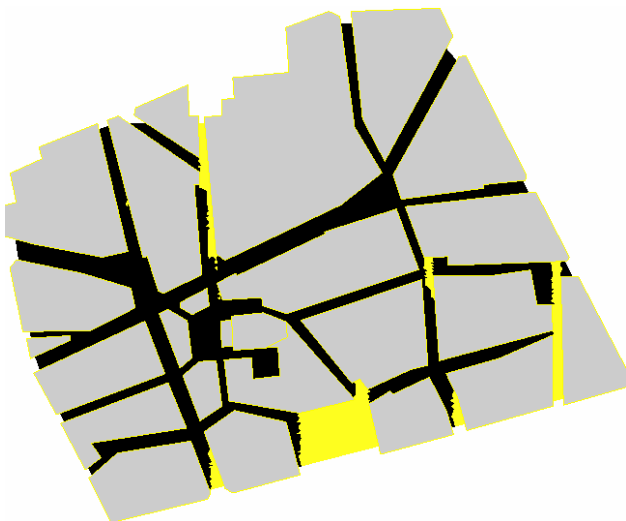


Figure 4.54: Ensoleillement le 21decembre à 12h

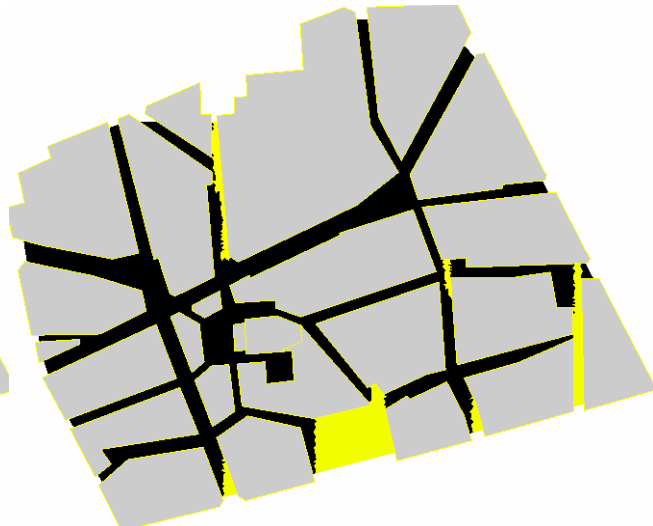


Figure 4.55: Ouverture directionnelle à 180 (pas de 10°)  
(en noir hauteur masque < à H soleil du 21/12 à 12h)

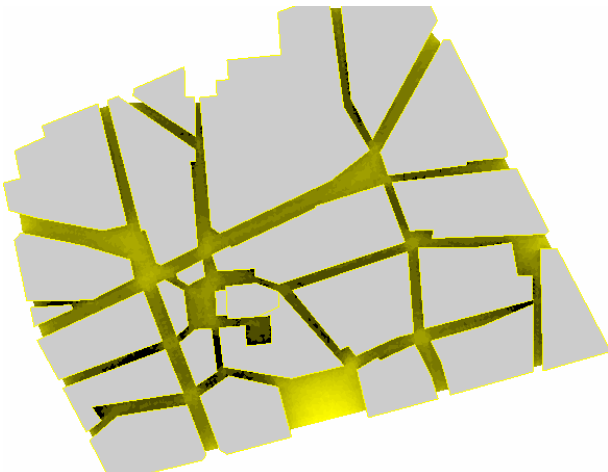


Figure 4.56: Facteur de vue du ciel du sol

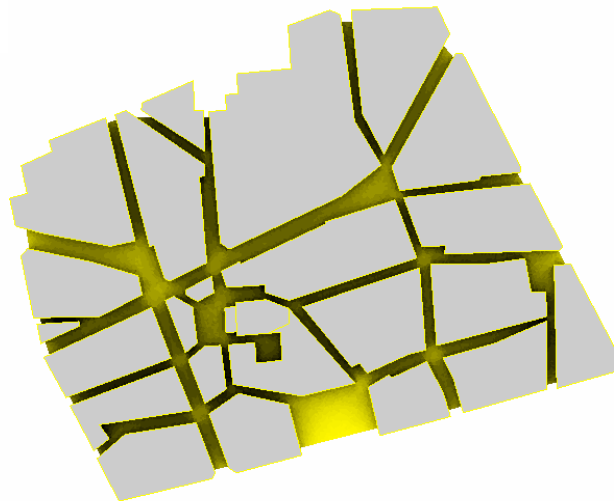


Figure 4.57: Ouverture directionnelle moyenne (pas de 10°)

### 3.5.2. Comparaison avec les résultats de simulation du vent avec le logiciel Fluent

La simulation de l'écoulement du vent dans les rues a été effectuée avec le logiciel Fluent développé par le CSTB et disponible au CERMA<sup>56</sup>. Le modèle utilisé dans ce logiciel est un modèle de type code CFD, basé sur une modélisation par éléments finis. Le volume du vide urbain constitué par les rues est maillé en trois dimensions et le résultat donne la vitesse du vent pour chaque maille.

Le modèle géométrique quartier du Bouffay, constitué d'une vingtaine de bâtiments, a été introduit dans une veine numérique en considérant qu'il n'avait pas d'environnement bâti<sup>57</sup>. Le quartier a été soumis à un vent Sud-Ouest (direction 250°), ce qui correspond à la direction des vents dominants à Nantes. Les résultats de simulation représentée sur une cartographie numérique ont été comparés à la cartographie de l'ouverture directionnelle calculée sur une direction équivalente (250°).

<sup>56</sup> Voir annexe pour les résultats des simulations à différentes hauteurs du sol.

<sup>57</sup> Les espaces urbains entourant ce quartier ont en effet une largeur très importante, ce qui nous permet d'admettre l'hypothèse d'une possibilité de simulation sans environnement bâti (l'ancien cours de l'Erdre -actuel cours des 50 otages- se situe au nord et à l'Est, au sud c'est l'ancien cours du bras nord de la Loire, et à l'Est le quartier est limité par l'actuel cours des états).

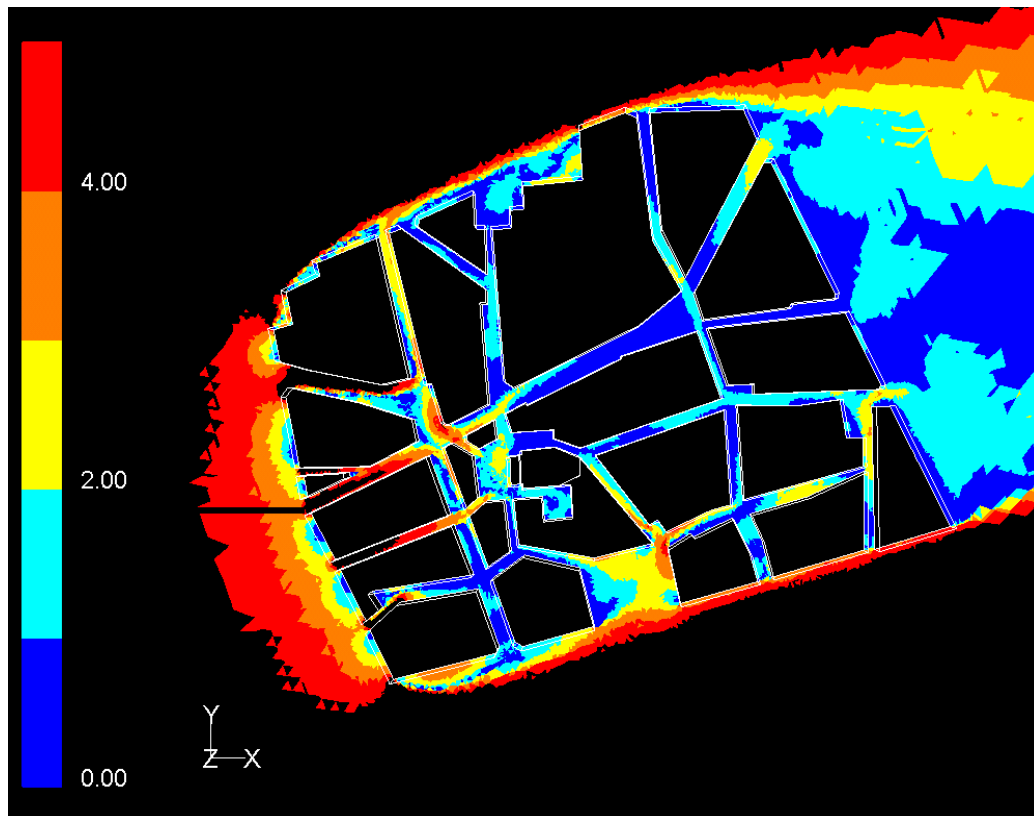


Figure 4.58: Cartographie des vitesses du vent au quartier du Bouffay soumis à un vent sud-ouest ( $250^\circ$ ) selon cinq classes de vitesse (en noir, vitesses supérieures à 4m/s)

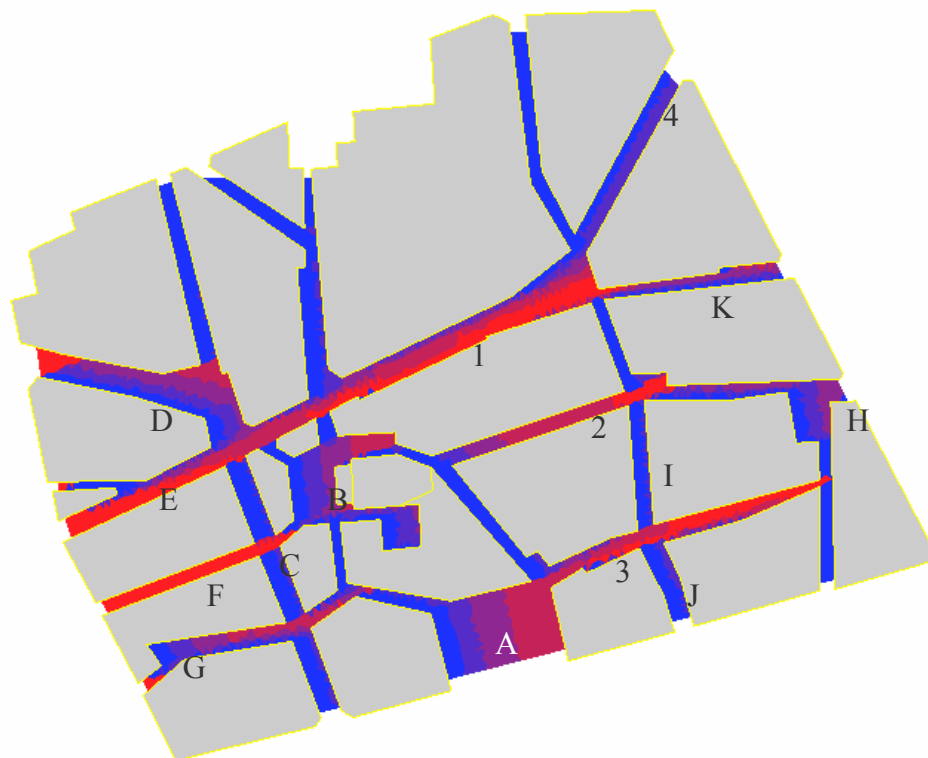


Figure 4.59: Cartographie de l'ouverture directionnelle selon la direction d'un vent sud-ouest ( $250^\circ$ )



Pour effectuer cette comparaison nous avons construit une cartographie d'ouverture sur la direction 250° selon 5 classes (fig. 4.59) et une cartographie de la vitesse du vent selon le même nombre de classes (fig. 4.58). Cette comparaison nous permet de constater quelques similitudes avec les simulations et un certain nombre de différences.

Les principales similitudes, qui restent tout de même relatives, concernent tous les espaces annotés par des lettres sur la cartographie de l'ouverture directionnelle (de A à I). Sur l'ensemble de ces espaces on note effectivement une hiérarchisation de l'ouverture directionnelle assez proche de celle des vitesses. Cela se voit d'avantage dans les espaces A, C, D, E, I, J et K. Les espaces qui sont presque en net contraste avec ceux de la simulation, sont soit des espaces ouverts dans la direction du vent mais avec une faible vitesse (espaces 1 et 2), soit des espaces assez fermés au vent mais comprenant de fortes vitesses de vent (espace 4).

Les différences entre les deux cartographies sont surtout dues à des effets microclimatiques locaux liés par exemple à des effets de sillage ou à des effets d'élargissement de voie, qui affaiblissent la vitesse du vent.

La place du Bouffay (espace A) est assez représentative du niveau de rapprochement entre les résultats de la simulation et ceux de la caractérisation. On observe bien en effet, dans la simulation (fig. 4.60) cinq classes de vitesse de vent comme pour la caractérisation, sauf que la distribution spatiale et la surface qu'occupe chaque classe de vitesse sont assez différentes.

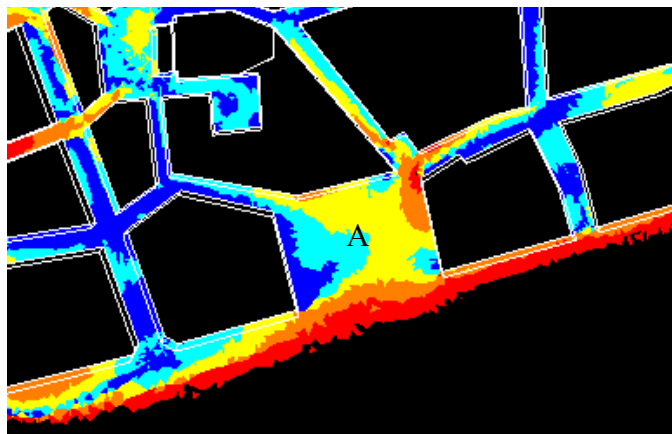


Figure 4.60: Simulation de la vitesse du vent dans la place du Bouffay : classification selon cinq classes de vitesse

Ces différences sont principalement dues aux éléments suivants qui ne sont pas pris en compte par l'ouverture directionnelle :

- *Effet de densité* : le quartier du Bouffay présente une forte densité bâtie. Les prospects des bâtiments sont en effet assez importants alors que ceux des rues sont très faibles. Cet effet de densité va donc réduire la perméabilité des rues au vent. De ce fait le principal apport de flux aéraulique provient par les rues de la face Ouest du quartier. Au-delà de cette face le vent ne pénètre dans les rues que par les limites périphériques du quartier.
- *Ouverture au vent en amont* : L'ouverture à l'Est du quartier du Bouffay produit des rues avec les plus fortes vitesses de vent. De par l'effet de densité c'est principalement ce flux aéraulique qui va être détourné, brisé, et canalisé vers les autres rues. De par cette ouverture, un fort contraste va se produire entre ces rues et les autres rues situées à l'intérieur du quartier.
- *Non-continuité directionnelle des rues* : Le quartier du Bouffay, est un quartier ancien qui présente des rues sinueuses et avec des directions discontinues. Cette discontinuité augmente les effets de brise et de détournement du flux aéraulique. C'est ce qui explique principalement une augmentation des vitesses dans quelques espaces à l'intérieur du quartier.

- *Intersections* : les intersections des rues distribuent le vent dans des rues transversales à la direction du vent ( $250^\circ$ ). Cette distribution transversale introduit donc un mouvement d'air dans des rues qui peuvent être très fermées aux vents dominants (fig. 4.61).

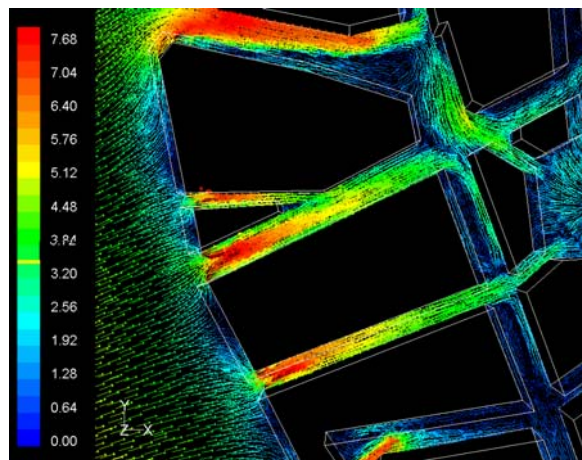


Figure 4.61: **Distribution des vitesses au vent du quartier** (face Est)

- *Largeur variable des rues* : Puisque c'est principalement le même flux qui va circuler dans les rues, l'élargissement des rues produit une diminution de la vitesse du vent (fig. 4.62).

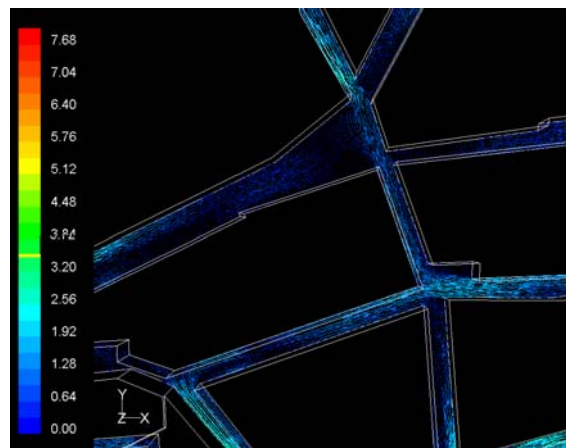


Figure 4.62: **Distribution des vitesses du vent au cœur du quartier** (effet de densité)

### 3.5.2. Synthèse

Rappelons tout d'abord l'intérêt de la caractérisation. Elle permet de donner des indications à partir d'informations et une méthode simplifiées. Elle ne vise pas l'anticipation des phénomènes physiques comme c'est le cas par exemple des modèles de simulation, mais elle prévoit leur comportement général.

L'analyse de l'ensoleillement et du facteur de vue du ciel, qui sont basés sur des évaluations angulaires directionnelles, nous donne des résultats comparables à ceux de l'indicateur.

Le rapprochement entre la caractérisation solaire et de la vue du ciel avec l'ouverture directionnel ne se retrouve pas avec autant de similitude dans l'analyse des vitesses du vent. En décomposant les vitesses en 5 classes, on a certes pu définir une hiérarchisation des espaces urbains du quartier du Bouffay, du plus aéré au moins aéré, mais la spatialisation des vitesses du vent sont tout de même assez différentes. La superposition de ces deux cartes nous a donc conduit à constater des rapprochements possibles mais aussi des décalages importants. Ainsi, si l'ouverture directionnelle



paraît très intéressante à l'échelle du quartier, puisqu'elle permet de traduire par une rose explicite l'ouverture de tout le quartier, et donc de pouvoir porter une évaluation d'ensemble, elle l'est moins à l'échelle des points qui constituent les espaces urbains.

Pour arriver à une meilleure caractérisation du vent à l'échelle des espaces constituant un ensemble bâti, on peut proposer les développements suivants :

- D'abord, effectuer plusieurs tests sur plusieurs formes urbaines pour évaluer pour quel type de tissu urbain la caractérisation de l'ouverture directionnelle présente des décalages importants.
- Ensuite, compléter la caractérisation de tout un fragment urbain, par des caractérisations de rues qui intégreront l'analyse des effets des intersections de rues et les effets des discontinuités directionnelles, de même que les effets des élargissements de voies. Toutes ces données peuvent être caractériser par l'ouverture directionnelle. Il suffit pour cela d'analyser la variation de l'ouverture le long des parcours principaux. Ces parcours principaux peuvent donc être déduits par exemple par une classification automatique qui fera ressortir les fréquences de chaque classe.
- Enfin, s'interroger sur l'apport d'une simulation numérique<sup>58</sup> pour constituer un règlement urbain ou pour évaluer de la qualité d'un projet urbain. Les simulations numériques s'attachent à une échelle de lecture trop fine qui ne correspond pas à des préoccupations d'échelle spatiale importante. La caractérisation que nous proposons permet, sans simulations complexes et avec des données morphologiques assez simples de caractériser globalement selon une moyenne et selon des classes le comportement microclimatiques des ensembles bâtis. La perspective de développement de la caractérisation proposée dans cette thèse doit donc s'accompagner d'un questionnement sur l'apport qualitatif des simulations, ce qui est en soi un sujet de recherche.

### 3.6. Ouverture de l'indicateur à des applications climatiques et environnementales

Comme on l'a précédemment évoqué, l'analyse de l'ouverture permet d'appréhender la perméabilité des ensembles bâtis à tous les phénomènes physiques qui se propagent dans le vide urbain. Sans aller jusqu'à effectuer cette application exhaustive, nous présentons ici quelques pistes qui confirment cette hypothèse d'applicabilité de l'ouverture directionnelle telle que nous la définissons à la caractérisation des paramètres physiques comme le bruit, la pollution automobile ou encore l'îlot de chaleur urbain.

#### - Le bruit dans les espaces et ensembles urbains

Pour la prévision des niveaux sonores, Le CETUR<sup>59</sup> [CETUR 1980]<sup>60</sup> a développé une formulation empirique qui prend en compte l'effet de paramètres géométriques comme l'ouverture d'un espace à une source ou l'éloignement de l'environnement bâti de cette dernière.

