T. 226 / D

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme
Alger

Mémoire soumis pour l'obtention
du diplôme de Magister en Urbanisme

Intégration de la dimension climatique en urbanisme

Présenté par : Mlle Ali Toudert Fazia

Sous la direction du : Dr Bensalem Rafik
Maître de conférence à l'E.P.A.U

Janvier 2000

Je dédie ce mémoire
à mes parents

المدرسة الوطنية للتقنيات الهندسية المعمارية
مركز التوثيق
ماستر التدرج

Remerciements

Je tiens à remercier vivement Mr Bensalem Rafik pour son suivi et ses orientations durant toute la durée de cette recherche.

Je remercie, également, les personnes qui m'ont facilité la collecte de l'information, en particulier Mmes Karma Mourad, Karstein Gareis et Nadia Khitabet, Mr Tarik Bellahséne et l'association AREA-ED.

A ma sœur Nassima pour son soutien depuis le début de ce travail, et pour sa contribution effective aussi bien pour la collecte de l'information que dans la mise en forme du document final.

A mes amies Razika Boumansour et Ashraf Lounnas, ainsi qu'à mes cousines Zina et Merzaka.

A toute personne ayant contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

Enfin, à mes parents à qui je dédie ce mémoire.

Intégration de la dimension climatique en urbanisme

Résumé

La présente recherche s'inscrit dans l'objectif global d'établir un développement urbain durable et plus particulièrement un urbanisme climatique, lequel constitue une réelle alternative pour atteindre cette durabilité. Effectivement, une production urbaine qui tient compte de spécificités climatiques locales permet de réduire de façon significative la consommation énergétique, offre de meilleures conditions de confort et de sécurité et augmente les chances de réaliser une architecture adaptée à son environnement.

Ce mémoire a pour objectif l'élaboration d'une méthodologie d'adaptation au climat, intégrée au processus d'élaboration des plans d'urbanisme à leurs différentes phases. Il contribue à fournir une démarche progressive, jusque là inexistante, qui explique de façon claire la manière d'introduire cette dimension.

La méthodologie proposée s'organise en deux phases de conception principales à savoir : la planification urbaine et la composition urbaine et qui correspondent aux deux principaux instruments d'urbanisme, les plans directeurs et les plans d'occupation des sols.

Pour être opérationnelle, cette méthodologie est présentée sous une forme conceptualisée. Elle réunit l'ensemble des connaissances en des niveaux d'intervention et concepts opératoires, qui constituent des étapes permettant de guider la conception en matière d'intégration climatique d'une ville.

L'élaboration de cette méthodologie s'est basée sur la compréhension i) des interactions entre climat et facteurs de l'environnement, ii) des mécanismes qui régissent le climat urbain et qui relèvent des choix urbanistiques, iii)de la dépendance des divers objectifs de contrôle climatique par rapport aux propriétés géométriques du tissu urbain.

Il est apparu que pour la planification, le contrôle du climat urbain global concerne la réduction des effets thermiques négatifs de l'îlot de chaleur, l'exploitation des régimes des vents et la réduction de la pollution. Pour cela, les niveaux d'action décisifs ont été définis, à savoir : la connaissance du climat local, la localisation de la ville, la perméabilité de la ville, l'usage des sols et enfin le paysagisme.

Pour la composition urbaine, des paramètres géométriques qui décrivent le comportement du tissu urbain par rapport au contrôle climatique (accès au soleil, refroidissement albédo, , conservation de chaleur, la ventilation, etc.) ont été identifiés. Ces paramètres ont permis la définition des concepts à cette échelle, à savoir : ouverture au ciel, porosité urbaine, réflectance urbaine, directionnalité, enveloppe bâtie et verdurisation.

Table des matières

Chapitre 1 : Chapitre introductif

1.1 Problématique et objectifs.....1

1.1.1 Pour un développement urbain durable.....1

1.1.2 L'urbanisme climatique comme alternative de durabilité.....3

1.1.3 Objectifs et hypothèses du présent travail.....6

1.2 Structure du mémoire.....9

Chapitre 2 : Evolution de la pensée dans l'intégration au climat des villes à travers l'Histoire

2.1 Introduction.....11

2.2 Les architectures vernaculaires.....13

2.3 L'adaptation au climat dans les villes planifiées.....16

2.3.1 L'héritage de l'antiquité.....16

2.3.2 La redécouverte du rapport au climat à la Renaissance.....21

2.3.3 Le modernisme et question climatique.....23

2.3.4 Naissance de l'urbanisme climatique.....25

2.4 Conclusion.....27

Chapitre 3 : Connaissance du climat en urbanisme

3.1 Introduction.....28

3.2 Définitions.....29

3.3 Urbanisme et échelles du climat.....29

3.4 Facteurs environnementaux influant sur les climats locaux.....30

3.4.1 Relief et topoclimat.....31

1 - Radiation solaire.....31

2 – Le vent.....32

3 – Les températures.....32

4 - Vents locaux.....33
5 - Précipitations et humidité.....33
3.4.2 Végétation et modification du climat local.....34
1- Propriétés climatiques de la végétation.....34
2- Evaluation des propriétés climatiques de la végétation.....35
3.4.3 Ville et activités urbaines.....37
3.5 Conclusion.....37

Chapitre 4 : Ville et climat urbain

4.1 Introduction.....39
4.2 Le climat urbain.....40
4.2.1 L'îlot de chaleur urbain.....41
1 - Effets du stockage dans les bâtiments sur l'îlot de chaleur.....42
2 - Impact de l'énergie anthropique sur l'îlot de chaleur.....44
3 - Effets de la végétation sur la modification de la chaleur latente.....45
4 - Autres effets de l'îlot de chaleur.....47
4.2.2 Les vents urbains.....48
1 - Le vent régional.....48
2 - Les vents locaux.....49
4.2.3 La pollution.....51
4.3 Conclusion.....53

Chapitre 5 : Méthodologie d'intégration du climat dans la planification urbaine

5.1 Introduction à la méthodologie proposée.....55
5.1.1 Introduction à la méthodologie globale d'intégration urbaine au climat.....55
5.1.2 Introduction à la méthodologie appliquée à la planification urbaine.....59
5.2 Contexte climatique.....61
5.2.1 Détermination du climat local.....61
5.2.2 Cas de la ville de Stuttgart.....64

5.3 Localisation de la ville.....65

5.3.1 Choix du site.....65

5.3.2 Cas de la ville de Ma'ale Adumim,Israel.....66

5.3.3 Cas de la nouvelle capitale d'Argentine.....67

5.4 Perméabilité de la ville.....68

5.4.1 Objectif de la perméabilité de la ville.....68

5.4.2 Passages de ventilation.....69

5.5 Usage des sols.....71

5.5.1 L'emplacement des industries.....72

5.5.2 Aires résidentielles.....73

5.5.3 Infrastructure.....74

5.6 Paysagisme.....76

5.6.1 Proportions des espaces verts par rapport au bâti.....76

5.6.2 Localisation de la végétation en milieu urbain.....77

5.6.3 Impact du type de climat sur l'aménagement végétal.....78

5.6.4 Exemple de la ville de Salahldeen, Irak.....78

5.7 Configuration urbaine.....79

5.8 Discussion et conclusion.....80

Chapitre 6 : Rôle de la géométrie urbaine dans le contrôle climatique

6.1 Introduction.....83

6.2 Contrôle solaire et énergétique.....86

6.2.1 Effets de la géométrie urbaine sur l'accès au soleil.....87

6.2.2 Impact de la géométrie urbaine sur le refroidissement des bâtiments.....91

6.2.3 Effets de la géométrie urbaine de l'albédo urbain.....92

6.2.4 Rôle de la forme bâtie sur la distribution de la radiation solaire.....94

6.2.5 Rôle de la géométrie du bâtiment dans sa performance climatique.....96

6.2.6 Incidence de la géométrie urbaine sur l'éclairage 98

6.2.7 Récapitulatif des paramètres environnementaux
et géométriques de contrôle solaire et énergétique.....100

6.3 Contrôle du vent en milieu urbain.....103

6.3.1 Aérodynamisme des bâtiments.....104

1- Flux d'air autour d'un obstacle.....104

2- Effets de petits groupements de bâtiments sur l'écoulement de l'air.....105

6.3.2 Ventilation dans les espaces extérieurs.....105

1- Effets de la disposition des bâtiments et de l'incidence du vent.....106

2- Rôle de la géométrie de la rue dans la définition de la nature du flux d'air..107

3- Effets de la géométrie urbaine sur la vitesse du vent.....108

4- Impact de la variation des gabarits sur la modification des flux d'air.....110

6.3.3 Ventilation intérieure des bâtiments.....111

1- Effets des espacements des bâtiments et de l'incidence du vent.....111

2- Effet de la forme du bâtiment.....112

6.3.4 Récapitulatif des paramètres urbains déterminants

dans le contrôle du vent.....115

6.4 Contrôle climatique par la végétation.....117

6.4.1 Impact de la végétation sur l'accès au soleil dans les bâtiments.....118

6.4.2 Effets de la localisation et du type d'arbre sur les économies d'énergies.....118

6.5 Conclusion 120

Chapitre 7 : Méthodologie d'intégration du climat dans la composition urbaine

7.1 Introduction à la méthodologie proposée.....121

7.1.1 Intérêt de la conceptualisation.....122

7.1.2 Détermination des concepts.....125

7.2 ouverture au ciel..... 126

7.2.1 Définition et objectifs.....126

7.2.2 Paramètres déterminants.....128

7.2.3 Recommandations générales.....132

7.2.4 Exemple d'ouverture au ciel.....133

7.5 Directionnalité.....149

7.5.1 Définition et objectif.....149

7.5.2 Choix de la directionnalité.....149

7.6 Enveloppe bâtie.....151

7.6.1 Définition et objectifs.....151

7.6.2 Paramètres déterminants.....152

7.6.3 Recommandations générales.....154

7.7 Verdurisation.....156

7.7.1 Objectifs.....156

7.7.2 Paramètres déterminants.....157

7.8 Discussion et conclusion.....159

Chapitre 8 : Conclusion générale

8.1 Conclusions et recommandations.....164

8.2 Limites du travail.....166

8.3 Orientations pour des recherches futures.....167

Bibliographie.....168

Chapitre 1 : Chapitre introductif

1.1 Problématique et objectifs

1.1.1 Pour un développement urbain durable

Les villes connaissent un rythme de croissance accéléré et la population urbaine à travers le monde augmente sensiblement. Cette tendance ne devrait pas se ralentir pour les décennies à venir ; elle est même difficile à envisager compte tenu de l'augmentation de la population mondiale et son aspiration grandissante à une vie urbaine. Selon les Nations Unies, la population dans le monde s'élèverait à 8,5 milliards en l'an 2025, dont prés de la moitié établie en milieu urbain (figure 1.1). Il s'ensuit que ces établissements sont plus étendus, les activités urbaines plus importantes, et la consommation énergétique y est excessive, de l'ordre de 60% à 80% de l'énergie totale consommée sur la planète.

Cette situation provoque de graves problèmes environnementaux, sans cesse, dénoncés, à savoir : Un changement climatique négatif car préjudiciable à l'Homme, l'augmentation de la pollution et l'épuisement de ressources énergétiques non renouvelables.

Effectivement, l'utilisation de ressources - essentiellement fossiles - conduit à de fortes émissions de gaz nocifs et provoque d'importants effets de serre, ressentis à l'échelle globale de l'établissement humain et met en danger la vie de l'Homme. D'autre part, n'étant pas renouvelables, ces énergies posent, de plus en plus, le problème de leur tarissement imminent, et l'urgence de trouver des énergies de substitution pour le futur.

Plus en détail on constate que l'environnement urbain est caractérisé par une diminution sensible du niveau de confort pour un usage plus grand d'énergie. Cette surconsommation énergétique traduit la rupture qui existe entre le domaine bâti et l'environnement naturel, car la densité et la morphologie urbaine modifient fortement les propriétés de cet environnement à l'intérieur des villes, en particulier leur relation aux principales énergies naturelles que sont la radiation solaire et le vent. Elles affectent, ainsi, les niveaux d'accès au soleil, les potentiels de ventilation urbaine, la qualité de l'air, etc. Ce qui par conséquent occasionne des surcoûts pour le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et la ventilation.

Une concertation internationale s'est établie autour de ces questions. Les années 1990 sont caractérisées par le débat sur la protection de l'environnement et un développement durable à instaurer qui aurait pour objectif de remédier à cette situation. Parmi les conférences les plus importantes citons :

- La conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, tenue à Rio de Janeiro, Brésil, en juin 1992 ; puis à New York, Etats Unis, en 1998
- La conférence des Nations Unies sur les établissements humains : Habitat II tenu à Istanbul, Turquie, en 1996.
- Les diverses conférences de l'organisation mondiale de la météorologie dont celles de 1984 au Mexique et celle de 1994 au Bangladesh.

En 1992, le sommet de Rio identifie, dans Agenda 21, le rôle crucial des autorités locales pour le développement et la mise en œuvre de politiques de durabilité. Pour Habitat II, le souci général était d'œuvrer pour le développement d'établissements humains durables, et la promotion d'un environnement urbain de grande qualité.

De même que l'organisation mondiale de la météorologie oriente de plus en plus ses recherches et son action vers l'environnement urbain ; Elle met l'accent sur le rôle décisif que peut avoir l'urbanisme dans la concrétisation de ces objectifs (cf. pp. IX- x WMO 1986 et pp. xxix –xxxi WMO1994).

Ainsi, il apparaît clairement que le milieu urbain est au centre des débats et que la conception des villes est l'enjeu principal des prochaines décennies. Par conséquent, il convient de parler de **développement urbain durable** où l'urbanisme occuperait une position privilégiée.

La figure 1.2 présente les composantes d'un développement urbain durable et les interrelations qui le structure. Remarquons que les dimensions politique, économique, sociale et démographique relèvent de stratégies globales, dépassant souvent la responsabilité de l'urbaniste, par contre, la dimension environnementale tient fondamentalement à sa compétence.

L'urbanisme n'est plus une action ponctuelle aux effets limités, et de nouvelles bases conceptuelles, qui favoriseraient cette durabilité sont à élaborer. Désormais, il faut œuvrer dans le sens d'une rationalisation de l'usage des ressources énergétiques périssables, le développement d'énergies renouvelables et une conception urbaine plus adaptée à son environnement et aux besoins des citadins.

1.1.2 L'urbanisme climatique comme alternative de durabilité

Le défi majeur de l'urbanisme est de trouver un compromis entre développement inévitable des villes, et un environnement urbain de haute qualité. Bitan(1992) définit cette qualité comme étant à la fois une qualité de l'air liée au taux de pollution, et une qualité du climat liée à l'usage correct des différents éléments climatologiques et leur intégration correcte dans les différents niveaux de projection urbaine et architecturale.

Dans le même sens, nous mettons l'accent sur le rôle du climat et proposons comme alternative urbanistique visant à atteindre cette durabilité : la considération du climat dans la conception des villes. En effet, le concept d'urbanisme climatique s'inscrit pleinement dans cette optique de développement urbain durable, à travers une conscience et une prise en charge réelle des interactions entre milieu urbain et environnement naturel.

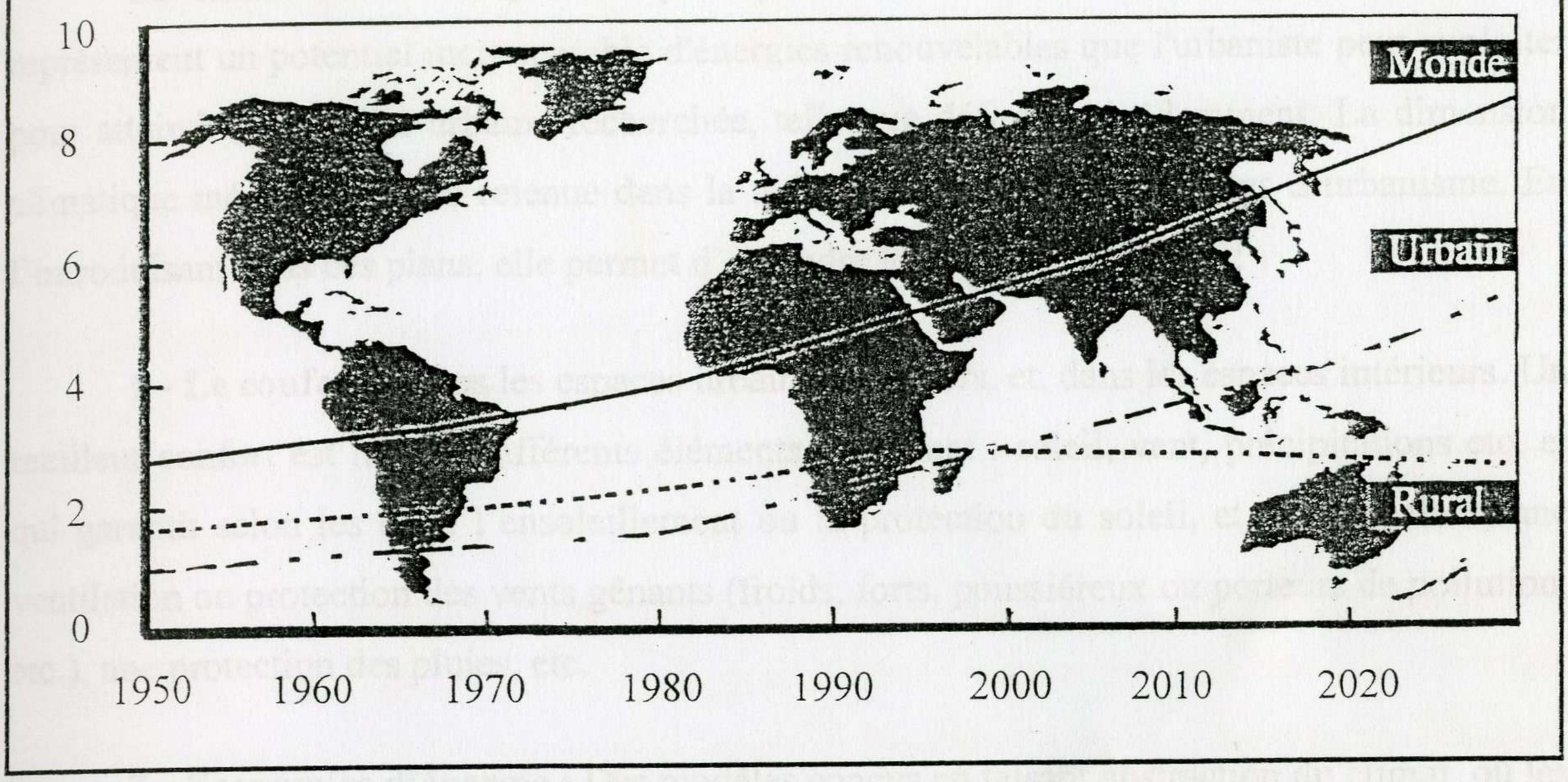


Figure 1.1 : Evolution de la population urbaine dans le monde (Source : Pacquot 1996).

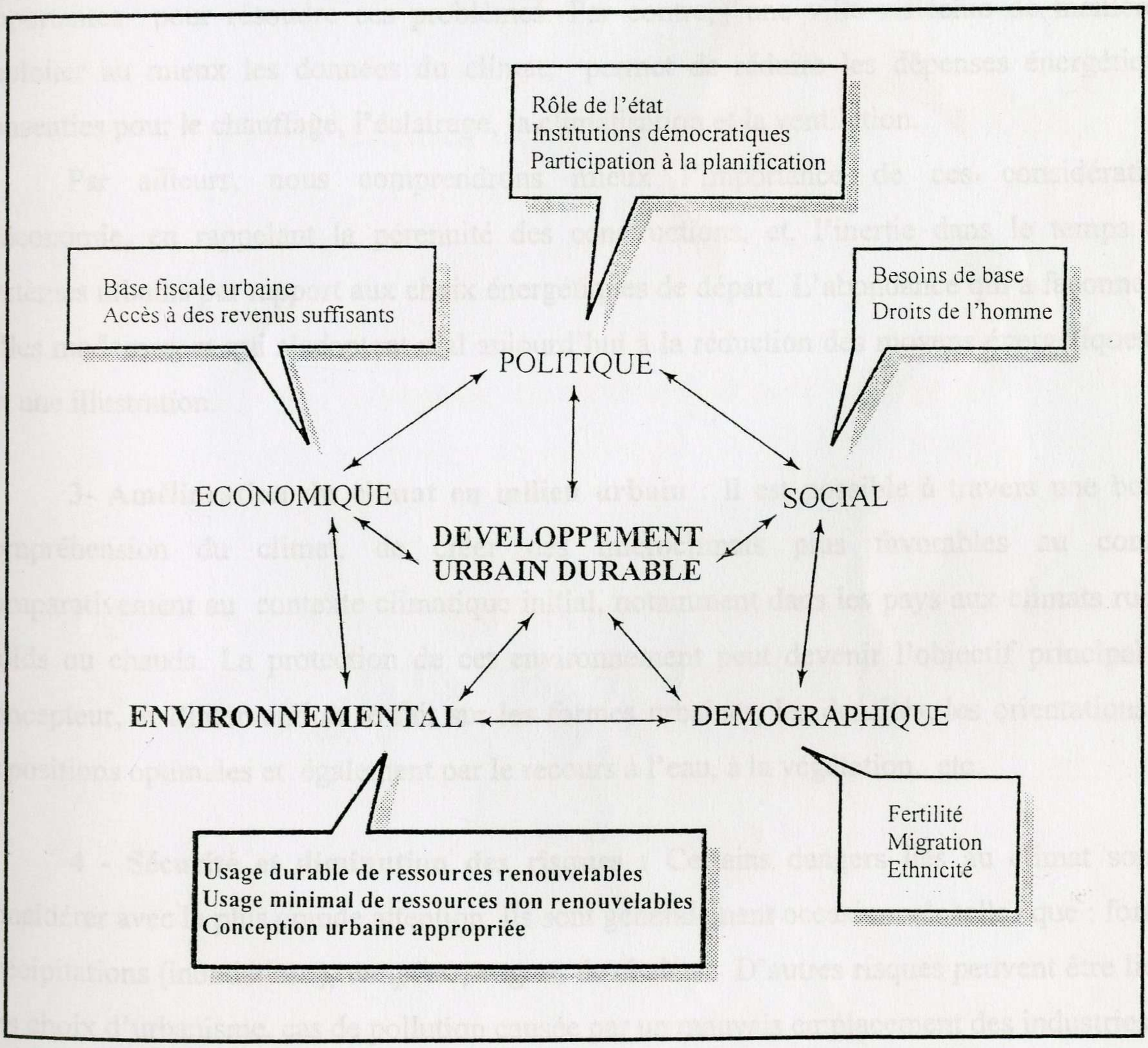


Figure 1.2 : Composantes du développement urbain durable (Drakakis-Smith 1995).

Le climat est la composante principale de l'environnement naturel, ses éléments représentent un potentiel incomparable d'énergies renouvelables que l'urbaniste peut exploiter pour atteindre la qualité urbaine recherchée, telle que définie précédemment. La dimension climatique mériterait d'être retenue dans la réflexion aboutissant aux plans d'urbanisme. En l'introduisant dans ces plans, elle permet d'atteindre les objectifs suivants :

1 - Le confort : Dans les espaces urbains extérieurs, et, dans les espaces intérieurs. Un meilleur confort est lié aux différents éléments du climat : soleil, vent, précipitations etc. et qui garantit selon les cas : l'ensoleillement ou la protection du soleil, et de la chaleur, une ventilation ou protection des vents gênants (froids, forts, poussiéreux ou porteurs de pollution, etc.), une protection des pluies, etc.

2 - Economies d'énergie : Des modèles conçus en faisant abstraction du climat où les problèmes d'inconfort sont exacerbés vont nécessiter des consommations d'énergie importantes pour résoudre ces problèmes. Par contre, une ville réfléchie de manière à exploiter au mieux les données du climat, permet de réduire les dépenses énergétiques consenties pour le chauffage, l'éclairage, la climatisation et la ventilation.

Par ailleurs, nous comprendrons mieux l'importance de ces considérations d'économie, en rappelant la pérennité des constructions, et, l'inertie dans le temps des systèmes urbains par rapport aux choix énergétiques de départ. L'abondance qui a façonné les villes modernes, et qui s'adaptent mal aujourd'hui à la réduction des moyens énergétiques en est une illustration.

3- Amélioration du climat en milieu urbain : Il est possible à travers une bonne compréhension du climat, de créer des microclimats plus favorables au confort comparativement au contexte climatique initial, notamment dans les pays aux climats rudes, froids ou chauds. La protection de cet environnement peut devenir l'objectif principal du concepteur, et l'intervention se fait sur les formes urbaines, les densités, les orientations ou expositions optimales et également par le recours à l'eau, à la végétation, etc.

4 - Sécurité et diminution des risques : Certains dangers liés au climat sont à considérer avec la plus grande attention. Ils sont généralement occasionnels telles que : fortes précipitations (inondations), tempêtes, vagues de chaleur. D'autres risques peuvent être liés à des choix d'urbanisme, cas de pollution causée par un mauvais emplacement des industries.

Ces phénomènes, même rares, ont un impact désastreux sur les établissements humains et induisent souvent des dommages importants : élévation du taux de mortalité, détérioration des biens, etc. Une prise de conscience de ces risques est donc nécessaire.

5 - Meilleur environnement pour l'architecture : Une réflexion à l'échelle urbaine sur les questions d'accès au soleil, d'ensoleillement optimal, de confort thermique, de ventilation extérieure et intérieure etc., présente à l'architecte - pour l'échelle du bâtiment- des sites aux potentialités élevées au point de vue climatique. En effet, une architecture bioclimatique peut être compromise par une situation urbaine défavorable, comme l'obstruction du soleil par des bâtiments environnants ou un faible potentiel de ventilation. Par ailleurs, il serait erroné de croire que cette architecture ne peut se concevoir qu'en milieu rural ou encore, que cette préoccupation implique des densités urbaines faibles ou des tissus lâches. Il est possible, en menant une réflexion approfondie et progressive, c'est-à-dire par échelle, d'assurer un compromis entre fortes potentialités climatiques et densités urbaines suffisantes.

A travers le monde, de plus en plus de recherches sont menées pour asseoir les bases d'une ville à haute qualité environnementale, et cette orientation devrait intéresser l'Algérie au plus haut point. En effet, dans le contexte algérien, cette démarche est intéressante à plus d'un titre :

1. D'une part, sur le plan économique, les répercussions positives d'une telle approche sont réelles car, bien plus que les pays développés, les pays en développement, gagneraient à mettre en œuvre des politiques d'économies d'énergie à long terme, vu leurs faibles moyens.
2. D'autre part, l'urbanisation du Sahara est une des alternatives les plus prometteuses pour l'aménagement du territoire en Algérie, compte tenu du déséquilibre régional flagrant dans l'armature urbaine. Cette région qui constitue les ¾ du territoire algérien doit son abandon essentiellement à son climat aride qui rend son occupation difficile. Par conséquent, cet urbanisme, dit climatique, constitue la clé d'un aménagement futur décentralisé.

1.1.3 Objectif et hypothèses du présent travail :

Les premières recherches liées à l'évaluation de l'environnement urbain ont été menées par des spécialistes en climatologie urbaine et diverses sciences de l'environnement. L'urbanisme est resté en marge de cette préoccupation jusqu'à ces dernières années. Pourtant, les différences climatiques entre ville et campagne, aussi bien que l'écart qualitatif qui existe entre ces deux milieux sont bien connus. Egalement, la production urbaine à travers le temps a révélé une adaptation exemplaire des villes traditionnelles, voire l'existence depuis l'antiquité, d'une préoccupation théorique et pratique sur la prise en compte du climat dans la conception des villes ; ce qui atteste de l'ancienneté de cette préoccupation.

Aujourd'hui, on constate un renouveau de cette approche parmi les urbanistes et les architectes (Bitan 1988). Les récentes conférences internationales sur l'architecture climatique en témoignent, en accordant de plus en plus d'intérêt au domaine urbain (1). Toutefois, il semblerait que, dans la pratique, le climat a très peu, sinon pas connu de prise en charge réelle à l'échelle urbaine, malgré la demande existante pour cette information (Bitan 1992, Cook 1991, Golany 1996). En effet, les études se sont souvent limitées au domaine de l'architecture ou à quelques tentatives ponctuelles - à une échelle ou à une autre - de l'entité urbaine, mais sans qu'elles suivent un cheminement continu qui serait une réflexion globale conduisant à l'élaboration d'un projet d'urbanisme.

En fait, des difficultés se posent quant à son introduction dans ces plans, malgré l'abondance et la sophistication de l'information climatique disponible aujourd'hui. Plusieurs raisons peuvent être invoquées à ce propos :

1) Le projet d'urbanisme est complexe ; il doit satisfaire des impératifs socio-économiques, culturels, géographiques, politiques, (parfois aussi théoriques) liés à une vision propre du concepteur, d'où la traditionnelle idée qu'une ville est d'une complexité telle que des considérations climatiques semblent accessoires, voire une surcharge pour l'urbaniste. Ceci peut s'observer dans la place qu'on réserve, bien souvent, au climat lors des analyses précédant l'élaboration des plans d'urbanisme.

---

(1) L'importance grandissante de la question climatique en milieu urbain est apparente dans les dernières conférences européennes sur l'architecture, en l'occurrence : Paris1989, Florence1993 et Berlin 1996.

2) Le climat est décrit de façon abstraite. On ne donne aucune orientation à l'urbaniste sur la manière d'introduire ces données. N'étant pas opérationnelle, l'information demeure inutilisable.

En effet, Bitan (1988) relève l'absence d'études théoriques et de caractère méthodologique, qui permettraient d'introduire le climat à l'échelle urbaine. En cela, il rejoint Oke(1984) qui insiste sur le besoin de renforcer et de consolider les connaissances scientifiques de cette nature.

Ainsi ce manque d'intérêt pour les facteurs climatologiques en urbanisme peut s'expliquer par la difficulté réelle à interpréter l'information en l'absence d'une **méthodologie** claire qui explique à travers les différentes phases de conception d'un projet d'urbanisme, les mesures susceptibles de garantir cette adaptation au climat.

Or, c'est aux urbanistes d'élaborer cette méthodologie ; Il leur appartient d'interpréter cette masse de données et, de la convertir en instruments et outils opératoires, au service de leur discipline. Rappelons à ce propos que l'architecture bioclimatique est apparue dans les mêmes conditions, et que c'est seulement lorsque des architectes se sont penchés sur la question que des solutions intéressantes ont été proposées.

Le présent travail se veut être une contribution dans ce sens. Notre objectif est donc, l'élaboration d'une méthodologie ou démarche progressive qui, permet d'intégrer les éléments du climat, aux différentes phases de conception d'un projet d'urbanisme.

Ainsi, cette méthodologie présente les avantages suivants :

1. La clarification des objectifs de conception liés au climat facilite leur combinaison aux multiples objectifs que doit satisfaire un projet de ville. Par conséquent, cette méthodologie devient pour l'urbaniste un outil de dialogue avec les autres spécialistes - collaborateurs.
2. Une démarche graduelle permet l'exploitation maximale du potentiel climatique. Il est essentiel de cumuler les bienfaits d'une intégration au climat depuis les phases urbaines préliminaires jusqu'à la phase architecturale. Etape par étape, l'on fournit la meilleure situation potentielle pour la conception.

Notre hypothèse de base est qu'il est possible d'élaborer une **méthodologie intégrée** au processus d'élaboration des plans d'urbanisme qui répond à ces critères, et serait basée sur l'idée suivante : Pour être opérationnelle, une forme conceptualisée qui consiste à identifier les connaissances en la matière, et les grouper en niveaux d'actions et concepts opératoires serait la démarche la plus appropriée, car cette conceptualisation garantit le caractère généralisable inhérent à toute méthodologie ; En effet, elle est préférée à une présentation de solutions définitives pour des cas particuliers qui ne peuvent être extrapolées à des contextes originaux. De même que ce choix privilégie un langage accessible à l'urbaniste et compatible avec sa méthode de travail habituelle, c'est à dire basé principalement sur des aspects géométriques.

Ces concepts sont déterminés grâce à la compréhension, d'une part, du climat urbain qu'engendre la ville elle-même et, d'autre part, de la performance climatique (contrôle des microclimats urbains) du tissu urbain lié à ses propriétés géométriques.

Enfin, elle doit respecter la logique de conception des plans d'urbanisme, à savoir la distinction entre les deux principales échelles, qui sont la planification urbaine et la composition urbaine (correspondant en Algérie au Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme, P.D.A.U et Plan d'Occupation des Sols, P.O.S).

Pour mettre en œuvre cette méthodologie, une collaboration interdisciplinaire est désormais nécessaire. Elle a, du reste, été largement recommandée (Bitan 1992, Evans et De Schiller 1996, Golany 1996) car l'urbaniste est inévitablement amené à travailler en équipe pluridisciplinaire et à emprunter la connaissance à des disciplines, quelquefois, d'apparence indépendantes de l'urbanisme. De plus, l'apport de ces disciplines est parfois indispensable pour certains aspects de la question. Il s'agit, à la fois, de climatologie appliquée, de climatologie urbaine, de géographie de l'environnement, d'agronomie, d'agro-météorologie, d'écologie, de foresterie, etc.

La climatologie appliquée sert la collecte, le traitement et l'analyse des données du climat d'un site dans le but de définir ses caractéristiques et les exigences d'adaptation qui s'y rapportent. La climatologie urbaine étudie le climat urbain et analyse ses causes et ses effets. Elle parvient à identifier des problèmes relevant des choix d'urbanisme à savoir la relation entre climat urbain et configuration de la ville et le rôle de la géométrie du bâti sur les conditions microclimatiques urbaines. Les sciences de l'environnement s'intéressent à la

composition de l'air, aux problèmes de pollution qui sont engendrés par les activités urbaines et peuvent renseigner sur les meilleurs choix d'implantation industrielle, par exemple. De la même manière l'agronomie et l'agrométéorologie développent des recherches sur les

microclimats, car l'agriculture en dépend étroitement. Le domaine des forets et de la botanique approfondissent les connaissances sur les effets du végétal sur les éléments du climat, notamment urbain.

Il est possible de multiplier les exemples, la finalité étant de saisir que ces disciplines offrent de grandes potentialités au développement d'un urbanisme climatique. Elles fournissent des informations précieuses, qui peuvent connaître des exploitations intéressantes, notamment :

- Une meilleure connaissance du climat et du microclimat.
- Une évaluation précise du climat urbain et de sa relation à la morphologie urbaine.
- La connaissance de l'impact environnemental de la géométrie urbaine.
- L'exploitation du végétal pour améliorer les conditions microclimatiques urbaines.

1.2 Structure du mémoire

Le présent mémoire est élaboré sur la base d'une recherche bibliographique ; C'est un travail théorique qui consiste à étudier et interpréter la littérature - fournie par l'ensemble des disciplines citées plus haut- consacrée à la question climatique à l'échelle urbaine.

La littérature est choisie et traitée dans un souci principal de dégager des recommandations qui privilégient les choix relevant de l'urbanisme, et pouvant être conceptualisées de manière à constituer une démarche progressive.

Le mémoire s'organise en huit (08) chapitres comme suit : (Figure 1.3) :

Le chapitre 2 présente l'évolution de la pensée bioclimatique appliquée à l'urbanisme et tente de donner un aperçu sur le niveau de conscience en matière d'intégration du climat dans la conception des villes à travers l'Histoire. Le but est de renseigner sur l'état des connaissances à ce sujet afin de situer notre réflexion et la pertinence de cette préoccupation aujourd'hui. Ce chapitre vérifie aussi, l'existence d'une démarche rationnelle et tente d'identifier les différentes mesures d'adaptation urbaine au climat à travers le temps et des moyens adoptés pour réaliser cette intégration.

OBJECTIF

Elaboration d'une méthodologie d'intégration du climat en urbanisme à ses différentes phases

ANALYSE

Référence à l'histoire

- Renseigner sur l'état des connaissances.
- Vérifier l'existence d'une démarche d'adaptation urbaine rationnelle au climat.
- Identifier les mesures d'adaptation au climat connues.

Etude de la relation Climat/Environnement

- Définition du climat.
- Identifier l'échelle du climat à considérer/ urbanisme.
- Identifier l'impact de l'environnement sur la modification du climat et sa relation à l'urbanisme.

Etude du climat urbain

- Identifier les composantes du climat urbain.
- Identifier leur dépendance des choix urbanistiques.
- Identifier les niveaux d'action relevant de l'urbanisme pour contrôler le climat urbain.

Etude de la relation Géométrie urbaine/ Contrôle climatique

- Etude des différents effets de la géométrie urbaine sur chacun des objectifs de contrôle climatique.
- Identifier les paramètres géométriques déterminants dans cette dépendance.

METHODOLOGIE PROPOSEE

Méthodologie d'intégration du climat dans la planification urbaine

- Identification des principales étapes d'intégration du climat.
- Présentation des recommandations des critères d'évaluation de la performance des solutions proposées.

Phase 1

Méthodologie d'intégration du climat dans la composition urbaine

- Proposition d'une démarche conceptualisée pour évaluer la performance des choix urbanistiques sur le contrôle climatique.
- Présentation des critères d'évaluation et des recommandations de conception pour chaque concept.

Phase 2

Figure 1.3 : Structure du mémoire

Le chapitre 3 présente l'information nécessaire à la connaissance du climat et de son environnement. La préférence est donnée aux informations pouvant servir directement l'urbanisme, notamment l'échelle du climat à considérer dans une action urbaine, les modalités de sa définition et les différents éléments de l'environnement influants sur le climat, et pouvant être exploités en urbanisme.

Le chapitre 4 est entièrement consacré à la compréhension du climat en milieu urbain. Cette connaissance est essentielle étant donné l'objectif de ce travail. Ainsi, ce chapitre étudie les mécanismes qui régissent l'apparition d'un climat nouveau en ville dit climat urbain, et tente de définir, ses composantes, leur causes, leur dépendance des choix d'urbanisme et par conséquent, permet d'identifier les niveaux d'action possibles à considérer lors de la conception.

Le chapitre 5 constitue la première étape de la méthodologie proposée pour intégrer le climat en urbanisme. Il concerne l'échelle de la planification urbaine, c'est à dire des plans directeurs généraux. Il explique les dispositions à prendre, dans une première phase, pour une planification urbaine, adaptée au climat. Cette démarche est élaborée, principalement, sur la base des conclusions des chapitres 3 & 4.

Le chapitre 6 est consacré à une échelle plus détaillée, celle de la composition urbaine. Il étudie la dépendance des différents objectifs de contrôle climatique par rapport aux choix de géométrie urbaine. Il permet d'identifier les paramètres géométriques décisifs dans ce contrôle que l'urbaniste doit utiliser pour vérifier la performance par rapport à l'adaptation climatique des choix formels qu'il fait.

Le chapitre 7 est la deuxième partie de la méthodologie proposée. Il présente une démarche conceptualisée qui explique les moyens d'intégrer le climat à l'échelle de la composition urbaine. Les concepts définis prennent en charge les objectifs de contrôle climatique et sont élaborés sur la base des paramètres géométriques identifiés au chapitre précédent.

Le chapitre 8 est une conclusion qui tente de synthétiser les principaux résultats obtenus, explique les limites objectives du mémoire et enfin les orientations pouvant être données pour des recherches futures.

مركز التوثيق
جامعة قسنطينة

Chapitre 2 : Evolution de l'intégration au climat des villes à travers l'Histoire

2.1 Introduction :

L'intérêt pour les architectures anciennes naît du besoin de références. C'est le moyen privilégié de vérifier la pertinence d'idées nées de situations actuelles.

Parmi ces idées, la volonté apparemment nouvelle d'intégrer le climat en architecture et en urbanisme. Effectivement, ces disciplines semblent de nouveau orientées vers le milieu naturel et la dimension climatique connaît un regain d'intérêt. On remarque ainsi le souci d'intégrer les éléments de l'environnement, en particulier le climat, à travers des démarches de plus en plus rationnelles. Cette tendance est favorisée, actuellement, par le développement rapide des connaissances, qui permet aujourd'hui une évaluation plus précise du comportement du bâti par rapport aux éléments climatiques.

Toutefois, l'approche climatique est parfois présentée comme étant tout à fait nouvelle, voire originale ; Pourtant l'histoire offre nombres d'exemples attestant de la connaissance des anciens quant à la nécessité de construire avec le climat. Ces exemples sont remis à jour avec l'apparition du concept d'architecture bioclimatique, par des chercheurs soucieux de retrouver les mesures d'adaptation connues dans le passé, et c'est ainsi que l'on redécouvre que le climat a longtemps été un outil déterminant dans la production architecturale.

Cependant, ce travail rétrospectif se limite en fait à l'architecture. Peut d'écrits se sont intéressés à cette adaptation dans les villes et en urbanisme. Cook (1991) remarque à travers l'analyse de plusieurs ouvrages consacrés à l'architecture bioclimatique le peu d'intérêt accordé à cette dimension à l'échelle d'établissements urbains importants. Il conclut que le concept de ville bioclimatique est une idée de recherche encore peu développée à ce jour.

Toutefois, des exceptions existent parmi lesquelles l'on peut citer Knowles (1974) pour l'étude des villes traditionnelles ou vernaculaires et Bardet (1943) pour les villes planifiées qui ont tenté de retrouver le niveau d'adaptation au climat dans les productions urbaines anciennes.

Ce chapitre a pour but d'étudier l'évolution du concept d'urbanisme climatique et de retracer l'évolution de la pensée liée à l'environnement depuis l'antiquité à nos jours. Ceci afin d'identifier toutes les mesures préconisées pour cette adaptation, et la démarche adoptée pour réaliser cette intégration.

La lecture peut se faire à deux niveaux distincts et complémentaires. D'une part il y a toutes les architectures vernaculaires reconnues pour être parfaitement intégrées à leur contexte et d'autre part, l'ensemble des écrits, traduisant les théories et la pensée (1) relative au climat dans la production des villes planifiées. Etant donné notre souci d'élaborer une démarche rationnelle pour intégrer le climat dans la conception urbaine, une plus grande attention sera accordée aux villes préalablement planifiées.

---

(1) C'est à dire tout écrit qui présente une réflexion ou des recommandations sur le sujet. Elle inclut, également, toute tentative de réglementation en vue de mettre en œuvre la dite pensée.

2.2 Les architectures vernaculaires

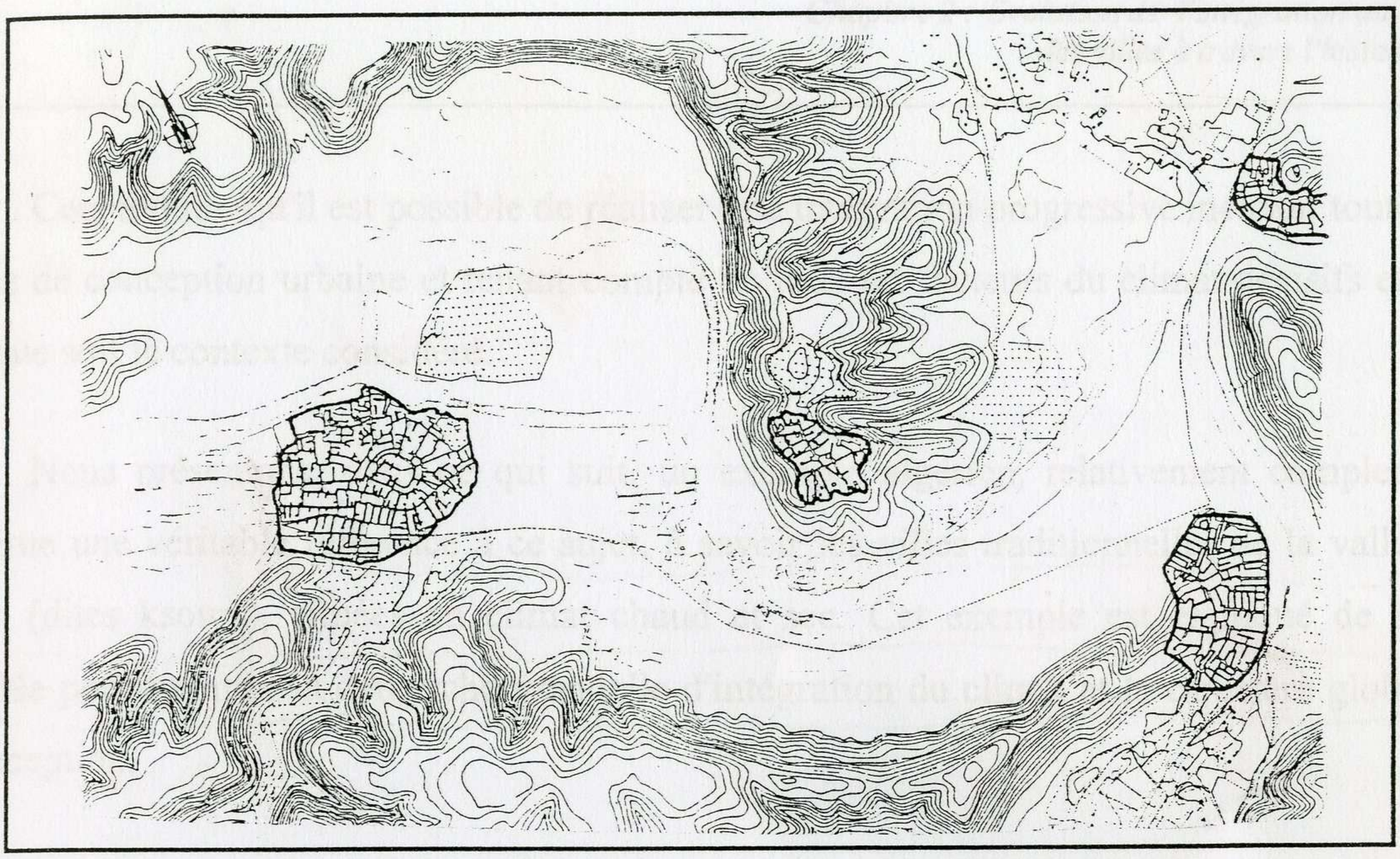
L'architecture vernaculaire est une architecture locale, expression d'une interrelation spécifique et active entre des groupes et leur milieu naturel. Elle n'est pas l'œuvre de scientifiques mais procède du perfectionnement des techniques basées sur l'expérience. Les réponses remarquables qu'elle offre sont le résultat d'une adaptation progressive dans le temps.

La dimension climatique dans ces architectures a souvent été masquée par des recherches mettant l'accent sur les caractères culturel, social, politique ou technique, considérés comme étant les principaux aspects générateurs de formes. Dans cet ordre d'idées, le climat est jugé secondaire ; Pourtant, la notion d'abri dans la forme primitive de l'habitation renvoie par définition à l'idée de protection contre les contraintes du milieu naturel. Aussi, ce milieu ne peut être négligé dans l'étude de la production bâtie. La production vernaculaire est, dans ce sens, un exemple remarquable dans l'illustration à la fois de la nécessité de considérer le climat et de sa faisabilité.

L'éventail d'exemples d'architectures vernaculaires est très grand et la littérature qui s'y rapporte est importante, mais notre propos n'est pas de rapporter toutes ces réalisations mais plutôt de relever quelques caractéristiques communes que nous jugeons intéressantes pour convaincre de la pertinence de notre problématique.

1. L'architecture vernaculaire reflète une vision globale de l'intégration du climat dans l'acte de bâtir ; C'est un exemple de continuité et d'unité entre le plan de la ville, de la maison et de la technique constructive.
2. Ces réalisations intègrent le climat dans sa globalité, c'est-à-dire que tous les éléments du climat sont pris en compte simultanément. C'est ainsi que le confort est recherché à travers le contrôle simultané de la radiation solaire, du vent, de l'humidité, etc.
3. L'architecture vernaculaire est répandue à travers toutes les régions du globe. Chacune a développé ses propres solutions selon les propriétés climatiques du lieu.
4. L'architecture vernaculaire offre plusieurs formes d'adaptation climatique pour un même climat, ce qui exclue toute idée de déterminisme climatique. A titre d'exemple l'habitat troglodytique, les casbahs ou ksours à la structure compacte et les forteresses sont toutes des solutions adoptées en climat chaud et sec.

a)



b)

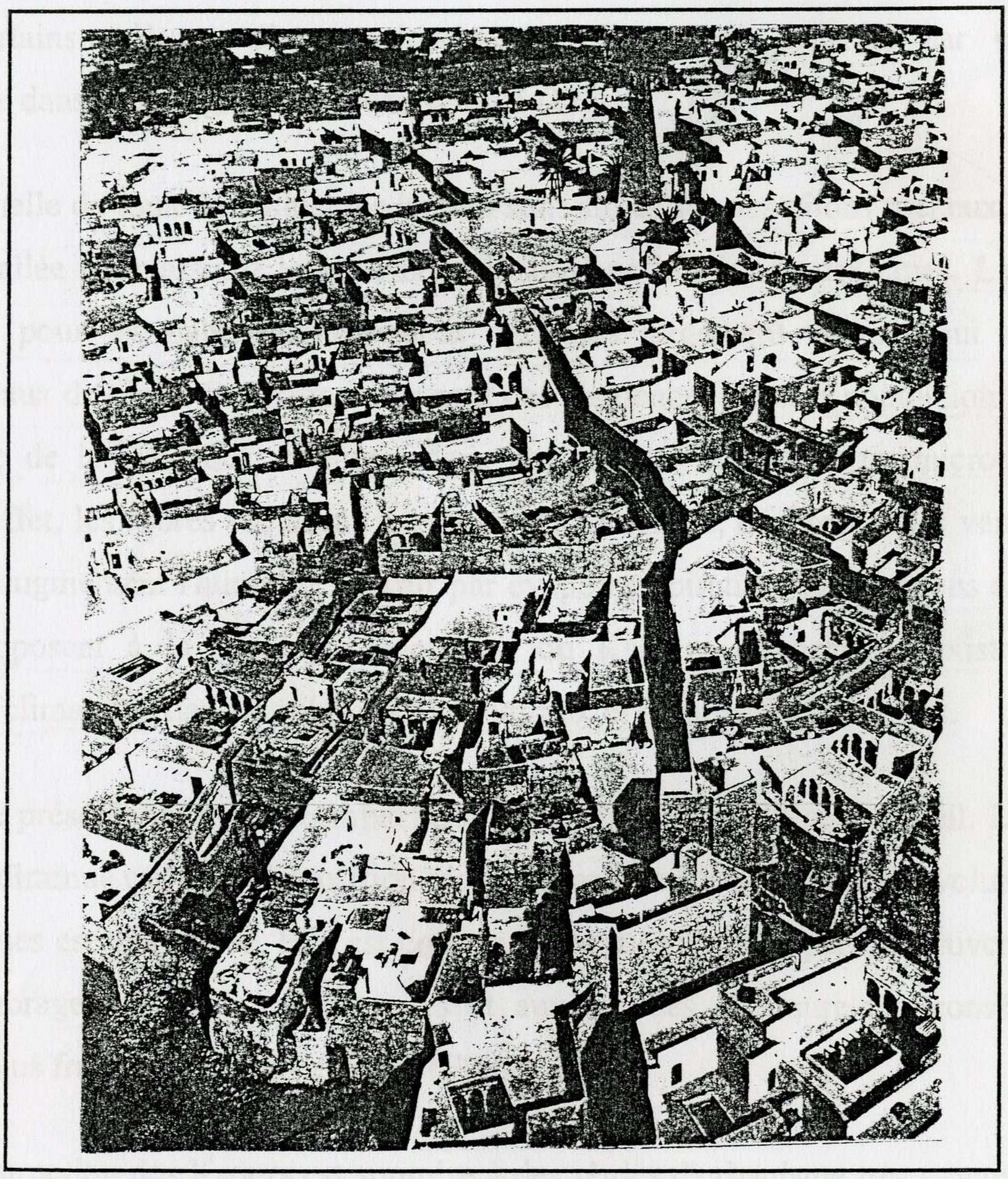


Figure 2.1 : Adaptation climatique dans les villes de la vallée du M'zab.

a) Les ksours sont situés sur des pitons rocheux pour assurer la mise hors d'eau pendant les crues.
b) la typologie du ksar est compacte pour minimiser l'exposition au soleil, la structure des rues est très serrée pour favoriser l'ombrage, et les maisons sont éclairées zénithalement par le chebek avec les galeries orientées sud.

Ceci montre qu'il est possible de réaliser une intégration progressive incluant toutes les phases de conception urbaine et tenant compte de tous les facteurs du climat décisifs et cela quel que soit le contexte considéré.

Nous présentons, dans ce qui suit, un exemple algérien, relativement complet, qui constitue une véritable référence à ce sujet, à savoir les villes traditionnelles de la vallée du M'zab (dites ksours), situées en climat chaud et sec. Cet exemple est expliqué de façon détaillée pour montrer la démarche graduelle d'intégration du climat et le caractère global de la conception.

Parmi les principes observés dans la construction des villes du M'zab et qui demeurent constants, certains relèvent d'une préoccupation climatique évidente car celle-ci est incontournable dans cette région d'extrême aridité (Figure 2.1).

A l'échelle de toute la vallée, les ksours sont situés sur des pitons rocheux, élevés par rapport à la vallée pour assurer la mise hors d'eau dans la période des crues. La vallée est ainsi dégagée pour les palmeraies, espaces agricoles largement irrigués qui assurent le stockage des eaux de pluie. Ces palmeraies sont des résidences d'été, la population s'y déplace à la recherche de la fraîcheur et trouve dans ces espaces ombragés un microclimat plus agréable. En effet, les arbres réduisent le rayonnement solaire, déchargent les vents de leurs poussières, et augmentent l'humidité de l'air par évapotranspiration. Les maisons aérées de la palmeraie s'opposent à la typologie compacte du Ksar et confirment l'existence d'une préoccupation climatique dans les choix architecturaux et urbains (Figure 2.1 a).

La ville présente un aspect compact pour minimiser l'exposition au soleil. Le stockage de chaleur est diminué car cette disposition réduit le rapport surface exposée - volume bâti. La structure des rues est très serrée. Elle est constituée de rues étroites, parfois couvertes, ce qui fournit un ombrage maximal aux passages et aux façades et assure par conséquent des températures plus fraîches dans ces espaces (Figure 2.1b).

La construction des Ksours est soumise à des règles d'urbanisme très strictes. Le droit au soleil y est scrupuleusement respecté et tout constructeur s'y conforme. Il est intéressant de relever que l'orientation des maisons et leurs hauteurs, dictées par la nécessité d'assurer l'accès

le vis à vis dans le voisinage (Ego)

au soleil à chaque maison est aussi important que l'obligation de préserver l'intimité vis-à-vis du voisin (Donnadieu et Didillon 1977). Il est peut être le plus important puisqu'il peut s'opposer à l'élévation de l'acrotère, qui garantit des regards extérieurs, et la terrasse devient, dans ce cas, inaccessible aux hommes ; Ainsi l'usage de la terrasse peut être modifié pour des considérations d'ensoleillement.

Les maisons s'associent par mitoyenneté. La maison est de type introverti, organisée autour d'un patio, dit chebek. Ce modèle méditerranéen est reproduit avec une adaptation à la lumière excessive du climat saharien par la réduction de son ouverture vers le ciel, d'où l'évitement des effets d'éblouissement. Les galeries des maisons sont toujours orientées sud (Raverau 1982) car si l'ardeur du soleil est redoutée en été, les rayons solaires sont recherchés en hiver. Ainsi la solution antique du portique est reprise.

Les toitures sont les éléments les plus exposés. Le recours aux couleurs claires permet de réfléchir le maximum de rayonnement vers le ciel. Le stockage à l'intérieur des bâtiments est ainsi réduit. Les façades ont peu d'ouvertures. La ventilation est assurée par des fentes verticales en hauteur et par le chebek. La circulation de l'air se fait par différence de températures existant entre la cave ou la rue et les espaces intérieurs. Enfin les matériaux utilisés pour les murs et les toitures ont de fortes inerties thermiques et protègent de la chaleur extérieure.

La lecture de cette production traditionnelle présente un intérêt majeur : celui de montrer la nécessité et la possibilité d'intégrer le climat à une échelle urbaine et non pas seulement architecturale.

Toutefois, les enseignements de ces architectures, d'une manière générale, posent quelques difficultés quant à leur transposition à des situations actuelles, notamment :

L'interprétation faite est souvent qualitative basée sur l'observation. Certaines affirmations doivent être vérifiées par des recherches scientifiques qui permettraient d'évaluer quantitativement les performances climatiques de ces architectures, tel que cela a été tenté par certains chercheurs (Cf. Knowles 1974, Ouahrani 1993, Krishan 1996). Ceci permettrait son exploitation pour le développement de démarches rationnelles d'adaptation au climat.

Ceci nous amène à examiner une autre source d'information, plus explicite, à savoir la production urbaine planifiée.

2.3 L'adaptation au climat dans les villes planifiées

2.3.1 L'héritage de l'antiquité

La pensée dans la civilisation mésopotamienne et égyptienne ne peut être appréciée qu'à travers l'analyse de la production concrète de l'époque car des écrits expliquant leurs principes de composition sont inexistants.

Il serait exagéré d'affirmer qu'une préoccupation pratique d'intégrer le climat ait guidé la réflexion à cette époque, car, ces civilisations sont connues pour être hautement symboliques.

Toutefois, il n'est pas sans intérêt de remarquer que dans les tombeaux et temples égyptiens, les axes suivent, en général, les directions cardinales ou leurs bissectrices, et que Kahun, (figure 2.2), la ville la plus connue d 'Egypte (2500 av. J.C.) est organisée selon les directions cardinales avec prédominance des rangées Est-Ouest. Ce dernier point pourrait témoigner d'une volonté d'exploiter l'énergie solaire en favorisant l'exposition au sud (Bardet 1943).

Plus à l'Est, en Extrême Orient, la civilisation chinoise offre aussi des indices d'adaptation urbaine au climat. Les plans des villes chinoises respectent quelques principes constants, à savoir : l'orientation systématique Nord-Sud et l'organisation autour de cours (Boyd 1962, Hoa 1981). Chaque bâtiment important a son coté le plus long orienté vers le sud. Les bâtiments Est et Ouest sont moins élevés (Boyd, 1962).

Le choix de l'orientation peut être expliqué par divers arguments, mais il semblerait que l'organisation autour des cours, la détermination des gabarits et la préférence du sud sont directement liés au climat (figure 2.3).

Les premières références sûres en matière de composition avec le climat se trouvent sans doute dans l'héritage des civilisations grecques et romaines car celles-ci nous sont transmises par des écrits, clarifiant leurs concepts de composition.

Pour les Grecs, et à l'instar des autres domaines, la raison intervient dans l'ordonnancement matériel de leurs cités. Il semble établi que l'aspect pratique, utilitaire ou hygiénique domine l'aspect rituel dans la pensée grecque (Martin, 1981).

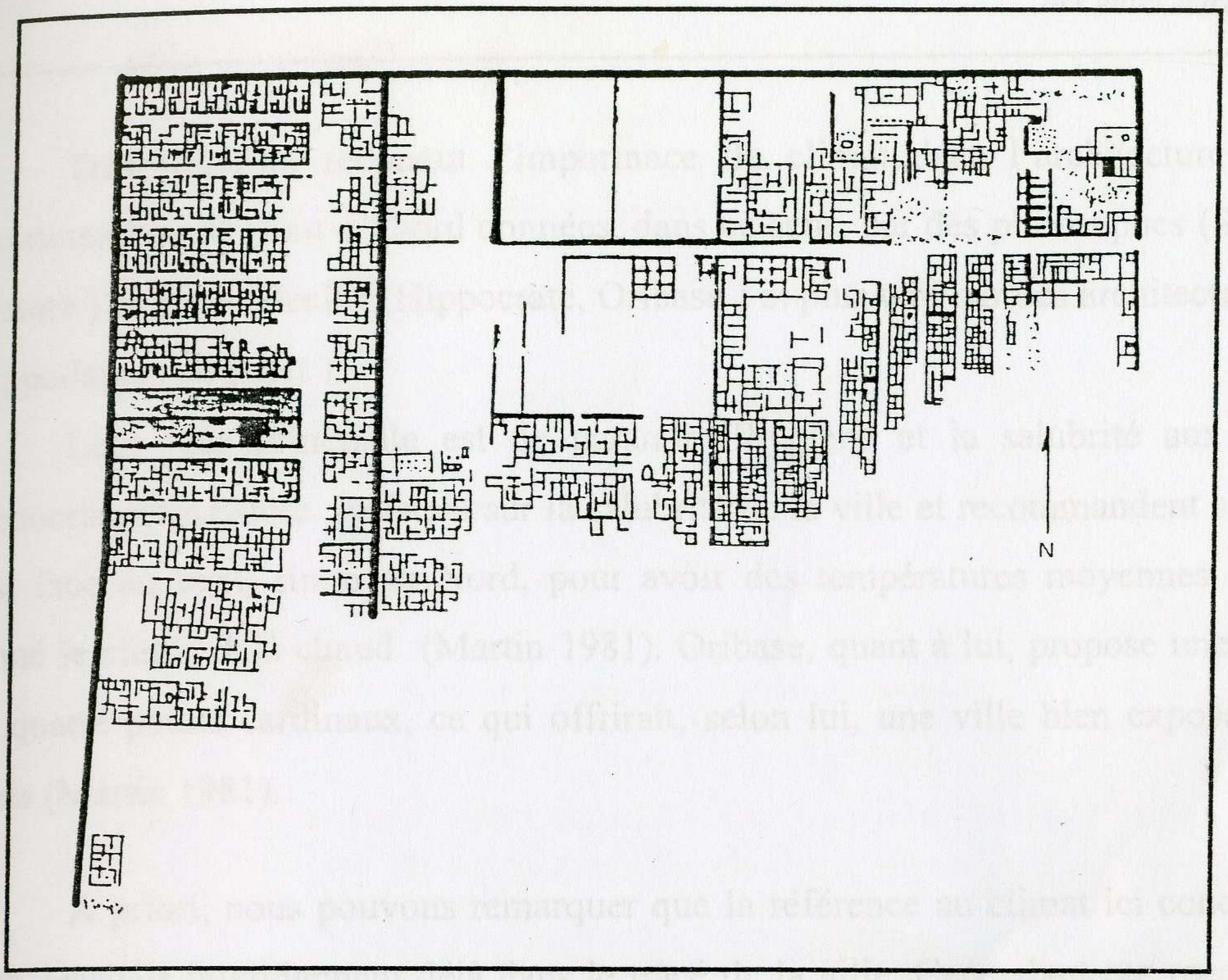


Figure 2.2 : Plan de la ville égyptienne de Kahun, 2500 av. JC (source Knowles 1974)

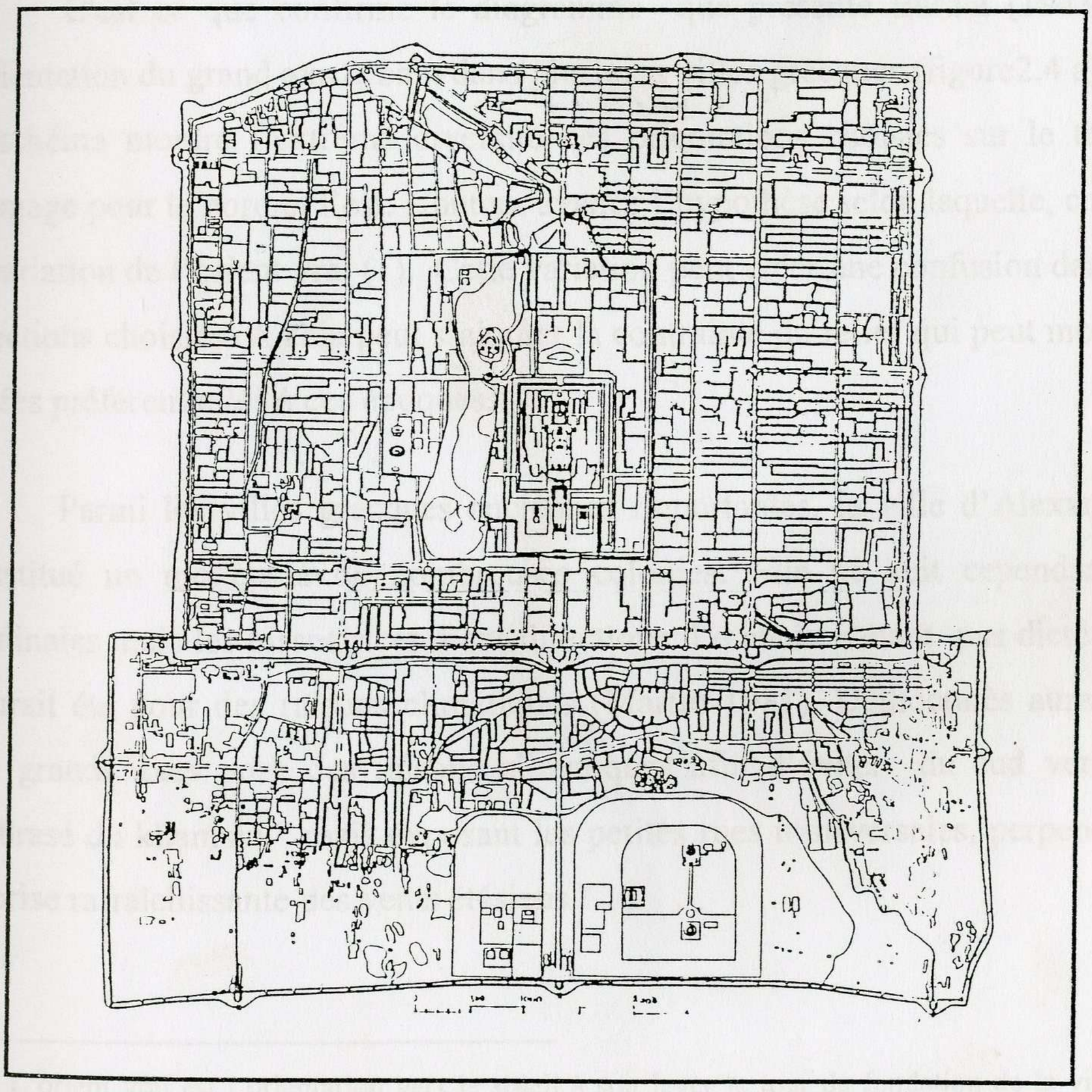


Figure 2.3 : Plan de la ville chinoise de Beijing (Source : Hoa 1981)

Très tôt, l'on reconnut l'importance du climat dans l'architecture des villes. Des recommandations sont d'abord données, dans ce sens, par des philosophes (Socrate, Xenophon, Aristote) et des médecins (Hippocrate, Oribase) et plus tard par des architectes et des urbanistes (Hippodamos de milet).

Leur idée principale est de garantir l'hygiène et la salubrité aux citadins. Socrate, Hippocrate et Aristote insistent sur la salubrité de la ville et recommandent son orientation vers l'est face au vent, sinon au Nord, pour avoir des températures moyennes et tempérées étant donné le climat déjà chaud (Martin 1981). Oribase, quant à lui, propose une ville tramée selon les quatre points cardinaux, ce qui offrirait, selon lui, une ville bien exposée au soleil et aux vents (Martin 1981).

A priori, nous pouvons remarquer que la référence au climat ici concerne le soleil et le vent, lesquels interviennent déjà dans le tracé de la ville. Cependant ces recommandations sont parfois divergentes, trop générales et limitées à des lieux précis en climat tempéré.

C'est ce que confirme le diagramme que présente Bardet (1943) et qui schématise l'orientation du grand axe urbain dans plusieurs villes grecques (figure2.4 a). Sans être exhaustif, ce schéma montre l'extrême diversité des orientations choisies sur le terrain, avec un léger avantage pour le nord et l'est. L'auteur avance l'hypothèse selon laquelle, cette diversité est due à la variation de l'orient vrai (1). Cette variation peut créer une confusion dans l'interprétation des directions choisies. A cela peut s'ajouter la contrainte du relief qui peut modifier les orientations jugées préférentielles à ces époques.

Parmi les villes grecques anciennes importantes, la ville d'Alexandrie (figure 2.4 b) a constitué un modèle à de nombreuses colonies. Elle ne suit cependant pas les directions cardinales mais les bissectrices à ces directions. Le choix n'étant pas dicté par la topographie, il l'aurait été pour des raisons climatiques (Martin 1981). Deinocratès aurait choisi l'orientation des grands axes pour des raisons climatiques afin d'éviter du sud vers le nord "le souffle embrasé du khamsin " mais exposant les petites rues transversales, perpendiculaires à la mer "à la brise rafraîchissante des vents étésiens ".

---

(1) L'orient vrai est l'orientation vers le soleil à son lever le jour de fondation de la ville. Il est variable durant l'année. Celui ci varie avec la latitude et atteint 56° entre le solstice d'hiver et d'été pour la région grecque (Bardet 1943).

a)

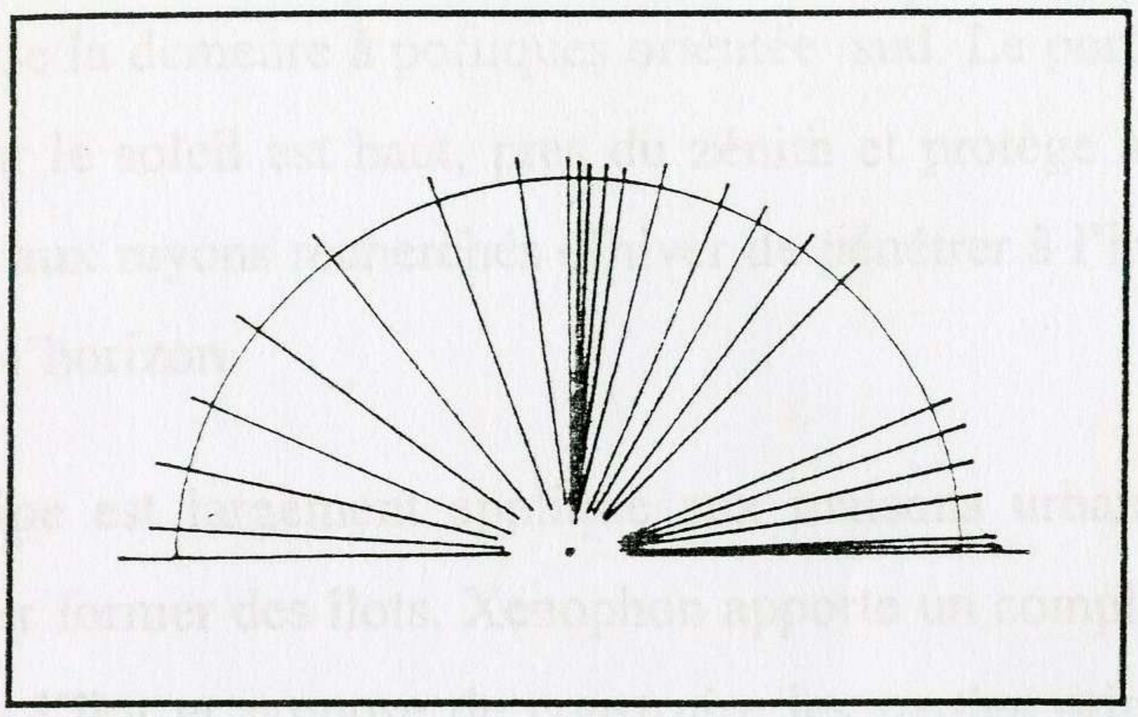


Figure 2.4 a: Schématisation de l'axe urbain dans 27 villes grecques (Bardet 1943) illustrant la diversité des orientations du grand axe urbain dû à la direction variable de l'orient vrai.

b)

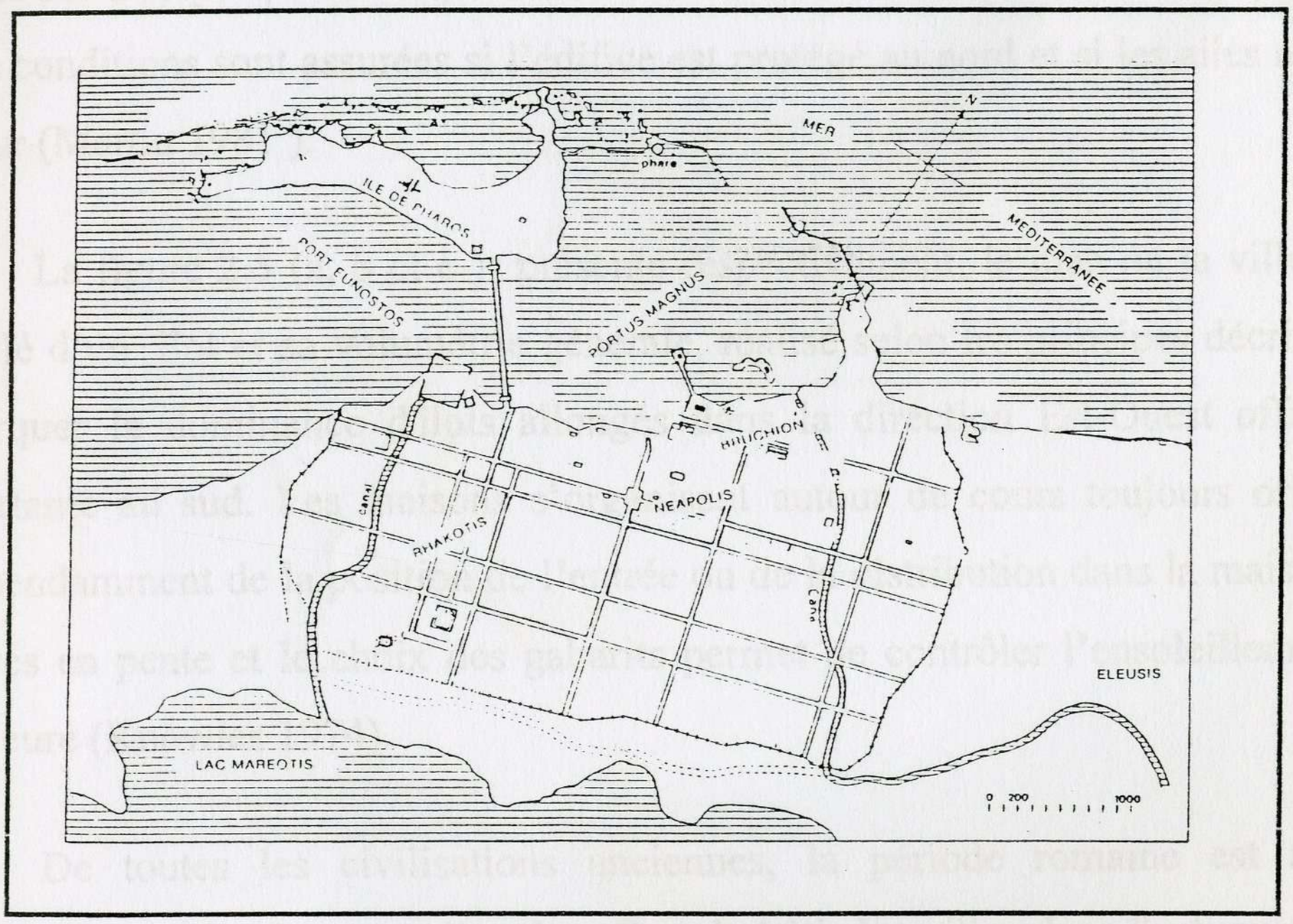


Figure 2.4 b : La ville d'Alexandrie de l'époque grecque (source Rolland 1981).
Le tracé des rues exploite les brises marines et évite les vents chauds du sud.

A l'échelle de la maison urbaine, l'orientation préférentielle au Sud est déjà connue. Xenophon propose la demeure à portiques orientée sud. Le portique permet d'arrêter les rayons solaires d'été, car le soleil est haut, près du zénith et protège ainsi les espaces intérieurs. Par contre, il permet aux rayons recherchés d'hiver de pénétrer à l'intérieur de la maison, puisque le soleil est bas sur l'horizon.

Ce principe est largement appliqué aux maisons urbaines généralement associées par mitoyenneté, pour former des îlots. Xenophon apporte un complément d'information concernant les gabarits dans l'îlot et propose de construire les parties orientées au midi plus hautes pour qu'elles reçoivent le soleil d'hiver et celles qui sont ouvertes au nord plus basses pour qu'elles ne soient pas sous le coup des vents froids (Martin 1981).

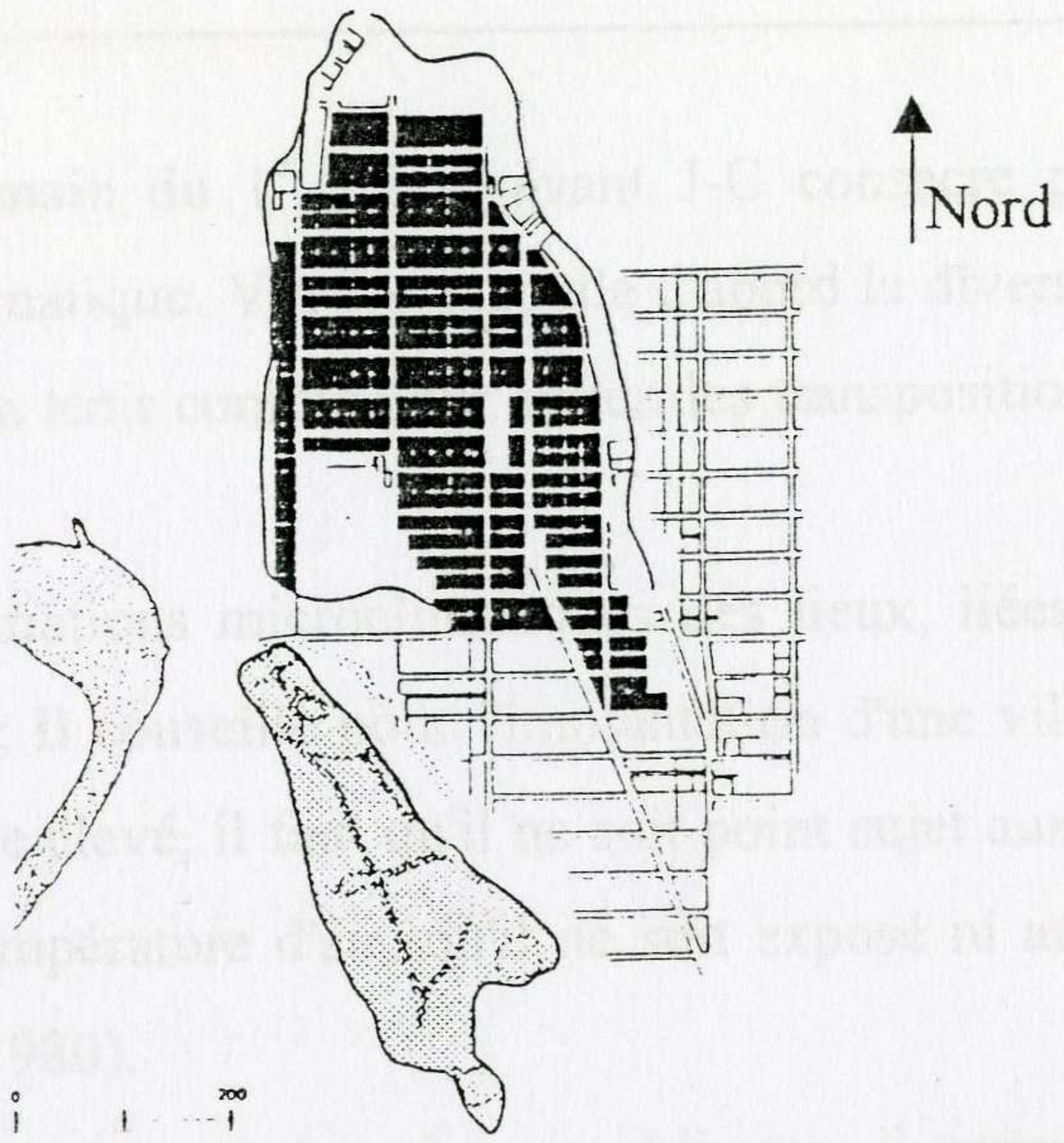
Enfin, une référence au confort dans la maison existe ; Elle est attribuée à Aristote ou à l'un de ses disciples, selon laquelle la maison doit être bien aérée l'été et bien ensoleillée l'hiver et ces conditions sont assurées si l'édifice est protégé au nord et si les ailes ne sont pas de même largeur (Martin 1981).