On retrouve ainsi une formule simplifiée qui permet d'observer le rôle de ces paramètres géométriques sur les niveaux sonores [cetur 1981]. Ainsi pour évaluer le niveau sonore d'une circulation routière (la source de la plus grande part de la pollution sonore en milieu urbain), quelque soit le type de circulation (autoroutes, boulevards, carrefours,... etc.) on distingue selon la typologie des voies deux formulations différentes :

---

<sup>58</sup> Dans l'introduction de cette thèse, nous avons, évoqué les problèmes liés aux méthodes d'ingénierie dans la pratique du projet urbain ou dans la réglementation du bâti. L'usage des résultats de simulation, restent assez problématique à une échelle spatiale comme celle du quartier du Bouffay. Quels enseignements peut nous offrir une simulation du vent de type FLUENT ?

<sup>59</sup> Centre d'Etudes des Transports Urbains.

<sup>60</sup> Il n'est pas de notre propos, comme on l'a déjà dit d'approfondir l'applicabilité de l'indicateur à la caractérisation de tous les phénomènes environnementaux, mais nous voulons montrer que c'est un indicateur potentiellement applicable. C'est ce qui explique que l'on s'est basé uniquement sur des travaux de référence dans le domaine et parfois assez anciens.

- Le long d'une voie insérée dans un tissu ouvert, parsemée de bâtiments de façon irrégulière de part et d'autre de la voie, le niveau sonore s'obtient à partir de la formule suivante :

$$Leq = 20 + 10 \log(QVL + EQPL) + 20 \log V - 12 \log(d + lc/3) + 10 \log(\theta/180).^{61}$$

- Pour une rue en « U », c'est à dire sous forme d'un canyon, on a :

$$Leq = 55 + 10 \log(QVL + E QPL) - 10 \log l + Kh + Kv + Kr + Kc^{62}$$

Les paramètres géométriques pris en compte sont :

d = distance de l'observateur (la cible) au bord de la voie considérée.

lc = largeur de la voie

l = angle sous lequel on voit la route

Kh = correction de hauteur = -2 (h-4)/l

h = hauteur du point récepteur (la cible) par rapport à la voie

Il ressort de cette formulation des niveaux sonores que « l'angle de vision de la source » ainsi que « la hauteur du bâti » et « son éloignement par rapport à la source » (en considérant que le bâti est le récepteur analysé) sont les seuls paramètres géométriques pris en compte. Ces trois paramètres peuvent être déduits de la lecture de l'ouverture directionnelle. On peut ainsi appliquer cette lecture à une source sonore pour définir le niveau de pénétration du bruit dans un ensemble urbain.

#### - La pollution atmosphérique

Evoquons pour le cas de la pollution atmosphérique la possibilité de rapprochement entre l'ouverture directionnelle et les données d'entrée d'un modèle de simulation de la pollution automobile dans les rues, qui est le modèle OSPM « Operational Street Pollution Model » [Berkowitz 1999]. Ce modèle se base sur une conception en « canyon » des rues (fig. 4.63).

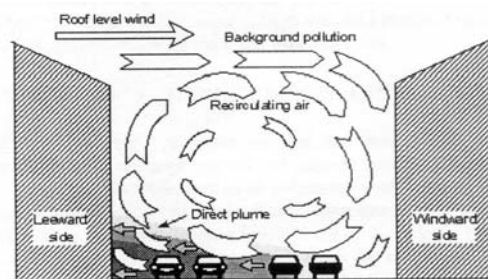


Figure 4. 63: Le modèle de rue utilisé dans « OSPM » [BERKOWITZ 1999]

En appliquant le modèle OSPM, dans le cadre d'un contrat de recherche<sup>63</sup> qui visait la constitution d'une base de données sur la géométrie des rues, pour l'évaluation de la pollution des rues, on a été confronté à la nécessité de traduire une forme de rue complexe dans les termes du modèle (comme cela fut le cas pour le modèle TEB). Les paramètres géométriques pris en compte par le modèle OSPM, sont la largeur de la rue, la hauteur moyenne des bâtiments, la largeur et la longueur des vides le long de la rue et la longueur de la rue étudiée. La conclusion principale du travail de simulation des rues de la ville de Nantes a été de constater la grande dépendance de la simulation des polluants à la valeur du prospect des rues (tableau 4.2).

<sup>61</sup> QVL et QPL = débits horaires de véhicules légers et poids lourds ; E= équivalence acoustique entre VL et PL ; V= vitesse.

<sup>62</sup> Kv= correction de vitesse ; Kr = correction de rampe ; Kc = correction de carrefour.

<sup>63</sup> [BENZERZOUR et al. 2003]

Ce qui prouve l'incidence très importante de l'ouverture des rues sur ce phénomène environnemental. On peut donc émettre l'hypothèse selon laquelle l'ouverture directionnelle peut informer du potentiel de pollution des espaces et des fragments urbains.

	3m	10m	15m	20m	25m
Benzene	4.963	3.245	2.836	2.452	2.317
NO	70.779	37.609	30.016	23.216	20.807
NO2	42.173	33.712	31.236	28.372	27.362
CO	0.903	0.633	0.568	0.508	0.486
NOX	150.744	91.412	77.363	64.085	59.381
O3	37.485	43.219	45.067	47.362	48.17

Tableau.4.2 : Variation de la concentration en polluants selon différentes largeurs de rues [OSPM 2003]

La superposition de l'ouverture directionnelle de plusieurs ensembles bâtis (comme les cinq fragments analysés précédemment en fig. 4.71) permet de définir (lorsque la source est à l'intérieur de cet ensemble) quel est celui qui présente potentiellement plus de bruit et de pollution atmosphérique. Ainsi plus l'espace est fermé plus il conserve le bruit et la pollution, et plus il est ouvert (et encore plus lorsqu'il est soumis au vents dominants) moins il conservera cette pollution. Lorsque la source est à l'extérieur de l'ensemble urbain, c'est l'inverse qui se produit.

- **Définition d'une intensité « directionnelle » de l'îlot de chaleur urbain et de l'émissivité des surfaces du sol urbain**

La formulation de T.R.Oke de l'îlot de chaleur urbain s'appuie uniquement sur une formulation exponentielle du rapport H/L (prospect des rues), celle-ci peut être traduite à partir de l'ouverture directionnelle, puisqu'il s'agit là aussi d'un calcul de hauteur par un éloignement (une distance). Pour retrouver la formulation de T.R.Oke, il suffit de calculer la moyenne de toutes les directions représentées par l'ouverture directionnelle.

On peut en effet, définir par exemple une rose directionnelle qui représentera la formule de T.R.Oke en traduisant le rapport H/L en un rapport H/D (qui est celle calculée par l'ouverture directionnelle) selon chaque direction, pour obtenir l'intensité de l'îlot de chaleur du fragment analysé en terme de différence de température entre ville et campagne. Puis en comparant plusieurs fragments, on peut obtenir la différence des îlots de chaleurs entre plusieurs fragments urbains.

On peut ainsi non seulement obtenir le potentiel de chaque fragment urbain à créer un îlot de chaleur urbain en reprenant la formulation de T.R.Oke :  $\Delta T_{u-r}(\max) = 7.54 + 3.97 \ln(H/L)$  [OKE 1987] ; mais aussi définir une directionnalité de cet îlot, ce qui permettra d'évaluer son influence sur son environnement en présence de vent.

En traduisant le rapport H/L en un rapport H/D, dans la formulation de Oke on obtient pour chaque directions opposées (coté 1 et coté 2 avec successivement des hauteurs H1 et H2 et des distances au masque D1 et D2) le rapport  $H/L = \frac{H1+H2}{2(D1+D2)}$ . A partir de là on obtient une rose directionnelle traduisant l'îlot de chaleur urbain (fig. 4.64).

On s'aperçoit en superposant les cinq diagrammes représentant les cinq fragments urbains précédemment analysée (fig. 4.64) qu'il existe une variation potentielle de l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain de plus de 4°C (à condition bien entendu que le fragment urbain selon les termes de Oke soit assez étendu).

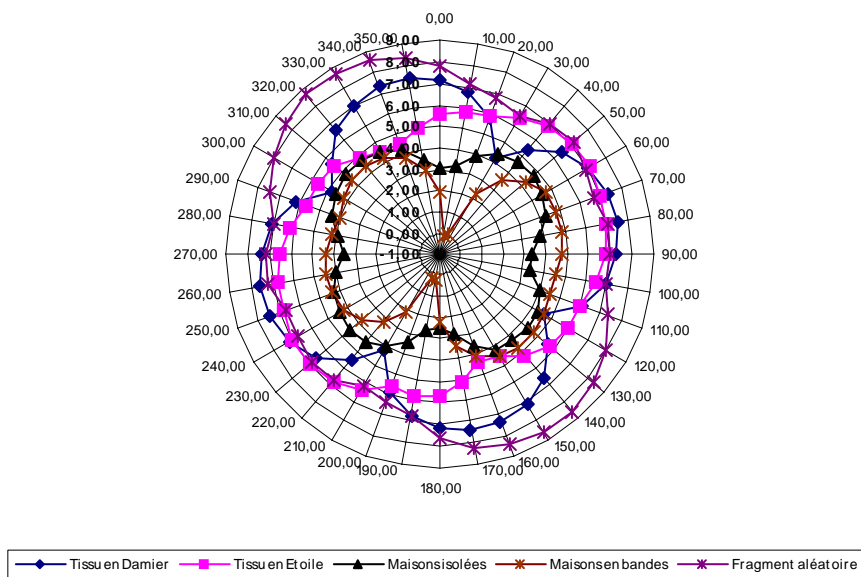


Figure 4. 64: Variation de l'intensité directionnelle de l'îlot de chaleur (en °C) selon la formulation donnée par T.R.Oke appliquée à cinq fragments urbains (idem ceux de la fig 4.71)

Au delà du rapport H/L formulé par Oke, l'îlot de chaleur urbain est aussi influencé par les propriétés des surfaces du sol urbain. Les arbres et les surfaces d'eau contribuent de façon importante au rafraîchissement de l'air en été. On peut en appliquant l'ouverture directionnelle à ces surfaces évaluer leur potentiel d'émission vers l'environnement. Ainsi nous avons comparé à titre illustratif dans un ensemble bâti deux solutions d'implantation de la même surface végétale : selon deux bandes parallèles et selon une implantation éparse. En évaluant l'ouverture directionnelle de ces deux surfaces nous obtenons la certitude que l'éparpillement est une meilleure solution pour faire propager les effets de la végétation sur l'environnement et que c'est une solution qui peut être améliorée (fig. 4.65)<sup>64</sup>.

Ouverture directionnelle de la même fraction de surface d'espaces verts l'une é fragment urbain et l'autre formant deux bandes Nord-Sud

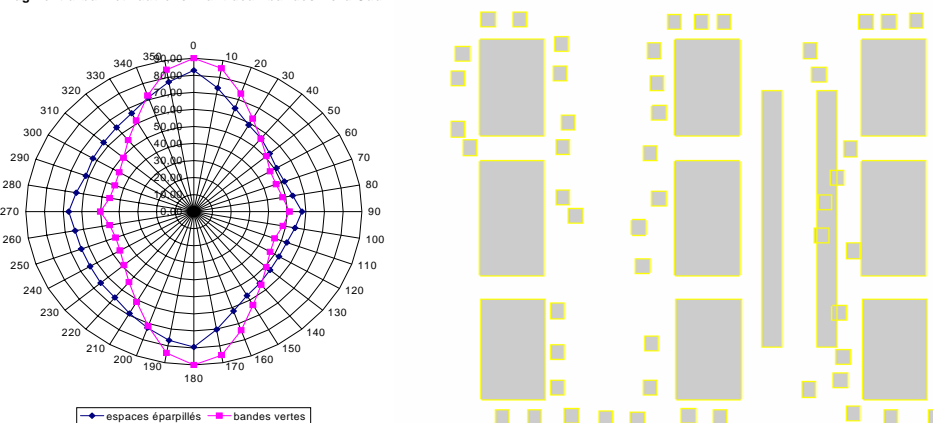


Figure 4. 65 : Exemple d'évaluation de l'ouverture directionnelle pour une surface végétale (mise en évidence de son effet potentiel sur son environnement selon deux configurations différentes de même surface)

<sup>64</sup> Rappelons que cette application est rendue possible, parce que la rose directionnelle est construite sur la base du concept de canyon qui a, comme on l'a vu, des applications multiples dans plusieurs modèles

## CONCLUSION

*« ...Il faut donc considérer le caractère organisationnel de l'ouverture. Entrées et sorties sont liées à une activité organisationnelle, donc à une organisation active, c'est à dire par là même transformatrice et productrice. L'ouverture est donc ce qui permet les échanges énergétiques nécessaires aux productions et transformations. De plus, toute boucle génératrice, toute production d'états stationnaires ou d'homéostasies, nécessite le flux énergétique, donc l'ouverture. L'ouverture apparaît ainsi comme un trait nécessaire parmi les traits interrelationnés et solidaires dont la constellation permet de définir les êtres-machines. Il apparaît donc qu'on ne saurait définir les « systèmes ouverts » seulement par l'ouverture. Il serait même mutilant de résorber les traits multiples et divers de l'être-machine dans la seule ouverture et dans la notion floue et abstraite de système. L'ouverture n'est pas pour autant un caractère secondaire : elle est fondamentale et vitale, puisqu'elle est nécessaire, non pas seulement au fonctionnement, mais à l'existence de tous êtres-machines ... »*

[MORIN 1977, p. 198]

Ce texte de E.Morin traduit assez bien les apports et les limites de la proposition contenue dans ce chapitre. En définissant l'ouverture des espaces construits comme indicateur il nous a semblé que nous détenions là un indicateur à la fois simple, explicite et opérationnel pour la caractérisation de l'environnement climatique. Mais en même temps, cet indicateur nous a paru tellement évident que l'on s'est longtemps posé des questions sur sa pertinence. Mais rappelons tout de même qu'il ne s'agit à que d'un indicateur dont le rôle n'est pas de se substituer aux modèles physiques dont l'objectif reste avant tout quantitatif, mais de donner des informations plus proches de la qualification du microclimat urbain que de sa quantification. L'ouverture nous renseigne et peut nous renseigner sur beaucoup de paramètres environnementaux puisque c'est dans le vide urbain que se déploient les usages, les phénomènes physiques et tout ce qui fait la vie urbaine. Quoi donc de plus évident que de caractériser le vide urbain qui est le siège de l'interaction de ces phénomènes physiques et du cadre bâti.

L'indicateur proposé ne fait, ni plus ni moins, que représenter ce que les auteurs des transformations salubristes réalisaient de manière intuitive c'est à dire une transformation du vide urbain de manière à améliorer la qualité de l'environnement climatique, ceci à partir d'interventions exclusivement morphologiques. La direction principale qu'a prise cette quantification du vide a eu comme point de départ le concept de rue canyon développé en climatologie urbaine, comme objectif la prise en compte de la forme urbaine dans sa complexité et comme méthode un élargissement de ce concept, de manière à ce qu'il devienne un indicateur explicite des variations potentielles de l'environnement climatique.

Cet indicateur, rappelons le encore une fois, est une traduction simplifiée du potentiel de la forme urbaine à réguler un paramètre climatique ou environnemental. Il a été représenté selon une méthode directionnelle explicite. Il permet, de façon très simplifiée, et donc très accessible aux divers acteurs intervenant sur le cadre bâti, d'effectuer une sorte de pré-diagnostic des éléments de la forme urbaine, tout en prenant en compte les variations de ces derniers.

Nous avons préféré cette représentation directionnelle parce que les phénomènes climatiques et environnementaux sont dans la majorité des cas aussi directionnels. Le choix d'un indicateur numérique pour traduire le potentiel d'un espace ou d'un fragment urbain, nécessite comme on l'a vu une « explication » et une interprétation de son usage. Ceci dans la mesure où ce type d'instrument réduit de façon « non explicite » la complexité de la forme urbaine.

L'ouverture directionnelle est donc un indicateur qui peut traduire toute les formes urbaines bâties, anciennes ou récentes puisqu'il traduit ce qui est permanent dans une forme urbaine : « le vide urbain ». La lecture multi-échelle de cette ouverture permet de donner à la fois une information synthétique et une information sur les variations locales de la perméabilité des espaces construits aux paramètres microclimatiques et environnementaux (par les classifications automatiques et la cartographie des points constituant la surface analysée). En effet, le fait de considérer le vide urbain, et ce quelque soit son étendue, selon un ensemble de points (le maillage étant défini selon le niveau de

détail que l'on veut analyser), permet à la fois de donner des moyennes par direction, et une cartographie spatiale. Ces deux lectures nous permettent de traduire la complexité de la forme urbaine tout en donnant une moyenne significative pour les analyses d'échelle supérieure.

Cet indicateur, par sa simplicité d'utilisation, devra être interprété selon les besoins et l'objet de l'analyse climatique ou environnementale. Nous avons présenté des possibilités d'application qui tenterait de définir le potentiel d'un point, d'un espace ou d'un fragment urbain, à « recevoir » des phénomènes physiques qui lui sont externes comme le vent, le soleil, la lumière ; à « émettre » une pollution sonore ou atmosphérique, ou encore « la perméabilité » d'un espace ou d'un fragment à ces pollutions. Il reste cependant donc un indicateur ouvert aux interprétations, selon l'application qu'on lui donne. Cette flexibilité d'utilisation nous paraît importante, pour son développement éventuel, dans des cadres précis.

L'indicateur de l'ouverture directionnelle est au stade du prototypage. Dans le sens où l'on a tenté de présenter ses domaines de validation, son utilité et sa pertinence, comme indicateur multicritère. Mais il nous reste à investir de manière plus approfondie les différents modèles physiques des phénomènes microclimatiques et environnementaux. Ceci pour analyser la pertinence de l'ouverture directionnelle dans ces modèles.

Les principaux développements de l'indicateur pourraient se résumer à deux phases :

- dans la première l'indicateur devra être confronté aux différentes disciplines environnementales qui traitent du milieu bâti en trois objectifs :
  - explorer ses possibles correspondances avec les données d'entrée des modèles physiques ;
  - le confronter aux résultats que l'on peut obtenir des modèles de simulation physique qui vise à prédire les phénomènes microclimatiques et environnementaux ;
  - compléter l'indicateur en vue d'en faire un outil permettant de la manière la plus simple, la prédiction de la spatialisation des différents phénomènes environnementaux.
- Dans la seconde, et en regard de la validation du contenu, une validation de l'opérationnalité et de la simplicité de l'indicateur, même si elle semble a priori évidente, devra être testée auprès de ses utilisateurs potentiels (architectes, auteurs des règlements urbains et enseignants en architecture), ceci dans le cadre de projets urbains réels ou simulés.



## Conclusion générale

### **APPORTS ET PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE**

---

L'objet principal de cette recherche a été l'analyse des interactions entre les espaces construits et les phénomènes physiques microclimatiques. Cette interaction a été définie, évaluée et quantifiée à travers l'histoire d'un ensemble bâti : le centre ancien de Nantes. Le choix d'une approche diachronique nous a permis d'observer des interventions réalisées et non des formes théoriques construites artificiellement selon les besoins de la recherche. Quant à l'application de cette analyse diachronique à un ensemble urbain spécifique, elle permet d'observer la succession des interventions et donc de mesurer leurs effets (convergenents ou divergenents) à travers le temps. Un travail rétrospectif sur la caractérisation microclimatique d'une aire urbaine, à notre connaissance, n'avait pas encore été tenté sur une étendue spatiale et une plage temporelle aussi importantes. La nature pluridisciplinaire de cette exploration, qui touche aux domaines de la physique, de l'histoire et de la morphologie du bâti, et la complexité du problème, ont sans doute rendu le document un peu confus. Il nous faut ici clarifier quelque peu le cheminement, pas toujours linéaire, de cette recherche, et montrer qu'au bout du compte elle a produit quelques avancées et ouvert un certain nombre de perspectives, tout en restant inachevée sur bien des points.

### **CHEMINEMENT DE LA RECHERCHE**

Rappelons tout d'abord les déterminations fortes qui ont sous-tendu ce travail, l'orientation méthodologique qui a été adoptée et enfin les solutions bien spécifiques que nous avons recherchées.

#### **Des déterminations fortes**

La formulation d'un sujet de recherche s'effectue à la rencontre d'une sensibilité propre au chercheur et d'un contexte favorable à son développement. La morphologie urbaine est un domaine de connaissance qui nous a toujours intéressé depuis les études et l'obtention du diplôme d'architecte à l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme d'Alger. Consacrer la spécialisation doctorale à la forme urbaine et à ses évolutions relevait de cette continuité de préoccupation. En regard, les questions environnementales représentaient un autre pôle d'intérêt. C'est à la rencontre de ces deux thématiques que l'on a été amené à s'interroger sur la manière dont les évolutions de la forme urbaine pouvaient interférer avec les phénomènes microclimatiques.

Concrètement, à la question : comment les auteurs des projets urbains peuvent anticiper la régulation du microclimat urbain ? nous avons proposé la reformulation suivante: comment par le passé cette question a été résolue? En d'autres termes, n'existe t il pas un savoir-faire que l'on pourrait, à partir des avancées scientifiques contemporaines, mettre au jour et formaliser ?. Quelque peu en rupture avec les préoccupations dominantes de notre discipline d'origine, nous avons été, plus sensibles à l'histoire comme référence d'un savoir-faire plutôt que comme référence de formes. Le questionnement sur les modalités d'intervention sur la ville en relation avec le contrôle des effets climatiques a été ainsi au cœur de cette recherche.



### **Une méthodologie à la croisée de trois approches**

Notre questionnement sur l'histoire comportait trois questions complémentaires : quel est ce savoir-faire historique, comment s'est-il matérialisé et a-t-il été pertinent ? Pour répondre à ces dernières plusieurs champs d'investigation se sont ouverts à nous. Ces trois questions renvoient en effet à des approches à la fois historique, physique, et morphologique . Elles ont été abordées de manière croisée et avec un dénominateur commun qui était de définir la capacité des actions sur la forme urbaine à induire des variations microclimatiques. Elles peuvent être caractérisées succinctement comme suit :

- L'approche historique nous a permis de définir les principales interventions sur le cadre bâti qui visaient la régulation des paramètres physiques du climat urbain. Ces interventions puisqu'elles expriment les intentions salubristes de réguler le microclimat urbain, constituent autant de cas d'études et de références qui nous ont permis de définir « ce savoir-faire ». L'analyse de ces interventions a permis de distinguer deux catégories majeures d'interaction sur le couple forme urbaine - climat : ouvrir le vide urbain et minéraliser les surfaces.

- L'approche physique a traité de l'interaction des espaces construits et du microclimat urbain. Cette approche a permis à la fois de définir, selon les travaux de climatologie urbaine, les éléments les plus déterminants de la forme urbaine qui influent sur le microclimat urbain, et de choisir le modèle TEB comme modèle de simulation numérique pour analyser les effets microclimatiques des transformations urbaines et de fait d'évaluer la pertinence des transformations urbaines du point de vue microclimatique.

- Enfin, une approche que l'on pourrait qualifier de morphologique. Cette approche n'est pas venue a posteriori des deux précédentes. Elle a constitué une trame de fond commune à l'ensemble de la recherche. Puisque la forme urbaine et ses transformations ont été l'objet principal de notre analyse. Ainsi la forme urbaine a été définie, non pas par ce qu'elle est à un moment et à un instant donné, mais par les niveaux d'actions qui au fil du temps forment ses états successifs. Il existe, nous semble-t-il, une différence fondamentale entre la place donnée au cadre bâti dans une opération « d'analyse du microclimat urbain » et celle qui viserait « la production d'un microclimat urbain ». Dans le premier cas, le cadre bâti est considéré comme une donnée de l'environnement parmi d'autres, alors que dans le deuxième, nous quittons le champs de l'analyse pour aborder celui des aménagements urbains et des projets. Cette deuxième approche nous semble plus opérationnelle.

### **Spécificité de l'analyse et de la solution recherchée**

Pour évaluer les effets micro climatiques nous avons effectué l'analyse des transformations urbaines du centre ancien de Nantes. Le modèle TEB nous a ainsi permis de constater les modifications importantes que ces transformations ont pu induire sur les paramètres physiques de l'environnement climatique. Nous avons en effet constaté des tendances globales au réchauffement, à la déshumidification et à la célérité de l'air et des tendances locales aux effets parfois divergents. Le savoir-faire salubriste, qui s'est traduit par les deux catégories : d'ouverture du vide urbain et de modification des états de surface, s'est en définitive avéré « performant ». Lors de ce travail de simulation l'utilisation du modèle TEB a fait ressortir quelques problèmes à partir desquels nous avons conclu qu'il ne peut, constituer un outil opératoire pour les auteurs des projets et des règlements urbains<sup>1</sup>. Ces problèmes sont principalement liés au concept de « canyon », adopté par le modèle. En effet, il existe un décalage important entre la forme urbaine, telle qu'elle se réalise par l'intermédiaire des projets et des règlements urbains (avec sa complexité morphologique et le chevauchement des échelles spatiales) et la forme urbaine formulée à partir du concept de rue canyon. Ce concept n'est pas

---

<sup>1</sup> Rappelons que cela n'est pas l'objectif du modèle.

le seul fait du modèle TEB, il a été à la base de plusieurs travaux de climatologie urbaine et continue à être utilisé aujourd'hui.

A partir de cette limite du concept de canyon et à partir de la définition de l'ouverture du vide urbain comme catégorie importante regroupant un ensemble de transformations urbaines modifiant le microclimat urbain nous avons construit notre proposition. En effet, le concept de canyon et l'ouverture du vide urbain sont deux caractères complémentaires de la surface urbaine, la première est opératoire pour les climatologues et la seconde pour les intervenants sur le cadre bâti. De ce constat, nous avons proposé de construire un nouvel indicateur qui combine ces deux notions. Ainsi « l'ouverture directionnelle » n'est ni plus ni moins que l'évaluation de l'ouverture d'un point ou d'un ensemble de points du vide urbain à partir de l'évaluation d'un canyon sur plusieurs directions. En d'autres termes, c'est un indicateur qui a été défini à partir d'un savoir-faire historique puis formalisé à partir d'un concept climatologique.

« L'ouverture directionnelle » traduit la perméabilité potentielle des espaces bâtis aux phénomènes microclimatiques et environnementaux. Sa construction a répondu à quatre objectifs : être simple à mesurer, explicite dans ses résultats, applicable au cas général et aux cas particuliers et permettre une lecture à plusieurs échelles spatiales. Ces objectifs ont été définis à partir d'une volonté de dépassement des limites du modèle TEB, et d'une lecture critique de quelques indicateurs proposés dans la littérature. Cet objectif et cette lecture nous ont conduit à opter pour un indicateur numérique et graphique pouvant effectuer une analyse à plusieurs échelles spatiales.

## LIMITES ET PERSPECTIVES

Cette recherche s'est articulée autour de deux grands volets : une analyse et une proposition. L'analyse, au-delà des apports qu'elle a permis en terme de quantification des effets microclimatiques, présente un certain nombre de limites qu'il nous faut clarifier pour qu'elle puisse être utilisée dans d'autres recherches. Quant à notre proposition d'un indicateur morphologique, elle présente un certain nombre de perspectives que l'on veut présenter ici dans l'ordre des priorités. Ces perspectives permettront, à notre avis, de faire passer l'indicateur du stade actuel de prototype à celui d'un outil de caractérisation environnemental opérationnel pour les projets urbains.

### Limites de l'analyse

Traverser trois siècles de transformations urbaines et aboutir à la définition d'un indicateur multicritère, a, comme on peut l'imaginer, supposé plusieurs réductions et parfois même des raccourcis difficilement acceptables si cette thèse avait été soutenue dans le cadre d'une spécialisation sur l'histoire de la ville ou sur la climatologie urbaine. Mais une recherche interdisciplinaire qui se veut opérationnelle, ne suppose-t-elle pas (comme c'est le cas dans un projet urbain) justement de trouver une synthèse « prête à l'emploi » à partir de la complexité des connaissances liées à chaque discipline ?

Ces différentes réductions s'expliquent par un certain nombre de choix que nous avons effectué et que nous résumons en ces six éléments :

- Notre première réduction a concerné la sélection des transformations urbaines qui ont visé ou contribué à la modification du microclimat urbain. Cette sélection n'a en effet pas été exhaustive. Elle fut principalement dictée par des travaux d'historiens qui ont fait le parallèle entre les intentions salubristes et les interventions sur la forme urbaine.
- Ensuite, nous avons réduit l'évaluation des transformations urbaines au cas particulier du centre ancien de la ville de Nantes. Ce choix était lié à :

- la variété des transformations urbaines qui touchent à la fois les différentes surfaces du sol urbain (eau, terre battue, végétation, sol minéral) et aux surfaces construites;
  - la disponibilité des sources historiques graphiques qui ont permis la quantification des différents états historiques et qui remontent jusqu'à la fin du XVII<sup>ème</sup> siècle.
- Puis, à propos du centre de Nantes, nous avons effectué une double réduction qui intéressait l'espace et la période temporelle analysée :
- L'étendue spatiale des espaces construits analysés a été réduite au centre ancien. Cette réduction traduit un intérêt de notre part pour l'échelle spatiale des projets et des réglementes urbains qui englobe un ensemble de bâtiments et de vide. Cette échelle spatiale est aussi, peu investie dans les recherches sur les ambiances.
  - la longue période historique qui commence avec le pavage et s'achève avec la définition du secteur sauvegardé et l'arrêt des transformations, c'est à dire près de trois siècles, a été réduite à cinq états représentatifs. Nous ne pouvons pas observer l'évolution de chaque édifice ni de chaque rue, car cela aurait été beaucoup trop lourd et, au vu de l'échelle climatique analysée, pas très pertinent.
- La quatrième réduction a porté sur la quantification des états anciens. En effet, pour définir les transformations urbaines qui font passer le centre ancien d'un état à un autre nous avons dû formuler beaucoup d'hypothèses. Celles ci relevaient à la fois de la datation des transformations, mais aussi de la quantification des transformations en question. Ainsi, du fait du manque des sources anciennes nous avons dû conjecturer un certain nombre de paramètres de la surface urbaine.
- Le choix du modèle n'était pas vraiment problématique, puisque TEB était assez représentatif des modèles développés en climatologie urbaine. Ce dernier était l'un des premiers (au moment où l'on a abordé cette question de la modélisation, en décembre 2001, à prendre en compte la hauteur des surfaces bâties à travers la notion de canyon. Ce choix du modèle a de fait désigné ce qu'il fallait reconstituer pour évaluer l'évolution du microclimat urbain.
- Enfin, la dernière réduction adoptée concernait la procédure de préparation des données d'entrée pour la modélisation. Nous nous sommes appuyés en effet pour préparer ces données sur un certain nombre d'hypothèses qui peuvent paraître problématiques, concernant les hauteurs des édifices, la généralisation des édifices en pan de bois sur toute la ville, ou encore la définition des propriétés physiques des parois proportionnellement aux pourcentages de surfaces des matériaux, etc. Mais l'adoption de ces hypothèses et d'autres étaient indispensables pour pouvoir effectuer les simulations. Si nous nous sommes autorisé ces hypothèses, c'est parce qu'il ne s'agit ni d'une reconstitution muséographique ni d'une analyse nanoclimatique. Les hypothèses que nous avons émises, peuvent être à tout moment corrigées, si l'on découvre de nouvelles sources, nous permettant ainsi de reformuler avec plus de « certitude historique » les états anciens du centre de Nantes.

### **Portée et perspectives de développement de la proposition**

Le deuxième volet de cette recherche concerne la proposition de « l'ouverture directionnelle » comme indicateur explicite et opérationnel pour la régulation de l'environnement climatique dans les projets urbains. Rappelons brièvement en ce qui suit la portée de l'indicateur morphologique proposé, et précisons les développements qu'il nécessite ainsi que les prolongements qui nous semblent intéressants dans la perspective plus générale d'une caractérisation morphologique prédictive des phénomènes environnementaux.

La portée de l'indicateur

- par sa simplicité, il est facilement applicable à des ensembles urbains complexes. Il suffit de disposer pour cela d'une base de données numérique de la forme urbaine et de relever les hauteurs moyennes des édifices.
- Sa représentation graphique (la rose directionnelle) peut permettre de caractériser un ensemble urbain ou de comparer des ensembles urbains complexes.
- Pour effectuer le calcul numérique de l'indicateur à l'échelle d'un ensemble urbain, il suffit d'utiliser un modèle numérique (comme Solene) permettant d'interpréter les distances et les angles entre des points et des faces et ayant une fonction de maillage.
- Il est représentatif de la forme des espaces urbains. On peut en effet à partir de la rose directionnelle déduire la forme de l'espace analysé.
- Enfin, « l'ouverture directionnelle » est applicable à l'analyse de l'ensoleillement, de la lumière naturelle et du vent dans les espaces construits et potentiellement applicable à l'ensemble des paramètres physiques environnementaux, du moment qu'ils se propagent dans le vide urbain et qu'ils répondent à une certaine directionnalité. C'est le cas de la pollution atmosphérique (dont la propagation peut être assimilée à la propagation du vent) et, dans une certaine mesure, de la propagation du bruit.

A partir de ces quelques avancées que l'indicateur dans la caractérisation morphologique de l'environnement climatique, nous situons les prochaines phases de la recherche à deux niveaux complémentaires : le premier concerne les développements possibles de l'indicateur ; et le deuxième, plus général, concerne les développements de la caractérisation morphologique.

Ses développements nécessaires

- *Définir les limites de l'indicateur en le comparant à des résultats de simulation*

La première perspective de cette recherche se situerait dans la définition des limites de « l'ouverture directionnelle » quant à l'anticipation de 'environnement climatique. Jusqu'à quel point les résultats de l'indicateur se rapprochent de ceux des simulations ?. Dans quels cas cet indicateur morphologique peut suffire pour anticiper les paramètres physiques du microclimat urbain à l'échelle d'un ensemble bâti et dans quels cas ses résultats sont insignifiants ?

- *Tester son applicabilité dans le cadre d'un projet ou d'un règlement urbain*

L'application de l'indicateur dans le cadre d'élaboration d'un projet urbain ou dans le cas d'une réglementation du bâti permettra de définir clairement si la caractérisation donnée par l'indicateur suffit aux intervenants sur la mise en forme des ensembles bâtis ou s'il faut le compléter par d'autres indications ou encore le compléter par des simulations. Une des propriétés non négligeables de l'indicateur est qu'il permet de révéler une qualité microclimatique ou environnementale sans contraindre au choix d'une forme urbaine particulière. Cette propriété permet d'en faire un outil de réglementation qualitatif intéressant.

- *Evaluer sa pertinence dans les modèles climatologiques appliqués aux échelles locale et Meso*

Comme nous l'avons évoqué, « l'ouverture directionnelle » est construite à partir du concept de canyon. Ce concept a été ensuite redéfini pour prendre en compte la complexité de la forme urbaine. A partir de là, il est potentiellement applicable aux modèles de la climatologie urbaine appliqués aux échelles locales et Meso puisque eux-mêmes traitent des aspects de densité bâtie, et de prospect de rues. En plus d'une traduction de la forme urbaine l'indicateur pourrait aussi permettre d'intégrer des

analyses non encore prises en compte dans les modèles climatologiques comme celles qui concernent les aspects advectifs. En effet, en plus des échanges verticaux sol-atmosphère, l'indicateur pourrait aider à la caractérisation de la distribution horizontale du climat urbain, comme nous l'avons fait pour la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain par exemple. Par la représentation directionnelle nous pouvons en effet caractériser l'émission de la chaleur, de la pollution, ou même de l'humidité sur un plan horizontal

Les développements de la caractérisation morphologique

- *Définir clairement ce que l'on attend de la caractérisation opérationnelle dans le cadre d'un projet urbain ou de la réglementation urbaine*

Une définition quantitative des paramètres physiques comme c'est le cas dans les méthodes de l'ingénierie, n'est pas toujours souhaitable pour un architecte ou un concepteur de projet urbain, qui doit concevoir « une qualité spatiale ». Il faut donc regarder de plus près les besoins en terme d'indications morphologiques. La réduction du nombre des indicateurs, leur nature multicritère et leur application à plusieurs échelles spatiales qui furent des objectifs de notre proposition, pourraient être perçues comme opérationnelles par les intervenants sur le cadre bâti. Il faudra ajouter à cela que les indicateurs doivent aider à prendre une décision et à la communiquer. Il existe certainement d'autres caractéristiques auxquelles doivent répondre les indicateurs et que seul un contact direct avec la pratique des projets et des règlements urbains pourra mettre au jour.

- *Compléter l'indicateur proposé par un deuxième, caractérisant « l'état des surfaces »*

Les résultats donnés par « l'ouverture directionnelle » se superposent bien à l'analyse de l'ensoleillement, et à l'éclairement naturel mais pas assez aux simulations du vent. Ce manque de superposition dans l'analyse de la lumière et du vent, vient surtout du fait que l'indicateur ne prend pas en compte les effets de réflexion et d'absorption (brise vent, réflexion de la lumière, etc..) des phénomènes physiques. Ce sont là des phénomènes qui doivent être caractérisés par l'état des surfaces construites. Mais rappelons que la modélisation des phénomènes physiques comme le vent, l'ensoleillement, la lumière, etc. a une histoire et que la caractérisation morphologique n'est qu'à ses débuts.

Il est donc nécessaire de compléter cette caractérisation. Ainsi pour caractériser d'un point de vue microclimatique et environnemental un cadre bâti, en ne s'appuyant que sur des informations morphologiques, il est nécessaire par exemple de superposer l'analyse de son ouverture et de sa perméabilité à l'analyse de l'état de ses surfaces. Cela permettrait de traduire les effets de propagation indirecte des phénomènes physiques. Cette caractérisation de l'état des surfaces ne se fera pas indépendamment de « l'ouverture directionnelle », car les deux interagissent avec les phénomènes physiques et les deux constituent simultanément les principaux niveaux d'intervention sur la forme urbaine.

- *Élargir la caractérisation opérationnelle à la question de la perception*

Enfin, il faudra regarder de plus près, chose que l'on a pas peu abordé, la question de la perception de l'environnement climatique qui est capitale dans le projet urbain. Pour cela une question reste à poser : l'ouverture directionnelle ne permet-elle pas d'appréhender la perception des espaces urbains ? Est-ce que les indicateurs morphologiques peuvent traduire ce que perçoivent les usagers des espaces urbains ? Il nous paraît par exemple possible de superposer les informations données par l'analyse de l'ouverture « le long d'un parcours (comme son aspect prégnant ou saillant [THOM 1988]) à celles liées à la perception des espaces urbains traversés par ce parcours. Quelques travaux commencent à aborder ces questions. Parmi ceux-la une thèse actuellement en cours au CERMA vise

la caractérisation, à partir d'informations morphologiques, de la perception visuelle le long d'un parcours [SARRADIN 2003], ou encore quelques travaux du Laboratoire belge LEMA sur la caractérisation performantielle des espaces urbains [TELLER 2001]. La réponse à ces précédentes questions pourrait faire de la caractérisation morpho-physique (approche jusque là adoptée) une caractérisation opérationnelle des ambiances construites en milieu urbain, prenant en considération la dimension sensible.

- *Enfin, explorer la réduction morphologique comme approche opérationnelle et multicritère dans le domaine des recherches environnementales sur le cadre bâti*

Nous avons pu voir dans le dernier chapitre qu'une démarche de définition d'indicateurs qui partirait d'une connaissance préalable de la complexité de la forme urbaine a plus de chance d'être "opérationnelle" (c'est à dire adaptée à la pratique du projet urbain), que des indicateurs qui seraient définis à partir de modèles théoriques, ajustés a posteriori à la complexité de la forme urbaine. Cette observation peut nous conduire à poser de manière différente le problème de la recherche "environnementale" (qui traite des paramètres physiques de l'environnement urbain) dans une visée de production du bâti.

Il paraît en effet assez pertinent, au vu de notre démarche, qu'une réduction morphologique puisse en elle-même constituer un objet de recherche spécifique dont l'objectif serait de tenter un rapprochement entre les modélisations du cadre bâti, adoptée dans les différentes disciplines physiques, et la complexité des espaces construits. Cette réduction morphologique, pourrait se traduire, par des indicateurs qui constitueraient un objet de recherche commun pour les diverses recherches environnementales qui traitent du cadre bâti. Cette réduction morphologique pourrait ainsi permettre d'analyser les phénomènes physiques et environnementaux de manière plus opérationnelle .

Cette recherche permet d'illustrer la possibilité de cette démarche et sa capacité à produire des résultats. Ainsi la définition d'indicateurs morphologiques devra partir de la forme urbaine et de sa complexité pour intégrer, selon des procédés à définir, les différents modèles physiques qui traitent du bâti.



# **ANNEXES**



## ANNEXE 01 : PRESENTATION DU MODELE TEB

### 1.1. Les variables de base utilisées pour la modélisation des échanges Sol - Atmosphère

- *Les températures de surface*

Pour prendre en compte la complexité de la surface urbaine, le modèle TEB, définit trois températures de surfaces ; une pour chaque type de surface :  $T_R$  pour les toits,  $T_r$  pour le sol, et  $T_w$  pour les murs. Le transfert de température se fait de part et d'autre de ces surfaces : entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments, en ce qui concerne les toits et les murs, et entre le sous-sol et l'espace de la rue, pour le cas du sol. Chaque surface est décomposée en trois couches de matériaux (le nombre de couches peut être plus important), caractérisée par trois températures allant de l'intérieur vers l'extérieur  $T_3$ ,  $T_2$ , et  $T_1$ , en vue de mieux prendre en compte le transfert des flux par conduction.

Les équations décrivant l'évolution des températures des différentes couches sont basées sur la formulation des bilans thermiques prenant en compte l'inertie des parois (capacité thermique des matériaux). Dans le cas des surfaces urbaines en contact avec l'air (couche 1) l'apport énergétique provient du bilan de l'ensemble des sources « arrivant » et « sortant » des surfaces.

$$C_{*1} \frac{\partial T_{*1}}{\partial t} = \frac{1}{d_{*1}} (S_{*}^* + L_{*}^* - H_{*} - LE_{*} - G_{*1,2})$$

Le caractère (\*) remplace les représentations R, r ou w des différents types de surfaces toits, sol, et murs.

En ce qui concerne les autres couches des surfaces (couches 2 et 3), l'évolution de la température dépend exclusivement d'un transfert de flux par conduction :

$$C_{*k} \frac{\partial T_{*k}}{\partial t} = \frac{1}{d_{*k}} (G_{*k-1,k} - G_{*k,k+1})$$

« k » définit le numéro de la couche de surface (différent de celle en contact avec l'air).