La figure 2.5 (a, b et c) présente respectivement, le plan de la ville d'Olynthe, le plan détaillé d'un îlot et sa volumétrie générale, réalisé selon les principes décrits plus haut. Il est à remarquer la dominance d'îlots allongés dans la direction Est-Ouest offrant une exposition importante au sud. Les maisons s'organisent autour de cours toujours orientées vers le sud, indépendamment de la position de l'entrée ou de la distribution dans la maison. L'utilisation des toitures en pente et le choix des gabarits permet de contrôler l'ensoleillement et la ventilation intérieure (Knowles 1974).

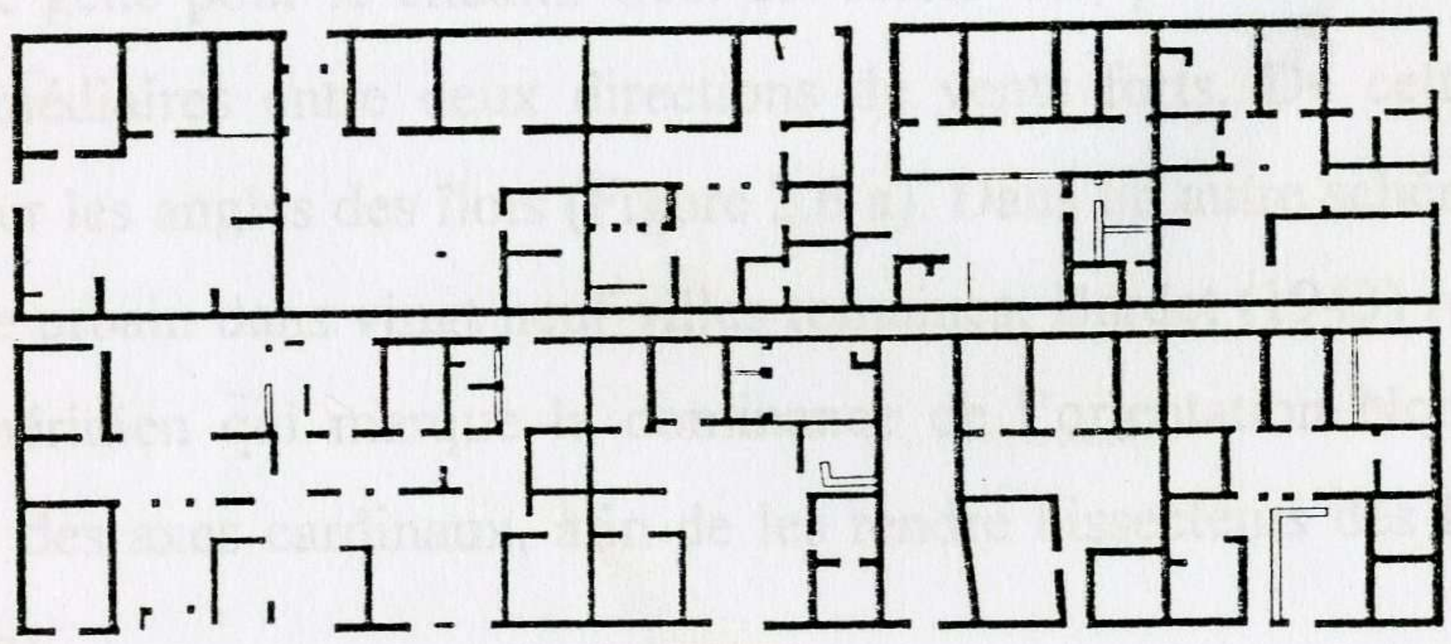
De toutes les civilisations anciennes, la période romaine est sans doute la plus intéressante car la plus complète dans l'art de bâtir les villes dans l'antiquité. Son étude renvoie inévitablement au traité : "De l'Architecture" de Vitruve qui rassemble l'essentiel des connaissances sur l'art de construire de l'époque (1).

(1) On déplore, cependant, la disparition des graphiques qui accompagnaient le texte et qui auraient permis une meilleure compréhension des recommandations proposées.

a)



b)



c)

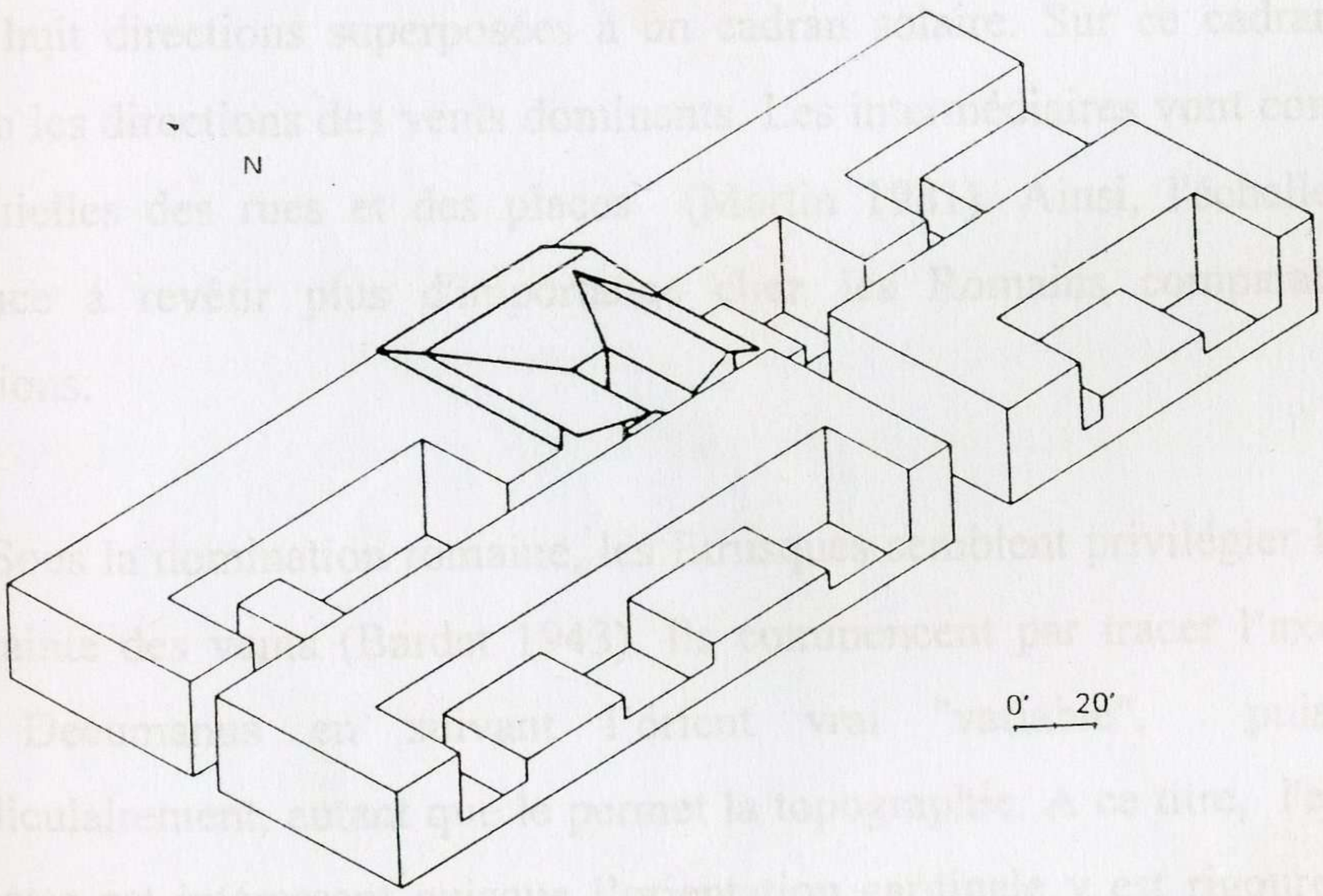


Figure 2.5 : a) Plan de la ville d'Olynthe (Source : Benevolo 1980).
b) Ilot de la ville et c) Volumétrie globale de l'îlot (Source : Knowles 1974).

Cet architecte romain du 1er siècle avant J-C consacre plusieurs chapitres de son ouvrage à la question climatique. Vitruve rappelle d'abord la diversité des climats à travers le monde et la nécessité d'en tenir compte pour éviter des transpositions hasardeuses de modèles architecturaux.

Conscient des variations microclimatiques des lieux, liées au relief, il recommande d'abord le choix du site ; Il conseille pour l'implantation d'une ville un lieu sain qu'il définit comme suit : "il doit être élevé, il faut qu'il ne soit point sujet aux brouillards ni aux bruines et qu'il ait une bonne température d'air, qu'il ne soit exposé ni aux grandes chaleurs ni aux grands vents " (Vitruve 1980).

Pour le tracé des rues et des places publiques, il recommande d'éviter les vents dominants, qui ne doivent pas être canalisés dans les rues, ce qui augmenterait leur vitesse et causerait une gêne pour le citadin. Ceci est selon lui, possible si le tracé se fonde sur les angles intermédiaires entre deux directions de vents forts. De cette manière les vents se briseraient sur les angles des îlots (Figure 2.6 a). Dans un autre schéma donnant l'orientation du grand axe urbain dans vingt neuf villes romaines, Bardet (1943) remarque un groupement autour du méridien qui marque la dominance de l'orientation Nord-Sud, avec une légère déclinaison des axes cardinaux, afin de les rendre bissecteurs des huit vents " vitruviens " (Figure 2.6 b).

Vitruve ne se limite pas aux conseils, il innove en proposant des moyens techniques pour déterminer " scientifiquement " la meilleure orientation par l'utilisation de la rose des vents à huit directions superposées à un cadran solaire. Sur ce cadran seront fixées avec précision les directions des vents dominants. Les intermédiaires vont constituer les directions préférentielles des rues et des places (Martin 1981). Ainsi, l'échelle de l'espace urbain commence à revêtir plus d'importance chez les Romains comparativement aux autres civilisations.

Sous la domination romaine, les Etrusques semblent privilégier l'orientation solaire à la contrainte des vents (Bardet 1943). Ils commencent par tracer l'axe urbain Est - Ouest appelé Decumanus en suivant l'orient vrai "variable", puis l'axe du Cardo perpendiculairement, autant que le permet la topographie. A ce titre, l'exemple de la ville de Marzobotto est intéressant puisque l'orientation cardinale y est rigoureuse malgré un relief difficile. Le dimensionnement des rues est à relever puisque les rues Est-Ouest sont larges et

les rues Nord-Sud étroites ; Ceci assure le meilleur ensoleillement aux façades sud des îlots en hiver, car les ombres sont évitées. Les rues Nord-sud bénéficiant du soleil à midi uniquement sont maintenues étroites ce qui protège également les maisons du rayonnement d'ouest en fin de journée (Bardet 1943).

Plus en détail, à l'échelle de l'îlot urbain, la maison urbaine romaine (figure 2.7) illustre aussi bien les idées héritées des Grecs que des connaissances romaines ultérieures. Cette maison urbaine - type s'organise autour d'un patio bordé de portiques. Des toitures inclinées vers le patio permettent la récupération des eaux de pluie dans un bassin. Cette eau en s'évaporant rafraîchit l'air dans la maison. Les différences de gabarits coupent les vents du Nord et permettent un ensoleillement adéquat.

Enfin, la Rome antique est également une référence en matière de réglementation liée au climat. Nous devons aux romains la première tentative de réglementation de l'accès au soleil dans l'histoire. Cet accès au soleil est un droit inaliénable régi par la loi. Le code adopté sous Justinien au VI siècle après J.C. reconnaît le "droit au soleil " et garantit son respect en milieu urbain par l'interdiction de toute construction pouvant créer de l'ombre à des espaces nécessitant l'ensoleillement.

Nous concluons de ce qui précède que l'intérêt de la pensée gréco-romaine est d'avoir bien posé le problème en axant leur réflexion sur des considérations qualitatives à savoir la salubrité et l'hygiène dans la ville, un bon ensoleillement et un meilleur confort aussi bien dans les espaces extérieurs qu'à l'intérieur des maisons.

Il est à noter un souci certain d'exploiter les potentialités naturelles du site et une volonté d'orientation et d'organisation des villes par rapport au soleil et au vent. Cependant, les connaissances en urbanisme sont, toutefois, moins précises que pour l'architecture compte tenu de la complexité de l'ensemble urbain et du niveau des connaissances de l'époque et qui apparaît, notamment, dans les divergences concernant l'orientation de la ville et de la priorité accordée alternativement au soleil et au vent.

Enfin, il est important de souligner l'existence d'une démarche progressive dans leur réflexion, l'amorce d'une réglementation qui instaure l'accès au soleil et enfin, la tentative de développer des instruments techniques de calcul pour une intégration plus efficace.

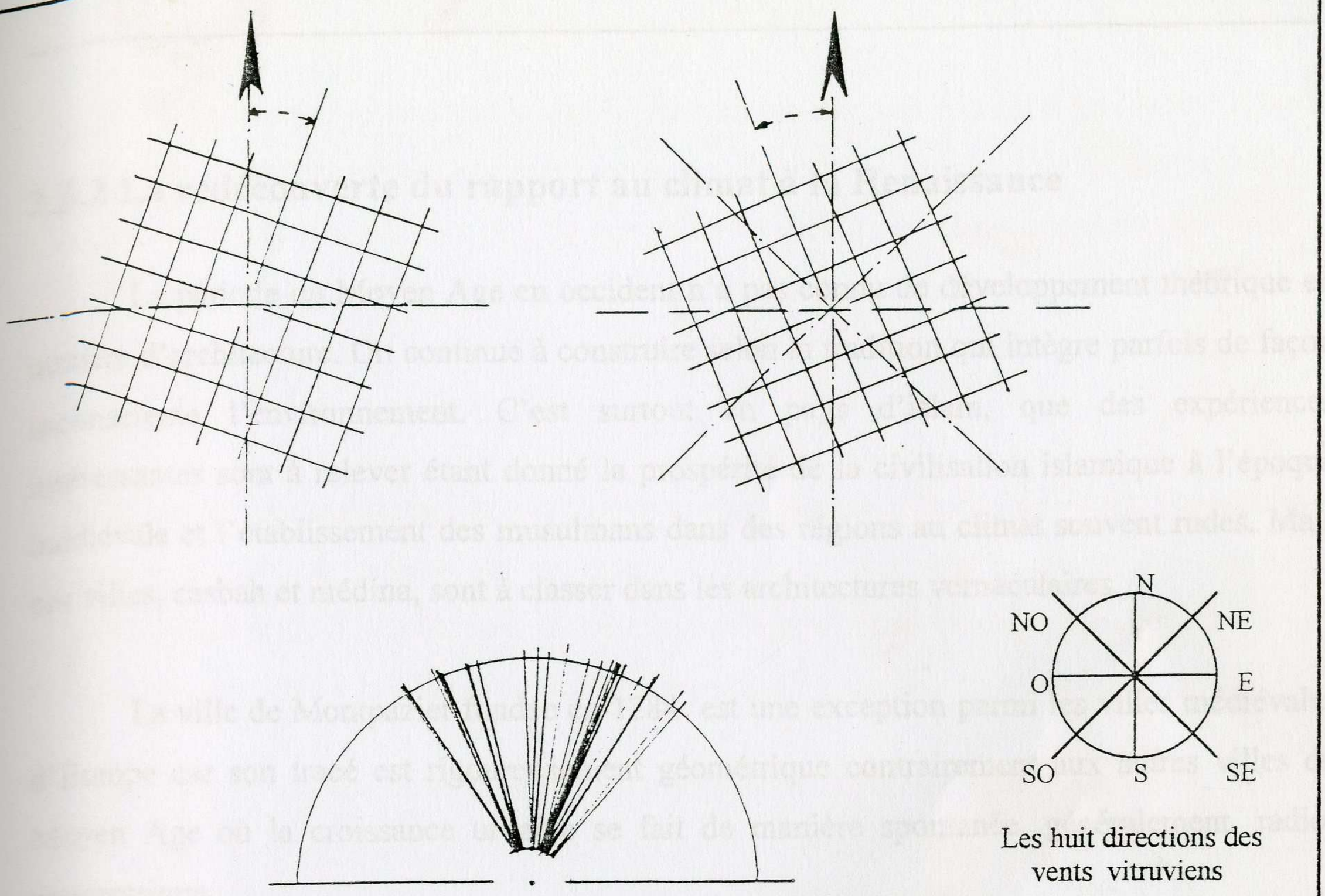
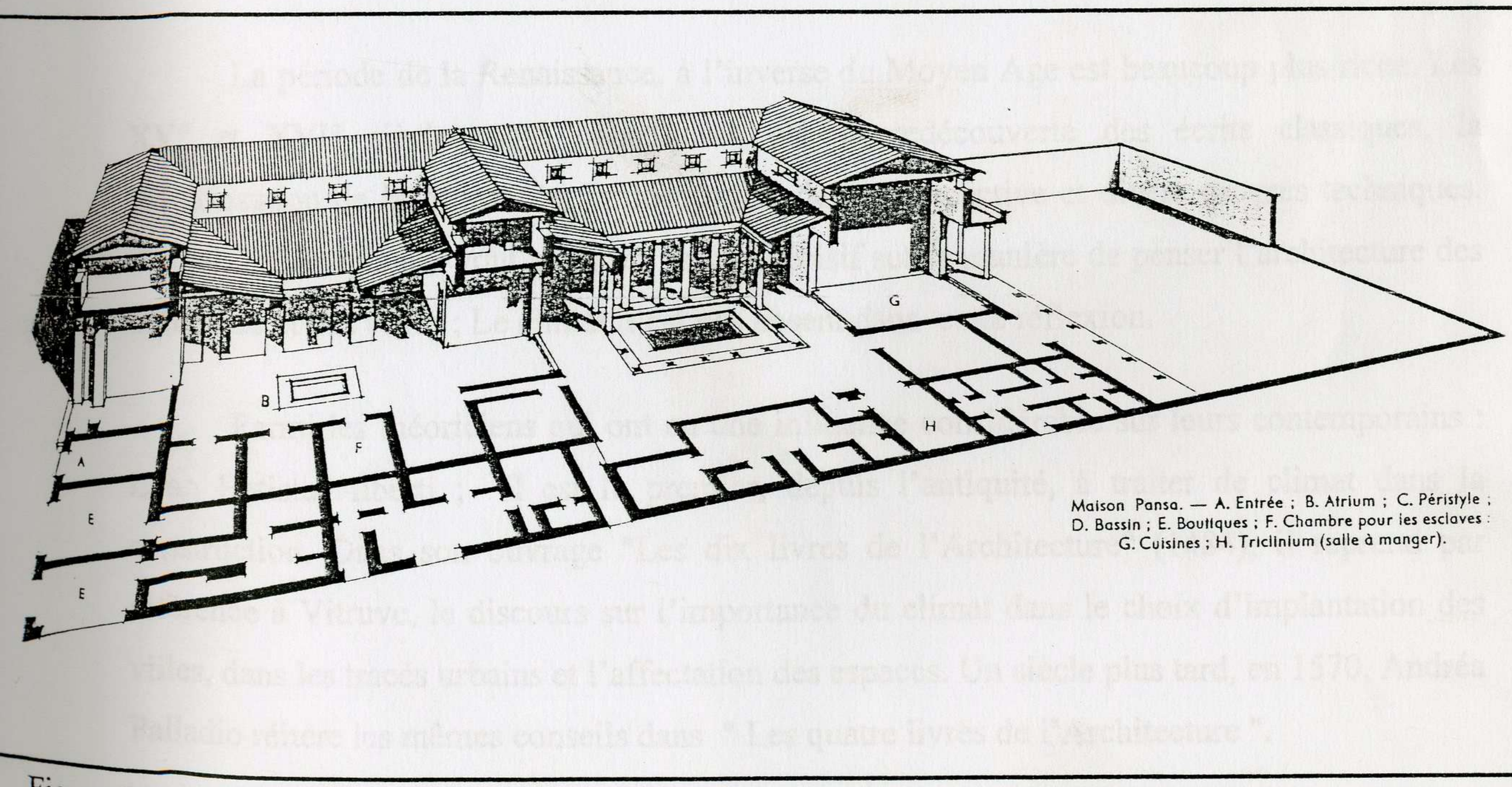


Figure 2.6 : a) Orientations des trames urbaines proposées par Vitruve (Bardet 1943). La trame est déviée de 22°5 / nord pour éviter toute canalisation du vent dans les rues.
b) Schématisation de l'axe urbain dans 29 villes romaines (Bardet 1943) montrant un regroupement vers le nord qui montre la dominance de l'orientation N-S.



Maison Pansa. — A. Entrée ; B. Atrium ; C. Péristyle ; D. Bassin ; E. Boutiques ; F. Chambre pour les esclaves ; G. Cuisines ; H. Triclinium (salle à manger).

Figure 2.7: Maison urbaine romaine type illustrant les principes de conception climatique romains. (Larousse 1975).

2.3.2 La redécouverte du rapport au climat à la Renaissance

La période du Moyen Age en occident n'a pas connu de développement théorique en matière d'architecture. On continue à construire selon la tradition qui intègre parfois de façon inconsciente l'environnement. C'est surtout en pays d'islam, que des expériences intéressantes sont à relever étant donné la prospérité de la civilisation islamique à l'époque médiévale et l'établissement des musulmans dans des régions au climat souvent rudes. Mais ces villes, casbah et médina, sont à classer dans les architectures vernaculaires.

La ville de Montpazier fondée en 1284 est une exception parmi les villes médiévales d'Europe car son tracé est rigoureusement géométrique contrairement aux autres villes du Moyen Age où la croissance urbaine se fait de manière spontanée, généralement, radio-concentrique.

Les rues de Montpazier sont orientées vers les quatre points cardinaux, avec dominance des rues Est-Ouest, ce qui favorise des îlots aux larges façades sud. Le découpage des parcelles tire profit de cette disposition en offrant à chaque maison une double orientation Nord – sud (Figure 2.8). La logique de dimensionnement des rues y est similaire à Mazobotto.

La période de la Renaissance, à l'inverse du Moyen Age est beaucoup plus riche. Les XV° et XVI° siècles sont caractérisés par la redécouverte des écrits classiques, la revalorisation de la géométrie, la découverte de la perspective et divers progrès techniques. Autant d'éléments qui vont avoir un impact décisif sur la manière de penser l'architecture des bâtiments et des villes ; Le climat n'est pas absent dans cette réflexion.

Parmi les théoriciens qui ont eu une influence considérable sur leurs contemporains : Léon Batista Alberti ; Il est le premier, depuis l'antiquité, à traiter de climat dans la construction. Dans son ouvrage "Les dix livres de l'Architecture" (1484), il reprend par référence à Vitruve, le discours sur l'importance du climat dans le choix d'implantation des villes, dans les tracés urbains et l'affectation des espaces. Un siècle plus tard, en 1570, Andréa Palladio réitère les mêmes conseils dans " Les quatre livres de l'Architecture ".

Concrètement, Les réalisations de la Renaissance ont très peu suivi les idées d'Alberti et de Palladio. Conformément aux idées nouvelles de cette période, ces villes sont réfléchies en planimétrie. Leurs plans sont des figures géométriques où les rues rayonnent, parfaites, à partir du centre dans toutes les directions, sans aucune préoccupation d'orientation Les fortifications de ces villes sont souvent en forme d'étoiles, sans direction particulière, ce qui renforce le caractère bi-dimensionnel de la conception (Figure 2.9).

Ceci s'expliquerait par la redécouverte des aspects esthétiques et plastiques dans l'architecture romaine, aspects qui ont retenu l'attention bien plus que le côté pratique de l'ensoleillement et de la ventilation, pourtant remis à jour. Cette tendance est corroborée par l'importance accordée à la géométrie et à la perspective à l'époque de la Renaissance.

Ici encore des exceptions existent, et nous pouvons donner comme exemple la ville forteresse de Durer (figure 2.9) au premier âge de la Renaissance. Elle serait dictée par des préoccupations climatiques. Son auteur justifie l'orientation de l'enceinte par la volonté de briser les vents forts. Egalement, on peut citer, la ville de Vitry le François, première manifestation urbaine de la Renaissance, fondée en 1544. Elle est inclinée à 22° à l'est du méridien où les rues principales avaient comme noms les directions cardinales qu'elles suivent (Bardet, 1943).

Néanmoins, l'ouvrage d'Alberti va connaître un meilleur sort sur le nouveau continent. La découverte de l'Amérique (1482) va engendrer un phénomène important, et son urbanisation devient vite nécessaire. Cette urbanisation se fera dans le respect d'une législation appelée loi des Indes, promulguée sous Philippe II d'Espagne en 1573 et qui est la première loi d'urbanisme de l'époque moderne. Elle avait pour but de fixer les règles et procédures d'urbanisme. Elle consacre au climat quelques chapitres largement inspirés de Vitruve et d'Alberti. C'est une législation remarquable qui présente l'intérêt d'avoir été rigoureusement respectée dans toutes les fondations espagnoles de l'époque (Reps, 1969).

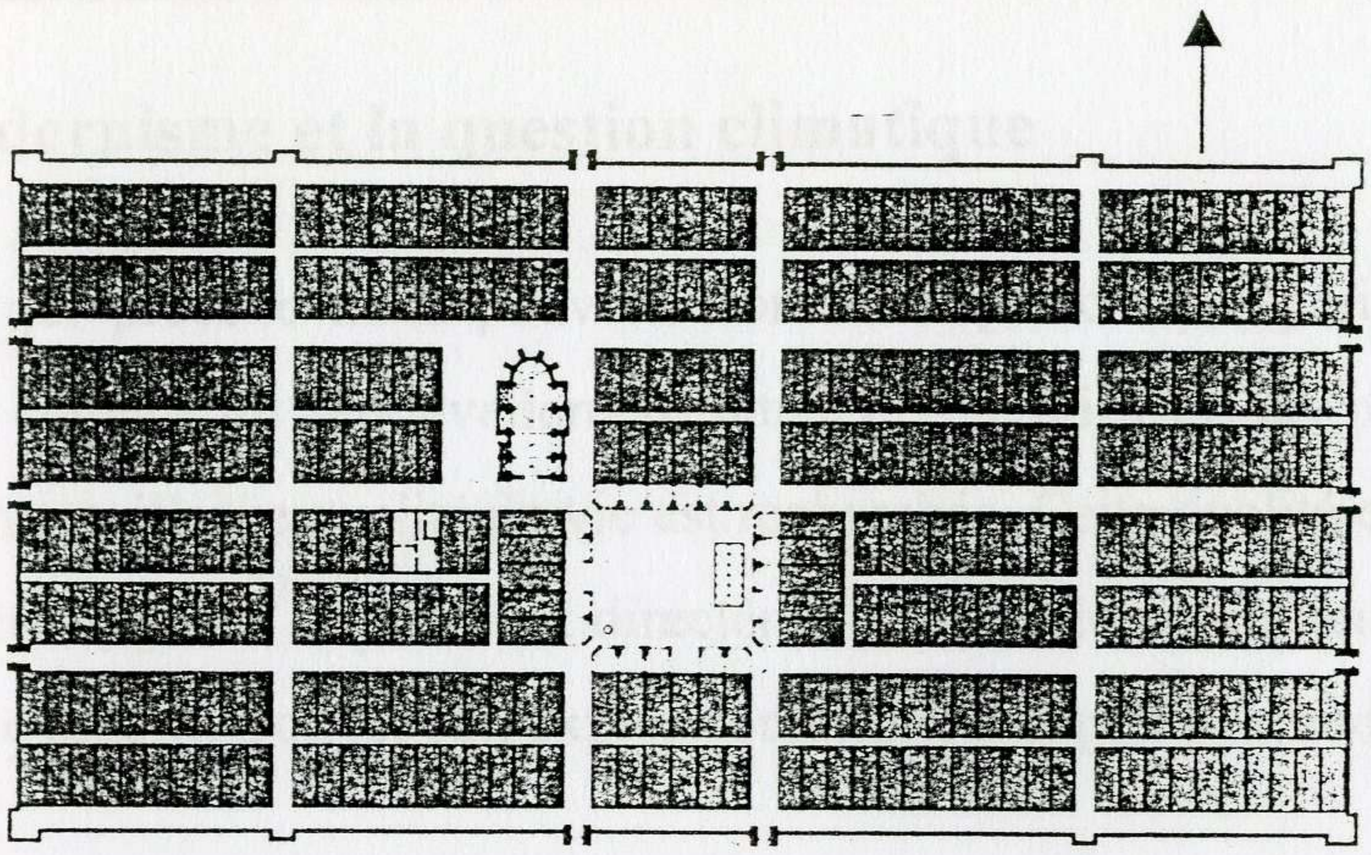
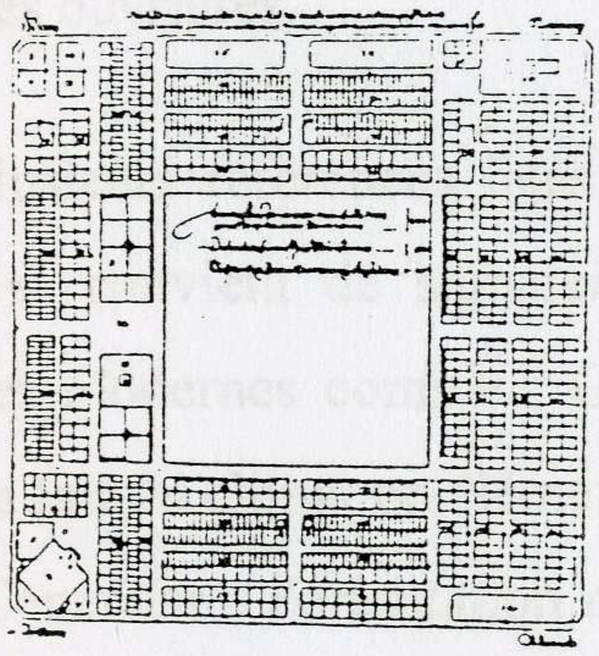
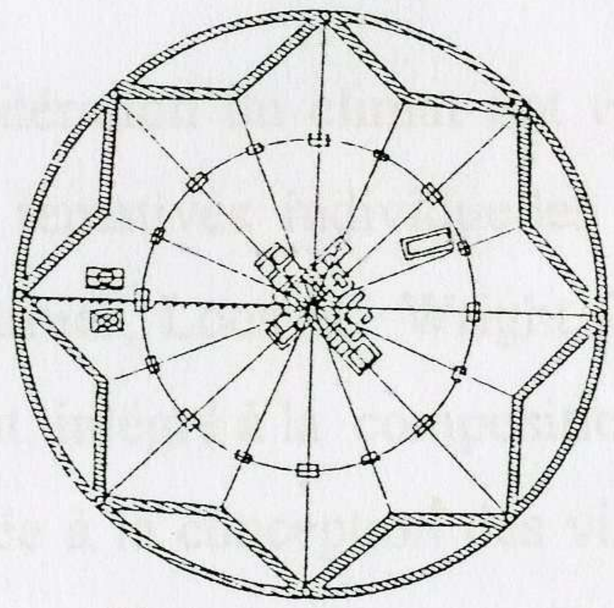


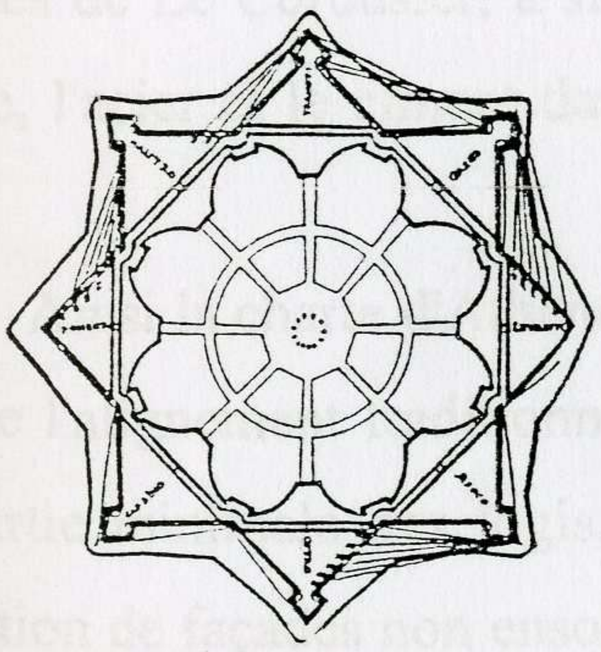
Figure 2.8 : La ville médiévale de Montpazier, 1284 qui montre l'orientation Nord-Sud des îlots et les large rues Est–Ouest pour des besoins d'ensoleillement (Source : Reps 1969).



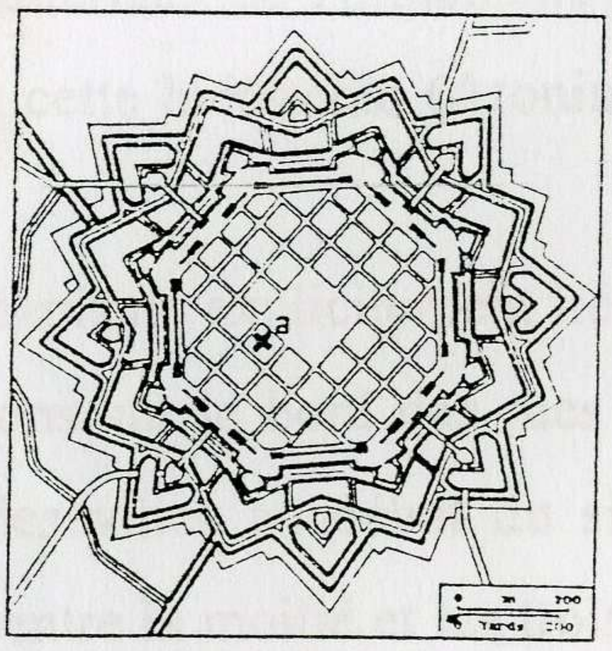
A. Dürer,
schéma de ville (1527)



Filarete,
schéma planimétrique de
Sforzinda (1451-1465)



G. Maggi,
schéma de ville militaire
(1564)



Vauban,
plan de Longwy (1679).

Figure 2.9 : Exemples de villes de la Renaissance, illustrant la conception planimétrique et géométrique de l'époque (Source : Tafuri 1981).

2.3.3 Le modernisme et la question climatique

De ce qui précède nous pouvons constater que chaque période forte de l'histoire de l'architecture connaît un renouvellement dans ses théories et ses pensées. Il semblerait qu'à chaque fois, une meilleure qualité de vie est recherchée. Cette qualité est habituellement associée à la salubrité et l'hygiène, laquelle est directement rattachée au milieu naturel et par conséquent au climat. Cette idée va trouver son expression ultime à la période moderne.

La période moderne est, sans doute, un moment essentiel dans l'histoire de l'architecture, qui fait que toute pensée ou critique architecturale d'aujourd'hui, notamment, solaire ou climatique ont été influencées par des problématiques nées de cette période.

Elle débute avec le contexte postindustriel caractérisé par un phénomène d'urbanisation, qui a soulevé de grands problèmes sociaux et urbains, liés à l'insalubrité des quartiers industriels et des cités ouvrières.

Plusieurs références liées à la considération du climat ont émergé au début du siècle. D'abord, il convient de signaler quelques tentatives individuelles de la part des premiers architectes modernes comme : Gropius, Garnier, Loos et Wright (Figure 2.10). Chacun à sa manière a fait du climat un élément important, intégré à la composition.

Cependant, l'orientation réelle donnée à la conception des villes au XX° siècle est sans doute à rechercher dans la charte d'Athènes. En effet, la première solution "radicale" pour résoudre les problèmes de la ville industrielle est donnée par cette charte (1933) qui a adopté les principes de Le Corbusier, à savoir que les matériaux de l'urbanisme sont le soleil, l'espace, la verdure, l'acier et le ciment dans cet ordre et cette hiérarchie (Aronin 1953, Markus et Morris 1980).

Ainsi la charte d'Athènes décrit un urbanisme explicitement lié au soleil. Le constat était fait que l'alignement traditionnel des habitations sur le bord des rues n'assure d'insolation qu'à une partie minimale des logis, et l'analyse des villes au début du siècle aurait révélé que la proportion de façades non ensoleillées variait entre la moitié et les trois quarts de l'ensemble (1), d'où la proposition faite d'interdire l'alignement sur les rues, et pour assurer

---

(1) Charte d'Athènes, article n° 17 (Source Le corbusier 1957).

une insolation maximale construire en hauteur, en élargissant les prospects (Figure 2.11). L'obligation est alors faite pour que chaque logis soit ensoleillé au minimum deux (02) heures par jour, calculés au solstice d'hiver (1).

Toutefois, cette manière de voir l'urbanisme est mécaniste et réductrice dans sa relation au soleil, puisqu'elle a mené à un élargissement démesuré des prospects par seul souci d'éviter les masques. C'est ainsi, que la recommandation simpliste de l'espacement égal à la hauteur est devenue obligatoire (2).

Cette conception heliocentriste a donné lieu à des réseaux de tours ou barres largement espacés et des espaces extérieurs ventés et fortement ensoleillés, qui ont remplacé les tissus anciens générateurs de microclimats souvent plus confortables. De même, les apports solaires dans les bâtiments sont considérés du point de vue quantitatif et non qualitatif, puisque aucune référence n'est faîte à l'orientation.

Plus tard, cette doctrine s'est trouvée renforcée par des moyens technologiques toujours plus développés à savoir : l'utilisation de l'acier et du verre, matériaux à faible inertie thermique et l'apparition de la climatisation et de la ventilation artificiels qui ont libéré l'architecture et l'urbanisme des contraintes du milieu naturel.

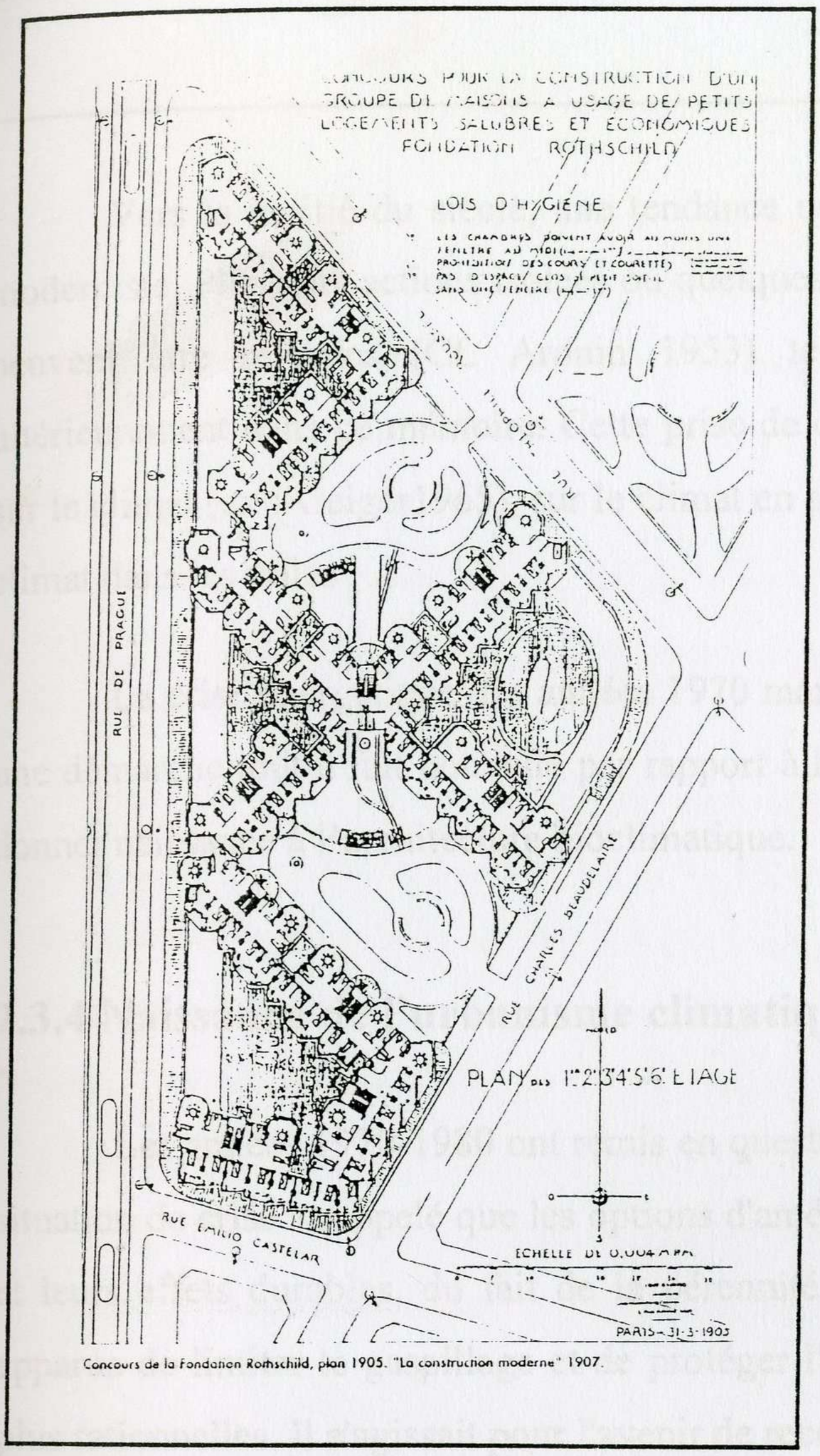
En dépit des critiques faites à la charte d'Athènes pour les répercussions négatives qu'elle a eues sur la morphologie des villes, la disparition des espaces urbains, et la négation des spécificités socioculturelles, etc. Elle constitue, à notre avis, un moment clé dans la prise de conscience de l'importance du climat à la période moderne.

En effet, si les solutions préconisées pour garantir l'air, le soleil, et la lumière en ville, qu'elle propose sont critiquables, elle a, néanmoins, eu le mérite d'orienter de nouveau la réflexion urbaine vers l'environnement naturel, et d'avoir identifié la clé du problème à savoir : que les villes sont insalubres et inconfortables pour absence d'ensoleillement et de ventilation suffisants.

---

(1) Charte d'Athènes, article n° 26 (Source Le corbusier 1957).

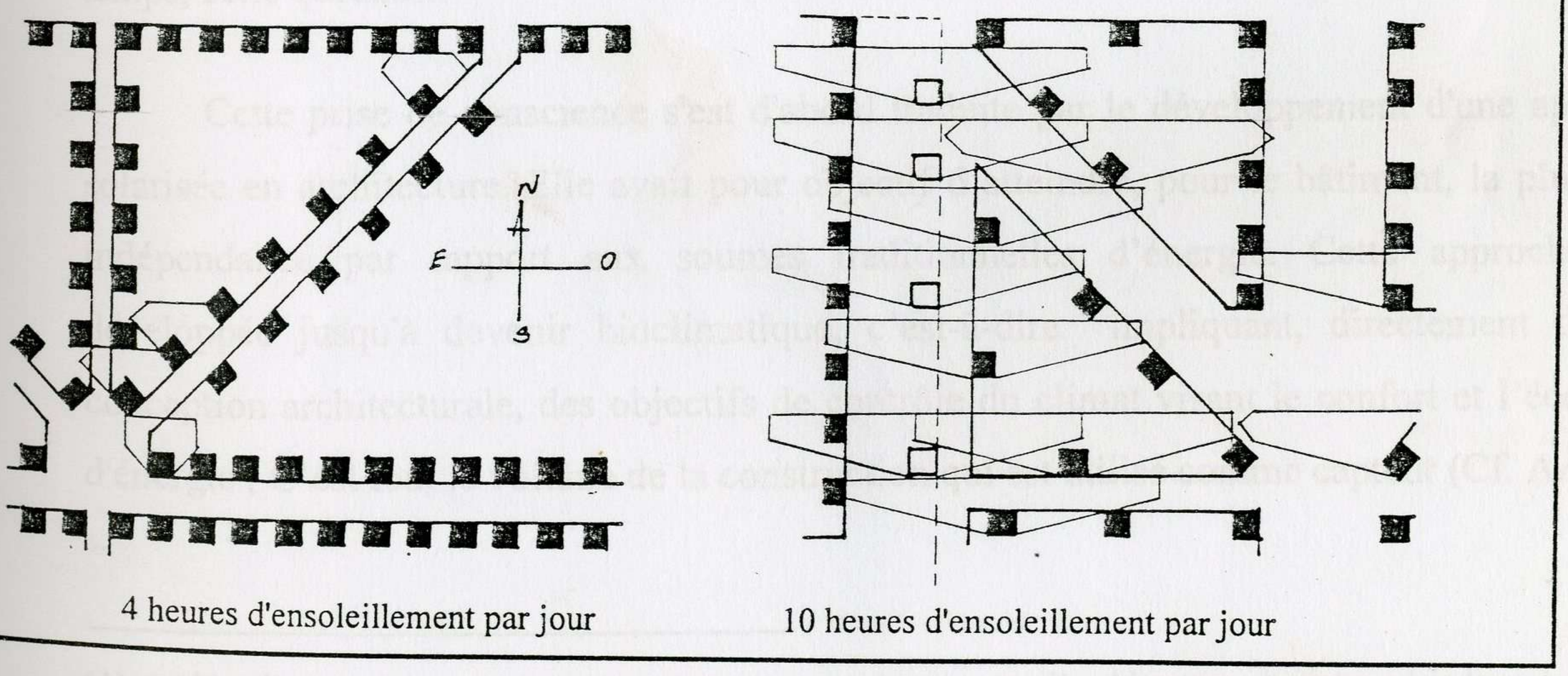
(2) En France, par exemple, une loi de 1902 fournit un règlement d'hygiène comme suit : les façades d'immeubles comportant des fenêtres doivent être au moins distantes d'une longueur égale à la hauteur du bâtiment auquel elles appartiennent et au bâtiment lui faisant face (magnan 1979). Cette règle de H/L= 1 ou 45°est toujours valable en Algérie (Cf. J.O n°26, juin1991).



Concours de la Fondation Rothschild, plan 1905. "La construction moderne" 1907.

LOIS D'HYGIENE
Les chambres doivent avoir au moins une fenêtre au midi.
Prohibition des cours et courettes.
Pas d'espace clos si petit soit-il sans une fenêtre.

Figure 2.10 : Exemple de ville moderne: la ville industrielle de Tony Garnier représentant des logements salubres basés sur l'ensoleillement (Source : Pawlowski 1992)



4 heures d'ensoleillement par jour

10 heures d'ensoleillement par jour

Figure 2.11 : Logique d'implantation des bâtiments en évitant les masques illustrant un des principes de composition moderne lié au climat. (Hermant 1943).

Vers la moitié du siècle, une tendance nouvelle apparaît en réaction à la production moderniste. Plusieurs actions isolées où quelques tentatives d'adaptation climatique des villes peuvent être relevées (Cf. Aronin 1953) tel que le cas de Chandigarh, développé ultérieurement dans ce mémoire. Cette prise de conscience co incide avec les premiers écrits sur le climat (ex : Geiger1965), sur le climat en architecture et les premières recherches sur le climat dans les villes .

La crise énergétique des années 1970 marque la fin de cette période et ouvre la voie à une démarche tout à fait nouvelle par rapport à la considération de cette dimension et qui va donner naissance à l'architecture bioclimatique.

2.3.4 Naissance de l'urbanisme climatique

Les années 1970-1980 ont remis en question plusieurs habitudes de consommation. La situation de crise a rappelé que les options d'aménagement des villes actuelles sont coûteuses, et leurs effets durables, du fait de la pérennité des constructions. La nécessité était alors apparue de limiter le gaspillage et de protéger l'environnement par un retour à des pratiques plus rationnelles. Il s'agissait pour l'avenir de reconsidérer les pratiques acquises à l'abondance énergétique, et c'est par un retour aux énergies dites "naturelles" que la solution est amorcée. Une littérature abondante sur le sujet est apparue à cette période (1). Le village solaire intégré de Boussada, est aussi une illustration pour le cas de l'Algérie de l'intérêt que prenait, en ce temps, cette question.

Cette prise de conscience s'est d'abord traduite par le développement d'une approche solarisée en architecture. Elle avait pour objectif d'atteindre, pour le bâtiment, la plus large indépendance par rapport aux sources traditionnelles d'énergie. Cette approche s'est développée jusqu'à devenir bioclimatique, c'est-à-dire impliquant, directement dans la conception architecturale, des objectifs de contrôle du climat visant le confort et l'économie d'énergie ; C'est tout le volume de la construction qui est utilisé comme capteur (Cf. AA192).

---

(1) A titre d'exemple, nous pouvons remarquer que les revues d'architecture de cette période ont consacré plusieurs numéros à la question énergétique : Urbanisme 171 et 172(1979) ; AA 192 (1979) ; AA209 (1980), etc.)

Cependant, cette approche est longtemps restée limitée à l'échelle de maisons individuelles ou de groupements disparates. Une réflexion globale, à l'échelle de l'établissement urbain était inexistante. Pourtant, c'est à l'échelle de groupements urbains que le facteur climat est le plus important ; il ne peut pas être limité au milieu rural car une maison bioclimatique "rurale" perdrait rapidement ses qualités si elle était transposée en milieu urbain où le rayonnement solaire peut être intercepté et les mouvements des vents modifiés dans leur force et leur direction par les bâtiments environnants.

La notion de droit au soleil est, ainsi, apparue pour élargir cette conception à l'échelle urbaine. Knowles introduit dès la fin de la décennie1970 le concept d'enveloppe solaire, qui contrôle la hauteur et l'espacement des bâtiments en milieu urbain, dans le but de garantir ce droit au soleil (Cf.6.2.1). Cette réflexion a ouvert la voie à de nombreuses recherches sur l'architecture climatique "urbaine" qui ont enrichi ce champ de connaissances. Elles incluent aussi bien l'étude des architectures vernaculaires que le développement de moyens et d'instruments d'évaluation du comportement climatique des bâtiments. Ces recherches sont, en grand partie, rassemblées à l'occasion des diverses conférences sur l'architecture et l'énergie (1).

Plus récemment, les graves problèmes environnementaux liés à la pollution, et aux risques encourus par les populations urbaines, dues à la mauvaise qualité de l'air, ont donné une nouvelle orientation à cette approche. On parle de plus en plus, aujourd'hui, d'un développement durable à instaurer qui met en avant de façon explicite le rôle des villes et la nécessité de revoir la manière de concevoir les établissements urbains.

C'est ainsi que la dimension environnementale et plus précisément climatique a commencé à s'élargir véritablement à la ville. Il est important de signaler que cette préoccupation a, dès le début, impliqué un grand nombre de disciplines tel que la climatologie urbaine et les sciences de l'environnement. Chacune de son côté tente de dépasser la description de la ville pour fournir des propositions d'action pour améliorer le cadre de vie

---

Il s'agit, entre autres :

1. Des conférences européennes sur l'architecture (Solar energy in architecture and urban planning
2. Des conférences internationales PLEA (Passive and Low Energy Architecture).
3. World Renewable Energy Congress .

dans les villes. Cette complémentarité semble, ainsi, favoriser le développement de solutions durables. De nombreux exemples sur ces recherches actuelles sont développés tout au long de ce mémoire, puisqu'ils constituent la base pour l'élaboration de la méthodologie fixée comme étant notre objectif.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tenté de retracer l'évolution de l'intégration au climat dans les villes à travers l'histoire. Plusieurs idées peuvent être rappelées :

La considération du climat existe depuis les premiers établissements humains, aussi bien vernaculaires que planifiés. L'étude des civilisations antiques a permis de montrer l'existence d'une préoccupation certaine quant à la nécessité de considérer le climat et qui s'est traduite par des textes, des instruments techniques et une tentative de réglementation.

Tout au long de l'Histoire de l'architecture, le climat a marqué la réflexion ayant mené à des changements importants, notamment à la période moderne.

La période actuelle riche de cet héritage est confrontée à des problèmes environnementaux globaux qui secouent la planète. La recherche de solutions met à contribution toutes les sciences pour tenter d'asseoir les bases d'un développement durable. Dans ce contexte, l'urbanisme tend à réussir le défi qui consiste à faire du climat un élément de composition parmi d'autres et non plus un mode original de conception.

Chapitre 3 : Connaissance du climat en Urbanisme

3.1 Introduction

Ce chapitre présente un certain nombre d'informations nécessaires à la connaissance du climat. L'information est choisie par rapport à l'intérêt qu'elle peut présenter pour l'urbanisme.

En effet, une littérature abondante est dédiée à la connaissance du climat. Toutefois, compte tenu des objectifs de cette recherche, seules les connaissances pouvant être exploitées dans une action d'urbanisme ont été retenues, au détriment d'une présentation théorique du climat, bien connue. Ainsi, une attention particulière est accordée aux différentes échelles du climat et leur relation aux différents facteurs de l'environnement par rapport à leur possibilité d'utilisation par l'urbaniste.

3.2 Définitions

De façon générale, le climat est défini comme étant l'ensemble des phénomènes météorologiques : températures, pression atmosphérique, vents, précipitations, qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et son évolution en un lieu donné (Larousse). Plus précisément, le climat est l'intégration dans le temps des états physiques de l'atmosphère, caractéristiques d'une certaine localisation géographique (Koenigsberger *et al* 1973).

Cette localisation est d'étendue variable selon l'échelle considérée. A chaque échelle correspondent des facteurs qui affectent les différents éléments du climat. Ces facteurs sont plus nombreux à mesure que l'espace concerné est réduit et la définition du climat devient alors plus précise. Le climat d'un lieu dépend (Escourrou 1983) :

- De sa position en latitude.
- De sa circulation atmosphérique générale (pôles et tropiques).
- Des conditions de l'environnement et du site (relief, végétation, eau, ville).

Ces critères permettent de définir les niveaux successifs suivants : climat global, climat régional, climat local et microclimat. Chaque échelle de climat hérite des caractéristiques générales de l'échelle qui l'englobe (Tableau 3.1).

3.3 Urbanisme et échelles du climat

Le climat global et régional relèvent de l'intérêt de la géographie ou de l'aménagement du territoire, car les espaces qu'ils couvrent sont importants, et les données climatiques à ces échelles sont relativement sommaires. Elles sont utiles pour l'orientation générale d'un aménagement.

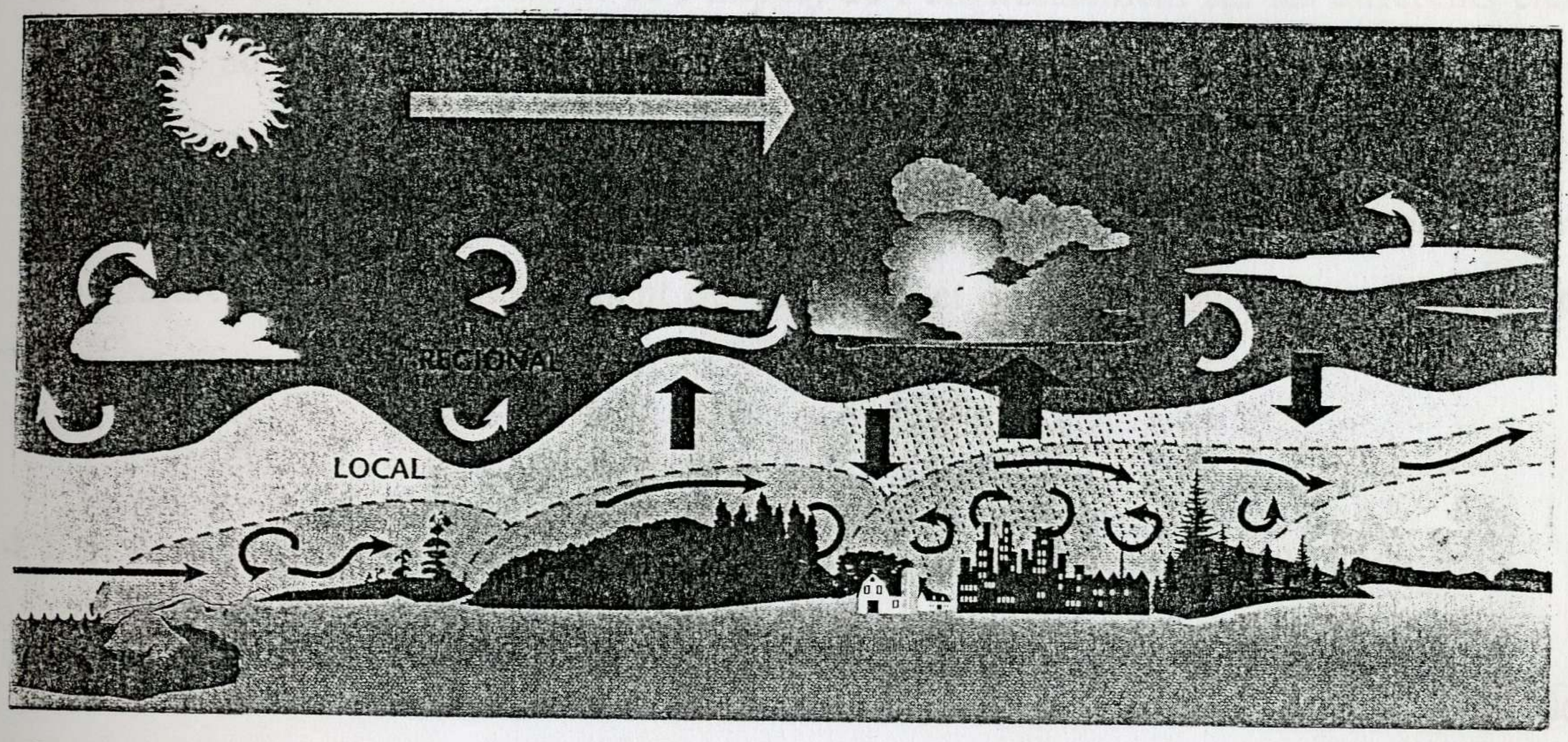
L'action de l'urbaniste s'inscrit à l'échelle du climat local, car celle-ci couvre une étendue correspondant à un établissement urbain, une ville. Ce territoire est de l'ordre d'une dizaine de kilomètres, au plus, horizontalement et une centaine de mètres verticalement. Les variations dans le temps peuvent être journalières (Figure 3.1).

Tableau 3.1 : Facteurs environnementaux définissant les différents échelles de climat (Schreck et al 1989)

Echelle du climat	Facteurs affectant le climat
Climat global	• Latitude • Altitude • Relation à la mer
Climat régional	• Latitude / altitude • Situation continentale • Relation aux autres eaux • Reliefs • Relations aux régimes de vent majeurs (temps, côté sous le vent)
Climat local	• Altitude relative • Relation aux eaux • Végétation • Développement / densité / trafic
Microclimat	• Topographie • Conditions des sols • Type de végétation • Formes des constructions • Type des eaux

Système	Caractères dimensionnels		
	Horizontal (Km)	Vertical (Km)	Temporel
Global	2000	3 à 10	1 à 6 mois
Régional	500 à 1000	1 à 10	1 à 6 mois
Local	1 à 10	0,01 à 0,1	1 à 24 H
Microclimat	0,1	0,01	24 H

Source : Markus et Morris 1980



Source WMO 1996

Figure 3.1 : Etendue spatiale et temporelle des différentes échelles de climat (Markus et Morris 1980)

Une intégration effective de la dimension climatique dans les décisions d'urbanisme suppose l'identification des facteurs climatiques de la manière la plus précise possible, c'est à dire l'échelle de la "localité ". La pertinence de cette précision pour une conception "climatique" d'un projet d'urbanisme peut être saisie à travers les arguments suivants :

1. Le choix du site d'implantation de la ville peut se faire en tenant compte des différences climatiques locales, puisque celles-ci peuvent apparaître entre deux lieux relativement proches, ce qui favoriserait pour une exploitation optimale du potentiel climatique.
2. Les données climatiques régionales obtenues dans une station météorologique ne sont utilisables qu'au stade préliminaire de la conception. Leur précision au niveau local permet de mieux orienter les choix d'urbanisme aux différentes phases de conception.
3. La compréhension de l'action et de l'impact de l'environnement sur les différents éléments du climat au niveau local donne la possibilité d'utiliser ces modifications de manière "planifiée" pour améliorer les conditions de confort en milieu urbain. A titre d'exemple, la végétation est un facteur de l'environnement modifiant qui peut être utilisé pour agir sur les températures de l'air, le mouvement du vent, etc. et créer des conditions microclimatiques urbaines plus confortables.

3.4 Facteurs environnementaux influants sur les climats locaux

Nous examinons maintenant, la relation climat - environnement qui est à la base des variations climatiques locales. Nous savons de ce qui précède que le climat local dérive du climat régional mais possède des particularités spécifiques dues à des variations géographiques et topographiques. Les facteurs de l'environnement les plus significatifs à ce sujet sont :

1 – Le relief.

2 – La végétation et l'eau.

3 – La ville et les activités urbaines.

Ces facteurs modifient les éléments du climat suivants :

1 – Régime des vents : vitesse, direction et fréquence.

2 - Radiation solaire : intensité, nature et durée.

3 - Températures de l'air et du sol : amplitudes, minima, maxima.

Les nombreuses interactions entre facteurs de l'environnement et éléments du climat donnent lieu à une situation complexe, qu'il convient de simplifier. Pour cela, l'influence de chaque facteur de l'environnement est étudiée séparément.

3.4.1 Relief et topoclimat :

Le relief est sans doute le facteur le plus important dans la détermination du climat local, d'où l'appellation plus explicite de topoclimat pour designer le climat local jugé parfois comme étant imprécis.

Le tableau 3.2 présente - brièvement- l'ensemble des interactions entre éléments du climat et composantes du relief. Il apparaît clairement, à la lecture de ce tableau, que la définition du topoclimat n'est pas aisée car toutes les variables agissent simultanément. Toutefois, certains principes généraux de modification du climat par le relief peuvent être énoncés.

Les composantes du relief les plus importantes sont :

- L'élévation ou altitude relative : Elle désigne aussi bien les dénivellations médiocres que des différences de hauteurs importantes.
- La pente : caractérisée par l'inclinaison du terrain et son orientation d'où son exposition ou protection au soleil et au vent.
- Les collines et vallées : ces variations de relief créent des situations climatiques très particulières. Les contrastes dans les propriétés climatiques dans ces zones sont fréquents.
- La nature de la surface : désigne le type de sol, sa texture, sa couleur, sa teneur en eau etc. Toute surface est caractérisée par une capacité à absorber et à réfléchir la radiation qui dépend de tous ces paramètres.

Le relief modifie les éléments du climat sont comme suit :

1- La radiation solaire :

La radiation solaire augmente avec l'altitude : plus un site est élevé plus il reçoit de rayonnement. Evidemment, le niveau d'exposition au soleil est le déterminant majeur de la disponibilité de la radiation. Pour cela l'orientation des versants est primordiale, le versant sud reçoit plus de radiation que le versant Nord.

Tableau 3.2 : Relations entre éléments du climat et topographie à l'échelle locale (D'après le consulat canadien pour la recherche, document interne)

Influences de la topographie sur les variables climatologiques									
	Température minimum	**Température maximum**	**Chauffage degrés - jour**	**Humidité**	**Vitesse et direction du vent**	**Couverture nuageuse**	**Radiation**	**Précipitation**	**Chute et couverture de neige**
Elévation (altitude relative)	Relation inverse	Relation inverse	Augmente avec la hauteur	L'humidité du brouillard disponible aux plantes sur de grandes hauteurs	La vitesse augmente avec la hauteur	Augmente avec l'élévation. Le brouillard aussi augmente avec la hauteur	Augmente avec la hauteur. La radiation émanante reste la même.	La pluie augmente avec la hauteur. La proportion pluie/ total des précipitations diminue	La chute des neiges augmente avec la hauteur. L'humidité de la neige diminue avec la hauteur.
Pente	Le drainage de l'air froid peut être dirigé. Relation directe avec la vitesse du drainage de l'air froid.	Temp. max. La plus élevée au bas de la pente l'été. Situation variable en hiver.	Plus élevée dans la vallée que dans la ceinture thermale au dessus de la pente	Pas d'influence directe	L'angle influence la vitesse de l'air froid, la nuit. Flux anabatic et katabatic	Augmente avec l'angle de la pente.	Augmente et diminue la radiation en fonction de l'angle de la pente (incidence)	Les pentes face aux vents humides. Les pentes sous le vent sont sèches (protégées de la pluie).	La chute des neiges est affectée par l'exposition des pentes au vent.
Exposition des pentes (Orientation)	La pente est moins importante la nuit quand la température est contrôlée par le flux d'air froid.	Pentes Ouest et sud respective--ment plus élevées que Est et Nord. Les vallées N-S et les pentes exposées Sud ont des maxima plus élevés.	La pente exposée Nord a un chauffage degré jour plus élevé que la pente exposée au Sud.	L'humidité absolue n'est pas affectée. L'humidité relative est affectée.	Dépend de l'orientation de la pente/vent (face au vent ou sous le vent).	Extrêmement variable en fonction de la période dans l'année et de la masse d'air, etc.	Plus importante sur les pentes Sud et moindre sur les pentes Nord.	Dans la direction du vent ou sous le vent, augmente ou diminue la chute de pluie.	Face au vent ou sous le vent, augmente ou diminue les neiges. La couverture neigeuse est plus grande sur les pentes N-E.
Collines et Vallées	Gel et temp. Min. Plus basses. Bande thermique sur les pentes au dessus de la vallée lors de l'inversion	Temp. max. au dessus de la vallée, sur les pentes, l'hiver. Temp. max. Dans la vallée le reste de l'année.	Plus élevées dans les vallées que sur les pentes, sauf pour des grandes hauteurs.	Peut capturer l'air humide dans les vallées.	Effets passifs plus grands quand la vitesse du vent augmente. Moins de vent dans les vallées, sauf tempêtes canalisées. Facteur de ventilation.	Cause une nébulosité accrue à cause d'une radiation de grandes longueur d'ondes. La Température diminuée.	Peut exclure la radiation tôt le matin et tard dans l'après-midi.	Pentes dans la direction du vent et sous le vent respectivement sèches et humides.	La chute des neiges est accrue sur les pentes supérieures sauf là où elles sont balayées par le vent.

(Suite tableau 3.2)

Influences de la topographie sur les variables climatologiques

	Température minimum	Température maximum	Chauffage degrés - jour	Humidité	Vitesse et direction du vent	Couverture nuageuse	Radiation	Précipitations	Chute et couverture de neige
Albédo	Peut considérablement augmenter ou diminuer la température minimum	Peut considérablement augmenter ou diminuer la température maximum	Peut augmenter ou diminuer le chauffage degrés/jours	Peut augmenter ou diminuer l'évaporation et l'influence de l'humidité	Peut créer des poches d'air ascendant et descendant	Les nuages "chauds" prédominent en après-midi. Nuages en couches prédominent après le coucher du soleil.	Influe sur le pourcentage de radiation absorbée.	Pas d'influence directe.	Peut influencer la distribution de la neige ex. : fonte localisée.
Nature de la Surface	Plus élevée pour l'herbe que pour un sol nu. La plus basse pour un sol rocheux.	Plus basse pour l'herbe que pour un sol nu. La plus élevée pour un sol rocheux.	Le tassement du sol ou de la surface' peut influencer le chauffage degrés/jour.	L'évaporation pour l'herbe courte est la plus élevée après la pluie. L'évaporation de l'eau de surface est la plus élevée les jours ensoleillés et secs.	Le coefficient de rugosité conditionne les tourbillons et les courants locaux.	Des surfaces aux albédos faibles peuvent créer des nuages "chauds".	Les surfaces à l'albédo élevé réfléchissent beaucoup la radiation. Les faibles albédos absorbent les ondes courbes et émettent les grandes ondes.	Pas d'influence sur les précipitations mais une influence considérable sur l'évaporation, l'infiltration et les ruissellements.	Pas d'influence sur la chute des neiges mais influe considérablement sur sa distribution.
Plans d'eau	Modifiée à proximité des plans d'eau. Elle dépend de la température de l'eau et des dimensions des plans d'eau.	Modifiée à proximité des plans d'eaux. Dépend de la température de l'eau et des dimensions du plan d'eau.	Diminue à proximité des plans d'eau.	Humidité accrue	Augmente généralement lors d'un passage au dessus d'un plan d'eau	Dépend extrêmement de la période dans l'année.	Peut réfléchir la lumière sur les versants.	Souvent accrues près du rivage quand les vents prennent l'humidité, en passant sur les terrains froids, l'air se condense et se précipite.	Voir précipitations
Végétation	La temp. min. augmente avec l'augmentation de la végétation	La temp. max. diminue avec l'augmentation de la végétation	A l'intérieur du volume végétal, C.D.J est réduit. Plus la végétation est grande plus son influence est grande.	Augmente l'humidité à travers l'évapo-transpiration dépend de la densité de croissance.	Vitesse du vent diminuée à l'intérieur de la couverture végétale.	Pas d'influence	La radiation totale reçue et émise reste la même mais varie à l'intérieur de la couverture végétale.	La pluie n'est pas influencée mais l'évaporation, le ruissellement et l'infiltration sont modifiés par le végétal.	Pas d'influence sur la chute mais influe sur sa distribution et sa fonte.

(Traduit)

L'intensité du rayonnement dépend également de l'angle des pentes qui modifie l'angle d'incidence du rayonnement sur la surface (Figure 3.2).

Le rayonnement augmente lorsque cet angle est important et maximal lorsqu'il est perpendiculaire à la surface. Egalement, la nature de la surface a un effet direct sur l'absorption et la réflexion du rayonnement. L'albédo de la surface définit le pourcentage de réflexion du rayonnement solaire : 0% correspond à une absorption totale et 100% à une réflexion totale de la radiation.

2- Le Vent :

Le vent est la variable la plus changeante de tous les éléments du climat. Toute variation de rugosité a un effet direct sur sa vitesse et sa direction. La vitesse du vent augmente avec l'altitude car la rugosité augmente. Plus la pente est importante, plus la vitesse du vent augmente. Elle est maximale sur les sommets. L'ascendance de l'air est d'autant plus nette que la masse d'air arrive perpendiculairement. En descendant de l'autre coté du versant, le vent généralement se chauffe (effet de fœhn).

L'identification des versants exposés aux vents et protégés des vents est essentielle. Lorsque le passage du vent se resserre sa vitesse augmente. De même la direction du vent est souvent modifiée par la forme du relief : étroit, large, élevé, etc. Face à un obstacle important, le vent a tendance a être dévié de sa direction. Plus l'angle d'incidence entre vent et relief est faible plus ce vent est canalisé le long de l'obstacle. Ceci conditionne fortement le niveau de ventilation dans les vallées. Si la vallée est large et son orientation proche de la direction du vent, elle est largement ventilée. Par contre, lorsqu'elle est étroite et son orientation perpendiculaire à la direction des vents, le niveau de ventilation peut être très faible donnant lieu à une stagnation défavorable de l'air (Escourrou 1983).

3- Les Températures :

Les températures de l'air diminuent avec l'altitude, à raison de 6° à 8° par 100m (Escourrou 1983, Givoni 1989, etc.). Cette baisse dépend d'autres facteurs tels que mouvement des vents et temps dans l'année ; Elle peut être irrégulière.

L'angle des pentes, la forme des versants et surtout leur orientation modifient les températures de la même manière que la radiation. Les amplitudes thermiques sont très variables, elles sont faibles sur les versants et plus importantes dans les dépressions ou les vallées. Dans ce dernier cas, les maxima sont plus élevés et les minima plus faibles.

Ainsi les vallées présentent une situation thermique plus défavorable que les versants, plus chaudes l'été, plus froides l'hiver. Le degré-jour, qui renseigne de la sévérité climatique et par conséquent de la demande de chauffage augmente avec l'élévation, dans les vallées et pour les orientations par rapport au soleil, proches du nord. Car dans ces cas la radiation solaire est moindre.

Enfin, la nature des surfaces et leur albédo influent sur les températures en conditionnant la quantité d'énergie stockée et donc les émissions de grandes ondes, sources de chaleur.

4- Vents locaux :

L'apparition des mouvements d'air à une échelle locale indépendamment du régime des vents dominants est un phénomène caractéristique du topoclimat. Ces mouvements d'air ou brises sont dues à des contrastes de températures et apparaissent le plus fréquemment par temps calme, lorsque le vent régional est faible, inférieur à 3m/s (Escourrou 1983). Les brises de jour sont généralement différentes des brises de nuit. Ce régime journalier est dû aux fréquentes inversions thermiques. Parmi les vents locaux les plus importants et qui présentent un intérêt pour l'urbanisme, les phénomènes suivants :

1) Brise de mer/terre :

Dans la journée, la brise de mer vers la terre est due au réchauffement excessif du sol contre une eau relativement fraîche car l'eau se réchauffe plus lentement que le sol. La nuit le phénomène s'inverse, c'est la brise de terre vers la mer, car l'eau se refroidit moins vite que le sol. Les brises de mer sont généralement plus fortes que les brises de terre.

2) Brise de vallée /pente

Les mouvements d'air dans les vallées varient fréquemment durant 24 heures. En début de journée, l 'air frais stagnant dans la vallée et l'ensoleillement des versants provoque une brise de vallée ascendante. En fin de journée, le phénomène s'inverse avec le réchauffement excessif de la vallée et le refroidissement rapide des versants donnant naissance à une brise de pente descendante (Figure 3.3).

5- Précipitations et humidité :

Ils connaissent également des variations locales, toutefois leur importance est faible en comparaison au vent ou à la radiation qui sont plus déterminants pour l'urbanisme.

Brièvement, précipitations et humidité augmentent avec l'altitude. Ces éléments sont nettement différenciés de part et d'autre d'une colline. Les versants exposés au vent connaissent plus de précipitations et les versants exposés au soleil moins d'humidité.

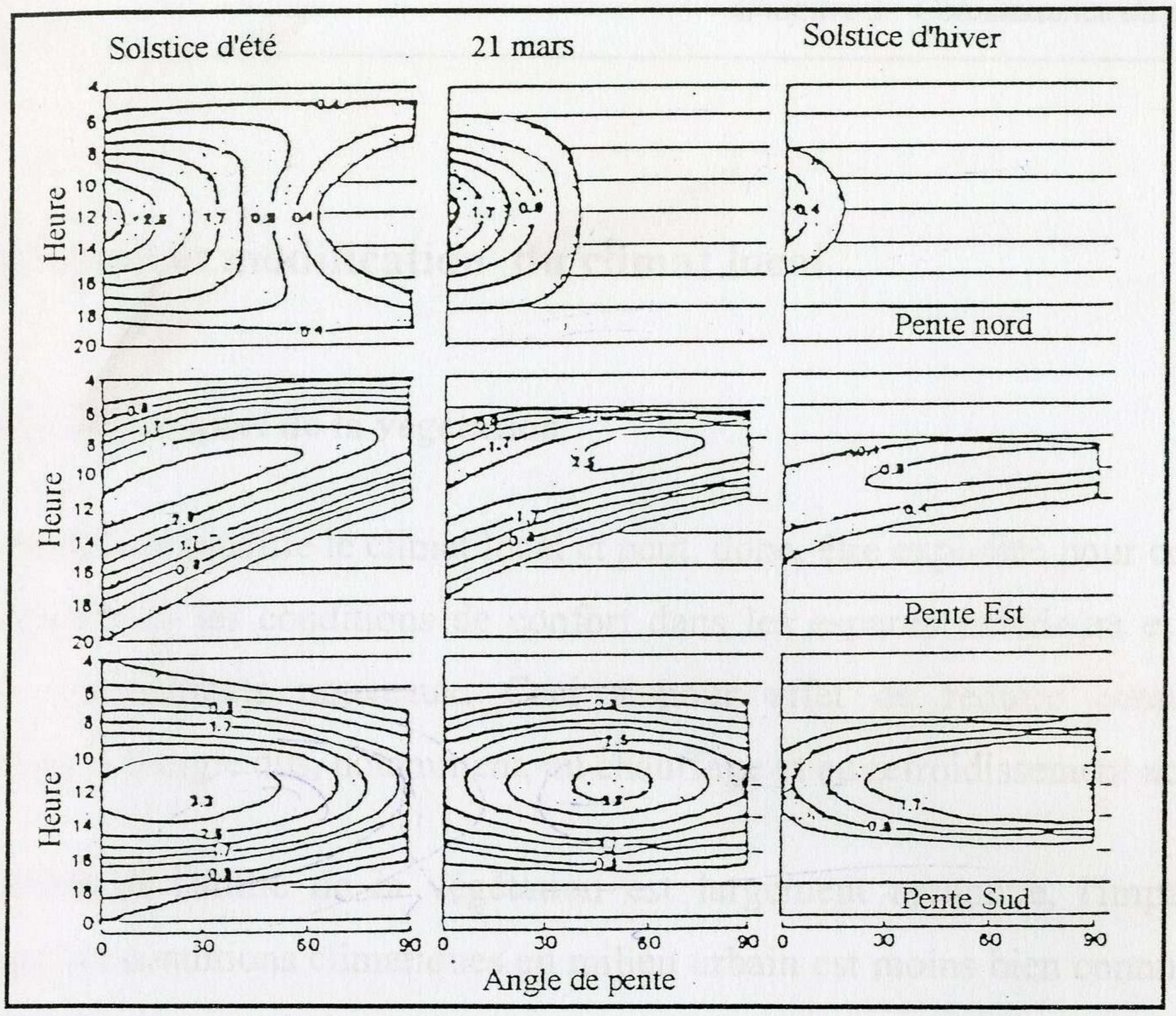


Figure 3.2 : Influence de la pente et de l'orientation sur la quantité de radiation solaire reçue
(D'après le consulat canadien pour la recherche, document interne).

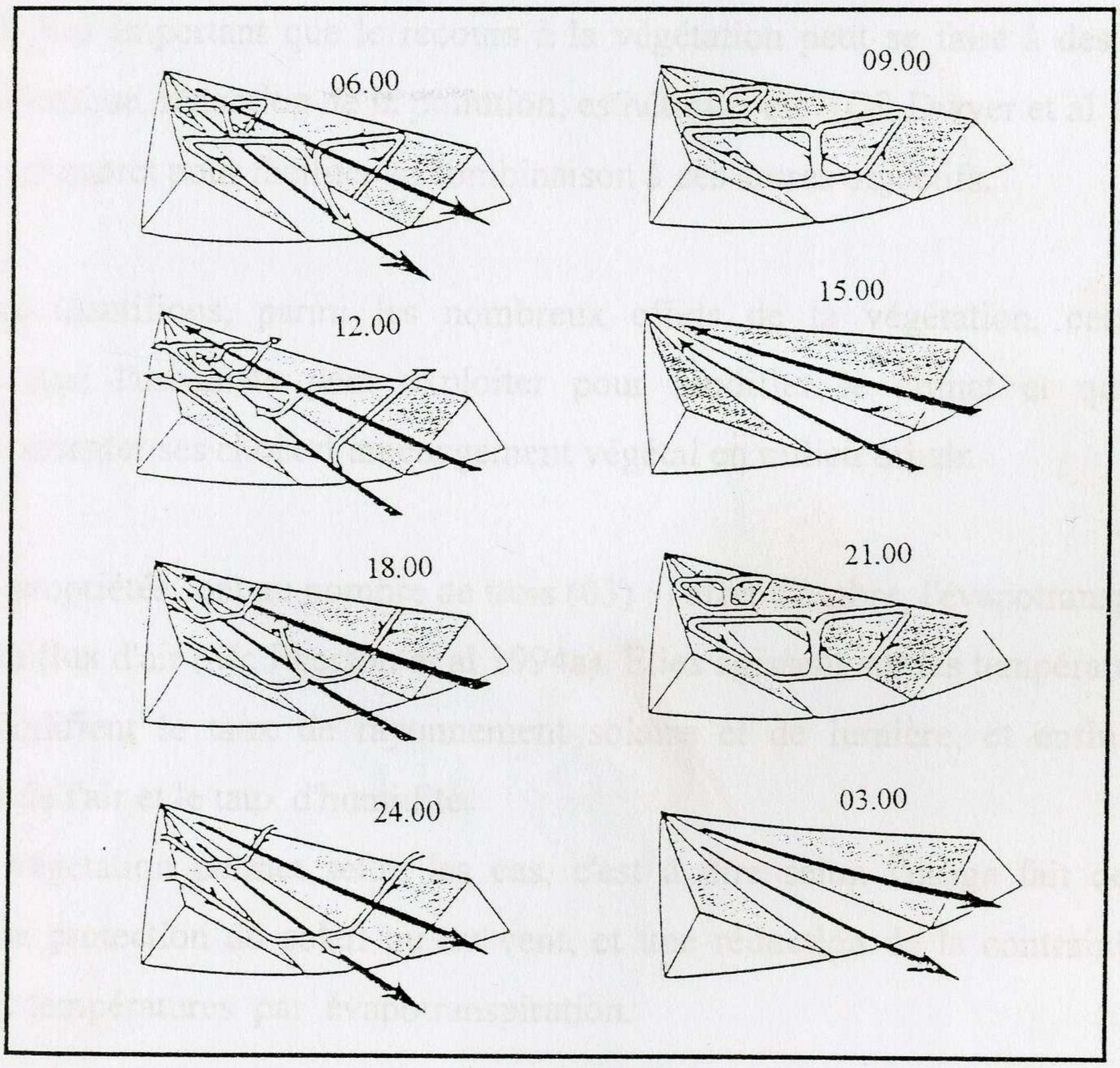


Figure 3.3 : Exemple de vents locaux : la brise de vallée qui est un flux diurne ascendant et la brise de colline, flux nocturne descendant.(Source Baumüller et al 1993).

3.4.2 Végétation et modification du climat local

1- Propriétés climatiques de la végétation

La végétation modifie le climat local et peut, donc, être exploitée pour contrôler le climat urbain en améliorant les conditions de confort dans les espaces extérieurs et intérieurs par la création de microclimats nouveaux. Ceci a pour effet de réduire considérablement les consommations d'énergie dus, notamment, au chauffage et au refroidissement actifs.

Toutefois si l'utilité de la végétation est largement reconnue, l'impact réel de cette végétation sur les conditions climatiques en milieu urbain est moins bien connu. La précision de cette information permettrait de guider nos choix en matière d'aménagement végétal, relatifs aux types, densités, mode de répartition, localisation par rapport au bâti, etc. avec une appréciation qualitative et/ou quantitative de l'apport de ces aménagements sur les microclimats urbains. Ceci est d'autant plus important que le recours à la végétation peut se faire à des fins multiples, à savoir : Acoustique, réduction de la pollution, esthétique, etc. (Cf. Dwyer et al 1992) et nécessite d'éclaircir cet aspect pour faciliter sa combinaison à ces autres objectifs.

Nous identifions, parmi les nombreux effets de la végétation, certaines propriétés essentielles que l'urbaniste peut exploiter pour modifier le climat et qui devraient, par conséquent, orienter ses choix d'aménagement végétal en milieu urbain.

Ces propriétés sont au nombre de trois (03) : l'effet d'ombre, l'évapotranspiration, et l'effet d'obstacle au flux d'air (Mc Pherson et al 1994a). Elles agissent sur les températures de l'air et de surfaces, modifient le taux de rayonnement solaire et de lumière, et enfin agissent sur le mouvement de l'air et le taux d'humidité.

La végétation permet selon les cas, c'est à dire selon l'usage fait de ses propriétés, d'assurer une protection du soleil ou du vent, et une réduction de la contrainte de chaleur en abaissant les températures par évapotranspiration.

L'effet d'ombre : c'est la capacité d'une végétation à obstruer les rayons solaires en réfléchissant le rayonnement grâce à son feuillage. Il permet de réduire le total d'énergie absorbée, stockée et restituée par des surfaces urbaines bâties et non bâties ; Les températures sont ainsi diminuées.

L'évapotranspiration : Phénomène par lequel la plante et le sol réagissent aux conditions climatiques ambiantes. L'évapotranspiration permet de convertir l'énergie radiative en énergie latente ce qui permet de réduire la chaleur sensible, d'où le rafraîchissement de l'air. Les températures diminuent et l'humidité augmente. L'évapotranspiration dépend étroitement de la disponibilité de l'eau dans le sol.

L'effet d'obstacle au flux d'air : Toute végétation constitue un obstacle plus ou moins grand aux flux d'air qui modifient la vitesse et la direction du vent. Elle affecte également le transport et la diffusion de l'énergie, de la vapeur d'eau et des polluants.

Le captage des eaux de pluie est une propriété secondaire de la végétation. Elle peut être rattachée à l'évapotranspiration puisqu'elle permet par une meilleure infiltration des eaux pluviales l'augmentation du potentiel d'eau évaporable dans le sol.

2- Evaluation des propriétés climatiques de la végétation

L'évaluation de ces propriétés a fait l'objet de nombreuses recherches. Certaines d'entre elles sont rattachées à l'environnement urbain et les résultats donnés peuvent trouver des applications intéressantes en urbanisme (Cf. Mc Pherson et al 1994b, Atmospheric Environment 1998, etc.).

Les effets de la végétation sont parfois estimés grâce aux modifications que subissent les différents éléments du climat à savoir : impact sur la variation des températures, du taux d'humidité, de la vitesse de l'air, etc. Toutefois c'est en termes d'économies d'énergie que l'action de l'espace vert sur le climat est, le plus souvent, quantifiée, car l'éfficacité de la végétation est, généralement évaluée par rapport à l'amélioration du confort dans les bâtiments qu'elle offre.

Le principe consiste à déterminer la réduction de la demande énergétique (généralement électricité) pour le chauffage ou le refroidissement à l'intérieur des bâtiments grâce à l'exploitation des effets cités plus hauts par la végétation qui les entoure.

Les méthodes expérimentales et les simulations numériques sont les principales utilisées (McPherson et al 1994a, McPherson et Simpson 1995). La première consiste à évaluer les effets du végétal en effectuant des mesures sur site des différents éléments du climat pendant une période déterminée ; Elle est moins utilisée car elle nécessite des coûts élevés et un temps d'investigation long sans être parfaitement fiable puisqu'elle engage d'autres facteurs de l'environnement de l'objet d'étude, tel que les conditions météorologiques, comportement de l'usager, etc. ce qui rend difficile l'appréciation de l'impact réel de la végétation. La simulation numérique, par contre, permet de pallier ces limitations et offre la possibilité d'isoler les effets de chacune des propriétés de la végétation en maintenant tous les autres paramètres constants. De même qu'elle permet d'évaluer les effets potentiels pour plusieurs années futures et de comparer l'efficacité de plusieurs aménagements végétaux, de différents types d'arbres, etc.

La figure 3.4 donne des exemples des économies d'énergie enregistrées grâce à l'utilisation de la végétation ; Elle est basée principalement sur le calcul de la réduction de la demande d'électricité dans les maisons.

Par ailleurs, l'évaluation d'une propriété climatique de la végétation par rapport à une autre diffère. Pour un arbre unique, l'effet d'ombre est aisément estimé et ce pour différentes situations : types de végétation, localisation, etc. avec une connaissance précise de son impact sur les températures de l'air et de surfaces, et les économies d'énergie réalisées. Par contre le refroidissement par évapotranspiration du même arbre est plus difficile à mesurer ; L'air frais généré dans la couronne est rapidement diffusé dans le volume d'air plus grand qui la traverse (Mc Pherson et Simpson 1995). Les effets de l'évapotranspiration et d'obstacle au flux d'air sont pour cela plus facilement évalués pour une agrégation d'arbres. De manière plus générale, un grand nombre d'arbres ou un quartier résidentiel largement pourvu de végétation peuvent réduire les températures de l'air de 1°C à 5° C et réduisent la vitesse du vent de 50% environ (Mc Pherson et Simpson 1995).

Toutefois, chacune de ces propriétés peut permettre de grandes économies. A titre d'exemple, une simulation numérique pour trois arbres autour d'une maison à Sacramento en Californie a révélé des économies d'énergie pour le refroidissement de 53% dont 16% sont dus à l'ombrage et 37% à l'évapotranspiration (Mc Pherson 1992), ce qui rend compte de l'importance de chacune de ces propriétés y compris l'évapotranspiration lorsque celle-ci n'est pas limitée par le manque d'eau dans le sol.

L'amélioration du climat local par le biais de ces propriétés doit être évaluée par rapport à plusieurs données à savoir la quantité de végétation utilisée, ses caractéristiques liées au type d'arbres, à leur densité, leur forme, volume, etc. mais aussi par rapport à son imbrication avec le domaine bâti pour identifier les meilleures solutions et enfin en tenant compte du climat du lieu

Tous ces aspects sont développés plus loin aussi bien pour identifier les propriétés de la végétation sur le climat urbain global (Cf. 4.2.1) que ses caractéristiques liées au contrôle climatique à l'échelle de la composition urbaine (Cf. 6.4).

3.4.3 Ville et activités urbaines

La ville est un facteur de l'environnement ayant pour origine l'Homme mais l'étendue de son impact sur les conditions climatiques locales sont très importantes. En effet la relation climat- ville est double. D'une part la nature du climat conditionne les choix urbanistiques ; D'autre part la configuration urbaine et les activités inhérentes à la ville modifient le climat initial.

Les caractéristiques de ce climat original devraient renseigner sur le niveau d'adaptation de la ville à son contexte. Ainsi, étant donné son importance aussi bien absolue que par rapport à l'objectif de ce travail dédié à l'urbanisme, La totalité du chapitre suivant est consacré à ces échanges.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'identifier l'échelle du climat la plus significative par rapport à une action d'urbanisme et le rôle des différents facteurs de l'environnement dans les variations climatiques.

Il est apparu que l'échelle locale est la plus pertinente vis-à-vis de l'urbanisme. Toute volonté d'utiliser le climat en urbanisme exige une information climatique précise, à cette échelle. Par ailleurs, le rôle des différents facteurs de l'environnement dans la définition du climat local a été étudié. Il a été montré que le topoclimat peut désigner le climat local, car le relief est le facteur de l'environnement le plus déterminant. L'importance du topoclimat pour l'urbaniste tient à la fois à son caractère invariable et à la nature profonde des modifications qu'il cause et qui nécessitent l'ajustement de l'information climatique régionale.

Cette précision permet à l'urbaniste de choisir un site d'implantation optimal et plus tard des orientations judicieuses pour la conception, notamment dans l'affectation des sols.

La végétation est un autre facteur de l'environnement qui participe à la définition du climat local. Toutefois, son intérêt réside, surtout, dans la possibilité d'exploiter ses propriétés pour améliorer les conditions climatiques dans les aires urbaines à projeter.

Enfin, la ville crée son propre climat, à une échelle locale, qui traduit son niveau d'adaptation à son contexte climatique. Le chapitre 4 suivant étudie en détail les interactions ville - climat urbain et tente de dégager les mesures nécessaires pour une conception urbaine appropriée qui contrôle ce climat urbain.

Chapitre 4 : Ville et climat urbain

4.1 Introduction

La ville est un facteur de l'environnement qui modifie profondément le climat local, en créant un phénomène nouveau appelé climat urbain. Compte tenu de l'objectif de ce mémoire, il est nécessaire de bien comprendre cette situation climatique originale engendrée par la ville.

L'étude du climat urbain dans ce chapitre vise à identifier ses composantes et ses causes et expliquer leur dépendance des divers choix d'urbanisme et par conséquent la part de responsabilité de l'urbaniste dans la définition de la qualité de l'environnement urbain résultant.

Ceci va nous permettre d'identifier les niveaux d'action les plus pertinents que l'urbaniste doit considérer dès les premières phases de conception urbaine pour offrir un climat urbain global favorable, lequel va constituer, ultérieurement, la base pour une intégration climatique à une échelle supérieure, celle de la composition urbaine.

4.2 Le climat urbain

Le climat urbain est dû essentiellement aux activités spécifiques à la ville et à sa configuration générale. Il est difficile à décomposer, car la combinaison de plusieurs facteurs créent une situation complexe.

De nombreuses références sur le climat urbain ont comparé les propriétés des milieux rural et urbain au point de vue climatique (WMO1996, Kaule1995, Escourrou1983,1991, Oke1988b, Barry et Chorley 1978, Bairoch1977, etc.) ; d'une façon générale, la ville se différencie de la campagne par

- L'existence de bâtiments qui modifient le bilan énergétique, les mouvements de l'air, les températures, etc.
- Des activités urbaines qui constituent un apport d'énergie supplémentaire.
- Un taux plus ou moins élevé de pollution.
- Des surfaces urbaines imperméables et un drainage rapide des eaux de pluies.
- Une faible végétation.

Toutes ces références relèvent l'importance des écarts entre ces deux milieux où tous les éléments du climat se trouvent modifiés. Les changements les plus importants dus à l'urbanisation concernent le bilan énergétique à travers l'équilibre thermique et hydrologique, les mouvements locaux de l'air et la composition de l'atmosphère.

A titre d'exemple le tableau 4.1 présente les effets d'une grande ville sur les phénomènes climatiques. Globalement, la radiation solaire nette est moindre en ville par rapport à la campagne mais l'énergie totale, les températures et les flux de chaleur sont plus importants. Les vents ont des vitesses réduites et leur direction et fréquence sont aussi modifiées. Cependant l'ampleur de ces changements est variable, dépendant à la fois de la taille et de la morphologie de la ville, de l'importance des activités urbaines et du nombre de population, tel que nous allons l'expliquer plus loin.

Nous développons dans ce qui suit, Les principaux phénomènes qui caractérisent le climat urbain, à savoir :

1- L'Ilot de chaleur urbain (i. C. U.)
2- Les vents urbains.
3- La pollution

Tableau 4.1 : Effets de la ville sur les variables climatologiques, cas d'une ville de 1 million d'habitants, en latitude moyenne (D'après Oke 1994, source WMO 1996).

Variable	Changement	Magnitude
Radiation UV	Beaucoup moins	15 - 90%
Radiation solaire	Moins	1 - 25%
Irradiation, Entrées	Plus	5 - 40%
Visibilité	Réduite	
Evaporation	Moins	50%
Flux de chaleur	Plus	50%
Turbulence	Plus grande	10 - 50%
Vitesse du vent	Diminuée	5 - 30% à 10m
Direction du vent	Altérée	1 - 10°
Temperature	Plus chaud	1 - 3°C moyenne annuelle jusqu'à 12°C occasionnellement
Humidité	Le jour, moins la nuit, plus	
Nuages	Plus de brume humide en ville, plus de nuages dans la ville sous le vent.	
Brouillard	Plus ou moins, selon la ville.	
Précipitations	Moins de neige (convertie en pluie) probablement plus de précipitations totales dans la partie de la ville sous le vent.	

4.2.1 L'îlot de chaleur urbain

C'est le phénomène le plus caractéristique du climat urbain. L'information relative à l'îlot de chaleur urbain est très abondante car ce phénomène constitue depuis plusieurs décennies, l'objet d'étude principal de la climatologie urbaine (Cf. WMO 1986, WMO 1994, etc.) ce qui permet de saisir sa complexité. Néanmoins, pour faciliter sa compréhension nous présentons quelques connaissances permettant d'établir ses liens avec l'urbanisme.

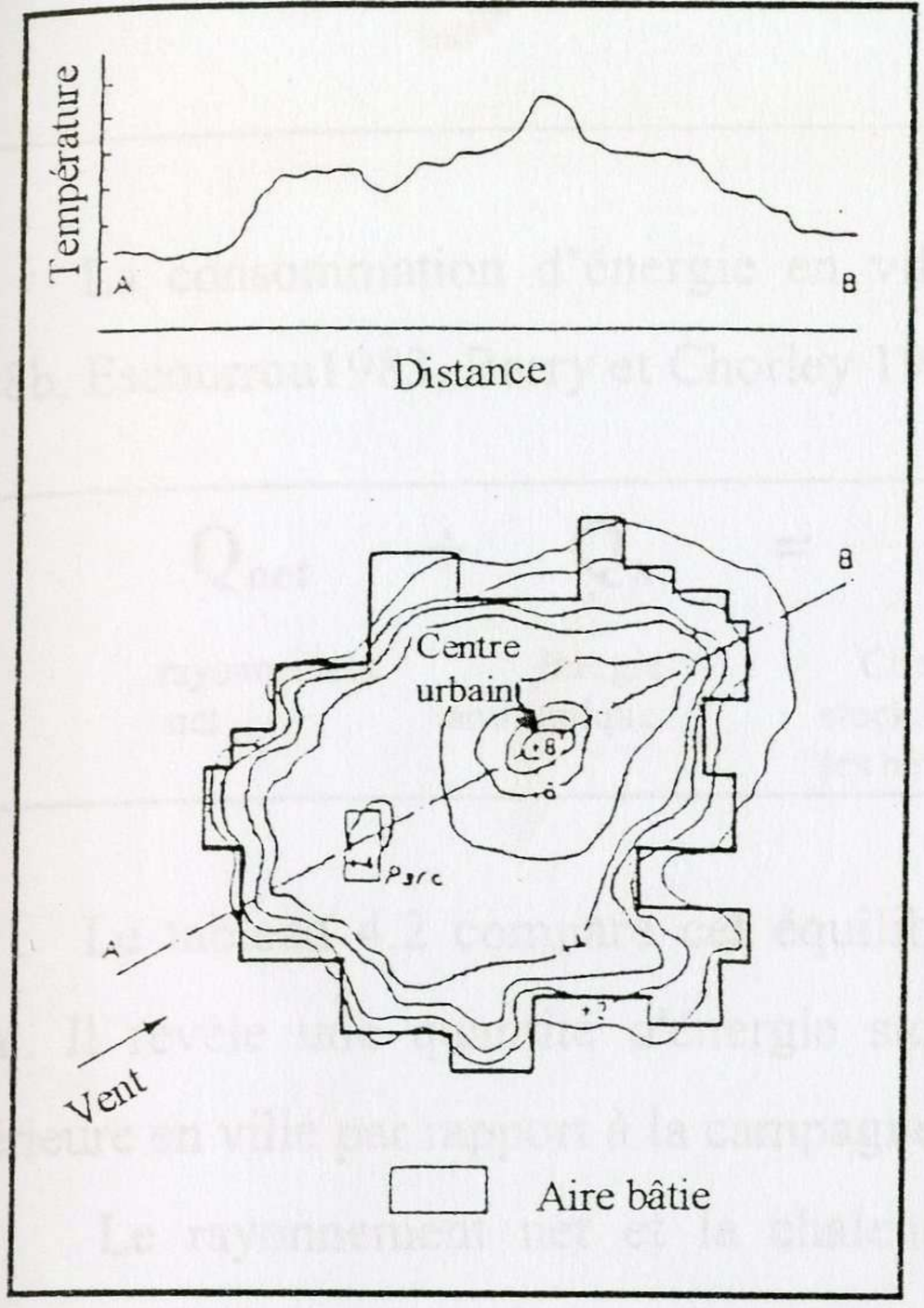
L'îlot de chaleur se définit comme étant la différence de températures entre le centre de la ville et le milieu rural. En règle générale, il se développe la nuit par temps calme (Figure 4.1). En effet, les différences de températures entre la ville et la campagne sont plus sensibles la nuit car la ville restitue la chaleur emmagasinée durant la journée plus lentement que son environnement rural. Toutefois, en présence de vent les températures tendent à s'uniformiser et donc à dissiper le phénomène (Figure 4.2). Son intensité est variable, de 3° à 5° en moyenne (Givoni 1989, Escourrou 1991, Barry et Chorley 1978) mais peut atteindre 8°à 10° voire 14° dans des cas extrêmes (Escourrou 1991).

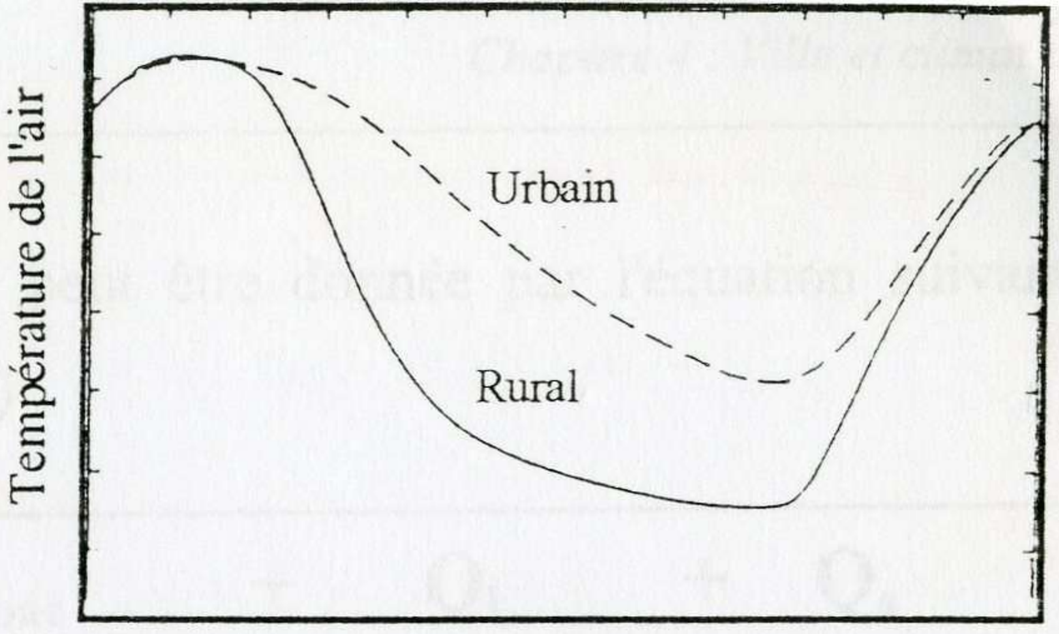
L'îlot de chaleur urbain n'est pas ressenti de la même manière en climat froid et en climat chaud. Dans le premier cas il est alternativement positif en hiver et négatif l'été par contre en climat chaud il est toujours défavorable (Oke 1994). Cependant la recommandation générale est d'éviter ou de limiter son apparition car les surcoûts énergétiques qu'il impose sont, dans tous les cas, importants (1). D'ailleurs, cet objectif constitue aujourd'hui la stratégie privilégiée pour améliorer le climat urbain.

Pour pouvoir le modifier, il faut d'abord comprendre les mécanismes qui l'engendrent. Ceci revient à considérer le bilan radiatif et énergétique de la ville (Figure 4.3). Effectivement, le rayonnement net que reçoit le milieu urbain est inférieur au milieu rural, mais l'énergie enregistrée dans la ville est plus importante ; Elle est due à l'ensemble des activités urbaines : Chauffage, éclairage, industrie, circulation, etc. (Escourrou 1991).

---

(1) A titre d'exemple les stratégies nécessaires à la réduction de l'îlot de chaleur urbain permettraient des économies d'énergie estimées entre 5 et 10 milliards de dollars aux états unis, annuellement. (WMO 1996).





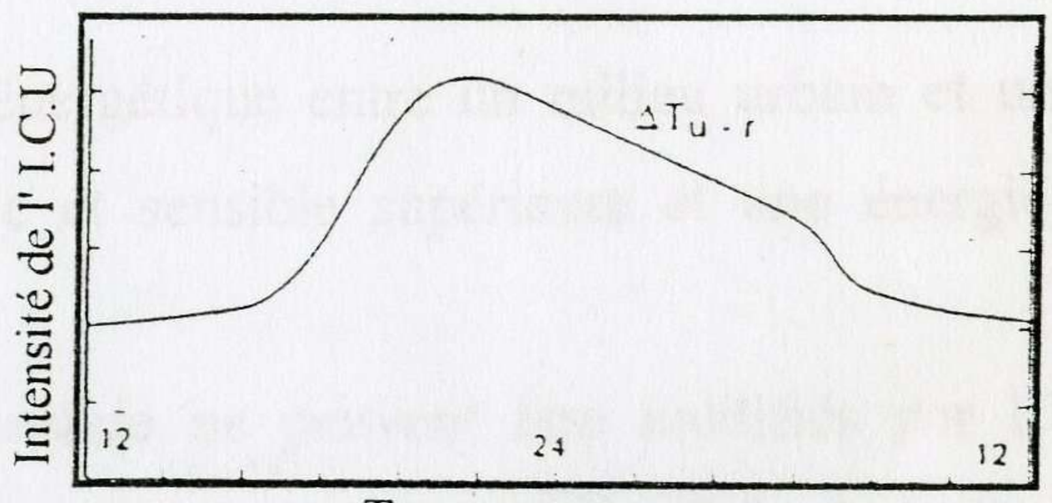


Figure 4.1 : Schématisation de l'îlot de chaleur urbain dans une ville fictive (Oke 1982 Source : Mc Pherson 1994).
Cette figure illustre le réchauffement de la ville prés du centre urbain, généralement plus dense et l'évolution de cet I.C.U durant la nuit en comparaison avec le milieu rural.

a)
En l'absence de vent Régional la ville se réchauffe et l'air chaud tend à s'élever au dessus de toute la ville. La température diminue progressivement en milieu rural.

b)
Lorsque le vent est très faible, un dôme de chaleur se constitue dans la ville L'I.C.U est maximum au centre dense. La température diminue avec la hauteur et du centre vers la périphérie.

c)
Lorsque le vent est modéré, il tend à dissiper le dôme de chaleur ou l'îlot de chaleur urbain . La température diminue avec la hauteur ; Cette diminution est d'autant plus rapide que le vent est fort.

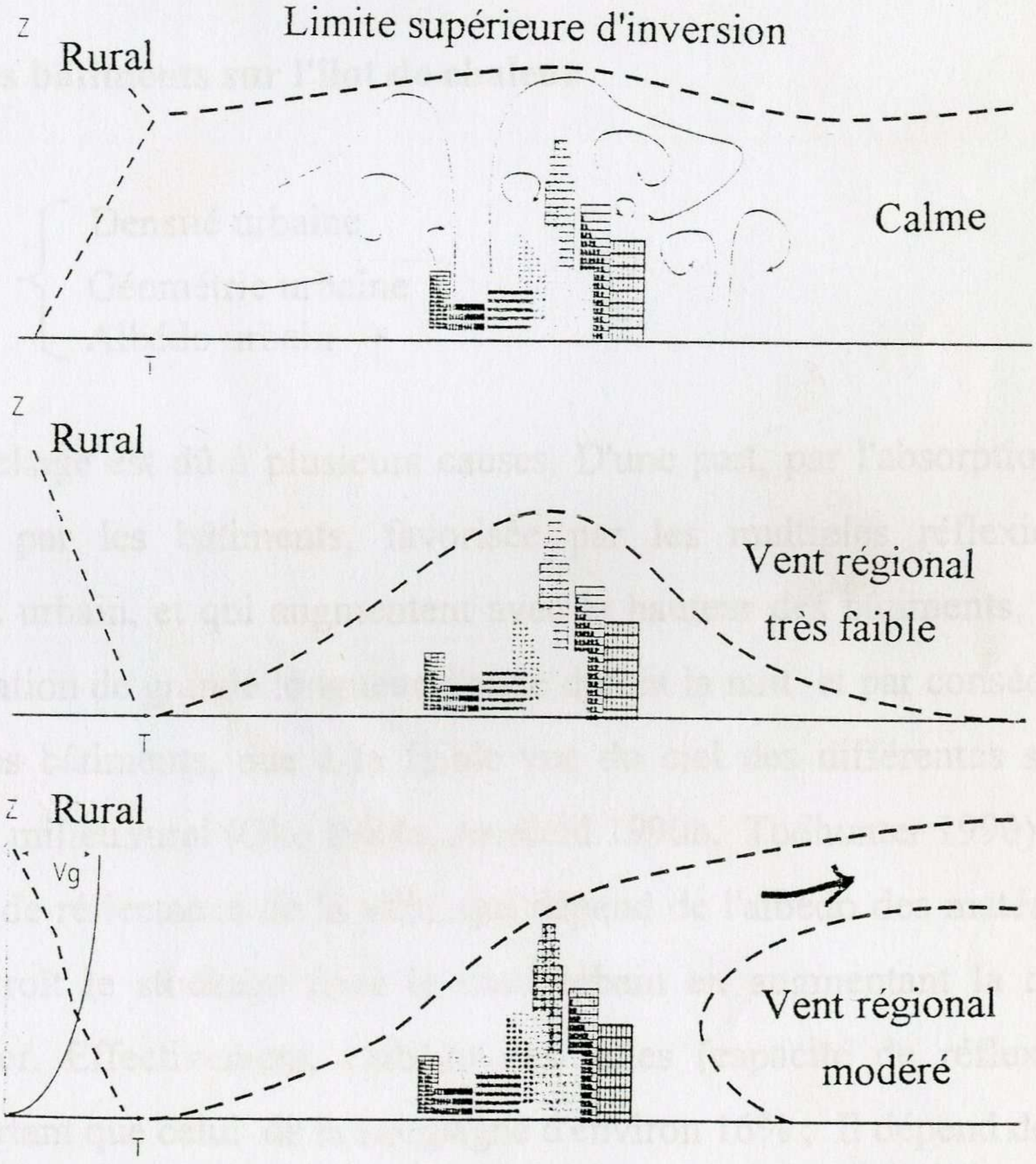


Figure 4.2 : Relation entre l'îlot de chaleur urbain et le régime des vents (Source : WMO 1996).

La consommation d'énergie en ville peut être donnée par l'équation suivante (Oke 1988b, Escourrou1983, Barry et Chorley 1978) :

$$Q_{net} + Q_a = Q_{bat} + Q_l + Q_s$$

rayonnement net — énergie anthropique — Chaleur stockée dans les bâtiments — Chaleur latente — Chaleur sensible

Le tableau 4.2 compare cet équilibre énergétique entre un milieu urbain et un milieu rural. Il révèle une quantité d'énergie stockée et sensible supérieure et une énergie latente inférieure en ville par rapport à la campagne.

Le rayonnement net et la chaleur sensible ne peuvent être modifiés par l'Homme directement ; Il apparaît donc que pour modifier l'îlot de chaleur urbain, il faudrait diminuer la quantité de chaleur stockée par les bâtiments Q_{bat}, réduire l'énergie anthropique Q_a, et augmenter la chaleur latente Q_l.

L'urbaniste est en mesure d'intervenir pour modifier ces propriétés, et par conséquent changer l'I.C.U. A cette fin, chacune de ces possibilités est étudiée séparément.

1- Effets du stockage dans les bâtiments sur l'îlot de chaleur

Q_{bat} ⟶ { Densité urbaine ; Géométrie urbaine ; Albédo urbain }

Ce phénomène de stockage est dû à plusieurs causes. D'une part, par l'absorption de la radiation durant la journée par les bâtiments, favorisée par les multiples réflexions du rayonnement dans les profils urbain, et qui augmentent avec la hauteur des bâtiments. D'autre part, à la réduction de l'irradiation de grande longueur d'onde durant la nuit et par conséquent la lenteur de refroidissement des bâtiments, due à la faible vue du ciel des différentes surfaces urbaines, comparativement au milieu rural (Oke 1988a, Arnfield 1990b, Todhunter 1990).
Egalement, la faible capacité de réflectance de la ville, qui dépend de l'albédo des matériaux et de la géométrie urbaine, accroît le stockage dans le tissu urbain en augmentant la quantité d'énergie potentielle à stocker. Effectivement, l'albédo des villes (capacité de réflexion du rayonnement) est moins important que celui de la campagne d'environ 16% ; Il dépend de

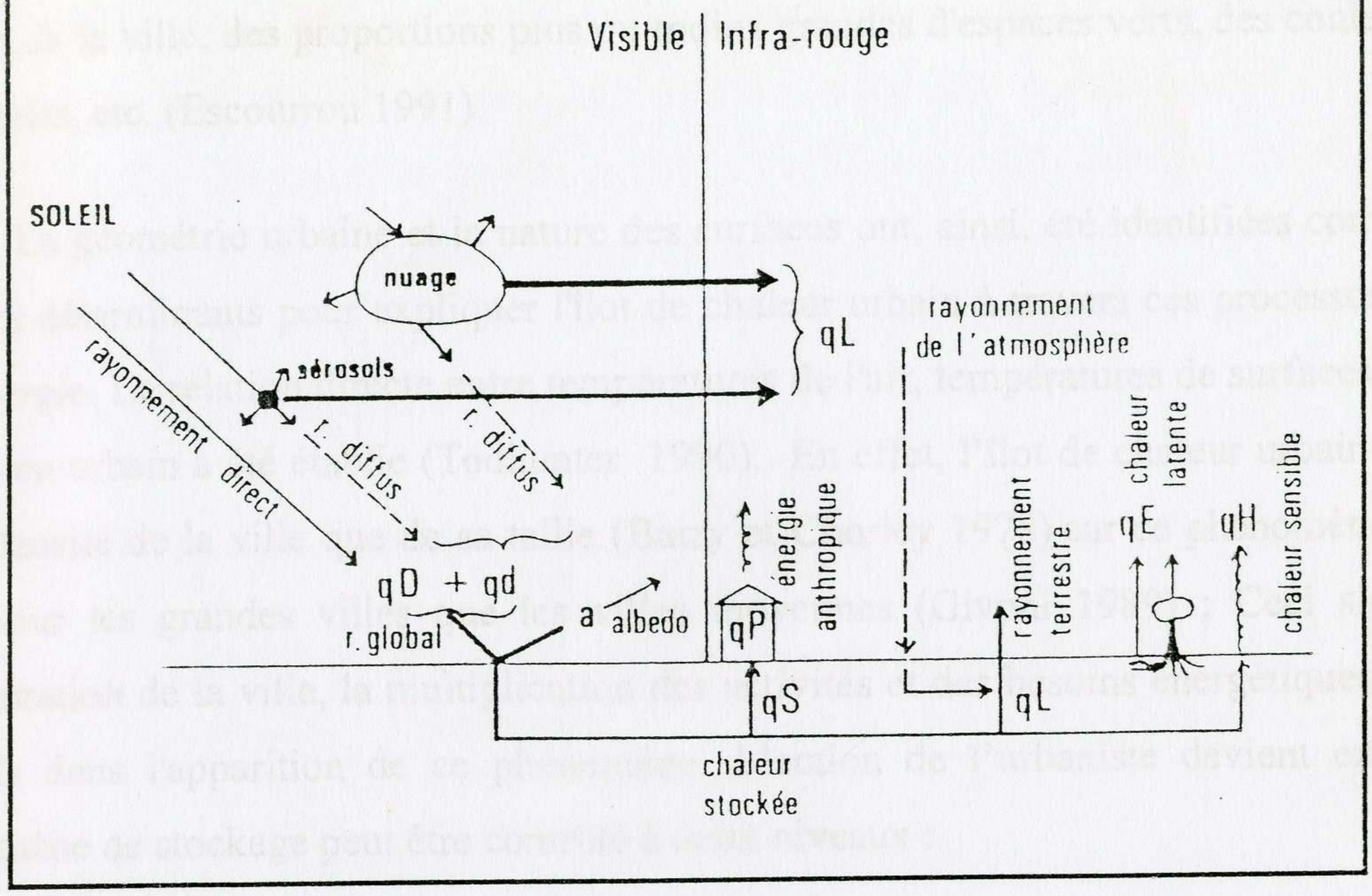


Figure 4.3 : Bilan radiatif de la ville (Escourrou 1991).

Tableau 4.2 : Equilibre radiatif et énergétique pour des aires rurale et urbaine (Oke 1988b)

Energie disponible(w/m^2)	**Rural**		**Urbain**	
Q U.V .reçue	800		760	
Q U.V réfléchie	-160		-106	
Q I.R reçue	350		365	
Q I.R réfléchie	-455		-503	
Q net	535		516	
Q anthropique	0		30	
Total	535		546	
Energie répartie (w/m^2)	**Rural**	**%**	**Urbain**	**%**
Q stockée	80	15	148	27
Q sensible	150	28	240	44
Q latente	305	57	158	29
Total	535	100	546	100

l'aspect de la ville, des proportions plus ou moins grandes d'espaces verts, des couleurs des murs et des toits, etc. (Escourrou 1991).

La géométrie urbaine et la nature des surfaces ont, ainsi, été identifiées comme étant des facteurs déterminants pour expliquer l'îlot de chaleur urbain à travers ces processus de stockage de l'énergie. La relation directe entre températures de l'air, températures de surfaces, et la densité du milieu urbain a été établie (Todhunter 1990). En effet, l'îlot de chaleur urbain dépend plus de la densité de la ville que de sa taille (Barry et Chorley 1978) car ce phénomène existe aussi bien pour les grandes villes que les villes moyennes (Givoni 1989) ; Ceci signifie que la configuration de la ville, la multiplication des activités et des besoins énergétiques sont les plus décisifs dans l'apparition de ce phénomène. L'action de l'urbaniste devient explicite, et ce phénomène de stockage peut être contrôlé à deux niveaux :

a) Conception tridimensionnelle du tissu urbain :

Tout choix de densité, de profils urbains, agit sur la chaleur stockée dans les bâtiments et par conséquent sur le bilan thermique global. Ces aspects sont déterminés principalement à l'échelle de la composition urbaine par rapport à des impératifs de contrôle climatique, mais leurs effets apparaissent ici cumulés. Les critères requis pour une géométrie permettant un faible stockage est discuté, plus en détail au chapitre 6, consacré aux aspects principalement géométriques.

b) Contrôle de la nature des surfaces urbaines

La deuxième alternative pour minimiser le stockage de chaleur dans les bâtiments est d'augmenter l'albédo urbain. A ce titre, il convient de mentionner que de nombreuses recherches ont été menées pour évaluer l'effet potentiel de l'utilisation de surfaces claires ou réfléchissantes, à l'albédo élevé, sur la diminution de l'I.C.U. (Akbari et al 1995, Taha 1997, Taha et al 1997, etc.).

L'exemple suivant est représentatif des résultats généraux obtenus. Taha (1997) a simulé numériquement, l'impact de l'augmentation de l'albédo de la ville (1) sur la diminution de l'îlot de chaleur urbain par l'utilisation de surfaces claires dans le bassin de Los Angeles. Il est apparu

(1)les albédos urbains varient en général entre 0.1 et 0.2 (Taha 1997).

qu'une différence de 2°C voire 4°C peut être atteinte en augmentant raisonnablement l'albédo de 0.13 dans les zones urbaines du bassin, à savoir les toits et les routes (Figure 4.4).

Enfin, la réflectance de la ville peut être modifiée par le contrôle de la géométrie urbaine puisque l'absorption de la radiation dépend, également, de l'incidence des rayons sur les surfaces réceptrices. Cet aspect est, lui aussi, développé au chapitre 6, qui étudie notamment la relation entre propriétés géométriques et albédo urbain.

2- Impact de l'énergie anthropique sur l'îlot de chaleur

$Q_a \longrightarrow$ { Chauffage/ Refroidissement et éclairage ; Industries ; Circulation urbaine ; Métabolisme H (négligeable)

La diffusion de l'énergie à partir des intérieurs des bâtiments, en raison de la production de chaleur de source anthropique, mène à l'accroissement de la chaleur sensible. Ce surplus d'énergie occasionne, généralement, une situation d'inconfort thermique.

L'urbaniste peut modifier l'énergie produite par ces activités urbaines en favorisant une conception qui exploite les énergies naturelles. Ici encore, ce sont des dispositions à une échelle de plus grand détail qui apparaissent, au niveau global par effet de cumul, à savoir la conception géométrique du tissu urbain. Il s'agit donc, de déterminer les critères géométriques destinés à satisfaire les objectifs d'accès au soleil, de refroidissement, de ventilation, etc. qui permettent de remplacer dans une large mesure les moyens actifs de chauffage et d'éclairage, source de chaleur, par des moyens passifs (Cf. Chapitre 6).

Egalement, bien qu'indirectement lié au climat, mais la rationalisation des transports et la réduction des distances de déplacements permettent de réduire sensiblement la circulation urbaine et par conséquent la demande d'énergie et la pollution dus aux divers moyens de transport.

A ce stade nous pouvons déjà affirmer que l'îlot de chaleur urbain traduit à un niveau global le niveau d'adaptation climatique d'un tissu urbain à une échelle plus détaillée. Ceci renforce l'idée selon laquelle l'urbanisme climatique est une démarche globale, qui offre plusieurs niveaux d'application. Il peut être mis en œuvre directement par une conception géométrique appropriée et indirectement par la garantie d'un climat urbain global favorable en amont.

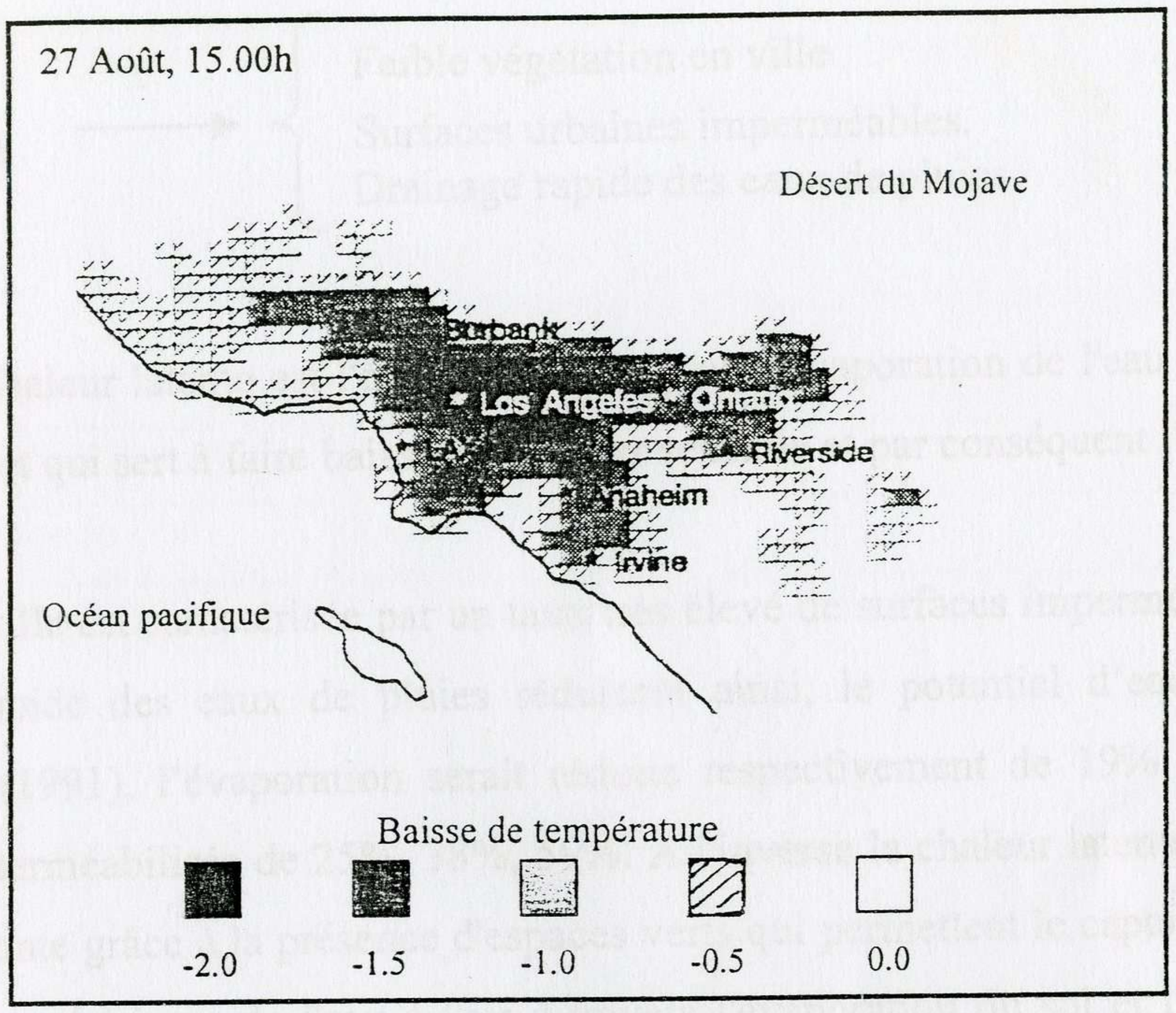


Figure 4.4 : Effets de l'augmentation modérée de l'albédo sur les températures de l'air dans le bassin de Los Angeles (Taha et al 1997).

3- Effets de la végétation sur la modification de la chaleur latente

Q_l ⟶ { Faible végétation en ville ; Surfaces urbaines imperméables. ; Drainage rapide des eaux de pluies }

La chaleur latente est l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau et l'évapotranspiration des plantes et qui sert à faire baisser la chaleur sensible et par conséquent l'îlot de chaleur.

La ville est caractérisée par un taux très élevé de surfaces imperméables qui favorisent le drainage rapide des eaux de pluies réduisant ainsi, le potentiel d'eau évaporable. D'après Escourrou (1991), l'évaporation serait réduite respectivement de 19%, 50%, 75%, pour une surface imperméabilisée de 25%, 38%, 59%. A l'inverse la chaleur latente dans la campagne est très importante grâce à la présence d'espaces verts qui permettent le captage des eaux de pluie et la restitution ultérieure de l'eau à l'air à travers l'évaporation du sol et l'évapotranspiration des plantes.

Ainsi, l'urbaniste doit encourager la présence d'espaces verts qui rétablissent le transfert d'eau à l'air. Cette stratégie a été largement recommandée par l'ensemble des recherches relatives au climat urbain (Cf. Taha 1997, Avissar 1996, Akbari et al 1995, Mc Pherson 1994a,1992, Escourrou 1991, Davis 1990, etc.).

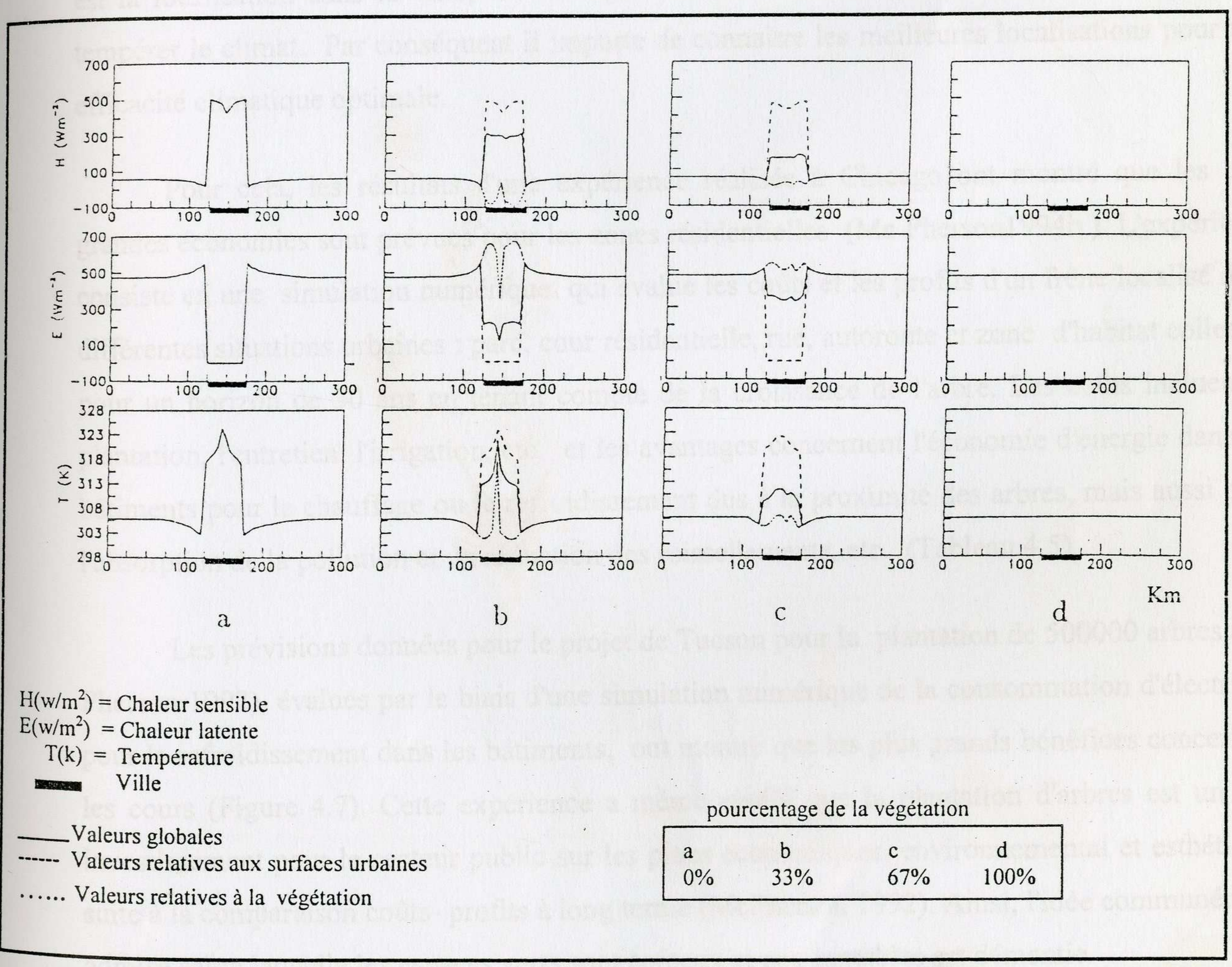
L'évaluation des effets thermiques des espaces verts a été étudiée par certains de ces auteurs. Quelques-uns des résultats les plus importants à l'égard de l'urbanisme sont résumés ci-après. Ils ont trait, principalement, aux critères à considérer, à savoir les proportions à adopter et les localisations préférentielles.

Avissar (1996) a simulé numériquement les effets potentiels de la végétation sur l'environnement thermique urbain global (tableau 4.3.) L'auteur a montré que :

- la végétation peut affecter véritablement tous les éléments du climat dans les aires urbaines, à savoir les températures, le vent, l'humidité, etc.
- Plus le rapport végétation/ bâti augmente plus la chaleur latente augmente d'où une baisse de la chaleur sensible. Les températures de l'air se réduisent graduellement jusqu'à retrouver les conditions rurales environnantes (Figure 4.5).

Tableau 4.3 : Conditions de simulation de la végétation en milieu urbain menée par Avissar (1996)

Variables	**caractéristiques**
Type de végétation	Diversifiée: Arbres, arbustes, gazon, distribuée aléatoirement dans la ville
Cadre bâti	Constitué de: zones industrielles, commerciales, résidentielles Inclut des zones de grandes densité et des espaces pavés non-bâtis
Milieu rural environnant	Aride , Humide
Conditions de vent	0 m/s , 5 m/s



$H(w/m^2)$ = Chaleur sensible
$E(w/m^2)$ = Chaleur latente
T(k) = Température
Ville

——— Valeurs globales
------ Valeurs relatives aux surfaces urbaines
..... Valeurs relatives à la végétation

pourcentage de la végétation

a	b	c	d
0%	33%	67%	100%

Figure 4.5 :Effets potentiels de la végétation sur le climat urbain. Cas de ville avec environnement humide, sans vent (Avissar 1996).

D'autres recherches théoriques et expérimentales ont permis de confirmer ce résultat relatif aux proportions entre espaces verts et domaine bâti (Tableau 4.4 et Figure 4.6).

Ceci pour les proportions globales dans la ville ; Plus en détail, le phénomène est, également, vérifié à savoir plus l'espace vert est important plus grande est l'étendue de son effet sur son environnement immédiat. A titre d'exemple, le parc de Chapultepec à Mexico représente une zone de fraîcheur dans la ville couvrant 500 ha où l'on relève une baisse de températures de 2° à 3° dans les parties proches. La température diminue de 1° en saison humide et de 4° en saison sèche à 700m du parc. L'influence du parc est ressentie sur un rayon de deux kilomètres (Escourrou 1991).

L'efficacité de la végétation par rapport au climat dépend d'un autre aspect important qui est la localisation dans la ville, car la végétation est rarement projetée dans le seul souci de tempérer le climat. Par conséquent il importe de connaître les meilleures localisations pour une efficacité climatique optimale.

Pour cela, les résultats d'une expérience réalisée à Chicago ont montré que les plus grandes économies sont prévues pour les zones résidentielles (Mc Pherson1994b). L'expérience consiste en une simulation numérique qui évalue les coûts et les profits d'un frêne localisé dans différentes situations urbaines : parc, cour résidentielle, rue, autoroute et zone d'habitat collectif) pour un horizon de 30 ans en tenant compte de la croissance de l'arbre. Les coûts incluent la plantation, l'entretien, l'irrigation, etc. et les avantages concernent l'économie d'énergie dans les bâtiments pour le chauffage ou le refroidissement dus à la proximité des arbres, mais aussi pour l'absorption de la pollution et la réduction des ruissellements, etc. (Tableau 4.5)

Les prévisions données pour le projet de Tucson pour la plantation de 500000 arbres (Mc Pherson 1992), évalués par le biais d'une simulation numérique de la consommation d'électricité pour le refroidissement dans les bâtiments, ont montré que les plus grands bénéfices concernent les cours (Figure 4.7). Cette expérience a même révélé que la plantation d'arbres est un bon investissement pour le secteur public sur les plans économiques, environnemental et esthétique, suite à la comparaison coûts- profits à long terme (McPherson 1992). Ainsi, l'idée communément admise selon laquelle les espaces verts sont coûteux et peu rentables est démentie.

Tableau 4.4 : Exemples d'expériences ayant révélé une modification du climat urbain substantielle par l'usage de la végétation.

Ville	Caractéristiques de l'expérience	Différence de températures Δ T°C	Economies d'énergie	Sources
Nankin, Chine	35 millions d'arbres 1.5 million d'habitants Plantés entre 1952 et 1982	1.8°C jusqu'à 3°C à long terme	–	Davis 1990
Tucson, Arizona, USA	500 000 arbres prévus	–	236.5 millions de dollars pour un horizon de 40 ans	McPherson 1994
Los Angeles	10 millions d'arbres	Baisse de 2°C au centre 1°C à la périphérie	–	Taha et al 1997

Dans la cas de Nankin, des mesures de la température ont été effectuées sur terrain ; Pour Tucson et Los Angeles, les résultats donnés sont estimés grâce à des simulations numériques.

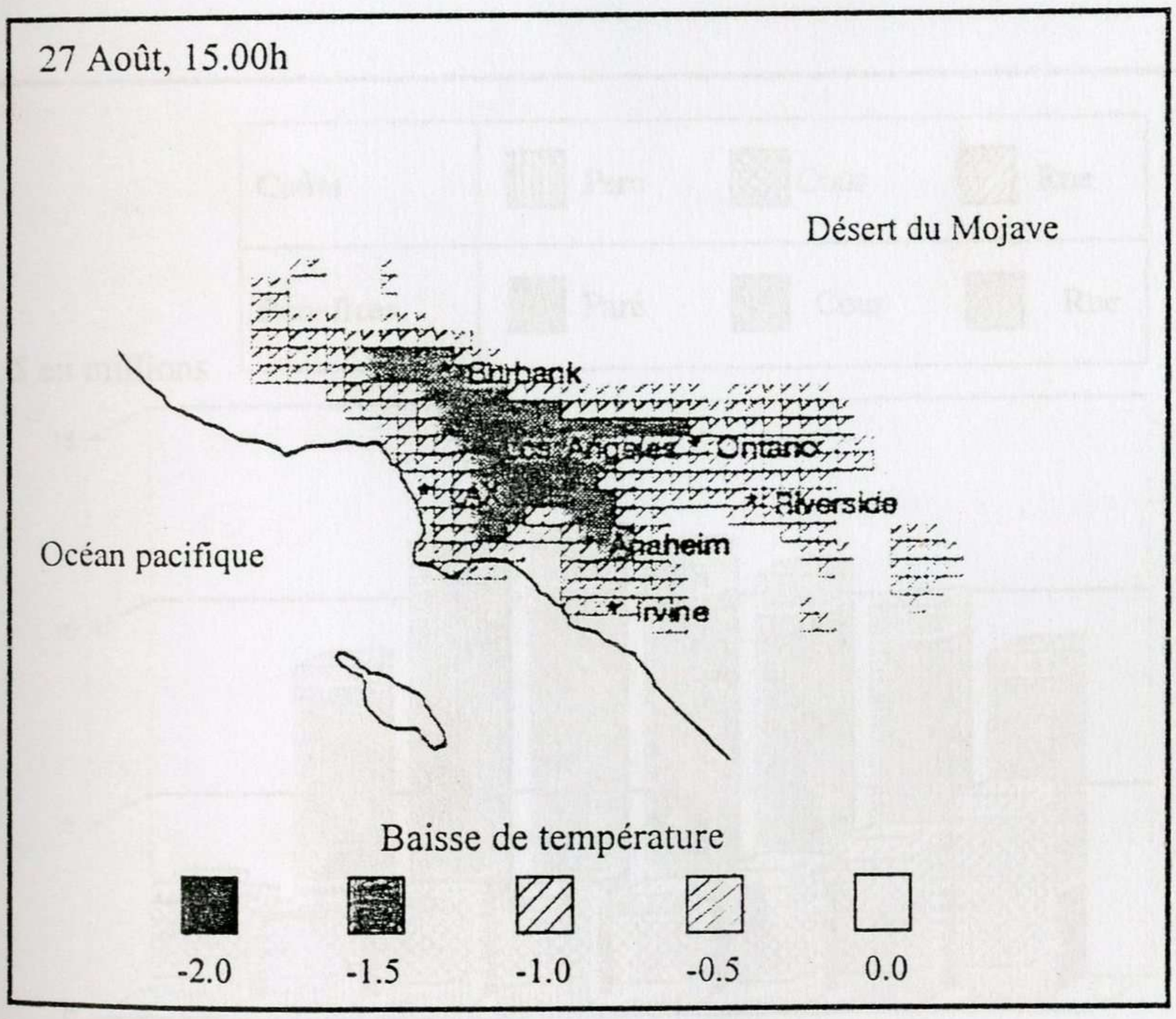


Figure 4.6 : Impacts de l'augmentation modérée de la végétation sur les températures de l'air dans le bassin de Los Angeles (Taha et al 1997).

Tableau 4.5 : Profits annuels prévus sur 30 ans pour un frêne localisé à divers endroits dans le projet climatique de la ville de Chicago (Mc Pherson 1994 a).

Localisation de l'arbre	**Taille**	**Economies d'énergie**
Parc	11.8 m (39 pieds)	39.42 %
Cour – zone résidentielle	10.8 m (36 pieds)	65.62 %
Rue – zone résidentielle	9.6 m (32 pieds)	50.74 %
Grande voie	10.2 m (34 pieds)	34.74 %
Habitat collectif	11.1 m (37 pieds)	59.98 %

Ces résultats sont obtenus grâce à une simulation numérique qui tient compte d'une part les frais de plantation, d'entretien, etc. de l'arbre et d'autre part des économies d'énergie (Demande en électricité) à réaliser grâce aux propriétés d'ombrage, de réduction du vent et d'évapotranspiration de l'arbre, en fonction de sa localisation.

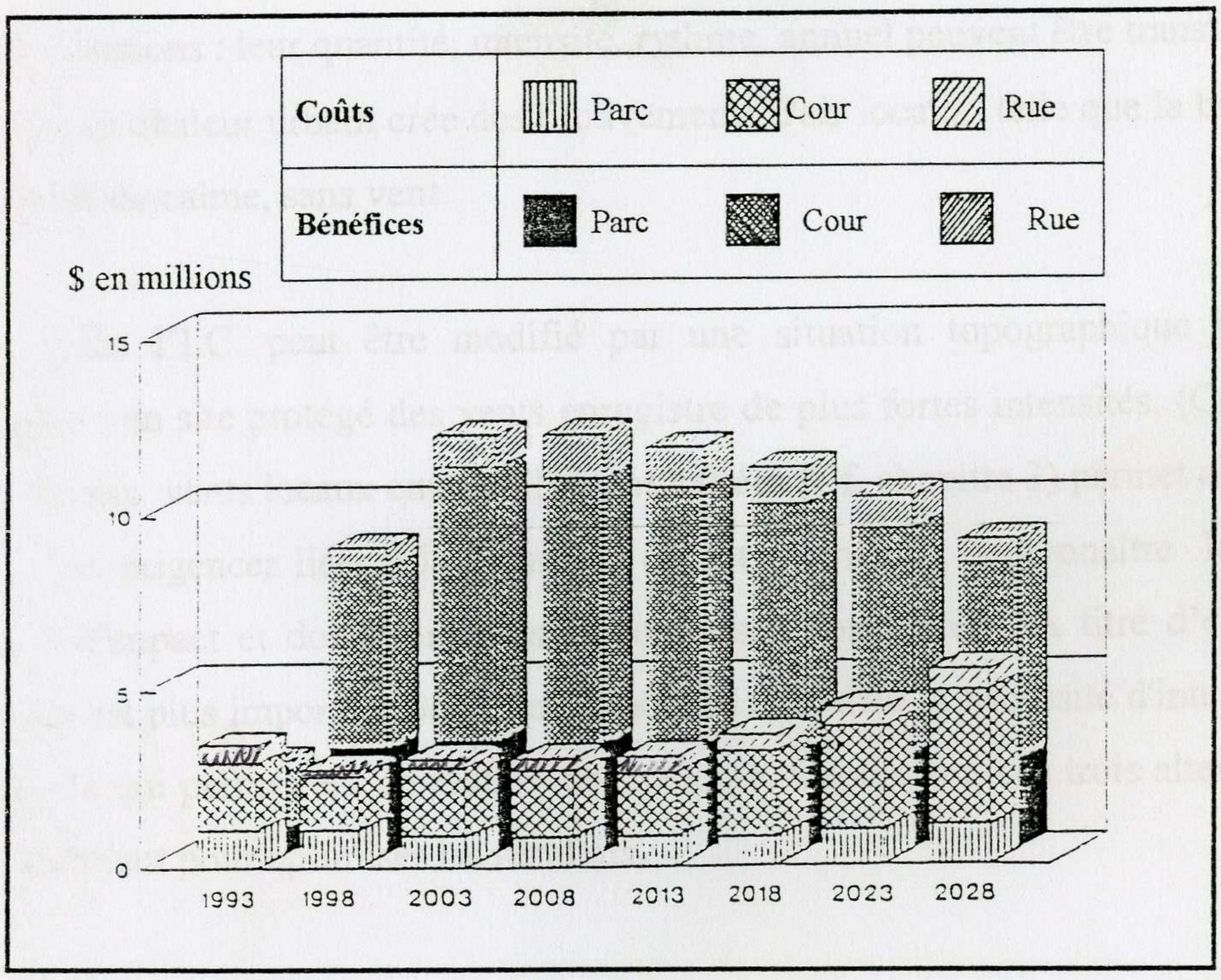


Figure 4.7 : Projet de 500000 plantations à Tucson, Arizona. Prévision des coûts et bénéfices annuels de la végétation en fonction de sa localisation (Mc Pherson 1992).

Ainsi, La végétation en étant planifiée de façon judicieuse peut être utilisée pour atténuer quelques-uns uns des effets thermiques négatifs générés par le développement urbain et matérialisés par l'îlot de chaleur. Le plus grand taux d'espaces verts est toujours souhaitable car leur efficacité augmente avec leur taille.

Leur distribution dépend en général de la disponibilité du sol, mais pour des objectifs climatiques, la préférence est à accorder aux zones résidentielles aussi bien en raison de la forte réduction de la demande énergétique réalisée, grâce à l'ombrage, l'évapotranspiration et la réduction du vent des arbres entourant les bâtiments, que pour l'importance du confort reconnue essentielle dans ces lieux.

4- Autres effets de l'îlot de chaleur

L'influence de l'îlot de chaleur urbain dépasse les seules températures, son impact sur les autres éléments du climat est important, parfois spectaculaire (Escourrou 1991) :

- L'humidité relative : la relation est inverse, le minimum d'humidité relative correspond au maximum d'I.C.U. La corrélation entre ces deux phénomènes est étroite puisqu'il apparaît que les cartes d'humidité et d'I.C.U. présentent des similitudes. (Cf. W.M.O1986).
- Précipitations : leur quantité, intensité, rythme, annuel peuvent être transformés.
- L'îlot de chaleur urbain crée des mouvements d'air locaux telle que la brise de campagne en période de calme, sans vent.

Enfin l'I.C. peut être modifié par une situation topographique particulière. A titre d'exemple : un site protégé des vents enregistre de plus fortes intensités. (Cf. Kuttler 1996). La référence aux vents locaux entre collines et vallées (Cf. chapitre 3) permet d'en saisir les causes.

Les exigences liées à la nature du climat permettent de connaître lesquels de ces effets ont plus d'impact et donc sont plus importants à considérer. A titre d'exemple, le stockage d'énergie est plus important pour des climats chauds d'où la nécessité d'intervenir en priorité sur les aspects qui permettent de réduire ce stockage. Cependant, ces trois alternatives sont adopter simultanément pour optimiser les résultats.

4.2.2 Les vents urbains

Les mouvements de l'air à l'intérieur d'une ville sont très différents du milieu rural. Le vent est l'élément du climat le plus largement modifié par la ville, engendrant des flux complexes. Cette modification est due à la rugosité de la ville, à la canalisation dans les rues et aux différences thermiques donnant naissance à des brises (Escourrou 1991).

La maîtrise de ces mouvements est déterminante pour une conception urbaine appropriée, car ceci conditionne d'abord, le niveau de ventilation dans les grandes aires, l'amélioration du climat urbain général et ensuite les microclimats urbains, à savoir le potentiel de ventilation dans les espaces extérieurs et intérieurs ainsi que les effets aérodynamiques engendrés par la présence d'obstacles.

Nous distinguons deux types de vent en milieu urbain : un vent régional, modifié dans sa vitesse et sa direction par la présence d'obstacles, et des vents locaux, nés de différences thermiques, également appelés brises thermiques.

1- Le vent régional

Le vent régional en milieu urbain est caractérisé par une vitesse moyenne plus faible qu'en milieu rural d'au moins 5% et pouvant atteindre 30% (Barry et Chorley 1978, WMO1996, etc.).

La figure 4.8 présente les profils de vent en fonction du milieu : rase campagne, milieu suburbain, milieu urbain et montre la diminution importante de la vitesse du vent en milieu urbain due à la présence d'obstacles. Le profil des vents est donné par l'équation

$$\frac{U(z)}{U_g} = \left(\frac{z-d}{z_g-d}\right)^{\alpha}$$

Tel que U(z) est la vitesse moyenne à la hauteur z au-dessus du sol, Où d est la hauteur zéro du plan déplacement. α est de 0.26 à 0.35 au-dessus des aires urbaines, jusqu'à 0.4 en milieu rural (Cf. Bensalem 1991).

D'une manière plus fine, la structure de l'atmosphère au-dessus de la ville, donnée par Oke (1988b), montre plusieurs couches aux caractéristiques différentes (Figure 4.9). A un niveau supérieur, la couche limite urbaine (C.L.U) est une zone influencée par des effets régionaux et locaux dus aux différentes entités de la ville définies par leur usage. Elle inclut la couche de

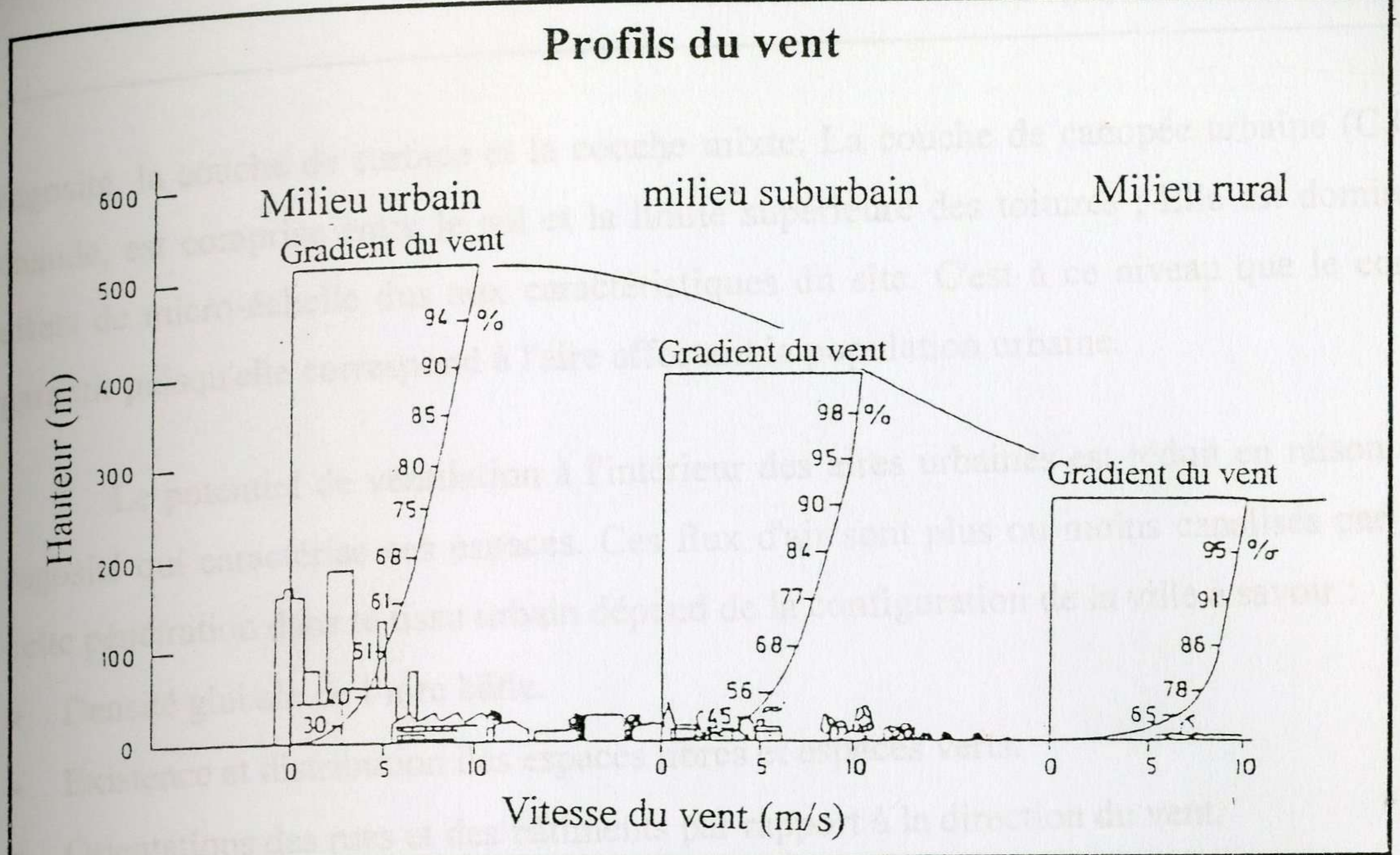


Figure 4.8 : Evolution spatiale de la vitesse du vent pour différents milieux (Source: Baumüller et al 1993).

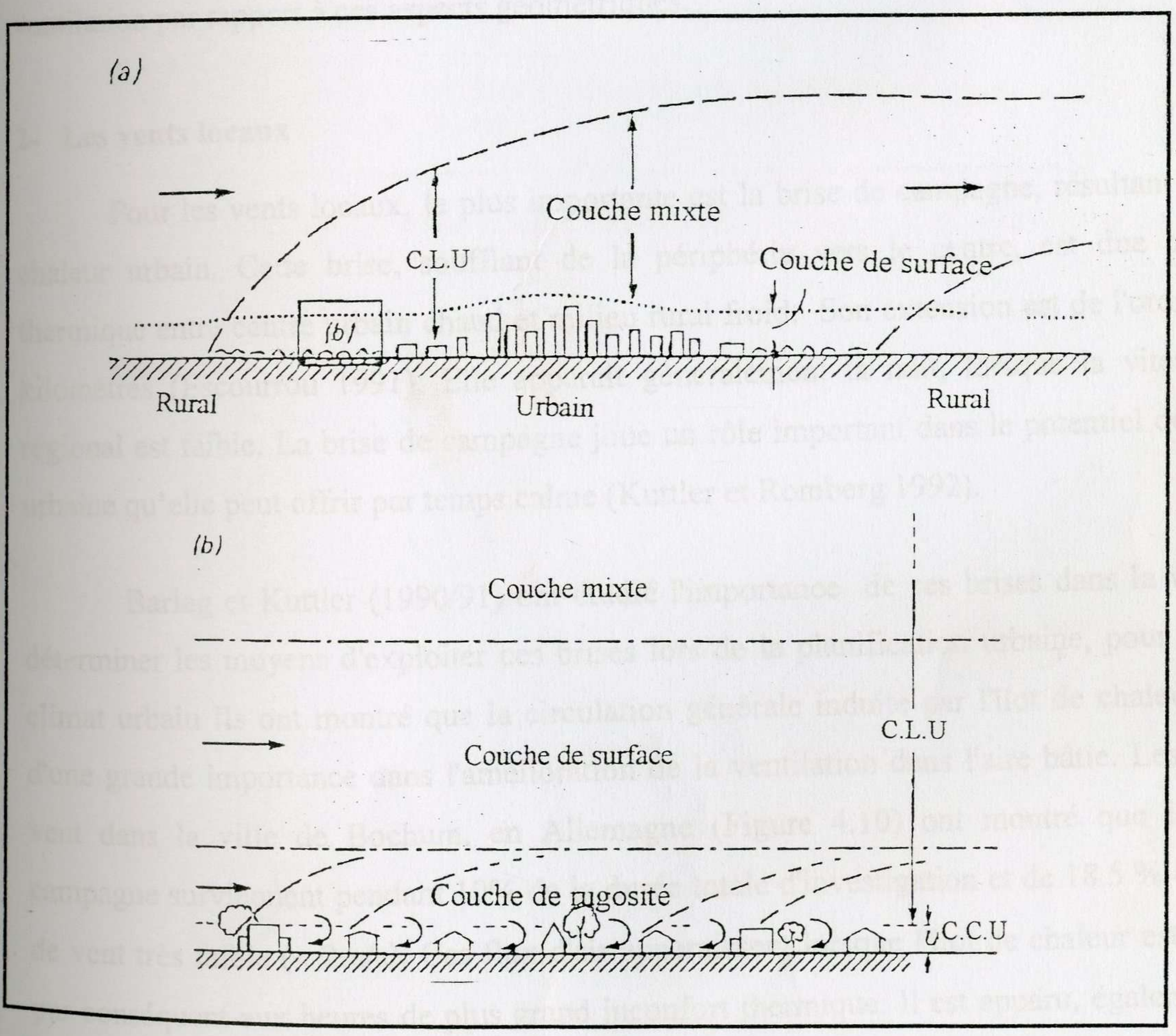


Figure 4.9 : Structure de l'atmosphère au dessus d'une ville (Oke 1988b).

rugosité, la couche de surface et la couche mixte. La couche de canopée urbaine (C.C.U), plus chaude, est comprise entre le sol et la limite supérieure des toitures ; Elle est dominée par les effets de micro-échelle dus aux caractéristiques du site. C'est à ce niveau que le confort est à garantir puisqu'elle correspond à l'aire affectant la population urbaine.

Le potentiel de ventilation à l'intérieur des aires urbaines est réduit en raison de la forte rugosité qui caractérise ces espaces. Ces flux d'air sont plus ou moins canalisés par les rues, et cette pénétration dans le tissu urbain dépend de la configuration de la ville à savoir :

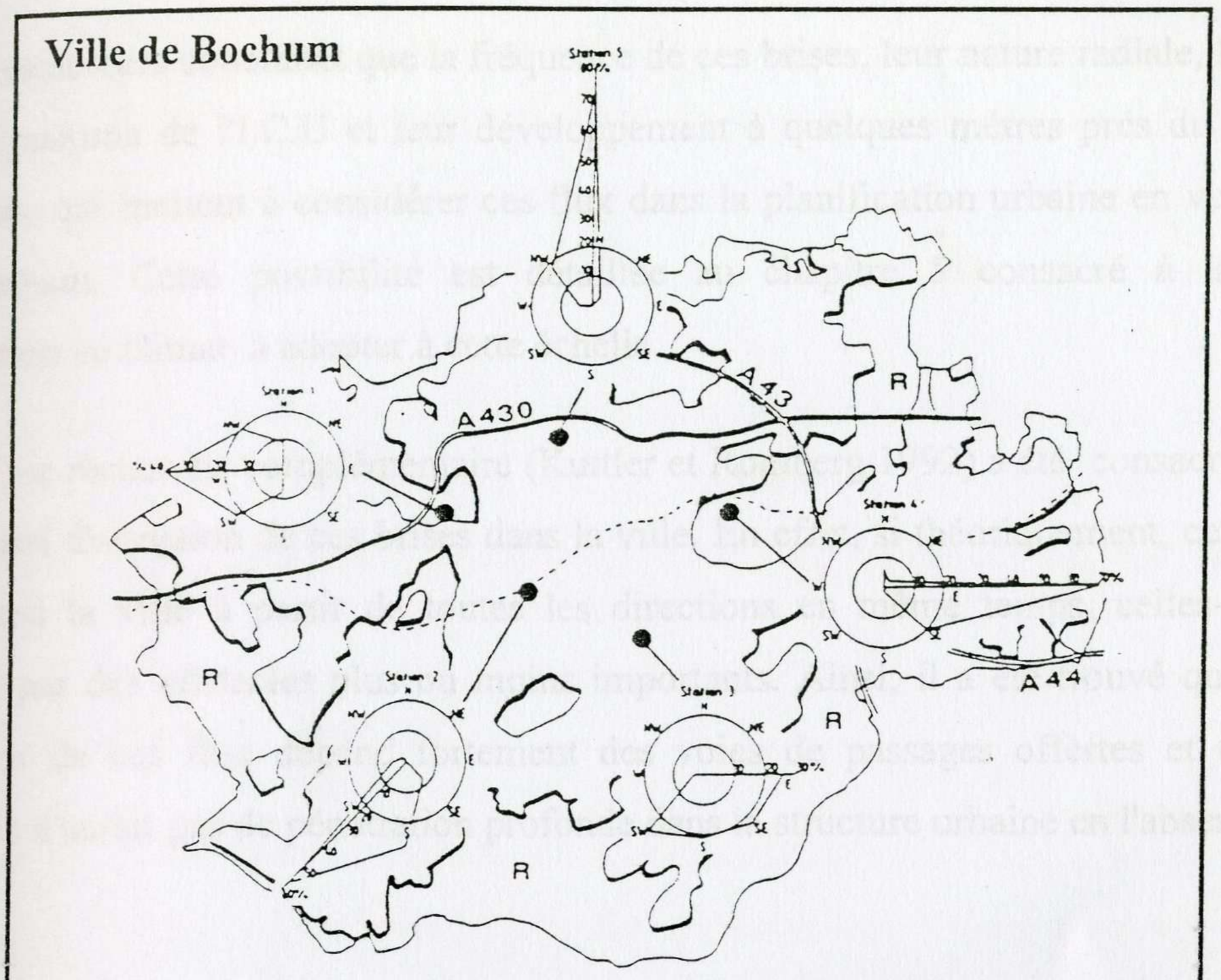
- Densité globale de l'aire bâtie.
- Existence et distribution des espaces libres et espaces verts.
- Orientations des rues et des bâtiments par rapport à la direction du vent.
- Formes, hauteurs et disposition des bâtiments entre eux.

Ces aspects sont développés au chapitre 6 qui étudie, en détail, la dépendance des schémas de ventilation par rapport à ces aspects géométriques.

2- Les vents locaux

Pour les vents locaux, la plus importante est la brise de campagne, résultant de l'îlot de chaleur urbain. Cette brise, soufflant de la périphérie vers le centre, est due au contraste thermique entre centre urbain chaud et milieu rural froid. Son extension est de l'ordre de 1 à 20 kilomètres (Escourrou 1991). Elle apparaît généralement la nuit, lorsque la vitesse du vent régional est faible. La brise de campagne joue un rôle important dans le potentiel de ventilation urbaine qu'elle peut offrir par temps calme (Kuttler et Romberg 1992).

Barlag et Kuttler (1990/91) ont étudié l'importance de ces brises dans la ville, afin de déterminer les moyens d'exploiter ces brises lors de la planification urbaine, pour améliorer le climat urbain Ils ont montré que la circulation générale induite par l'îlot de chaleur urbain est d'une grande importance dans l'amélioration de la ventilation dans l'aire bâtie. Les mesures du vent dans la ville de Bochum, en Allemagne (Figure 4.10) ont montré que les brises de campagne surviennent pendant 10% de la durée totale d'investigation et de 18.5 % de la période de vent très faible (< 2m/s). Ces flux d'air apparaissent lorsque l'îlot de chaleur est maximal, et par conséquent aux heures de plus grand inconfort thermique. Il est apparu, également, que ces brises peuvent entrer dans la ville à partir de toutes les directions de la périphérie vers le centre.