On obtient en définitive les formulations suivantes des flux conductifs entre couche et sous couche des différentes surfaces :

$$G_{R_{n,n+1}} = \lambda_n \frac{T_{R_n} - T_{i_{bid}}}{\frac{1}{2}(d_{R_n})}$$

$$G_{w_{n,n+1}} = \lambda_n \frac{T_{w_n} - T_{i_{bid}}}{\frac{1}{2}(d_{w_n})}$$

$$G_{r_{n,n+1}} = 0$$

L'évaluation des flux transmis par conduction, dépend de la température interne des bâtiments «  $T_{i_{bid}}$  » qui est une donnée fixée avant d'entamer les simulations, de la conductivité thermique «  $\lambda$  » de chaque couche et leurs épaisseurs.

- *Le réservoir d'eau en surface*

La prise en compte, par le modèle TEB, des températures de surfaces, rend plus aisée, le calcul des flux de chaleur latente et l'humidité spécifique de saturation. Les eaux de pluie ou celles produites par les habitations et les activités urbaines sont interceptées par le système de drainage et d'évacuation. Les toits et les sols seront donc recouverts selon une période de temps donné par des fractions de surface d'eau, paramétrées respectivement par les deux variables  $W_R$  et  $W_r$ . Tant que subsiste de l'eau sur la surface des toits ou du sol, et tant que l'humidité de l'air n'est pas saturée, il existe un processus d'évaporation<sup>1</sup> jusqu'à épuisement de la fraction d'eau.

<sup>1</sup> Le phénomène de rosée est aussi pris en compte (dans le cas d'un flux de chaleur latente négatif), puisque cela pourrait avoir des effets significatifs [RICHARDS et OKE, 1998] quand les conditions physiques du phénomène sont réunies (humidité

Ce réservoir d'eau dépend donc de la disponibilité en eau (pluie, drainage en surface, etc.), et il est en rapport direct avec le flux de chaleur latente et la chaleur latente de vaporisation.

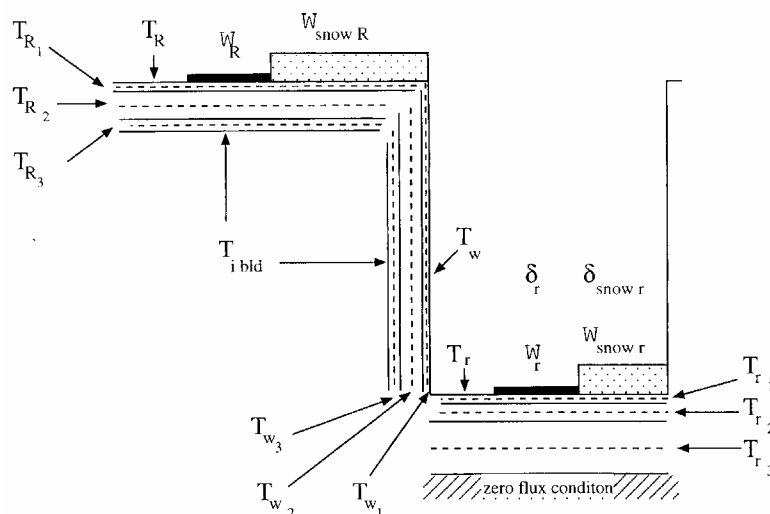


Figure A1 : Position des variables du modèle TEB : couches de températures pour les toits, rues et murs, et le réservoir de neige [MASSON 1999]

L'équation du réservoir d'eau retenu par TEB est pour les toits et sols :

$$\frac{\partial W_{*}}{\partial t} = R - LE_{*}/L_v, \quad (W_{*} < W_{*max})$$

R étant le taux de pluviométrie ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) et  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation.

Cette formulation du réservoir d'eau ne fait référence à aucun paramètre morphologique, si ce n'est de considérer que les surfaces sont imperméables. Cependant la fraction de surface d'eau peut être imposée, c'est ainsi que nous pouvons traduire par exemple, l'état du réseau d'assainissement en surface par la présence permanente d'une fraction de surface d'eau sur le sol des rues.

## 1.2. Les flux énergétiques et les variables calculées par le modèle

- Bilan des rayonnements de grandes longueurs d'onde

La modification principale introduite par la présence de bâtiments est la modification de la portion visible du ciel par chaque type de surface. Les toits ont une valeur du facteur de vue du ciel «  $\psi$  » égale à 1 (les toits sont considérés par TEB comme étant des surfaces horizontales). Pour les rues, plus le rapport  $h/w^2$  est élevé, moins importante sera la valeur de  $\psi$  ; et plus ce rapport est petit, plus  $\psi$  du sol des rues sera proche de 1 et celui des façades sera de 0.5. Le calcul des facteurs de vue du ciel est donc nécessaire et la formulation utilisée est celle donnée dans [Noilhan 1981]<sup>3</sup> :

$$\Psi_r = [(h/w)^2 + 1]^{1/2} - h/w$$

$$\Psi_w = \frac{1}{2} \{h/w + 1 - [(h/w)^2 + 1]^{1/2}\} / (h/w)$$

de l'air plus importante que l'humidité de saturation de la surface), et la surface est considérée complètement mouillée. Richards, K. and Oke, T.R. : 1998, Dew in urban environments, Proceedings of 2<sup>nd</sup> AMS Urban Environment Symposium.

<sup>2</sup> Le rapport  $h/w$  est le rapport Hauteur/ Largeur de la rue.

<sup>3</sup> Noilhan, J. : 1981, A model for net all wave radiation flux at the surfaces of a building, Building Environ. 16, 259-266.

Le rayonnement net des grandes longueurs d'ondes pour les surfaces du sol et des murs est formulé selon les facteurs de vue du ciel, les émissivités thermiques et la température de surface de chacune.

$$L_r^* = \epsilon_r \Psi_r L^\downarrow - \epsilon_r \sigma T_r^4 + \epsilon_r \epsilon_w (1 - \Psi_r) \sigma T_w^4 \\ + \epsilon_r (1 - \epsilon_w) (1 - \Psi_r) \Psi_w L^\downarrow + \epsilon_r \epsilon_w (1 - \epsilon_w) (1 - \Psi_r) (1 - 2\Psi_w) \sigma T_w^4 \\ + \epsilon_r (1 - \epsilon_w) (1 - \Psi_r) \Psi_w \sigma \overline{\epsilon_r T_r^4},$$

$$L_w^* = \epsilon_w \Psi_w L^\downarrow - \epsilon_w \sigma T_w^4 + \epsilon_w \Psi_w \sigma \overline{\epsilon_r T_r^4} \\ + \epsilon_w^2 (1 - 2\Psi_w) \sigma T_w^4 + \epsilon_w (1 - \overline{\epsilon_r}) \Psi_w \Psi_r L^\downarrow \\ + \epsilon_w (1 - \epsilon_w) \Psi_w (1 - 2\Psi_w) L^\downarrow + \epsilon_w^2 (1 - \epsilon_w) (1 - 2\Psi_w)^2 \sigma T_w^4 \\ + \epsilon_w^2 (1 - \overline{\epsilon_r}) \Psi_w (1 - \Psi_r) \sigma T_w^4 + \epsilon_w (1 - \epsilon_w) \Psi_w (1 - 2\Psi_w) \sigma \overline{\epsilon_r T_r^4}$$

- Bilan des rayonnements solaires :

Le rayonnement solaire direct

Du fait des ombres portées, les murs et les sols des rues ne recevront les rayonnements solaires que sur une partie de leurs surfaces, alors que les toits recevront le même rayonnement que ceux reçus par une surface horizontale complètement dégagée.

En considérant  $S^\downarrow$  comme étant le rayonnement solaire reçu par une surface horizontale (c'est ce même rayonnement que reçoit le toit),  $\theta$  l'angle défini par les rayonnements directs et l'axe de la rue,  $\lambda$  l'angle zénithale,  $\lambda_0$  représente l'angle zénithal à partir duquel le soleil illumine le sol de la rue,

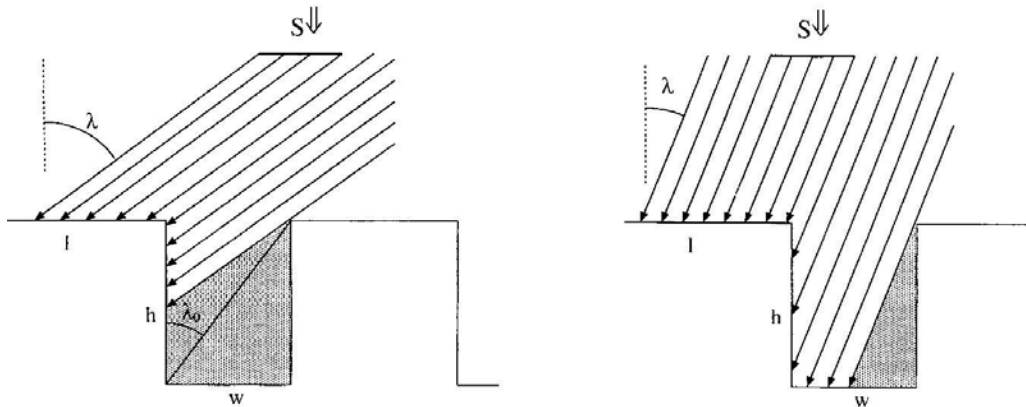


Figure A2 : Le rayonnement solaire reçu dans une rue perpendiculaire à la direction du soleil [MASSON 1999]

Le flux solaire direct moyen reçu par chaque mur et par le sol, selon une direction des rues perpendiculaire à la direction du soleil ( $\theta = \pi/2$ , figure), est défini pour chaque surface.

$$S_w^\downarrow \left( \theta = \frac{\pi}{2} \right) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{w}{h} S^\downarrow & \text{if } \lambda > \lambda_0 \\ \frac{1}{2} \tan(\lambda) S^\downarrow & \text{if } \lambda < \lambda_0 \end{cases}$$

$$S_r^\downarrow \left( \theta = \frac{\pi}{2} \right) = \begin{cases} 0 & \text{if } \lambda > \lambda_0 \\ \left( 1 - \frac{h}{w} \tan(\lambda) \right) S^\downarrow & \text{if } \lambda < \lambda_0 \end{cases}$$

Pour prendre en compte les autres directions possibles des rues, l'expression de la largeur des rues « w » sera remplacée par « w/sin( $\theta$ ) », et les flux du mur multipliés par sin( $\theta$ ) . Un paramètre «  $\theta_0$  » représente l'orientation

« critique » de la rue pour laquelle le sol n'est plus ensoleillé ou pour lequel le rayonnement est minimal (quand le soleil est très bas) :

$$\theta_0 = \arcsin \left( \min \left[ \frac{w}{h} \frac{1}{\tan(\lambda)}; 1 \right] \right)$$

Pour établir la moyenne du flux en considérant l'ensemble des orientations, deux intégrations sont établies, une entre  $\theta = 0$  et  $\theta = \theta_0$ , et l'autre entre  $\theta = \theta_0$  et  $\theta = \pi/2$ . Le flux solaire direct est alors formulé pour le sol, les murs et les toits par :

$$S_r^\downarrow = S^\downarrow \left[ \frac{2\theta_0}{\pi} - \frac{2}{\pi} \frac{h}{w} \tan(\lambda) (1 - \cos(\theta_0)) \right]$$

$$S_w^\downarrow = S^\downarrow \left[ \frac{w}{h} \left( \frac{1}{2} - \frac{\theta_0}{\pi} \right) + \frac{1}{\pi} \tan(\lambda) (1 - \cos(\theta_0)) \right]$$

$$S_R^\downarrow = S^\downarrow$$

Avec  $S_r^\downarrow + 2 (h/w) S_w^\downarrow = S^\downarrow$

#### Les réflexions du rayonnement solaire

Les rayonnements solaires piégés par la rue et reçus par les surfaces ( $S_s^\downarrow$ ) sont directement déduits des facteurs de vue du ciel. A cause du prospect de la rue et la possibilité que les matériaux de surfaces aient un albédo très important (peinture blanche, neige), le bilan des rayonnements de courtes longueurs d'ondes est calculé à partir de la résolution d'un système géométrique pour un nombre infini de réflexions (les réflexions sont isotropiques, et non spéculaires).

La somme des réflexions à travers le sol de la rue et les murs sont formulés par :

$$M_r = \frac{R_r(0) + (1 - \Psi_r) \bar{\alpha}_r (R_w(0) + \Psi_w \alpha_w R_r(0))}{1 - (1 - 2\Psi_w) \alpha_w + (1 - \Psi_r) \Psi_w \bar{\alpha}_r \alpha_w}$$

$$M_w = \frac{R_w(0) + \Psi_w \alpha_w R_r(0)}{1 - (1 - 2\Psi_w) \alpha_w + (1 - \Psi_r) \Psi_w \bar{\alpha}_r \alpha_w}$$

Avec :

$$R_r(0) = \bar{\alpha}_r S_r^\downarrow + \bar{\alpha}_r S_r^\downarrow$$

$$R_w(0) = \alpha_w S_w^\downarrow + \alpha_w S_w^\downarrow$$

Le rayonnement solaire total absorbé par chaque surface est :

$$S_r^* = (1 - \alpha_r) S_r^\downarrow + (1 - \alpha_r) S_r^\downarrow + (1 - \alpha_r) (1 - \Psi_r) M_w$$

$$S_w^* = (1 - \alpha_w) S_w^\downarrow + (1 - \alpha_w) S_w^\downarrow + (1 - \alpha_w) (1 - 2\Psi_w) M_w + (1 - \alpha_w) \Psi_w M_r$$

$$S_R^* = (1 - \alpha_R) S_R^\downarrow + (1 - \alpha_R) S_R^\downarrow$$

- Les flux anthropogéniques

Les activités humaines dans la ville produisent une quantité considérable de chaleur et d'humidité qui vont se rajouter aux sources naturelles. La plus considérable d'entre les sources est sans doute celle qui résulte du chauffage des bâtiments, qui se traduit par le maintien « forcé » d'une température constante à l'intérieur des bâtiments «  $T_{\text{bid}}$  ». Une valeur par défaut de 17°C ( 290.15 K) est attribuée dans le modèle. Le flux de chaleur est alors transmis par conduction à travers les toits et les murs.

TEB prend aussi en considération les sources de combustion principalement dues au transport et aux activités industrielles. Ces derniers produisent des flux de chaleur et d'humidité, qui sont différent d'une ville à une autre. Les flux de chaleur anthropogéniques sont donc des paramètres sources qui ne dépendent pas des propriétés morphologiques des surfaces.

- Les flux turbulents

Le vent dans la rue

L'écoulement du vent est très important pour le calcul du transfert des flux entre l'air de la rue et les surfaces du sol et des murs. Pour cela, le modèle TEB définit la composante verticale de la vitesse du vent le long des murs «  $W_{\text{can}}$  » et sa composante horizontale «  $C_{\text{an}}$  ». A partir de la littérature, [MASSON 1999, p.374] la formulation retenue de  $W_{\text{can}}$  est la suivante :

$$W_{\text{can}} = u_* = \sqrt{C_d} |U_a|$$

$U_a$  représente la vélocité et  $C_d$  le coefficient de drainage de l'air. Il est calculé à partir des températures et humidités au-dessus et dans le canyon, et à partir de la longueur de rugosité :  $Z_{0\text{town}}$

La vitesse horizontale est estimée à mi-hauteur de la hauteur de la rue. Elle est calculée à partir de la vitesse du vent au-dessus du canyon par une loi logarithmique, et la hauteur de déplacement est égale à deux tiers de la hauteur de la rue à partir du sol.

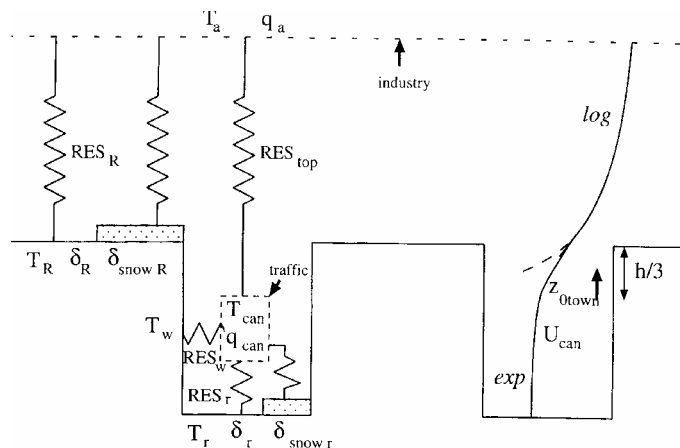


Figure A3 : Résistances aérodynamiques et profil de vent dans le modèle TEB [MASSON 1999]

La vitesse du vent au-dessus de la rue est donnée par :

$$U_{\text{top}} = \frac{2}{\pi} \frac{\ln\left(\frac{h/3}{z_{0\text{town}}}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta z + h/3}{z_{0\text{town}}}\right)} |U_a|,$$

Où  $\Delta Z$  est la hauteur de la canopée urbaine au-dessus des toits.

Pour calculer la vitesse dans la rue à partir de cette dernière formulation, un rapport exponentiel a été choisi [Arya 1988]<sup>4</sup> :

$$U_{\text{can}} = U_{\text{top}} \exp(-N/2)$$

N, étant égal à  $0.5h/w$ .

La vitesse moyenne du vent est donnée par :

$$U_{\text{can}} = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{1}{4} \frac{h}{w}\right) \frac{\ln\left(\frac{h/3}{z_{0\text{town}}}\right)}{\ln\left(\frac{\Delta z + h/3}{z_{0\text{town}}}\right)} |U_a|$$

La longueur de rugosité est définie par une approximation à partir de travaux divers [Bottema 1997]<sup>5</sup>, comme étant :  $Z_{0\text{town}} = h/10$  [MASSON 1999], mais cette valeur pourrait être modifiée en cas de mesures sur site.

#### Flux de chaleur entre l'air du canyon et l'atmosphère

Au-dessus du canyon, les flux sont estimés à partir d'une approche classique de la couche limite. Cependant, les valeurs de température et d'humidité de l'air du canyon sont calculées en fonction des surfaces de ce dernier. La résistance aérodynamique au-dessus de la rue, appelée  $RES_{\text{top}}$ , est calculée selon la longueur de rugosité utilisant les coefficients de stabilité [Mascart et al. 1995]. Les flux turbulents de chaleur et d'humidité entre l'air du canyon et l'atmosphère sont calculés à partir de :

$$H_{\text{top}} = C_{p,d} \rho_a (\hat{T}_a - T_{\text{can}}) / RES_{\text{top}}$$

$$LE_{\text{top}} = L_v \rho_a (\hat{q}_a - q_{\text{can}}) / RES_{\text{top}}$$

#### Flux de chaleur latente et sensible dans la rue (entre les murs, le sol et l'air de la rue)

Des formulations aérodynamiques ont été utilisées à partir de la littérature, pour définir les échanges entre les surfaces qui composent la rue (sol et murs) et l'air qui y est contenu [Mills 1993, etc.]. Un rapport direct entre la résistance aérodynamique des surfaces et les deux composantes de la vitesse du vent est donné par :

$$RES_r = RES_w = \left( 11.8 + 4.2 \sqrt{U_{\text{can}}^2 + W_{\text{can}}^2} \right)^{-1}$$

Les formulations retenues pour calculer les flux de chaleur latente et sensible entre les surfaces de la rue et l'air sont données par la relation ci dessous, avec :  $\rho_a$ , la densité de l'air dans la canopée,  $C_{p,d}$ , la capacité thermique de l'air sec, et  $\delta$ , la fraction d'eau en surface.

Les flux de chaleur sensible dépendent de quatre paramètres :

<sup>4</sup> Arya, S.P. 1988: Introduction to Micrometeorology, Academic Press, Inc., New York, 303 pp.

<sup>5</sup> Bottema, M. : Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion, Atmos. Environ. 18, 3059-3075.

<sup>6</sup> D'autres méthodes comme celle développée par [Grimmond et Oke 1999] permettent le calcul de la rugosité au travers une « méthode morphométrique ». A propos de cette méthode voir le dernier chapitre.

$$H_r = C_{p,d} \rho_a (T_r - T_{\text{can}}) / \text{RES}_r,$$

$$H_w = C_{p,d} \rho_a (T_w - T_{\text{can}}) / \text{RES}_w,$$

$$LE_r = L_v \rho_a \delta_r (q_{\text{sat}}(T_r, p_s) - q_{\text{can}}) / \text{RES}_r$$

$$LE_w = 0$$

- Température et humidité dans la rue

Le calcul des flux de chaleurs latente et sensible au-dessus de la rue, de même que la température moyenne et l'humidité de l'air de la rue, intègrent l'ensemble des flux anthropogéniques (circulation automobile) :

$$H_{\text{top}} = H_r + (2h/w) H_w + H_{\text{traffic}} (1/1-a_{\text{bld}})$$

$$LE_{\text{top}} = LE_r + LE_{\text{traffic}} (1/1-a_{\text{bld}})$$

$$T_{\text{can}} = \frac{\frac{T_r}{\text{RES}_r} + \frac{2h}{w} \frac{T_w}{\text{RES}_w} + \frac{\hat{T}_a}{\text{RES}_{\text{top}}} + \frac{H_{\text{traffic}}}{C_{p,d} \rho_a (1-a_{\text{bld}})}}{\frac{1}{\text{RES}_r} + \frac{2h}{w} \frac{1}{\text{RES}_w} + \frac{1}{\text{RES}_{\text{top}}}}$$

$$q_{\text{can}} = \frac{\frac{\delta_r q_{\text{sat}}(T_r, p_s)}{\text{RES}_r} + \frac{\hat{q}_a}{\text{RES}_{\text{top}}} + \frac{LE_{\text{traffic}}}{L_v \rho_a (1-a_{\text{bld}})}}{\frac{\delta_r}{\text{RES}_r} + \frac{1}{\text{RES}_{\text{top}}}}$$

## ANNEXE 02 : TABLEAUX SYNTHETIQUES DES RESULTATS DU BILAN ENERGETIQUE OBTENUS PAR TEB

### Variables Energétiques calculées sur la période d'ETE (moyennes sur six années de données météorologiques)

Heures	Etat 01				Etat 02				Etat 03				Etat 04				Etat 05			
	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs
0	-48	-1	8	-30	-50	-5	7	-28	-44	2	6	-33	-43	13	2	-55	-51	45	3	-96
1	-48	0	8	-29	-50	-4	7	-27	-44	3	6	-32	-42	13	1	-54	-50	44	3	-94
2	-47	0	7	-28	-49	-4	7	-27	-43	3	6	-31	-41	13	1	-53	-48	43	2	-91
3	-46	0	7	-27	-49	-3	7	-26	-43	3	6	-30	-40	12	1	-51	-47	41	2	-88
4	-46	0	6	-26	-49	-3	6	-26	-42	3	5	-30	-40	12	1	-50	-45	40	2	-85
5	-45	0	6	-25	-48	-3	6	-24	-41	3	5	-28	-38	12	1	-48	-43	38	2	-81
6	-40	0	6	-21	-43	-2	6	-21	-37	3	5	-24	-34	11	1	-43	-36	34	2	-70
7	-13	0	7	-3	-15	-2	7	-2	-11	2	6	-4	-10	9	1	-17	-4	29	3	-34
8	49	7	15	28	50	7	16	28	49	7	12	30	48	14	7	27	70	37	7	26
9	136	31	32	49	138	33	34	48	131	31	27	54	127	41	20	63	170	65	16	87
10	228	66	51	60	231	70	54	57	218	66	44	68	211	82	36	89	273	107	26	135
11	309	105	67	65	311	109	72	58	293	105	56	74	286	128	48	103	359	156	33	162
12	362	137	76	61	364	141	82	54	342	137	62	73	335	171	52	103	414	204	34	168
13	387	155	82	53	391	158	89	48	366	157	66	66	355	197	54	95	443	239	33	161
14	368	156	79	39	375	159	87	36	349	161	62	52	334	201	48	76	426	252	26	138
15	341	148	75	30	350	152	82	28	324	155	58	42	307	195	43	61	397	252	21	116
16	286	127	67	18	295	130	74	17	272	134	51	28	255	171	36	41	336	229	17	82
17	215	101	57	3	222	103	62	2	205	108	44	10	190	140	30	15	254	196	15	39
18	129	68	43	-12	133	68	46	-12	123	73	33	-8	111	99	21	-12	155	150	11	-10
19	43	36	27	-26	44	34	29	-25	40	38	21	-24	33	57	12	-37	55	102	8	-56
20	-22	12	16	-37	-23	9	16	-36	-21	13	13	-37	-25	27	6	-57	-21	64	5	-89
21	-48	2	10	-39	-50	-2	9	-37	-46	3	8	-41	-47	15	3	-64	-51	48	4	-101
22	-49	-1	8	-34	-52	-5	8	-32	-47	1	7	-37	-47	13	2	-60	-54	46	3	-101
23	-49	-1	8	-32	-51	-5	7	-30	-45	2	7	-35	-45	13	2	-57	-53	45	3	-98
24	-48	-1	8	-30	-50	-5	7	-28	-44	2	6	-33	-43	13	2	-55	-51	45	3	-96



**Variables Energétiques calculées sur la période d'HIVER  
(moyennes sur six années de données météorologiques)**

Heures	Etat 01				Etat 02				Etat 03				Etat 04				Etat 05			
	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs	Q*	Qh	Qe	Qs
0	-40	-8	4	-15	-42	-10	3	-15	-38	-6	3	-19	-37	3	1	-40	-37	14	4	-53
1	-41	-8	4	-15	-42	-10	3	-15	-38	-6	3	-19	-37	3	1	-40	-38	14	3	-53
2	-40	-7	3	-15	-42	-9	3	-14	-38	-5	3	-18	-37	3	1	-39	-37	14	3	-53
3	-40	-7	3	-15	-42	-9	3	-14	-38	-5	3	-18	-37	3	1	-39	-37	13	3	-52
4	-40	-7	3	-14	-42	-9	3	-13	-37	-5	3	-17	-36	3	0	-38	-36	13	3	-50
5	-40	-7	3	-14	-42	-9	3	-14	-38	-5	3	-18	-36	3	0	-38	-36	12	3	-50
6	-39	-7	3	-13	-41	-9	3	-12	-36	-5	3	-16	-35	3	0	-36	-34	12	3	-47
7	-38	-7	3	-12	-40	-9	3	-12	-35	-5	3	-15	-34	3	0	-35	-32	11	3	-44
8	-30	-6	4	-6	-31	-8	3	-6	-28	-5	3	-10	-27	3	1	-28	-22	10	3	-33
9	1	-5	7	11	1	-7	7	12	2	-3	6	9	1	5	3	-6	14	12	5	-2
10	57	3	19	31	58	2	20	32	55	5	17	30	53	17	13	23	80	28	12	39
11	118	17	37	42	120	17	40	42	113	22	32	42	109	38	27	42	150	52	20	74
12	167	33	55	43	171	33	59	42	160	40	47	45	154	60	40	50	205	79	28	94
13	187	41	66	37	192	41	72	36	180	50	55	40	171	74	46	47	228	99	30	95
14	187	44	69	29	192	44	75	28	179	54	56	33	170	82	46	38	227	110	27	85
15	162	38	66	19	167	38	72	18	155	50	52	22	145	77	41	23	198	109	23	62
16	112	25	54	8	116	24	59	7	107	36	42	9	99	60	32	4	140	90	17	31
17	54	9	39	-3	56	7	42	-4	51	17	30	-3	45	37	22	-15	72	63	12	-4
18	-2	-3	22	-15	-3	-6	24	-14	-2	2	17	-16	-5	17	12	-34	7	36	8	-36
19	-33	-9	10	-18	-34	-11	10	-18	-32	-6	8	-21	-33	5	5	-41	-29	18	6	-51
20	-39	-9	5	-17	-41	-12	5	-17	-38	-7	4	-20	-38	2	2	-41	-37	14	5	-54
21	-39	-9	5	-16	-41	-11	4	-15	-37	-7	4	-19	-38	2	2	-40	-37	13	4	-53
22	-39	-9	4	-15	-41	-11	4	-14	-37	-7	3	-18	-37	2	1	-38	-37	13	4	-52
23	-39	-9	4	-15	-41	-11	4	-14	-37	-7	3	-18	-37	2	1	-38	-37	13	4	-53
24	-40	-8	4	-15	-42	-10	3	-15	-38	-6	3	-19	-37	3	1	-40	-37	14	4	-53

ANNEXE 03 : RESULTATS DES SIMULATIONS AERAULIQUES AVEC FLUENT

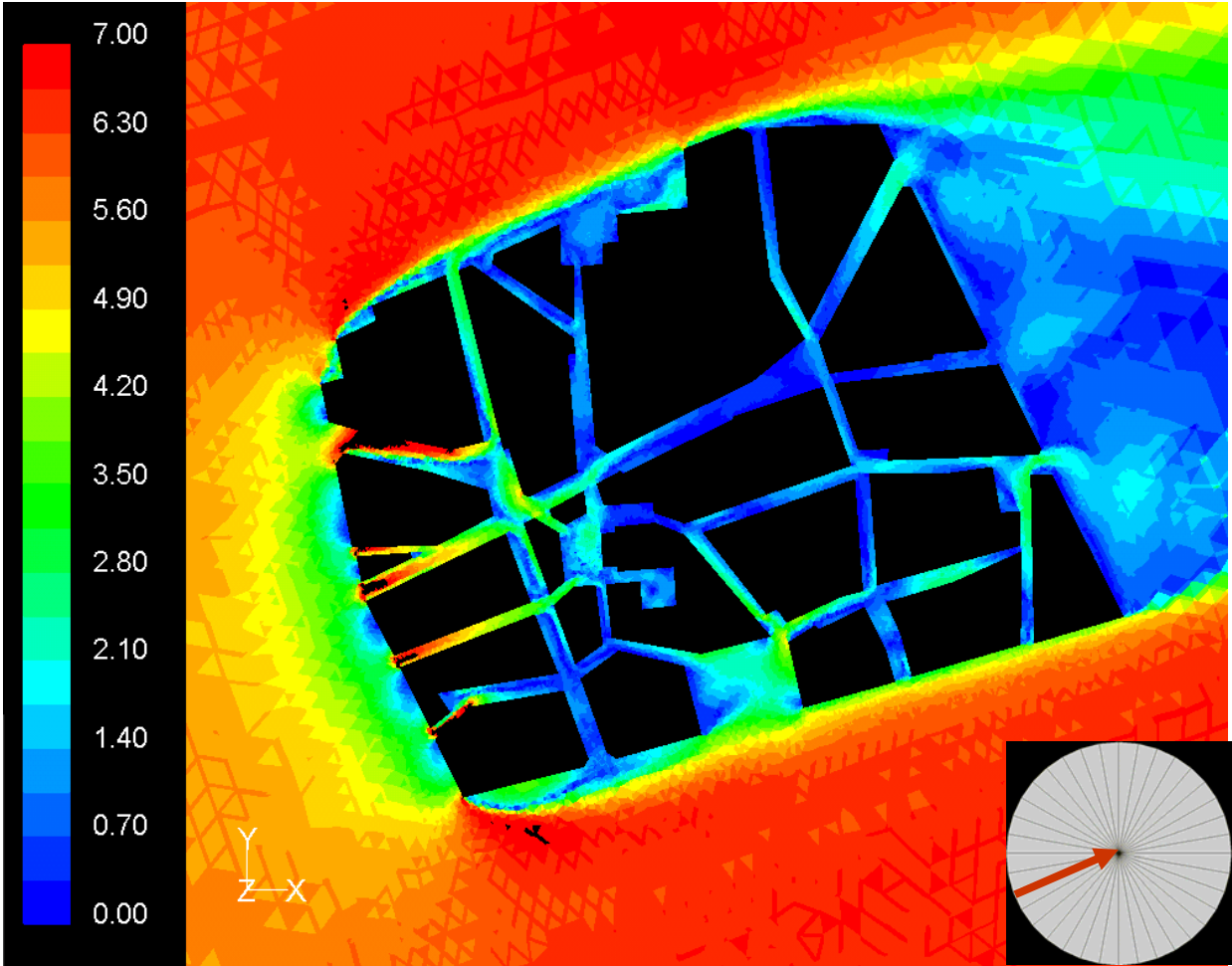
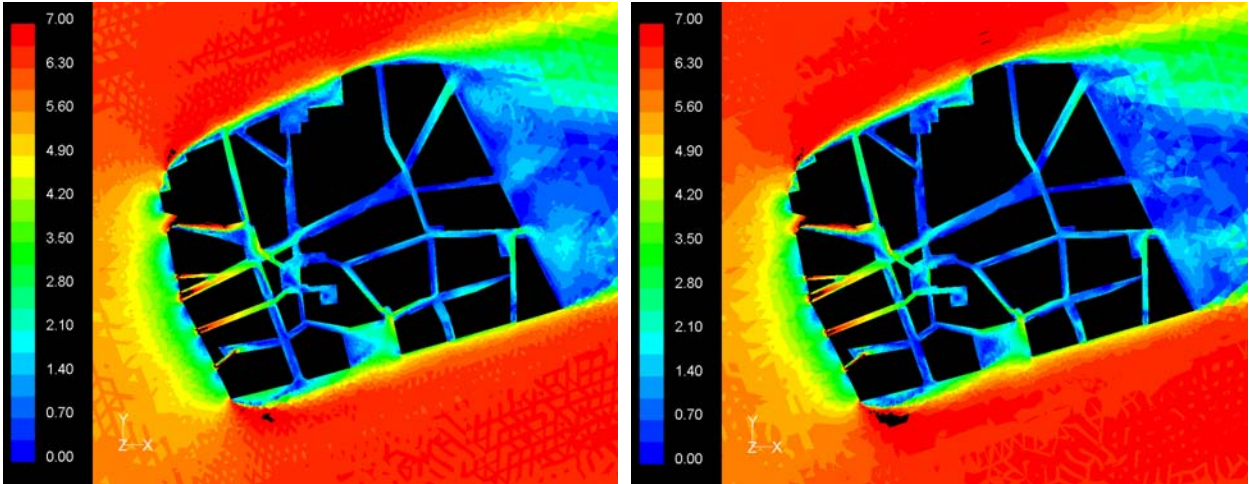


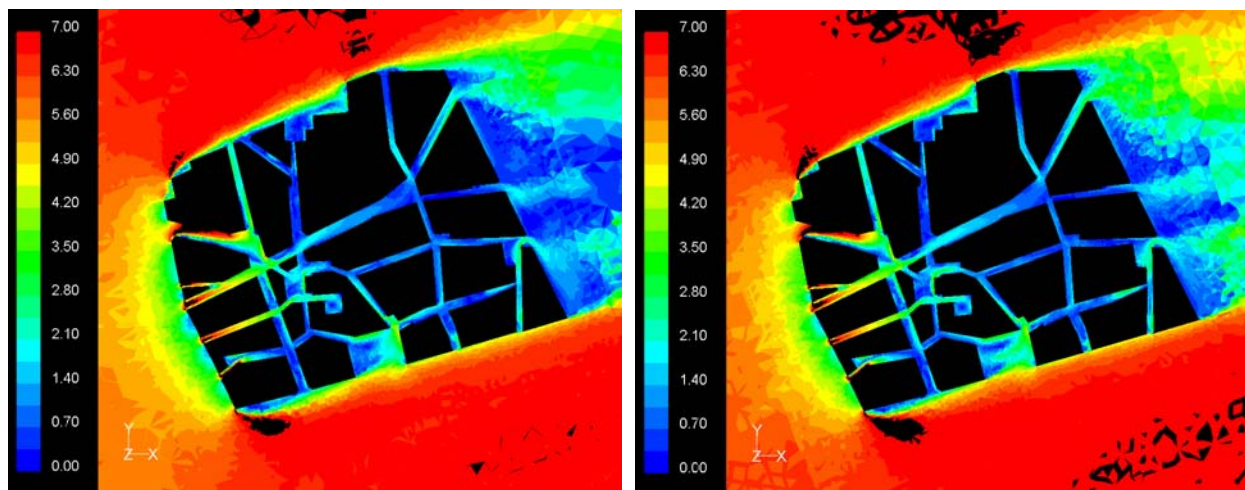
Figure A.4 : Distribution des vitesses du vent à 2m du sol en m/s



à 4m du sol

à 8m du sol

Figure A.5 : Distribution des vitesses du vent à 4m et 8m du sol en m/s



à 12m du sol

à 16m du sol

Figure A.6 : Distribution des vitesses du vent à 12m et 16m du sol en m/s



Figure A.7 : Application des valeurs sur le maillage des rues de Solene et même visualisation des classes

## ANNEXE 04 : LES LARGEURS DES RUES SELON LES PLANS DE 1756, 1835 ET 1999

## 1. Différentes largeurs des rues et largeur moyenne selon le plan Cacault de 1756

N° ilots W	W moyen		30-38	4,23	4,23	22.6	4,77	4,77	11.12	6,08	5,59
6.11	4,55	5,54	25-34	11,98	11,98	22.12	5,96	5,96			5,09
	5,67		14-15	4,81	5,48	12.21	2,67	5,08	A1-1	38,38	
	6,41			6,15			5,36			25,09	
6.22	4,4	4,40	14-16	2,45	2,45		7,22			4,51	
11.10	4,26	5,22	2.3	5,25	4,18	21.11	7,68	6,72		6,38	
	4,61			3,1			6,33		13-23	2,5	2,50
	6,8		31-32	2,3	4,00		5,58		22-23	5,9	7,05
11.21	7,24	6,64		5,7			7,28			7,34	
	6,67		40-42	8,27	8,27	10.11	4,17	5,23		6,48	
	5,91		37-38	8,63	7,42		3,19			8,48	
	5,8			9,69			6,27		24-22	17,22	
	7,6			7,8			7,27		19-29	7,22	7,07
11.12	4,79	4,79		5,52		10.20	5,37	5,82		6,92	
12.22	6,08	6,08		5,48			5,41		29-35	5,62	5,92
10.9	3,86	5,19	44-43	9,3	7,90		6,69			5,48	
	5,57			6,5		1.2	4,46	4,94		6,42	
	6,28		23-24	6,6	6,85		3,69			7,43	
	5,06			7,1			6,75			4,67	
10.20	6,5	8,23	16-24	7,49	7,09		5,88		29-30	4,26	4,53
	9,96			6,68			3,92			5,07	
20-19	8,88	8,40	24-33	7,27	5,41	2.6	5,1	5,08		4,27	
	8,68			3,54			2,8		30-36	6,4	6,59
	7,65		32-33	4,63	6,62		4,28			6,18	
20-21	7,35	6,05		8,6			8,12			7,19	
	7,82		3.6	2,99	2,99	5.6	4,92	4,10	30-37	7,58	5,70
	4,67		34-R	3,84	3,84		3,27			4,61	
	4,37		25-25A	2,7	2,70	5.10	3,96	3,73		4,92	
22-21	5,65	5,46	26-25A	3,58	3,58		3,49		36-37	7,05	6,59
	6,26		33-34	4,48	3,36	5-EGLISE	3,52	5,49		6,12	
	4,87			3,11			2,23		36-44	2,72	3,72
	8,1			2,5			3,72			2,44	
	2,44		3.4	5,32	6,04		11,74			6,38	
9.18	7,2	7,20		3,95			8,23			3,33	
19-18	4,73	5,65		8,84			3,48		44-45	5,17	4,24
	6,45		4-R	2,3	5,61	9-EGLISE	6,4	6,40		3,3	
	5,76			4,5		9.10	3,08	4,47	35-36	5,42	6,30
18-28	5,31	5,31		1,5			4,09			7,17	
38-31	4,97	6,04		14,15			6,1		35-43	1,09	3,04
	7,1		6.7	4,46	5,59		4,62			2,12	
32-41	2,93	3,94		4,83		10.20	5,37	5,82		5,15	
	5,84			6,57			5,41			3,8	
	3,04			6,51			6,69		<b>LARGEUR MOYENNE</b>	<b>5,73</b>	
38-39	7,16	8,62	7-R	4,73	9,84	19-20	9,43	8,19			
	10,08			11,96			7,48				
41-42	7,49	7,49		11,43			7,65				
38-40	9,82	9,82		16,03		9.18	8,48	7,80			
40-A40	6,43	6,43		5,05			7,11				
42-A42	6,98	6,99	07-avr	7	7,00	10-EGLISE	5,69	5,09			
	8,6		7.13	5,74	4,50		5,62				
	5,4			3,68			3,96				
38-22	4,49	4,49		4,08		11.6	4,75	5,34			
26-34	5,1	5,62	23-13	2,65	2,73		4,76				
	6,14			2,81			6,52				

## 2. Différentes largeurs des rues et largeur moyenne selon le plan de 1835

N° îlots	W	W moyen	46.45	4.93	4.51	5.43	4.85				
29.19	5,92	6,11	301.302	1,39	1,39	6_2.6_1	10,04	20,24	5A.5B	4,37	4,80
	6,37		36.37	6,16	5,86		9,93			4,61	
	6,05			5,56		11A.6_1	40,75	6,34		5,38	
301.21	6,11	6,11	302.221	7,01	7,01		5,79		2.3	4,85	6,14
302.21	7,36	7,36	37.382	7,64	7,64	11A.12	6,88			3,7	
384.221	6,37	6,37	383.31	2,29	8,41		5,02	4,27		3,14	
32.24	5,53	14,56		12,3		12.6_1	3,51			3,23	
	33,24			10,65			4,04	3,73	2.6_4	5,24	5,26
	4,92		382.39	5,16	6,87		4,02			5,28	
43.28	5,73	4,94		7,87		7.13	3,12		3.6_3	4,29	4,74
	4,15			7,57			6,79	6,07		5,19	
35.29	5,61	6,08	381.40	10,74	8,82	4.7	5,34		6_4.6_3	4,39	5,09
	6,9			6,9			6,01	6,25		5,72	
	5,72		31.32	1,64	2,65	N1.7	6,48				
36.301	7,22	5,96		1,91		13.23	7,87	7,87	1B.2	5,17	11,16
	6,22			4,39			4,47	5,16		18,69	
	5,01		39.41	3,78	3,78	13.N3	5,85			9,62	
	5,4		32.33	9,93	9,93		7,72	7,60	1A.1B	7,65	13,04
36.302	6,39	6,39	23.13	4,43	6,63	13.6_1	7,47			23,14	
37.302	6,8	5,74		8			5,22	8,83		8,33	
	4,67			7,47			15,25		10.11A	5,73	6,90
382.221	PLACE		6.222	3,57	3,57	23.6_1	6,02			5,17	
	21,63X34,		12.222	7,89	7,89		6,54	6,15	5C.6_4	9,8	7,82
	72		11.21	4,7	5,32	3.4	5,76			6,36	
41.32	6,72	5,70		5,94			5,57	5,21	5C.1A	7,3	7,12
	4,86		10.20	5,17	5,06		5,14			6,93	
	5,53			4,95			5,28			7,14	
44.35	3,31	3,31	9.18	7,25	8,89	1C.1B	4,84		6_3	PLACE	
45.36	3,74	5,02		10,52			9,81	7,25		84,82X56,	
	6,29		24.23	6,12	5,55	9.10	4,69			44	
381.37	6,35	6,35		6,12	5,55		4,11	4,53	N1.N2	5,56	7,44
42.41	5,3	5,22	221.222	4,98			5,55		N2.N3	8,01	7,54
	5,94		23.221	5,92	5,92		3,93			8,76	
	4,01			6,37	6,32	10.20	4,42	4,37		8,71	
	5,64			5,87			4,21			4,66	
28.29	4,26	4,19	222.21	6,72			4,49		23.X	2,77	5,33
	4,81		221.21	6,06	6,06	21.11C	4,73	4,73	11C.11A	6,65	9,27
	3,49			6,68	5,06	21.11A	6,14	6,23		6,58	
43.35	16,93	11,40	21.20	3,43			5,46		N4.5B	14,58	10,96
	5,86			6,64	5,92		7,08			4,2	
43.44	6,11	6,70		6,42		9.18	6,81	8,23	5A.N4	14,11	11,01
	7,29			5,48			9,64		N4.N5	9,34	9,46
29.301	5,9	5,90		5,13		5C.10	4,83	5,26		9,57	
35.36	4,6	5,36	20.19	7,99	7,50		6,81		N4.1B	PLACE	
	5,21			6,7			4,15			73,63X69,	
	6,27			7,82		5B.5C	PLACE			24	
44.45	7,02	19,94	19.18	3,88	5,10		45,07X39,		1C.4	PLACE	
	44,46			4,06			75			42,88X62,	
	8,35			7,27		5A.9	3,28	4,53	<b>MOYENNE</b>	37	<b>6,80</b>
				4,78			4,61				
							5,38				