Les données du vent sont récoltées par 5 stations.
Chacune des roses des vents illustre les vents locaux enregistrés pour chacune des stations indiquée sur la carte.

Figure 4.10 : Manifestation nocturne des brises de campagnes montrant le schéma radial des flux (Barlag et Kuttler 1990/91).

Les auteurs concluent que la fréquence de ces brises, leur nature radiale, leur coïncidence avec les maxima de l'I.C.U et leur développement à quelques mètres prés du sol sont, autant d'éléments, qui incitent à considérer ces flux dans la planification urbaine en vue d'améliorer le climat urbain. Cette possibilité est détaillée au chapitre 5 consacré à la méthodologie d'intégration au climat à adopter à cette échelle.

Une recherche complémentaire (Kuttler et Romberg 1992) a été consacrée à l'évaluation du potentiel d'intrusion de ces brises dans la ville. En effet, si théoriquement, ces brises peuvent entrer dans la ville à partir de toutes les directions en même temps, celles-ci peuvent être bloquées par des obstacles plus ou moins importants. Ainsi, il a été trouvé que la profondeur d'intrusion de ces flux dépend fortement des voies de passages offertes et que la brise de campagne n'aurait pas de pénétration profonde dans la structure urbaine en l'absence de passages libres.

Ces brises sont, également, à considérer dans la prévention des phénomènes de pollution, en raison de leur faible vitesse, défavorable à leur dispersion, en particulier dans les rues (Escourrou 1991, Kuttler et Romberg1992). En effet, ces flux lents, et prés du sol déplacent l'air horizontalement de façon régulière, et peuvent, de ce fait, augmenter la pollution si les polluants se trouvent sur le passage de ces vents. Ainsi, il est essentiel que les voies de passages projetées pour laisser pénétrer ces flux aient une bonne qualité d'air.

Enfin, d'autres brises peuvent exister dues à certaines situations topographiques ou géographiques particulières tels que : brise de mer/terre ou de vallée/colline. L'étendue de ces brises est très variable, depuis la brise de campagne et de mer se manifestant sur des kilomètres jusqu'à des brises très localisées, de faible épaisseur, pouvant se produire entre deux quartiers urbains ou par la présence d'un espace vert. Ces mouvements locaux peuvent être exploités de la même manière et à une plus grande échelle.

Certaines exigences urbanistiques par rapport au vent peuvent, donc, être énoncées :

1. Exploitation des vents régionaux pour réduire l'îlot de chaleur urbain. En effet une bonne ventilation de la ville permet de dissiper la chaleur excessive du centre, puisque l'I.C.U. ne se manifeste que lorsque les vents sont inférieurs à 3m/s. Ainsi il convient que ces vents régionaux parviennent au centre de la ville.

2. Contrôle des vents régionaux pour permettre le renouvellement de l'air dans les espaces extérieurs et améliorer la qualité de l'air. Ceci nécessite l'étude du rôle de la géométrie urbaine. Dans certains cas, il est aussi, nécessaire de protéger les aires urbaines des vents gênants : froids ou chauds, chargés de poussière ou porteurs de pollution etc. en particulier aux bordures de villes.
3. Exploitation des régimes locaux du vent pour soutenir une ventilation urbaine par temps calme. Egalement, la connaissance des régimes des vents locaux permet de prévenir des risques de pollution favorisés par l'absence de vent régional et qui sont souvent négligés.

4.2.3 La pollution :

Hormis les principaux caractères du climat urbain que sont l'I.C.U. et les vents urbains, la pollution de l'air est le troisième caractère d'importance. D'une part, ce phénomène est développé ici, parce qu'il a toujours des effets négatifs sur la qualité de l'air, et par conséquent sur la santé de l'homme. D'autre part, il est expliqué principalement, par rapport à sa dépendance de la radiation solaire et du vent. Par conséquent sa présentation complète la définition du climat urbain, même si sa relation au climat est indirecte.

La pollution, nous l'avons vu, est un phénomène inhérent à la ville. Son importance est plus ou moins grande et dépend des activités urbaines suivantes :

- Industries : généralement productrice de poussière et de gaz.
- Circulation automobile et transport divers.
- Activités domestiques

La relation climat- pollution en milieu urbain est double :

1. D'une part la pollution générée par la ville elle-même peut être aggravée par certains éléments du climat : le vent par exemple peut reporter les polluants depuis des sources éloignées vers les aires urbaines, surtout résidentielles. Dans ce cas, il augmente la concentration des polluants au lieu de les disperser. Il en est de même pour un vent faible, qui déplace les polluants de manière linéaire et lente. La température de l'air est l'autre élément du climat important, car les interactions chimiques dans l'air et donc la formation de pollution se produisent plus facilement pour des températures plus élevées. On enregistre rarement des taux de pollution élevés pour des températures modérées.

2. A son tour, la pollution de l'air a un effet direct sur la quantité d'énergie disponible. Celle-ci est toujours réduite en présence de particules dans l'air. Le rayonnement diffus, dû à la présence de particules solides ou gazeuses, est une source de chaleur supplémentaire en ville.

Un urbanisme adapté au climat permet de minimiser cette pollution de deux manières : à la base, par la réduction des émissions, puis en favorisant la dispersion de ces polluants lorsqu'ils existent.

1) La réduction des émissions est possible grâce à la réduction de la demande énergétique dans les bâtiments, par l'utilisation d'énergies peu polluantes. Toutefois, la volonté de réduire les émissions requière des politiques volontaristes qui dépassent la compétence de l'urbaniste.

2) Dans le second cas, favoriser la dispersion des polluants peut être favorisée par le contrôle du mouvement des vents, par une meilleure affectation des sols notamment pour les zones industrielles et des grandes voies de circulation par rapport aux zones résidentielles.

Le contrôle de la pollution de l'air est à présent l'un des facteurs les plus importants dans la localisation des zones industrielles. Habituellement les sites industriels sont localisés le long de la direction sous le vent en relation avec les aires résidentielles. Cette démarche, bien que nécessaire, est insuffisante et présente des risques d'erreurs (Nowicki 1988, Kaule 1995).

Pour cela, nous résumons ci-après une recherche (Nowicki 1988) ayant pour but l'identification des critères de localisation des industries pour favoriser la dispersion des polluants qu'elles engendrent par le biais d'une simulation numérique (Tableau 4.5).

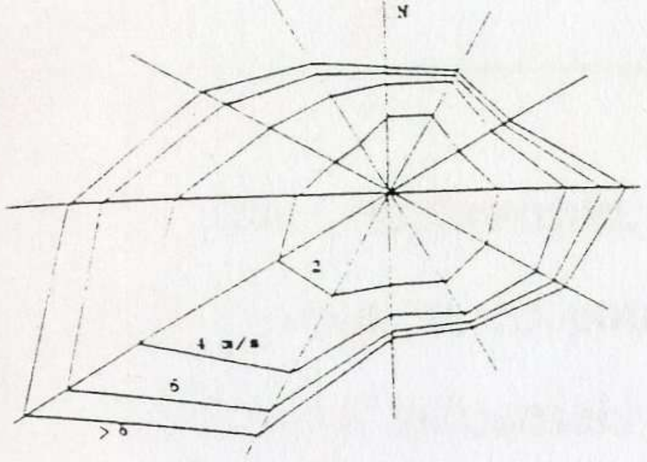
Globalement, il est apparu que le déplacement des polluants dépend de toutes les variables considérées : la hauteur des cheminées, les diverses directions du vent et la forme de la ville (figure 4.11).

Dans tous les cas, les industries situées à l'intérieur de la ville ou alignées à sa périphérie immédiate sont fortement polluantes, leur éloignement est donc nécessaire. La meilleure localisation pour des cheminées d'égales hauteurs est dans une grande zone industrielle située à quelques kilomètres loin des zones résidentielles. Pour le cas, plus fréquent, de cheminées de hauteurs différentes, le meilleur résultat est donné pour les villes linéaires avec les industries situées à la périphérie du côté le plus petit de la ville.

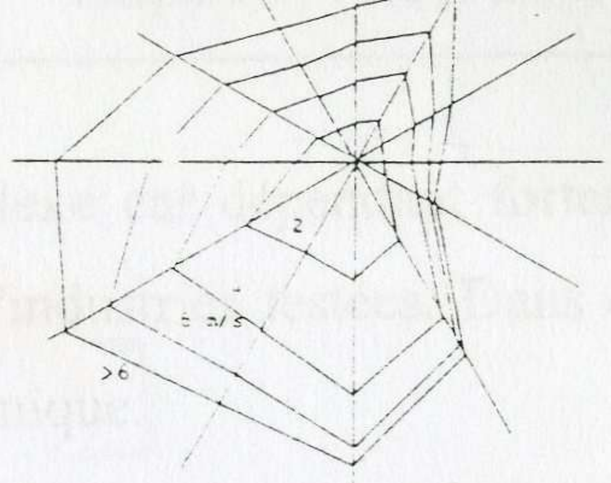
Tableau 4.5 : Conditions de simulation de la localisation des industries / ville pour le contrôle de la pollution menée par Nowicki (198)

Variables	**Caractéristiques**
Type de ville étudié	• Ville moyenne de 30 km^2, • 100000 à 200000 habitants • Concentrique et linéaire
Vent	• Rose des vents régionaux • Rose des vents locaux
Type d'industries étudié	• Grandes avec cheminées de 150 m • Moyennes avec cheminées de 20m
Localisation des industries testées	• Dispersée à l'intérieur de la ville • Alignées le long d'un coté de la ville • Groupé en un site à la périphérie de la ville, plusieurs cas • Groupé en deux sites à la périphérie de la ville • Groupement d'industries grandes et moyennes simultanément
La simulation est faite numériquement pour une région de la côte baltique.	

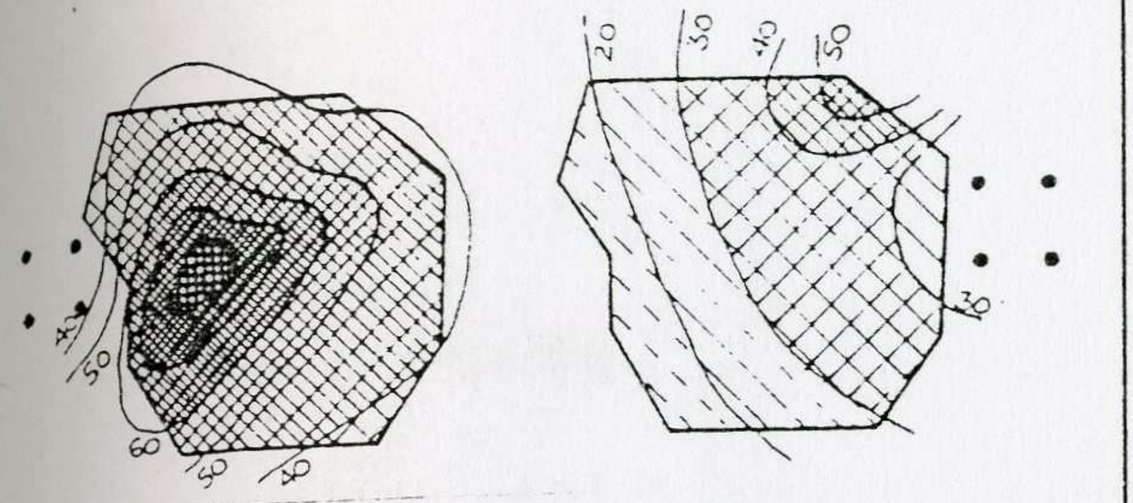
(a)
Rose des vents régionaux



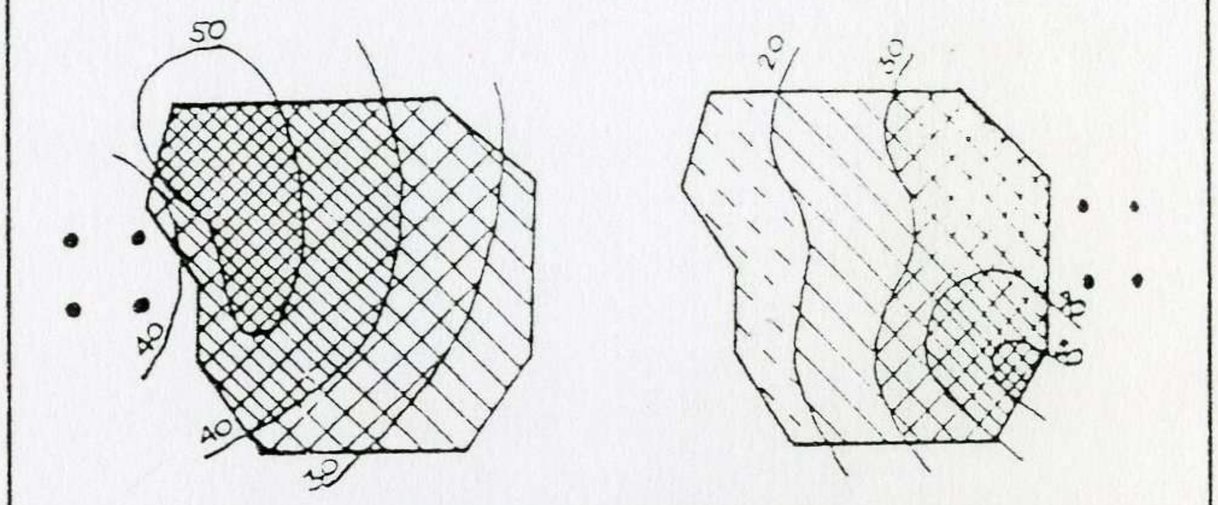
(b)
Rose des vents locaux



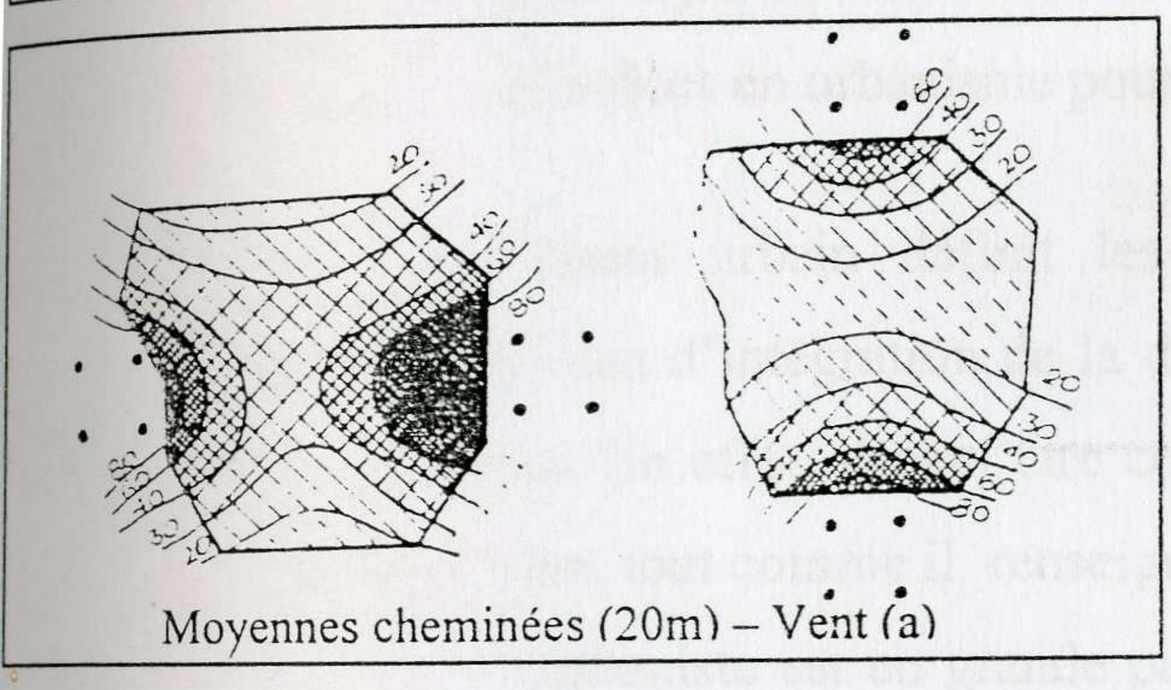
Ville concentrique



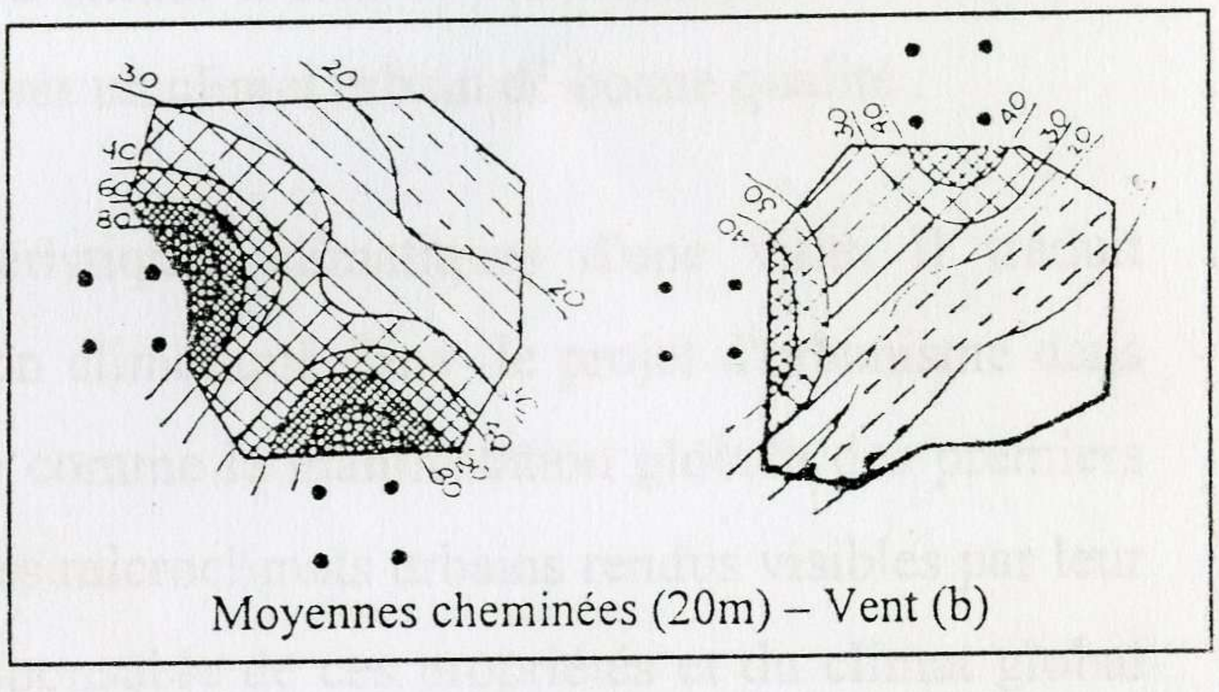
Hautes cheminées (150m) - Vent (a)



Hautes cheminées (150m) - Vent (b)

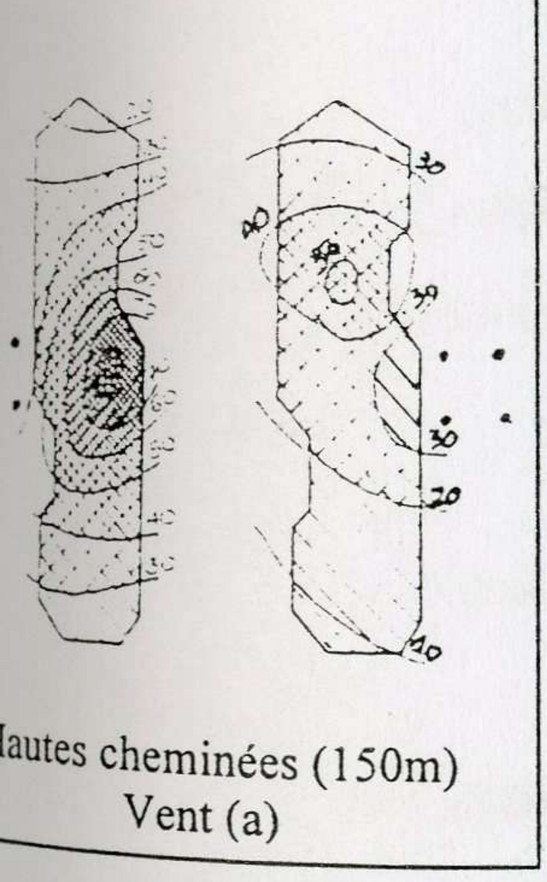


Moyennes cheminées (20m) – Vent (a)

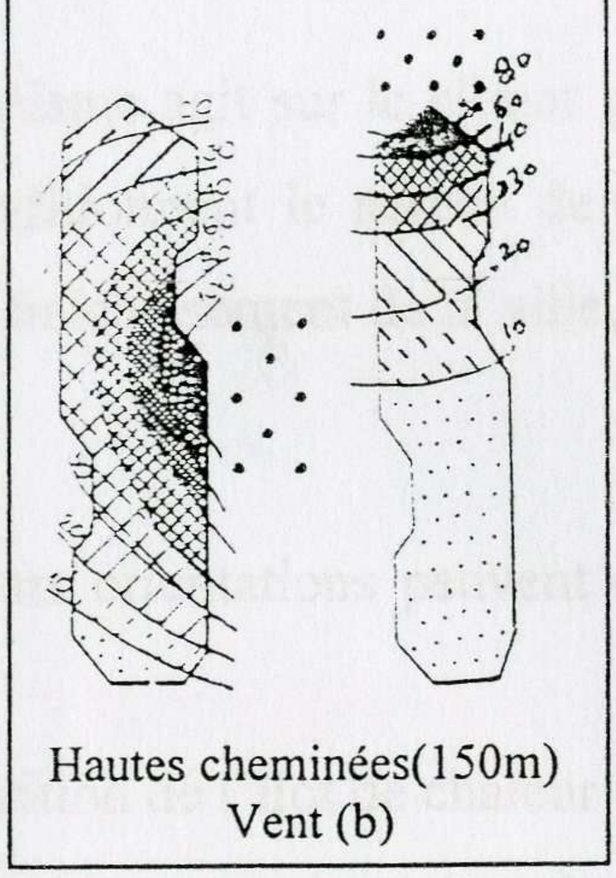


Moyennes cheminées (20m) – Vent (b)

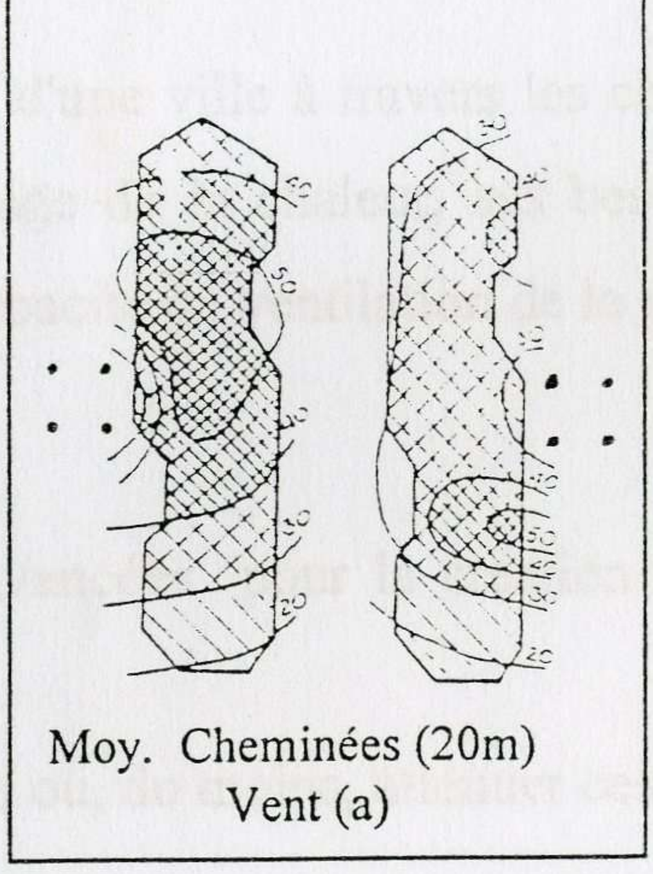
Ville linéaire



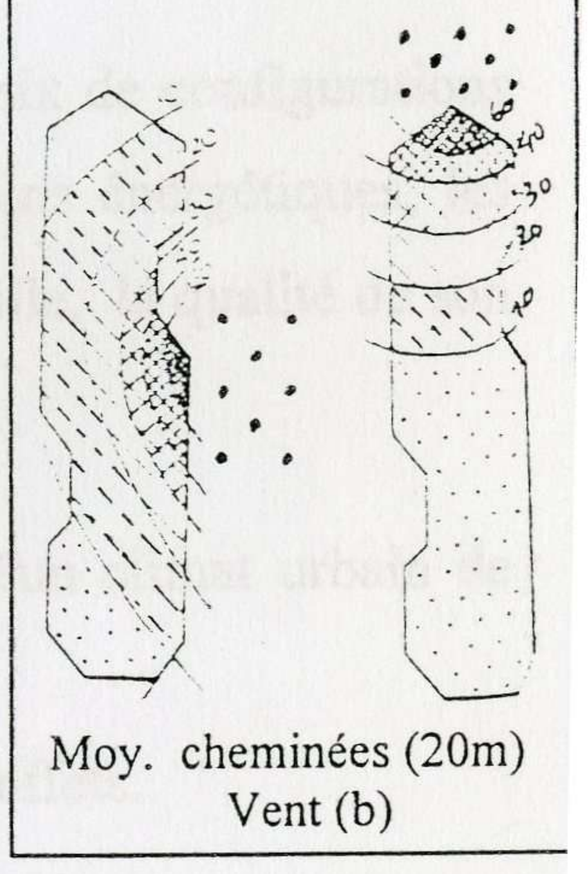
Hautes cheminées (150m) Vent (a)



Hautes cheminées(150m) Vent (b)



Moy. Cheminées (20m) Vent (a)



Moy. cheminées (20m) Vent (b)

Concentrations en $\mu g/m^3$

0 10 20 30 40 50 60 70 80

Figure 4.11 : Exemples de contrôle de la pollution liée aux industries (Nowicki 1988). Les courbes indiquent le taux de pollution dans la ville dû au report des polluants par le vent à partir des sources d'émissions.

Pour la ville concentrique, la situation est plus complexe car dépendant fortement des régimes locaux du vent, et ce pour toutes les localisations d'industries testées. Dans ce cas la projection de deux sites industriels est ici préférable à un site unique.

Par le moyen de ces solutions, la pollution due à l'industrie sur les aires urbaines peut être diminuée à un large pourcentage. Nowicki (1988) estime cette réduction des polluants à 12% si l'analyse en vue de repérer les meilleures localisations est menée dès la première phase de la planification.

4.3 Conclusion

Ce chapitre a permis la compréhension du climat urbain et l'identification de certaines orientations applicables en urbanisme pour maintenir un climat urbain de bonne qualité :

1- Le climat urbain définit les caractéristiques climatiques d'une ville. Il traduit clairement le niveau d'intégration de la dimension climatique dans le projet d'urbanisme dans toutes ses phases. En effet, il peut être considéré comme la manifestation globale des premiers choix d'urbanisme, tout comme il renseigne sur les microclimats urbains rendus visibles par leur cumul. Ainsi, l'urbaniste est en grande partie responsable de ces propriétés et du climat global qui règne en milieu urbain. Il peut de ce fait contribuer à l'améliorer, pour plus de confort, plus d'économies et moins de risques.

2- L'urbanisme agit sur le climat global d'une ville à travers les choix de configurations urbaines qui conditionnent le niveau de stockage de la chaleur, ses besoins énergétiques, les possibilités de rafraîchissement de la ville, sa capacité de ventilation de la ville, la qualité de son air, etc.

3- Plusieurs orientations peuvent être avancées pour la création d'un climat urbain de qualité :

- Eviter l'apparition de l'îlot de chaleur urbain ou, du moins, atténuer ces effets.
- Exploiter judicieusement le régime des vents.
- Réduire la pollution de l'air.

4 - Ces dispositions peuvent trouver des applications aux différentes phases de conception urbaine, aussi bien à l'échelle des plans d'urbanisme relatifs à la planification urbaine qu'à l'échelle de la composition urbaine.

5- Pour la planification urbaine : l'attention est à porter principalement sur le choix du site, l'usage des sols, la végétation et la perméabilité de la ville. A ce stade le vent est élément du climat dominant, la radiation solaire est importante, par contre les autres éléments du climat sont de faible importance, exception faite de certains risques environnementaux tels qu'inondations, tempêtes, etc.

6- Pour la composition urbaine : certains choix faits à cette échelle se répercutent sur le climat global. Ceci est le cas pour la géométrie urbaine, la nature des surfaces ou albédo, et la végétation urbaine. Ces aspects sont régis par des exigences fines de contrôle climatique à savoir : accès au soleil, refroidissement des bâtiments, ventilation dans les espaces extérieurs et intérieurs, etc. Le chapitre 6 étudie plus en détail cette dépendance géométrie urbaine- contrôle climatique qui est à l'origine des dispositions à prendre à l'échelle de la composition urbaine.

Chapitre 5 : Méthodologie d'intégration du climat dans la planification urbaine

5.1 Introduction à la méthodologie proposée

5.1.1 Introduction à la méthodologie globale d'intégration urbaine au climat

La méthodologie que nous proposons pour l'intégration du climat en urbanisme se présente en deux phases ; La première phase concerne la planification urbaine, développée dans le présent chapitre, suivie d'une deuxième phase consacrée à la composition urbaine, détaillée au chapitre 7. Ces deux phases se basent principalement sur la compréhension du climat urbain et des mécanismes de contrôle climatique rapportés à la géométrie du tissu, traités respectivement au chapitres 4 et 6 (Cf. figure 1.3).

Avant de développer la première phase, et pour comprendre la logique de structuration de cette méthodologie dans sa globalité et son contenu, il est important de rappeler quelques informations relatives aux plans d'urbanisme et à certaines démarches déjà proposées par des auteurs soucieux de mettre en œuvre cette adaptation des villes au climat.

L'objectif de ce mémoire est l'élaboration d'une **méthodologie intégrée** dans le processus d'élaboration des plans d'urbanisme. Ceci signifie qu'il est essentiel que les orientations données, pour réaliser cette adaptation, soient compatibles avec le contenu des plans d'urbanisme, tel que fixé par la réglementation et respectant la démarche adoptée traditionnellement par l'urbaniste pour élaborer ces plans. Pour cela, nous rappelons, d'abord, les différents plans d'urbanisme et leur relation aux autres plans d'aménagement en amont.

D'une manière générale, les plans d'urbanisme se divisent en 2 grandes échelles : l'échelle des plans directeurs d'urbanisme, qui régissent la planification de la ville, et l'échelle des plans d'occupation des sols, qui régissent la composition géométrique du tissu urbain (1). Ceux-ci succèdent à des plans d'aménagement régionaux et nationaux (2), lesquels déterminent à un niveau global les stratégies d'aménagement du territoire, l'armature urbaine supérieure, l'articulation des établissements humains, et leur développement par rapport à des considérations démographiques, socio-économiques, etc. (Figure 5.1).

Le domaine de l'aménagement du territoire semble peu significatif en matière d'adaptation au climat, alors que le domaine de l'urbanisme est, à tous les niveaux, impliqué. En effet, la distribution des villes à l'échelle régionale montre que l'influence du climat de la région n'est pas déterminante, car de nombreuses villes existent dans des climats peu favorables au confort. A l'échelle régionale, c'est surtout la présence d'eau et la qualité des sols par rapport à des préoccupations d'agriculture qui président aux choix d'établissements humains (Lyons 1986).

---

(1) En Algérie, ces plans correspondent respectivement aux P.D.A.U : plan directeur d'aménagement et d'urbanisme et P.O.S : plan d'occupation des sols (Cf. loi 90.29 du 1décembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme.

(2) En Algérie : schéma régional d'aménagement du territoire : S.R.A.T. et schéma national d'aménagement du territoire : S.N.A.T. (Cf. Loi n° 87-03 du 27 janvier 1987 relative à l'aménagement du territoire).

Aménagement du territoire

Etape 1

S.N.A.T

Schéma National d'Aménagement du Territoire

Instrument stratégique qui a pour objectif de donner des orientations en matière de développement des régions et des établissements urbains, de contrôle de l'armature urbaine supérieure et des mouvements de populations.

Il Fixe la démarche et les objectifs prospectifs fondamentaux des rééquilibrages démographiques socio-économiques nécessaires et la gestion des ressources notamment agricoles et énergétiques.

Il définit les moyens de mise en œuvre de ces objectifs (grandes infrastructures, création de villes, etc.)

Etape 2

S.R.A.T

Schéma Régional d'Aménagement du Territoire

Il a pour but de traduire à un niveau régional les grandes orientations du S.N.A.T. C'est un outil de personnalisation et d'application de ces orientations (Equilibres démographiques et socio-économiques inter-régionaux, utilisation des ressources, armature urbaine régionale, etc.)

Urbanisme

Etape 3

P.D.A.U

Plan Directeur d'Aménagement du Territoire

Il fixe :

- Destination générale des sols
- Extension des établissements humains
- Localisation des services st des activités
- Nature et localisation des grands équipements et infrastructures
- Les quatre (04) secteurs : urbanisé, à urbaniser, d'urbanisation future, et non urbanisable.

Etape 4

P.O.S

Plan d'Occupation du Sols

1. Fixer de façon détaillée la forme urbaine, son organisation, les droits de construction et l'utilisation des sols.
2. Définir la quantité minimale et maximale de constructions autorisées et les types de constructions et leur usage.
3. Délimiter l'espace public, les espaces verts, les emplacements réservés aux ouvrages publics et installations d'intérêt général, ainsi que les tracés et les caractéristiques des voies de

Source : J.O, loi 89-29 relative à l'aménagement et l'urbanisme

Figure 5.1 : Logique de structuration des schémas d'aménagement du territoire et de l'urbanisme; Cas de l'Algérie.

Par conséquent, l'intégration du climat en urbanisme commence avec la planification urbaine. En Algérie elle se traduit par le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (P.D.A.U) élaboré aux échelles du 1/20 000 au 1/5 000 environ, et se poursuit avec la composition urbaine matérialisée par les plans d'occupation des sols (P.O.S) élaborés aux échelles du 1/2000 à 1/500.

Bien que complémentaires et interdépendants, la distinction entre ces deux instruments d'urbanisme est nécessaire car les actions à mener en matière de conception climatique dans l'une et l'autre de ces échelles diffèrent, car dépendant des effets du climat, eux aussi soumis à des critères d'échelle. La conception du plan directeur d'urbanisme doit être rapportée à la nécessité de créer un climat urbain global favorable, tandis que le plan d'occupation des sols vise le contrôle climatique à un niveau plus détaillé qui tient compte des objectifs de contrôle climatique, tels que : accès au soleil, ventilation des espaces urbains, etc.

Ceci a d'ailleurs été relevé au chapitre 3 qui a permis de différencier entre climat local, et microclimat ; De même qu'au chapitre 4 lors de l'étude du climat urbain où il a été montré que la ville, elle-même, crée un climat particulier qui dépend des choix globaux de son aménagement. La configuration géométrique est certes, une composante essentielle de ces choix mais son importance réside surtout dans le contrôle des microclimats urbains, tel que le suggère la mise en application de l'architecture bioclimatique en site urbain. C'est ce qui explique l'organisation de cette méthodologie en deux phases tel que cela a été annoncé précédemment.

D'autre part, pour élaborer cette méthodologie, il est intéressant de rappeler quelques-unes des démarches proposées par certains des auteurs qui ont engagé le débat sur la nécessité d'une conception climatique de la ville ; Elles sont résumées dans le tableau 5.1.

Ces démarches présentent un intérêt certain dans l'identification des niveaux d'action principaux en urbanisme et fournissent quelques recommandations de projection.

Golany (1996) énonce dans leurs grandes lignes les étapes à suivre dans la planification urbaine. Givoni (1989) quant à lui insiste sur les aspects géométriques du tissu liés au contrôle climatique de plus grand détail. Bitan (1988 et 1992) met en avant le caractère progressif de la démarche à suivre et identifie certains des composantes urbaines pouvant être affectés par le climat.

Toutefois, ces propositions présentent quelques inconvénients, qui rendent leur mise en application difficile :

1. Les objectifs de contrôle climatique (réduction de l'îlot de chaleur et de la pollution, l'accès au soleil, l'ombrage des espaces, l'abri du vent, etc.) et les niveaux d'intervention (Site de la ville, rues périphériques, orientation des rues, largeur des rues, gabarits, densités, etc.) sont quelquefois confondus. Or la première est la condition que doit satisfaire l'entité urbaine, tandis que la seconde concerne les paramètres sur lesquels il faut intervenir. Les étapes à définir doivent lier entre l'un et l'autre, à savoir l'objectif climatique et le paramètre urbain à considérer, soit : quels sont les critères de projection des rues périphériques pour une exposition ou protection des vents, quelle est la localisation préférentielle des industries pour prévenir de la pollution, comment concevoir les espaces verts ou les bâtiments pour satisfaire ces objectifs d'ombrage, d'accès au soleil ou de ventilation, etc.

2. Les mécanismes qui régissent le comportement climatique d'un tissu urbain ne sont pas toujours précisés pour permettre d'établir des critères d'évaluation d'un choix formel. La description du tissu urbain est faite de manière conventionnelle (densité, gabarits, etc.). Ceci ne donne que peu d'indications sur le moyen d'évaluer la performance des choix de géométrie, or celui-ci doit être décrit dans sa relation aux objectifs de contrôle du climat à savoir identifier avec précision les paramètres urbains responsables dans tel ou tel autre processus environnemental. Autrement dit quels sont les paramètres géométriques qui régissent le contrôle de l'accès au soleil, la ventilation dans les rues et dans les bâtiments, le captage de l'énergie dans les bâtiments et, la conservation de chaleur, etc.

C'est pour cela que nous avons privilégié une démarche qui lie directement les aspects à considérer (paramètres décrivant la ville) avec les effets attendus (climat urbain et contrôle climatique) c'est-à-dire qui identifie les paramètres à considérer tout en les rapportant à leur capacité de créer un climat urbain favorable et des conditions microclimatiques favorables pour une étape ultérieure de conception.

Ainsi, il a été retenu de présenter les orientations sous une forme conceptualisée qui consiste à grouper les connaissances par niveau d'action significatif ou concept en mettant en avant les critères d'évaluation de la performance climatique dans chaque cas afin de donner à cette méthodologie un caractère généralisable, permettant son application dans toute action d'urbanisme. Enfin, cette démarche a été préférée à celle plus classique qui consiste à présenter des solutions définitives précises, d'intérêt limité, car ne pouvant être étendues à des situations différentes.

1. Les objectifs de contrôle climatique (réduction de l'îlot de chaleur et de la pollution, l'accès au soleil, l'ombrage des espaces, l'abri du vent, etc.) et les niveaux d'intervention (Site de la ville, rues périphériques, orientation des rues, largeur des rues, gabarits, densités, etc.) sont quelquefois confondus. Or la première est la condition que doit satisfaire l'entité urbaine, tandis que la seconde concerne les paramètres sur lesquels il faut intervenir. Les étapes à définir doivent lier entre l'un et l'autre, à savoir l'objectif climatique et le paramètre urbain à considérer, soit : quels sont les critères de projection des rues périphériques pour une exposition ou protection des vents, quelle est la localisation préférentielle des industries pour prévenir de la pollution, comment concevoir les espaces verts ou les bâtiments pour satisfaire ces objectifs d'ombrage, d'accès au soleil ou de ventilation, etc.

2. Les mécanismes qui régissent le comportement climatique d'un tissu urbain ne sont pas toujours précisés pour permettre d'établir des critères d'évaluation d'un choix formel. La description du tissu urbain est faite de manière conventionnelle (densité, gabarits, etc.). Ceci ne donne que peu d'indications sur le moyen d'évaluer la performance des choix de géométrie, or celui-ci doit être décrit dans sa relation aux objectifs de contrôle du climat à savoir identifier avec précision les paramètres urbains responsables dans tel ou tel autre processus environnemental. Autrement dit quels sont les paramètres géométriques qui régissent le contrôle de l'accès au soleil, la ventilation dans les rues et dans les bâtiments, le captage de l'énergie dans les bâtiments et, la conservation de chaleur, etc.

C'est pour cela que nous avons privilégié une démarche qui lie directement les aspects à considérer (paramètres décrivant la ville) avec les effets attendus (climat urbain et contrôle climatique) c'est-à-dire qui identifie les paramètres à considérer tout en les rapportant à leur capacité de créer un climat urbain favorable et des conditions microclimatiques favorables pour une étape ultérieure de conception.

Ainsi, il a été retenu de présenter les orientations sous une forme conceptualisée qui consiste à grouper les connaissances par niveau d'action significatif ou concept en mettant en avant les critères d'évaluation de la performance climatique dans chaque cas afin de donner à cette méthodologie un caractère généralisable, permettant son application dans toute action d'urbanisme. Enfin, cette démarche a été préférée à celle plus classique qui consiste à présenter des solutions définitives précises, d'intérêt limité, car ne pouvant être étendues à des situations différentes.

5.1.2 Introduction à la méthodologie appliquée à la planification urbaine

Le P.D.A.U est un instrument d'urbanisme qui fixe les dispositions à prendre pour l'implantation et le développement de l'établissement urbain ; Il fournit les conditions favorables à l'implantation et la croissance d'une ville. Il comprend un règlement d'urbanisme, des documents graphiques et un rapport d'orientation (1).

Les objectifs du P.D.A.U sont fixés par le texte officiel comme suit :

- Destination générale des sols
- Extension des établissements humains
- Localisation des services et des activités
- Nature et localisation des grands équipements et infrastructures
- Les quatre (04) secteurs : urbanisé, à urbaniser, d'urbanisation future, et non urbanisable.

Chacun de ces objectifs peut être influencé par des considérations climatiques. Toutefois, il est à noter qu'à ce niveau les directives législatives demeurent générales, aucune allusion n'est encore faite à la configuration urbaine.

L'analyse présentée aux chapitres précédents 3 et 4 a permis de dégager les orientations premières dans la projection d'une ville. Les étapes à suivre pour la considération du climat à l'échelle de la planification urbaine sont basées principalement sur les objectifs suivants :

1. Une meilleure connaissance du climat régional et local, et la compréhension du rôle des facteurs de l'environnement dans la modification du climat local, ceux-ci vont avoir un impact décisif sur le choix du site de la ville et l'affectation des sols.
2. Eviter ou réduire l'îlot de chaleur urbain est l'une des conditions fondamentales pour garantir un climat urbain favorable ; ce contrôle peut se faire en réduisant le stockage dans les bâtiments, en réduisant la demande énergétique dans les bâtiments et par la limitation de la circulation urbaine. Egalement le climat de la ville peut être amélioré en permettant une ventilation suffisante, en réduisant les émissions de polluants et en contrôlant leur dispersion, en rétablissant l'équilibre hydrologique par le biais de la végétation, etc.

(1) J.O, loi 90-29 du 1er décembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme.

Ces recommandations ont été groupées sous forme d'actions et concepts de manière à suivre l'évolution de la conception (Figure 5.1b). Elles peuvent être groupées an 3 groupes : la connaissance du site, les premières dispositions de planification et enfin l'amorce des dispositions de composition urbaine. Ces étapes sont comme suit :

1- **Contexte climatique** rassemble toute l'information nécessaire à la compréhension des mécanismes de formation du climat local dont les plus importants sont les modifications dues aux facteurs de l'environnement, Cette étape est importante pour définir la meilleure localisation ou site de la ville, et pour exploiter au mieux les spécificités climatiques locales dans l'affectation des sols.
2- **Localisation de la ville** consiste à définir le meilleur site d'implantation d'une ville pour garantir un bon potentiel climatique et pour éviter les risques. Ce choix est fortement dépendant de la connaissance du climat assurée par l'étape 1.
3- **Perméabilité de la ville** La perméabilité est un concept clé qui a pour objectif de favoriser la ventilation globale de la ville, dans le but de contrôler les températures urbaines dont l'I.C.U. est la manifestation ultime et maintenir de cette manière une continuité entre milieu urbain et milieu naturel.
4- **Usage des sols : ségrégation/intégration** L'usage des sols est une étape décisive dans la localisation des différentes activités urbaines. Elle se base sur le concept alternatif de ségrégation /intégration de ces activités, en particulier industries et habitat, selon leurs exigences par rapport au climat.
5- **Paysagisme :** L'aménagement végétal regroupe l'ensemble des critères paysagers que l'urbaniste peut utiliser pour améliorer le climat urbain en atténuant les effets de l'I.C.U. par l'apport de chaleur latente.
6- **Configuration urbaine :** Cette étape rappelle l'importance que joue la géométrie urbaine dans la garantie de bonnes conditions climatiques en milieu urbain et annonce la deuxième phase de cette méthodologie.

Créer un climat urbain favorable

1/Bonne connaissance du climat régional et local

2/ Eviter ou limiter l'apparition de l'îlot de chaleur urbain :

Réduire le stockage dans les bâtiments

Réduire la demande énergétique dans les bâtiments

Limiter la circulation urbaine.

Augmenter la chaleur latente par la végétation

3/ Exploiter le régime des vents :

Ventilation globale da ville pour dissiper l'îlot de chaleur

4/Réduire la pollution :

Réduction des émissions (des bâtiments et circulation) et de leur dispersion

Contrôle de la localisation des industries

Niveaux d'actions et concepts définis pour la planification urbaine

1/ Connaissance du site

Contexte climatique

Détermination du climat régional et local

Localisation de la ville

Choix du site/potentiel énergétique et protection des risques liés au climat

2/ Premiers choix urbanistiques liés à la planification

Perméabilité de la ville

Ventilation globale dans la ville pour contrôler pour dissiper l'îlot de chaleur

Usage des sols :
Ségrégation- Intégration

Définition de l'emplacement des industries, habitat et infrastructure

Paysagisme

Usage de la végétation pour rétablir l'équilibre hydrologique et réduire l'îlot de chaleur

3/ Phase de la composition urbaine

Configuration urbaine

Géométrie de la ville dépendant du contrôle climatique (phase ultérieure)

Figure 5.1 b : Actions et concepts proposées pour l'intégration du climat dans la planification urbaine

5.2 Contexte climatique

Toute volonté d'intégrer le climat dans un projet d'urbanisme nécessite, au préalable, une connaissance du climat régional. Ceci permet d'identifier les problèmes majeurs liés aux principales caractéristiques du climat en question. Ces différences ont été bien établies pour l'usage de l'architecture bioclimatique (Cf. Koenigsberger et al 1973, Givoni 1968,1992, Golany 1996, etc.).

Le tableau 5.2 présente la relation qui existe entre les données climatiques d'une région et les exigences globales auxquelles doit répondre une ville. Il apparaît nettement que pour deux climats différents, les exigences sont différentes, parfois opposées. Ceci est d'autant plus important que ces différences induisent une prise en charge dès la première étape de conception qui consiste à choisir le meilleur site d'implantation de la ville.

C'est ainsi que l'on remarque, par exemple, qu'un climat chaud et sec exige en priorité la protection contre la forte chaleur, et le contrôle des fortes amplitudes journalières et saisonnières qui le caractérisent. Le vent étant généralement faible et chaud dans la journée, parfois porteur de sable, il est recommandé de s'en protéger la journée et de l'exploiter la nuit, car plus frais, pour dissiper la forte chaleur emmagasinée durant la journée. Par contre, dans un climat chaud et humide, la situation d'inconfort est liée principalement à la chaleur associée au fort taux d'humidité qui requiert l'exploitation du vent pour rétablir le confort.

5.2.1 Détermination du climat local

L'information de niveau régional est, sans doute, nécessaire mais elle n'est pas suffisante, car nous savons, suite à l'analyse de la relation Climat - Environnement au chapitre 3, qu'il est important de considérer une échelle locale du climat si l'intégration des projets d'urbanisme est souhaitée. Le climat régional peut inclure plusieurs climats locaux. Ces variations climatiques locales sont dues aux effets modifiants des facteurs de l'environnement (Escourrou 1983, Koenigsberger *et al* 1973).

Pour cela le relief a été identifié comme étant le facteur de l'environnement le plus déterminant dans ces modifications climatiques locales. Ainsi, l'altitude, l'exposition, l'orientation des pentes, la présence de collines et de vallées, sont tous des éléments qui modifient les quantités de radiation solaire reçue, les valeurs et variations des températures, de la

vitesse et direction des vents, etc. (Cf. 3.4.1). Il est donc recommandé de tenir compte de ces variations et d'affiner l'information climatique régionale.

L'évaluation qualitative de ces changements est relativement bien connue (Cf. Tableau 3.2) ; Toutefois plusieurs difficultés entravent l'évaluation quantitative de ces variations. Elles se résument comme suit :

1. Les données climatiques locales ne peuvent être obtenues directement par une station météorologique car celle-ci fournit des données régionales (Escourrou 1983). Il est, également, difficile dans la pratique d'envisager systématiquement des mesures spécifiques à un site. La méthode acceptée (Koenigsberger *et al* 1973) est de démarrer avec des données climatiques régionales et d'émettre des estimations sur les changements dus aux variations géographiques et topographiques et d'opérer ensuite les modifications nécessaires.

2. Le choix des données régionales de départ doit être judicieux car les adaptations faites sur leur base peuvent s'avérer erronées dans le cas d'un mauvais choix de station. Escourrou (1983) estime que ce n'est pas obligatoirement la station la plus proche qu'il faut considérer mais celle qui possède les aspects les plus semblables avec le site d'étude, en particulier, topographiques.

L'objectif devient ainsi, l'élaboration de cartes topoclimatiques. Pour cela, il est nécessaire de recourir à des méthodes fiables pour évaluer ces modifications. Plusieurs méthodes peuvent être citées à ce sujet. Certaines d'entre elles sont puisées dans des cas réels, et qui sont développés plus loin.

1. Resserrer le réseau des stations météorologiques est la solution la plus évidente pour résoudre durablement ce problème. Cette recommandation déjà avancée par Geiger (1965) est souvent reprise actuellement. Toutefois, elle peut être entravée par des considérations de coûts. Cependant, Geiger (1965) avance que si la maille est plus petite, la durée d'observation peut être réduite pour maintenir des coûts raisonnables. Cette solution présente l'avantage de fournir régulièrement une information climatique utile pour le suivi du développement urbain de la ville à bâtir, mais peut aussi servir plusieurs établissements urbains environnants existants ou à créer.

Tableau 5.2 : les principales régions climatiques et les réponses urbaines de base (D'après Golany, 1996)

Principaux Climats	Profil	Problèmes majeurs	Orientations de base pour la conception urbaine	Forme urbaine préférentielle
Chaud - humide (zone Equatoriale)	Chaleur diurne et saisonnière. Faible amplitude des températures. Fortes pluies meilleur confort à des hautes élévations	Chaleur excessive Grande humidité	– Ventilation : extrémités ouvertes et forme dispersée. – Rues largement ouvertes pour soutenir le mouvement du vent. – Ombrage étendu. – Dispersion des constructions de grande hauteur pour soutenir la ventilation. – Variation combinée des hauteurs des bâtiments. – Espaces verts vastes mais ombragés. – Ombrage, zones plantées d'arbres.	Forme dispersée avec des extrémités ouvertes pour soutenir la ventilation.
Froid - Humide (Nord des Etats Unis d'Amérique et Sud Canada)	Neigeux Venteux Blizzard Nuits très froides	Basse température, fortes précipitations en été et en hiver. Venteux.	– Chauffage (passif et actif). – Mélange de formes ouvertes et fermées. – Lisières protégées en hiver face au vent (avec des structures ou des arbres). – Hauteurs de constructions uniformisées. – Espaces verts moyennement dispersés. – Rangées d'arbres en circonférence et aux intersections.	Combinaison de formes ouvertes et de formes compactes.
Chaud - Sec (Moyen - orient et Afrique du Nord)	Radiation solaire intense. Grande amplitudes de températures entre le jour et la nuit. Tempêtes de sable. Pluies torrentielles jours de nuages bas des hydratation intense. Haute salinisation. Evaporation excédant les précipitations	Sécheresse excessive, combinée à des jours de températures élevées. Poussiéreux et orageux.	– Formes compactes. – Ombrage. – Refroidissement par évaporation. – Limites des villes protégées des vents chauds. – Situation dans la direction du vent prés d'un plan d'eau. – Rues de quartiers étroites et sinueuses. – Variation des hauteurs des bâtiments pour ombrager la ville. – Espaces verts publics petits, dispersés et protégés. – Zones d'arbres en bordure et aux intersections. – Utilisation du concept géo-espace de la ville.	Forme compacte.

Suite tableau 5.2

Principaux climats	Profil	Problèmes majeurs	Orientations de base pour la conception urbaine		Forme urbaine préférentielle
Froid - Sec (Plateaux de l'intérieur)	Stressant et désagréable Vent fort froid et sec	Température basse associée à la sécheresse. Vent provoquant un stress	– Formes compactes et groupées : – Lisières urbaines protégées. – Rues de quartiers sinueuses et étroites. – Hauteurs uniformes dans la ville. – Espaces verts publics, petits, dispersés et protégés. – Zones d'arbres en bordure et aux intersections. – Utilisation du concept geo-espace de a vile.		Formes compactés et groupées.
Côtier (Côtes désertes)	Venteux et orageux. Système de brise. Haute humidité. érosif.	Humidité élevée venteux.	• *Dans les régions humides :* – Forme modérèrement dispersée. – Extrémités de la ville ouvertes. – Rues larges perpendiculaires au rivage pour recevoir la brise. – Dispersion des constructions de grande hauteur pour recevoir la ventilation. – Variété dans les hauteurs des constructions. – Espaces verts larges. – Ombrage, zones d'arbres planifiées.	• *Dans les régions arides :* – Ouverte vers la mer, compacte et protégée vers l'intérieur. – Construction de grand hauteur avec des constructions de basse hauteur. – Espaces verts petits et protégés. – Ombrage, zones d'arbres planifiées.	• Dans les régions humides : forme modérément dispersée. • Dans les régions aides : protection vers l'intérieur.
Pentes montagneuses (Hautes et basses pentes)	Venteux et circulation de l'air accrue. Humidité relative plus élevée que le bas-pays climat sain et modéré met en valeur une vue agréable	Venteux	Formes semi compactes : – Mélange du compact et du dispersé. – Favoriser l'horizontalité et les allées pour mettre en valeur les rues. – Constructions de basses hauteurs. – Espaces verts petits et dispersés. – Zones d'arbres protégées, qui ne causent pas d'obstructions. – Utilisation du concept, geo-espace.		Forme semi-compacte mélange entre la compacité et la dispersion du bâti.

2. Dans le même sens, l'exploitation des stations d'agrométéorologie est intéressante. La maille de ces réseaux, lorsqu'ils existent, est beaucoup plus petite, étant donné la grande précision requise dans le domaine agricole en matière de microclimats. En France par exemple, la maille des stations météorologiques étant de 60 km, mais il existe un poste de mesures thermométriques tous les trente kilomètres environs ; cette densité permet de se rapprocher de l'échelle du topoclimat et de réaliser des études climatologiques fines (Choisnel et Payen 1988). Celles-ci peuvent être exploitées pour l'urbanisme.
3. Travailler en collaboration avec des spécialistes en climatologie pour estimer ces modifications (Bitan 1988, 1992), car l'expérience du climatologiste est ici très utile pour pallier le manque habituel de temps pour l'investigation climatique.
4. Stations de mesures mobiles : Des mesures sur site sont parfois menées lorsque le projet de ville est très important et la durée d'analyse suffisamment longue. Toutefois cette méthode est relativement peu répandue car coûteuse.
5. Des méthodes plus sophistiquées sont parfois utilisées en climatologie urbaine : thermographie infrarouge, modèles statistiques, modèles de digitalisation orographique, etc. (Baumüller et Reuter 1992,1996 ; Baumüller *et al* 1993). Ces outils permettent une connaissance très précise des propriétés climatiques locales d'un site.

Les cartes topoclimatiques de base doivent présenter au minimum les cinq zones suivantes (Geiger 1965) :

- Les zones assimilables au climat régional données par la station météorologique.
- Les zones aux caractéristiques favorables (ex : bon ensoleillement)
- Les zones aux meilleures potentialités climatiques.
- Les zones défavorables (Ex : vents gênants)
- Les zones présentant de grands risques (ex : inondables).

Il convient de mentionner qu'à l'échelle de la planification urbaine, les éléments du climat déterminants à considérer à l'échelle locale sont :

1. Les phénomènes climatiques présentant des risques, tel que fortes précipitations, vents forts.
2. Le vent, la radiation solaire, et les températures sont les éléments les plus déterminants.

Il est important d'identifier les caractéristiques suivantes du vent :

- Direction, vitesse et fréquence des vents dominants durant toute l'année.
- Nature des vents : chauds, froids, vents de sable, vents exceptionnels.
- Vents locaux : brise de campagne, de mer, de terre, de vallées et de collines.

La radiation solaire et les températures sont également importantes, et dépendent fortement de la pente du site et de son orientation. Les autres éléments du climat sont moins importants à ce niveau de la conception mais interviennent déjà dans la définition des caractéristiques du climat régional.

5.2.2 Cas de la ville de Stuttgart

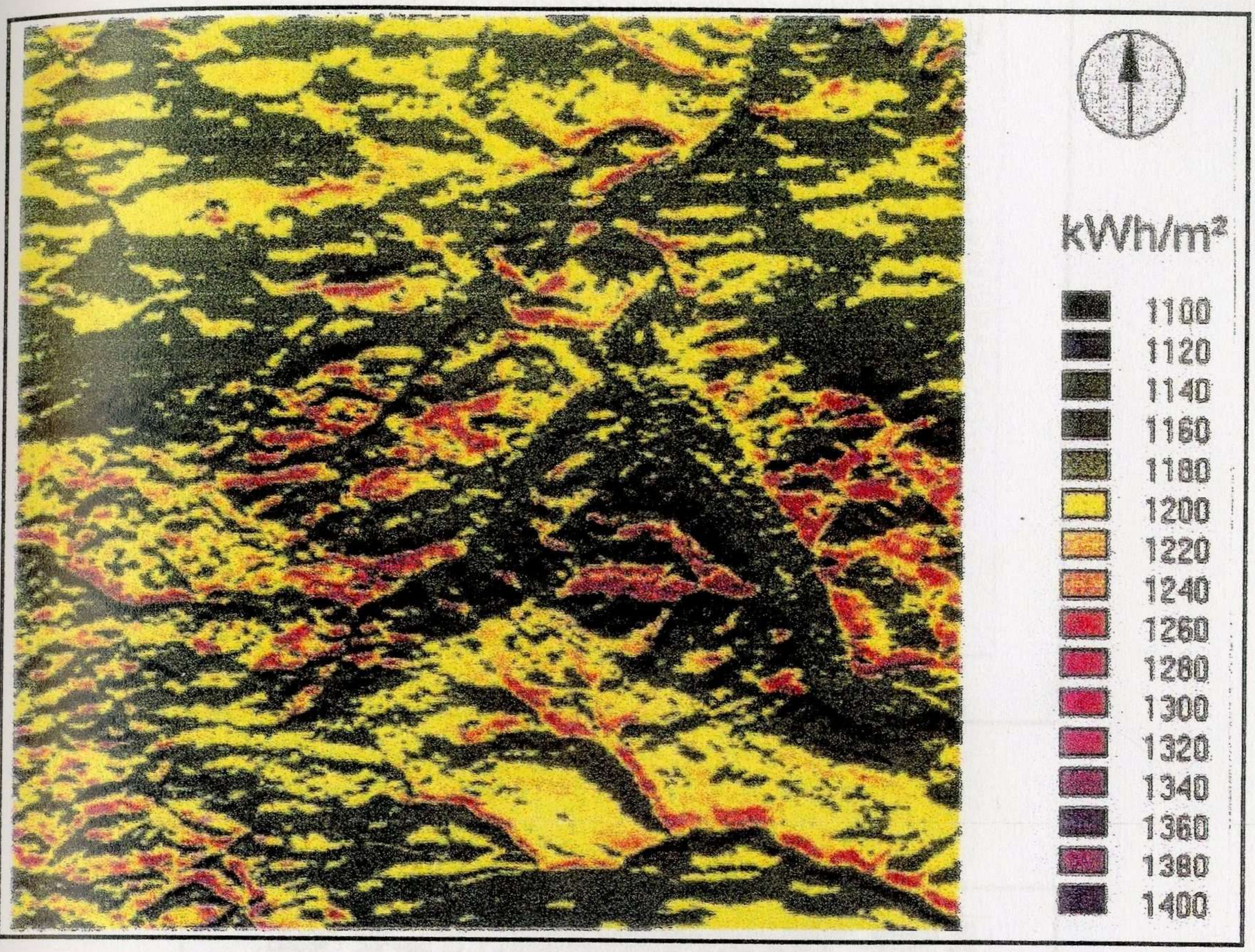
L'exemple de Stuttgart, Allemagne, est probablement unique dans sa démarche systématique de considérer le climat dans la planification urbaine. Cette ville industrielle, connaît de graves problèmes de pollution, dus principalement à sa situation enclavée dans une vallée, caractérisée par un vent régional très faible et des inversions thermiques fréquentes. La ventilation est dépendante principalement des vents locaux faibles et variables.

Ceci a conduit depuis plusieurs décennies à mener des recherches approfondies sur le moyen d'améliorer la qualité de l'air et du climat en favorisant une collaboration étroite des services de climatologie (Baumüller 1986). Le département de climatologie a pour rôle de planifier, mesurer, interpréter les résultats et conseiller les urbanistes en matière de climat dans la planification urbaine (Baumüller et Reuter 1992).

Des études climatiques extensives sont entreprises ; plusieurs cartes de base sont réalisées (carte donnant l'intensité et la distribution de la radiation solaire, les températures moyennes et extrêmes, les directions et vitesses des vents, la teneur de l'air en polluants, etc.). Le but est d'élaborer une carte d'analyse climatique de la région et une carte de recommandations pour la planification urbaine aux échelles : 1/100000 et 1/20000. Actuellement toute cette information est rassemblée dans un document de référence, à savoir un atlas climatologique couvrant la ville de Stuttgart et son voisinage (Cf. Baumüller et al 1993).

La figure 5.2 présente le relief (c) et le plan de distribution de la radiation solaire et des vents (a et b) à Stuttgart. Il convient de mentionner ici, les fortes similitudes entre ces cartes, qui illustrent la dépendance des différents éléments du climat par rapport aux propriétés du relief : pentes, orientation /soleil etc. discutée précédemment.

La figure 5.3 présente la carte climatique globale qui montre une classification par zones aux caractéristiques climatiques spécifiques, le flux d'air froid, les plans d'eau, les vents régionaux, les vents locaux, les sources de pollution ponctuelles et linéaires (routes), etc.

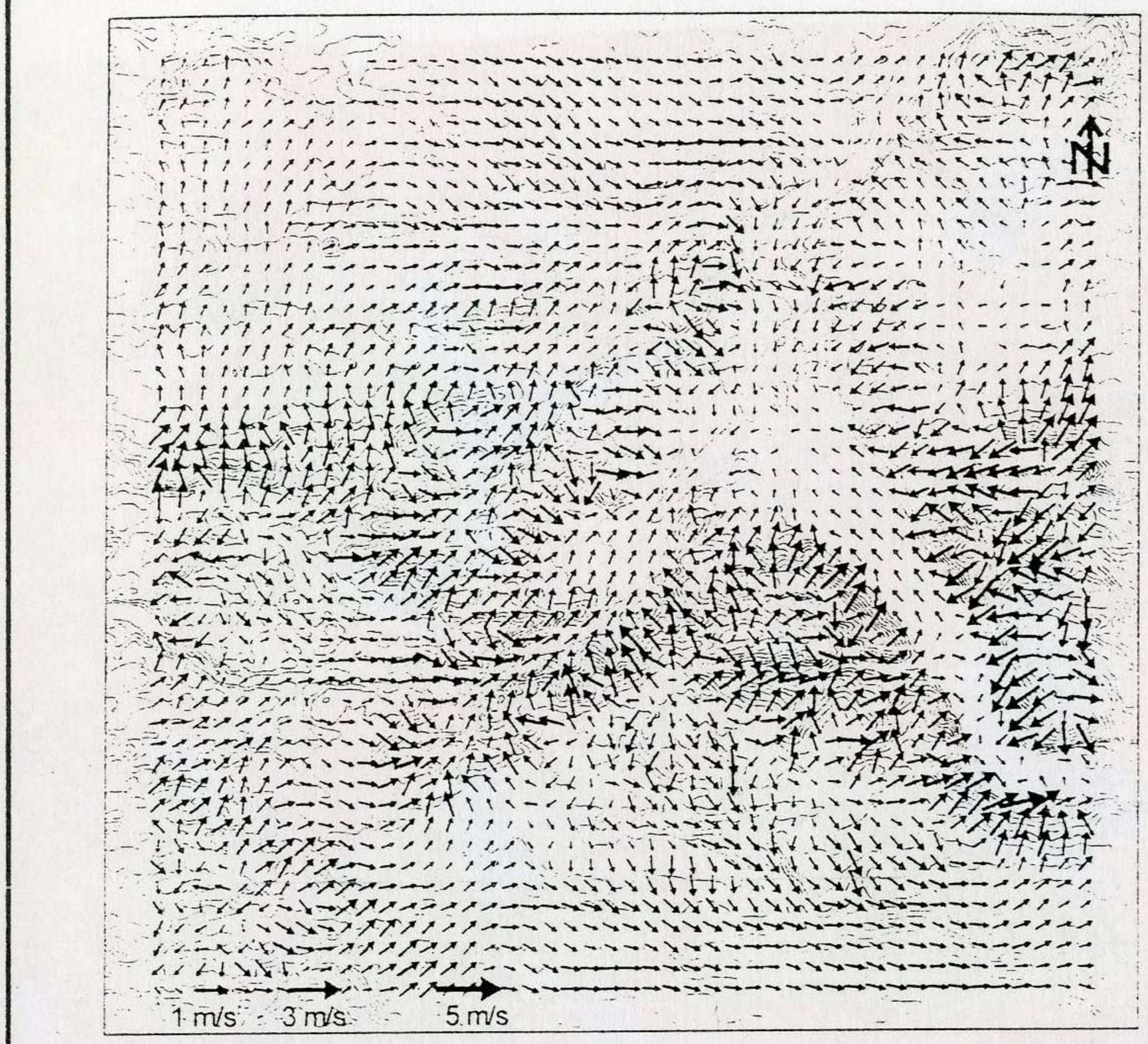


(a) Distribution de la radiation solaire.

Figure 5.2 : Cartes climatiques de base, Stuttgart (Baumüller *et al* 1993).
(a) Distribution de la radiation solaire.
(b) régime des vents (page suivante)
(c) Relief de la région de Stuttgart (page suivante)

Cet exemple illustre la manière d'élaborer des cartes de planification urbaine qui intègrent la dimension climatique grâce à l'élaboration de cartes climatiques pour toute la zone urbaine.

Ces cartes permettent de préciser les climats locaux et mieux orienter le développement de la ville sur la base de ces particularités climatiques locales



(b) régime des vents

(c)Relief de la région de Stuttgart.

Figure 5.2 : Cartes climatiques de base, Stuttgart (suite).

Légende à la page suivante

Figure 5.3 : Carte climatique faisant la synthèse des propriétés climatique et de la qualité de l'air dans la ville de Stuttgart. Cette synthèse sert de base à l'établissement de recommandations pour la planification urbaine (Baumuller *et al* 1993).

Légende de la figure 5.3

Climax

Au niveau des eaux :
Compensation thermique
Grande humidité
Ouvert aux vents

En plein champ :
Cours journalier de température et d'humidité.
Particulièrement calme
Ouvert aux vents
Production d'air frais et froid

Dans les forêts :
Cours journalier de température et d'humidité très modéré
Production d'air frais et froid
Fonction de filtre

Dans îlot de verdure :
Cours journalier marqué de température et d'humidité
Surfaces de compensation thermique en milieu construit

Dans les cités jardins :
Influence minime sur les températures, l'humidité et le vent.

Dans les banlieues :
Grande influence de température, d'humidité, et de vent
Perturbations locales des systèmes venteux

Dans la ville :
Grands changements de tous les éléments climatiques par rapport au milieu rural
Formation d'îlot de chaleur
Air fortement pollué

Centre ville :
Intenses effets d'îlots de chaleur
Peu d'humidité
Forte perturbation des vents régionaux
Echange problématique d'air
Air fortement pollué

Zones d'activités commerciales :
Grands changements de tous les éléments climatiques
Formation d'îlots de chaleur
Parfois grande pollution de l'air

Zones d'industrie :
Effets d'îlot de chaleur intensifs
En partie, grande pollution des vents régionaux
Echange d'air problématique
Grande pollution de l'air (Significatif pour les grandes surfaces)

Sur installations ferroviaires :
Cours journalier de températures extrêmes, sec
Ouverture aux vents
Passage d'air

Zones d'air froid, Particularités du relief

Zone d'entrée d'air frais et froid

Zone de rassemblement d'air froid : rassemblement d'air froid dans profondeurs relatives, couloirs de transport d'air froid.

Refoulement d'air froid, cumul d'air froid à travers les bâtiments, les barrages, et les forêts.

Rétrécissement de vallée, obstacle au courant atmosphérique.

Echanges d'air

Courant descendant : fin de l'air froid sur l'étendue.

Régime de vents de montagne ou de vallée : courant intensif d'air frais.

Voie d'air libre : vallée, anticlinal

Voie d'air (polluée)
Emission dans vallée et anticlinal

Pollution d'air, Emission

Fortement pollué

Pollution moyenne

Pollution minime

Aucune valeur mesurée

Zone de brouillard

Zone de brouillard, interdite.

Pollution par émissions de transport

Rue à charge de circulation extrême : gêne extrême par rai et bruits.

Rue à très grande circulation : très grande gêne par air et bruits.

Rue à grande circulation : grande gêne par air et bruits.

Pictogramme

Habitations : présence relativement élevée d'incendies domestiques.

Circulation (automobile) relativement Elevée dans la zone.

Commerces : Emissions relativement importante de polluants.

Industries : Emission relativement importante de polluants avec charges agissantes dans grandes surfaces.

Fouilles (carrières, carrières de graviers, briqueteries) : Pollution par poussière.

Grandes charges de pollution dans les régions menacées d'inversion des sols et dans les vallées.

Brouillard de surface et de vallée : souvent dans les régions menacées d'inversion de sols et dans les vallées.

Inversion supprimée : turbulence thermique.

Changement des champs du vent. Effets, par exemple, à travers les grands bâtiments, les coteaux.

Rose des vents

Rose des vents de pollution : index de pollution d'après la direction la direction des vents.

5.3 Localisation de la ville

5.3.1 Choix du site

Le choix du site d'implantation pour une ville est primordial si la dimension climatique doit être prise en charge. Cette recommandation connue depuis l'antiquité est constamment formulée comme première étape d'intégration au climat (Cf. Tableau 5.1 ou Golany 1996, Bitan 1988,1992, Givoni 1992).

Cette importance tient au caractère irréversible de ce choix qui conditionne la situation thermique et aérodynamique, le confort des habitants, leur santé, la demande énergétique et le développement futur de la ville. Un site judicieusement choisi du point de vue climatique permet d'offrir de grandes chances à la ville d'être adaptée durablement à son environnement. Inversement un site défavorable va engendrer des nuisances qui vont se répercuter à toutes les échelles de composition. L'exemple de Stuttgart cité précédemment est, à ce titre, révélateur, puisque sa situation topographique réduit fortement le niveau de confort lié à une mauvaise qualité de l'air, de même qu'elle engendre une consommation énergétique considérable pour pallier ses problèmes de surchauffe l'été, de refroidissement excessif l'hiver et la forte pollution, dus à sa localisation dans une vallée.

Les exemples de villes implantées sur des sites défavorables sont nombreux, bien que l'importance du site soit reconnue. Ceci est dû, sans doute, aux nombreux critères classiques de choix de site privilégiant les richesses naturelles, l'accessibilité, la disponibilité de l'eau, la relation aux autres agglomérations, etc.

L'importance du choix d'un site favorable tient à deux considérations essentielles, souvent négligées :

1. Protection des risques : Choisir un site sûr, c'est à dire ne présentant pas de risques, liés à des conditions climatiques extrêmes, telles que zones inondables, exposées à des vents violents (Cf. Davis1986) ou sujettes à des inversions thermiques fréquentes, zones non ventilées, etc.
2. Un site aux fortes potentialités énergétiques naturelles. L'objectif est l'optimisation de l'usage des énergies naturelles pour augmenter le confort et réduire la consommation d'énergies non renouvelables et polluantes.
3. Sites présentant des qualités de dispersion des polluants par rapport à d'éventuels sites industriels proches.

Pour cela le choix doit se faire essentiellement par rapport aux données du climat local. Son importance a été discutée plus haut. Il s'agit de choisir, parmi les climats locaux, que définit le relief, celui qui satisfait le mieux les exigences urbanistiques de base.

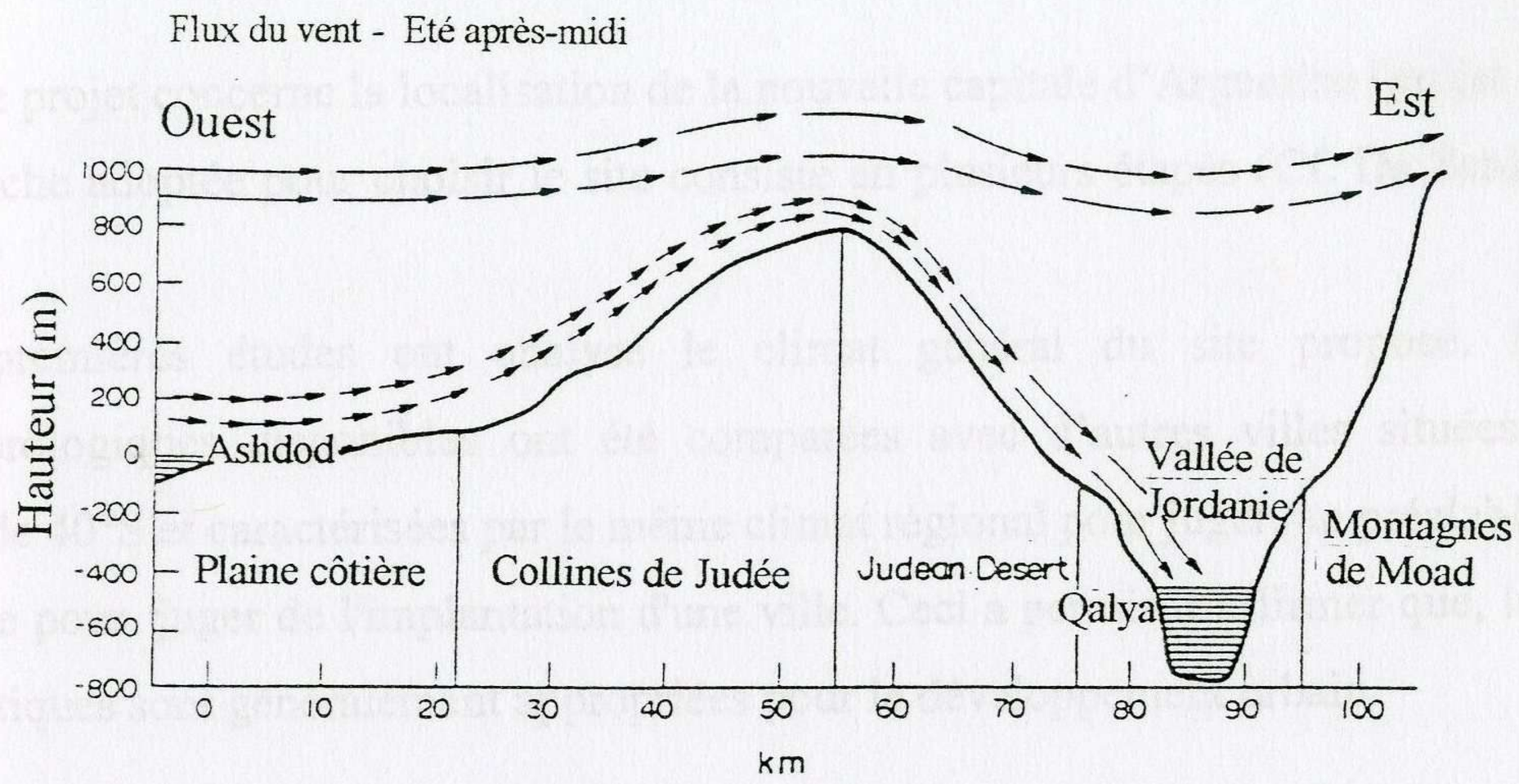
Toutefois, nous avons pu constater que la translation du climat régional au climat local est difficilement quantifiable. A ce titre, nous présentons deux projets de villes, pour lesquelles le choix du site s'est fait suite à l'évaluation des modifications climatiques locales.

5.3.2 Cas de la ville de Ma'ale Adumim, Israël

Ce projet de ville nouvelle (1970) était prévu sur les pentes des montagnes de Judée, Israël. Le choix du site a été confié à une équipe de spécialistes en climatologie qui devait déterminer la meilleure localisation au point de vue climatique en évaluant les modifications climatiques locales : vents, contrainte de chaleur, rayonnement, températures, etc. (Cf. Bitan 1992).

1. Analyse du site : Les problèmes climatologiques sont liés principalement au vent, à savoir une brise marine venant de l'Ouest à partir de la Méditerranée. Ce vent est effectif presque tous les jours d'été. Il atteint la région à midi comme vent froid, puisqu'il escalade la montagne. Ce vent en descendant les pentes orientales se comprime et se réchauffe.

2. Choix du site : Sur les pentes Est, plus la localisation est basse, plus le vent est chaud et fort. D'où le choix d'un site élevé pour la ville. La zone industrielle est située plus bas. Le site initial était prévu dans la zone la plus défavorable, dans la vallée. Compte tenu des différences d'altitudes (100m ≈1°C), la ville est à 2°- 3° plus fraîche que la zone industrielle. La contrainte de chaleur, également essentielle, est moindre sur le site retenu, et le risque de pollution faible car la direction du vent éloigne l'air pollué des industries de la ville (Figure 5.4).