## 3. Différentes largeurs des rues et largeur moyenne selon le plan Cacault de 1999

<i>N° îlots</i>	<i>W</i>	<i>W moyen</i>									
			32.41A	4,08	4,89	29A.35	5,51	5,51	19A.19B	15,03	15,03
				4,86		28B.28A	14,94	14,93	7A.7B	10,02	9,94
				5,26			14,91			9,86	
				5,34		28C.29	15,16	15,16	7A.N2	7,71	7,72
1B.1A	8,9	8,64	41A.41B	10,07	9,73	28C.18	8,07	6,70		7,72	
	8,38			9,85			5,75		6B.11	33,77	
1B.2A	10,43	9,49		10,12			7,1			48,63	
	10,1			10,09			5,87		a.11A	26,05	
	8,82			8,5		8A.18	6,94	5,95	a.b	12,78	12,78
	8,61		38A.41B	10,1	10,08		5,12		1A.1B	8,9	8,64
2A/2B	14,71	14,80		10,05			5,19			8,38	
	14,67		38B.41A	10	9,89		6,55		?24	15,32	15,32
	15,02			9,78		18.9A	7,78	7,09	20.10A	6,99	7,02
2B.3	6,43	7,24	38A.37	6,58	6,58		6,39			7,05	
	6,54			6,34		9A.9B	10	10,00	10A.11A	12,18	13,72
	7,88			6,81		9B.10B	8,1	8,13		15,26	
	8,1		36.37	6,03	6,00		8,16		11A.11A	6,33	6,33
3.4	10,42	10,45		5,97		10B.10A	14,82	14,82	2		
	10,57		30.36	6,17	5,96	9C.10C	7,87	7,87	11A2.11	4,55	4,47
	10,35			5,54		5A.5B	8,66	7,87	B	4,39	
3.b	10,59	10,24		6,18			9,06		20.21	6,8	6,25
	11,18		23.?	6,32	7,26		8,83			5,7	
	11,17			6,55			4,91		35.43a	4,71	2,83
	8,01			7,55		5B.1A	4,79	6,97		0,95	
				8,6			10,02		44.39	5,64	7,25
4.7C	6,18	6,15	21.?	5,29	7,42		5,17			7,99	
	6,12			4,92			7,9			8,11	
7C.7B	7,89	7,82		6,12		5C.1A	6,31	6,63	44.45	4,02	3,52
	7,74			10,31			6,97			2,62	
7C.N1	9,99	8,92		10,48			6,62			3,93	
	8,72		21.30	11,32	12,77	?5B	14,38	14,35	43.45	7,94	8,03
	8,04			13,51			14,35			8,11	
N1.N1bis	7,89	7,82		13,47			14,32		28C.18	8,07	6,70
	7,75		19A.20	9,87	9,67	43.35	4,35	4,35		5,75	
13.23	7,92	10,62		9,71		36.44	7,99	8,05		7,1	
	7,99			9,44			8,11			5,87	
	15,94		19A.29	8,01	6,12	38B.38A	5,91	5,91	8A.18	6,94	5,95
23.24	7,56	10,63		5,39		21.12	7,2	7,20		5,12	
	12,09			4,96		12.6A	6,25	5,81		5,19	
	12,24		29.35	5,7	5,83		4,5			6,55	
24.32	10,4	10,40		6,3			3,78		18.9A	7,78	7,09
	10,07			5,5			8,69			6,39	
24.24bis	7,19	6,01	28A.43	7	6,96	6A.13	7,76	8,25	9A.9B	10	10,00
	4,83			6,92			8,17		<b>LARGEUR MOYENNE</b>		<b>8,55 m</b>
32.24bis	9,68	9,74	6B.6A	11,59	11,59		8,81				
	9,8										

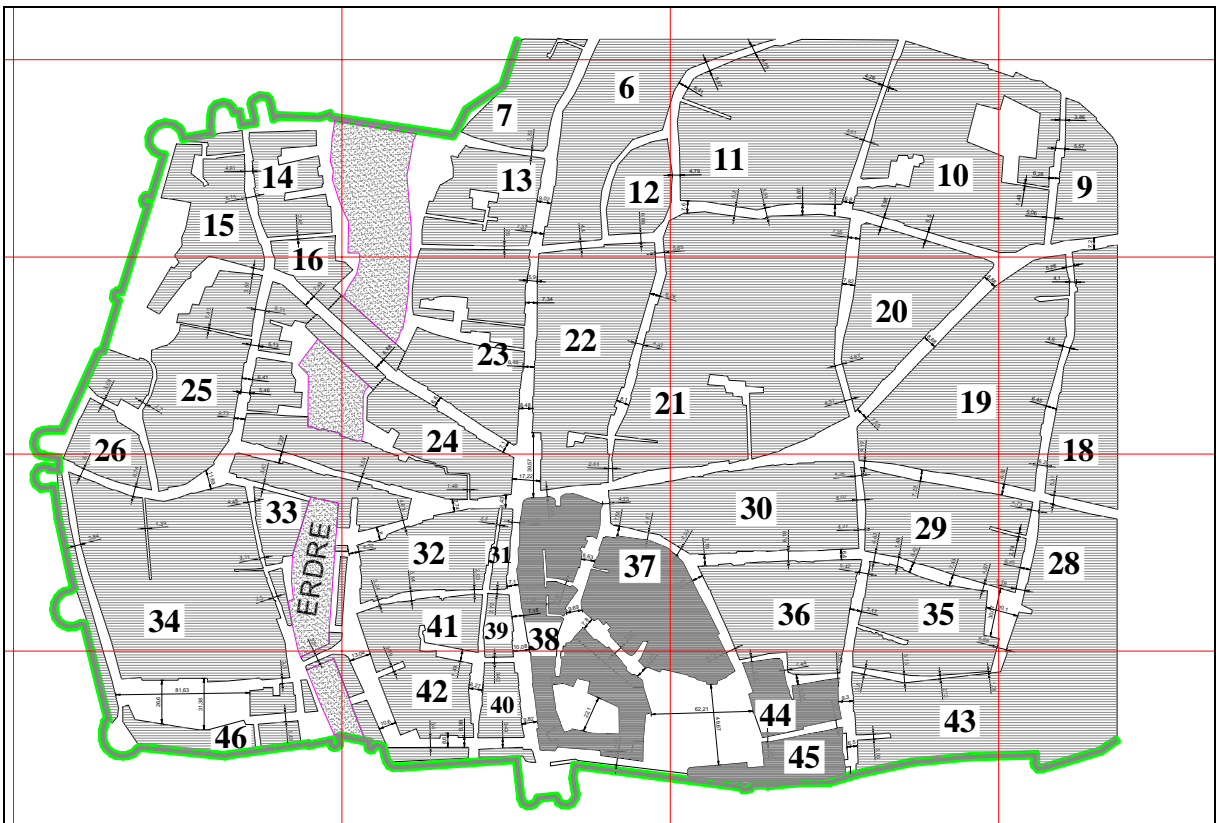
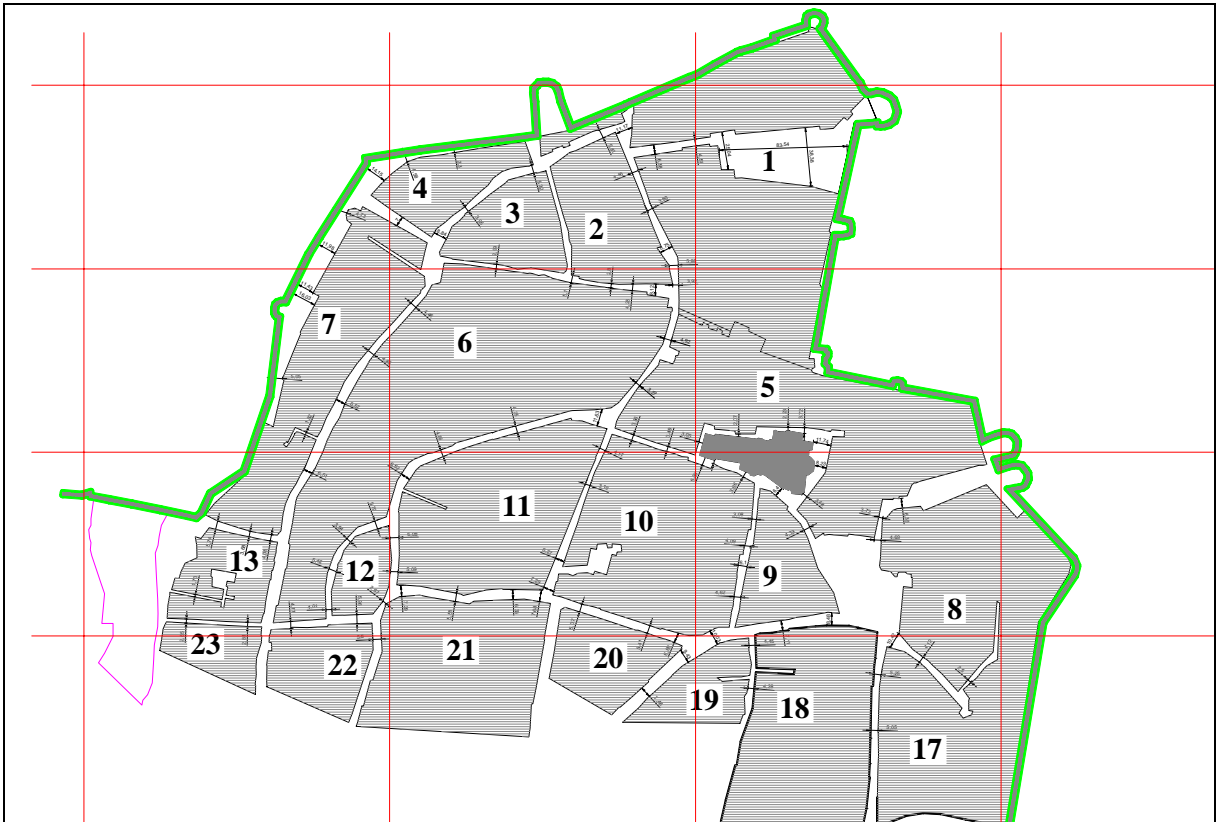


Figure A.8 : Plan de repérage des numéros d'îlots sur la reconstitution (à partir du plan Desbauvais) du plan Cacault (partie Nord et partie Sud)



## ANNEXE 05 : TAUX D'OUVERTURE DES PAROIS DE QUELQUES BATIMENTS DU CENTRE NANTES SELON DES ICONOGRAPHIES ANCIENNES



Figure A.9 : Iconographie du faubourg du pont Rousseau datée de 1711 [AMN CC 14- n°9]

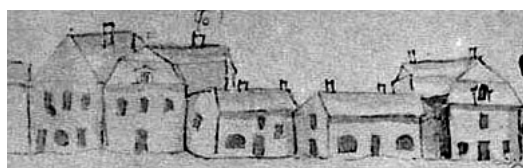


Figure A.10 : Extrait de l'iconographie du faubourg du pont Rousseau



Figure A.11 : Maison sur le pont Rousseau 1777 [LELIEVRE 1988, p.257] : **Taux d'ouverture : 18%**

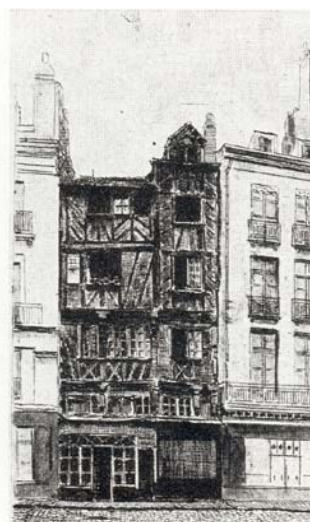


Figure A.12 : Maison en pan de bois au Bouffa : Rue Haute grande rue (maison du 15eme siècle) [COSNEAU 1978]  
**Taux d'ouverture : 20,32%**



Figure A.13 : Iconographie de maisons du quartier du Marchix [COSNEAU 1978]  
**Taux d'ouverture: 43,88%**





Figure A.14 : Façade d'un bâtiment de l'île Feydeau établie par Goubert en 1723 et extrait d'un module de façade  
[AMN, 5Fi 61] Taux d'ouverture : **34,80%**

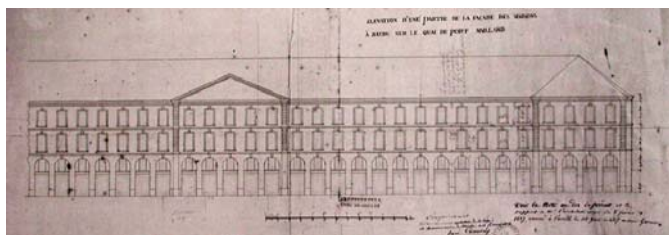


Figure A.15 : Façade d'un bâtiment du port Mallard établi par Ceineray en 1761 et extrait d'un module de façade  
[AMN, 5Fi 71] Taux d'ouverture : **41,96%**

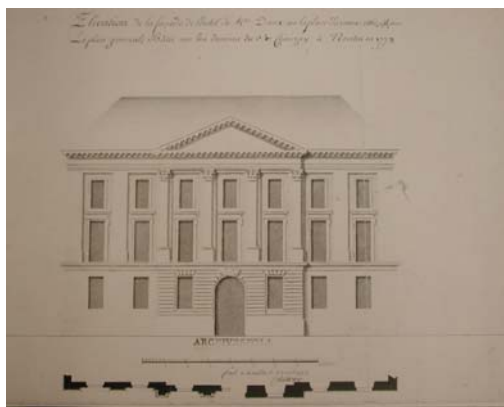


Figure A.16 : Façade du bâtiment de la place d'armes établi par Ceineray en 1773 et extrait d'un module de façade  
[AMN, 5Fi 59] Taux d'ouverture : **17,26%**

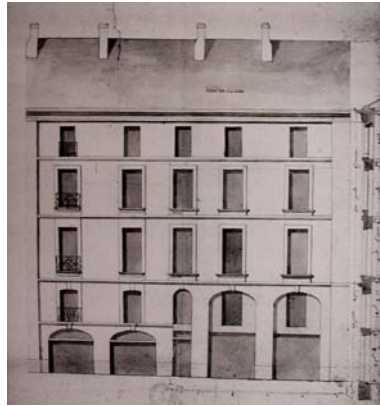


Figure A.17 : Façade rue St Clément établie par l'architecte Marmayou en 1779 et extrait d'un module de façade et son profil  
[AMN, 5Fi 52] Taux d'ouverture : 25,72%

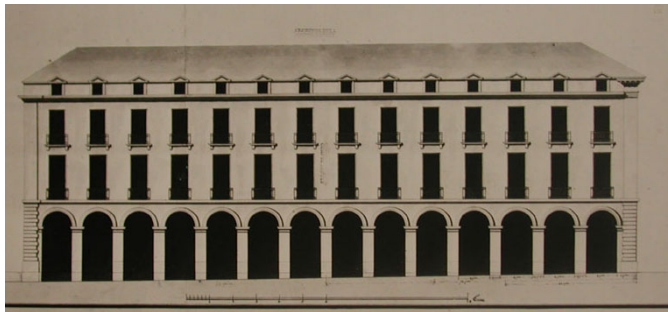


Figure A. 18 : Façade rue Évêché établie par l'architecte Crucy en 1783 et extrait d'un module de façade  
[AMN. 5Fi 54] Taux d'ouverture : 43,81%

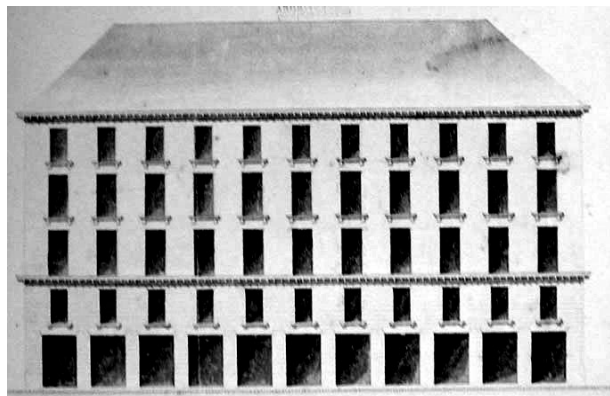


Figure : A.19 : Façade bâtiment de la place Royale par Crucy en 1788 et extrait d'un module de façade  
[AMN. 5Fi 59] **Taux d'ouverture : 36,59%**



Figure A.20 : Façade d'un bâtiment de la place St Pierre, concours de 1868 et extrait d'un module de façade  
[AMN 1Fi 29] **Taux d'ouverture : 35,75%**

# BIBLIOGRAPHIE

---

## OUVRAGES GENERAUX

- ADOLPHE, L. (1996). La maîtrise des ambiances, enjeux et stratégie, in. 74 , in cahiers de la recherche architecturale, Situations, n°37, 1<sup>er</sup> trimestre, 143p.
- ARNFIELD, A.J. (2003). Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, International journal of climatology, 23, Interscience, pp. 1-26.
- AUGOYARD, F. (1995). L'environnement sensible et les ambiances architecturales, In : l'Espace Géographique.
- AUGOYARD, J.F. (1998). Ambiances du lexique à l'épistémè, cours de DEA « ambiances architecturales et urbaines », Nantes / Grenoble.
- AUGOYARD, J.F. et TORGUE, H. (1995). Répertoire des effets sonores, Parenthèses, Paris, 174p.
- BARDET, G. (1943). Le facteur soleil en urbanisme, Technique et Architecture vol. 7-8 pp. 202-206.
- BOULEAU, N. (1999). Philosophies des mathématiques et de la modélisation du chercheur à l'ingénieur, l'harmattan, 363p.
- BOULEAU, N. (1999). Qualité et programmation des modèles, Ecole thématique : modélisation de la ville, Nantes : 20-24 septembre 1999, Communication orale.
- BOULEAU, N. (2002). La règle, le compas et le divan, plaisirs et passions, Seuil, Paris, 296p.
- CHEMETOFF , A. BERTHOMIEU , J-L. (1999). L'Ile de Nantes : le plan guide en projet, MeMo, Nantes, 95p.
- CHOAY, F. (1965). L'Urbanisme utopies et réalités, Seuil, Paris, 1965, 448p.
- CHOAY, F. (1980). La règle et le modèle : Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme. Seuil, Paris.
- CHOAY, F. (1991). L'urbanisme utopies et réalités une anthologie, Seuil, Paris, 400p.
- CHOISY, A. (1971). Vitruve textes et traduction, tome 1, Paris, De Noble, pp. 5-16.
- DESCHILLER, J S. et EVANS, M. (1996). Training architects and planners to design with urban microclimates, Atmospheric Environment vol.30 n°3 pp.449-454.
- DHOMBRES, J. (1994). Les sciences de la forme aujourd'hui, entretiens effectués par Noël, E. , Seuil, Paris, pp. 13-25.
- EPRON J.P. (sous la direction de) (1992). Architecture une anthologie, Tome 1, la culture architecturale, IFA, Pierre Mardaga, 383p.
- FROMMES, B. (1982). Urban and Building Climatology in Practice and professional education, Energy and Building vol.5, pp. 31-37.
- GOLANY, G.S. (1995). Urban design morphology and thermal performance, Atmospheric environment vol. 30 n°3 455-465p.
- GIRARD, Ch. (1986), Architecture et concepts nomades, Mardaga, Bruxelles, 224p.
- KOPP, A. PAULY, D. BOUCHER, F. (1980). l'architecture de la reconstruction : solutions obligées ou occasions perdues ? France 1940-1945, Université de Paris VIII - Vincennes, Paris, 1980.

- LASSANCE, G. (1998). Analyse du rôle des références dans la conception : éléments pour une dynamique des représentations du projet d'ambiance lumineuse en architecture, thèse de doctorat, Université de Nantes, Ecole d'architecture de Nantes, GRECO, Ecole d'architecture de Toulouse, 315p.
- MILLS, G. (1999). Urban climatology and urban design, ICUC Sydney, proceeding Cd rom, 06p.
- MORIN, E. (1977). La méthode, T. 1. La nature de la nature, Seuil, Paris, 399 p.
- MORIN, E. (2003). Sur l'interdisciplinarité, cahier de la recherche architecturale et urbaine, n°12, Monum Editions du patrimoine, Paris, pp. 13-20.
- PENEAU, J. P. (1983), Eclipse des méthodologies, Les cahiers de la recherche architecturale n°13, Parenthèses, Paris, pp. 25-59.
- PENEAU, J. P. (1993). Ajustements climatiques et tracés urbains au siècle des lumières, p.18, in sciences et techniques en perspective, V.24, Université de Nantes, Centre d'histoire des sciences et des techniques, 105p.
- PENEAU, J. P. (1995). Morphologie urbaine et climat urbain, Energie et climat urbain : actes de journée du CUEPE , pp. 19-30.
- PENEAU, J. P. (1998). Quelques éléments sur l'aérisme et l'ajustement climatique de la ville au siècle des lumières, thèse de doctorat, université de Nantes, Faculté des sciences et des techniques, Nantes, 432p.
- PENEAU, J. P. (1998). Références d'ambiances et ambiances de références, cours de DEA « Ambiances architecturales et urbaines », Nantes / Grenoble.
- RAGON, M. (1986). Histoire de l'architecture et de l'urbanisme modernes, tome 1 : Idéologies et pionniers, 374p. ; tome 2 : Naissance de la cité moderne, 348p. ; tome 3 : De Brasilia au post-modernisme, 402p. , Csterman, Paris, 1986.
- RAPPOPORT, A. (2003). Culture Architecture et design, In folio, Gollion, 160p.
- S.T.U (Services Techniques de L'urbanisme), (1987). Centre historiques, les outils de lecture, direction de l'architecture et de l'urbanisme, ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports, éditions du SITU, Paris, 77p.
- SERRES, M. (1975). Esthétique sur Carpaccio, Hermann, Paris, 156p.
- SHULZ, Ch. N. (1972). Système logique de l'architecture, Mardaga, Bruxelles, (traduction de « Intentions in architecture », Oslo, 1962), 305p.
- SWAID, H. BAREL, M. et HOFFMAN, M.E. (1993). A bioclimatic design methodology for urban outdoor spaces, Theoretical and Applied Climatology vol. 48 pp. 49-61.
- THAM, H. P. et al. (1999). Conflicting interests of planners, politicians and scientists in urban climatology as exemplified by the city of Freiburg I.B.R, Germany, ICUC Sydney, proceedings Cd rom, 07p.
- THOM R. et NOËL, E. (1993). Prédire n'est pas expliquer, Flammarion, Paris.
- THOM, R. (1972). Stabilité structurelle et morphogénèse, Benjamin, Paris.
- THOM, R. (1988), Esquisse d'une sémiophysique, physique aristotélicienne et théorie des catastrophes, InterEditions, Prs, 281 p.
- 

## **MORPHOLOGIE ET FORMES URBAINES**

- BORIE, A. MICHELONI, P. et PINON, P. (1999), Analyse morphologique et composition architecturale, Ecole d'architecture de Paris-la défense, Paris, 83p.

- CANIGGIA, G. et MAFFEI, P.L. (1979). Composition architecturale et typologie du bâti, V.1, Lecture du bâti de base, traduit de l'italien par P. LAROCHELLE, ville recherche diffusion, 2000, 214p. (édition originale 1979)
- CASTEX, J. DEPAULE, J-C. PANERAI, Ph. (1975). Evolution comparée des modèles architecturaux et des modèles culturels dans la ville industrielle d'Hausmann à Le Corbusier, Principe d'analyse urbaine, Versailles : Association pour le Développement de la Recherche sur l'Organisation Spatiale (ADROS) 127p. Rapport de recherche.
- COLQUHOUN, A. (1972). Recueil d'essais critiques, déplacement des concepts de l'architecture classique chez le Corbusier, Mardaga, Bruxelles, pp. 59-74.
- D.G.U.H.C, (2001). Formes urbaines et tissus urbains, essai de bibliographie raisonnée 1940-2000, Direction Générale de l'Urbanisme de l'Habitat et de la Construction, ministère de l'équipement des transports et du logement, Paris, 92p.
- DARIN, M. (1998). The study of urban form in France , International seminar on urban form, Urban morphology (2), proceedings, pp. 63-76.
- DE PORTZAMPARC, C. (1995). La ville du troisième age, revue projet urbain, n°3, « la ville hors la ville », pp.4-9, ministère de l'équipement des transports et du tourisme, direction de l'architecture et de l'urbanisme.
- DEVILLIERS, Ch. (1990). Sur l'histoire et l'analyse architecturale, lettre à Françoise Choay, les cahiers de la recherche architecturale n°26, Parenthèses, pp. 95-103.
- FAUCHER, D. (1998). Etudes des règles urbaines relatives à la morphologie du bâti en vue de leur modélisation informatique, Nantes : Institut de recherche en informatique de Nantes, 31p.
- GEROSA, P.G. (1986). Sur quelques aspects novateurs dans la théorie urbaine de Saverio Muratori , université des sciences humaines de Strasbourg, coll. Urbanisme et sciences sociales, V. 6 , Strasbourg 1986 , 69p.
- GEROSA, P.G. (1993). Eléments pour une histoire des théories sur la ville comme artefact et forme spatiale (18<sup>e</sup>-20<sup>e</sup> siècles), Strasbourg : Université des sciences Humaines de Strasbourg. 284p.
- LE CORBUSIER, (1925 ;1994). Urbanisme, Champs Flammarion, Paris, 284p.
- LE CORBUSIER, (1957). La Charte d'Athènes, Minuit, Paris, 189p.
- LECOUEDIC, D. (1996). La ville, l'édifice et l'historien, les cahiers de la recherche architecturale n°37 « Situations », Parenthèses, Paris, pp. 119-126.
- LEVY, A. et SPIGAI, V. (1992). La qualité de la forme urbaine. Tomes 1 et 2, rapport pour le ministère de l'équipement du transport et du logement, Nantes, Ville Recherche et Diffusion, 158p.
- LUIGI, P. (1987). Oscar Niemeyer : une esthétique de la fluidité, Parenthèses, Marseille, 1987, 140p.
- LOYER, F. (1994). La ville, Courrier du CNRS n°81, Le PIR villes, 3p.
- MALFROY, S. (1991). Morphologie de la ville et du territoire et idée de structuration, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de Théorie et d'Histoire de l'Architecture, 24p.
- MALFROY, S. et CANIGGIA, G. (1986). L'approche morphologique de la ville et du territoire, Eidgenössische Technische Hochschule, Zurich, 260 p. (écrit en Français et en Italien).
- MANCEAU, D. (1981). Echantillons d'espaces urbains de l'agglomération Nantaise, Nantes, CERMA, 117p.
- MANGIN, D. PANERAI, P. (1988). Le temps de la ville, l'économie raisonnée des tracés urbains, Paris : Ecole d'architecture de Versailles, 242p. Laboratoire de recherche « d'Histoire Architecturale et Urbaine – sociétés ».

- MERLIN, P. D'ALFONSO, E. CHOAY, F. (1988). Morphologie urbaine et parcellaire, Saint-Denis : Presses Universitaires de Vincennes. 292p.
- MUMFORD, M. (2000). The CIAM discourse on urbanisme 1928-1960, MIT press, London, 375p.
- PANERAI, Ph. DEPAULE, J-Ch, et al. (1980). Eléments d'analyse urbaine, Archive d'Architecture Moderne, Bruxelles, 194p.
- PANERAI, Ph. Castex, J. DEPAULE, J-Ch, et al. (1997-2001). Formes urbaines : de l'îlot à la barre, Parenthèses, Marseille, 195p.
- PINON, P. (1992). Composition urbaine. Tome 1 : Repères, Paris : STU, 106p.
- RIBOULET, P. (1998). Onze leçons sur la composition urbaine, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 256p.
- ROSSI, A. (1966). L'architecture de la ville (1<sup>ère</sup> édition en 1966), traduction de l'italien par F.Brun, l'Equerre, Paris, 295p.
- SITTE, C. (1996). L'art de bâtir les villes l'urbanisme selon ses fondements artistiques, traduction de Wiczorek, D. Seuil, Paris, 188p.
- THIBERGE, C. (2002). La ville en creux, éditions du Linteau, Paris, 335p.
- 

## **APPROCHE HISTORIQUE ET HISTOIRE DE NANTES**

- ARDEPA. (1991). P.O.S Scriptum du texte à la forme, la ville construite NANTES XVIe-XXe siècle, ARDEPA (Association Régionale pour la Diffusion et la Promotion de l'Architecture, de la ville de Nantes), Nantes, 56p.
- BARLES, S. (1999). La ville Délétère, Médecins et Ingénieurs dans l'espace urbain XVIII<sup>e</sup> – XIX<sup>e</sup> siècle, Champs Vallon, Seyssel, 337p.
- BESSON, G. (1919). Recueil des règlements de police et arrêtés municipaux actuellement en vigueur dans la ville de Nantes classés par G. Besson, Nantes, Impr. du Commerce, Fonds local, Archives Municipales de la ville de Nantes.
- BIENVENU, G. (1988). Architecture de la ville et réglementation urbaine, V1/1 et V1/2 : les textes réglementaires à Nantes aux XVIII<sup>e</sup>, XIX<sup>e</sup>, et XX<sup>e</sup> siècles, V2 : le cadre réglementaire , Etude pour le ministère de la culture, Ecole d'architecture de Nantes.
- BIENVENU, G. (1999). Nantes Plans commentés, éditions mémo (présente une suite de 20 plans de grand format, du premier plan géométral nantais jusqu'à l'époque contemporaine), Nantes, 108p.
- BLOYET, D. (1999). Erdre et Loire les travaux de Comblement, coll. Nantes les dossiers de la mémoire, édit. CMD, Angers, 36p.
- BUISSON, L. et al. (1994). Une histoire du chauffage domestique, édit. P.E.M.F, Mouans Sartout, 47p.
- CHANU, P. (1982). La civilisation de l'Europe des lumières, Champs Flammarion, Paris, (1<sup>ère</sup> édition Arthaud 1971), 419p.
- CHAPALAIN-NOUGARET, Ch. (1985). Cartes et plans des séries anciennes (AA-II), Impr. de la Ville de Nantes, ARCHIVES MUNICIPALES DE NANTES.
- CHEROT, A. et al. (1852). Travaux de la commission pour l'assainissement des logements insalubres, Imp. Mangin, Nantes, 92p. Bibliothèque municipale de Nantes.
- CORBIN, A. (1986). Le miasme et la Joncquille, l'odorat et l'imaginaire social XVIII<sup>ème</sup> XIX<sup>ème</sup> siècles, Champs Flammarion, 336p.
- COSNEAU, C. (1978). Iconographies de Nantes, catalogue d'exposition, Musée Dobrée, Nantes.

- DARIN, M. (1981). La grande percée, B.R.A, Ecole d'architecture de Nantes, CERMA, Nantes. pp.50-58.
- DARIN, M. (1987). Alignement des rues, B.R.A, Ecole d'architecture de Nantes, CERMA, Nantes. 99p.
- DE BERRANGER, H. (1966). Evocation du vieux Nantes , Paris, Ed. de Minuit.
- DELATTRE, L. (1911). Mémoire sur le projet de 1755 de l'architecte de Vigny concernant l'embellissement de Nantes (extr. dans Bulletin de la société archéologique et historique de Nantes et de Loire atlantique). Nantes, impr. A. Dugas, 34p.
- DEMOGET, A. (1883). Rapport de l'architecte en chef de la ville : De l'alimentation de la ville de Nantes au moyen des eaux de la Loire, du nettoyage de la voie publique, de l'assainissement des habitations et de l'entretien des chaussées , Imp. du Commerce, Ville de Nantes, Voirie municipale, Nantes, 51p. BIBLIOTHÈQUE MUNICIPALE DE NANTES.
- DENIZEAU, M. (1978). Le développement urbain à Nantes, des origines à 1830, documents d'histoire régionale, CRDP (centre national de documentation pédagogique) Nantes.
- DENIZEAU, M. (1980). Nantes, le fleuve, les îles, le port, documents d'histoire régionale, CRDP Nantes.
- DOCUMENTS DES ARCHIVES MUNICIPALES DE NANTES, fond ancien avant 1790 :
- série C 325 : Urbanisme et plans généraux
  - série C 327 à 330, 334 à 337, 340 à 344, et 348 à 355 : Par quartier
  - série Fi 2 à 20 : photographies des plans anciens de la ville de Nantes.
  - série II : séries comprenant cartes, plans et documents iconographiques.
  - série DD : travaux de construction et d'entretien des bâtiments, voirie, cours d'eau, ouvrages d'art.
  - série I : règlements de police et hygiène publique.
  - série O : services techniques, travaux publics et travaux de voirie.
- DRIOLLET, H. (1954). Cahier des charges pour la confection du pavé et son rétablissement à Nantes, Nantes, 67 art., 24p. Bobliothèque municipale de Nantes.
- DUPUY, G. KNAEBEL, G. (1982). Assainir la ville hier et aujourd'hui, Dunod, Paris, pp. 1-26.
- DURVILLES, G. (1900-1977). Etudes sur le vieux Nantes d'après les documents originaux, T. 1, Vannes 1900, culture et civilisations, Bruxelles, 1977. (1<sup>ère</sup> édition 1900).
- EDOUARD, P. (1906). Notices sur les rues, ruelles, cours, impasses, quais, ponts, boulevards, places et promenades de la ville de Nantes, impr. A. Dugas et Cie , Fonds local Bibliothèque Municipale de Nantes.
- ETLIN, R. (1977). L'air dans l'urbanisme des lumières, revue Dix-huitième siècle n°9, le sain et le malsain, Garnier, Paris, pp. 123-134.
- FAVRE, R. (1977). Du « médico-topographique » à Lyon en 1783, revue Dix-huitième siècle, n°9 le sain et le malsain, Garnier Paris pp. 151-160.
- FORTIER, B. (1977). La maîtrise de l'eau, revue Dix-huitième siècle, n°9 le sain et le malsain, Garnier, Paris 1977 pp. 193-202.
- FOURMY Père (1808). Projets anciens et nouveaux d'utilité et d'embellissement, pour la ville de Nantes et ses faubourgs , exécutables, les uns, par la Voirie des ponts et chaussées, en ce qui s'en trouve sur les grandes routes transversales de Paris, Rennes, Vannes, La Rochelle et Clisson, et sur les quais , les autres, par la Voirie municipale (signé : F. P. Fourmy Père) , Publié à Nantes en 1808 , chez Forest , Bibliothèque Municipale de Nantes.
- GRANDCHAMPS, P.G. (1999). Demeures médiévales, édit. Remparts, Paris, 129p.



- GUEPIN, A. et BONAMY, E. (1835-1981). Nantes au XIXe siècle statistique topographique, industrielle et morale , P. SEBIRE, 1835. Réédition du centre de recherche politique, faculté de droit et des sciences Politiques, université de Nantes, 1981.
- GUILLERME, A. (1990). Les temps de l'eau : la cité, l'eau et les techniques, coll. Milieux, Champ vallon, Macon, 263p.
- GUILLOUX, F. (1938). Précis d'histoire de Nantes, 2<sup>e</sup> Ed. E. Cassin, Nantes.
- HALGAN, G. (1920) Le quartier Delorme à la fin du XVIIIe siècle, Bull. Sté Archéol. Et Histor. de Nantes, Nantes, pp. 155-162.
- HARISMENDY, P. (1999). Du caillou au bitume le passage à la route moderne (1900-1936), Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest, Rennes, Tome 106, n°3, pp. 105-126.
- HAROUEL, J. L. (1977). Les fonctions de l'alignement dans l'organisme urbain, revue Dix-huitième siècle, n°9 le sain et le malsain, Garnier Paris, pp.135-150.
- HAROUEL, J.L. (1993). L'embellissement des villes l'urbanisme français au XVIII<sup>e</sup> siècle, Picard, Paris, 333p.
- LADURE, L. (1983). Histoire du climat depuis l'an mil, V.1, Champs Flammarion, Paris.
- LAISNEY, F. (1994). Règle et règlement d'urbanisme, compte rendu de la séance du 16 Novembre 1993, par Vladimirova, J., DEA Projet architectural et urbain, école d'architecture de Paris Belleville.
- LEDUC, S.A.N. (1899). L'Hygiène de Nantes , Institut national de bibliographie scientifique, Paris, BIBLIOTHEQUE NATIONALE DE FRANCE.
- LEGUAY, J.P. (1984). La rue au moyen âge , ouest-France université, Rennes, 253p.
- LELIEVRE, P. (1988). Nantes au XVIIIe siècle urbanisme et architecture, Picard, 295p.
- LEPERE, (1900). Nantes en dix neuf cent, édit Emile Grimaud et fils, Nantes.
- ORDONNANCE DE POLICE concernant : les Pavés des rues, quais, places publiques et fauxbourgs de Nantes , Nantes 1767 , chez la veuve Marie , Bibliothèque Municipale de Nantes.
- PERROT, J-C. (1975-2001). Genèse d'une ville moderne Caen au XVIII<sup>ème</sup> siècle, Les ré-impressions des éditions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences sociales, (2001), première édition en 1975.
- RABREAU, D. (1972). Un modèle d'urbanisation néoclassique : l'œuvre de Crucy à Nantes, actes du congrès national des sociétés savantes, Nantes.
- RAPPIN, G. (1904). Nantes climat et mortalité de 1881 à 1900, (Signé : Dr Rappin.), Nantes, impr. de Biroché et Dautais, Bibliothèque Nationale de France.
- ROGER, A. (1989). Esthétique du paysage au siècle des lumières, Composer le paysage : constructions et crise de l'espace (1789-1992), Champs Vallon, coll. Milieux, 1989, pp. 61-82.
- SADDY, P. (1977). Le cycle des immondices, revue Dix-Huitième siècle n°9, Garnier, Paris, pp. 203-214.
- Service des travaux publics (1899). Cahiers des charges pour l'exécution des pavages, bordures de trottoirs et dallages de toute nature, mairie de Nantes, éditeur imprimerie moderne Déroual, Archives Municipales de la ville de Nantes.
- TOULLIER, B. (1993). Le pan de bois dans les villes du Val de Loire et du Berry au XV e et XVI e siècles, actes du colloque « le bois dans l'architecture », Picard, Paris, pp. 61-66.
- TRASNEL, J. P. (1997). Le métal et le verre dans l'architecture en France – Du mur à la façade légère, thèse de doctorat, Université Paris 8 - Saint-Denis, Institut Français d'urbanisme, laboratoire LTMU, 471p.

- VERGER. (éditeur), (ND). Arrêts, ordonnances et délibérations concernant la construction des vingt-quatre Maisons régulières, avec une façade uniforme, et des Quais d'entre d'enceinte, des Calles et des rues sur l'emplacement de la grève de la Saulsaye de Nantes, maintenant nommée l'isle Feydeau. Cette construction a été ordonnée du temps de la mairie de M. Mellier en 1724, Nantes, Archives Municipales de la ville de Nantes
- VERGER. (éditeur), (ND). Arrêts, ordonnances, règlements, ...etc. expédiés sur les principales affaires de la ville de Nantes, pendant les années de la mairie de M. Mellier, 1723-1728, Nantes.
- WISMES, et GAËTAN, (1907). Commentaire étymologique des notices sur les rues, ruelles, cours, impasses, quais, ponts, boulevards, places et promenades de la ville de Nantes, Lafolye Vannes.
- S.A. (1895). L'assainissement de la ville de Nantes, Imp. Salières, 18p. Bibliothèque municipale de Nantes (côte : 76721/C352).
- S.A. (1966). Maisons à Pan de bois étude de structures, centre de recherche des monuments historiques ministère des affaires culturelles, vol. 1 à 9.
- S.A. RECUEIL factice des Règlements de police de la ville de Nantes, Nantes 1789-1859, Bibliothèque municipale de Nantes.
- S.A. REGLEMENT de police concernant les pavés des rues, quais et places publiques de la ville et faubourgs de Nantes. Du 14 thermidor, an cinquième. Séance où présidait Davoyel Kervegan, Nantes, Département de la Loire inférieure. Administration municipale du canton de Nantes. (N.D.)
- S.A. REGLEMENT sanitaire 1943, Ville de Nantes, Nantes, Imprimerie du Commerce, Fonds local Bibliothèque Nationale de France.

## APPROCHE ET MODELES PHYSIQUES

- AIDA, M. (1982/1-2). Urban albedo as a function of the urban structure, A two dimensional numerical simulation / Boundart-Layer Meteorology vol.23, Part 1 : pp. 405-413, and Part 2 : pp.415-424.
- AKBARI H. DAVIS S. et al. (1992). Cooling our communities – a guidebook on tree planting and light colored surfacing-. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Policy Analysis, Climate Change Division. Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory, 217p.
- ALVAREZ et al. (1989). Aconditiamento climatico de los espacios abiertos en Expo'92, laminas de agua. Sevilla : Universidad de Sevilla.
- ARNFIELD, A.J. (1982). An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiative budgets of cities, Physical Geography vol. 3 pp. 97-122
- ARNFIELD, A.J. (1990). Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling, a simulation approach / Physical Geography, 11,3, pp. 220-239.
- ARNFIELD, A.J. (1990). Street design and urban canyon solar access, Energy and building vol. 14 pp.117-131.
- ASAEDA, T. ET CA, V.T. (1993). The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment, a numerical model, Boundary-Layer Meteorology 65, pp. 159-173.
- ASAEDA, T. et CA, V.T. (2000). Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment, Building and Environment 35, pp. 363-375.
- ASIMAKOPOULOS, D.N. et al. (2001). Energy and climate in the urban built environment, Mat Santamouris éditeur, James and James, London, 402p.