Flux du vent traversant Israel en été

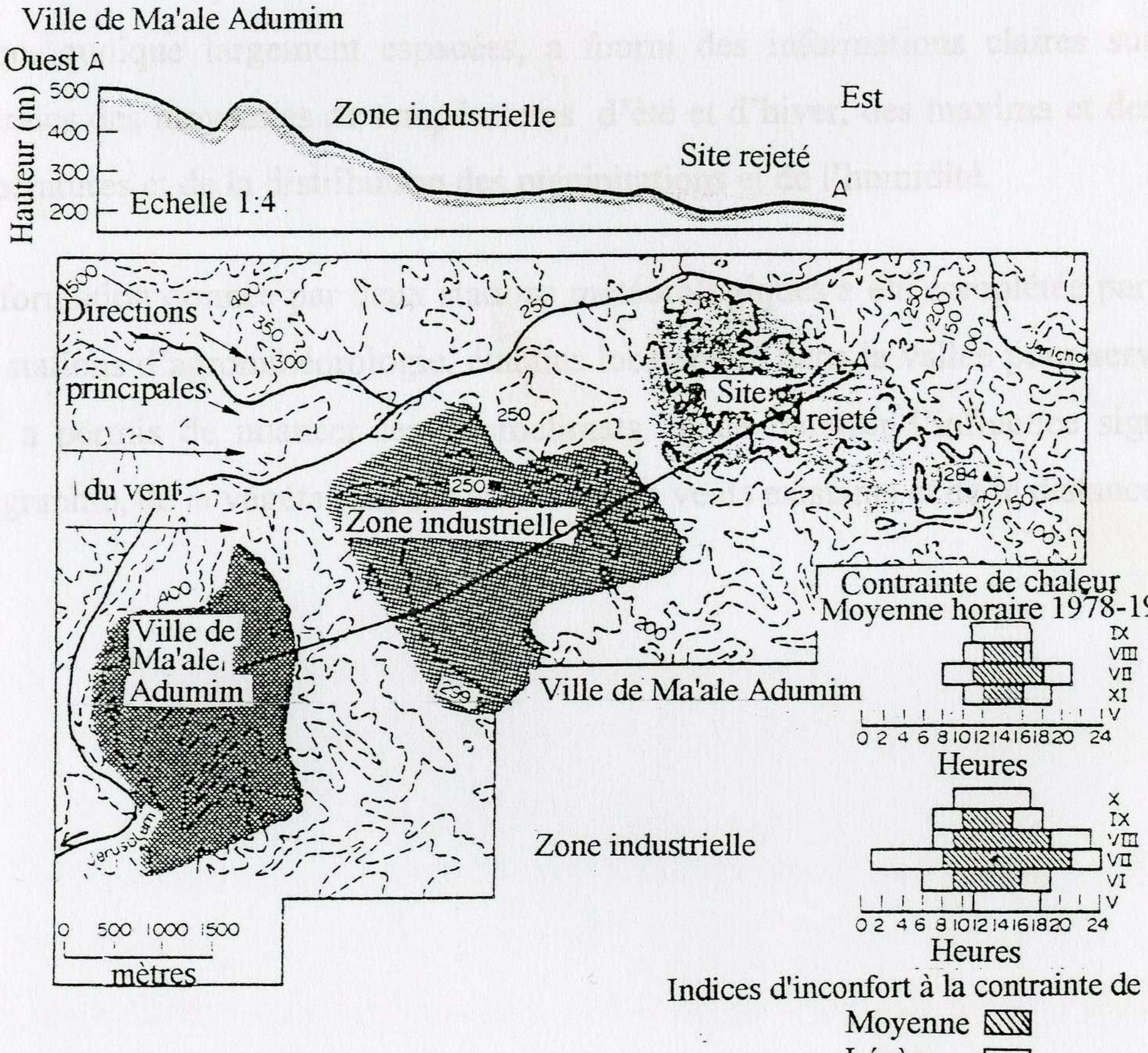


Figure 5.4 : Choix du site d'implantation de la ville de M'aale Adumim, Israel (Bitan 1992). Cet exemple montre la selection d'un site pour l'établissement d'une ville nouvelle sur la base de critères climatiques (direction du vent, contrainte de chaleur,etc.).

5.3.3 Cas de la nouvelle capitale d'Argentine

Ce projet concerne la localisation de la nouvelle capitale d'Argentine (projet ajourné).

La démarche adoptée pour choisir le site consiste en plusieurs étapes (Cf. De Schiller et Evans 1996) :

1. Les premières études ont analysé le climat général du site proposé. Les données météorologiques disponibles ont été comparées avec d'autres villes situées à la même latitude 40°S et caractérisées par le même climat régional pour juger, au préalable, de l'intérêt du site pour juger de l'implantation d'une ville. Ceci a permis d'affirmer que, les conditions climatiques sont généralement appropriées pour le développement urbain.

2. Les données climatiques régionales ont ensuite été étudiées pour détecter les variations dans l'aire considérée qui couvre 4900 km^2. Pour cela le réseau de stations météorologiques de la région, quoique largement espacées, a fourni des informations claires sur les tendances générales des moyennes de températures d'été et d'hiver, des maxima et des amplitudes de températures et de la distribution des précipitations et de l'humidité.

3. L'information donnée par deux stations météorologiques a été complétée par les données de sept stations d'agrométéorologie, établies localement dans la vallée pour servir l'agriculture. Ceci a permis de nuancer les microclimats, et de montrer l'influence significative de la topographie, de la végétation, des arbres brises vents existants et de la distance/ mer.

5.4 Perméabilité de la ville

5.4.1 Objectif de la perméabilité de la ville

La perméabilité est un concept de base qui synthétise plusieurs critères d'intégration au climat déduit de l'analyse du climat urbain au chapitre 4 et applicable dans la planification urbaine. En effet, il regroupe : l'objectif de réduire l'îlot de chaleur urbain, de garantir une exploitation judicieuse des régimes de vents profitables aux espaces à des niveaux ultérieurs, et participe à contrôler la pollution en milieu urbain.

Ainsi, la perméabilité urbaine consiste à offrir une ventilation globale de la ville. Globalement, elle peut être assimilée à une fragmentation de la ville en plusieurs grandes entités pour atténuer les effets thermiques négatifs de la forte densité.

Les objectifs de la perméabilité urbaine sont donc :

1. Prévenir le réchauffement de la ville grâce à l'arrivée de l'air jusqu'au centre, qui permet d'atténuer l'îlot de chaleur urbain.
2. Les mouvements de l'air doivent être contrôlés et dirigés de manière à réduire la pollution, surtout dans les zones résidentielles et les rues.
3. Garantir un potentiel de ventilation nécessaire, ultérieurement, aux espaces urbains.

En effet, l'analyse (Cf.4.2.2) a révélé une forte dépendance entre apparition de l'îlot de chaleur et vent régional. La vitesse du vent régional peut être considérablement réduite en milieu urbain par la présence d'obstacles. Le vent est alors dévié au-dessus de la ville par effet de rugosité, ce qui engendre un vent de faible vitesse à l'intérieur de la structure urbaine favorisant ainsi l'apparition de l'îlot de chaleur urbain.

Par ailleurs, il est apparu que la densité est le caractère géométrique le plus déterminent dans le développement de l'îlot de chaleur (Cf. 4.2.1). Cette forte densité favorise, d'une part, le stockage de la chaleur dans les bâtiments, et d'autre part, crée des effets d'obstacle au vent qui empêche la restitution rapide de cette chaleur.

Cette rupture qui existe entre milieu urbain et rural peut être atténuée en offrant des voies de passages, suffisamment importants qui permettent l'amenée de l'air jusqu'au centre urbain et permet de dissiper cette chaleur.

D'autre part, la ventilation de la ville doit se faire également, par temps calme, en l'absence de vents régionaux. Dans ce cas, le chapitre précédent a aussi révélé l'importance d'utiliser le mouvement des vents locaux à travers l'étude de l'importance des brises de campagne pour l'urbanisme menée par Barlag et Kuttler (1990/91) et Kuttler et Romberg (1992. Rappelons les conclusions les plus importantes :

- Ces brises apparaissent aux heures de plus grand inconfort thermique, correspondant au maximum d'I.C.U.
- Elles soufflent pendant une période importante de la période calme ou de vent faible.
- Elles se développent prés du sol, dans la zone affectant directement la population urbaine.
- Elles entrent en ville dans un schéma radial et toutes les directions peuvent supporter ces flux d'air.
- Ces brises sont effectives en milieu urbain si les voies de passages sont importantes et sans obstacles.

Ces résultats, qui incluent la structure spatiale et temporelle des brises de campagne, confirment que ce type de régime doit être considéré comme un élément essentiel de ventilation dans la planification urbaine, qui peut contribuer efficacement à améliorer le confort thermique par temps calme.

La référence est faite ici aux brises de campagnes mais les mouvements d'air locaux concernent également les brises de mer ou de terre, les brises de vallées ou de collines qu'il convient également d'évaluer et d'exploiter.

5.4.2 Passages de ventilation

La perméabilité de la ville peut être garantie par des passages importants qui permettent la canalisation des vents régionaux et des flux d'air locaux. Cet apport d'air frais dans la ville dépend des propriétés des voies de passage ménagées pour cela.

Il convient lors des premières lignes de conception d'évaluer les voies de passages potentielles qui peuvent supporter cette ventilation. A titre d'exemple : les prairies, champs, plans d'eau, etc. grâce à leur faible hauteur et faible rugosité qui permettent l'accélération du vent ; ces sources créent des brises la nuit. Les forêts peuvent également rafraîchir la ville en donnant naissance à des brises mais en début de journée (Kaule 1995).

Le relief joue également un rôle dans la définition des voies de passages potentielles : telle que vallées pouvant canaliser le vent, par exemple.

Il convient de ménager des couloirs de ventilation urbaine importants orientés de façon à canaliser une partie plus ou moins grande des vents dominants en fonction de leur intensité et qui parviendraient jusqu'au centre. Dans ce cas, il faudrait suivre la direction des vents régionaux, donnée par les stations météorologiques. Il semblerait que cette canalisation soit effective lorsqu'elle ne s'écarte pas des directions entre 0° à 10° (Escourrou 1983) et ces voies de passages doivent tenir compte de ces directions.

Les voies de passages pour les vents locaux sont moins contraignantes en matière de direction puisque, nous l'avons vu, toutes les directions peuvent supporter ces flux. Bien plus, des directions radiales sont à favoriser pour optimiser l'exploitation de ces brises. Toutefois une attention particulière est à accorder à la qualité de l'air de ces passages. Ceux-ci ne doivent pas être porteurs de pollution pour éviter leur translation lente dans les zones urbaines.

Toutefois, les passages de ventilation à prévoir ne peuvent être efficaces que si elles permettent une intrusion profonde à l'intérieur de la ville. Ceux-ci ne doivent pas être bloqués par des obstacles tels que topographie ou bâtiments. (Kaule 1995, Kuttler et Romberg 1992, Barlag et Kuttler 1990/91).

Potentiellement, ces couloirs peuvent être des routes principales de circulation, des rivières ou plans d'eau, des espaces libres ou plantés. Ces passages de ventilation doivent satisfaire certaines conditions : à savoir des ailes libres et droites parvenant au centre de la ville avec une végétation de faible rugosité pour filtrer la pollution. L'utilisation d'espaces verts, des parcs, les rivières ou les plans d'eau est recommandée, par contre les routes de grande circulation routière, ferroviaire sont à éviter car souvent polluées (Tableau 5.3). Lorsque ces passages se trouvent dans la direction des vents dominants, ils peuvent canaliser aussi bien les vents régionaux que locaux ; pour les autres directions, ils supportent principalement les vents locaux.

Tableau 5.3 : Voies de passages pouvant supporter la ventilation globale de la ville

Voies de passage potentielles	**Effets attendus (*)**	**Conditions requises pour ces passages de ventilation**
Routes de circulation principales **Voies ferrées**	• Utilisation limitée • Nécessité d'analyser la qualité de l'air dans ces voies / pollution	1. Ailes libres et droites doivent être gardées jusqu'au centre de la ville. 2. La rugosité des surfaces le long de ces passages doit être faible. 3. Voies avec végétation de faible rugosité pour filtrer les polluants 4. Ces surfaces devraient avoir un effet refroidissant sur la faible couche d'air se déplaçant lentement vers le centre urbain. 5. Ces passages d'air doivent être conçus pour favoriser une stabilité dans la direction des flux. 6. La pollution devrait être minimisées dans les zones à partir desquelles l'air se déplace vers le centre et le long de ces voies de passages. 7. Longueur suffisamment importante dans une direction , au moins 1000m. 8. Largeur suffisamment importante de 2à 4 fois la hauteur des obstacles latéraux (Bâtiments, forets) mais d'au moins 50 m. 9. Les bordures de ces passages doivent être relativement lisses. 10. La largeur des obstacles ,tel que bâtiment isolé ou arbres dans une aile de ventilation ne devrait pas être supérieure à 10% de la largeur du passage. 11. La hauteur de l'obstacle devrait être orienté de façon à présenter la plus grande largeur parallèle au passage. 12. En présence de plusieurs obstacles , le ratio entre sa hauteur et la distance horizontale entre les deux obstacles successifs est de 0.1 pour les bâtiments et 0.2 pour les arbres.
Coulées vertes, Parcs	• Utilisation recommandée • Amélioration de la qualité de l'air attendue	
Rivières et plans d'eau	• Utilisation recommandée. • Qualité de l'air améliorée. • Effets thermiques moindre car l'eau est relativement chaude la nuit.	

(*) et De 1 à 6 source Barlag et Kuttler (1990/91)
De 6 à12 : source Matzarakis et Mayer (1992)

5.5 Usage des sols

L'usage des sols est une étape d'intervention importante lors de la planification urbaine puisqu'elle décide de l'emplacement des principales activités dans la ville. Cette étape est décisive en matière d'adaptation au climat, car ces activités sont relativement autonomes et leurs exigences vis-à-vis du climat et leur impact sur l'environnement naturel sont très différents.

D'une part, il y a les activités présentant de gros risques pour l'Homme et sa santé et pouvant affecter négativement l'environnement et le climat dans les zones urbanisées. D'autre part, il y a les activités nécessitant une grande qualité environnementale, fortement dépendantes des ressources énergétiques naturelles, en particulier les zones d'habitat.

Ainsi, nous distinguons comme principales affectations des sols liées au climat :

- les zones industrielles
- les zones résidentielles
- l'infrastructure

La végétation aussi caractérise un usage des sols particulier, mais vu son importance elle est présentée séparément et détaillée dans le concept suivant en complément à ceux déjà expliqués.

Au point de vue climatique, les recommandations globales peuvent être directement rapportées au concept ségrégation- intégration (Golany 1996). D'une part, la ségrégation entre activités incompatibles à savoir les aires urbaines d'habitat par rapport aux industries et à l'infrastructure primaire de la ville généralement polluante. D'autre part, l'intégration entre aires résidentielles et aires d'activités diverses (Services : bureaux, commerces, éducation, etc.)

L'exploitation des propriétés topographiques du site et les particularités climatiques locales sont ici encore, déterminants par rapport aux choix dans l'affectation des sols. Elle doit être organisée de manière à rehausser la qualité environnementale à travers la considération adéquate de l'information climatique (Lyons 1986).

5.5.1 L'emplacement des industries

La position des industries est essentielle par rapport à la qualité de l'air dans les aires urbaines et dépend étroitement du régime des vents. Cependant, la mauvaise localisation des industries est une erreur courante car celles-ci sont définies par rapport à des facteurs économiques (accessibilité, proximité des ressources, disponibilité de l'eau et du sol, etc.).

Dans ce cas, les analyses précédant les choix de localisation des industries sont menées aux dernières phases de la planification et se limitent à vérifier que les nouvelles installations industrielles ne vont pas causer d'accentuation des niveaux de pollution (Nowicki 1988).

Pourtant il est apparu que la considération du contrôle de la pollution dès les premières phases de planification permet de réduire substantiellement la pollution (Nowicki 1988).

Les zones industrielles sont des sources de pollution qu'il convient, dans tous les cas, d'éloigner des zones d'habitat et les industries situées à l'intérieur de la ville sont toujours fortement polluantes. Les industries ne doivent pas se localiser sur le passage des principaux vents régionaux pour éviter qu'ils ne reportent les polluants sur les zones urbanisées (Kaule 1995, Nowicki 1988, Lyons 1986, Taesler 1986).

Toutefois, cette condition, quoique nécessaire, ne suffit pas à maintenir des taux de salubrité suffisants car l'implantation des sources polluantes par rapport au seul critère de la direction sous le vent présente des risques d'erreurs, aux effets durables (Kaule 1995, Nowicki 1988).

En effet, des taux de pollution élevés peuvent être enregistrées lors de la manifestation des vents locaux. Ces brises (de campagne, de mer, de vallée, etc.) apparaissent sous des conditions de faible vent ou absence de vent régional, et peuvent avoir des directions complètement différentes de celle des vents dominants de la région et par conséquent doivent aussi être considérées (kaule 1995, Escourrou 1983,1991 Nowicki 1988).

Ainsi, la première recommandation est que les industries doivent se localiser de façon à éviter leur emplacement dans les directions des vents régionaux et locaux simultanément par rapport aux aires urbaines.

Le type d'industrie, petite ou grande, et la géométrie de la ville, linéaire ou concentrique, ont également été identifiés (Cf. 4.2.3) comme ayant une grande importance dans le niveau de

salubrité d'une ville. Ils doivent donc être pris en compte. Dans ce sens, Nowicki 1988 propose comme méthode la plus efficace pour contrôler de la pollution de l'air de :

1. Les industries aux hautes cheminées doivent se situer à quelques kilomètres loin des limites de la ville car l'éloignement est une condition première pour une dispersion du fort taux de pollution engendré par ce type d'industrie.
2. Les industries de taille moyenne aux petites cheminées doivent se situer dans un ou deux sites pour améliorer la dispersion, et le choix de ces localisations est fortement dépendant des conditions climatiques locales.
3. Préférer une forme urbaine globale oblongue plutôt qu'une forme concentrique car pour une forme de ville linéaire, la concentration en polluants est nettement inférieure à une ville concentrique pour une même localisation d'industrie.

Enfin, les sources de pollution prés du sol dues aux activités urbaines ne doivent pas se localiser dans les zones à faible potentiel de ventilation car les différences thermiques peuvent conduire à déplacer les polluants de façon horizontale et propagent ainsi, la zone polluée. (Kaule 1995). Dans ce dernier cas l'usage de la végétation pour créer des écrans entre zones d'habitat et ces activités permet d'atténuer ces effets négatifs.

5.5.2 Aires résidentielles

Une attention particulière doit être accordée aux zones résidentielles, car tout établissement urbain est destiné à la population établie dans ces aires. Les zones résidentielles sont, par conséquent, les plus exigeantes en matière de confort. De même qu'elles sont les plus consommatrices d'énergie, surtout pour le chauffage, le refroidissement, et l'éclairage. Elles représentent, pour cela, le meilleur cadre pour réaliser des économies importantes grâce à une exploitation optimale des énergies naturelles.

La première condition à satisfaire, promesse d'une exploitation ultérieure de ces énergies, c'est d'abord un choix judicieux de l'implantation de ces aires. Dans ce cas la référence au relief est évidente. Les sites destinés à l'habitat doivent, dans la plupart des cas, être bien exposés au soleil et le choix d'une bonne orientation est ici primordial. Les versants Sud et Est reçoivent les plus grands taux de radiation et seront préférés aux versants Nord et Ouest (Cf. 3.4.1).

Des conditions de ventilation suffisantes sont, également, à rechercher en exploitant à la fois, les vents régionaux et locaux.

On distingue principalement les collines et les vallées pour leurs différences fondamentales dans le potentiel climatique. Les aires résidentielles sont à prévoir sur les versants. L'habitat sur les pentes devrait connaître des vents descendants propres et frais la nuit, en été tandis que dans la vallée une situation d'air stagnant et accumulateur de pollution est à éviter (Lyons1986). En effet, les vallées sont caractérisées par une faible circulation de l'air, des inversions thermiques importantes, des minima de températures plus bas l'hiver et des maxima plus élevés l'été (Cf. Tableau 3.2) ce qui augmente la demande énergétique aussi bien pour le chauffage en été que pour le refroïdissement en hiver.

5.5.3 Infrastructure

L'infrastructure primaire d'une ville est importante pour plusieurs raisons :

1. L'infrastructure de base d'une ville conditionne durablement son développement futur (Lyons 1986). Les réseaux principaux de circulation doivent être élaborés pour orienter la croissance future de la ville vers les zones les plus favorables au point de vue climatique. En effet, il serait dommage que les aires urbanisées tardivement se retrouvent défavorisées. Dans ce cas la corrélation relief- infrastructure peut s'avérer très importante ; La trame des rues peut favoriser le développement urbain sur les hauteurs et éviter les vallées, plus bénéfique pour un aménagement végétal.

2. L'infrastructure urbaine supporte largement la ventilation à l'intérieur de la ville. Le rôle des grandes voies de circulation a déjà été relevé. Les rejets automobiles représentent les plus grands risques de pollution en milieu urbain et l'une des sources d'énergie anthropique les plus importantes. Ainsi, la conception de cette infrastructure dépend fortement de sa hiérarchie ; Plus les voies de circulation sont importantes plus il est recommandé de les éloigner des zones bâties, pour éviter qu'elle ne reporte les polluants dans la ville. Ainsi, les voies de circulations primaires (tel que autoroutes et routes urbaines principales) sont à préférer en réseau périphérique contournant les zones d'habitat. A l'inverse les voies piétonnes ou de faible circulation peuvent être conçues de façon à supporter les flux d'air vers les centres urbains ; dans ce cas une structure radiale est intéressante.

3. L'infrastructure conditionne la densité de la ville. La réduction des circulations dans les zones résidentielles améliore la qualité de l'air dans ces zones. Dans ce cas, un usage des sols "intégré" qui favorise la proximité de certains usages tels que : le résidentiel, commercial, les espaces publics, les espaces verts, etc. est recommandée (Golany 1996). La proximité étroite entre activités urbaines quotidiennes maximise l'usage des sols, facilite les mouvements dans des espaces urbains protégés et réduit les distances induites par l'infrastructure et par conséquent réduit les sources de pollution, la production d'énergie anthropique et la consommation énergétique qu'elle implique.

5.6 Paysagisme

La végétation a été relevée comme un des facteurs de l'environnement qui modifient fortement le climat local par le biais de ces propriétés climatiques (Cf. 3.4.2). Egalement, l'utilisation des espaces verts a été identifiée comme l'une des stratégies les plus intéressantes pour contrôler le climat urbain, en particulier l'îlot de chaleur (Cf.4.2.1). La végétation peut avoir des applications pratiques importantes en urbanisme tel que pour les besoins de chauffage et de refroidissement des bâtiments. La végétation en étant planifiée de façon judicieuse peut être utilisée pour atténuer quelques-uns des effets anthropiques générés par le développement urbain (Avissar 1996).

Le concept de paysagisme introduit l'aspect environnemental qui complète les divers choix urbanistiques expliqués plus haut. L'aménagement végétal vise l'amélioration du climat urbain en atténuant les effets thermiques négatifs de l'îlot de chaleur. Les espaces verts permettent de réduire la chaleur sensible en augmentant la chaleur latente à la fois par le biais de l'ombrage, de l'évapotranspiration et la réduction du vent. Plusieurs conditions sont requises pour optimiser l'usage de la végétation ; les recherches présentées au chapitre 4 (Avissar 1996, Taha et al 1997, Mc Pherson 1992,1994a) ont permis de cerner les aspects qui décident de l'efficacité de cette stratégie, à savoir :

1. Les proportions de végétation utilisée par rapport au domaine bâti.
2. Sa densité, son mode de répartition et son imbrication dans le tissu urbain.
3. A la nature du climat.

5.6.1 Proportions des espaces verts par rapport au bâti

L'efficacité de la végétation augmente à mesure que ses proportions augmentent (Avissar 1996). L'usage extensif de la végétation permet de réduire l'îlot de chaleur urbain en fournissant de l'ombre et en restituant l'eau à l'air par évaporation des sols et évapotranspiration des plantes (Taha et al 1997, McPherson 1992,etc.). Cette végétation permet aussi bien d'améliorer le confort mais aussi de réaliser de fortes économies d'énergie (Cf. Tableau 4.4) et ce à long terme ; ceci fait du paysagisme une solution climatique rentable. Ainsi le plus grand taux de végétation est toujours souhaité en ville.

D'autre part, plus l'espace vert est grand plus son impact se fait ressentir sur son environnement immédiat. Ces effets peuvent même être ressentis sous forme de brise dans la journée (Kaule1995) et l'étendue de cette brise augmente, aussi, à mesure que l'espace vert est grand (Escourrou 1991, Geiger 1965).

Dans une ville de forte densité où la trame urbaine est serrée et la projection de grandes étendues d'espaces verts est difficile, la verdure peut aussi se localiser dans les places, les parkings, les carrefours ou alignés le long des rues. Les effets de ces aménagements sont sensibles, ils ne doivent pas être négligés. En effet, la ville de Chicago qui compte un tiers de sa couverture végétale en alignement d'arbres enregistre aussi des économies d'énergies très intéressantes, notamment grâce à la réduction du vent qui réduit la demande énergétique pour le chauffage (Mc Pherson 1995).

5.6.2 Localisation de la végétation en milieu urbain

La meilleure localisation pour une efficacité climatique est le deuxième critère d'importance pour l'aménagement d'espaces verts. Elle est explicitée ci-après.

La répartition du végétal dans la ville est hétérogène. Elle peut se présenter sous diverses formes : grands parcs, bordures ceinturant la ville ou végétation éparse imbriquée au tissu urbain. Une structure urbaine rigide et dense, de type orthogonal par exemple, implique souvent une répartition linéaire de la végétation, en rangées d'arbres. Une structure plus souple, de conception organique, permet des aires de verdure dispersées, se confondant avec le bâti. Ces aménagements peuvent se retrouver simultanément dans une ville. Leur position dépend de nombreux critères : environnement naturel, relief, nature du climat et affectation des sols.

Généralement, la distribution de la végétation dépend de la disponibilité du sol et que les zones résidentielles sont celles qui offrent les plus grandes potentialités pour l'implantation d'une végétation extensive (Nowak et al 1996). Fort heureusement cette localisation est celle qui permet les plus grandes économies d'énergie au point de vue climatique (McPherson 1994a, 1992). En effet, étant donné la forte demande énergétique dans ces zones pour le chauffage et le refroidissement. La présence de végétation autour des bâtiments permet e réduire sensiblement cette consommation énergétique pour toute saison et tout climat grâce à l'exploitation judicieuse des propriétés climatique de la végétation (ombrage, réduction des vents, évapotranspiration).

5.6.3 Impact du type de climat sur l'aménagement végétal

La nature du climat décide des premiers choix relatifs à l'usage du végétal car les propriétés climatiques de la végétation exploitées, dans chaque cas, sont différentes ; une distinction nette est à faire entre les exigences d'un climat froid et celles d'un climat chaud.

Pour un climat chaud, la propriété d'ombrage est la plus importante car le rayonnement solaire intense est la principale contrainte. Le réchauffement de la ville est essentiellement dû au captage des surfaces urbaines de ce rayonnement, surtout que l'évapotranspiration y est faible en raison du manque d'eau dans le sol. Par contre, pour un climat froid, la réduction de la vitesse du vent est plus importante (Mc Pherson *et al* 1994a).

Les villes des climats froids économisent plus en chauffage par la réduction du vent et celles des climats chauds économisent en refroidissement grâce à l'ombrage (Mc Pherson et al 1994a). Ainsi, sur le plan spatial l'on préférera une structure végétale compacte pour les climats froids pour briser les vents, en particulier dans les zones exposées telles que les bordures urbaines, et une structure plus éparse pour les climats chauds afin de maximiser les surfaces ombrées (McPherson *et al* 1994b).

Pour les climats tempérés, le défi principal est de résoudre le conflit entre besoins de protection contre le vent et accès au soleil et ombrage et brises fraîches. C'est à travers la conception de détail que les compromis peuvent être assurés tel que nous le verrons plus loin (Cf. 6.4 et 7.7).

Enfin, quelques mesures particulières sont à prendre pour des climats qui présentent des risques importants telles les régions désertiques sujettes à des vents extrêmes et des tempêtes de sables où il faut prévoir des brise-vent avec une structure plus compacte, notamment en périphérie du tissu urbain.

5.6.4 Exemple de la ville de Salahldeen, Irak

La ville nouvelle de Salahldeen en Irak illustre la manière d'introduire les espaces verts dans la conception de la ville. Son intérêt réside dans la démarche globale adoptée qui fait de la végétation un élément de conception primaire. L'idée consiste dans la prévision d'une trame verte prioritaire pour l'ensemble de la ville en tenant compte du relief. Le but est de générer des microclimats plus confortables (Sloan *et al* 1989).

Dans cette région au climat chaud et sec, le but est de réduire la contrainte de chaleur, assurer une protection des vents et des poussières en périphérie et permettre un captage des rares pluies par l'implantation de la végétation dans les vallées. Le bâti s'inscrit ultérieurement dans cette trame tel que cela est illustré par la figure 5.5.

5.7 Configuration urbaine

L'étude du climat urbain (Cf.4.2) a montré que l'apparition de l'îlot de chaleur dépend de la densité urbaine (Givoni 1989, Oke 1988a, etc.) et que le phénomène de stockage dans les bâtiments est responsable de l'élévation des températures en milieu urbain (Escourrou 1991, etc. Egalement, le régime des vents dépend des obstacles que constituent les bâtiments et qui peuvent réduire sensiblement leurs vitesses en milieu urbain (Oke 1988b).

Ainsi, la configuration urbaine globale doit participer à créer un climat urbain favorable. Les concepts précédents ont permis de le signaler. A titre d'exemple, la perméabilité dépend des passages urbains offerts à travers le tissu urbain, et l'infrastructure est étroitement liée à la géométrie urbaine.

Toutefois, des orientations précises relatives à la configuration globale de la ville à ce niveau sont difficiles à définir car celle-ci dépend principalement des choix géométriques faits ultérieurement et qui doivent satisfaire des objectifs de contrôle climatique

Le tableau 5.2 (Cf. 5.2) fournit quelques éléments de réponse aux formes globales à préférer. Il apparaît que les problèmes majeurs liés au type de climat (sécheresse et chaleur excessive forte humidité, basse température, vents forts, etc.) renvoient à des schémas de ville préférentiels, tel que : géométrie compacte pour se protéger de la chaleur en climat chaud et sec, forme dispersée pour permettre la ventilation en climat humide ou encore combinaison de formes compactes et d'espaces ouverts pour assurer un captage solaire et une protection du vent en climat froid, etc.

Toutefois, ces orientations restent sommaires et connues intuitivement mais l'évaluation réelle de la performance d'une configuration de ville par rapport à une autre, pour un climat donné, renvoie aux besoins de contrôle climatique qui concernent : l'accès au soleil, la restitution de chaleur, la ventilation des espaces extérieurs et intérieurs, etc.

L'ensemble de ces aspects constitue le deuxième niveau d'adaptation au climat et pour lequel les chapitres suivants (6 et7) sont entièrement consacrés.

5.8 Discussion et conclusion

Ce chapitre a été consacré à la première partie de la démarche méthodologique visant l'intégration du climat dans la planification urbaine. La figure 5.4 en est un récapitulatif qui rappelle les actions et concepts, leurs objectifs, les facteurs climatiques décisifs, et les recommandations globales qui s'y rapportent.

Egalement, plusieurs exemples de villes ont été donnés pour illustrer quelques-unes des étapes discutées. Ceci afin de montrer la pertinence de ces étapes et le caractère opérationnel de cette démarche. Nous avons présenté :

1- Stuttgart : pour la connaissance fine du climat local afin d'orienter la planification à travers l'élaboration de cartes climatiques locales détaillées
2- Ma'ale Adumim et la nouvelle capitale argentine pour le choix du site de la ville et des industries par rapport aux caractéristiques locales du climat.
3- La ville de Salahldeen pour la concrétisation du concept de paysagisme. A travers une trame de verdure prioritaire.

En complément à ces exemples nous présentons deux exemples qui illustrent plusieurs de ces concepts simultanément. Il s'agit de : Chandigarh, Inde, en climat chaud et humide et de Parc Bit, Espagne, en climat méditerranéen.

Le choix de ces exemples est motivé par l'importance qui a été accordée au climat dans l'élaboration de ces projets.

1- Exemple de Chandigarh, Inde

La ville de Chandigarh, conçue au début des années 1950,comme nouvelle capitale du penjab présente l'un des plans d'urbanisme les mieux réfléchis par rapport au climat (Aronin 1953) grâce à la collaboration d'un climatologiste (1).

Le site est de 28 miles carrés, d'un relief de faible pente, sauf dans la zone NE, légèrement élevée. Le site est limité par une rivière au Nord et au Nord-Est.

La ville est située à une latitude de 30°N. Le climat de la ville est caractérisé par un fort taux d'humidité, des températures élevées, de fortes pluies à la période de la mousson. Les vents dominants soufflent du NO et du SE ; les brises de colline saisonnières (avril à juin) viennent du NE. L'exigence climatique principale est la ventilation urbaine continue et la protection du soleil.

Cette ville révèle une intégration au climat à travers une grande perméabilité, un usage des sols différencié, basé sur la ségrégation –intégration des activités, et par le paysagisme, concept clé pour cette ville, voulue dés le départ ville verte.

Pour l'usage des sols, l'emplacement des industries s'est fait de manière à éviter les directions des vents régionaux et locaux. Les zones d'habitat s'organisent en secteurs de grande taille, délimités par des axes mécaniques. Ces zones sont autonomes grâce à l'intégration des services de base, organisés linéairement ; la circulation piétonne y est privilégiée. Les activités primaires de la ville sont alignées le long des grandes artères

La ville traduit le concept de paysagisme à travers l'usage extensif de la végétation. Conçue sous forme de coulées vertes, elle traverse les secteurs résidentiels et réalise à l'intérieur de chaque secteur de grandes poches vertes, destinées à l'ombrage. Cette végétation constitue également des voies de passages suffisamment importantes pour assurer la perméabilité de la ville, en particulier la coulée verte dans la direction NE qui suit la vallée et qui peut drainer aussi le flux des brises locales.

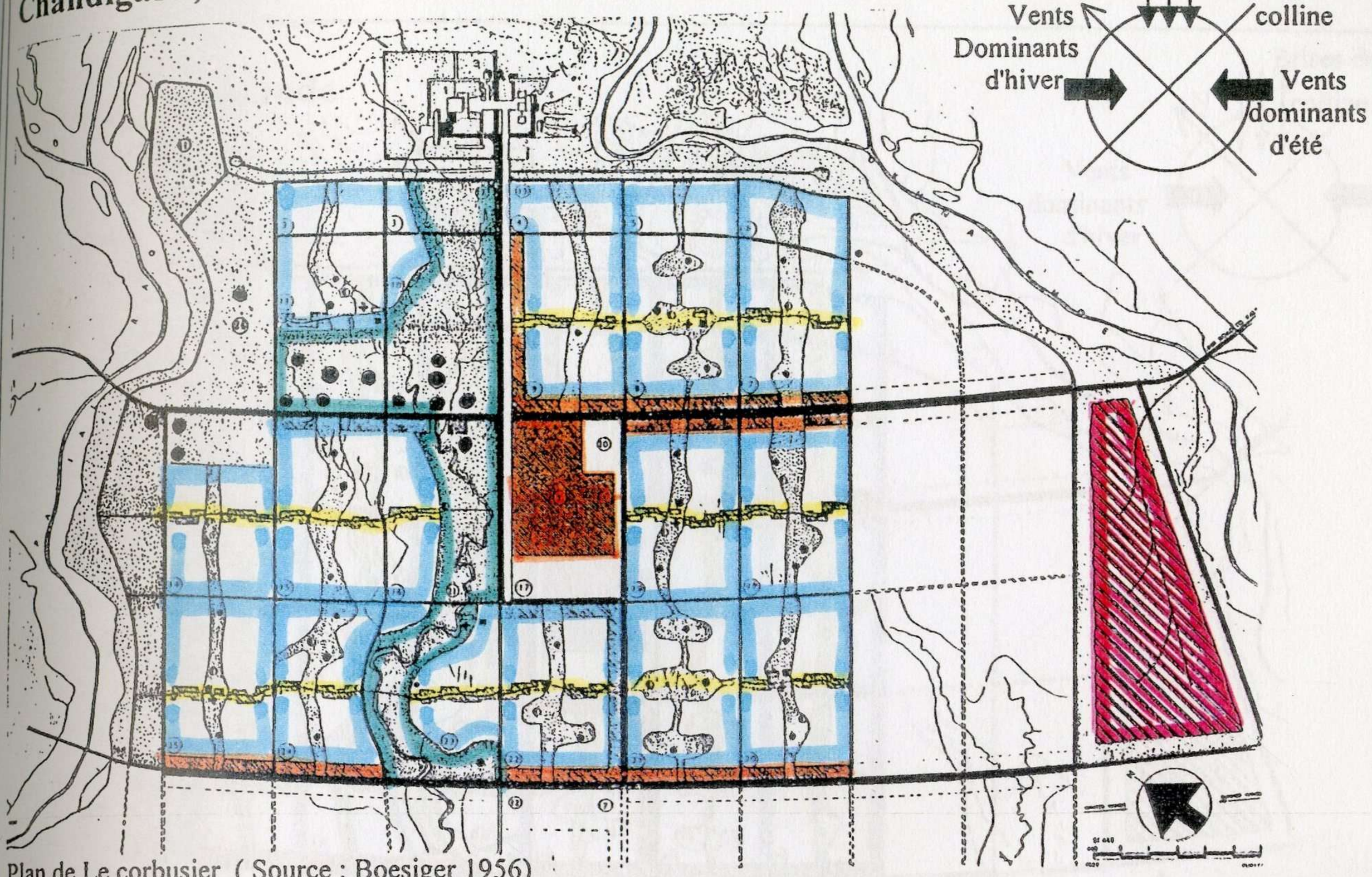
Les figures 5.6a, b, et c expliquent en détail ces concepts. Cet exemple est repris au chapitre 7 (Cf.7.7) pour tous les aspects géométriques.

---

(1) D'après Aronin (1953) les architectes Mayer, et Wittlesey responsables de l'élaboration des plans de la ville ont bénéficié du concours d'un climatologiste américain, de renom Helmut Landsberg. Parallèlement, Le corbusier et son équipe élaborait également les plans d'urbanisme de la ville (Cf. Boesiger 1956). La forte similitude qui caractérise les deux projets montre sans doute une collaboration. Dans tous les cas la réflexion liée au climat est toujours présente. Pour cela, les deux références sont utilisées pour l'illustrer.

Usage des sols : Ségrégation- Intégration (Habitat / Activités/Industrie)

Chandigarh, Inde



Plan de Le corbusier (Source : Boesiger 1956)

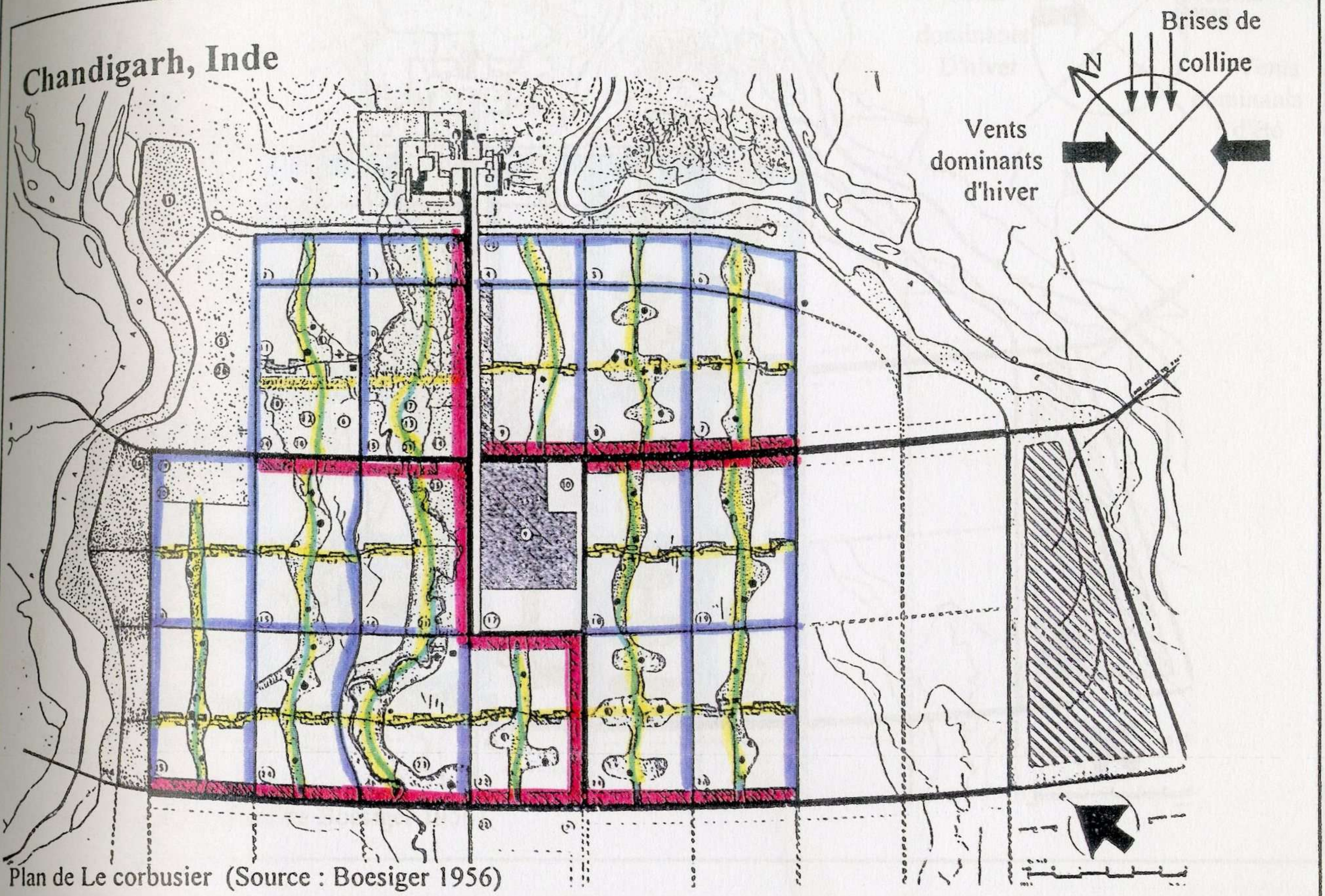
Légende

- Industrie
- Secteurs d'habitat.
- Activités de proximité
- Equipements de proximité (ecoles...)
- Zones commerciales et d'affaires à l'échelle de la ville.
- Parc de la ville (Aire de loisirs et de culture)
- Equipements culturels (socio-éducatifs et sportifs)

- **Industrie** : localisée à l'ouest et SO pour éviter le report des polluants aussi bien par les vents dominants NO d'hiver et SE d'été que par les brises venant du NE. De même que l'éloignement de prés de 2 km par rapport aux zones urbaines permet une plus grande protection de la pollution.
- **Les zones d'habitat** sont groupées en secteurs (800×1200m) pour 5000 à 8000 habitants. Les services de proximité (écoles, commerces, centre de santé, etc.) sont intégrés à l'intérieur, permettant ainsi, l'autonomie de ces zones résidentielles et donc la limitation des déplacements. Les parcours piétons sont favorisés à l'intérieur de ces zones.
- **Les zones d'activités principales** sont groupées sur les principaux axes de la ville (Bureaux, commerces, etc.)et dans le parc de la ville (Université, stade, théâtre, etc.)

Figure 5.6a : Plan de Chandigarh illustrant la ségrégation entre industrie polluante et Habitat, et l'intégration des activités dans l'habitat.

Usage des sols : Infrastructure



Légende

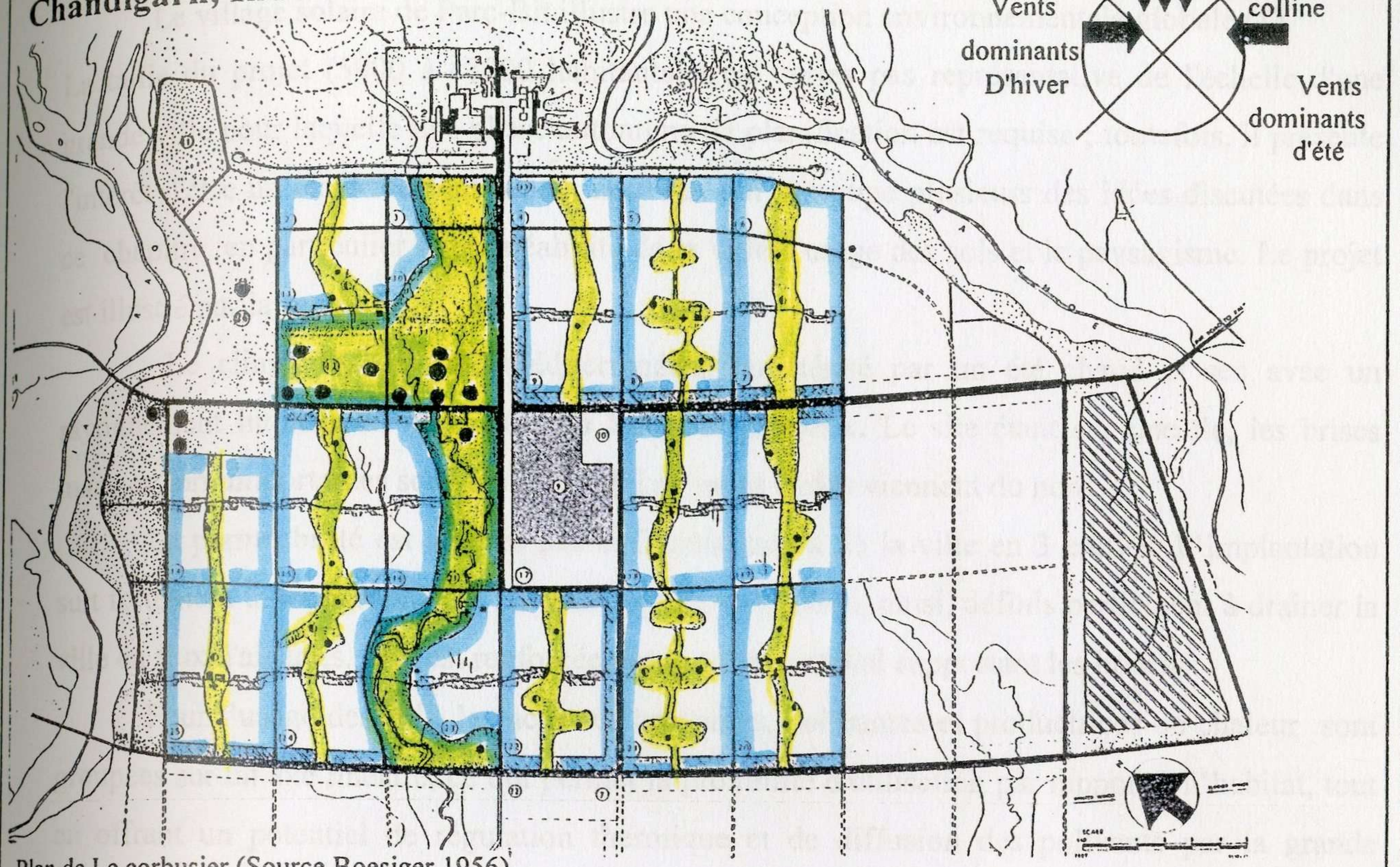
- Artères principales, grande circulation
- Rues mécaniques secondaires
- Dessertes pour l'habitat (mécanique faible et piéton)
- Parcours piétons

- L'infrastructure est orthogonale délimitant les secteurs résidentiels. Elle est hiérarchisée de manière à privilégier des secteurs d'habitat importants autonomes.
- Les rues mécaniques secondaires permettent l'accès aux secteurs d'habitat et les voies tertiaires ou piétonnes assurent la desserte de l'habitat de l'intérieur.
- Les artères principales supportent les activités urbaines à l'échelle de toute la ville, avec une préférence pour les transports en commun. L'artère du capitole, très large, de 100m comprend des voies rapides et un parcours piéton délimité par la végétation.
- Des rues commerciales traversant et relient les secteurs d'habitat et supportent les activités de proximité (Ecoles, centres de santé, commerces, etc.)

Figure 5.6b : Plan de Chandigarh illustrant la hiérarchie de l'infrastructure liée à l'usage des sols.

Paysagisme et perméabilité de la ville

Chandigarh, Inde



Plan de Le corbusier (Source Boesiger 1956)

Légende

- Parc public à l'échelle de la ville
- Espaces verts intérieurs aux secteurs d'habitat
- Habitat

Le paysagisme se traduit par les coulées vertes qui montrent des proportions de végétation importantes, localisées dans les meilleures zones, à savoir résidentielles.

Ces coulées vertes traversent tous les secteurs d'habitat, et crée à l'intérieur des quartiers résidentiels des zones d'ombre et de fraîcheur intérieurs et permettent des économies d'énergie

La perméablilité de la ville est assurée par le biais de cette même végétation, en particulier par leur orientation ans le sens des brises NE, notamment.Le parc de la ville qui suit la vallée qui traverse la plateau de la ville.

Figure 5.6c : Chandigarh, ville verte illustrant les concepts de paysagisme et de perméabilité

2- Exemple de Parc Bit, Majorque, Espagne

Le village solaire de Parc-Bit illustre une conception environnementale globale (1).

La taille du projet (5000 à 8000 habitants) n'est certes pas représentative de l'échelle d'une grande ville pour laquelle une phase autonome de planification est requise ; toutefois, il présente l'intérêt d'être un établissement urbain nouveau qui regroupe plusieurs des idées discutées dans ce chapitre, en particulier la perméabilité de la ville, l'usage des sols et le paysagisme. Le projet est illustré par la figure 5.7.

Le climat est de type méditerranéen, caractérisé par un été chaud et sec avec un rayonnement intense, un hiver frais à froid et pluvieux. Le site étant sur une île, les brises marines sont importantes soufflant du sud. Les vents froids viennent du nord.

La perméabilité est assurée par la fragmentation de la ville en 3 entités. L'implantation suit fortement la topographie, et les passages de ventilation, ainsi, définis participent à drainer la ville en flux d'air frais. Elle est renforcée par le schéma radial supportant les brises.

Pour l'usage des sols, les activités bruyantes, polluantes et productrices de chaleur sont groupées sur un axe linéaire, ce qui permet la proximité d'utilisation par rapport à l 'habitat, tout en offrant un potentiel de régulation thermique et de diffusion des polluants par la grande exposition de cet axe sur ces deux façades.

Les zones résidentielles sont localisées en périphérie, de manière à leur garantir le calme et un bon potentiel climatique, Le schéma radial et la faible distance par rapport au centre permet l'accès facile, les services (bureaux, commerces) sont intégrés afin de créer un cycle d'activités équilibré dans chaque entité, ce qui permet de privilégier les parcours piétons, et donc la réduction de la pollution et de la consommation énergétique.

A l'inverse des centres urbains habituellement très denses et donc plus chauds, l'exemple de Parc Bit montre des noyaux faits de plans d'eau (stockage pour l'agriculture) et de végétation, ce qui permet de compenser le stockage de chaleur des bâtiments hauts environnants. La végétation apparaît comme une composante clé dans ce projet ; au Nord, elle est constituée de forêts afin de bloquer les vents forts du Nord. Plus au sud, la végétation est de plus faible rugosité (champs, etc.) qui permet les passages des brises marines rafraîchissantes l'été.

Cet exemple est détaillé également, au chapitre 7 (Cf. 7.7) pour les aspects géométriques.

---

(1) Rogers, auteur de ce projet, se distingue, à la fois, par son intérêt pour l'urbanisme et pour la résolution des questions de contrôle de la lumière et de l'environnement climatique dans ces bâtiments (Terrail ed 1995).

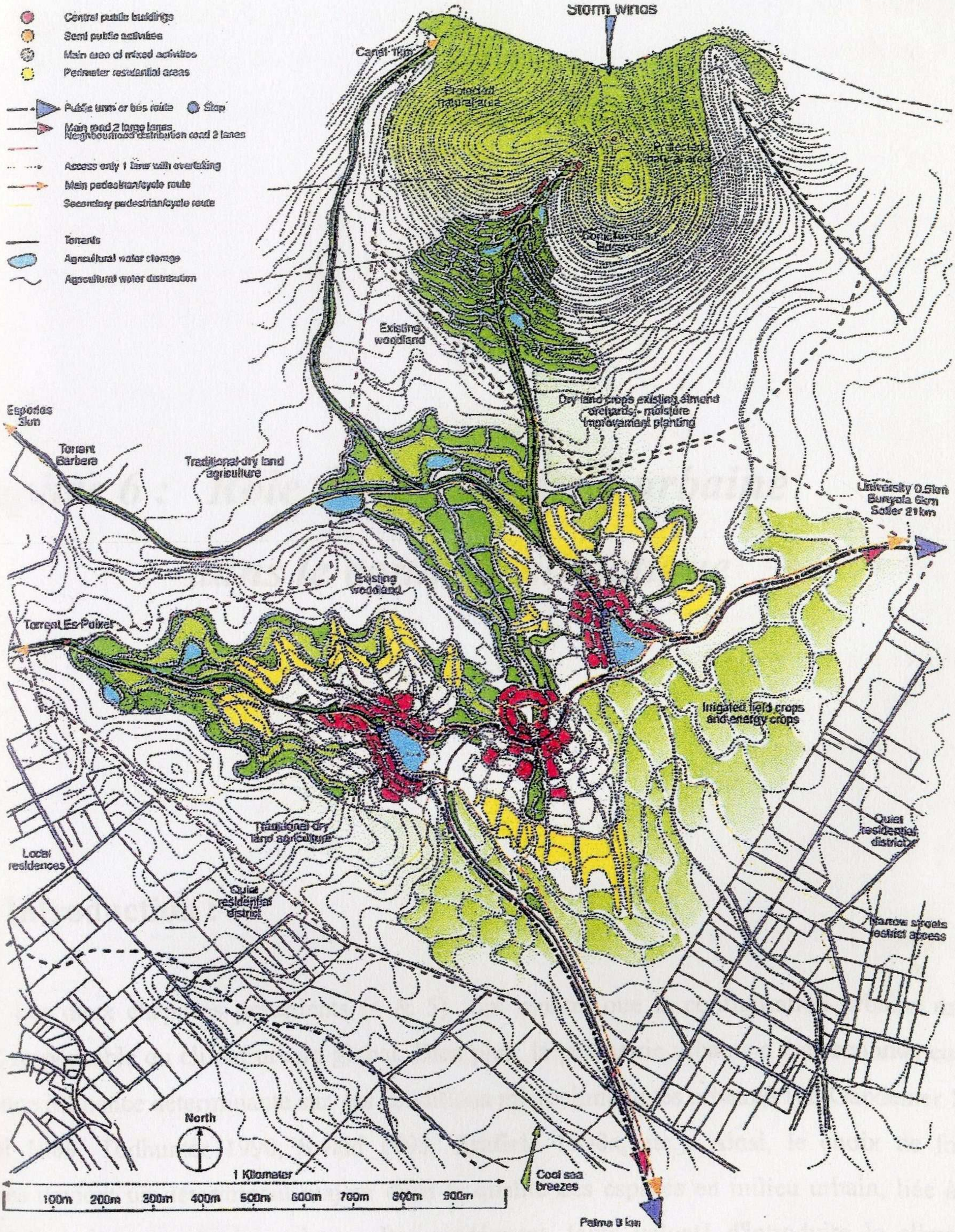


Figure 5.7 : Le plan directeur de Parc Bit à Majorque, Espagne , illustrant plusieurs actions et concepts de la planification à savoir : usage des sols (ségrégation- intégration) , perméabilité, et paysagisme. (source : Terrail ed 1995).

Chapitre 6 : Rôle de la géométrie urbaine dans le contrôle climatique

6.1 Introduction :

Les deux chapitres précédents (4 & 5) ont montré que la configuration urbaine est, en partie, responsable du climat urbain global. Bien plus, la géométrie urbaine a été reconnue comme ayant une influence déterminante sur les conditions microclimatiques urbaines (cf. Gandemer 1980, Givoni 1989, Todhunter 1990, Swaid 1993, Arnfield 1990a, etc.). Ainsi, le choix de formes urbaines devient un déterminant majeur dans la qualité des espaces en milieu urbain, liée à leur confort thermique et aérodynamique. Par conséquent, toute volonté d'introduire le climat, au moment de la composition, exige la compréhension de la dépendance entre géométrie urbaine et microclimats résultants.

A ce stade de la conception - c'est à dire à l'échelle de l'occupation du sol - l'objectif de l'urbaniste concerne principalement les moyens de contrôle climatique, visant à la fois, à garantir les meilleures conditions de confort dans les espaces urbains extérieurs, et permettre un usage rationnel de l'énergie dans les espaces intérieurs, tout en maintenant un niveau de confort élevé. Ceci est possible par l'exploitation des principaux facteurs climatologiques que sont la radiation solaire et le vent à travers la maîtrise des propriétés géométriques, dimensionnelles et formelles, du tissu urbain.

La radiation solaire et le vent sont, effectivement, les principaux facteurs du climat pouvant être contrôlés et exploités lors de la composition urbaine. Pour cela, plusieurs arguments peuvent être donnés :

1. De tous les éléments du climat, ces deux facteurs sont ceux qui constituent un potentiel énergétique, ce qui signifie que leur intégration permet - au-delà du confort - de satisfaire les objectifs d'économie souhaités.
2. La radiation solaire et le vent créent des effets complexes lorsqu'ils entrent en interaction avec le tissu urbain. Ils connaissent d'importantes modifications de leurs propriétés, et engendrent différents microclimats, alors que la dépendance directe des autres facteurs du climat, par rapport à la géométrie urbaine, est moins évidente. Par ailleurs, la radiation solaire et le vent agissent sur certains autres éléments du climat et les incluent, de ce fait, indirectement. A ce titre, il suffit de rappeler la forte dépendance des températures et de l'humidité par rapport à ces deux facteurs.
3. Les autres éléments (températures, humidité, couverture du ciel, précipitations, etc.) interviennent, au préalable, dans la définition du climat et des exigences climatiques d'un lieu ; Celles-ci sont alors satisfaites par le contrôle de la radiation et du vent (1) ou par des dispositions urbaines et architecturales simples (2).

Ce contrôle peut s'exprimer en termes de disponibilité et de distribution de la radiation solaire, lesquelles régissent les niveaux d'accès et de protection du soleil dans les rues et les

---

(1) Par exemple : les températures urbaines et le taux d'humidité sont contrôlés par la maîtrise du captage de la radiation et par le contrôle du niveau de circulation de l'air dans le tissu.

(2) Par exemple pour tenir compte des précipitations, envisager l'implantation en hauteur, un tracé des rues respectueux du relief, usage de toitures inclinées, etc.

bâtiments et par conséquent le potentiel d'ensoleillement et d'éclairage naturel, de chauffage et de refroidissement passifs. Ce contrôle concerne également les flux d'air autour des masses bâties, dans un souci de ventilation ou de protection du vent dans les espaces extérieurs, de diffusion des polluants et afin d'offrir un potentiel de ventilation intérieure suffisant.

La description habituelle de l'entité urbaine en termes de densités et gabarits moyens, configuration générale, etc. ne renseigne pas suffisamment sur son comportement vis-à-vis des données de l'environnement ou du climat ; tout comme la complexité des interactions qui existent entre les masses construites et le contexte climatique rendent difficiles l'isolement de l'effet d'une propriété géométrique sur le contrôle climatique, par rapport à une autre.

Ainsi, ce chapitre a pour but d'identifier les paramètres géométriques qui décrivent la forme urbaine et qui représentent des indicateurs de son comportement climatique. Cette démarche permet d'isoler les effets de chaque paramètre par rapport à chacun des éléments du climat et de relever son incidence sur le contrôle des ambiances thermiques et aérodynamiques. Ceci permet - à posteriori - d'évaluer l'impact d'une solution donnée par la combinaison des multiples effets qu'elle crée.

A cette fin, plusieurs travaux significatifs sont résumés ci-après. Les recherches présentées sont puisées principalement dans la climatologie urbaine et l'architecture bioclimatique car, malgré le caractère urbain de la question, l'urbanisme fournit peu de recherches dans ce sens.

En effet, la climatologie urbaine ne se limite plus à la description du climat de la ville ; Elle tend, de plus en plus, à rechercher le rôle des propriétés géométriques du tissu suite au constat de leur impact sur le climat urbain global, et afin de les intégrer dans la conception urbaine (Cf. Brazel *et al* 1991). L'architecture, dans une démarche inverse, élargit son périmètre d'étude à l'environnement bâti puisque la proximité des bâtiments compromet le fonctionnement d'une architecture bioclimatique conçue en milieu dégagé.

Ce chapitre présente d'abord les recherches servant le contrôle solaire et énergétique sous tous ses aspects : accès au soleil, refroidissement des bâtiments, stockage et réflexion de la radiation, sa distribution en milieu urbain et enfin le comportement environnemental des bâtiments lié à leur formes et leurs dimensions. Ensuite, le contrôle du vent est étudié en relevant le rôle des diverses dispositions géométriques sur le niveau de ventilation des espaces extérieurs puis intérieurs.

6.2 Contrôle solaire et énergétique :

La radiation solaire inclut à la fois le rayonnement visible, duquel dépendent directement les gains solaires et le rayonnement de grande longueur d'onde qui conditionne les températures urbaines. La radiation solaire, doit être considérée sous tous ses aspects pour l'intégration de ce phénomène dans la composition urbaine. Les principales préoccupations urbanistiques liées à ce phénomène sont :

1) L'accès ou disponibilité de la radiation dans l'entité urbaine qui dépend d'abord de la capacité d'absorption et réflexion du rayonnement par le tissu urbain et des schémas de distribution de cette radiation sur les différentes surfaces urbaines. Cette considération a pour but de permettre des gains passifs de chaleur (ensoleillement) et de lumière (éclairage naturel).

2) Le refroidissement nocturne : Il traduit la capacité de restitution de chaleur en grande longueur d'onde d'une entité urbaine qui conditionne l'équilibre thermique dans ce milieu.

Les conditions thermiques ou énergétiques en milieu urbain liées à la radiation solaire dépendent de nombreuses variables, à savoir : la géométrie urbaine, la géométrie solaire, les caractéristiques de surfaces.

Plusieurs recherches ont été menées pour étudier l'importance de chacune de ces variables et les relations réciproques qui existent entre elles. Ces travaux se basent sur diverses méthodes ; Les simulations numériques semblent être les plus intéressantes, car elles sont facilitées par la connaissance précise de la géométrie solaire et des caractéristiques des surfaces urbaines. Elles permettent, de ce fait, de dégager les multiples effets de la géométrie urbaine sur le contrôle de la radiation solaire.

Nous présentons, à ce propos, quelques-unes des plus significatives. Leur analyse a pour objet de relever les paramètres urbains géométriques et environnementaux les plus déterminants dans la modification des schémas de radiation en milieu urbain et par conséquent pouvant être utilisé par l'urbaniste pour servir ce contrôle.

6.2.1 Effets de la géométrie urbaine sur l'accès au soleil :

L'accès au soleil est la préoccupation majeure d'adaptation climatique en milieu urbain. Elle constitue le premier motif d'extension de l'approche architecturale bioclimatique au contexte urbain. La principale difficulté réside dans la diminution du potentiel de radiation solaire du à la proximité des bâtiments et aux effets d'obstruction au soleil qu'ils peuvent créer. Le concept d'enveloppe solaire initié par Knowles (1981) est une première contribution à la résolution de ce problème.

Globalement, l'enveloppe solaire peut être définie comme étant le plus grand volume, sur une parcelle de terrain, qui permet l'accès au soleil à toutes les parcelles voisines adjacentes à des périodes d'ensoleillement utile. Cette enveloppe se construit en considérant la durée d'ensoleillement recherchée et la course du soleil liée à la latitude (figure 6.1). L'enveloppe solaire dépend également de la forme de la parcelle et de son orientation, lesquelles conditionnent la hauteur du bâti résultant.

Au niveau urbain, la construction de l'enveloppe solaire laisse apparaître le caractère déterminant de l'orientation par rapport au soleil. En effet compte tenu de la symétrie de la course solaire les profils urbains orientés dans la direction N-S sont symétriques, tandis que les rues orientées E-O ont des profils asymétriques où les murs face au sud sont plus élevés que les murs regardant le nord. De même, pour les choix d'assemblage des parcelles, Knowles (1981) a montré que des lots étroits disposés en profondeur dans la direction E-O dans des rues N-S sont plus favorables que l'orientation inverse car celle-ci offre plus de façades ensoleillées pour une plus forte densité (figure 6.2).

Bien que basé sur les prospects urbains où la relation au voisinage consiste à décider des gabarits en intégrant les espacements entre bâtiments, ce concept a pour objectif principal l'ensoleillement intérieur des bâtiments car aucune allusion n'est faite au confort lié au soleil dans les rues. Or, une conception urbaine appropriée exige aussi la considération du confort dans l'espace extérieur. Ceci nous amène à une deuxième recherche, qui présente l'intérêt de considérer cette question d'accès au soleil à la fois pour le niveau urbain de la rue et pour celui des espaces internes aux bâtiments, en faisant du profil urbain, la variable principale.

Par le moyen d'une simulation numérique, Arnfield (1990) explore la dépendance de l'irradiation des murs IR_m, de la rue IR_r, d'un modèle de piéton IR_p par rapport à diverses

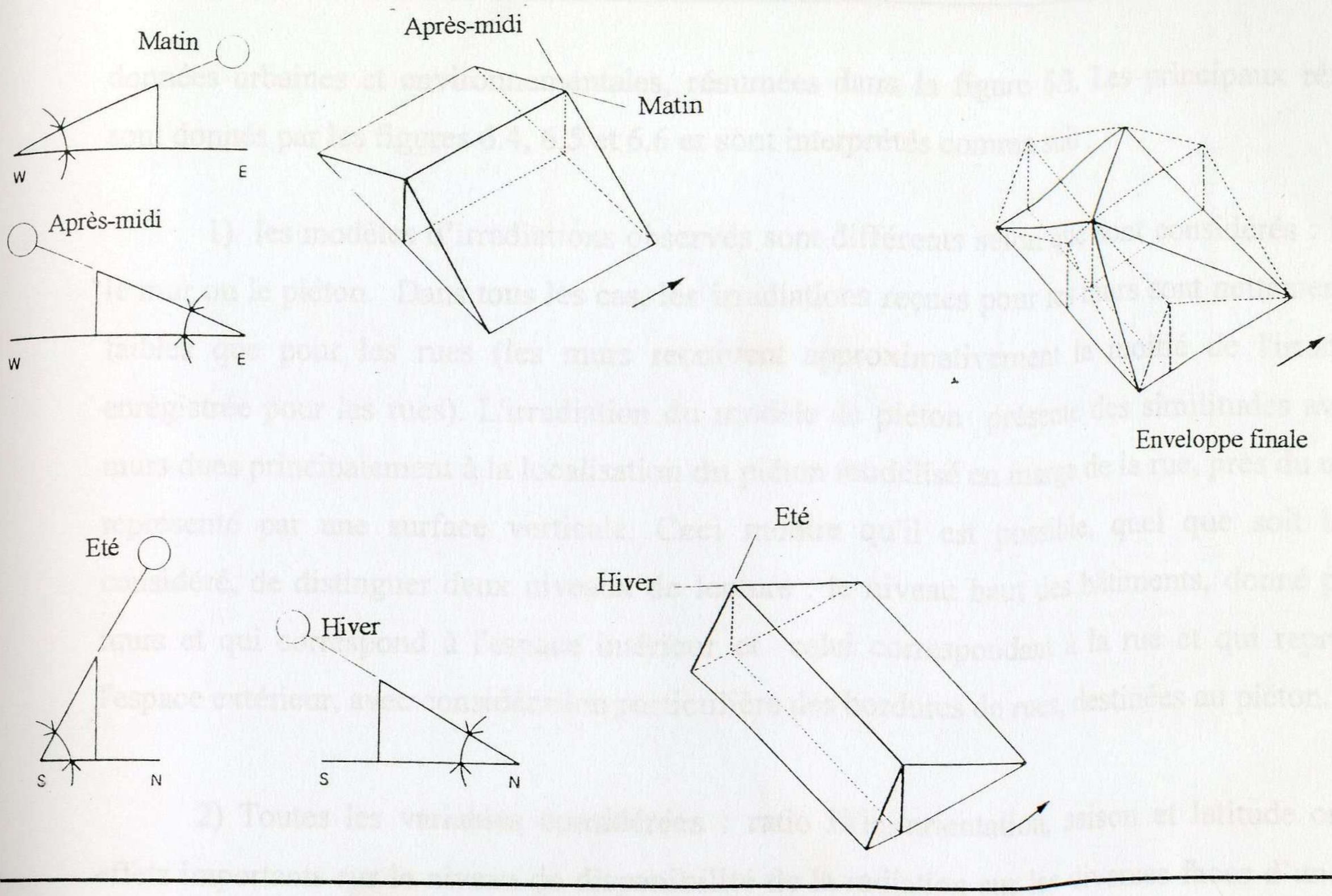


Figure 6.1 : Concept de l'enveloppe solaire (Knowles 1981)

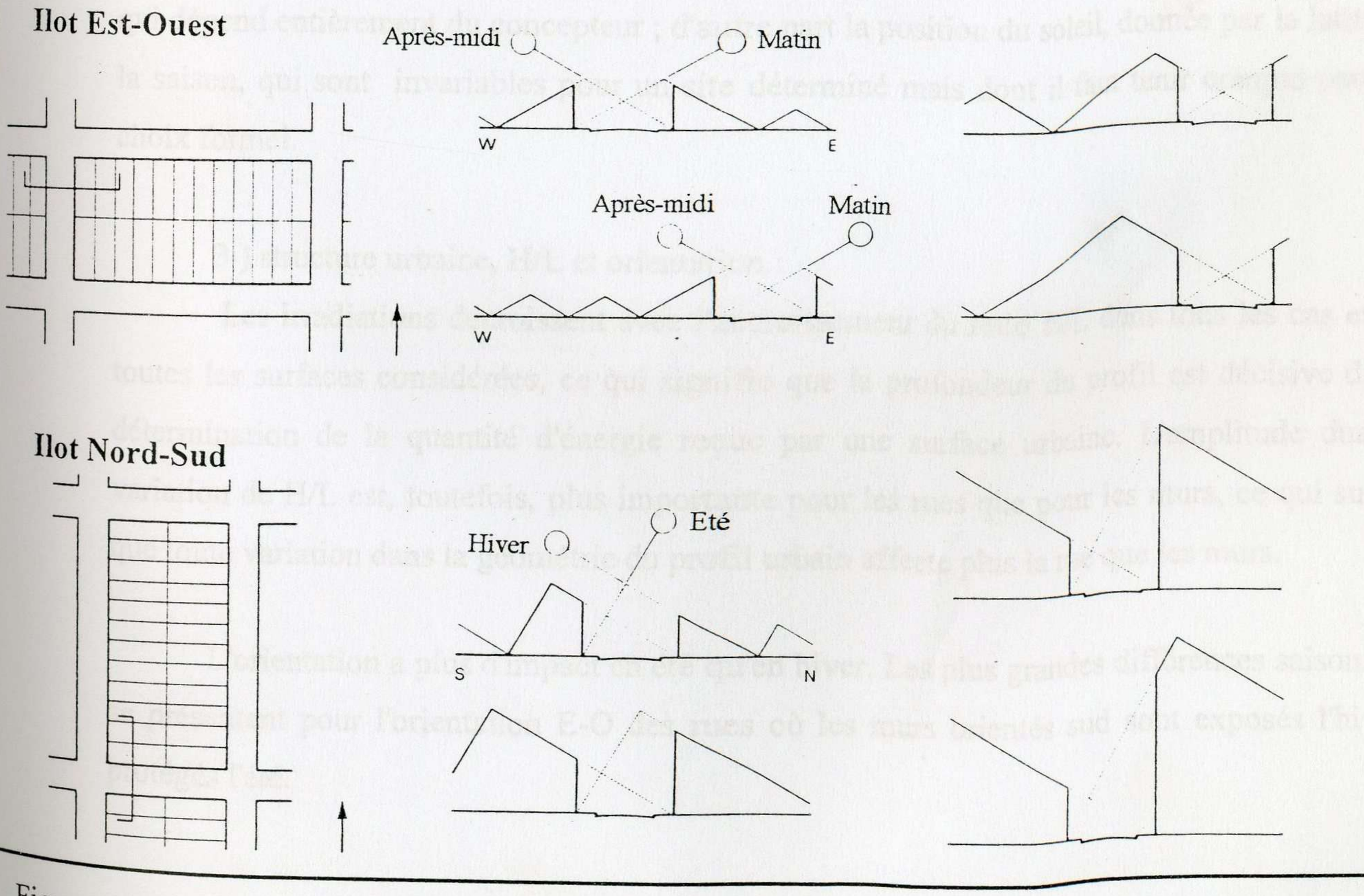


Figure 6.2 : Influence de l'orientation sur l'enveloppe solaire en milieu urbain (Knowles 1981)

données urbaines et environnementales, résumées dans la figure 6.3. Les principaux résultats sont donnés par les figures 6.4, 6.5 et 6.6 et sont interprétés comme suit :

1) les modèles d'irradiations observés sont différents selon que sont considérés : la rue, le mur ou le piéton. Dans tous les cas, les irradiations reçues pour les murs sont nettement plus faibles que pour les rues (les murs reçoivent approximativement la moitié de l'irradiation enregistrée pour les rues). L'irradiation du modèle de piéton présente des similitudes avec les murs dues principalement à la localisation du piéton modélisé en marge de la rue, près du mur, et représenté par une surface verticale. Ceci montre qu'il est possible, quel que soit le lieu considéré, de distinguer deux niveaux de lecture : le niveau haut des bâtiments, donné par les murs et qui correspond à l'espace intérieur et celui correspondant à la rue et qui représente l'espace extérieur, avec considération particulière des bordures de rues, destinées au piéton.

2) Toutes les variables considérées : ratio H/L, orientation, saison et latitude ont des effets importants sur le niveau de disponibilité de la radiation sur les diverses faces d'un profil urbain par temps clair. La combinaison de toutes ces variables crée des situations complexes et spécifiques, difficiles à généraliser. Cependant, nous pouvons grouper ces variables en deux groupes : d'une part, la structure urbaine donnée par le ratio H/L et l'orientation du bâti / soleil, et qui dépend entièrement du concepteur ; d'autre part la position du soleil, donnée par la latitude et la saison, qui sont invariables pour un site déterminé mais dont il faut tenir compte pour tout choix formel.

3) structure urbaine, H/L et orientation :

Les irradiations décroissent avec l'accroissement du ratio H/L dans tous les cas et pour toutes les surfaces considérées, ce qui signifie que la profondeur du profil est décisive dans la détermination de la quantité d'énergie reçue par une surface urbaine. L'amplitude due à la variation de H/L est, toutefois, plus importante pour les rues que pour les murs, ce qui suppose que toute variation dans la géométrie du profil urbain affecte plus la rue que les murs.

L'orientation a plus d'impact en été qu'en hiver. Les plus grandes différences saisonnières se présentent pour l'orientation E-O des rues où les murs orientés sud sont exposés l'hiver et protégés l'été.

Ratio H/L : 0.25 - 0.5 - 1.0 - 2.0 - 3.0 - 4.0

Orientation :Nord, Sud, Est, Ouest

Latitude :de 0°N à 70°N

Saison :Décembre, juin, septembre, mars

Etat du ciel : Clair et Couvert

Albédo :0.15 pour le sol, 0.3 pour les murs

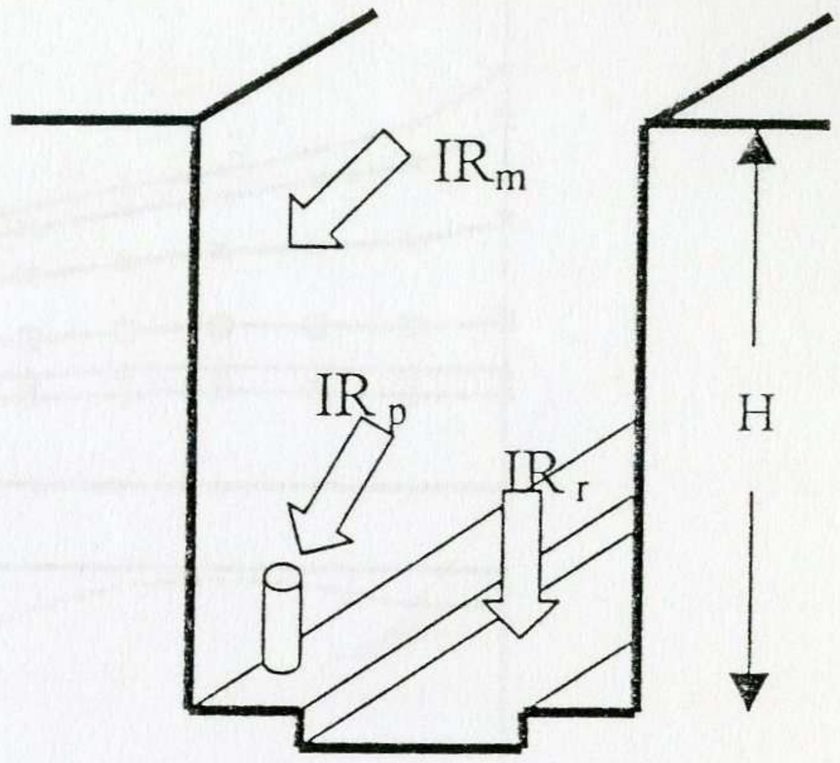


Figure 6.3 : Conditions de simulation de l'accès au soleil pour un profil urbain menée par Arnfield 1990

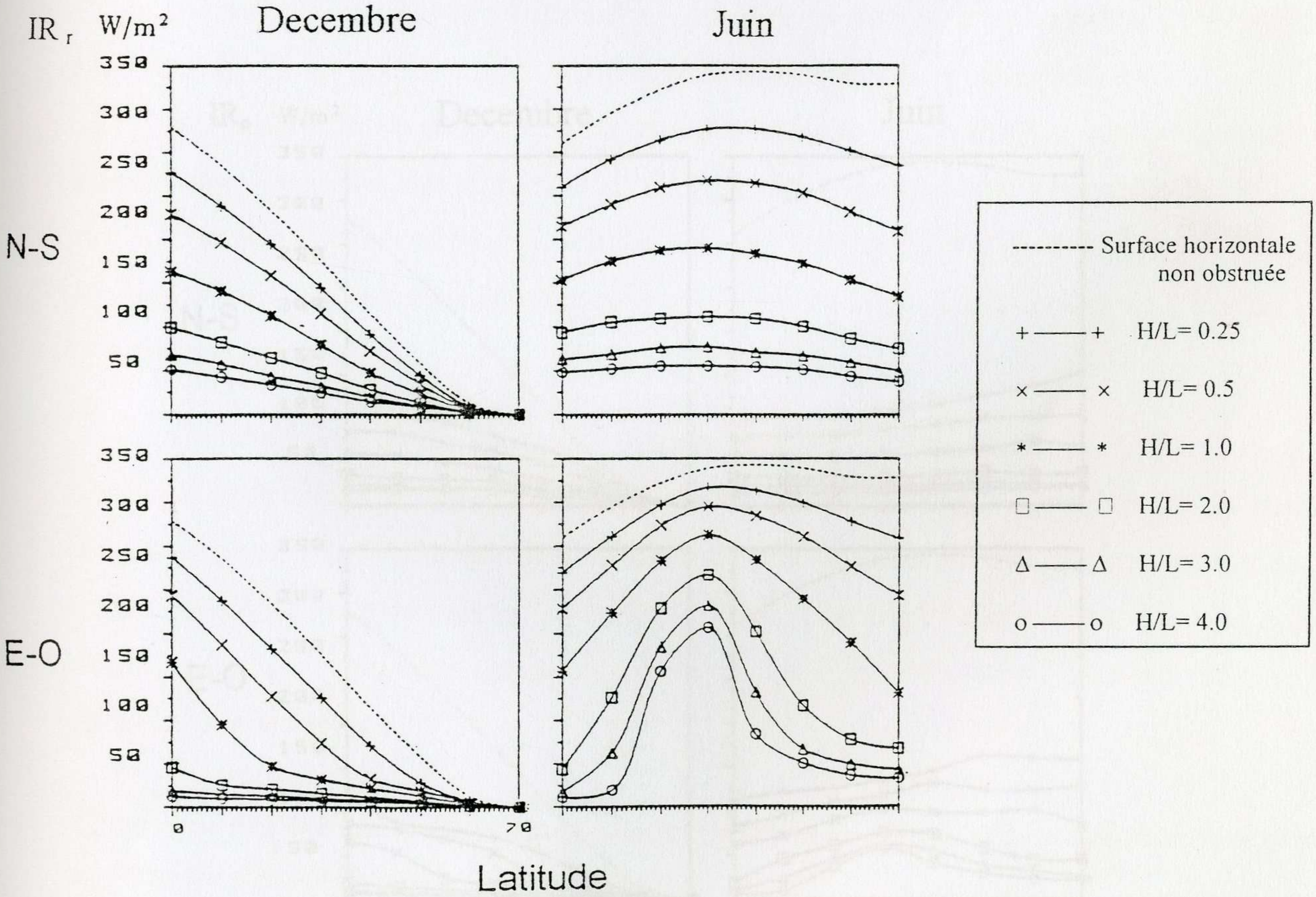


Figure 6.4 : Irradiations au niveau de la rue (W/m^2) en fonction du profil urbain H/L, de l'orientation, la latitude, et la saison (Arnfield 1990).