- BACKENSTOW, D.E. (1987). Comparison of white versus black surfaces for Energy conservation, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Roofing technology , Applied technology for improving roof performance, Gaithersburg, Maryland, 16-17 April, National bureau of standards and the national roofing contractors association, pp. 27-31.
- BERKOWITZ, R. (2000) , OSPM, A parametrised street pollution model, Environmental Monitoring and Assessment, 65, 323-331.
- BERTHIER, E. (1999). Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain, élaboration du modèle et première évaluation, thèse de doctorat.
- C.E.R.M.A (1999), Solene et la simulation solaire, Nantes : Laboratoire CERMA, 50p.
- CAYAN, D. R. et DOUGLAS, A. V. (1984). Urban influences on surface temperatures in the southwestern United States during recent decades, Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(11), pp. 1520-1530.
- CHANDLER, T.J. (1976). Urban climatology and its relevance to urban design / World Meteorological Organisation. Technical note n°149, 61p.
- DE LA TORRE J.M.O. et SERRA, R. (1998). Microclimatic analysis of some urban scenarios, In proceedings of PLEA 1998, Lisbon, Portugal, June 1998. London : James and James, pp. 159-162.
- DUPONT, S. (2001). Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine, réalisation du modèle de sols urbains pour submeso, Université de Nantes, thèse de doctorat, Nantes, 319p.
- DUPONT, S. et al. (2004). Introduction of urban canopy parameterization into MM5 simulate urban meteorology at neighbourhood scale, AMS (American Meteorological Society) 2004, <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/74072.pdf> , 5p.
- ELIASSON, I. (1991). Urban Geometry, surface temperature and air temperature, Energy and buildings, 15-16, 141-145.
- ELIASSON, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use, Atmospheric Environment Part B Urban Atmosphere 30(3), 379-392.
- EQUIPE ARTOPOS (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains, Cas d'Aix-en-Provence de Nîmes. Tome 1, le contexte, analyse urbaine. Plan urbain, Ministère de l'Équipement, 52p et fiches.
- ERIKSSON, H. (1997). A Statistical Model for Explaining the Difference in Temperature between a Green Area and its Built-up Surroundings. Published at Göteborg univeristy in 'Project works on modelling' B57.
- ESCOUROU, G. (1978), Climatologie pratique, Paris, Masson, 172p.
- FERNANDES E. O. ALMEIDA F. and CARDOSO P. (1998). Energy and Environnement at EXPO'98, Lisbon. In : Proceedings of PLEA 1998, Lisbon, Portugal, June 1998. London : James et James, pp. 7-12.
- FUJINO, T. et al. (1994). Characteristics of heat and moisture transport of permeable pavement, Ann. Jour. Of hydraulic Engineering, Vol. 38, pp. 235-240.
- FUJINO, T. et al. (1994). Characteristics of heat and moisture transport of permeable pavement, Ann. Jour. Of hydraulic Engineering, Vol. 38, 235-240.
- GAO, W. et OJIMA, T. (1997). Prediction of thermal environnement of urban area, Summaries of technical papers of annual meeting of architectural institute of Japan pp.881-883.

- GAO, W. SUGIYAMA, H. et OJIMA, T. (1995). Field study of effect of street and its trees on thermal environment of sidewalks. *Journal of Architecture and Planning Environment Engineering*, n°469, pp. 53-64.
- GOLDREICH Y. (1999). Absolute and relative humidity island in urban area, ICUC Sydney, proceedings, Cdrom., 6p.
- GRIMMOND, C. et OKE, T.R (1999). Heat storage in urban areas, local-scale observations and evaluation of a simple model, *J. Appl. Meteorol.* 38, 922-940.
- GRIMMOND, C.S.B. et OKE, T.R. (1998). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of urban form, *Journal of Applied Meteorology.* 38, 1262-1292.
- GRIMMOND, C.S.B. et OKE, T.R. (1999). Variability of évapotranspiration rates in urban areas, ICUC 99, CD rom.
- GRIMMOND, C.S.B. et SOUCH, C. (1994). Surface description for urban climate studies, a GIS based methodology. *Geocarta International* 1:47-59.
- GRIMMOND, C.S.B, CLEUGH, H.A, et OKE, T.R. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes, *Atmos. Environ.* 25B, 311-326.
- GROLEAU, D. (1987). Modélisation des interactions entre formes urbaines et les facteurs physiques de l'environnement in : *European Conference on architecture.* Munich 6-10 avril.
- GROLEAU, D. (2001). Solene un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains , rapport descriptif du modèle , laboratoire CERMA, Nantes.
- GROLEAU, D. et al. (2003).
- GROUPE A.B.C (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains, Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome2, les mesures , Plan urbain, Ministère de l'Équipement, pp. 131-133.
- GUYOT, G. (1997). Climatologie de l'environnement de la plante aux écosystèmes, Masson, Paris. 497 p.
- HAGISHIMA, A. TANIMOTO, J. (2003). Sensitivity analysis of factors of urban heat islands of various meteorological regions using the urban canopy model; proceedings of the fifth international conference on urban climate, 1-5 September 2003, Lodz, Poland.
- HOYANO, A. et LINO, (1996). A. development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIA data , in *energy and building* 23, pp.199-205 , Elsevier.
- HUNTER, L.J, JHONSON, G.T. et WATSON, I.D. (1992). An investigation of the three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment*, vol 26b, n°4, pp.425-432.
- ICHINOSE, I. (1999). Regional warming related with land use change during around 135 years in Japan, ICUC Sydney, proceedings, Cdrom., 8p.
- KANDA, M et al. (1996). New thermal sensation index for outdoor environment, *Japanese Jour. Of Civil Eng.* N° 545/II-36, 1-10
- KANDA, M. (1991). Role of water region and soil moisture in the urban climate, Numerical experiment of evaporation, convective clouds and rainfall. *Prepr. Proc. Congr. Int. Assoc. Hydraul. Res.* 24, 51-58.
- KANDA, M. et al. (1996). New thermal sensation index for outdoor environment, *Japanese Jour. Of Civil Eng.* N° 545/II-36, pp. 1-10 (en Japonais).
- KINOUCI, T. et al. (1996) : A comparative study of thermal environment indices for exterior space in summer, *Civil Eng.* Vol. 38, 32-37
- KINOUCI, T. et KANDA, M. (1998). Cooling effect of watering road and retention in porous pavement, *Second urban environment symposium, Albuquerque, new-mexico*, pp. 255-285.

- LEMONSU, A. GRIMMOND, C.S.B. MASSON, v. Modeling the Surface Energy Balance of old Mediterranean City Core, *Journal of Applied Meteorology*, 2003 (submitted article), 55p.
- LIPFERT, F.W, COHEN, S. DUPUIS , L.R AND PETERS, J.(1991). Relative humidity predictor equations based on environmental factors, *Atmos. Environ.* 25B : pp.435-441.
- LOWRY, W. P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis, *Journal of Applied Meteorology*, 16, p. 129.
- MANN, M.E. BRADLEY, R.S. et HUGHES, M.K. (1999). Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters* 26: 759-762.
- MASSON, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy balance in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.*, 94, 90-109.
- MASSON, V, GRIMMOND, C.S.B. ET OKE, T.R. (2001). Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities, submitted paper, 15 october.
- MESTAYER, P. et ANQUETIN, S. (1995). Climatology of Cities in Diffusion and transfer of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields, *ERCOFTAC Series*, V1, Kluwer Academic Publisher, pp. 165-189.
- MILLER-CHAGAS, Ph. et PAUL, P. (1980). Configurations urbaines : Apports énergétiques et microclimats. Etude des espaces extérieurs de trois ensembles à Strasbourg. Contrat de recherche Plan Construction ARIAS, Strasbourg, ARIAS, 182p.
- MILLS, G.M. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon. I, II. / *Atmospheric environment. Serie B* vol.27 n°2 pp.171-181.
- NUNEZ, M. et OKE, T.R. (1977). The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Météorologie*, Vol 16, n°1, January, pp. 11-19.
- OKE, T.R. (1973). City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment* 7: 769-779.
- OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London et New york : Methun, Second edition (first edition 1978), 435p.
- OKE, T.R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 11, pp. 103-113.
- RAESSI, S. et TAHERI, M. (1999). Energy saving by proper tree plantation. *Building and Environment* 34, pp. 565-570.
- SACADURA, J.F. (1982). *Initiation aux transferts thermiques, techniques et documentation (Lavoisier)*, Paris, pp. 429-436.
- SAILOR, D.J. et al. (1992). Measured impact of neighbourhood tree cover on microclimate. Berkeley : Energy and Environment Division, LBL, University of California, 19p.
- SANTAMOURIS M. PAPANIKOLAOU N. KORONAIIS I. et al. (1999). Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, Vol 33, pp. 4503-4521.
- SINI, J.F. ANQUETIN, S. et MESTAYER, P.G. (1996). Pollutant dispersion and thermal effects in urban sreet canyons. *Atmospheric Environment*, Vol 30, n°5, pp. 2659-2677.
- SMITH, C. AKBARI, H. et BRETZ, S. (1996). *Microclimate Effects Near the Ground in the Suburban Environment*, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBL-37876, Berkeley.
- SWAID, H. (1993). Urban climate effects of artificial heat sources and ground shadowing by buildings, *International Journal of Climatology* vol. 13 pp. 797-812.

- TAESLER, R. (1980). Studies of the development and thermal structure of the urban boundary layer in Uppsala, Part II, Data analysis and results. Report n° 61, Meteorol. Instit., Uppsala Univ., Uppsala.
- TERJUNG, W.H. et O'ROURKE, P.A. (1980). Influences of physical structures on urban energy budgets, *Boundary layer Meteorology* 19, pp. 421-439.
- TIRAOUI, L. (2000). Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains, Université de Nantes (I.S.I.T.E.M.), thèse de doctorat, CERMA, Nantes, 362p.
- UPMANIS, H. et al. (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*, n°18, pp. 681-700.
- VACHON, G. (2001). Transferts des polluants des sources fixes et mobiles dans la canopée urbaine, évaluation expérimentale, thèse de doctorat, sciences pour l'ingénieur, spécialité dynamique des fluides et des transferts, université de Nantes, Nantes, 210p.
- VINET, J. (2001). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, thèse de doctorat, CERMA, Nantes, 245p.
- VOOGT, J.A. OKE, T.R. (1997). Complete urban surface temperature, *Journal of applied Meteorology* vol. 26 PP. 1117-1132.
- YUN, D. HOYANO, A. et LINO, A. (1997). Evaluation of urban forms from thermal environmental aspects, *Proceedings of PLEA, Kushiro 8-10 jan. / Kushiro : PLEA'97 Japan comitee*, vol.2, pp. 223-228.

## CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE

- Cahiers de la recherche architecturale et urbaine n°42-43, (1998). Ambiances architecturales et urbaines, Parenthèses, Paris.
- A.D.E.M.E. (1996). Journée d'échanges méthodologiques sur l'élaboration d'indicateurs de l'environnement urbain, Sophia-Antipolis, ADEME.
- ADOLPHE, L. (2000). Vers une modélisation de la performance environnementale des villes, 2<sup>ème</sup> conférence IBPSA France, Sophia Antipolis, pp. 101-107.
- ADOLPHE, L. (2001). A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities, *environment and planning B : planning and design*, volume 28 ? pp.183-200.
- AIT-AMEUR, K. (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du micro climat dans les espaces publics : validation d'un système d'indicateurs « morpho-climatiques » et d'un indicateur de confort, thèse de doctorat, sciences pur l'ingénieur, université de Nantes, Nantes, 288p.
- C.E.T.U.R (Centre d'Etudes des Transports Urbains) (1980). Guide du bruit et des transports terrestres, ministère de l'Environnement et du Cadre de vie et Ministère des Transports, Fascicule n°6, Prévision des Niveaux Sonores.
- C.E.T.U.R (1981). Bruit et formes urbaines, propagation du bruit routier dans les tissus urbains, ministère des transports et du logement, juillet 1981, pp. 29-78.
- CHARLOF-VALDIEU, C. et OUTREQUIN, P. (1999). La ville et le développement durable, Cahiers du CSTB, études et recherches, 35p.
- DUPAGNE, A. et TELLER, J. (1997). Représentation de l'espace ouvert dans un système d'information de projet, in *ingénierie des systèmes d'information*, vol. 5 n. 2.

- GAGGE, A. P. NISHI, Y. et GONZALEZ, R.R. (1972). CIB Commission W45 (Human Requirements), Symposium, Building Research Establishment Report 2, HMSO, London, Building Research Station, pp. 229-250.
- GAUZIN-MULLER, D. (2001). L'architecture écologique 29 exemples européens (urbanisme et développement durable, architecture et qualité de l'environnementale, démarche HQE), Le Moniteur, Paris, 290 p.
- GROLEAU, D. et MARENNE, Ch. (1995). Environmental specificities of the urban built forms, Rebuild- Rebuilding the European City. Integration of renewable Energies in Established Urban Structures, Corfoue, 29-30 Jul.
- HILLIER, B. (1999). The hidden geometry of deformed grids or why space syntax works, when it looks as though it shouldn't, *Environnement planning and design*, n.26 (2), Mars, pp. 193-218.
- HILLIER, B. The common language of space, 22p. consultable sur : <http://www.barlett.ucl.ac.uk/spacesyntax/publications/commanlang.html> ,
- LAVIGNE, P. FERNANDEZ, et BRYON, P. (1992). Architecture climatique une contribution au développement durable, T1 bases et approches physiques, EdiSud, pp. Annexe 04.
- LECORRE, Y. (2001). Towards a method of investigation of the « ambient pattern » for a better comprehension of the relations between the behaviours of the pedestrian and the characteristics of the environment, 7<sup>th</sup> International Interdisciplinary conference on the environment, July 2-4 2001, San Francisco, California-USA.
- LONG, N. (2003). Analyses morphologiques et aérodynamiques du tissu urbain: application à la micro-climatologie de Marseille pendant la campagne ESCOMPTE, Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques de Lille, 297p.
- NIKOLOPOULOU, M. STEEMERS, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces , in *energy and buildings* 35, pp.95-101 , Elsevier.
- RAMOS, C. CORINTH, M. et STEEMERS, K. (2002). A Comfort in urban spaces : the roles of physiological and psychological parameters, The fifth symposium of the international urban planning and Environnement Association UPE, 23-26 September, Oxford, Grande Bretagne.
- SARRADIN, F. SIET, D. et TELLER, J. (2003). Visual urban space assessment from sky shape analysis, METROPOLIS Verlag 2003, Marburg (Germany), pp. 231-238.
- STEEMERS, K. BAKER, N. CROWFORD D. et al. (1996). Urban design : microclimate, building and energy, in : *poceedings, PLEA'96*
- STEEMERS, K. BAKER, N. CROWFORD, D. et al. (1996). Project ZED : Modelling environmental characteristics of urban forms in : 4<sup>th</sup> European Conference on architecture, 26-29 Mar. Berlin, Germany / Bedford : H.P. Stephensen & Associates, pp. 4-7.
- STEYNS, D.G. LYONS, T.J. (1984). Comments on the determination of view-factors in urban canyons, *American Meteorology Society. Journal of Climate and Applied Meteorology* vol. 18 n°3 pp. 383-386.
- SWAID, H. (1992), Intelligent urban forms (IUF), A new climate-concerned, urban planning strategy / theoretical and Applied Climatology vol.46 pp. 179-191.
- TELLER J. (2001). La régulation morphologique dans le cadre du projet urbain spécification d'instruments informatiques destinés à supporter les modes de régulation performantiels , Thèse de doctorat , université de Liège, Liège, 249 p.
- WOLOSZYN, P. (1998). Caractérisation dimensionnelle de la diffusivité des formes architecturales et urbaine. Thèse de doctorat : sciences pour l'ingénieur option architecture. Nantes : université de Nantes (ISITEM), 269p.
-

## Travaux personnels

### *Publication dans des congrès et conférences avec comité de lecture et actes :*

- BENZERZOUR, M. ET GROLEAU, D. (2002). Effects of diachronic town surface transformations on the urban microclimate: application to the city of Nantes, Passive and Low Energy Architecture (PLEA 2002): Design with the Environment, Presentation poster intitulé: How did the historical transformations of the urban surface of Nantes modified the modified the urban microclimate ?, 22-24 July 2002, Actes sur C.D. –ROM, Toulouse (France), 5p.
- BENZERZOUR, M. ET GROLEAU, D. (2002). Urban microclimate changes according to historical transformations of Nantes (France), American Meteorological Society (AMS): Fourth Symposium on the Urban Environment, Norfolk (USA) 20-24 May 2002, Actes sur C.D. –ROM, 5p.
- BENZERZOUR, M. (2004). Interdisciplinarité et opérationnalité de la recherche: Parcours d'une thèse en ambiances architecturales et urbaines sur le microclimat urbain, Journées européennes de la recherche architecturale et urbaine : « la question doctorale », 12-14 Mai 2004, Marseille (France), Actes en cour de réalisation, 6p.

### *Publication dans des congrès et conférences sans comité de lecture :*

- BENZERZOUR, M. et GROLEAU, D. (2002). Temporality of urban micro climate: Historical analysis and prospecting attempt, The Fifth Symposium of the International Urban Planning and Environment Association, Creating Sustainable Urban Environments: Future Forms for City Living (UPE5), 23-26 September 2002, Oxford (UK), 10p.

### *Rapports d'études et de recherche :*

- BENZERZOUR, M. et FOLLUT, D. (1999). Modélisation rétrospective de l'évolution de la ville de Nantes première phase, Contrat CERMA-Ville de Nantes, CERMA, Nantes, 40p.
- SIRET, D. MARENNE, C. BENZERZOUR, M. (2002). Etude préalable pour le dossier de candidature de la ville de Nantes à l'appel à projets OPATB de l'ADEME, Rapport interne, CERMA, avril 2002, 30p.
- BENZERZOUR, M. et GROLEAU, D. (2003). Modélisation des gabarits des rues du centre ville de Nantes pour le modèle « OSPM », Contrat CERMA- Air pays de la Loire, volume1 : méthode de modélisation, 18p., volume2 : Fiches de relevé et de modélisation, Rapport, CERMA, Nantes.









---

**TRANSFORMATIONS URBAINES ET VARIATIONS DU MICROCLIMAT – Application au centre ancien de Nantes et proposition d’un indicateur morpho-climatique.**

---

*Résumé*

Ce travail s’appuie sur deux investigations: la première met au jour le savoir-faire et les interventions qui ont conduit, depuis les premiers temps de l’urbanisme salubriste, à l’amélioration de l’environnement urbain; et la deuxième quantifie les effets microclimatiques des transformations urbaines. L’une et l’autre portent de manière privilégiée sur le centre ancien de Nantes. Des reconstitutions ont ainsi été effectuées en considérant cinq états représentatifs allant de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle à la moitié de XX<sup>e</sup>. Des simulations ont ensuite été réalisées à l’aide du modèle TEB, développé par le CNRM de Toulouse. Au-delà des variations quantifiées du microclimat, l’analyse historique et physique a permis d’établir des corrélations conduisant à la construction d’un indicateur morpho-climatique appelé « ouverture directionnelle ». Cet indicateur permet une caractérisation relativement fine de l’espace (rue, place, ensemble bâti) et du microclimat associé (ensoleillement, vue du ciel, exposition au vent) en accord avec les résultats des simulations effectuées par des outils du CERMA.

*Mots clés* : forme urbaine, transformations, variations du microclimat, reconstitution, Nantes, simulations, caractérisation, vide urbain, indicateur morpho-climatique.

---

**URBAN TRANSFORMATIONS AND MICROCLIMATE VARIATIONS – Application to the Nantes historical centre and proposition of a morpho-climatic indicator**

---

*Abstract*

This work develops two main investigations : the first one concerns the analysis of historical know-how and transformations since the first periods of the “healthiness town planning”; and the second quantifies the evolution of physical parameters of urban microclimate. They are applied to the specific case of historical centre of Nantes. Historical reconstitutions of the city have been carried out and five representative situations have been defined between the end of the XVII<sup>th</sup> century and the middle of the XX<sup>th</sup> one. Several climatological simulations have been done with the TEB model, developed by the CNRM of Toulouse. The study of interaction between urban form and physical factors has enabled to build a morpho-climatic indicator based on “directional opening analyses”. The indicator enables a relevant characterisation of urban empty spaces (streets, places, urban fabrics) and of their associated microclimate (solar access, sky view, wind exposition) relatively consistent with the results obtained with the tools of the CERMA laboratory.

*Key words* : urban form, urban transformations, microclimate variations, reconstitution, Nantes, simulations, characterisation, urban empty spaces, morpho-climatic indicator.

*Discipline* : Mécanique, Thermique et Génie Civil

*Spécialité* : Sciences pour l’ingénieur, option architecture

N°