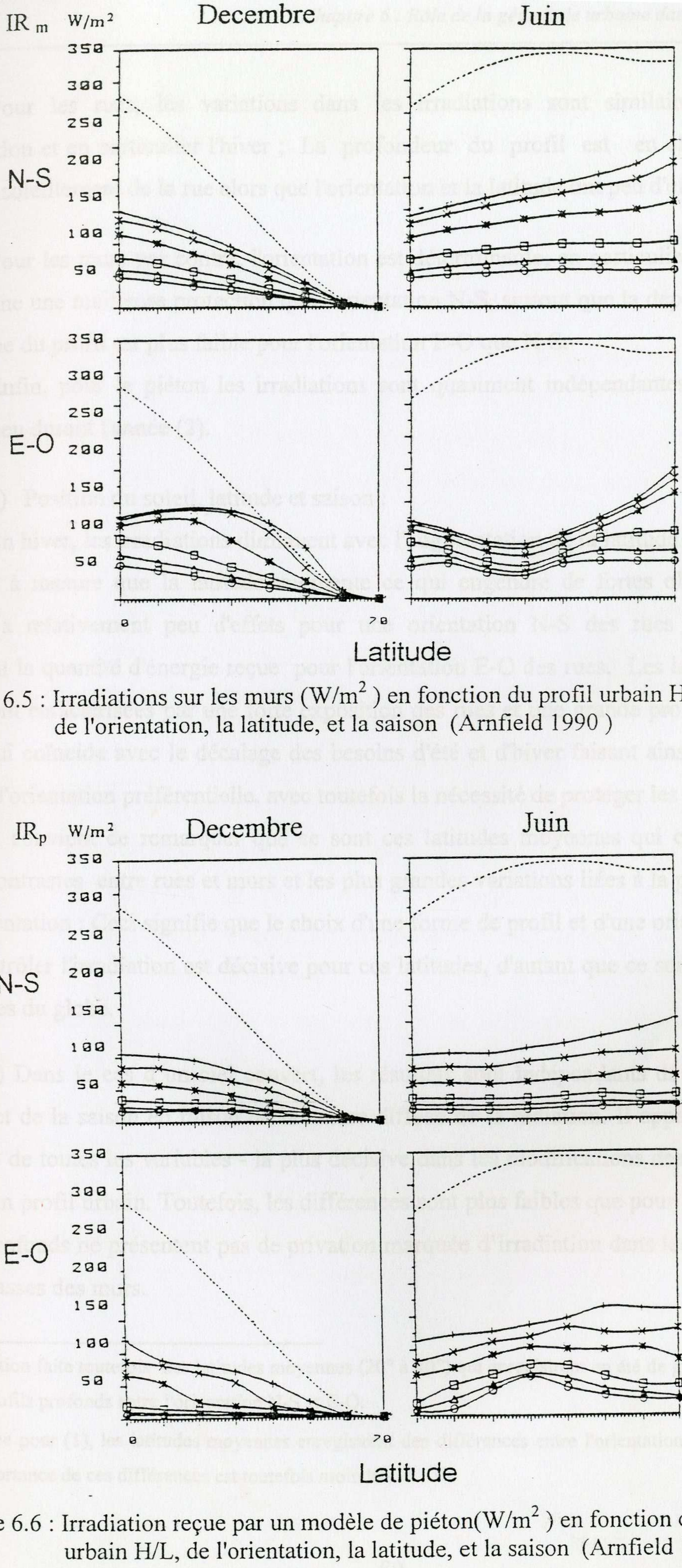


Figure 6.5 : Irradiations sur les murs (W/m^2) en fonction du profil urbain H/L, de l'orientation, la latitude, et la saison (Arnfield 1990)

Figure 6.6 : Irradiation reçue par un modèle de piéton(W/m^2) en fonction du profil urbain H/L, de l'orientation, la latitude, et la saison (Arnfield 1990)

Pour les rues, les variations dans les irradiations sont similaires quelle que soit l'orientation et en particulier l'hiver ; La profondeur du profil est en effet, plus décisive dans l'ensoleillement de la rue alors que l'orientation et la latitude ont peu d'effets (1).

Pour les murs par contre, l'orientation est déterminante, en particulier l'été. L'orientation E-O donne une meilleure protection que l'orientation N-S, surtout que la dépendance par rapport à la forme du profil est plus faible pour l'orientation E-O que N-S.

Enfin, pour le piéton les irradiations sont quasiment indépendantes de l'orientation et varient peu durant l'année (2).

4) Position du soleil, latitude et saison :

En hiver, les irradiations diminuent avec l'augmentation de la latitude puisque le soleil est plus bas à mesure que la latitude augmente ce qui engendre de fortes obstructions. L'été la latitude a relativement peu d'effets pour une orientation N-S des rues mais conditionne fortement la quantité d'énergie reçue pour l'orientation E-O des rues. Les latitudes entre 20° et 40 ° sont caractérisées par une forte exposition des rues et une grande protection des murs en été, et qui coïncide avec le décalage des besoins d'été et d'hiver faisant ainsi de la direction de rue E-O l'orientation préférentielle, avec toutefois la nécessité de protéger les rues.

Il convient de remarquer que ce sont ces latitudes moyennes qui connaissent les plus grands contrastes entre rues et murs et les plus grandes variations liées à la profondeur du profil et à l'orientation ; Ceci signifie que le choix d'une forme de profil et d'une orientation particulière pour contrôler l'irradiation est décisive pour ces latitudes, d'autant que ce sont les zones les plus urbanisées du globe.

5) Dans le cas d'un ciel couvert, les résultats sont indépendants de l'orientation, de la latitude et de la saison en raison de la nature diffuse de la radiation. Il apparaît que la variable H/L est - de toutes les variables - la plus décisive dans les modifications des irradiations sur les faces d'un profil urbain. Toutefois, les différences sont plus faibles que pour un ciel clair, car les profils profonds ne présentent pas de privation marquée d'irradiation dans leurs rues ou dans les parties basses des murs.

---

(1) Exception faite toutefois des latitudes moyennes (20° à 40°) qui enregistrent en été de grandes différences pour des profils profonds entre l'orientation N-S et E-O.

(2) Comme pour (1), les latitudes moyennes enregistrent des différences entre l'orientation N-S et E-O des rues ; L'importance de ces différences est toutefois moindre.

6) Les résultats de cette recherche font apparaître l'importance à la fois de la forme du profil et du potentiel de radiation lié à la position en latitude, à travers la hauteur du soleil et la longueur du jour. Ainsi, pour isoler le rôle de la géométrie de la rue (H/L), Arnfield (1990) propose l'utilisation de l'indice d'accès au soleil (i. A. S) qui représente l'irradiation calculée pour une surface en milieu urbain rapportée à l'irradiation solaire en milieu dégagé et qui varie entre 0 et 1. Elle peut, de ce fait, constituer une représentation intéressante pour l'urbanisme.

La figure 6.7 en est un exemple. Les graphiques sont élaborés sur la base des données d'Arnfield (1990), ils représentent les indices d'accès au soleil pour les murs, la rue et pour un piéton, en fonction du profil vertical H/L. Le réseau urbain est en grille, c'est à dire donnant les valeurs moyennes entre orientation N-S et E-O, pour toutes les saisons et pour une latitude déterminée, en l'occurrence 30°N.

Cette représentation permet la comparaison entre le niveau de la rue et la partie supérieure des bâtiments et aide à estimer un profil vertical qui tient compte aussi bien des besoins d'ensoleillement dans les espaces intérieurs (murs) que l'environnement thermique de la rue et le confort d'un piéton dans cette rue.

Egalement, Pereira et Minache (1989) ont présenté une recherche basée sur ce principe d'accès au soleil. Ils utilisent le critère d'ensoleillement souhaitable (ES) ou non souhaitable (ENS) pour permettre la détermination de H/L. La figure 6.8 considère l'ensoleillement des murs. Elle décrit l'ajustement des profils urbains, à l'origine fixés à 70° (1), grâce à l'utilisation de ces indices d'accès d'ensoleillement souhaitable ou non souhaitable.

La figure 6.8a résume les exigences climatiques de la zone. Sur la figure 6.8b est reporté le total d'heures d'ensoleillement recherché ou à éviter en fonction de la saison et de la période dans la journée, en optant pour une moyenne de 1,5 à 3 heures d'ensoleillement minimum toute l'année. Il a, ainsi, été possible de définir les hauteurs de bâtiments préférentielles (figure 6.8c) où l'on remarque une plage de variations de H / L importante, entre 53° et 85°.

Ces différences révèlent que la considération de l'orientation est décisive dans la détermination du niveau d'accès au soleil compte tenu de la géométrie solaire. Ceci montre que l'obligation d'un gabarit moyen pour l'ensemble du tissu urbain n'est pas pertinente et qu'il est

---

(1) Cet angle est rendu obligatoire par une législation qui régit les gabarits pour garantir l'accès au soleil ; Toutefois ce critère en étant généralisé à toutes les orientations devient contraignant sans être efficace.

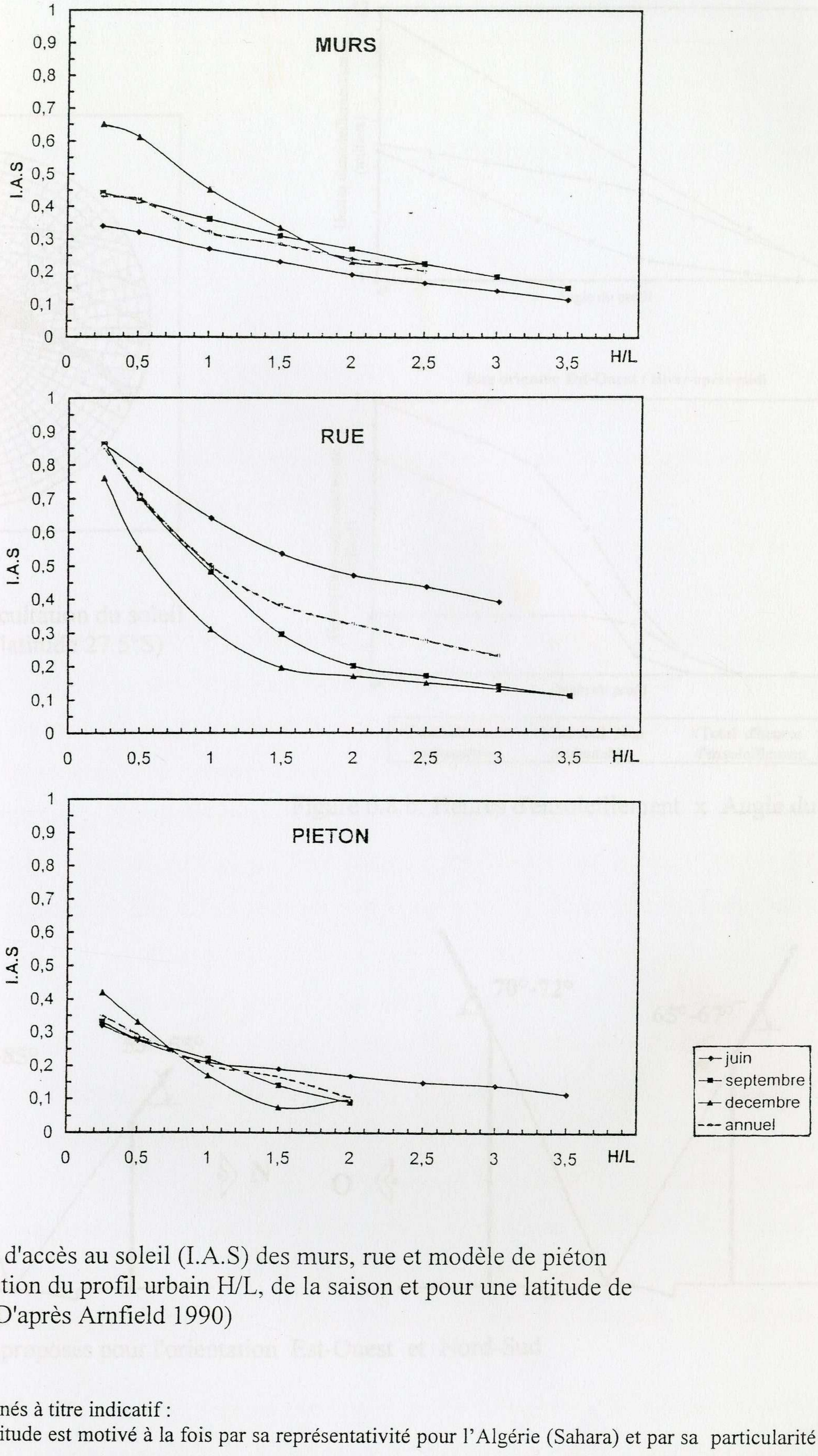


Figure 6.7 : Indices d'accès au soleil (I.A.S) des murs, rue et modèle de piéton en fonction du profil urbain H/L, de la saison et pour une latitude de 30° N (D'après Arnfield 1990)

Ces graphiques sont donnés à titre indicatif :

1) Le choix de cette latitude est motivé à la fois par sa représentativité pour l'Algérie (Sahara) et par sa particularité constatée dans l'analyse (Cf. figure 6.4 et 6.5)

2) Ces graphes ne sont pas élaborés pour les orientations N-S et E-O par manque de données. Toutefois, Arnfield (1990) suggère la tabulation de ces indices, de les présenter en monogramme ou sous forme de formules. En effet, le choix de la grille est peu pertinent lors d'une composition urbaine et il convient de dissocier les orientations N-S et E-O étant donné l'importance que nous connaissons à l'orientation dans la définition de la qualité de l'ensoleillement.

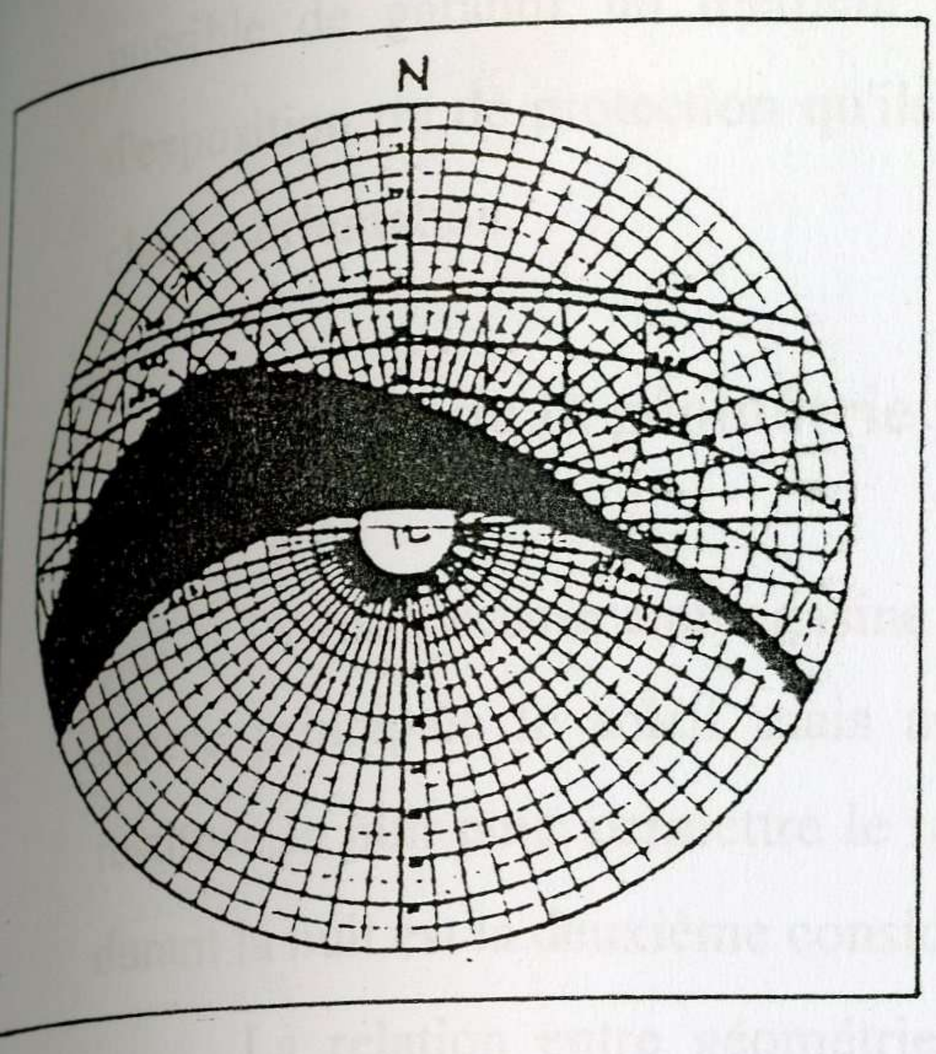


Figure 6.8 a :

Période nécessitant l'occultation du soleil
(Florianopolis, Brésil, latitude 27.5°S)

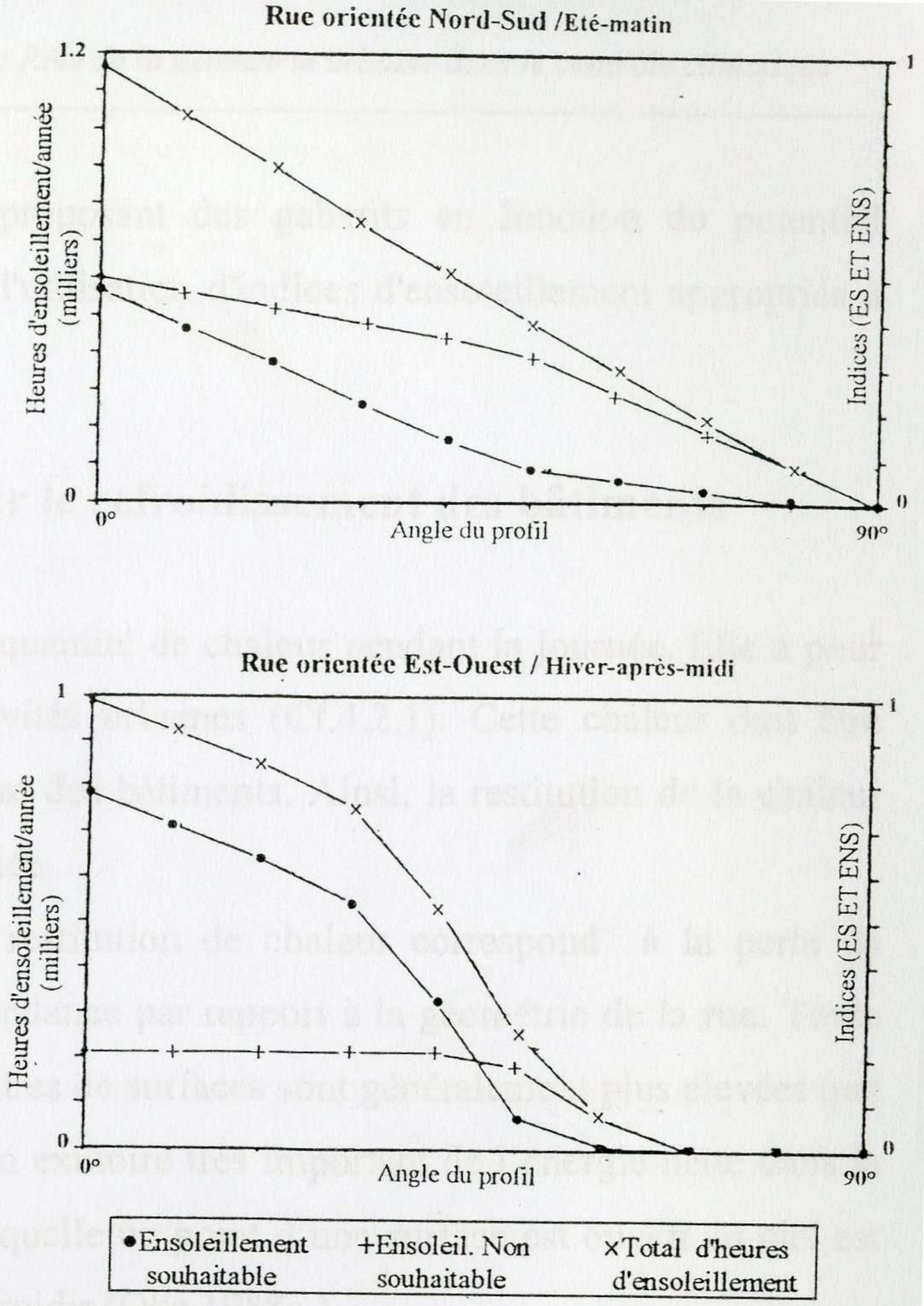


Figure 6.8 b: Heures d'ensoleillement x Angle du profil

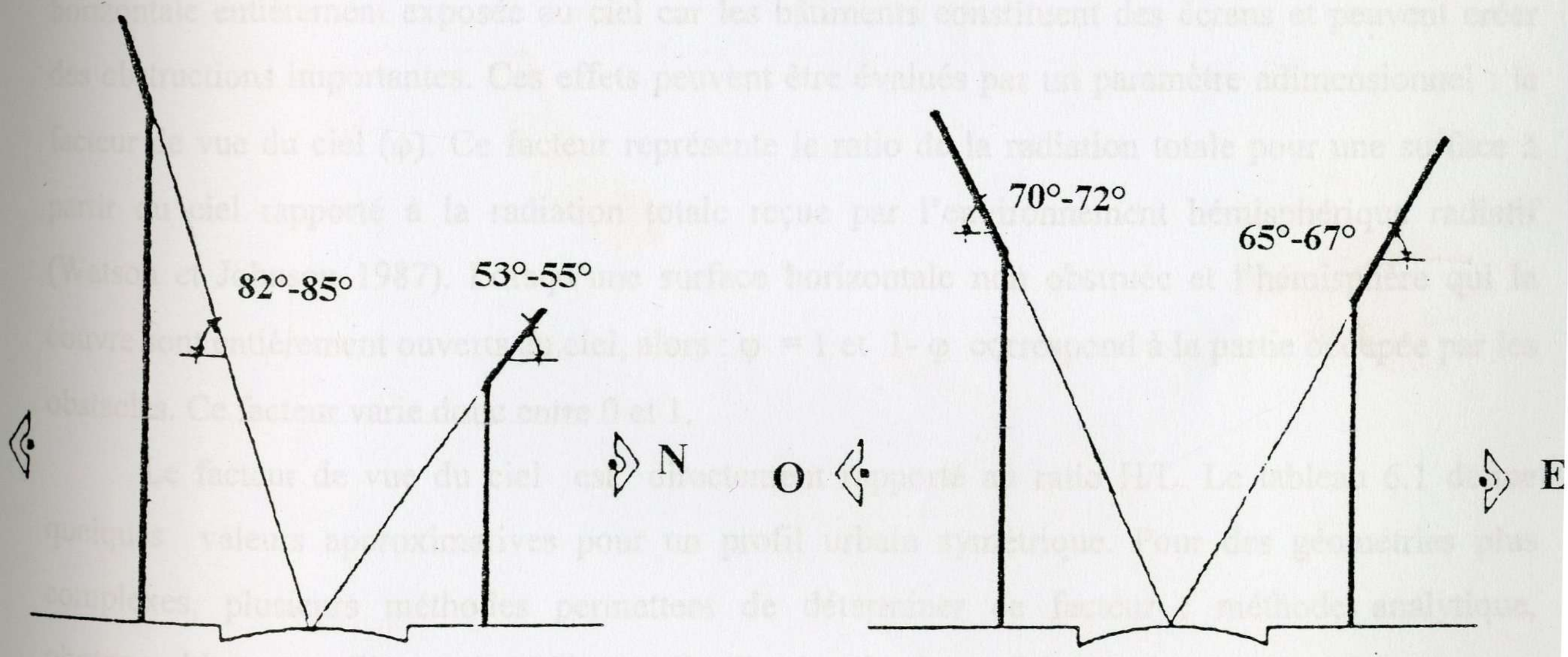


Figure 6.8 c : Angles proposés pour l'orientation Est-Ouest et Nord-Sud

e 6.8 : Détermination de profils urbains par la prise en compte du temps d'ensoleillement souhaitable et des indices d'accès au soleil (Pereira et Minache 1989).

possible de garantir un meilleur confort en proposant des gabarits en fonction du potentiel d'exposition ou de protection qu'ils offrent par l'utilisation d'indices d'ensoleillement appropriés à chaque orientation.

6.2.2 Impact de la géométrie urbaine sur le refroidissement des bâtiments

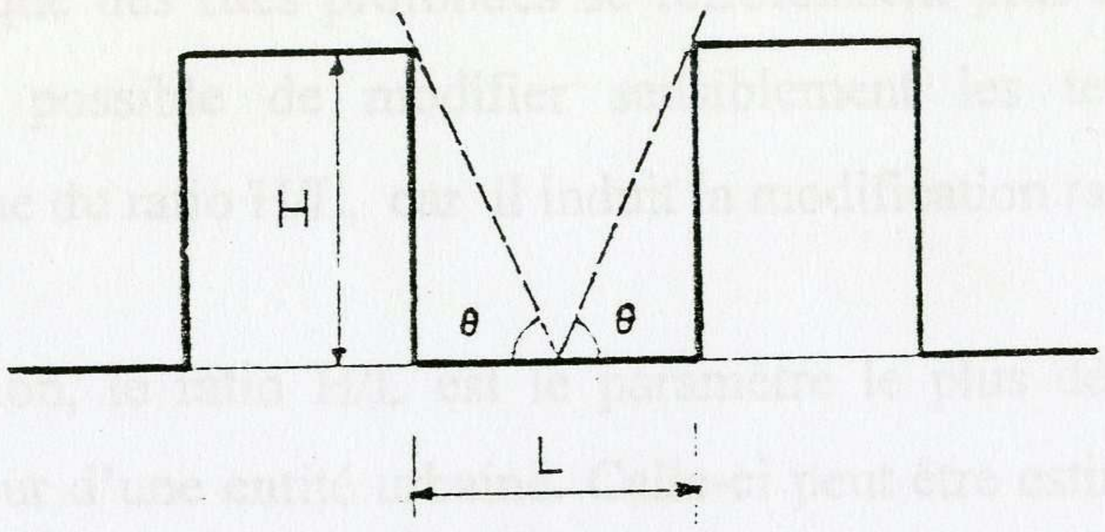
Le tissu urbain emmagasine une grande quantité de chaleur pendant la journée. Elle a pour source principale le soleil mais aussi les activités urbaines (Cf.4.2.1). Cette chaleur doit être restituée la nuit pour permettre le refroidissement des bâtiments. Ainsi, la restitution de la chaleur durant la nuit est la deuxième considération étudiée.

La relation entre géométrie urbaine et restitution de chaleur correspond à la perte de radiation en grande longueur d'onde et sa dépendance par rapport à la géométrie de la rue. Toute surface ouverte au ciel rayonne, car les températures de surfaces sont généralement plus élevées que les températures du ciel. De ce fait, le ciel est un exutoire très important de l'énergie nette dans la région infrarouge. Par conséquent l'étendue à laquelle un point d'une surface est ouvert au ciel est une considération importante de sa capacité à refroidir (Oke 1988a).

En milieu urbain, le refroidissement des surfaces est très différent par rapport à une surface horizontale entièrement exposée au ciel car les bâtiments constituent des écrans et peuvent créer des obstructions importantes. Ces effets peuvent être évalués par un paramètre adimensionnel : le facteur de vue du ciel (φ). Ce facteur représente le ratio de la radiation totale pour une surface à partir du ciel rapporté à la radiation totale reçue par l'environnement hémisphérique radiatif (Watson et Johnson 1987). Lorsqu'une surface horizontale non obstruée et l'hémisphère qui la couvre sont entièrement ouverts au ciel, alors : $\varphi = 1$ et $1-\varphi$ correspond à la partie occupée par les obstacles. Ce facteur varie donc entre 0 et 1.

Le facteur de vue du ciel est directement rapporté au ratio H/L. Le tableau 6.1 donne quelques valeurs approximatives pour un profil urbain symétrique. Pour des géométries plus complexes, plusieurs méthodes permettent de déterminer ce facteur : méthode analytique, photographique ou d'imagerie vidéo par l'utilisation de photo fish-eye (watson et Johnson 1987).

Oke (1988a) affirme que les valeurs maximales de l'îlot de chaleur urbain sont linéairement rapportées à (φ) et par conséquent à la géométrie de la rue, donnée par H/L au centre ville. Etant donnée la situation calme et claire considérée, la figure 6.9 montre que l'effet d'écran des bâtiments lié au ratio H/L est responsable de cette augmentation.



$$\varphi = \cos\left(\tan^{-1}(H/0.5L)\right)$$

H/L	0	0.25	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
θ	0°	27°	45°	63°	76°	81°	83°
φ	1.00	0.89	0.71	0.45	0.24	0.16	0.12

Tableau 6.1 : Relation entre profil de la rue (H/L) et vue du ciel (F.V.C) montrant que le profil de rue est profond plus faible est la vue du ciel (Oke 1988)

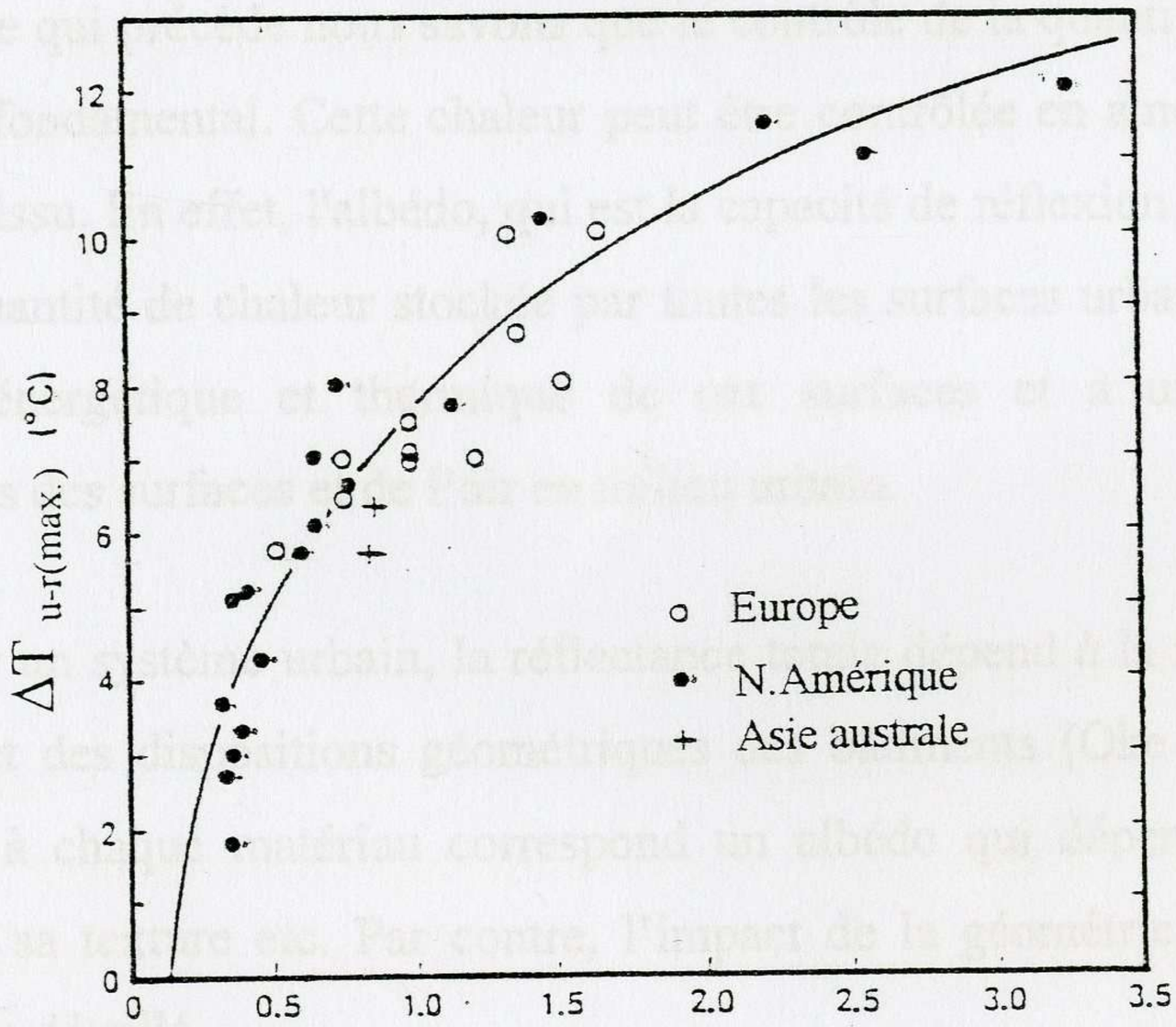


Figure 6.9 : Influence de la géométrie de la rue (H/L au centre-ville) sur les maxima de l'îlot de chaleur pour quelques villes de latitudes moyennes. L'îlot de chaleur est favorisé par l'augmentation de H/L (Oke 1988a)

Il apparaît que des rues profondes se refroidissent plus lentement que des rues larges. Egalement, il est possible de modifier sensiblement les températures urbaines, par un changement minime du ratio H/L, car il induit la modification rapide de φ .

En conclusion, le ratio H/L est le paramètre le plus déterminant dans la capacité de restitution de chaleur d'une entité urbaine. Celle-ci peut être estimée par l'utilisation du facteur de vue du ciel φ , considéré comme un indicateur intéressant du comportement environnemental d'une entité urbaine vis-à-vis du refroidissement nocturne et par conséquent des températures urbaines résultantes. (Oke 1988a, Lindqvist 1992).

Enfin, en complément à ce qui précède, il convient de rappeler que pour améliorer le refroidissement urbain plusieurs actions complémentaires peuvent être envisagées :

1 – Agir, au préalable, sur la quantité de radiation stockée par la maîtrise de la densité et de l'albédo (cf.6.2.3)

2 - Exploitation de la ventilation urbaine (cf. 6.3)

6.2.3 Effets de la géométrie urbaine sur l'albédo urbain

De ce qui précède nous savons que le contrôle de la quantité de chaleur emmagasinée par le tissu est fondamental. Cette chaleur peut être contrôlée en amont par l'albédo ou réflectance globale du tissu. En effet, l'albédo, qui est la capacité de réflexion du rayonnement d'une surface, définit la quantité de chaleur stockée par toutes les surfaces urbaines. De ce fait, il conditionne l'équilibre énergétique et thermique de ces surfaces et a une incidence directe sur les températures des surfaces et de l'air en milieu urbain.

Pour un système urbain, la réflectance totale dépend à la fois de l'albédo spécifique des matériaux et des dispositions géométriques des bâtiments (Oke 1988a). Le premier est bien connu, car à chaque matériau correspond un albédo qui dépend de ses composantes, de sa couleur, de sa texture etc. Par contre, l'impact de la géométrie urbaine est plus complexe et mérite d'être détaillé.

Globalement, l'albédo d'une surface crénelée est moindre que celle d'une surface plane (Oke, 1988a). L'albédo dépend aussi de l'angle d'incidence des rayons solaires sur une surface.

Ainsi il augmente lorsque les rayons forment un angle faible avec la surface et diminuent jusqu'à devenir minimal pour un rayonnement qui lui est perpendiculaire (Escourrou 1981). Aussi, il semblerait que cet effet s'accroît avec la latitude, car le soleil est moins haut, et les saisons d'hiver par rapport à l'été. (Escourrou, 1981, Aida, 1982).

Hormis la position, du soleil, la géométrie urbaine serait également déterminante. En effet, la réflexion du rayonnement solaire direct diminue avec l'augmentation du ratio H/L. Ainsi, plus un profil urbain est profond plus grande est l'absorption du rayonnement favorisée par les multiples réflexions sur les différentes faces (Oke, 1988a ; Givoni, 1989) Enfin, plus l'emprise au sol est élevée plus grande est la quantité de radiation réfléchie (Aida 1982).

Quelques-unes de ces informations sont vérifiées par les travaux de Aida (1982) et Aida et Gotoh (1982) ; En particulier celles relatives à la géométrie du bâti. Elles sont présentées ci-après.

Aida (1982) examine la relation entre radiation solaire globale, directe et diffuse et sa réflexion sur des modèles expérimentaux représentant une structure urbaine. Le but étant de déterminer comment la structure urbaine modifie ses propriétés de réflexion attribuée simplement à la géométrie, la qualité de surface étant fixée (figure 6.10).

Les résultats montrent que l'albédo décroît lorsque les irrégularités de surfaces augmentent. Ces changements sont fonction de la hauteur du soleil au zénith tout au long de l'année (figure 6.11). L'augmentation de l'absorption due à ces irrégularités est d'environ 20%. L'orientation semble avoir peu d'effets.

Une recherche similaire est menée par le moyen d'une simulation numérique bidimentionnelle (Aida et Gotoh 1982). Le réseau considéré est parallèle à la direction N-S (figure 6.12).

Cette étude a révélé la forte dépendance de l'albédo par rapport au ratio largeur du bâtiment/largeur de la rue (L_1/L_2) et par conséquent sur la densité du plan ρ (1). La dépendance de l'angle d'incidence est examinée pour des angles variant entre 0° et 80°. Le profil vertical H/L_2 est maintenu constant et égal à 1. La figure 6.12 montre que les valeurs les plus élevées correspondent à des valeurs L_1/L_2 élevées. De même l'albédo minimal apparaît lorsque L_1/L_2 est proche de 0,5 pour toutes les hauteurs de soleil.

---

(1) L_1/L_2 est proportionnel à L_1/L_1+L_2, tel que L_1+L_2 =surface totale. $\rho = L_1/L_1+L_2$ correspond à la densité du plan.

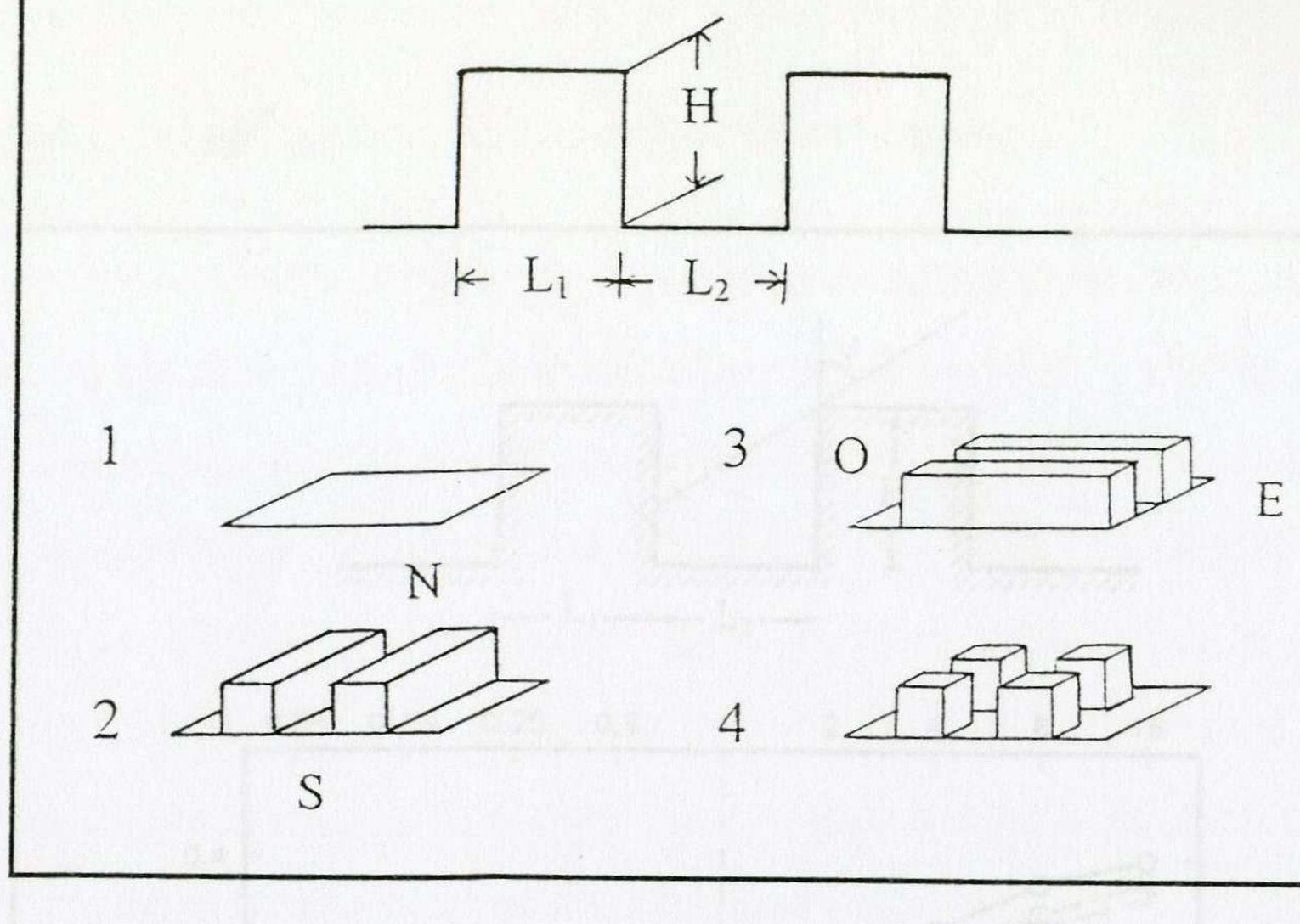


Figure 6.10 : Géometries urbaines utilisées pour l'étude de l'albédo urbain (Aida 1982

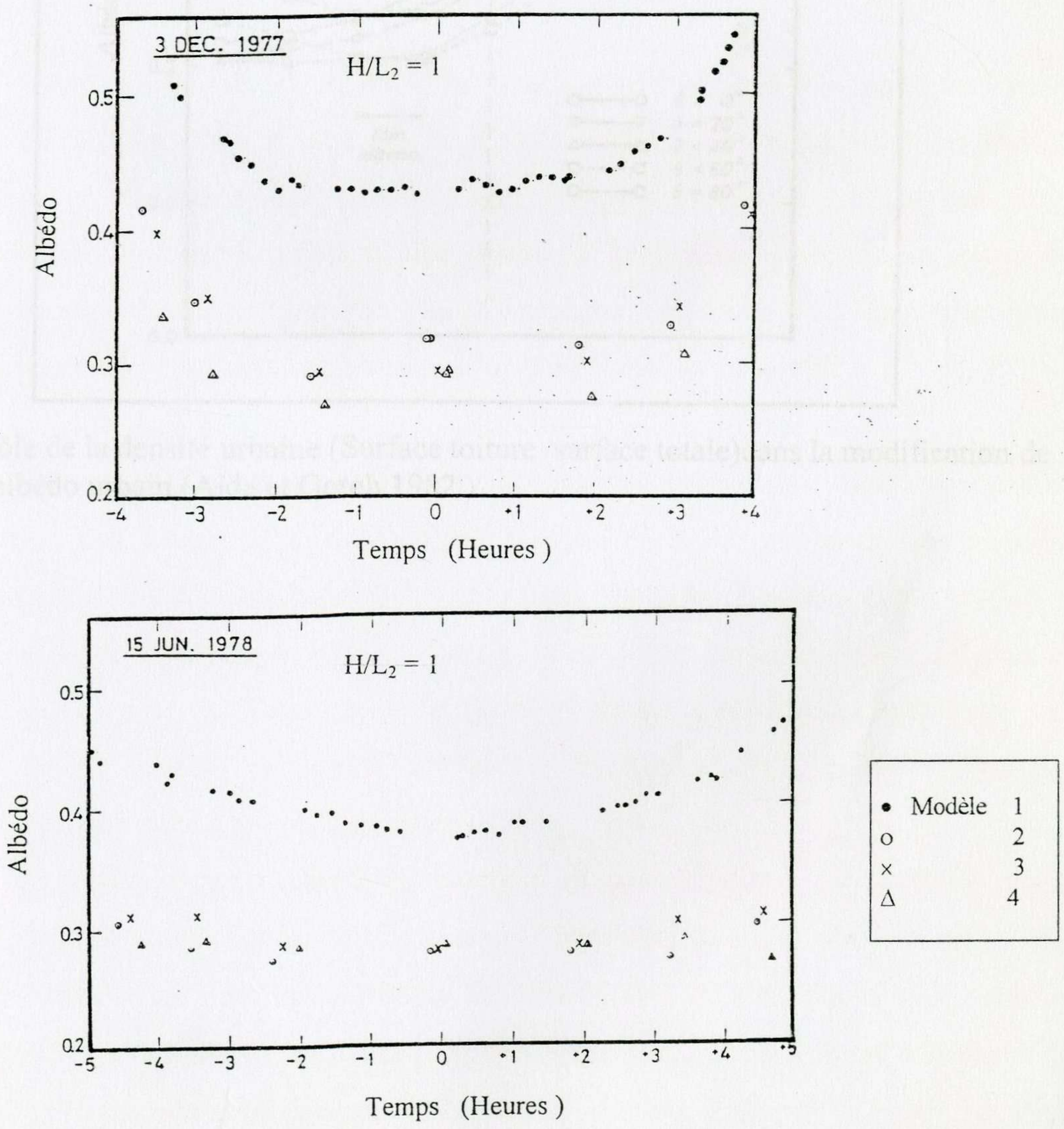


Figure 6.11 : Variation de l'albédo en fonction de la géométrie urbaine comparée à une surface plane exposée, en hiver et en été. (Aida et Gotoh 1982)

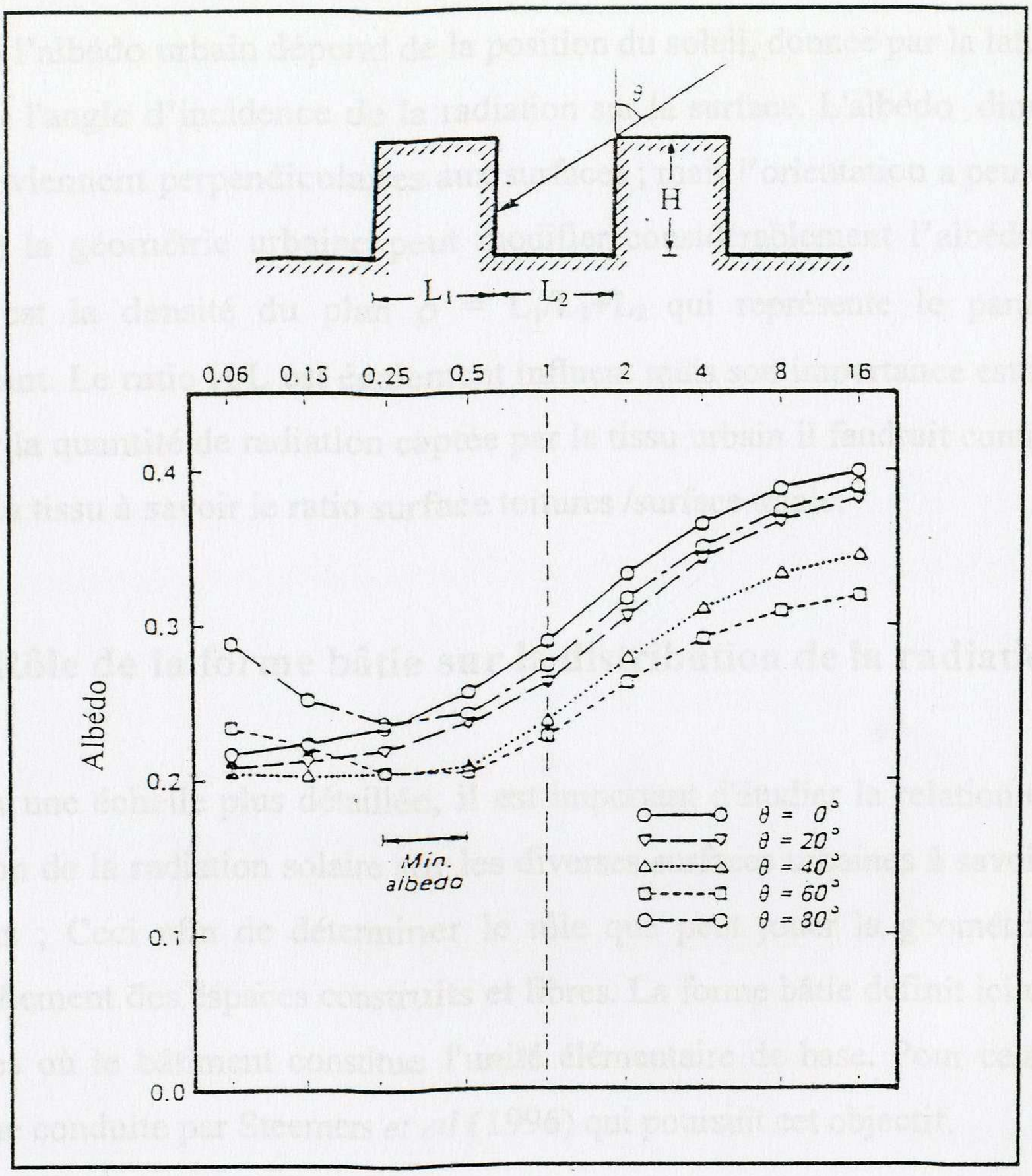


Figure 6.12 : Rôle de la densité urbaine (Surface toiture /surface totale)dans la modification de l'albédo urbain (Aida et Gotoh 1982)

Quelques conclusions peuvent donc être énoncées :

1) l'albédo urbain dépend de la position du soleil, donnée par la latitude et la saison et qui détermine l'angle d'incidence de la radiation sur la surface. L'albédo diminue à mesure que les rayons deviennent perpendiculaires aux surfaces ; mais l'orientation a peu d'effet.

2) la géométrie urbaine peut modifier considérablement l'albédo jusqu'à atteindre les 20%. C'est la densité du plan $\rho = L_1/L_1+L_2$ qui représente le paramètre urbain le plus déterminant. Le ratio H/L est également influent mais son importance est secondaire. Ainsi pour contrôler la quantité de radiation captée par le tissu urbain il faudrait contrôler principalement la densité du tissu à savoir le ratio surface toitures /surface totale.

6.2.4 Rôle de la forme bâtie sur la distribution de la radiation solaire

A une échelle plus détaillée, il est important d'étudier la relation entre forme urbaine et répartition de la radiation solaire sur les diverses surfaces urbaines à savoir bâtiments et espaces non bâtis ; Ceci afin de déterminer le rôle que peut jouer la géométrie des bâtiments dans l'ensoleillement des espaces construits et libres. La forme bâtie définit ici un réseau de bâtiments similaires où le bâtiment constitue l'unité élémentaire de base. Pour cela nous présentons une recherche conduite par Steemers *et al* (1996) qui poursuit cet objectif.

Dans le but d'isoler le rôle de la forme du bâti et permettre la comparaison entre plusieurs géométries, des formes génériques ont été choisies où seules les propriétés géométriques sont variables, à savoir les dimensions des bâtiments. En effet, Le ratio entre surface plancher et surface totale du site est maintenu constant pour conserver la même densité d'occupation du site. De même que pour maintenir le même potentiel de fonctionnement passif entre les différents bâtiments, les auteurs proposent d'utiliser l'indicateur aire passive / aire active qu'ils maintiennent constant dans ce cas (figure 6.13).

Le fonctionnement passif est entendu ici comme étant la possibilité d'utilisation de moyens passifs pour l'exploitation des énergies naturelles pour l'ensoleillement et l'éclairage ; Il est directement rapporté au pourcentage de l'aire passive tel que celle-ci représente une surface profonde de 5 ÷ 6 mètres à partir des parois extérieures et qui correspond à la partie du bâtiment ensoleillée et éclairée naturellement (Steemers *et al* 1996, Baker et al 1996) ; A l'inverse l'aire active est la partie du bâtiment où des moyens actifs de chauffage et d'éclairage sont nécessaires.

L'analyse est faite numériquement par le calcul de la radiation incidente sur les surfaces des bâtiments et sur le sol en tenant compte à la fois des obstructions et des premières réflexions du rayonnement. Le tableau 6.2 résume les résultats de cette simulation.

Cette expérience révèle que le captage et la distribution de la radiation sur les différentes surfaces réceptrices sont fortement conditionnés par la forme du bâtiment et le mode d'assemblage qu'il induit. D'une part, le choix de la forme décide de la répartition de la radiation entre les surfaces d'un même bâtiment à savoir les surfaces verticales des murs et les toitures et d'autre part, entre bâtiment et sol c'est-à-dire ensoleillement intérieur et extérieur.

C'est ainsi que la tour favorise le captage sur les murs et l'îlot sur les toits. Le réseau de tours totalise la plus grande quantité de radiation incidente due à l'importance des surfaces verticales relativement sans ombres tandis que l'îlot reçoit le plus grand pourcentage de radiation sur ses surfaces dont plus de la moitié sur les toitures. L'îlot capte moins de radiation sur les surfaces verticales que les tours en raison de leur obstruction partielle. Il convient de relever ici, que la densité du bâti donnée par le ratio surface toiture / surface totale apparaît comme déterminant dans cette distribution.

La géométrie du bâtiment conditionne la géométrie du réseau et donc la géométrie de l'espace libre ce qui, par conséquent, a un impact direct sur l'ensoleillement des espaces extérieurs, et sur le captage solaire intérieur. Les résultats concernant l'irradiation du sol donnent pour le réseau de tours le plus grand taux, car leur emprise au sol est la plus faible. Cependant le réseau d'îlots fournit le meilleur pourcentage d'exposition du sol par unité de surface (m^2). Ceci signifie que les tours permettent l'ensoleillement à une surface du sol plus étendue mais la durée d'ensoleillement est plus grande pour l'îlot.

Enfin, la forme du bâtiment décide de l'importance plus ou moins grande de l'orientation par rapport à la quantité de radiation captée. Dans ce cas la forme allongée est la forme la plus affectée par l'orientation, en l'occurrence la barre parce que la proportion de surfaces exposées pour chaque orientation présente ici les plus grands écarts. A l'inverse les autres géométries sont moins affectées par l'orientation car les proportions varient peu avec l'orientation.

Cependant, l'orientation et la qualité de la radiation sont moins bien évaluées car cette expérience considère le total annuel de la radiation solaire sans considération des variations saisonnières ou des composantes directes ou réfléchies de la radiation mais l'importance de ces aspects a déjà été relevée par d'autres travaux (Cf. 6.2.1).

Conditions de simulation

Latitude : 52°N

Orientation : N, S, E, O

Période : annuelle

Radiation : directe & diffuse

Destination : bureaux

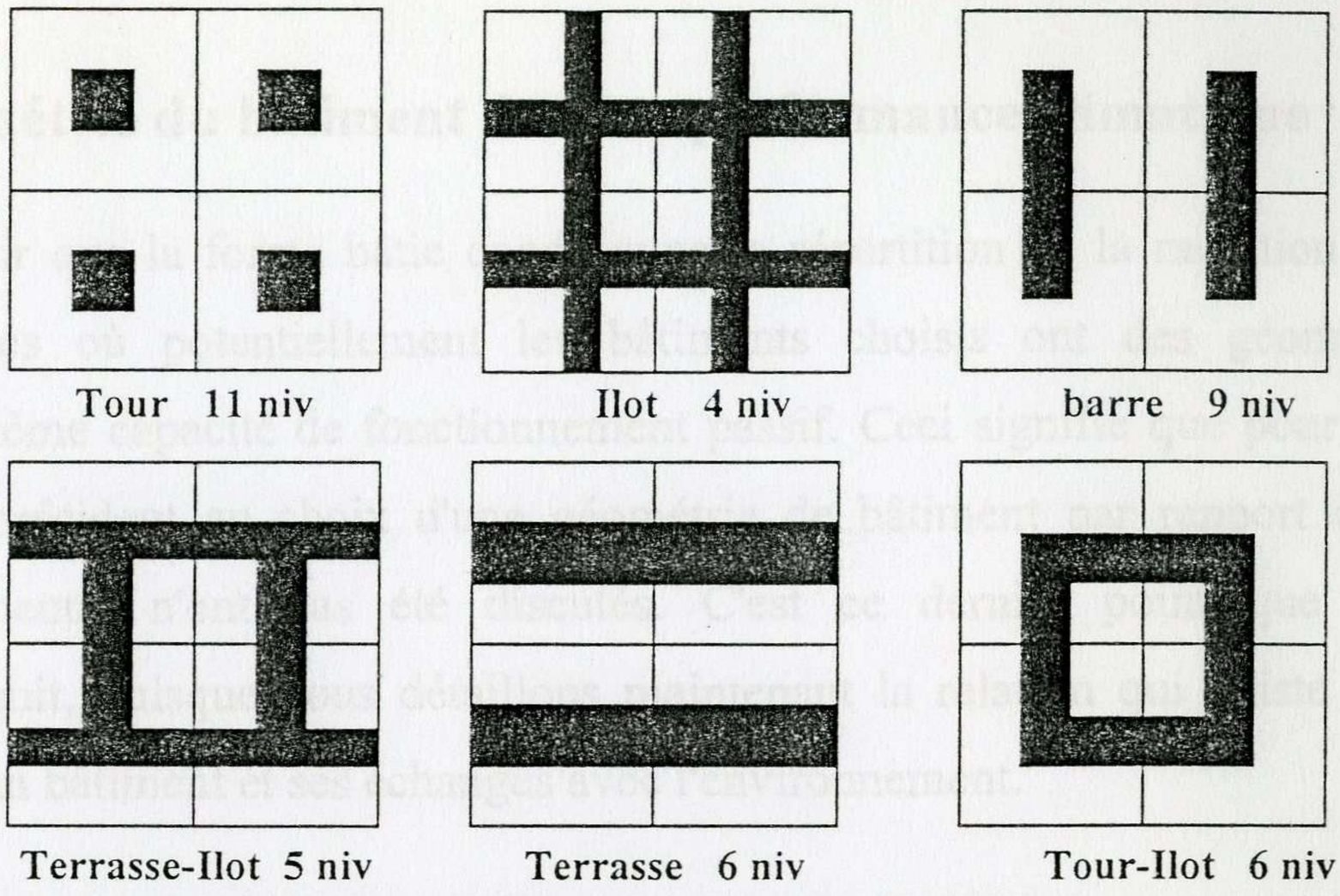


Figure 6.13 : Les formes bâties utilisées pour évaluer l'impact de la géométrie sur la répartition de la radiation solaire en milieu urbain (Steemers *et al* 1996)

FORME	Toutes les surfaces du bâtiment		Surfaces verticales		Sol seulement		Total (Bâtiment + Sol)	
Pavillon	6.79	91%	5.35	100%	6.88	100%	13.67	100%
Barre E – O	6.17	83%	4.56	85%	6.55	95%	12.72	93%
Barre N-S	5.89	79%	4.28	80%	6.17	90%	12.06	88%
Ilot	7.48	100%	3.65	68%	5.22	76%	12.70	93%
Albédo des murs : 40%					Albédo du sol : 20%			

Tableau 6.2 : Comparaison de la radiation solaire incidente annuelle (directe et diffuse) pour trois formes génériques donnée en TJ (Steemers *et al* 1996)

6.2.5 Rôle de la géométrie du bâtiment dans sa performance climatique

Nous venons de voir que la forme bâtie conditionne la répartition de la radiation pour diverses situations urbaines où potentiellement les bâtiments choisis ont des géométries différentes mais ont la même capacité de fonctionnement passif. Ceci signifie que pour cette recherche les motifs qui président au choix d'une géométrie de bâtiment par rapport à son comportement environnemental n'ont pas été discutés. C'est ce dernier point que nous développons dans ce qui suit, puisque nous détaillons maintenant la relation qui existe entre propriétés géométriques d'un bâtiment et ses échanges avec l'environnement.

Les échanges entre le bâtiment et l'extérieur se font par le biais de son enveloppe. Ces échanges concernent aussi bien les gains solaires (ensoleillement) que les déperditions thermiques (isolation). Le descripteur-clé de ces échanges est donné par Le ratio surface/volume, qui est le total des surfaces extérieures d'un bâtiment, rapportées au volume qu'il renferme.

La pertinence d'utiliser le ratio S/V réside dans sa capacité à décrire la taille et la forme d'un bâtiment par rapport à son comportement environnemental. En effet, le ratio surface / volume est donné pour être révélateur de la distance moyenne d'un occupant par rapport à l'enveloppe et par conséquent des proportions de l'aire passive (Baker *et al* 1996).

a- Taille du bâtiment

L'importance de la taille est illustrée par la figure 6.14, qui considère l'évolution de S/V pour une forme cubique de coté x, variable. Elle révèle une diminution de S/ V lorsque la taille du bâtiment augmente, car le volume (x^3) s'accroît plus rapidement que la surface (x^2). Ceci signifie que pour augmenter la compacité d'un bâtiment, il faut choisir des ratios S/V faibles et donc de grands volumes. Inversement, plus le bâti est petit plus il est exposé à l'extérieur et est caractérisé par S/V important.

Le rôle de la taille dans le contrôle du niveau d'exposition ou de compacité par le biais de l'aire passive est donnée par la figure 6.15. Elle montre une relation proportionnelle entre S/V et P (%), pour des formes cubiques. Il apparaît que plus le ratio S/V augmente, plus le niveau d'exposition et donc d'échanges est important, ce qui accroît l'aire passive.

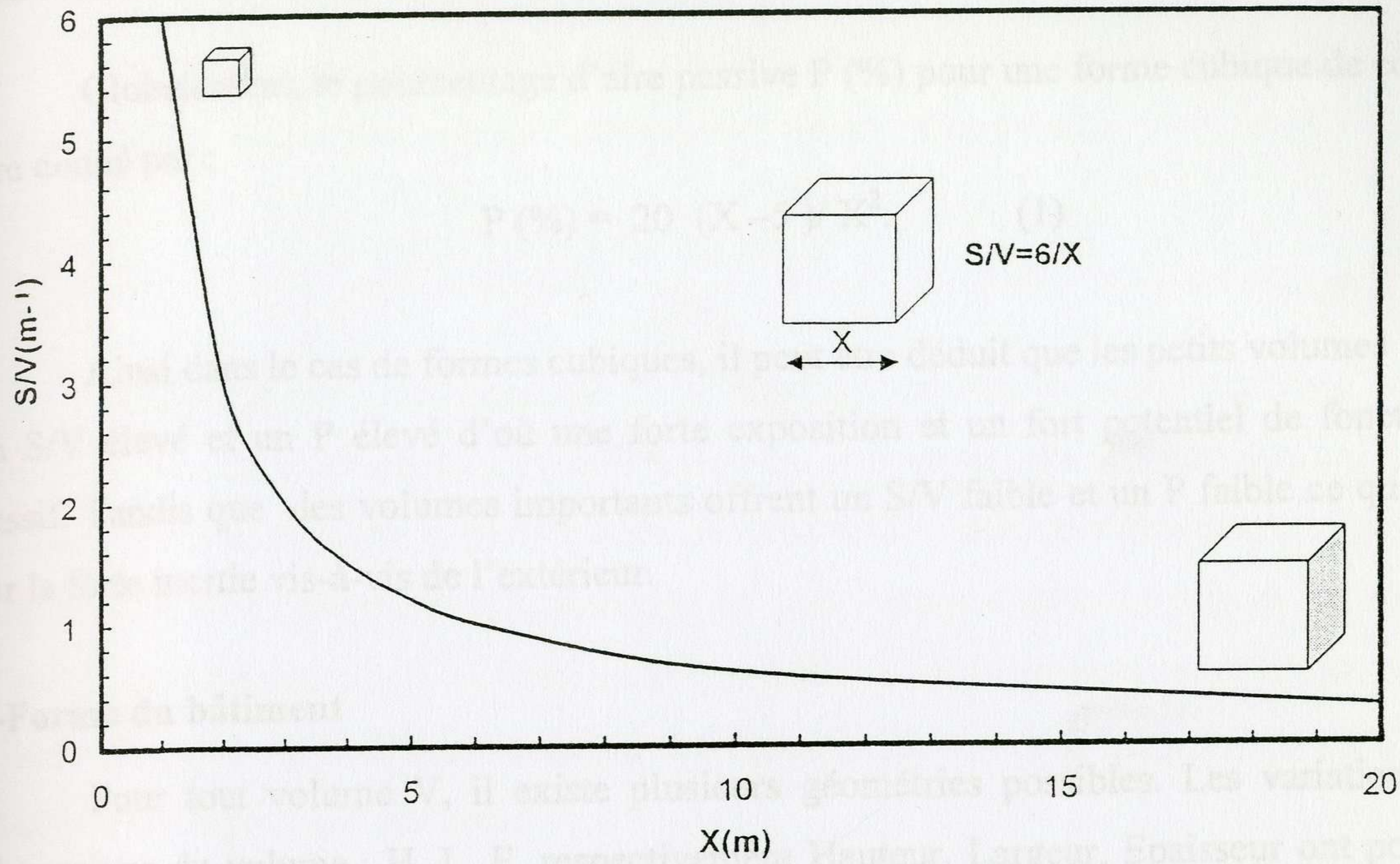


Figure 6.14 : Rôle de la taille d'un bâtiment sur le ratio Surface/ Volume montrant que plus le bâtiment est grand plus le ratio S/V est faible, d'où un bâtiment compact (Cf. Markus et Morris 1980).

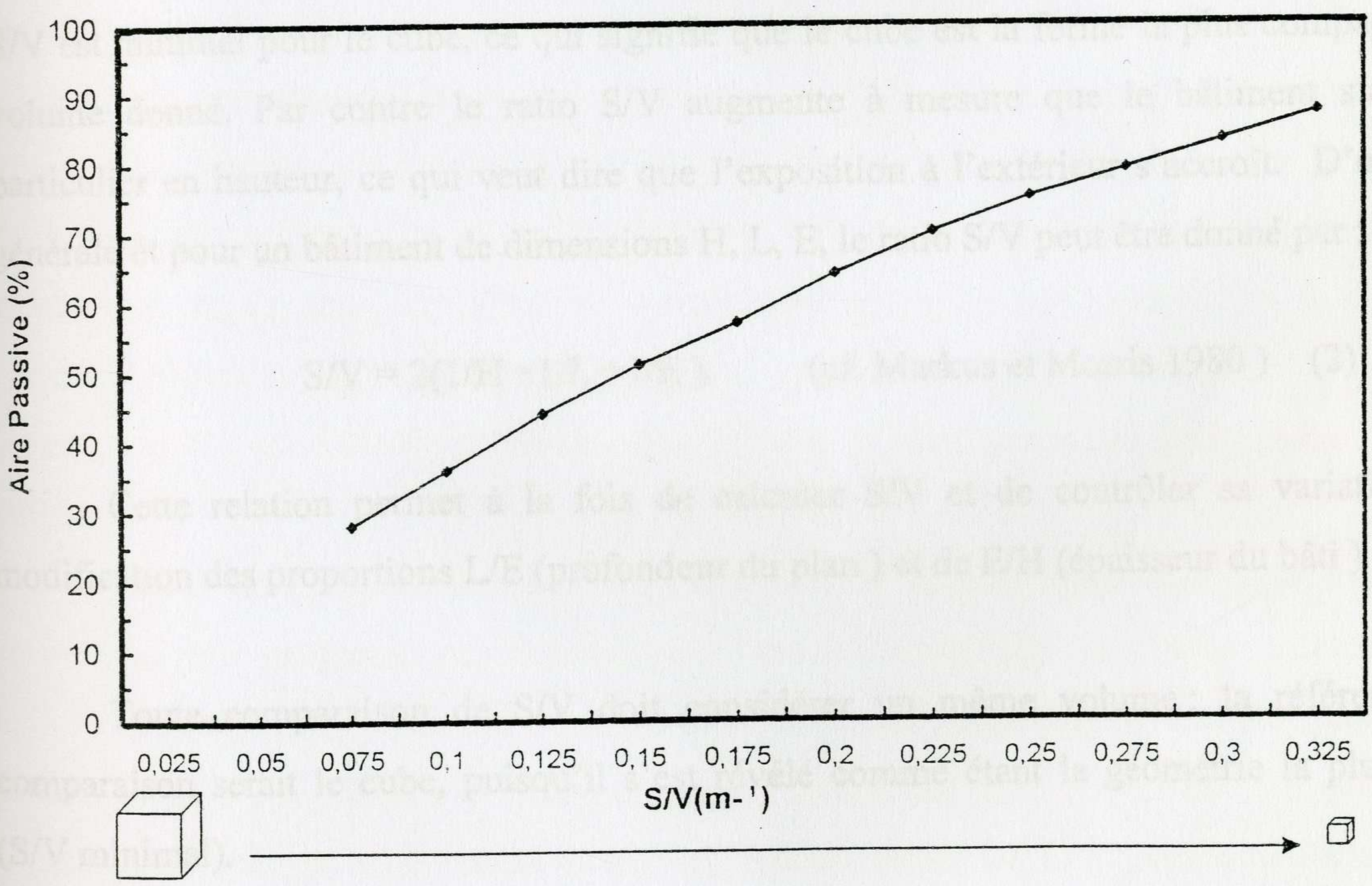


Figure 6.15 : Relation entre le ratio Surface /Volume et le pourcentage d'aire Passive montrant que plus le rattio S/V augmente plus grand est le potentiel de son fonctionnemnt passif (Cf. Baker *et al* 1996).

Globalement, le pourcentage d'aire passive P (%) pour une forme cubique de coté X, peut être donné par :

$$P\,(\%) = 20\ (X - 5\ )/\ X^2. \qquad (1)$$

Ainsi dans le cas de formes cubiques, il peut être déduit que les petits volumes présentent un S/V élevé et un P élevé d'où une forte exposition et un fort potentiel de fonctionnement passif. Tandis que des volumes importants offrent un S/V faible et un P faible ce qui renseigne sur la forte inertie vis-à-vis de l'extérieur.

b-Forme du bâtiment

Pour tout volume V, il existe plusieurs géométries possibles. Les variations dans les dimensions du volume : H, L, E, respectivement Hauteur, Largeur, Epaisseur ont pour effet de modifier le total des surfaces exposées. Ainsi deux bâtiments de même volume et de formes différentes présentent un ratio S/V différent et par conséquent des échanges avec l'extérieur distincts.

Le tableau 6.3 présente des géométries variables pour un même volume. Il apparaît que S/V est minimal pour le cube, ce qui signifie que le cube est la forme la plus compacte pour un volume donné. Par contre le ratio S/V augmente à mesure que le bâtiment s'allonge, en particulier en hauteur, ce qui veut dire que l'exposition à l'extérieur s'accroît. D'une manière générale et pour un bâtiment de dimensions H, L, E, le ratio S/V peut être donné par :

$$S/V = 2(1/H + 1/L + 1/E\ ). \qquad \text{(cf. Markus et Morris 1980)} \quad (2)$$

Cette relation permet à la fois de calculer S/V et de contrôler sa variation avec la modification des proportions L/E (profondeur du plan) et de E/H (épaisseur du bâti).

Toute comparaison de S/V doit considérer un même volume ; la référence à cette comparaison serait le cube, puisqu'il s'est révélé comme étant la géométrie la plus compacte (S/V minimal).

---

(1) L'aire passive est la partie du volume profonde de 5 mètres. X donné en mètre.
L'aire passive P : $P = x - (x-10)^2 = 20(x-5)$.

(2) $S/V = [\ 2(E + L)\ H\ ]\ /\ E\ LH$ (Source Markus et Morris 1980)

Le potentiel de fonctionnement passif peut, alors, être déduit par le calcul de P (%) correspondant. Le pourcentage de l'aire passive, dans ce cas, serait :

$$P\,(\%) = 10\,(L + E - 10\,)/\,L\,E$$

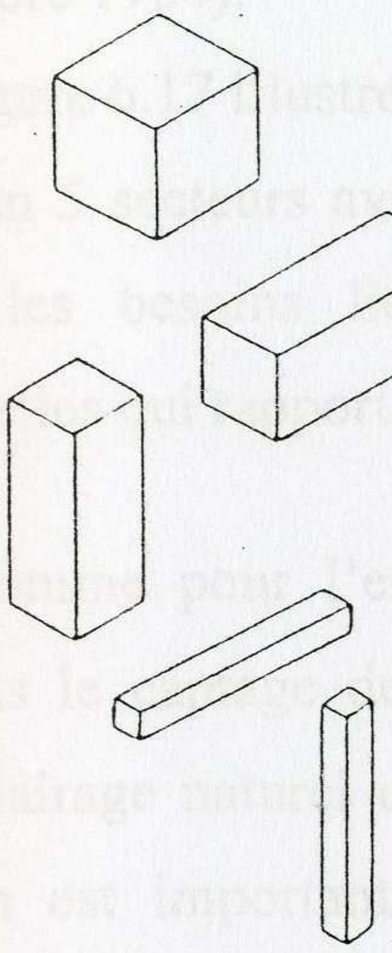
Il apparaît que le pourcentage d'aire passive d'un bâti est indépendant de la hauteur du bâtiment. Elle est fonction de L et de E seulement. Autrement dit, de la profondeur ou étroitesse du plan. De cette manière la performance de toute forme bâtie peut être évaluée par le calcul de S/V et de P(%) Correspondant. L'ensemble en étant comparé au cube permet le choix rationnel d'une géométrie conciliant les besoins de ventilation et d'éclairage naturels et les exigences de chauffage et de refroidissement passif. La figure 6.16 compare les proportions de bâtiments préférentielles par type de climat.

6.2.6 Incidence de la géométrie urbaine sur l'éclairage naturel

Nous terminons cette partie consacrée au contrôle de la radiation en donnant quelques informations sur la disponibilité de la lumière en milieu urbain, car les exigences d'éclairage présentent quelques particularités comparativement au gains solaires directs. Il est utile de donner des indications sur la spécificité de ce phénomène, même si l'importance de ce phénomène semble secondaire. En effet, peu d'informations existent sur la dépendance de l'éclairage par rapport à la géométrie urbaine. Ceci peut s'expliquer par le fait que les taux d'éclairage requis pour une situation donnée sont généralement plus faciles à satisfaire que l'ensoleillement. Ainsi, l'intérêt est plus souvent porté sur les moyens d'assurer des gains solaires utiles pour des considérations thermiques. Ceux-ci en étant satisfaits garantissent un éclairage suffisant.

Cependant, certains cas peuvent nécessiter la considération des besoins en éclairage seulement, sans exigences particulières pour l'ensoleillement (ex : bureaux, commerces ou dans les cas qui exigent la protection du soleil mais la conservation d'un niveau d'éclairage suffisant comme cela peut être le cas en climat chaud). Ainsi, Il est utile de connaître les paramètres liés à l'environnement ou la géométrie du bâti qui ont un impact sur la disponibilité de la lumière en milieu urbain.

Tableau 6.3 : Rôle de la forme du bâtiment dans la définition du ratio Surface / Volume (Markus et Morris 1980).

FORME	Total surfaces (5 faces) m^2	Volume m^3	Surface/Volume
	80	64	1.25
	81.9	64	1.28
	94.2	64	1.47
	104	64	1.63
	132	64	2.01

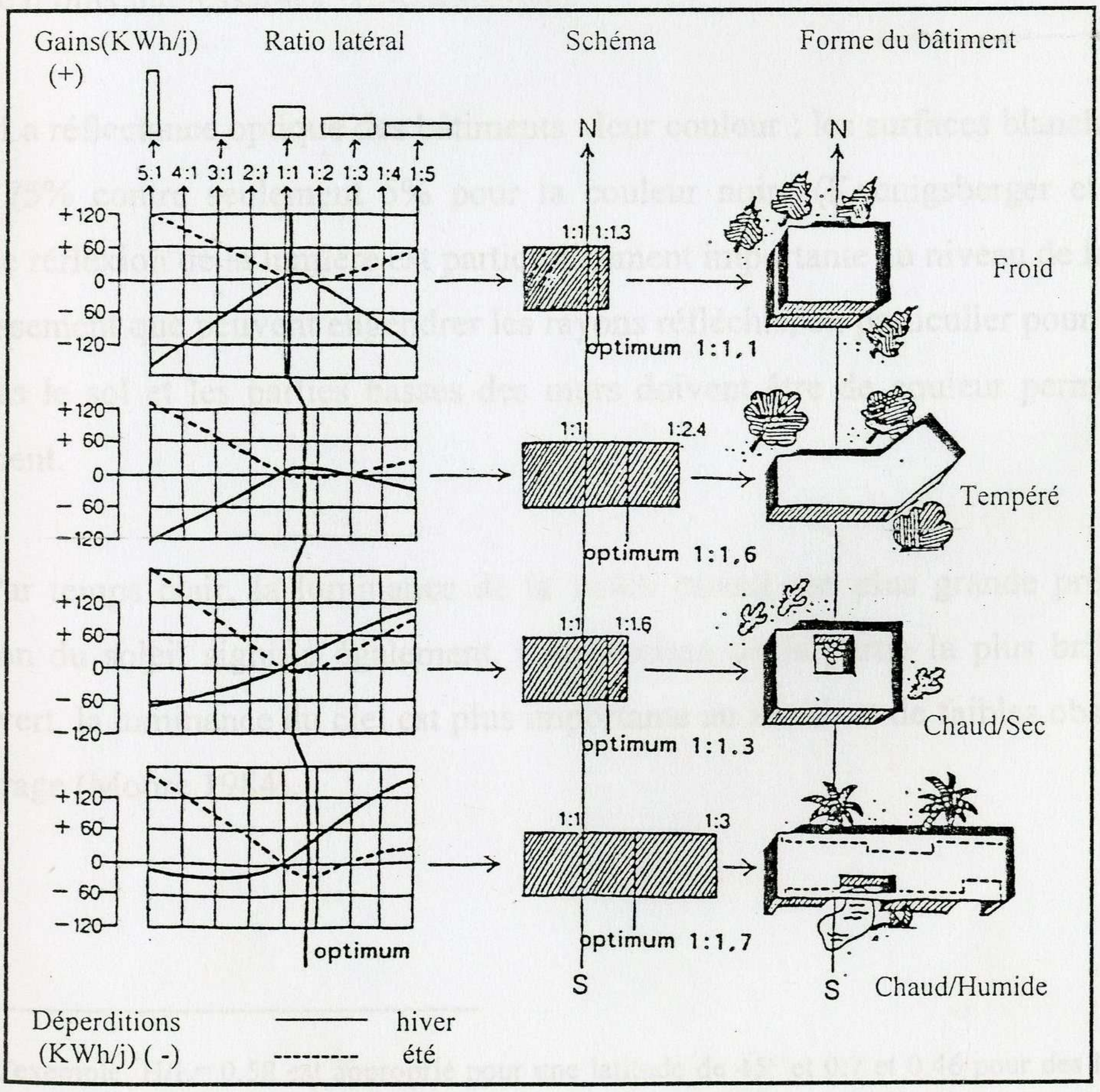


Figure 6.16 : Proportions de bâtiments optimales par type de climat (Schreck et al 1989).

1) A l'instar des autres objectifs de contrôle de la radiation solaire (ensoleillement et refroidissement), l'éclairage en milieu urbain dépend de la vue du ciel donnée par le ratio H/L (Oke 1988a et Moore 1984).

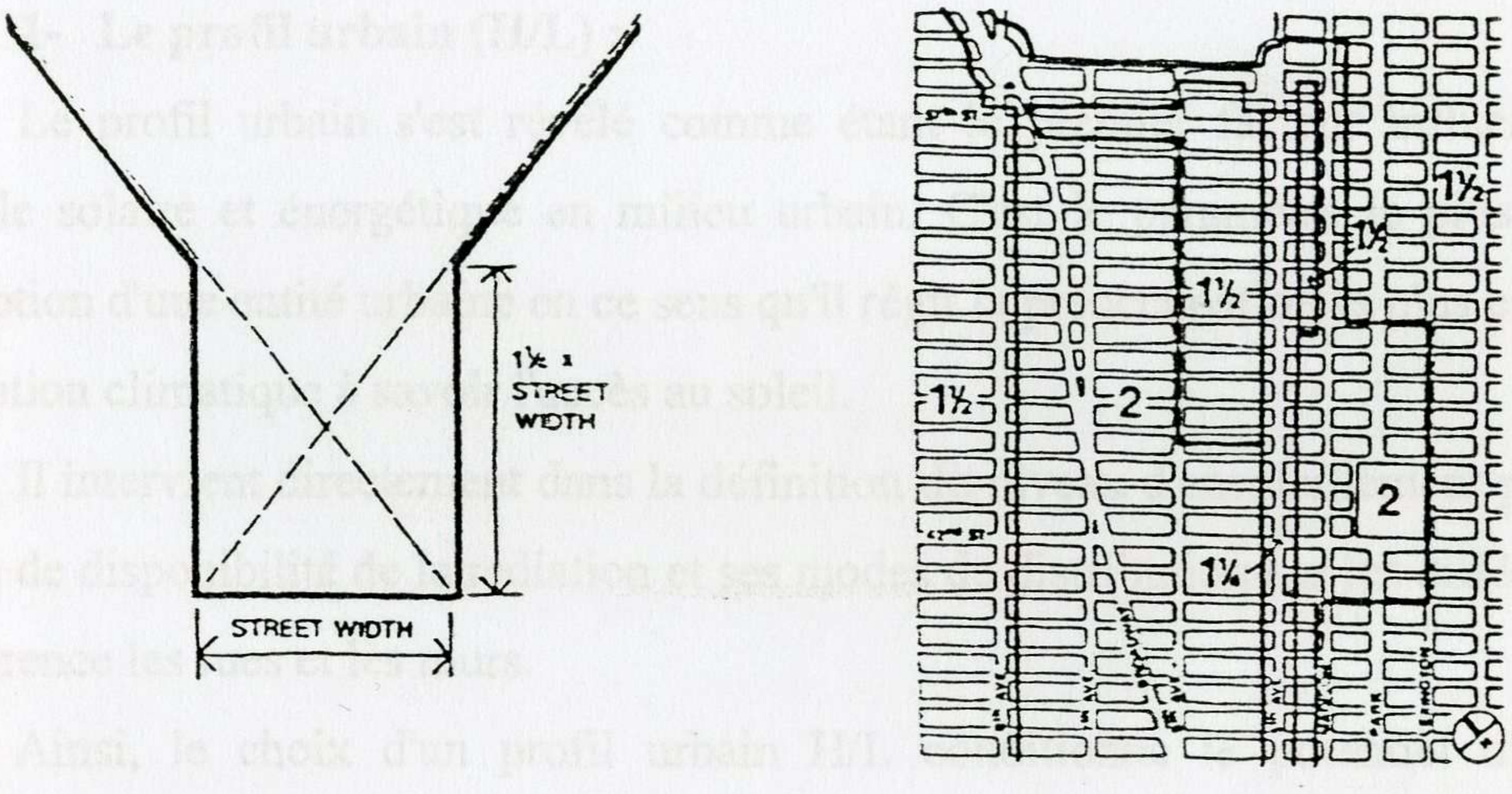
La figure 6.17 illustre les profils requis pour l'éclairage dans la ville de New York. La ville a été divisée en 5 secteurs ayant des besoins d'éclairage différents, selon l'activité, le caractère du quartier et les besoins liés aux espaces piétons. Il existe des valeurs données comme conventionnelles qui rapportent la quantité de lumière disponible au profil urbain (1).

2) Comme pour l'ensoleillement, la largeur ou profondeur des plans de bâtiments est décisive dans le captage de la lumière naturelle intérieure, en particulier en site urbain. L'aire passive d'éclairage naturel correspond à 5÷6 mètres à partir des parois extérieures (Cf. 6.2.5). L'orientation est importante dans la définition du taux d'éclairage. Le sud est la meilleure orientation pour le captage de la lumière car il fournit le plus fort taux de lumière, relativement uniforme. Le nord est la deuxième orientation à adopter car la lumière diffuse est uniforme L'est et l'ouest offrent un éclairage variable dans la journée, et une protection plus difficile du rayonnement direct, donc moins intéressantes. (Moore 1984).

3) La réflectance optique des bâtiments leur couleur : les surfaces blanches réfléchissent la lumière à 75% contre seulement 5% pour la couleur noire (Koenigsberger et al 1973). Cette propriété de réflexion de la lumière est particulièrement importante au niveau de la rue, compte tenu de l'éblouissement que peuvent engendrer les rayons réfléchis, en particulier pour les climats arides. Dans ce cas le sol et les parties basses des murs doivent être de couleur permettant d'éviter cet éblouissement.

4)Par temps clair, la luminance de la voûte céleste est plus grande prés du soleil, ainsi, l'obstruction du soleil signifie également, l'obstruction de la partie la plus brillante du ciel. Par temps couvert, la luminance du ciel est plus importante au zénith et de faibles obstructions affectent peu l'éclairage (Moore 1984).

(1) A titre d'exemple H/L= 0.58 est approprié pour une latitude de 45° et 0.7 et 0.46 pour des latitudes de 40° et 50° (Oke 1988)



5 secteurs sont définis dans la ville par rapport à leur besoins d'éclairage.
A chacune est fixé un ratio H/L maximal toléré

Figure 6.17 : profils urbains requis pour l'éclairage urbain dans la ville de New York (Source Moore 1984).

6.2.7 Récapitulatif des paramètres environnementaux et géométriques de contrôle solaire et énergétique

Cette partie du chapitre consacrée au contrôle solaire et énergétique a permis d'identifier un certain nombre de paramètres liés à la géométrie et à l'environnement qui conditionnent la performance d'un tissu. Ces paramètres vont constituer les outils de base dans la démarche conceptualisée adoptée pour l'intégration de la radiation dans la conception urbaine et qui est développée dans le chapitre suivant. Ces paramètres sont rappelés ci-après :

1- Le profil urbain (H/L) :

Le profil urbain s'est révélé comme étant le premier facteur influent en matière de contrôle solaire et énergétique en milieu urbain. C'est le paramètre le plus pertinent dans la description d'une entité urbaine en ce sens qu'il régit la préoccupation la plus essentielle dans une conception climatique à savoir l'accès au soleil.

Il intervient directement dans la définition du niveau d'ensoleillement puisqu'il détermine le taux de disponibilité de la radiation et ses modes de distribution sur les différentes surfaces, en l'occurrence les rues et les murs.

Ainsi, le choix d'un profil urbain H/L conditionne le potentiel d'exposition ou de protection du niveau de la rue et par conséquent le confort du piéton, de même qu'il contrôle les apports solaires à l'intérieur des bâtiments. Pour cela l'indice d'accès au soleil (I.A.S) se présente comme un indicateur intéressant pour estimer le niveau d'ensoleillement puisqu'il isole le rôle de la forme du profil par rapport à la disponibilité de la radiation. Il permet de confronter les besoins d'ensoleillement intérieur(I.A.S pour le niveau des rues) et extérieur (I.A.S pour les murs) et facilite donc les choix formels de même qu'il tient compte de l'orientation choisie et intègre les conditions réelles d'un lieu (latitude, saison, etc.).

La géométrie de la rue (H/L) renseigne également sur la capacité de refroidissement d'une structure urbaine et par conséquent sur les températures urbaines résultantes aussi bien intérieures qu'extérieures puisqu'il détermine son potentiel de restitution de chaleur nocturne. Pour cela, le facteur de vue du ciel, qui met en relation le ratio H/L et le niveau de vue du ciel, est l'indicateur privilégié de cette capacité à refroidir.

Enfin, le ratio H/L a un effet sur la capacité d'absorption et de réflexion du rayonnement au niveau global, toutefois son impact demeure secondaire.

2- Orientation / soleil :

L'orientation par rapport au soleil est décisive car elle détermine la position ou hauteur du soleil par rapport au bâti et par conséquent l'angle d'incidence du rayonnement. Etant donné le caractère géométrique et cyclique de la course du soleil, l'orientation choisie affecte le niveau d'exposition et d'obstruction du soleil de manière permanente que peuvent causer les différentes parois urbaines entre elles, et le ratio H/L devient alors fortement dépendant de cette orientation.

L'importance de l'orientation réside principalement dans son impact sur la qualité de l'ensoleillement bien plus que la quantité d'énergie reçue à savoir la garantie de l'exposition ou de la protection en fonction des besoins de confort. Dans ce cas les choix d'orientation sont plus déterminants pour les murs que pour les rues. A ce titre l'architecture bioclimatique a préalablement établi la préférence de l'orientation des façades Est- Ouest plutôt que Nord- Sud.

3- Densité du plan :

C'est l'emprise au sol, elle est donnée par le rapport entre surface toiture / surface totale ($\rho = L_1 / L_1+L_2$). Ce paramètre est important dans la définition des surfaces réceptives principales à savoir : toitures et profils de rue (mur et sol). Elle conditionne de ce fait le niveau d'absorption ou de réflexion de la radiation globale par une entité urbaine et par conséquent la quantité d'énergie utilisée. Globalement plus la densité du plan est importante plus la réflexion de la radiation est grande.

4- Géométrie du bâtiment :

D'échelle architecturale, ce paramètre a cependant une grande importance au niveau urbain en raison de ses propriétés d'assemblage qu'il induit et qui diffèrent d'une forme à une autre, et de ses propriétés environnementales intrinsèques.

Les dimensions absolues d'un bâtiment déterminent son comportement environnemental, autrement dit la taille du bâtiment donnée par H, L et E respectivement Hauteur, Largeur, Epaisseur et sa forme à savoir les proportions H/L, H/E, L/E.

Ces deux dimensions peuvent être contrôlées et estimées grâce à deux indicateurs. D'abord le ratio Surface /Volume (S/V) qui décrit le niveau de compacité ou d'exposition des bâtiments par rapport à l'environnement, ensuite le ratio aire Passive P (%) et qui renseigne sur sa capacité de fonctionnement passif.

Par ailleurs la géométrie du bâtiment est importante au niveau urbain par l'association qu'elle suppose puisque la forme d'un bâtiment et plus spécialement sa hauteur va influencer le choix d'assemblage de manière à garantir des espacements entre bâtiments suffisants.

5-Caracteristiques de la radiation :

Ce paramètre est lié à l'environnement mais il a une incidence directe sur les performances de tout choix de géométrie et vient en complément à tous les paramètres donnés plus haut. Elles incluent la nature de la radiation et la position ou hauteur du soleil. Ils sont donnés par la latitude, la période dans l'année et l'état du ciel : clair ou couvert. Tous ces facteurs ont été identifiés comme déterminants dans les schémas d'irradiation résultants.

Toute cette information est importante dans la définition du taux de disponibilité de la radiation en milieu urbain, de son mode de répartition sur les différentes surfaces et par conséquent sur l'accès au soleil. Elle est également importante dans la définition de la capacité d'absorption et de réflexion de la radiation par une structure urbaine.

La hauteur du soleil donnée par la latitude et la saison modifie les angles d'incidence du rayonnement sur toutes les surfaces urbaines et affecte aussi bien le potentiel d'accès au soleil des murs et des rues que la quantité de radiation absorbée et exploitée par le tissu. La latitude définit la longueur d'un jour et donc le nombre d'heures d'ensoleillement et l'intensité de la radiation, enfin, l'état du ciel clair régit la nature de la radiation directe ou diffuse et par conséquent l'ensoleillement des espaces.

Ces informations constituent des constantes pour un contexte donné mais tout choix de géométrie urbaine doit se faire sur la base de ces données, à savoir recommandations pour le contrôle climatique liées au contexte et à la géométrie solaire.

6.3 Contrôle du vent en milieu urbain

L'étude du comportement du vent en milieu urbain est indispensable pour définir la démarche à suivre pour intégrer ce phénomène dans la conception urbaine. A l'échelle de l'entité urbaine, les préoccupations liées au phénomène vent peuvent être résumées comme suit :

1. Contrôle des effets aérodynamiques dans les espaces extérieurs liés au confort du piéton.
2. Ventilation liée au potentiel qu'elle offre de renouveler l'air et de refroidir les bâtiments.
3. Ventilation pour la dispersion des polluants.

Ces trois exigences dépendent des caractéristiques de ces flux d'air, à savoir : la vitesse du vent, sa direction, sa nature, sa fréquence, associés aux propriétés géométriques du tissu urbain. Les choix formels doivent tenir compte des besoins définis par la nature du climat à savoir : Favoriser l'exposition ou la protection du vent.

Il convient de remarquer qu'actuellement la simulation du vent en milieu bâti est généralement effectuée en soufflerie atmosphérique, qui est le moyen le plus fiable, compte tenu du caractère instable et peu prévisible du vent, et qui rend difficile la modélisation mathématique. Egalement, l'évaluation des effets du bâti sur la modification des flux d'air est difficile et demeure insuffisante. Elle est souvent présentée sous une forme plus qualitative que quantitative, nécessitant dans la pratique, généralement l'aide d'aérodynamiciens du bâtiment.

Le but de cette partie de chapitre est d'identifier les paramètres urbains géométriques les plus déterminants sur le comportement des flux d'air en milieu urbain et par conséquent qui permettraient de contrôler la ventilation urbaine au moment de la projection pour satisfaire les objectifs définis plus haut. L'accent est mis sur l'évaluation des phénomènes physiques liés principalement à la géométrie, puisqu'elle représente l'outil de travail privilégié de l'urbaniste, même si la notion de confort liée au vent fait également intervenir les conditions psychologiques, les activités, etc.

Cette partie présente d'abord les principaux effets aérodynamiques autour des bâtiments pour rappeler les connaissances de base sur le comportement du vent en présence d'un ou de plusieurs obstacles, ensuite sont résumées quelques recherches ayant trait à la ventilation urbaine dans les espaces extérieurs puis intérieurs et leur dépendance par rapport à la géométrie du tissu urbain.

6.3.1 Aérodynamisme des bâtiments

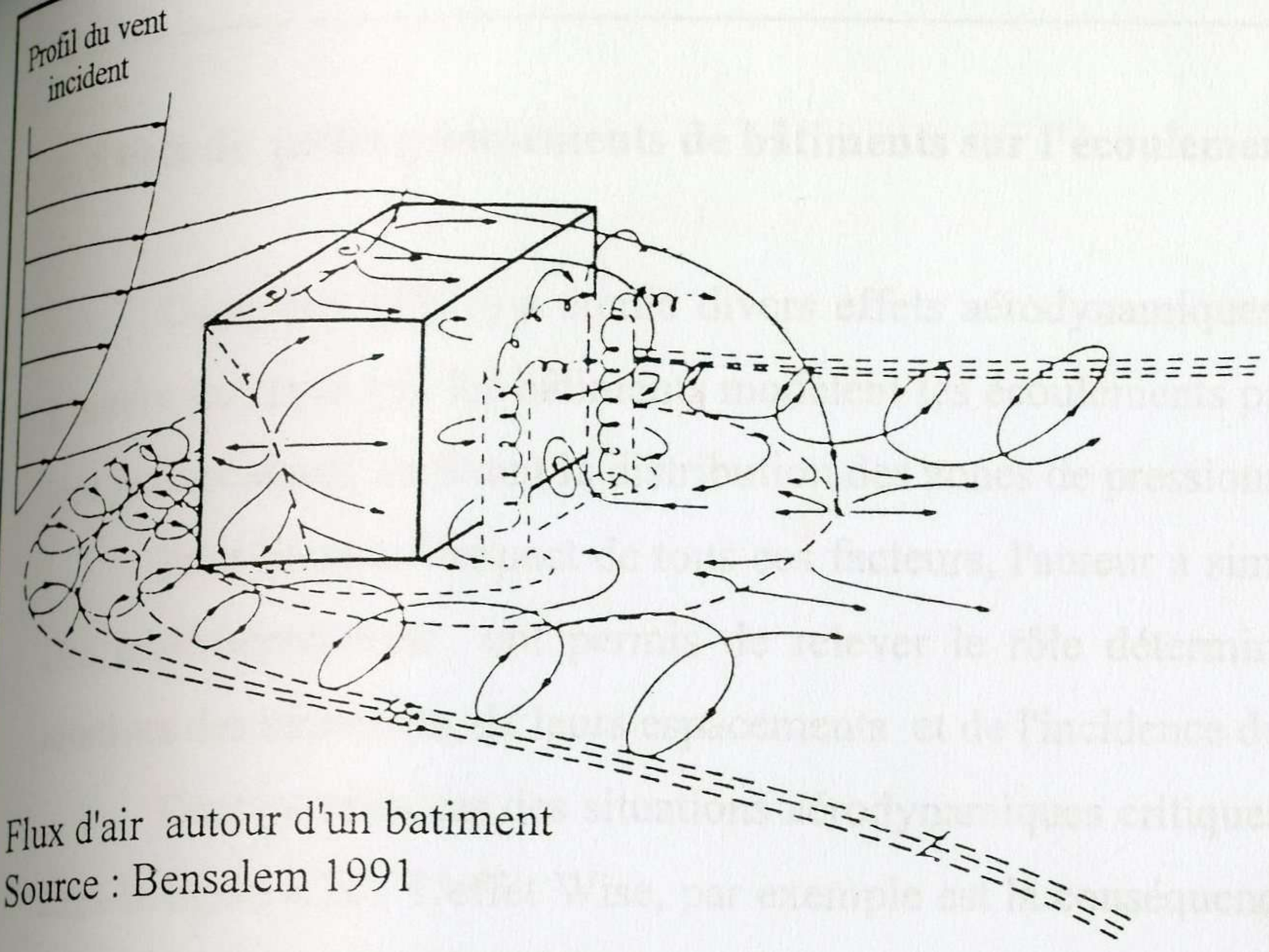
D'une manière générale, toute construction crée des zones d'abri et d'exposition au vent, correspondant à des zones de pressions positives (surpression) et négatives (dépression). Le mouvement de l'air tend à équilibrer ces zones. L'écoulement du vent autour d'un obstacle unique tel qu'un bâtiment est bien connu, mais le groupement de plusieurs éléments bâtis rend plus complexe les flux d'air. L'association de deux bâtiments seulement, suffit pour modifier la trajectoire du vent, il est donc attendu qu'une situation urbaine complexe, crée des modèles de flux compliqués et toute généralisation devient difficile. Cependant, quelques connaissances de base sur l'aérodynamisme des bâtiments peuvent être rappelées.

1- Flux d'air autour d'un obstacle

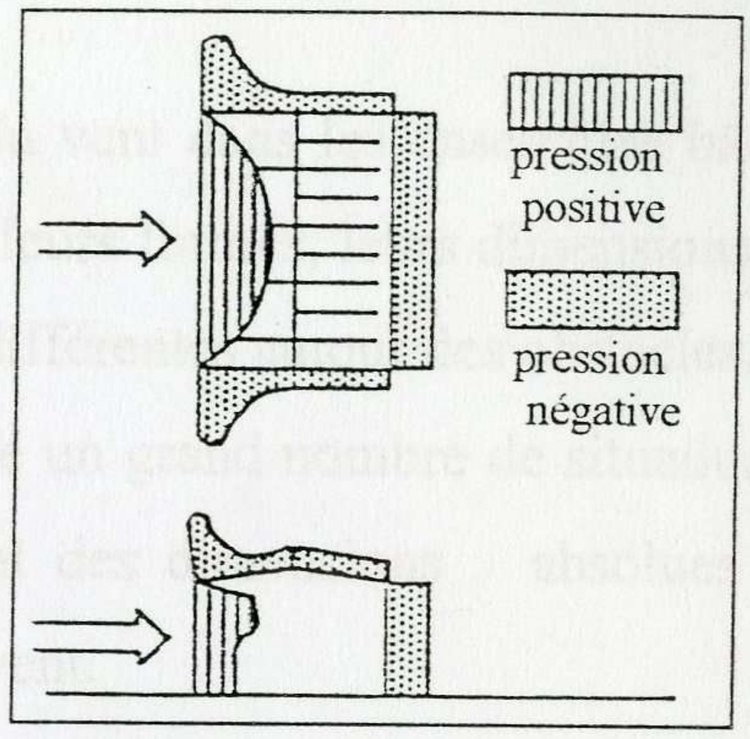
Lorsque le vent est bloqué par un obstacle, il tend à le contourner et crée différentes zones de pression autour de lui. La surface en amont du vent se retrouve dans une zone de forte pression car directement exposée au vent. A l'approche des limites du bâtiment, le vent est accéléré ; Il tend à être dévié au-dessus de la toiture et contourne les faces latérales ce qui engendre des effets de succion importants sur ses surfaces en raison du changement brusque de l'incidence du vent par rapport à ces surfaces. Une zone de re-circulation du flux apparaît dans la partie du bâtiment sous le vent caractérisée par une faible pression (Figure 6.18).

L'étendue de ces perturbations générées par la présence d'obstacle dépend de la géométrie du bâtiment en question. A chaque forme correspond une zone d'influence que Beranek (1984) définit comme étant déterminée par les dimensions relatives ou proportions du bâtiment (Figure 6.19).

Ceci explique partiellement les flux d'air autour de certaines formes géométriques particulières telles que la barre ou la tour caractérisées par la dominance d'une dimension par rapport aux autres (respectivement longueur et hauteur). De même que cela permet de comprendre la complexité des flux dans les cas d'association de bâtiments due à l'interférence de leurs zones d'influence. Ce dernier point est traité ci-après.

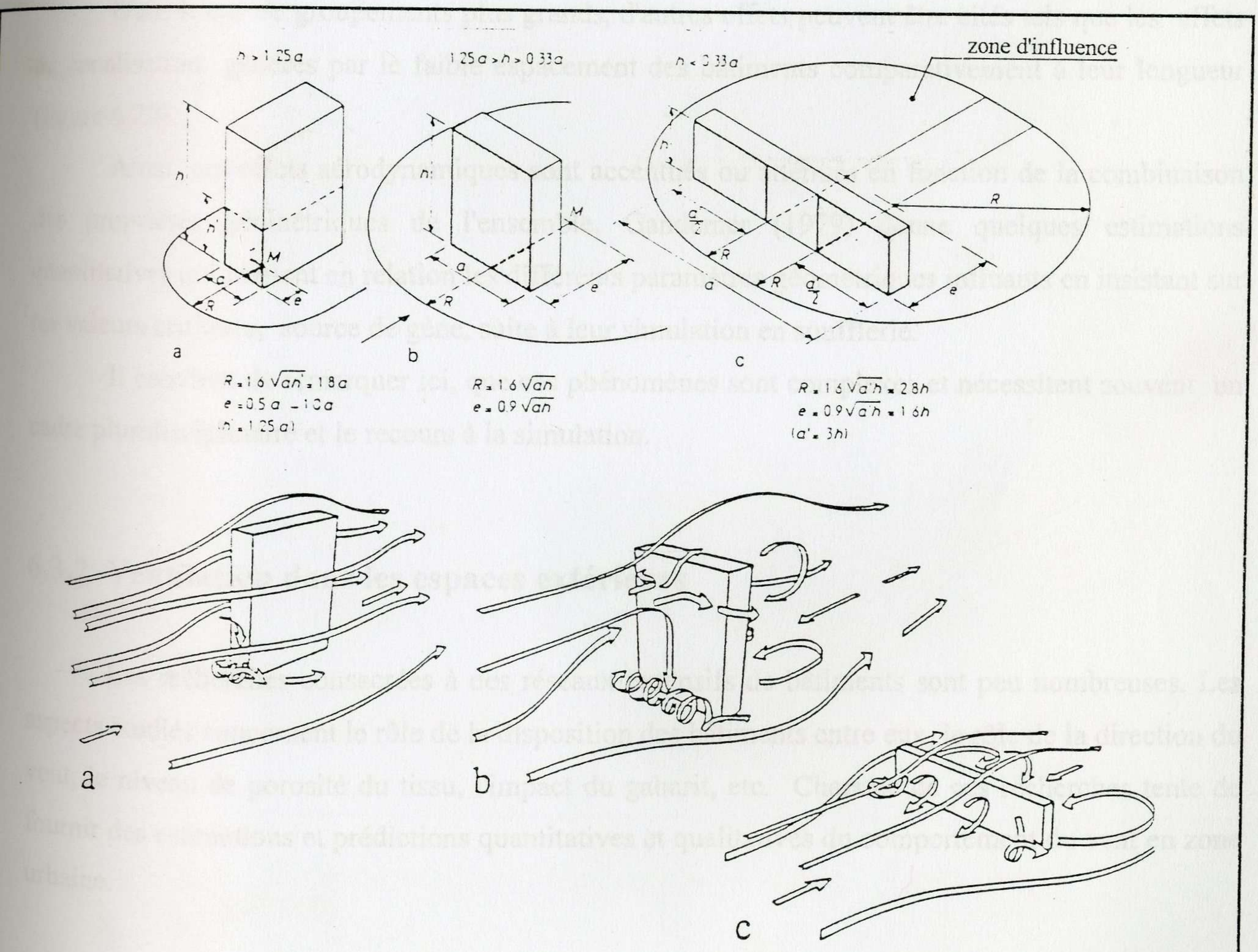


Flux d'air autour d'un batiment
Source : Bensalem 1991



Répartition des pressions
Source : Schreck *et al* 1989

Figure 6.18: Pressions et flux d'air autour d'un bâtiment.



gure 6.19: Impact de la forme du bâtiment sur l'écoulement de l'air (Beranek 1984).

2- Effets de petits groupements de bâtiments sur l'écoulement de l'air

Gandemer (1979) a étudié divers effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis. L'auteur explique que les bâtiments modèlent les écoulements par leurs formes, leurs dimensions et leur juxtaposition, en fixant la distribution des zones de pressions différentes autour des obstacles.

Pour illustrer l'impact de tous ces facteurs, l'auteur a simulé un grand nombre de situations. Ces expérimentations ont permis de relever le rôle déterminant des dimensions absolues et relatives des bâtiments, de leurs espacements et de l'incidence du vent.

Dans certains cas des situations aérodynamiques critiques peuvent apparaître tels qu'illustré dans la figure 6.20. L'effet Wise, par exemple est la conséquence de la différence de gabarits entre les deux bâtiments et l'incidence perpendiculaire du vent qui engendre un retour du flux et un effet de rouleau entre les deux bâtiments. De même que l'effet venturi est dû à la longueur des bâtiments associée à leur hauteur et leur disposition qui favorise la canalisation de l'air et son accélération.

Dans le cas de groupements plus grands, d'autres effets peuvent être cités tels que les effets de canalisation générés par le faible espacement des bâtiments comparativement à leur longueur (figure 6.20).

Ainsi ces effets aérodynamiques sont accentués ou atténués en fonction de la combinaison des propriétés géométriques de l'ensemble. Gandemer (1979) donne quelques estimations quantitatives qui mettent en relation les différents paramètres géométriques influants en insistant sur les valeurs critiques, source de gène, suite à leur simulation en soufflerie.

Il convient de remarquer ici, que ces phénomènes sont complexes et nécessitent souvent un cadre pluridisciplinaire et le recours à la simulation.

6.3.2 Ventilation dans les espaces extérieurs

Les recherches consacrées à des réseaux extensifs de bâtiments sont peu nombreuses. Les aspects étudiés concernent le rôle de la disposition des bâtiments entre eux, le rôle de la direction du vent, le niveau de porosité du tissu, l'impact du gabarit, etc. Chacune de ces recherches tente de fournir des estimations et prédictions quantitatives et qualitatives du comportement du vent en zone urbaine.

2- Effets de petits groupements de bâtiments sur l'écoulement de l'air

Gandemer (1979) a étudié divers effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis. L'auteur explique que les bâtiments modèlent les écoulements par leurs formes, leurs dimensions et leur juxtaposition, en fixant la distribution des zones de pressions différentes autour des obstacles.

Pour illustrer l'impact de tous ces facteurs, l'auteur a simulé un grand nombre de situations. Ces expérimentations ont permis de relever le rôle déterminant des dimensions absolues et relatives des bâtiments, de leurs espacements et de l'incidence du vent.

Dans certains cas des situations aérodynamiques critiques peuvent apparaître tels qu'illustré dans la figure 6.20. L'effet Wise, par exemple est la conséquence de la différence de gabarits entre les deux bâtiments et l'incidence perpendiculaire du vent qui engendre un retour du flux et un effet de rouleau entre les deux bâtiments. De même que l'effet venturi est dû à la longueur des bâtiments associée à leur hauteur et leur disposition qui favorise la canalisation de l'air et son accélération.

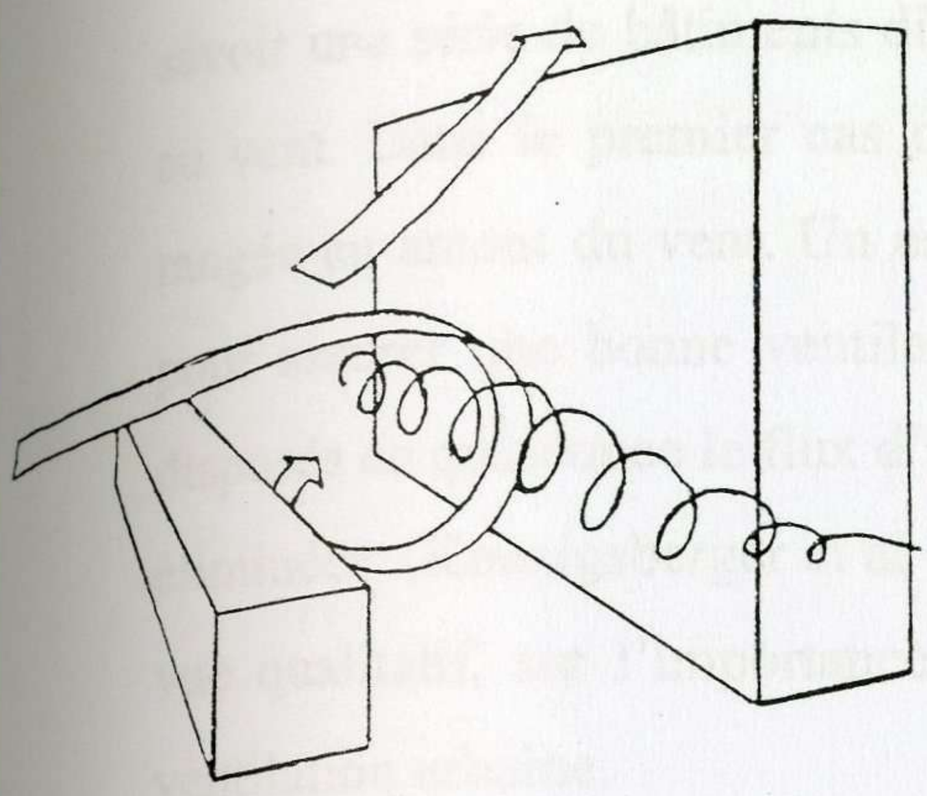
Dans le cas de groupements plus grands, d'autres effets peuvent être cités tels que les effets de canalisation générés par le faible espacement des bâtiments comparativement à leur longueur (figure 6.20).

Ainsi ces effets aérodynamiques sont accentués ou atténués en fonction de la combinaison des propriétés géométriques de l'ensemble. Gandemer (1979) donne quelques estimations quantitatives qui mettent en relation les différents paramètres géométriques influants en insistant sur les valeurs critiques, source de gène, suite à leur simulation en soufflerie.

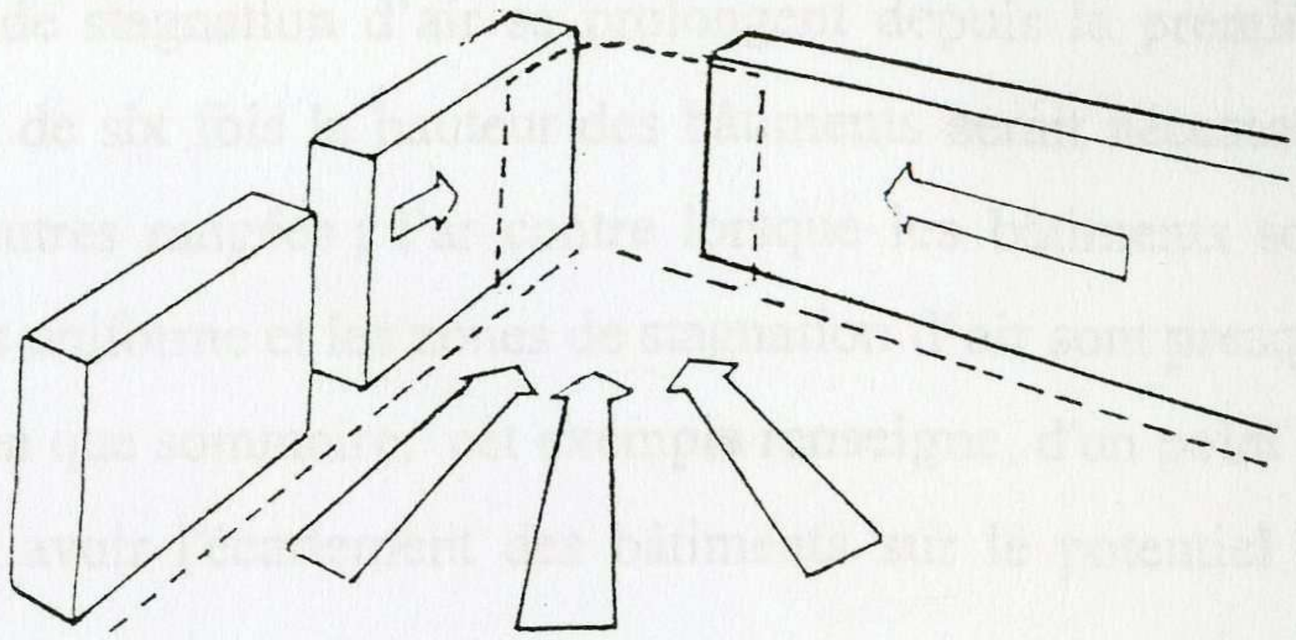
Il convient de remarquer ici, que ces phénomènes sont complexes et nécessitent souvent un cadre pluridisciplinaire et le recours à la simulation.

6.3.2 Ventilation dans les espaces extérieurs

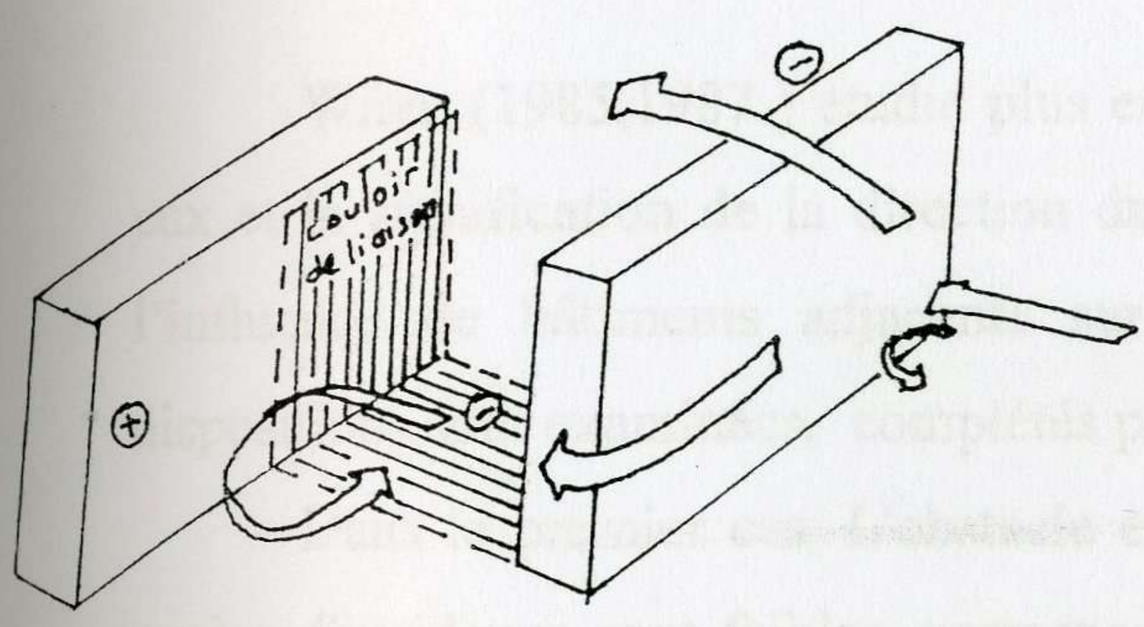
Les recherches consacrées à des réseaux extensifs de bâtiments sont peu nombreuses. Les aspects étudiés concernent le rôle de la disposition des bâtiments entre eux, le rôle de la direction du vent, le niveau de porosité du tissu, l'impact du gabarit, etc. Chacune de ces recherches tente de fournir des estimations et prédictions quantitatives et qualitatives du comportement du vent en zone urbaine.



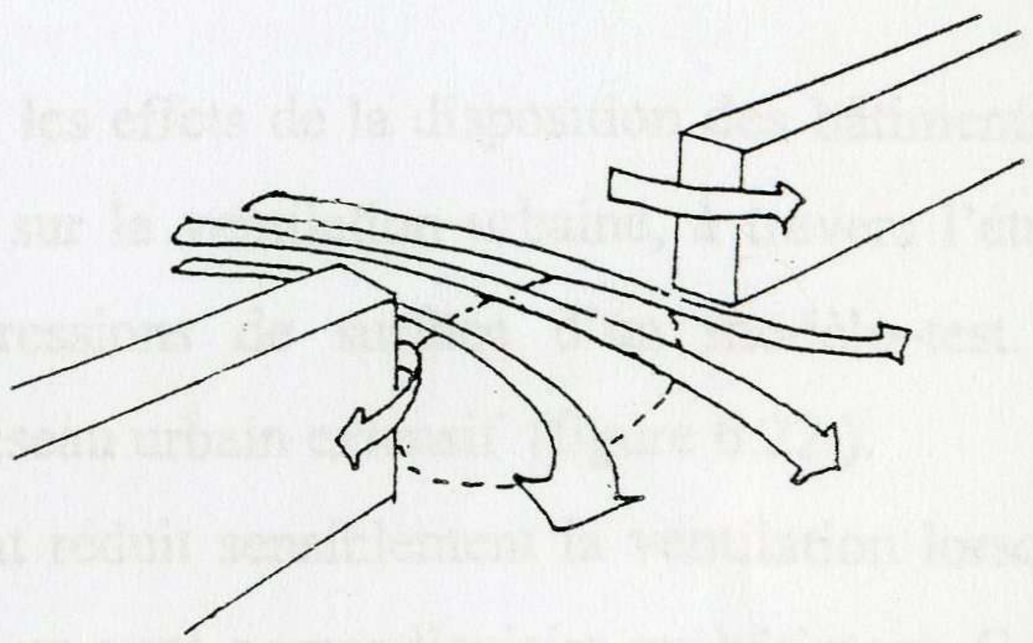
Effet Wise



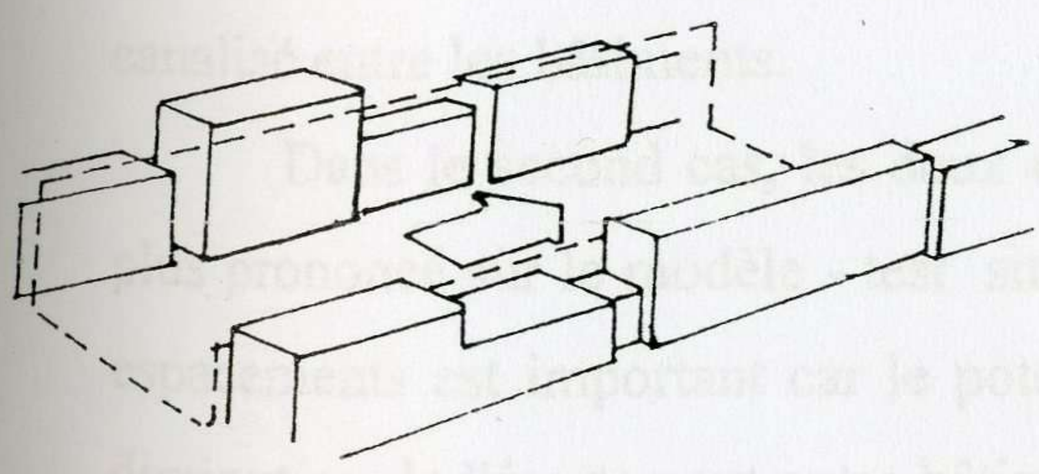
Effet Venturi



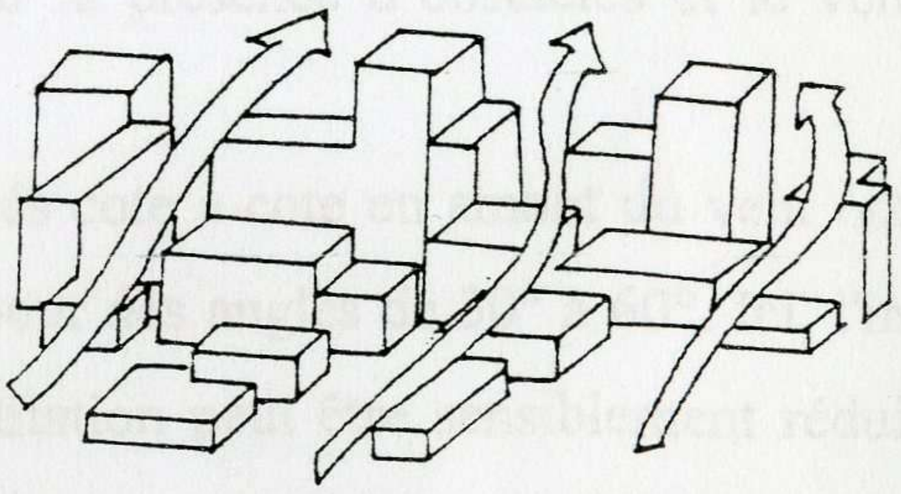
Effet de liaison



Effet de barre



Effet de canalisation



Effet de pyramide

Figure 6.20: Quelques effets aérodynamiques liés à l'association de plusieurs bâtiments (Gandemer 1980).

La figure 6.21 présente l'exemple le plus général de la ventilation d'une entité urbaine, à savoir une série de bâtiments disposés en réseau régulier ou en quinconce perpendiculairement au vent. Dans le premier cas des zones de stagnation d'air se prolongent depuis la première rangée en amont du vent. Un espacement de six fois la hauteur des bâtiments serait nécessaire pour assurer une bonne ventilation des autres rangées ; Par contre lorsque les bâtiments sont disposés en quinconce le flux d'air est plus uniforme et les zones de stagnation d'air sont presque éliminées (Koenigsberger et al 1973). Bien que sommaire, cet exemple renseigne, d'un point de vue qualitatif, sur l'importance que peut avoir l'écartement des bâtiments sur le potentiel de ventilation urbaine.

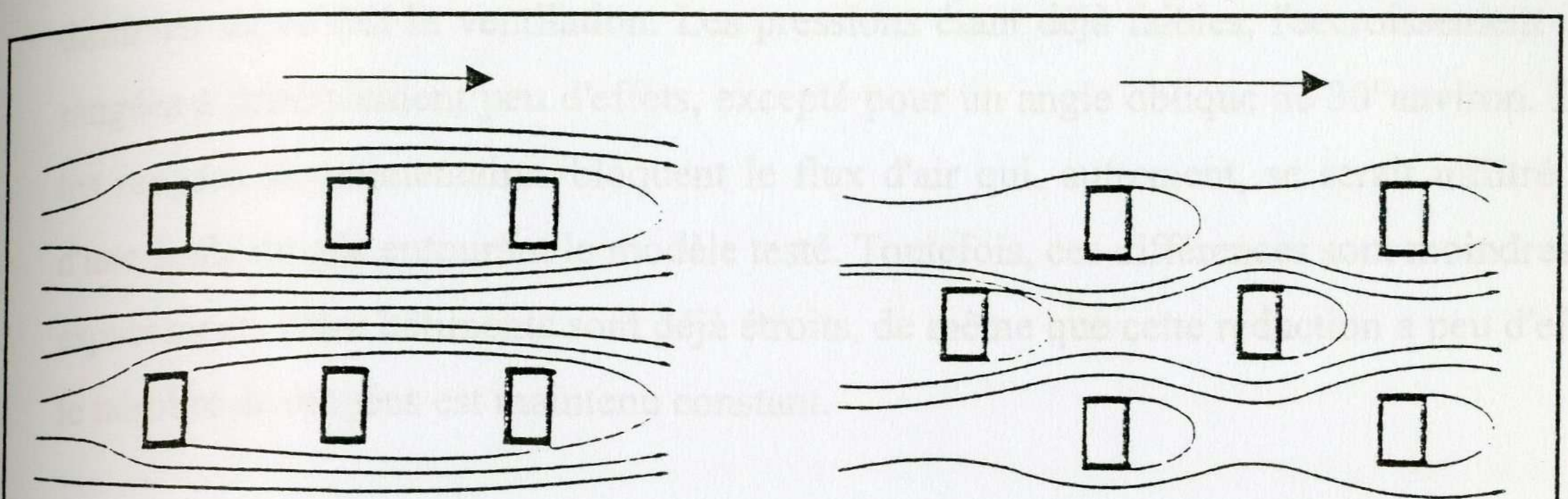
1- Effets de la disposition des bâtiments et de l'incidence du vent

Wiren (1985,1987) étudie plus en détail les effets de la disposition des bâtiments entre eux et la signification de la direction du vent sur la ventilation urbaine, à travers l'étude de l'influence de bâtiments adjacents sur les pressions de surface d'un modèle–test. Trois dispositions sont examinées, complétés par un réseau urbain extensif (figure 6.22).

Dans le premier cas, L'obstacle en amont réduit sensiblement la ventilation lorsque les angles d'incidence sont faibles, correspondant à un vent perpendiculaire au bâtiment. Cet effet d'obstacle en amont et les effets dus aux changements d'espacements entre blocs diminuent avec l'accroissement de l'angle du vent et devient négligeable pour une incidence oblique (autour de 60°) ; la ventilation est alors améliorée. Lorsque le vent est parallèle aux bâtiments, les pressions sur les surfaces ne sont pas du tout affectées par la présence d'obstacles et le vent devient canalisé entre les bâtiments.

Dans le second cas, les deux éléments placés cote à cote en amont du vent ont un effet plus prononcé sur le modèle - test situé derrière, pour des angles de 30° à 60°. Ici, l'impact des espacements est important car le potentiel de ventilation peut être sensiblement réduit avec la diminution de l'écartement entre bâtiments. Lorsque le vent est perpendiculaire au modèle, il est entièrement exposé puisque l'effet de protection des bâtiments environnants est insignifiant.

Enfin pour le troisième cas, la présence d'éléments adjacents conduit à une canalisation du vent entre les bâtiments lorsque le vent est plus ou moins perpendiculaire (0°à 30°) ; L'effet dû à la variation des espacements est plus marqué à 90°, car l'effet de barre est rompu et la ventilation entre les bâtiments est meilleure à mesure que les espacements augmentent.



Réseau régulier — Réseau en quinconce

Figure 6.21: Rôle de l'agencement des bâtiments sur la ventilation extérieure montrant des zones de stagnation d'air importante dans le réseau régulier dû aux effets d'obstacles des bâtiments en amont et une meilleure ventilation pour le réseau en quinconce (Source : Koenigsberger *et al* 1973).

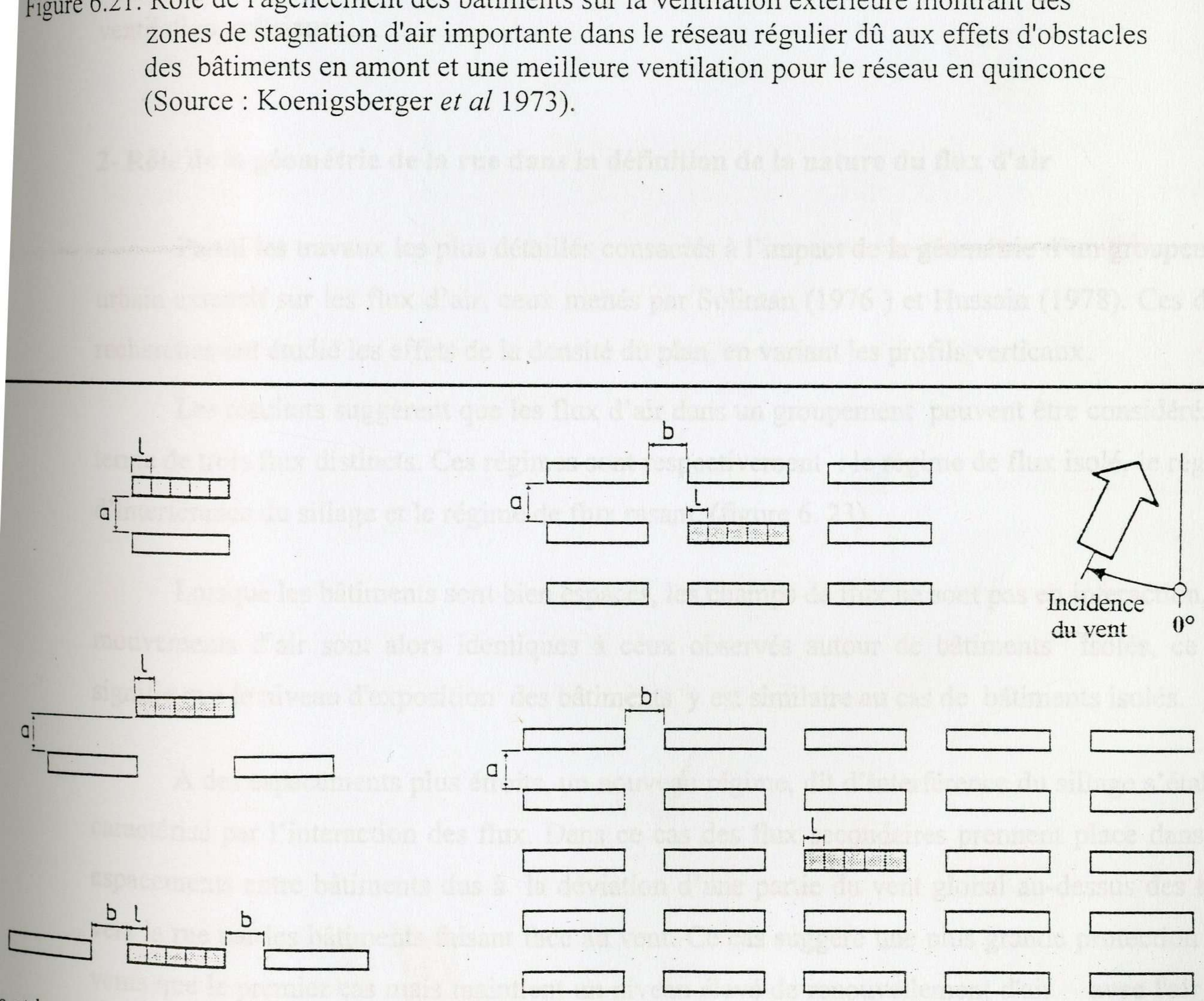


Figure 6.22: Géométrie utilisées dans la simulation menée par Wiren (1985,1987).

Pour un réseau étendu de bâtiments, représentatif d'une situation urbaine, l'auteur indique que l'addition d'une rangée suffit à causer une réduction considérable dans les pressions et diminuer de ce fait la ventilation. Les pressions étant déjà faibles, l'accroissement de plusieurs rangées a généralement peu d'effets, excepté pour un angle oblique de 30°environ. Dans ce cas, les rangées supplémentaires bloquent le flux d'air qui, autrement, se serait infiltré dans le cas d'une seule rangée entourant le modèle testé. Toutefois, ces différences sont moindres lorsque les espacements entre bâtiments sont déjà étroits, de même que cette réduction a peu d'effets lorsque le nombre de rangées est maintenu constant.

Ainsi lorsque les bâtiments sont localisés sur la trajectoire du vent, ils créent un effet d'abri aux bâtiments situés derrière eux. L'incidence du vent et la séparation entre bâtiments sont largement responsables de ces effets d'abri ou d'exposition et par conséquent du potentiel de ventilation extérieure.

2- Rôle de la géométrie de la rue dans la définition de la nature du flux d'air

Parmi les travaux les plus détaillés consacrés à l'impact de la géométrie d'un groupement urbain extensif sur les flux d'air, ceux menés par Soliman (1976) et Hussain (1978). Ces deux recherches ont étudié les effets de la densité du plan, en variant les profils verticaux.

Les résultats suggèrent que les flux d'air dans un groupement peuvent être considérés en terme de trois flux distincts. Ces régimes sont respectivement : le régime de flux isolé, le régime d'interférence du sillage et le régime de flux rasant (figure 6. 23).

Lorsque les bâtiments sont bien espacés, les champs de flux ne sont pas en interaction, les mouvements d'air sont alors identiques à ceux observés autour de bâtiments isolés, ce qui signifie que le niveau d'exposition des bâtiments y est similaire au cas de bâtiments isolés.

A des espacements plus étroits, un nouveau régime, dit d'interférence du sillage s'établit, caractérisé par l'interaction des flux. Dans ce cas des flux secondaires prennent place dans les espacements entre bâtiments dus à la déviation d'une partie du vent global au-dessus des toits vers la rue par les bâtiments faisant face au vent. Ce cas suggère une plus grande protection des vents que le premier cas mais maintient un niveau élevé de renouvellement d'air avec l'air au-dessus des toitures, et présente une façade face au vent exposée et celle sous le vent protégé.

Pour des densités élevées, une circulation tourbillonnaire stable s'installe dans les vides entre les bâtiments et définit le régime de flux rasant. Le passage à ce régime survient lorsque le flux principal n'entre pas dans les espacements et passe au-dessus des bâtiments et correspond au cas d'une grande protection des vents et un faible potentiel de renouvellement d'air dans les rues.

Egalement, l'espacement des bâtiments sur le plan face au vent (ratio hauteur /Largeur latérale) est un facteur qui peut altérer les flux depuis le régime isolé jusqu'au régime interférent. Toutefois lorsque les éléments sont suffisamment longs, les espacements frontaux ont moins d'effets ; c'est à dire que l'importance de ce ratio dépend du pourcentage des vides par rapport aux surfaces pleines faisant faces au vent. Dans le même sens, Hosker (1985) suggère que la transition entre les flux dépend de la géométrie relative des éléments : Ratio Hauteur /Largeur et ratio longueur du bâtiment / Hauteur. Toutefois le rôle de H/L est dominant, tandis que l/H est faible, que le montre la figure 6.24.

Enfin, Givoni (1989) teste l'impact d'une rue centrale perpendiculaire a des rangées de bâtiments et parallèle au vent. D'abord l'auteur remarque la même dépendance de la nature du flux par rapport au ratio H/L, ensuite, il remarque la présence de flux secondaires entre les bâtiments et la rue centrale, car elle a pour effet de créer des flux turbulents aux intersections, mais l'étendue de leur intrusion dans les espacements entre bâtiments demeure faible. Ceci laisse apparaître que les intersections de rues connaissent une situation de turbulence plus importante.

Ainsi, tous ces paramètres géométriques permettent d'identifier la nature de l'écoulement de l'air dans les espaces extérieurs, laquelle à son tour peut être reprise pour expliquer et contrôler les potentialités de ventilation ou de protection dans les espaces extérieurs, de même que les possibilités de ventilation intérieure et de dispersion des polluants, générés à la fois par la rue (circulation de véhicules) et par les activités urbaines.

3- Effets de la géométrie urbaine sur la vitesse du vent

Les recherches précédentes définissent la nature des flux mais ne renseignent pas sur la réduction de la vitesse du vent dans chaque cas. Oke (1988a) affirme qu'on ne connaît pas parfaitement la relation entre réduction de la vitesse du vent et mesures de la géométrie.

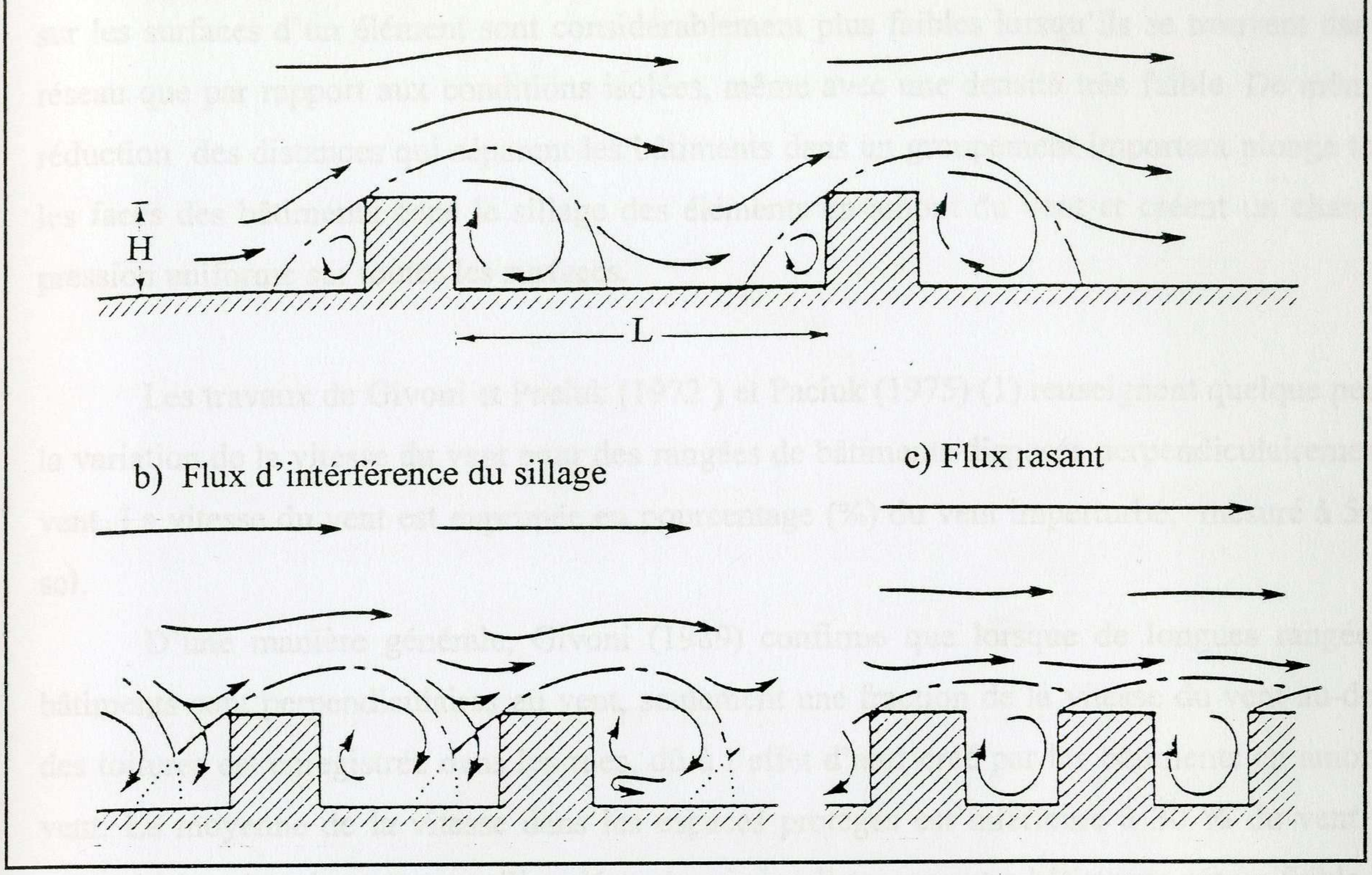


Figure 6.23: La dépendance de la nature du flux par rapport à la géometrie du profil urbain (H/L). Trois régimes de flux existent qui dépendent du profil de rue (Soliman 1976, Hussein 1978)

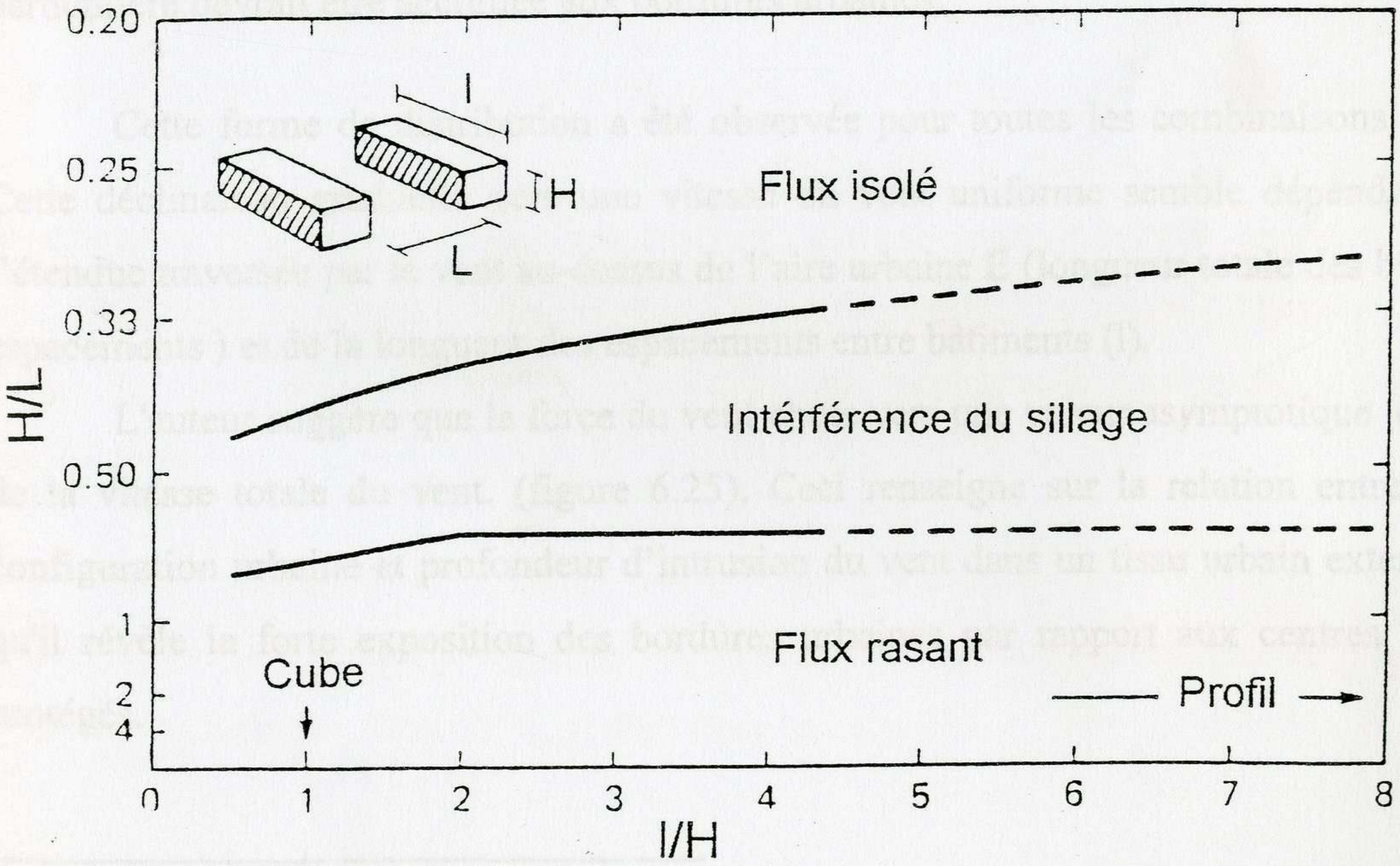


Figure 6.24: Dépendance de la nature du flux d'air par rapport à la géométrie de la rue (H/L) & la géométrie du bâtiment. (Hosker 1985).

Cependant, tous les travaux s'accordent à affirmer que les pressions positives et négatives sur les surfaces d'un élément sont considérablement plus faibles lorsqu'ils se trouvent dans un réseau que par rapport aux conditions isolées, même avec une densité très faible. De même, la réduction des distances qui séparent les bâtiments dans un groupement important plonge toutes les faces des bâtiments dans le sillage des éléments en amont du vent et créent un champ de pression uniforme sur toutes les surfaces.

Les travaux de Givoni et Paciuk (1972) et Paciuk (1975) (1) renseignent quelque peu sur la variation de la vitesse du vent pour des rangées de bâtiments disposés perpendiculairement au vent. La vitesse du vent est exprimée en pourcentage (%) du vent imperturbé, mesuré à 5m du sol.

D'une manière générale, Givoni (1989) confirme que lorsque de longues rangées de bâtiments sont perpendiculaires au vent, seulement une fraction de la vitesse du vent au-dessus des toitures est enregistrée dans les rues, dû à l'effet d'abri créé par les bâtiments en amont du vent. La moyenne de la vitesse dans les espaces protégés est inférieure à 30 % du vent total mesuré à la même hauteur en milieu dégagé mais les distances entre bâtiments ont un faible effet sur cette réduction. La distribution des vitesses du vent dans les rangées de bâtiments, montre une force de vent plus importante pour les constructions les plus en amont. Après, la seconde rangée la vitesse relative est graduellement stabilisée ; Ce qui suppose qu'une attention particulière devrait être accordée aux bordures urbaines.

Cette forme de distribution a été observée pour toutes les combinaisons de ratios H/L. Cette déclinaison graduelle vers une vitesse du vent uniforme semble dépendre à la fois de l'étendue traversée par le vent au-dessus de l'aire urbaine E (longueur totale des bâtiments et des espacements) et de la longueur des espacements entre bâtiments (l).

L'auteur suggère que la force du vent chute vers une valeur asymptotique d'environ 10% de la vitesse totale du vent. (figure 6.25). Ceci renseigne sur la relation entre densité de la configuration urbaine et profondeur d'intrusion du vent dans un tissu urbain extensif. De même qu'il révèle la forte exposition des bordures urbaines par rapport aux centres urbains mieux protégés.

---

(1) Ces travaux sont publiés pour la première fois par Givoni en 1989. Ils sont donc cités sous la référence Givoni (1989) dans la suite du texte.

4- Impact de la variation des gabarits sur la modification des flux d'air

Tous les travaux présentés, jusqu'ici, considèrent des réseaux uniformes de bâtiments de même hauteur ; les expériences suivantes (Givoni 1989) évaluent l'impact de bâtiments additifs élevés. Cet aspect est intéressant car il permet d'apprécier le rôle que peut jouer la variation des gabarits dans la ventilation d'une structure urbaine, car le bâtiment-tour est connu pour avoir des effets aérodynamiques particuliers notamment prés du sol. A priori, la référence à l'effet Wise permet de saisir le principe de modification des flux d'air dû à un bâtiment élevé.

Deux distributions sont testées : d'une part les tours sont juxtaposées pour former un mur brise-vent placé en amont ; d'autre part, les tours sont dispersées aléatoirement dans le tissu. Ces deux cas sont comparés à un réseau uniforme sans tours (figure 6.26).

Il a été constaté que la première disposition réduit davantage les vitesses du vent en comparaison à une situation déjà faiblement ventilée, de l'ordre de 15% contre 26% initialement. Par contre dans le cas de bâtiments dispersés, de plus grandes vitesses sont mesurées face aux tours et plus faibles derrière ou entre deux tours. La vitesse du vent est largement plus élevée que dans le cas de bâtiments uniformes et peut atteindre 60%. Ainsi l'addition de bâtiments élevés et leur mode de distribution fait varier considérablement la vitesse des vents.

Dans une autre expérience (figure 6.27), l'effet des tours est mesuré par rapport à la variation du ratio Hauteur / Largeur du réseau. Plusieurs hauteurs de tours ont été testées. Dans ce cas aussi, il a été trouvé que les tours dispersées dans le tissu accroissent toujours de manière significative la vitesse de l'air dans les rues. En moyenne la hausse est de 48% contre 28% seulement dans le réseau sans tours pour H/L =1/3 et de 52 % contre 15% pour un ratio de 3/1. Ainsi, Le ratio H/L ne semble pas avoir une très grande importance sur les variations enregistrées.

Enfin, Givoni (1989) affirme que les hauteurs absolues des tours (36m, 48m et 60m) ont seulement un faible effet puisque les vitesses moyennes relatives enregistrées pour ces hauteurs sont respectivement 52%, 56%, et 60% pour un ratio H/L =1(H = L = 24m).

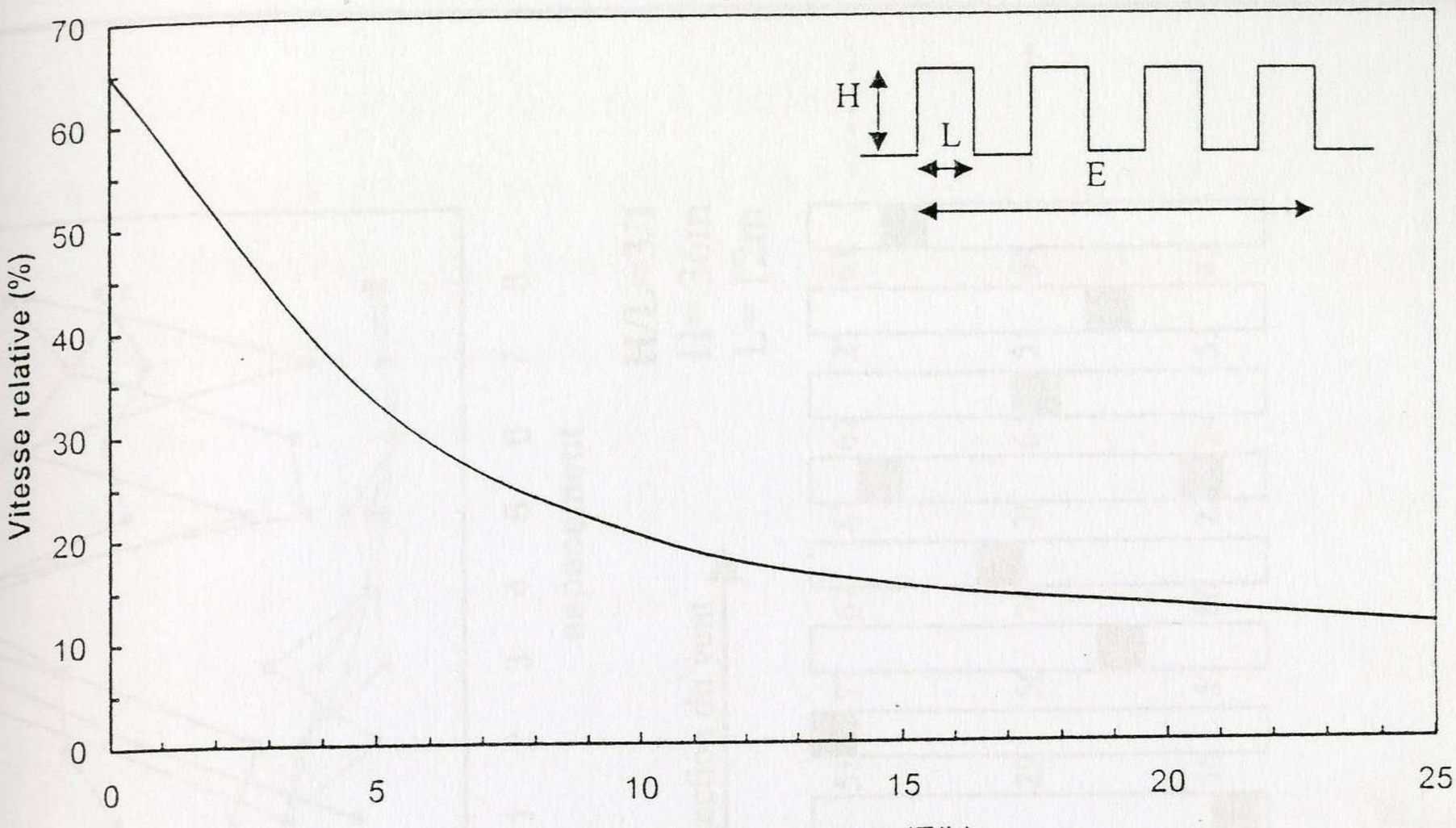


Figure 6.25 : Impact de l'étendue d'un tissu urbain sur la vitesse du vent; La vitesse du vent tend à se stabiliser à mesure que l'étendue du tissu urbain augmente (Givoni 1989).

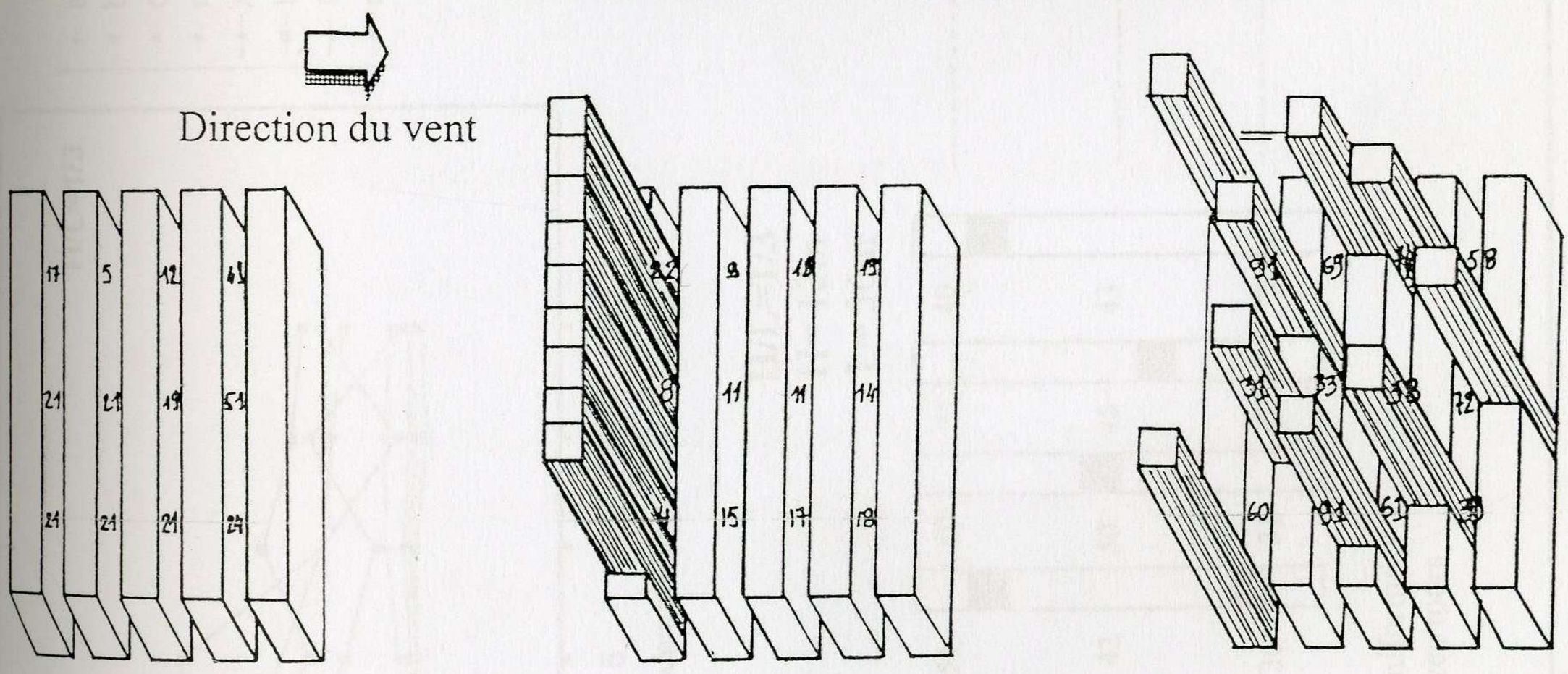
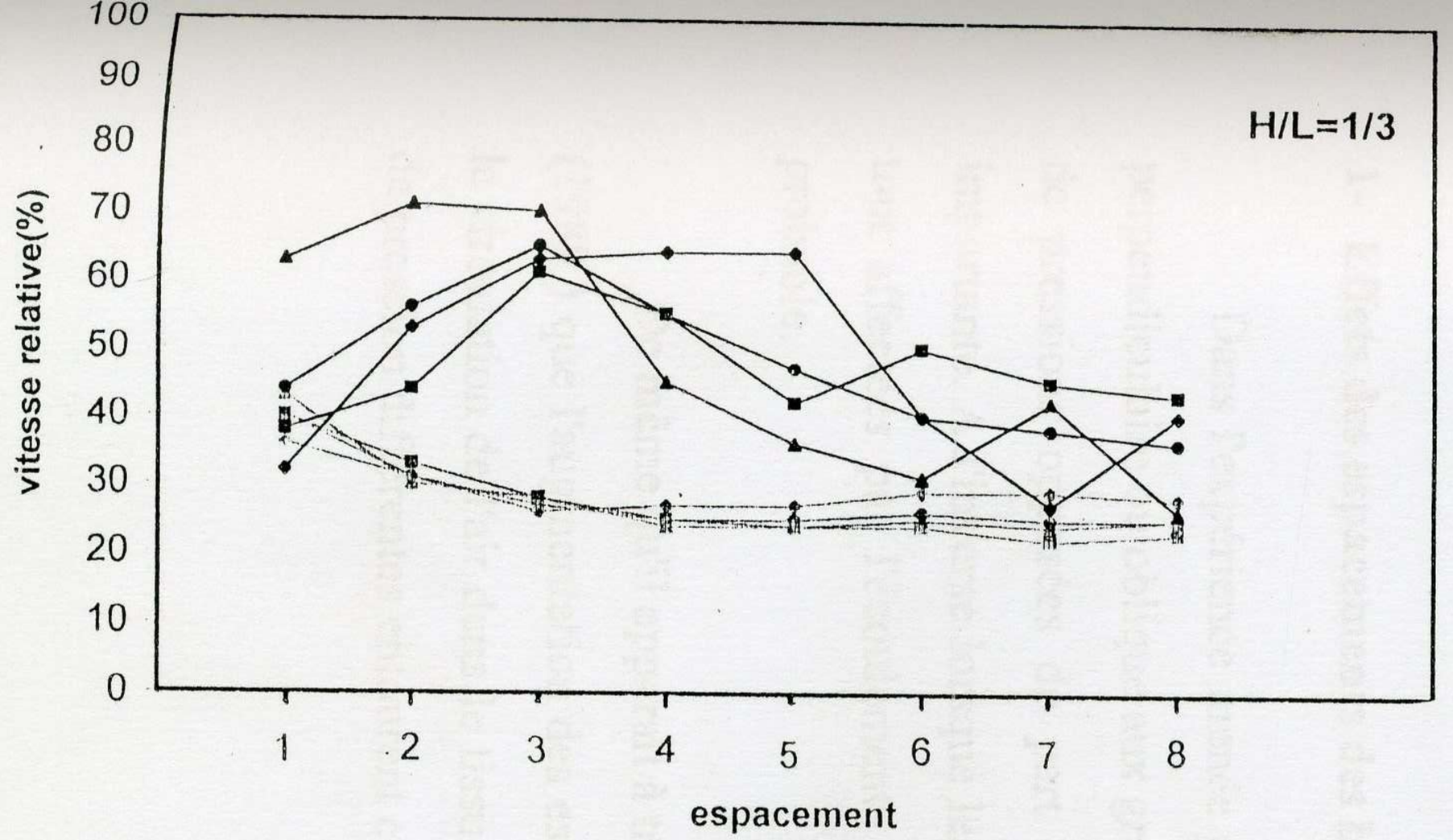
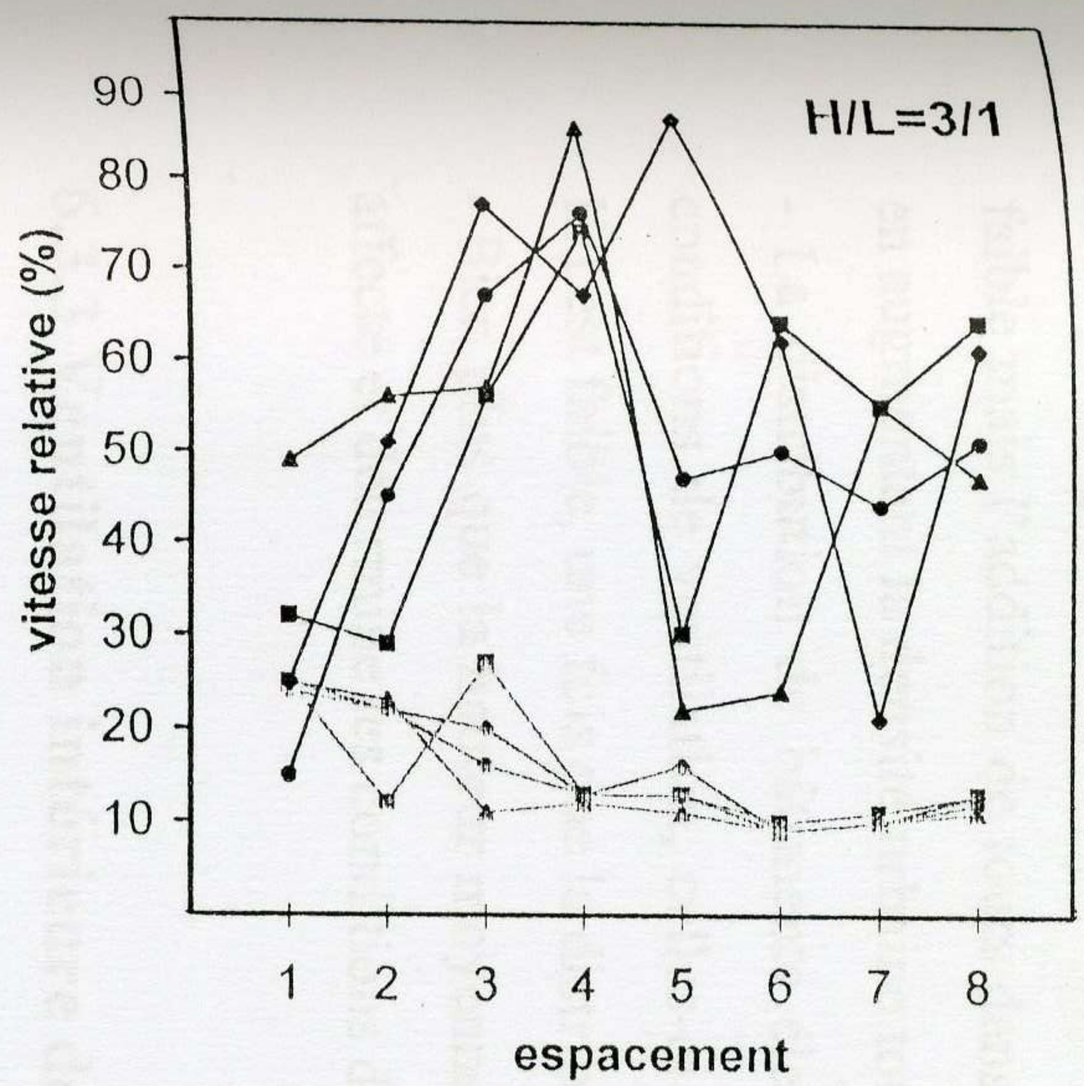
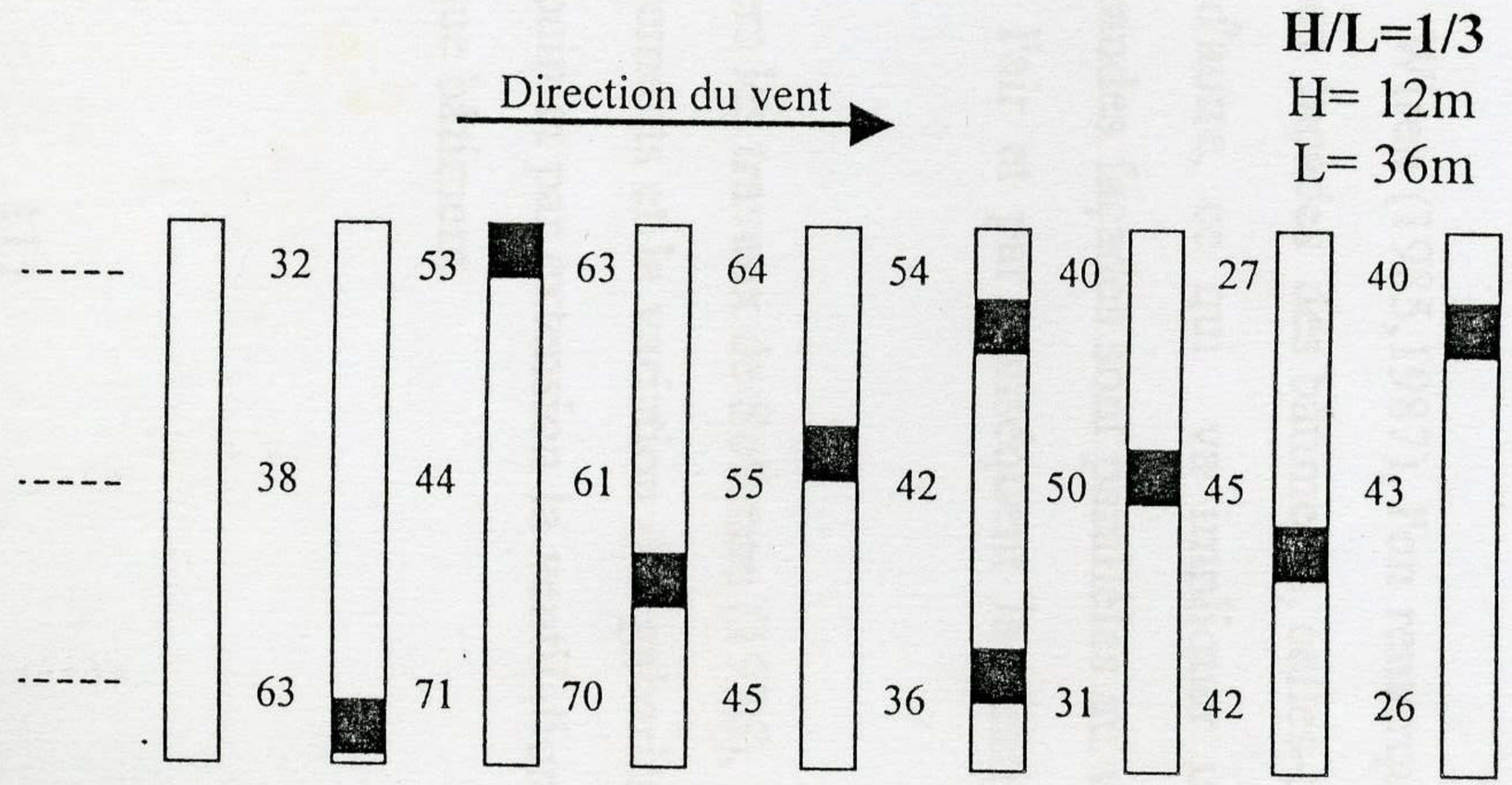
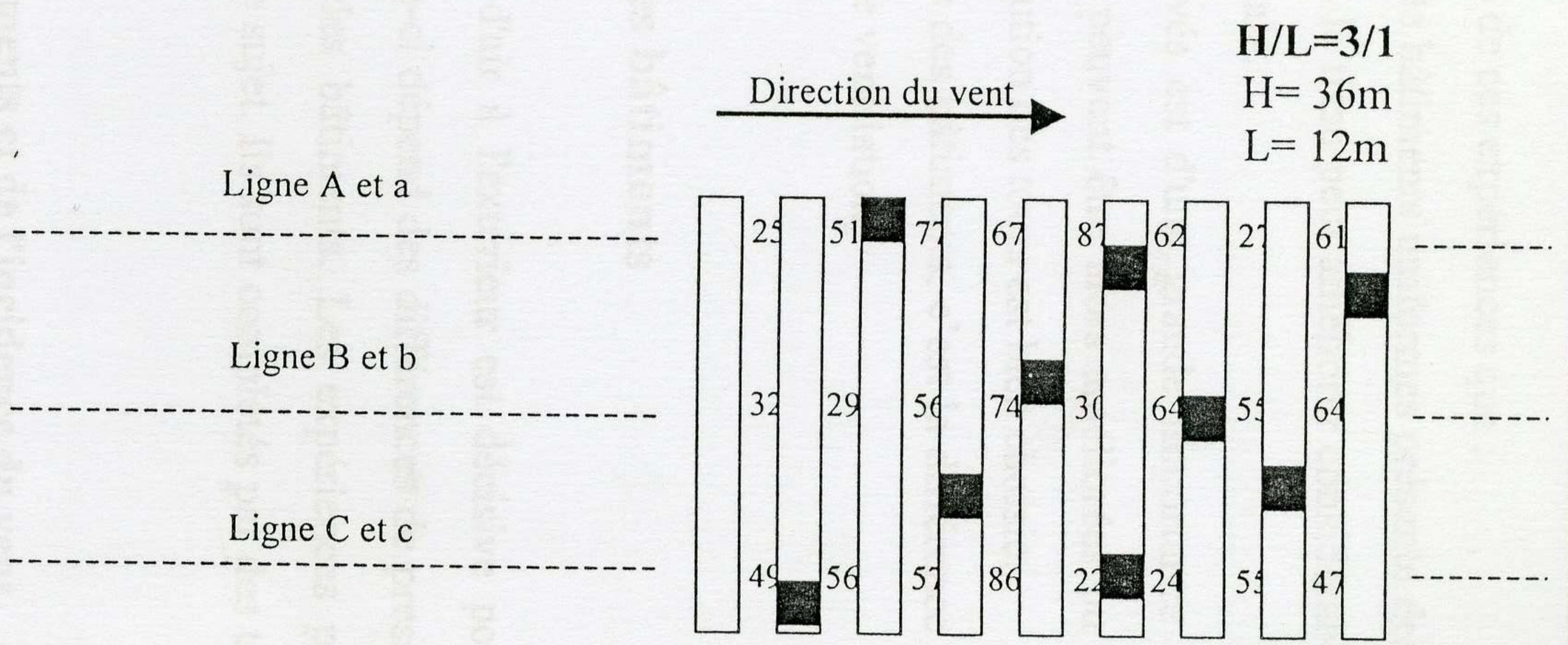


Figure 6.26 : Rôle des tours et de leur distribution sur la vitesse du vent en milieu urbain . Les tours en brise font obstacle au vent et réduisent sensiblement sa vitesse, tandis que des tours bien réparties permettent d'améliorer la ventilation (Givoni 1989)









A, B, C : Vitesses relatives pour réseau uniforme
A, b, c : Vitesses relatives pour réseau avec tours

Figure 6.27 : Rôle des tours et de l'espacement entre bâtiments (H/L) dans l'accroissement de la vitesse du vent (Givoni 1989).

Ainsi, nous pouvons déduire de ces expériences que :

- Une configuration urbaine dense de bâtiments uniformes présente des conditions de ventilation faible mais l'addition de tours dans le tissu peut améliorer considérablement la ventilation, tout en augmentant la densité urbaine totale.
- La distribution de bâtiments élevés est d'une grande importance dans la modification des conditions de ventilation, celles-ci peuvent être alors améliorées ou réduites. L'effet du ratio H/Lest faible, une fois que la distribution des tours est bien choisie.
- Bien plus que la hauteur moyenne des bâtiments, c'est la différence de hauteur entre eux qui affecte et détermine les conditions de ventilation.

6.3.3 Ventilation intérieure des bâtiments

La connaissance des flux d'air à l'extérieur est décisive pour évaluer le niveau de ventilation intérieure résultant. Celle-ci dépend des différences de pressions extérieures induites par l'agencement et la géométrie des bâtiments. Les expériences présentées précédemment apportent quelques informations à ce sujet. Ils sont complétés par des travaux liés directement à la ventilation intérieure.

1- Effets des espacements des bâtiments et de l'incidence du vent

Dans l'expérience menée par Wiren (1985,1987), l'on remarque que lorsque le vent est perpendiculaire ou oblique aux grandes façades des bâtiments, celles-ci connaissent des champs de pressions opposées de part et d'autre, ce qui va impliquer une ventilation intérieure importante. A l'inverse lorsque les grandes façades sont parallèles au vent, elles ne sont pas du tout affectées par l'écoulement de l'air et par conséquent la ventilation intérieure est peu probable.

De même qu'il apparaît à travers les travaux de Soliman (1976), Hussein (1978) et Givoni (1989) que l'augmentation des espacements et la variation des gabarits a pour effet d'améliorer la circulation de l'air dans le tissu urbain et par extension la ventilation intérieure car des zones de pression différentes entourent chaque bâtiment.

En matière d'étude de la ventilation intérieure, proprement dite, Weston (1956) a mesuré les flux internes dans un modèle poreux représentant un bâtiment industriel, où les ouvertures sont exposées à 45° par rapport au vent, placé derrière un obstacle poreux, de hauteur variable. D'une manière générale, la ventilation naturelle intérieure est améliorée avec l'accroissement des espacements entre bâtiments. Cependant, a une distance critique de séparation, la ventilation est minimale, et peut être améliorée par toute augmentation ou diminution d'espacement car l'air se déplace dans le sens opposé au vent à l'extérieur, cette situation est favorisée par la forte dépression qui s'établit entre le modèle et l'obstacle.

Dans le même sens Chand (1976) a mené une recherche sur un réseau d'éléments poreux représentant des maisons semi-detachées ou en bande, disposées en rangées parallèles et faisant face au vent. Plusieurs espacements H/L et géométries du bâti ont été testés.

Les principaux résultats de cette investigation sont :

- La vitesse du vent à l'intérieur est sensiblement plus faible en présence d'obstacles en amont du vent comparativement à un bâtiment isolé, même si les espacements sont importants. De même que la réduction des distances entre bâtiments a pour effet de diminuer la ventilation interne.
- En fonction des proportions des modèles étudiés, la vitesse intérieure montre différentes tendances de changement. Les résultats révèlent la présence d'un moment critique dont la valeur varie avec la géométrie et qui correspond à la valeur de ventilation minimale et au moment d'inversion dans la direction du flux.
- La ventilation dans un élément protégé est améliorée lorsque sa hauteur est plus élevée que le bâtiment obstacle.

2- Effets de la forme du bâtiment

Tous les travaux présentés plus haut, se basent principalement sur la géométrie des espaces extérieurs et son rôle dans la ventilation urbaine. L'importance de la forme du bâtiment n'a été approchée que par rapport à la géométrie des espaces extérieurs qu'elle implique. Ainsi, cette lecture est complétée ci-après par l'identification du rôle que peut jouer la géométrie du bâtiment dans la ventilation intérieure en milieu urbain.

La ventilation intérieure est optimale dans des bâtiments de faible largeur, car ceux-ci facilitent la ventilation transversale, à savoir le mouvement de l'air entre deux façades opposées se trouvant dans des champs de pressions différents. Elle est aussi plus importante lorsque les bâtiments se trouvent dans des sites exposés ou dans un site de faible densité.

Toutefois, une situation urbaine "classique" suppose généralement des densités plus ou moins grandes qui provoquent une chute du potentiel de ventilation extérieure et par conséquent intérieure, tel que montré précédemment. Par ailleurs la forme d'un bâtiment peut varier de la forme la plus compacte à une forme plus allongée, en fonction des multiples objectifs de conception ou autres considérations de confort, elles-mêmes liées au climat tel que le contrôle thermique (déperditions). D'où la nécessité de mieux comprendre l'impact de la forme du bâtiment et de la densité d'un tissu urbain sur la ventilation intérieure. La recherche suivante permet d'atteindre ce but.

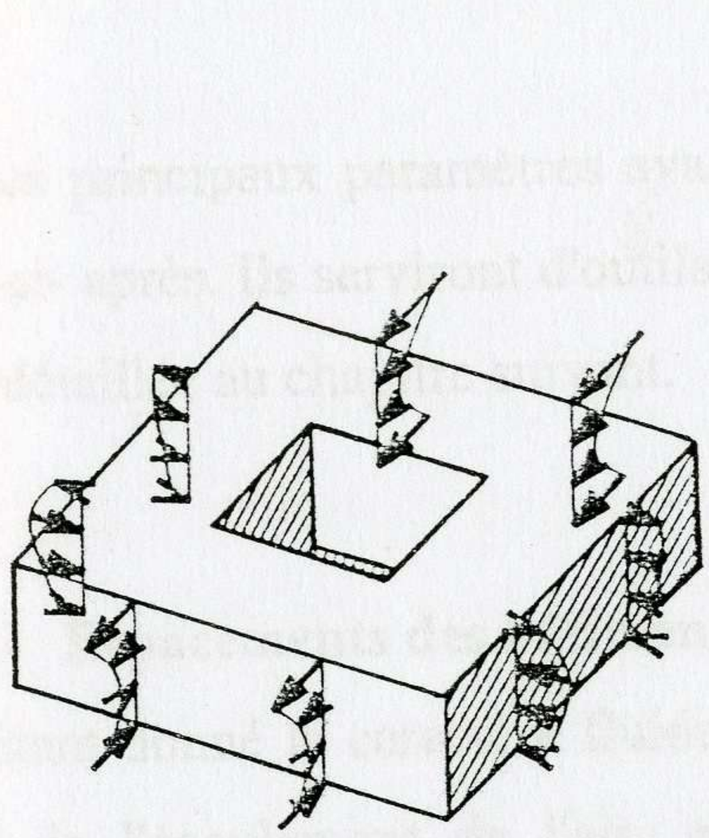
Bensalem (1991) a étudié le potentiel de ventilation naturelle dans des bâtiments à patio et des bâtiments à atrium en site exposé et en milieu urbain. Les effets de deux variables principales ont été étudiés : la géométrie du patio et l'incidence du vent.

Les tests en site exposé ont montré, comme attendu, que les bâtiments à patio sont moins bien ventilés que des formes longitudinales orientées face au vent. L'influence de la géométrie du patio sur la capacité d'induire des flux d'air suffisants est limitée. Par contre l'effet de l'orientation du bâtiment est bien plus remarquable, à savoir qu'une incidence oblique du vent provoque une nette amélioration de la ventilation du bâtiment.

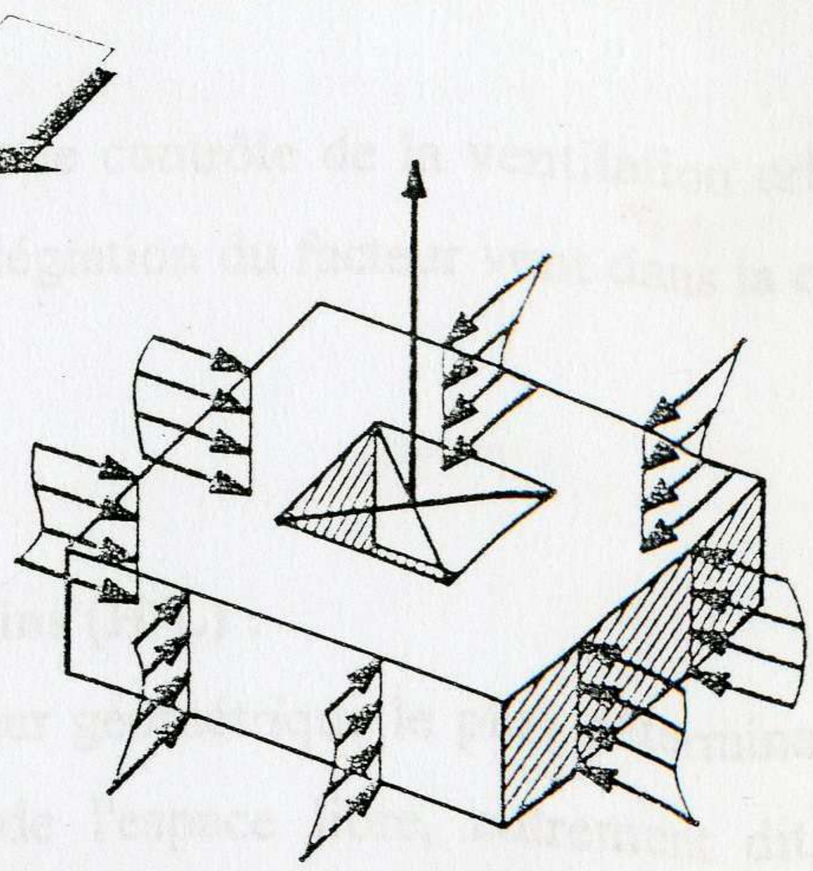
Toutefois, en milieu urbain la différence de pression sur les façades des bâtiments est bien trop faible pour générer une ventilation suffisante, et celle-ci peut chuter de plus de la moitié par rapport à une situation dégagée. L'incidence oblique du vent permet d'améliorer les vitesses internes de l'air, car cette disposition permet une meilleure infiltration du vent dans les rues, et induisent de ce fait des champs de pression plus forts. Cependant, dans les deux cas, les performances de ventilation d'un bâtiment à patio demeure faible.

Le cas est tout autre pour les bâtiments à atrium, et l'intérêt essentiel de cette recherche est d'avoir montré qu'il est possible d'améliorer cette ventilation interne en exploitant les puissants champs de pression qui existent au-dessus des toitures en couvrant le patio, soit un bâtiment à atrium.

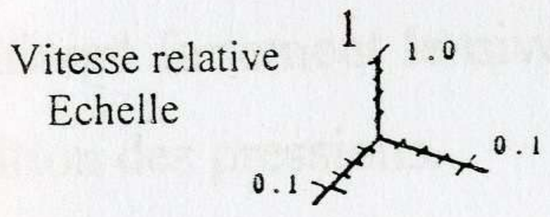
Il a été trouvé que cette solution peut améliorer la ventilation de l'ordre de 80% à 130% par rapport à un bâtiment à patio. Le principe est que les forces de succion en toiture sont si grandes qu'elles induisent un mouvement d'air qui entre par toutes les façades et est expulsé entièrement par la toiture (figure 6.28). Ainsi, l'usage de l'atrium se présente comme un moyen efficace d'améliorer la ventilation dans les sites congestionnés et pour des géométries de bâtiment compactes.

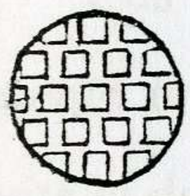


Modèle à patio



Atrium exploitant les effets
de succion en toiture





Milieu urbain
Espacement entre bâtiments = 1,5H
Trame en damier

Figure 6.28 : Performances de ventilation des bâtiments à patio et à atrium en milieu urbain dense (Bensalem 1991).

6.3.4 Récapitulatif des paramètres urbains déterminants dans le contrôle du vent

Les principaux paramètres ayant un impact dans le contrôle de la ventilation urbaine sont rappelés ci- après. Ils serviront d'outils de base pour l'intégration du facteur vent dans la conception urbaine, détaillée au chapitre suivant.

1- Espacements des bâtiments et profils urbains (H/L) :

Etant donné le caractère fluide du vent, le facteur géométrique le plus déterminant dans le contrôle de l'écoulement de l'air, est la géométrie de l'espace libre, autrement dit, tous les espacements qui existent entre bâtiments aussi bien les espacements horizontaux (distances latérales et frontales) entre bâtiments que leur relation avec la hauteur, donc le profil urbain et qui déterminent fortement le niveau d'abri, d'exposition au vent dans l'entité urbaine en agissant sur la répartition des pressions.

Ces espacements conditionnent le niveau d'obstruction au vent d'un bâtiment par d'autres éléments environnants ; Ces obstructions sont plus grandes à mesure que les espacements sont réduits et donc le potentiel de ventilation se réduit davantage avec la diminution des espacements.

Le profil urbain H/L définit la nature du flux, autrement dit le taux de renouvellement d'air entre les bâtiments, dans ce cas plus l'espacement est grand plus grande est la ventilation dans les rues.

2- Incidence du vent par rapport au bâti :

La disposition du bâti par rapport à la direction du vent est le deuxième paramètre décisif en matière d'écoulement de l'air en milieu urbain. Ce facteur agit simultanément avec les espacements déjà cités et conditionne le niveau de ventilation. Trois incidences principales par rapport à leur performance de ventilation ont été identifiées : L'incidence perpendiculaire, parallèle ou oblique.

3- La géométrie du bâtiment :

Les dimensions du bâtiment sont importantes aussi bien pour la ventilation au niveau urbain que pour la ventilation intérieure. Pour cela les dimensions absolues et relatives sont importantes. D'abord l'assemblage des bâtiments dépend de leurs formes qui induisent une certaine géométrie de l'espace extérieur, et renvoient donc, au rôle des espacements déjà cité. D'autre part la largeur du bâtiment va conditionner le potentiel de ventilation transversale.

5- Différence de gabarits :

Elle a pour résultat de dévier les flux d'air vers les niveaux de la rue et peut constituer un moyen pour modifier les vitesses de l'air en milieu urbain, notamment pour améliorer la ventilation.

6.4 Contrôle climatique par la végétation

Les pages précédentes de ce chapitre ont permis d'identifier les paramètres géométriques influants sur le contrôle climatique. Le présent titre tente de montrer le rôle que peut jouer la végétation comme élément additif visant à renforcer ce contrôle. En effet, nous avons expliqué précédemment que la végétation possède des propriétés qui lui permettent de modifier les conditions locales du climat (Cf. 3.4.2 et 4.2.1) puis nous avons donné les critères d'introduction de cette végétation à l'échelle globale de la ville (Cf.5.6). Nous nous proposons maintenant d'expliquer les interactions qui existent entre le domaine bâti et le végétal, dans le cas de leur imbrication, afin d'identifier les conditions que doit satisfaire cette végétation lorsqu'elle est utilisée à l'échelle de la composition urbaine.

Nous savons que la végétation peut être d'un effet positif ou négatif par rapport au climat selon l'usage, plus ou moins, judicieux de ses propriétés. Evidemment, un aménagement vert ne doit pas créer une situation climatique plus défavorable que la situation initiale, même si celle-ci est préconisée pour des objectifs autres que climatiques (esthétiques, acoustiques, pour absorber la pollution, etc.)

Effectivement, l'imbrication d'espaces verts et d'espaces bâtis peut être conflictuelle, car la végétation peut agir sur le microclimat urbain négativement en bloquant l'accès au soleil en hiver, en réduisant le mouvement de l'air dans les espaces extérieurs et par extension dans les bâtiments.

Egalement, il convient de connaître l'impact des propriétés des arbres (forme, volume, densité, taille, nombre, etc.) sur les économies d'énergie potentielles pour le chauffage et/ou le refroidissement.

Parmi les recherches qui ont évalué ces aspects, celles données ci-après.

6.4.1 Impact de la végétation sur l'accès au soleil dans les bâtiments

La végétation plantée pour protéger les bâtiments du soleil d'été peut gêner l'ensoleillement de ces bâtiments en hiver car les branches peuvent réduire jusqu'à 30 à 40% de l'irradiation d'hiver recherchée (Mc Pherson 1992).

Cãnton et al (1994) ont mené une recherche qui étudie la perméabilité des couronnes d'arbres au rayonnement solaire d'hiver pour la ville de Mendoza, située dans une région aride d'Argentine pour juger de l'importance de ce critère. Le choix de cette ville, pour un tel objectif, est pertinent car l'imbrication de l'espace bâti et de l'espace végétal y est important, ce qui est approprié pour évaluer les interactions entre ces deux entités. Cette ville-oasis compte 600000 habitants avec un ratio habitant/arbre de un (01).

Les résultats donnent les taux de perméabilité à l'irradiation globale, directe et diffuse, pour quatre espèces d'arbres à feuillage caduc, estimées représentatives du couvert végétal dans la ville et ce pour différentes zones et à des étapes particulières de leur cycle foliaire annuel (Figure 6.29).

Les principaux résultats montrent que le platane fournit la meilleure alternative en été avec seulement 9 % de perméabilité moyenne à l'irradiation totale, ce qui est essentiel pour cette zone aride nécessitant le maximum d'ombrage. D'autre part le frêne présente les plus grandes valeurs de perméabilité au soleil d'hiver avec seulement 29.5 % de rayonnement intercepté. Les deux autres espèces présentent moins d'intérêt puisque moyennement efficaces l'été et l'hiver. Ainsi, il apparaît que le choix du type d'arbre est important par rapport aux effets de masques que peuvent causer les troncs et les branches sur les bâtiments en hiver.

Ainsi, lorsque la végétation est localisée prés des bâtiments, à des endroits pouvant gêner l'accès au soleil (Ex : façades sud), les espèces à feuillage persistant sont à exclure et les espèces à feuillage caduc doivent être choisies de manière à permettre le maximum d'ensoleillement l'hiver.

6.4.2 Effets de la localisation et du type d'arbre sur les économies d'énergie

Hormis ces aspects d'accès au soleil, le choix de la végétation doit se faire par rapport aux économies d'énergie qu'elle permet de réaliser. Ces économies dépendent du type d'arbre, de sa forme, de son volume et de sa localisation par rapport aux bâtiments et du nombre d'arbres. Ces aspects sont expliqués ci-après.

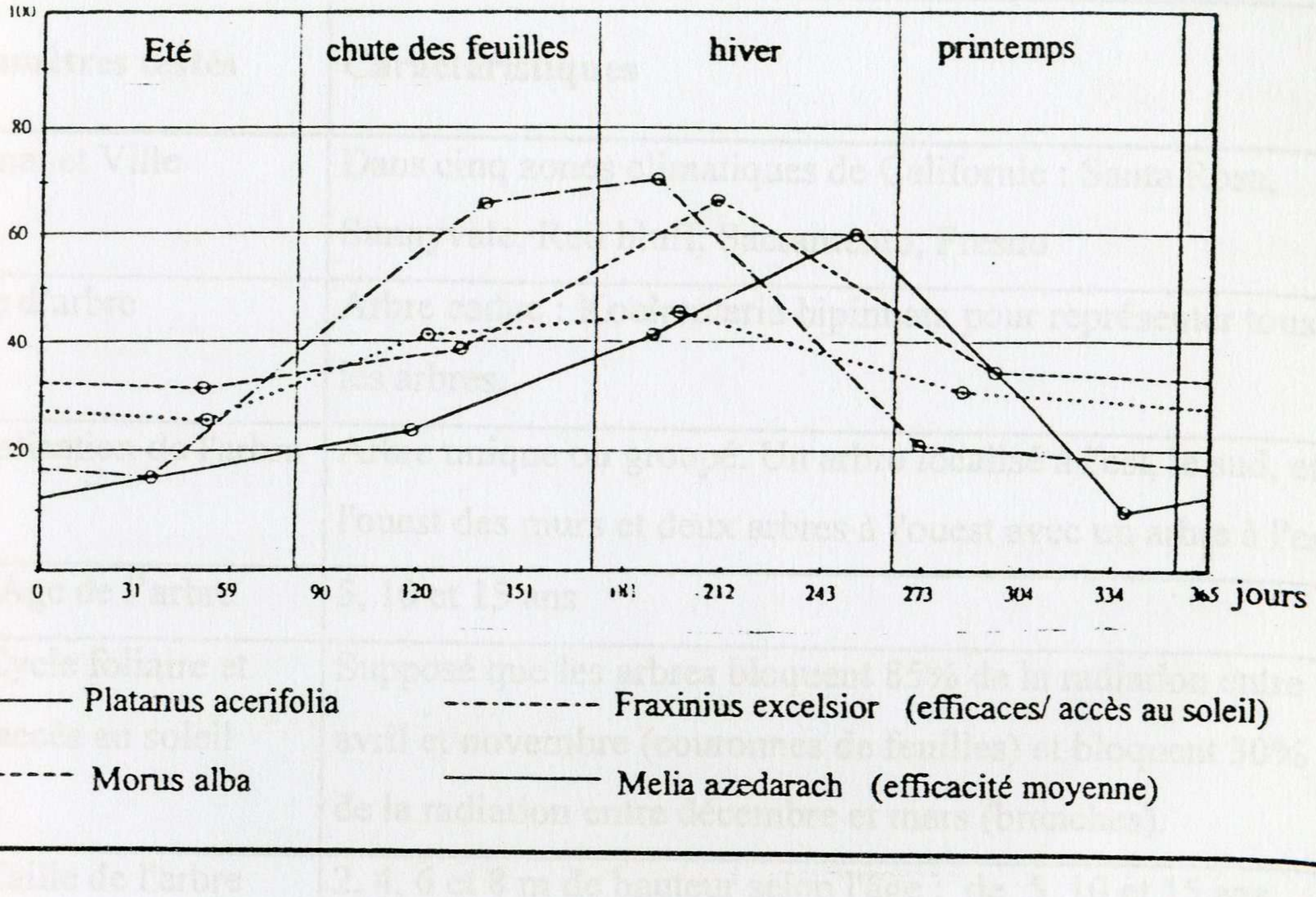


Figure 6.29 : Résultats de la perméabilité à la radiation solaire pour différentes espèces d'arbres (Canton et al 1994)

Tableau 6.4 : Conditions de simulation de la recherche menée par McPherson et Simpson (1995)relative aux effets des propriétés des arbres sur les économies d'énergie dans les bâtiments.

Paramètres testés	**Caractéristiques**
Climat et Ville	Dans cinq zones climatiques de Californie : Santa Rosa, Sunnyvale, Red bluff, Sacramento, Fresno
Type d'arbre	Arbre caduc : Koelreuteria bipinnata pour représenter tous les arbres.
Localisation de l'arbre	Arbre unique ou groupé. Un arbre localisé à l'est, le sud, et l'ouest des murs et deux arbres à l'ouest avec un arbre à l'est.
Age de l'arbre	5, 10 et 15 ans
Cycle foliaire et accès au soleil	Supposé que les arbres bloquent 85% de la radiation entre avril et novembre (couronnes de feuilles) et bloquent 30% de la radiation entre décembre et mars (branches).
Taille de l'arbre	2, 4, 6 et 8 m de hauteur selon l'âge : de 5, 10 et 15 ans respectivement
Effets simulés	Effets de l'ombrage des arbres sur la demande maximale et annuelle d'énergie due aux charges de chauffage et de refroidissement
Isolation des bâtiments	3 niveaux d'isolation : pas d'isolation , isolation de la toiture, isolation de la toiture et des murs
Expérience faite par simulation numérique Vent et températures maintenus constants : les effets de réduction du vent et des températures, habituellement, associés à la végétation ne sont pas inclus dans les calculs	

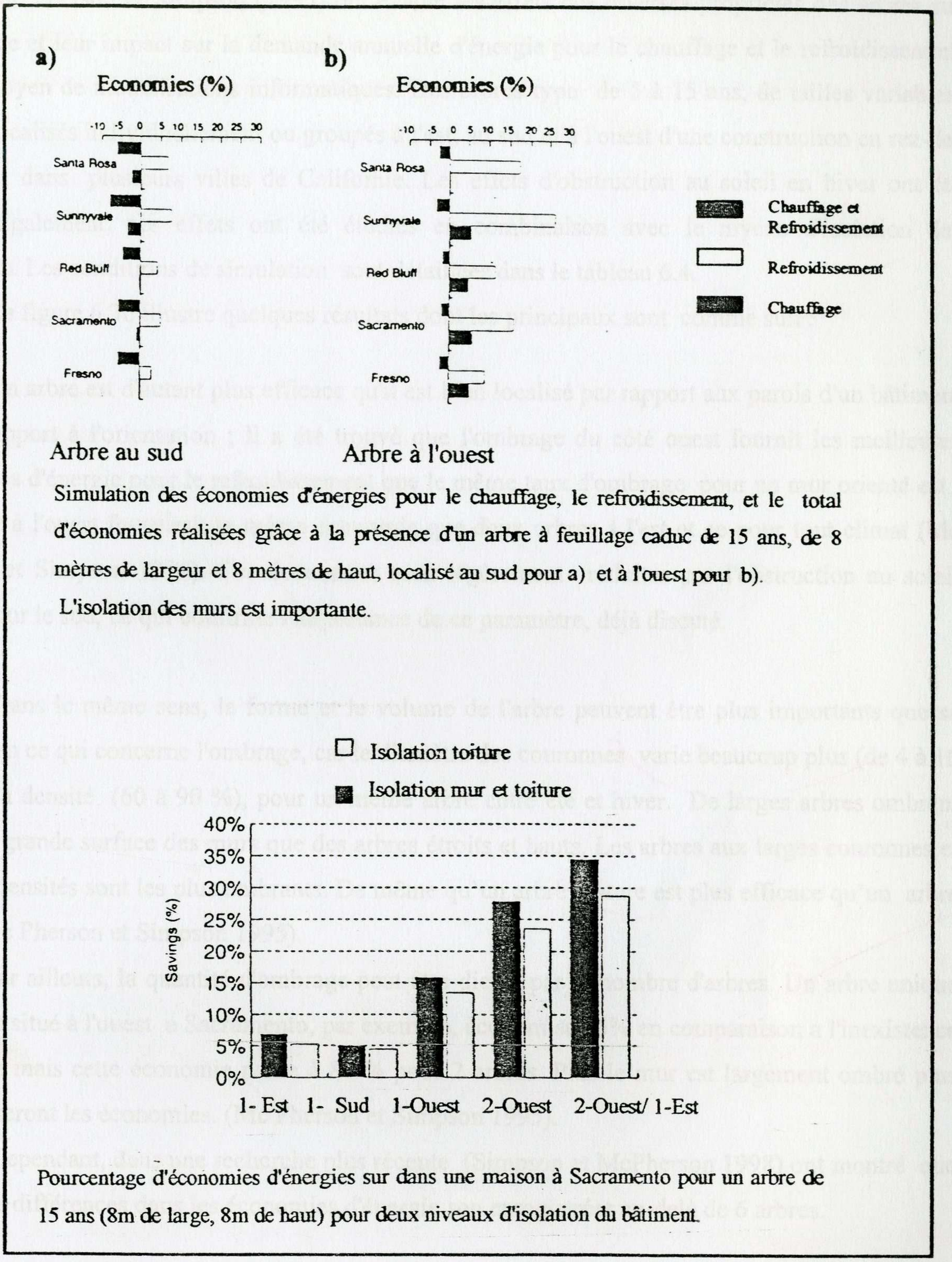


Figure 6.30 : Quelques résultats relatifs aux propriétés des arbres et leur impact sur l'ombrage et les économies d'énergie (Mc Pherson et Simpson 1995).

Mc Pherson et Simpson (1995) ont évalué les effets des diverses propriétés des arbres sur l'ombrage et leur impact sur la demande annuelle d'énergie pour le chauffage et le refroidissement par le moyen de modélisations informatiques. Des arbres type de 5 à 15 ans, de tailles variables, ont été localisés individuellement ou groupés à l'est, au sud et à l'ouest d'une construction en rez-de-chaussée, dans plusieurs villes de Californie. Les effets d'obstruction au soleil en hiver ont été inclus. Egalement, ces effets ont été étudiés en combinaison avec le niveau d'isolation des bâtiments. Les conditions de simulation sont détaillées dans le tableau 6.4.

La figure 6.30 illustre quelques résultats dont les principaux sont comme suit :

Un arbre est d'autant plus efficace qu'il est bien localisé par rapport aux parois d'un bâtiment et par rapport à l'orientation ; Il a été trouvé que l'ombrage du côté ouest fournit les meilleures économies d'énergie pour le refroidissement que le même taux d'ombrage pour un mur orienté est ; Un arbre à l'ouest fournirait la même économie que deux arbres à l'est et ce pour tout climat (Mc Pherson et Simpson 1995). Ces économies sont légèrement réduites par l'obstruction au soleil l'hiver pour le sud, ce qui confirme l'importance de ce paramètre, déjà discuté.

Dans le même sens, la forme et le volume de l'arbre peuvent être plus importants que sa densité, en ce qui concerne l'ombrage, car le diamètre des couronnes varie beaucoup plus (de 4 à 16 m) que sa densité (60 à 90 %), pour un même arbre entre été et hiver. De larges arbres ombrent une plus grande surface des murs que des arbres étroits et hauts. Les arbres aux larges couronnes et grandes densités sont les plus ombrants. De même qu'un arbre mature est plus efficace qu'un arbre jeune (Mc Pherson et Simpson 1995).

Par ailleurs, la quantité d'ombrage peut être dictée par le nombre d'arbres. Un arbre unique de 15 ans situé à l'ouest à Sacramento, par exemple, économise 15% en comparaison a l'inexistence de l'arbre mais cette économie passe à 80 % pour 2 arbres. Plus le mur est largement ombré plus grandes seront les économies. (Mc Pherson et Simpson 1995).

Cependant, dans une recherche plus récente (Simpson et McPherson 1998) ont montré que de faibles différences dans les économies d'énergie son enregistrées au-delà de 6 arbres.

Les arbres qui ne sont pas localisés pour ombrager les bâtiments peuvent encore être bénéfiques grâce à leurs effets d'agrégation. Ceci est important dans les aires de forte densité où les bâtiments se développent sur plusieurs niveaux et qui limitent l'emplacement de la végétation aux bordures des rues ou aux arrières cours (Mc Pherson et Simpson 1995).

Dans la ville de Chicago où les arbres se localisent principalement le long des rues, il est apparu que ceux localisés pour ombrer le côté ouest permettent des économies d'énergie pour le refroidissement de 2 à 7 %, les arbres ombrant l'est permettent des économies pour le refroidissement mais peuvent augmenter légèrement les besoins de chauffage l'hiver en raison du blocage des rayons solaires qu'ils créent. Les arbres au sud augmentent les besoins en chauffage l'hiver bien plus qu'ils ne réduisent les besoins en refroidissement l'été (Mc Pherson 1994c). Ceci laisse apparaître que l'évaluation doit être globale, mais dans ce cas aussi, l'ouest se présente comme la localisation qui permet les plus grandes économies globales, puis l'est mais le sud exige la nécessité d'utiliser des arbres caducs qui permettent l'accès au soleil l'hiver.

6.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'identifier un certain nombre de paramètres géométriques et environnementaux, liés au contrôle climatique, décisifs dans la définition de la qualité environnementale d'une entité urbaine.

La plupart de ces paramètres régissent simultanément la situation énergétique, thermique et aérodynamique et par conséquent des compromis sont à rechercher entre ces besoins par rapport aux choix géométriques à faire.

La méthodologie préconisée pour introduire la dimension climatique dans la composition urbaine se base sur ces paramètres. Elle est détaillée dans le chapitre 7 qui décrit sous forme de concepts la démarche à suivre.

Il est utile de rappeler que ce chapitre a privilégié le domaine urbain, mais les connaissances d'architecture bioclimatique sont également indispensables pour cette conceptualisation. Elles seront rappelées dans la présentation de ces concepts

Chapitre 7 : Méthodologie d'intégration du climat dans la composition urbaine

7.1 Introduction à la méthodologie proposée

Ce chapitre constitue la deuxième partie de la méthodologie proposée pour l'introduction du climat en urbanisme. La première partie donnée au chapitre 5 a été consacrée à la planification urbaine ; le présent chapitre concerne l'échelle de la composition urbaine.

Il a été identifié précédemment, les paramètres urbains et environnementaux déterminants dans le contrôle climatique lié à la radiation solaire et au vent et rapportés directement à la géométrie du tissu urbain (Cf. chapitre 6). Nous exposons dans ce chapitre une démarche méthodique qui explique la manière d'exploiter ces paramètres lors de la conception.

Au préalable, il est utile de rappeler, quelques informations relatives aux difficultés qui existent quant à l'introduction de la dimension climatique à ce stade de la réflexion. Ceci afin de mieux comprendre les choix faits ultérieurement dans l'orientation donnée à cette méthodologie.

7.1.1 Intérêt de la conceptualisation

A l'échelle de la composition urbaine, c'est la configuration tridimensionnelle du tissu qui constitue l'objet d'étude principal. A ce stade de la conception, l'urbaniste décide du tracé des rues, de la forme des bâtiments, des prospects, des gabarits, de l'emprise au sol, etc.

En Algérie, ce niveau de conception correspond au Plan d'Occupation des Sols (P.O.S). Ces plans sont élaborés entre le 1/2000 et le 1/500 et leur contenu est défini par le texte officiel (1) comme suit :

1. Fixer de façon détaillée la forme urbaine, son organisation, les droits de construction et l'utilisation des sols.
2. Définir la quantité minimale et maximale de constructions autorisées et les types de constructions et leur usage.
3. Délimiter l'espace public, les espaces verts, les emplacements réservés aux ouvrages publics et installations d'intérêt général, ainsi que les tracés et les caractéristiques des voies de circulation.

La difficulté majeure pour le développement d'une démarche qui permet l'introduction du climat à cette phase de conception réside dans le fait que dans la pratique l'élaboration des P.O.S doit tenir compte d'un grand nombre d'objectifs urbanistiques : satisfaction des données de programme, intégration au contexte physique, socio-économique, etc. auxquels nous proposons d'ajouter les objectifs de contrôle climatique, étudiés précédemment. Ces difficultés se rapportent à ces deux aspects et peuvent se résumer comme suit :

a) Diversité des objectifs de conception urbaine :

Le contexte urbain dans lequel intervient l'urbaniste peut lui dicter des orientations en matière de formes urbaines, de densités moyennes, de gabarits, etc. pour des considérations d'intégration morphologique au contexte comme dans le cas d'extension ou de densification urbaine, pour des données de programme, comme pour des contraintes d'ordre socioculturel liées au vécu et à la pratique des espaces ou encore économiques qui peuvent rendre le problème plus difficile

(1) Loi n°89-29 du 1erdécembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme.

D'autre part, les activités connaissent une localisation différente selon leur nature en l'occurrence : bureaux, commerces, habitat, etc. En effet, ces activités se retrouvent généralement dans un même tissu et leur association se fait aussi bien par juxtaposition que par superposition c'est à dire horizontalement ou verticalement. Ces aspects sont d'une grande importance car leurs exigences au regard du climat sont différentes. A titre d'exemple les bâtiments résidentiels sont exigeants au point de vue de l'ensoleillement, tandis que des bâtiments commerciaux ou à usage de bureaux peuvent se suffire à un bon éclairage.

De même les espaces urbains extérieurs sont astreints à des impératifs d'articulation et de mobilité urbaine, liées à leur vocation : rues plus ou moins importantes de circulation mécanique, rues piétonnes, places, etc. Ces espaces présentent une dépendance variable par rapport au climat qui dépend du niveau plus ou moins grand de confort requis.

b) Multiplicité des objectifs de contrôle climatique :

Le chapitre précédent a révélé l'étendue des objectifs de contrôle climatique ; Satisfaire ces objectifs constitue à lui seul un défi pour l'urbaniste étant donné le caractère parfois conflictuel entre besoins liés à la radiation solaire et au vent, considérés séparément ou simultanément, surtout qu'ils se rapportent aux mêmes paramètres géométriques (Cf. Oke 1988a).

Egalement, à la différence d'une action de niveau architectural, l'intervention à l'échelle urbaine exige la considération du confort climatique aussi bien dans les espaces intérieurs qu'extérieurs malgré leurs besoins différents.

c) Dépendance du contrôle climatique du contexte climatique :

Chaque climat dicte des objectifs de contrôle spécifiques et la variation des exigences entre un climat et un autre est très grande, bien que dépendant des même paramètres. Nous savons que d'un climat à un autre, l'impératif principal tout comme la stratégie à adopter peuvent être opposé car les besoins d'exposition ou de protection par rapport au soleil et au vent différent entre un climat chaud ou froid, sec ou humide (Cf. tableau 5.2).

Par ailleurs, Il a été relevé que les recommandations de conception urbaine sont souvent rigides et restrictives, alors qu'elles devraient être souples, flexibles et mettant en avant la qualité recherchée et non un résultat unique pour garantir une bonne interprétation de l'utilisateur (De Schiller et Evans 1994).

De même que Baker et al (1996) relèvent la difficulté de mener des modélisations détaillées pour évaluer le comportement climatique du tissu urbain, dû à la grande quantité de données dues principalement à la complexité du tissu. Pour cela, ils proposent le recours à des indicateurs géométriques simples qui décrivent et permettent de prédire le comportement environnemental du tissu, par rapport aux différents objectifs de contrôle climatique.

Ainsi, la méthodologie proposée ici est basée sur cette idée, à savoir qu'il ne s'agit pas tant de fournir un guide précis de conception autant qu'il est d'offrir les éléments clés pour évaluer cette intégration. Pour cela, nous avons opté pour une démarche formulée sous forme de concepts. Chaque concept est décrit par le biais des indicateurs géométriques déduits de l'étude de la relation géométrie urbaine- contrôle climatique.

Nous rappelons ses avantages :

1. Les concepts choisis sont tournés vers ses préoccupations principales de composition à savoir : quels profils choisir, quelle orientation du tissu préférer, quelles formes de bâtiments adopter, quelle densité optimale ? etc.
2. Ces concepts sont directement rapportés à la géométrie pour garantir leur opérationnalité, et permettre leur confrontation aux autres choix géométriques liés aux impératifs de projection urbaine habituels.
3. Ces concepts constituent des indicateurs sur le comportement environnemental d'une géométrie choisie par rapport à chacun des processus environnementaux : accès au soleil, absorption et réflexion de la radiation, refroidissement du tissu, ventilation des espaces extérieurs et intérieurs, etc. Ce qui permet de comparer la performance d'une géométrie par rapport à plusieurs objectifs de contrôle climatique et par conséquent réaliser les compromis nécessaires.
4. Cette forme de présentation permet également son utilisation quel que soit le climat considéré, puisque l'évaluation du comportement climatique laisse le choix de décider de l'exposition ou protection de la radiation solaire et du vent, etc. ; L'évaluation du niveau confort est à déterminer par l'urbaniste en accord avec la situation climatique considérée.

7.1.2 Détermination des concepts

La figure 7.1a résume les objectifs de confort climatiques liés à la radiation solaire et au vent et les paramètres géométriques et environnementaux qui contrôlent les conditions de confort climatique, tels que déduits de l'analyse menée au chapitre précédent. Les concepts sont issus directement de ces paramètres. Le principe consiste à grouper plusieurs de ces paramètres de manière à constituer un concept qui évalue simultanément plusieurs préoccupations climatiques interdépendantes. Ces concepts sont résumés dans la figure 7.1b.

Ces concepts sont au nombre de six (06) et peuvent être classés en 3 niveaux complémentaires : urbain, architectural et environnemental.

Deux concepts fondamentaux sont proposés, qui regroupent l'essentiel des recommandations liées aux principaux objectifs de contrôle climatique, à savoir : l'accès au soleil et la ventilation. Il s'agit respectivement des concepts d'ouverture au ciel et de porosité urbaine.

En complément, le concept de directionnalité consiste à expliquer les compromis à faire en matière d'orientation du tissu urbain puisque celui-ci dépend à la fois de l'orientation /soleil développé dans l'ouverture au ciel et de l'orientation par rapport au vent développée dans la porosité urbaine ; ceci parce que la détermination de la direction à donner au tissu urbain est un impératif de projection primaire auquel l'urbaniste est confronté dès le début de la conception. Le concept de réflectance est à considérer en association à l'ouverture au ciel puisqu'il renseigne en amont sur la quantité d'énergie disponible en milieu urbain.

Ces concepts représentent la base d'une intégration du climat à l'échelle urbaine parce qu'ils font référence à l'espace libre, caractéristique fondamentale d'une situation urbaine.

Le concept d'enveloppe bâtie est de fondement architectural. Il se base sur les masses construites, les bâtiments. Ce concept permet de contrôler la performance climatique du bâtiment en question et de lier ses critères de géométrie à leur pertinence au niveau urbain induit par l'assemblage des bâtiments.

Enfin, le dernier concept introduit les dispositions complémentaires liées à l'aménagement paysager comme moyen environnemental efficace qui permet d'optimiser le contrôle climatique.

Objectifs de contrôle climatique

Contrôle de la radiation solaire

- Accès au soleil à l'intérieur
- Accès au soleil à l'extérieur
- Refroidissement des bâtiments
- Albédo urbain
- Eclairage
- Conservation/déperdition de chaleur

Contrôle du vent

- Ventilation des espaces extérieurs
- Dispersion des polluants
- Ventilation intérieure
- Contrôle des effets aérodynamiques des bâtiments

Paramètres environnementaux et géométriques décisifs dans le contrôle climatique en milieu urbain

Radiation solaire

Le profil urbain H/L
Orientation/ soleil
Densité du plan
Géométrie du bâtiment
(Ratio S/V et % aire passive)
Caractéristiques de la radiation

Vent

Espacements entre bâtiments
(H/L frontal et latéral)
Incidence du vent/bâti
Géométrie du bâtiment
(Largeur du bâtiment)
Différence de gabarits

Végétation

Localisation de l'arbre
Type d'arbre
Densité et volume
Cycle foliaire

Conceptualisation

Détaillée à la figure 7.1b

Figure 7.1a : Processus de définition des concepts constitutifs de la méthodologie proposée

Objectifs de contrôle climatique

Paramètres géométriques et environnementaux décisifs dans le contrôle climatique

Conceptualisation

Niveau urbain

Ouverture au ciel

Contrôle de l'accès au soleil intérieur et extérieur

Réflectance urbaine

Reflexion de la radiation solaire

Porosité urbaine

Contrôle de la ventilation et dispersion des polluants

Directionnalité

Choix de l'orientation de la trame urbaine par rapport au soleil et au vent

Niveau architectural

Enveloppe bâtie

Relation entre choix d'architecture et impact climatique au niveau urbain

Niveau environnemental

Verdurisation

Améliorer les microclimats urbains par l'usage de la végétation

Figure 7.1b : Concepts proposés pour le contrôle climatique dans la composition urbaine.

7.2 Ouverture au ciel

7.2.1 Définition et objectifs

L'ouverture au ciel est l'un des concepts les plus importants à considérer en vue d'atteindre les objectifs d'un urbanisme climatique, puisqu'il prend en charge les moyens d'exploiter l'énergie solaire en faisant des apports d'énergie passifs le moyen privilégié de chauffage et donc d'économie.

L'ouverture au ciel permet le contrôle des échanges thermiques et énergétiques du tissu urbain avec l'environnement. L'accès au soleil et le refroidissement des bâtiments sont les principaux objectifs de contrôle solaire et énergétique. L'analyse a révélé leur dépendance des mêmes paramètres urbains, ce qui permet de les grouper dans le même concept.

La nomination ouverture au ciel renvoie au niveau de vue du soleil par les différentes parois du profil en ce qui concerne l'ensoleillement et le niveau de vue du ciel lorsque c'est le refroidissement qui est évalué.

Toute conception urbaine basée sur la définition d'un niveau d'ouverture au ciel approprié doit tenir compte des deux objectifs urbanistiques suivants :

1- L'ensoleillement

Pour l'urbaniste, le niveau d'accès au soleil (ou protection) concerne aussi bien les espaces intérieurs qu'extérieurs. L'ensoleillement est le souci majeur de toute conception climatique.

Dans les espaces intérieurs des bâtiments, les gains solaires utiles satisfont des besoins de chauffage passif et d'éclairage naturel. Lorsque cette radiation est, au contraire, gênante (risque de surchauffe, éblouissement, etc.), le souci devient la protection du soleil et la régulation des besoins de fraîcheur. Ces besoins dépendent fortement de la période dans la journée et dans l'année.

Dans les espaces extérieurs, l'accès ou la protection de la radiation solaire permet de contrôler la situation thermique et énergétique près du sol et le potentiel d'éclairage dans les rues pour le confort du piéton, pour toutes les activités se déroulant à l'extérieur, de même que pour l'aménagement végétal ou minéral de ces espaces.

2- Le refroidissement nocturne

Cette considération est essentielle pour le contrôle des températures urbaines nocturnes, de surface et de l'air, aussi bien dans les bâtiments que dans les rues. Cette propriété de refroidissement est donnée par la capacité d'un tissu urbain à restituer la chaleur emmagasinée durant la journée.

Cette influence s'est révélée décisive dans la constitution de l'îlot de chaleur urbain au niveau global de la ville. Elle l'est aussi à l'échelle microclimatique de la rue et les températures extérieures ont une incidence directe sur la variation des températures intérieures dans les bâtiments, par conduction à travers les matériaux ou convection par ventilation.

La définition du niveau d'ouverture au ciel optimal peut être d'une réelle complexité, due principalement au caractère parfois conflictuel ou incompatible des nombreuses exigences urbanistiques à satisfaire liées à la vue du ciel.

D'une part, l'accès et/ou protection du soleil peuvent s'opposer aux besoins de refroidissement urbain nocturne. A titre d'exemple, dans un climat chaud où le rayonnement solaire est intense, la première disposition à prendre serait une faible vue du ciel, pour un captage minimal de la radiation, en particulier l'été ; Toutefois le meilleur refroidissement nocturne, au contraire, nécessiterait, pour la même raison, la plus grande ouverture au ciel possible.

D'autre part, l'accès au soleil, à lui seul, exige la considération simultanée d'espaces différents, en l'occurrence les rues et les espaces intérieurs des bâtiments (murs et toitures), lesquels besoins peuvent induire des géométries différentes. A ces questions, s'ajoutent les conditions de radiation et les variations saisonnières qui constituent des données additives au problème.

Ainsi tout choix de géométrie urbaine doit être un compromis entre ces multiples objectifs. Une géométrie idéale n'existe pas ; Ici, comme pour toute action d'urbanisme, des choix formels doivent être faits sur la base des aspects les plus déterminants pour le contrôle climatique. Des moyens d'évaluation et de prédiction de cette ouverture au ciel sont nécessaires pour faciliter ces choix. Les pages suivantes présentent les paramètres déterminants de ces processus environnementaux et les dispositions urbaines à prendre pour permettre cette évaluation.

7.2.2 Paramètres déterminants

La partie 6.2 chapitre précédent, a permis de relever les principaux paramètres environnementaux et urbains qui conditionnent les processus environnementaux que sont la disponibilité de la radiation sur les différentes surfaces urbaines et sa capacité à restituer la chaleur en grandes ondes sous forme de rayonnement infrarouge.

Il s'agit, d'une part, de la géométrie de la rue, c'est à dire l'espacement entre bâtiments rapporté à leurs hauteurs donné par le ratio hauteur / largeur et de l'orientation des rues et des bâtiments par rapport au soleil. D'autre part, de l'ensemble des conditions de radiation, à savoir : géométrie solaire, intensité de la radiation, état du ciel, etc.

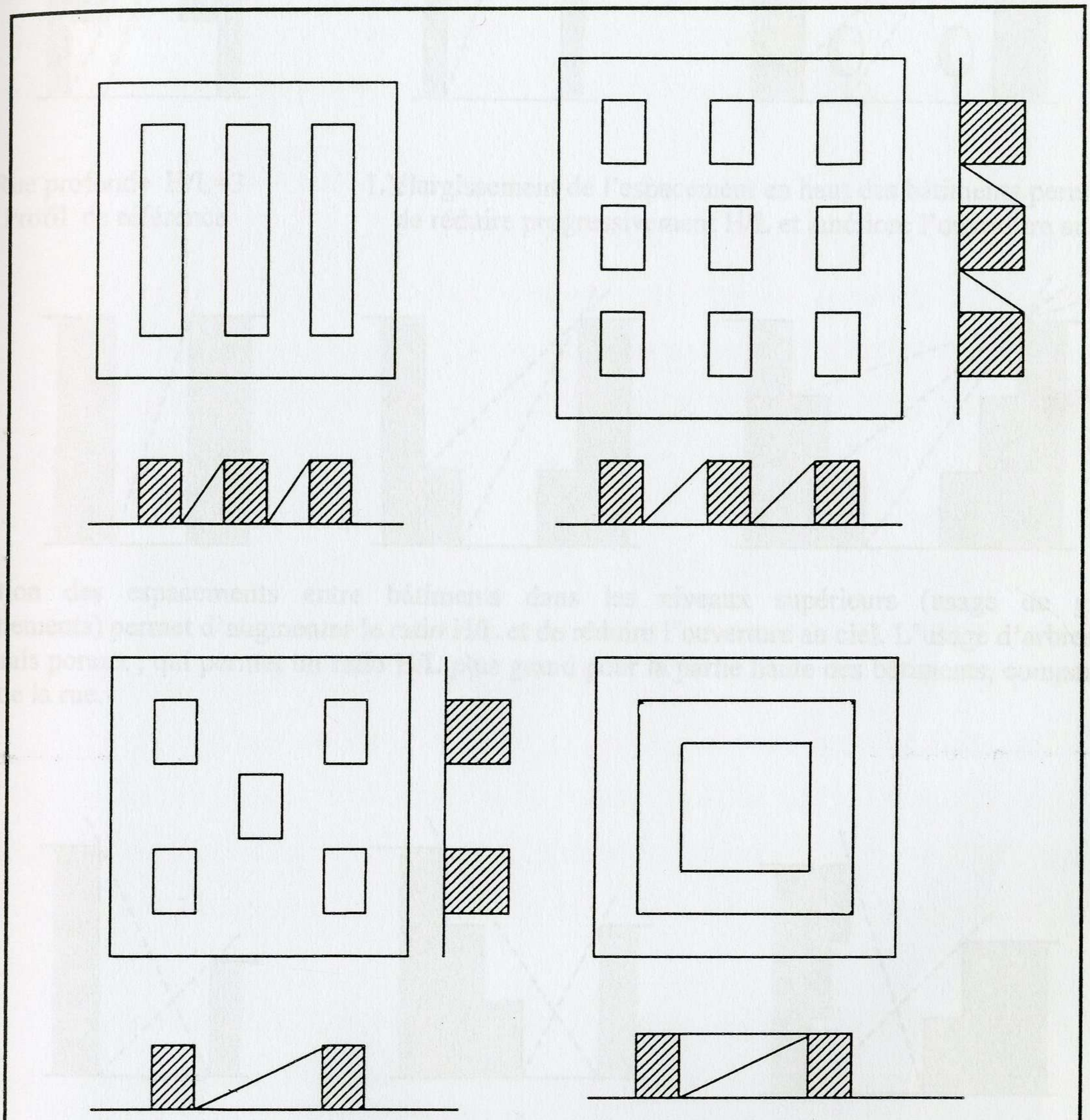
1- Le profil de la rue (H/L)

Le ratio H/L a été considéré par de nombreuses recherches comme étant l'unité structurelle de base d'une entité urbaine. Ceci est vrai s'il est considéré comme étant toute proportion entre hauteur bâtie et espacement entre deux bâtiments. De cette manière, il devient un paramètre représentatif de toutes les situations urbaines par rapport à sa performance vis à vis de l'ensoleillement et du refroidissement. Ainsi, il peut décrire aussi bien une rue bordée de bâtiments infiniment longs - caractéristiques d'une structure urbaine dense- que des situations urbaines plus variées de bâtiments largement espacés, voire par extension, une forme unique tel qu'un îlot (Figure7.2).

Il convient de remarquer, ici, qu'il est possible de proposer une emprise au sol suffisante par un choix de ratio H/L judicieux par le seul fait de considérer ce ratio comme moyen de contrôle de l'assemblage des bâtiments ; Ainsi un ratio H/L important peut être observé avec une densité relativement élevée si les bâtiments sont disposés en quinconce (Figure 7.2 b et c).

Par ailleurs, si le ratio H/L est généralement présenté sous la forme simplifiée d'un profil rectangulaire, il peut décrire différentes formes de profils verticaux (Figure 7.3). Ceci pour dire que le ratio H/L est un paramètre urbain extensible à de multiples situations urbaines, ce qui confirme son intérêt en urbanisme. Il permet une estimation quantitative tout en laissant libre choix à l'urbaniste de la forme urbaine à préférer.

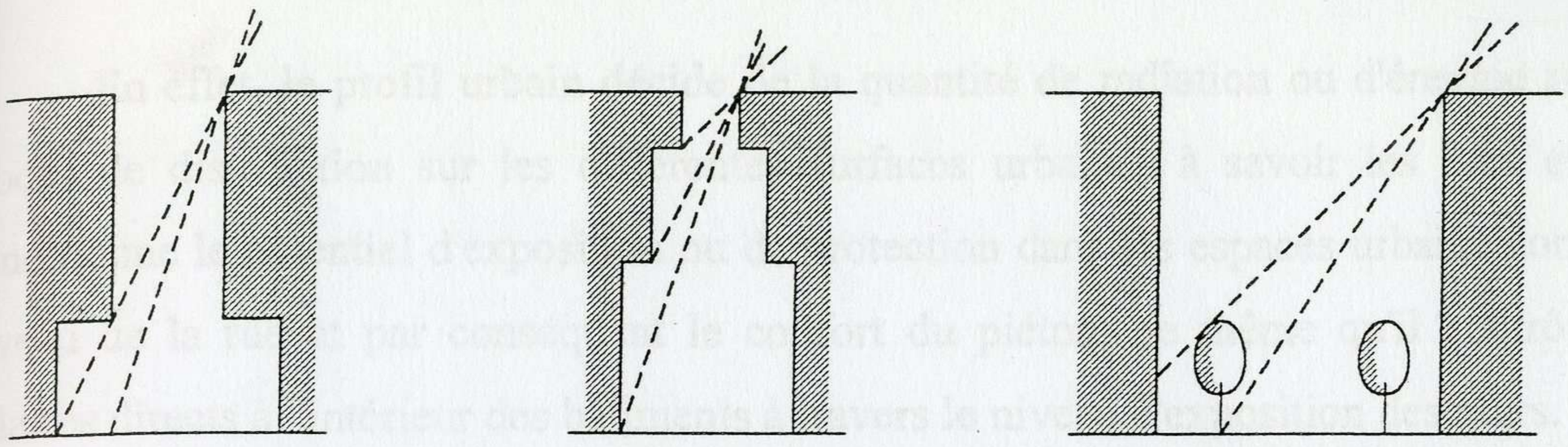
Le profil de la rue a été identifié comme étant le paramètre le plus pertinent dans la description d'une entité urbaine au point de vue de sa capacité de contrôle solaire et énergétique Arnfield 1990, Oke 1988a, etc.).



Le ratio H/L est l'unité structurelle de base . Il décrit plusieurs géométries urbaines : réseau de barres, de petits batiments, et par extension un îlot ; D'où son intérêt pour décrire la performance climatique d'un tissu liée à l'ensoleillment et le refroidissement.

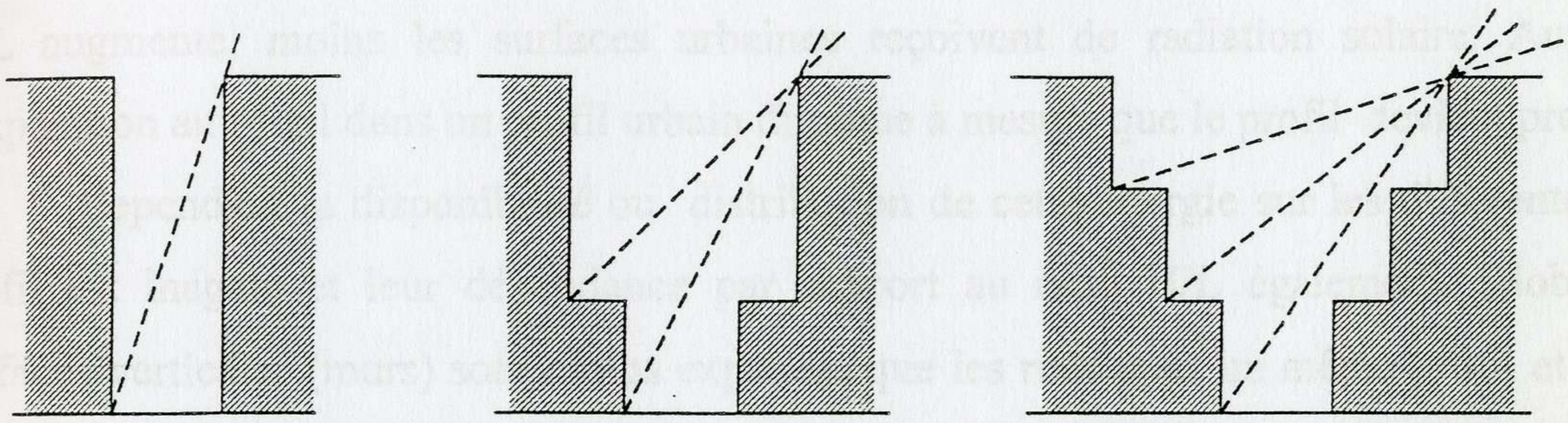
Figure 7.2 : Le ratio H/ L comme unité structurelle de base de l'entité urbaine.

a)



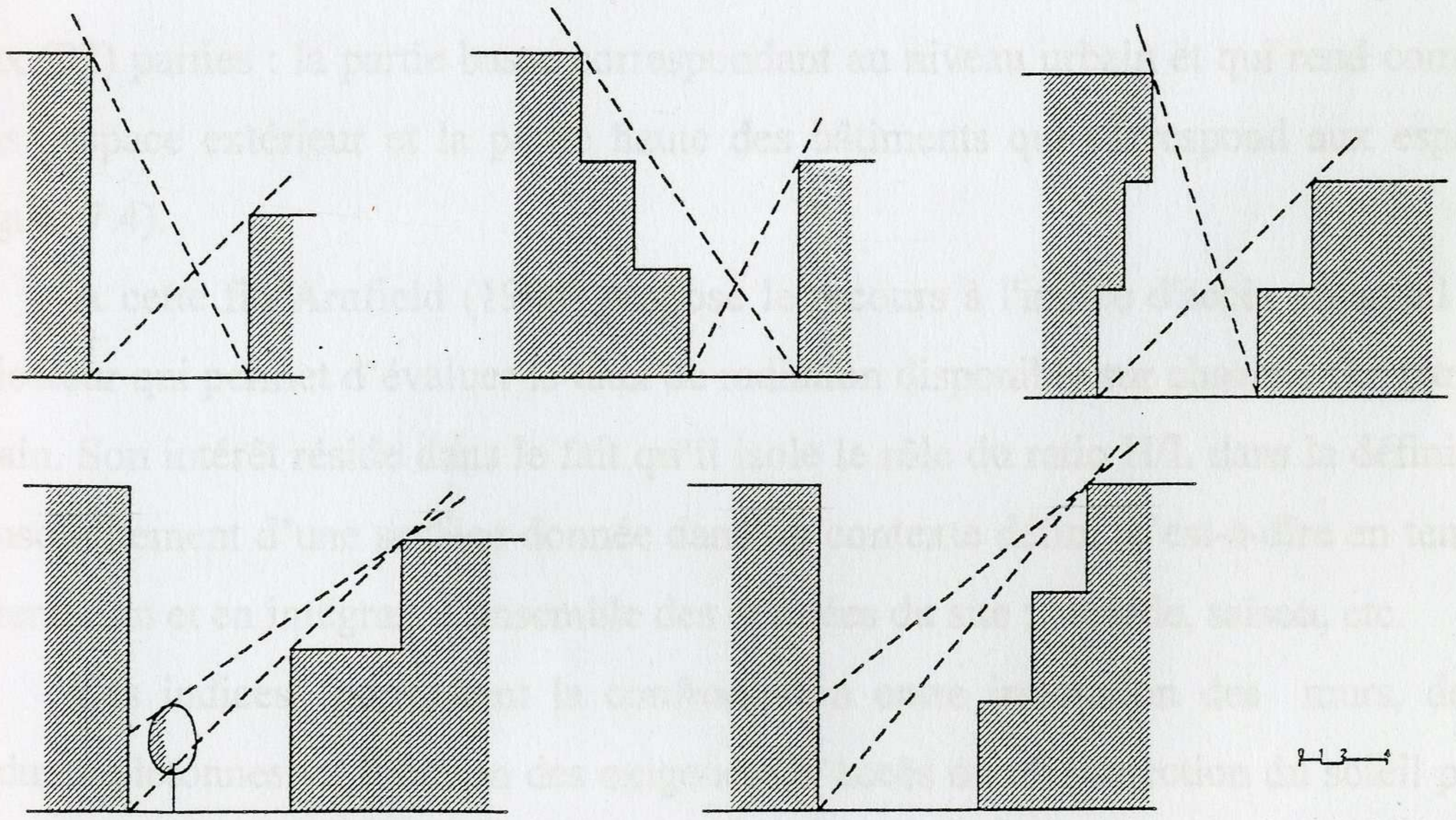
Rue profonde H/L=3
Profil de référence

L'élargissement de l'espacement en haut des bâtiments permet de réduire progressivement H/L et améliore l'ouverture au ciel



La réduction des espacements entre bâtiments dans les niveaux supérieurs (usage de galeries et d'encorbellements) permet d'augmenter le ratio H/L et de réduire l'ouverture au ciel. L'usage d'arbres est aussi un écran mais poreux , qui permet un ratio H/L plus grand pour la partie haute des bâtiments, comparativement au niveau de la rue.

b)



Exemples de profils asymétriques caractérisés par deux ratios H/L, ceci permet d'intégrer l'orientation / soleil dans le contrôle de l'ouverture au ciel (ensoleillement et refroidissement), aussi bien pour la rue que pour le niveau supérieur du bâtiment.

7.3 : Diversité des profils urbains rapportés au ratio H/L.

En effet, le profil urbain décide de la quantité de radiation ou d'énergie reçue et de ses modes de distribution sur les différentes surfaces urbaines à savoir les rues et les murs. Il conditionne le potentiel d'exposition ou de protection dans les espaces urbains correspondant au niveau de la rue et par conséquent le confort du piéton, de même qu'il contrôle les apports solaires directs à l'intérieur des bâtiments à travers le niveau d'exposition des murs.

L'étude de la relation entre géométrie et accès au soleil (Cf. 6.2.1) a révélé que le ratio H/L détermine d'abord la quantité d'énergie reçue dans l'espace global de la rue ; Plus le ratio H/L augmente, moins les surfaces urbaines reçoivent de radiation solaire. Autrement dit, l'exposition au soleil dans un profil urbain diminue à mesure que le profil devient profond.

Cependant la disponibilité ou distribution de cette énergie sur les différentes parois du profil est inégale et leur dépendance par rapport au ratio H/L également. Globalement les surfaces verticales (murs) sont moins exposées que les rues pour un même profil et la variation de H/L semble affecter plus les rues que les murs (Arnfield 1990). D'une manière plus fine on peut distinguer aussi entre les bordures urbaines destinées au piéton et la partie centrale de la rue par rapport aux irradiations qu'elles reçoivent.

Nous pouvons alors affirmer que la distinction entre ces deux niveaux est importante, voire nécessaire dans la détermination de l'accès au soleil. Le profil urbain peut être divisé en deux (02) parties : la partie basse correspondant au niveau urbain et qui rend compte du confort dans l'espace extérieur et la partie haute des bâtiments qui correspond aux espaces intérieurs (Figure 7.4).

A cette fin Arnfield (1990) propose le recours à l'indice d'accès au soleil (1) qui est un indicateur qui permet d'évaluer le taux de radiation disponible sur chacune des parois d'un profil urbain. Son intérêt réside dans le fait qu'il isole le rôle du ratio H/L dans la définition du niveau d'ensoleillement d'une surface donnée dans un contexte défini, c'est-à-dire en tenant compte de l'orientation et en intégrant l'ensemble des données du site : latitude, saison, etc.

Ces indices permettent la confrontation entre irradiation des murs, des rues et des bordures piétonnes en fonction des exigences d'accès ou de protection du soleil pour chacun de ces trois cas (Cf. p 90 et figure 6.7).

(1) I.A.S. : radiation totale d'une surface non obstruée / radiation reçue par la même surface en milieu urbain, varie entre 0 et 1.

Dans ce cas le niveau d'ensoleillement requis est défini en tenant compte du temps d'ensoleillement souhaitable, tel que proposé par Pereira et Minache (1989). Ces auteurs l'ont testé pour l'ensoleillement des murs, mais cette démarche pourrait s'étendre à l'ensoleillement de la rue pour intégrer le confort extérieur.

La figure 7.5 illustre sur cette base les ratios H/L qui permettent de décrire la géométrie d'une rue. Dans le cas le plus détaillé, le niveau urbain est contrôlé par quatre angles d'espacement. Cette représentation laisse apparaître qu'une plus grande densité peut être atteinte lorsque la partie basse des murs n'est pas exigeante en matière d'ensoleillement. Cependant, par souci de simplicité on retient, généralement, deux ratios H/L, l'un régissant l'ensoleillement du bâtiment 1 et l'autre l'ensoleillement du bâtiment 2.

Ici, il convient de mentionner que la considération de H/L pour contrôler l'ensoleillement des murs et des rues est fortement dépendant de l'orientation par rapport au soleil, qui se traduit, notamment, par la symétrie ou asymétrie du profil. Ce paramètre est expliqué plus loin.

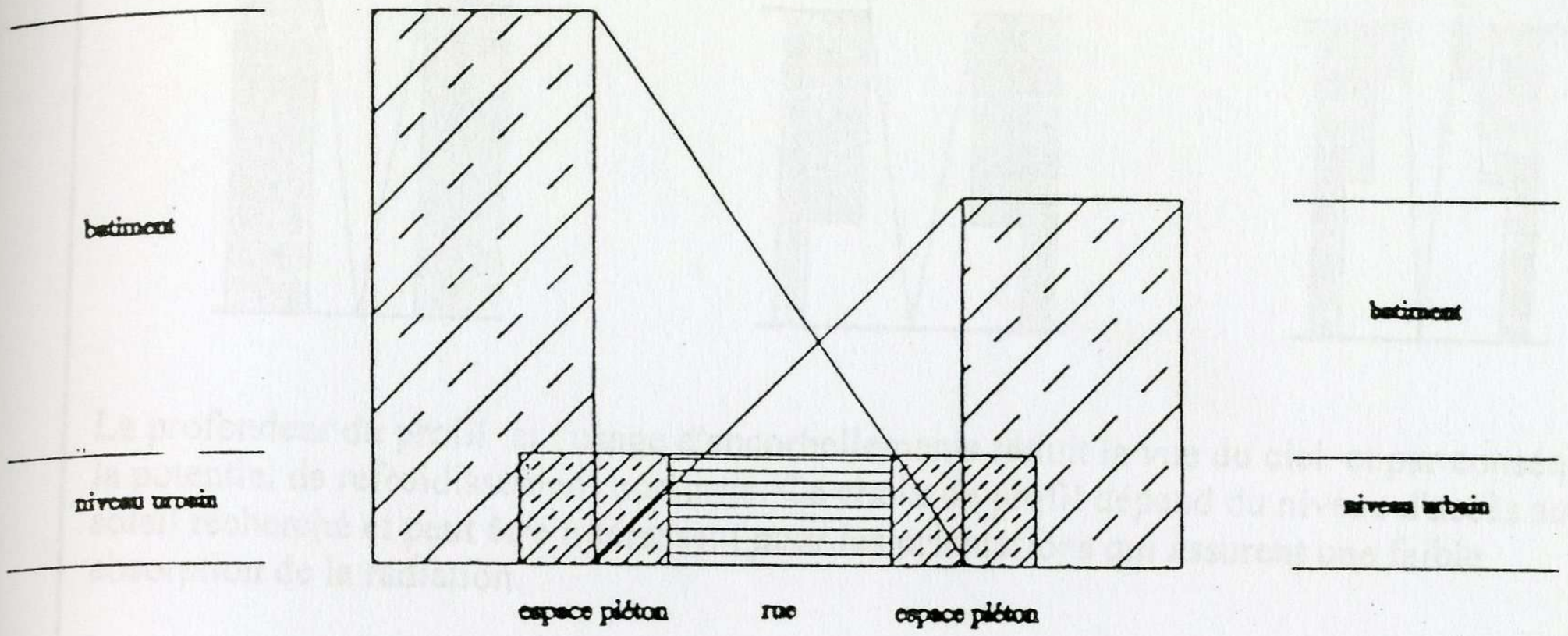
Hormis l'ensoleillement, la capacité de restitution de chaleur des bâtiments la nuit s'est également révélée dépendante du profil de la rue. Le potentiel de refroidissement diminue à mesure que le ratio H/L augmente (Oke 1988a) ; autrement dit, le refroidissement nocturne est favorisé à mesure que la vue du ciel augmente (cf. 6.2.2). Pour cela le facteur de vue du ciel (1) est l'indicateur privilégié de cette capacité à refroidir des bâtiments. Il est rapporté exclusivement au ratio H/L car le refroidissement nocturne ne dépend pas de l'orientation /soleil (Figure 7.6). Oke 1988a en donne l'équation suivante : $\varphi = \cos(\tan^{-1}(H/0.5L))$.

2- L'orientation par rapport au soleil

L'orientation /soleil est décisive dans la définition d'un ratio H/L optimal car la course du soleil par rapport à l'axe du profil décide du ratio H/L à adopter. En effet, la course du soleil est symétrique par rapport à l'axe d'une rue pour une orientation N/S et asymétrique pour les rues orientées est/ouest ce qui a pour conséquence que les rues orientées N-S présentent des profils de rues symétriques, tandis que les rues orientées E-O exigent des profils asymétriques (Knowles 1981).

---

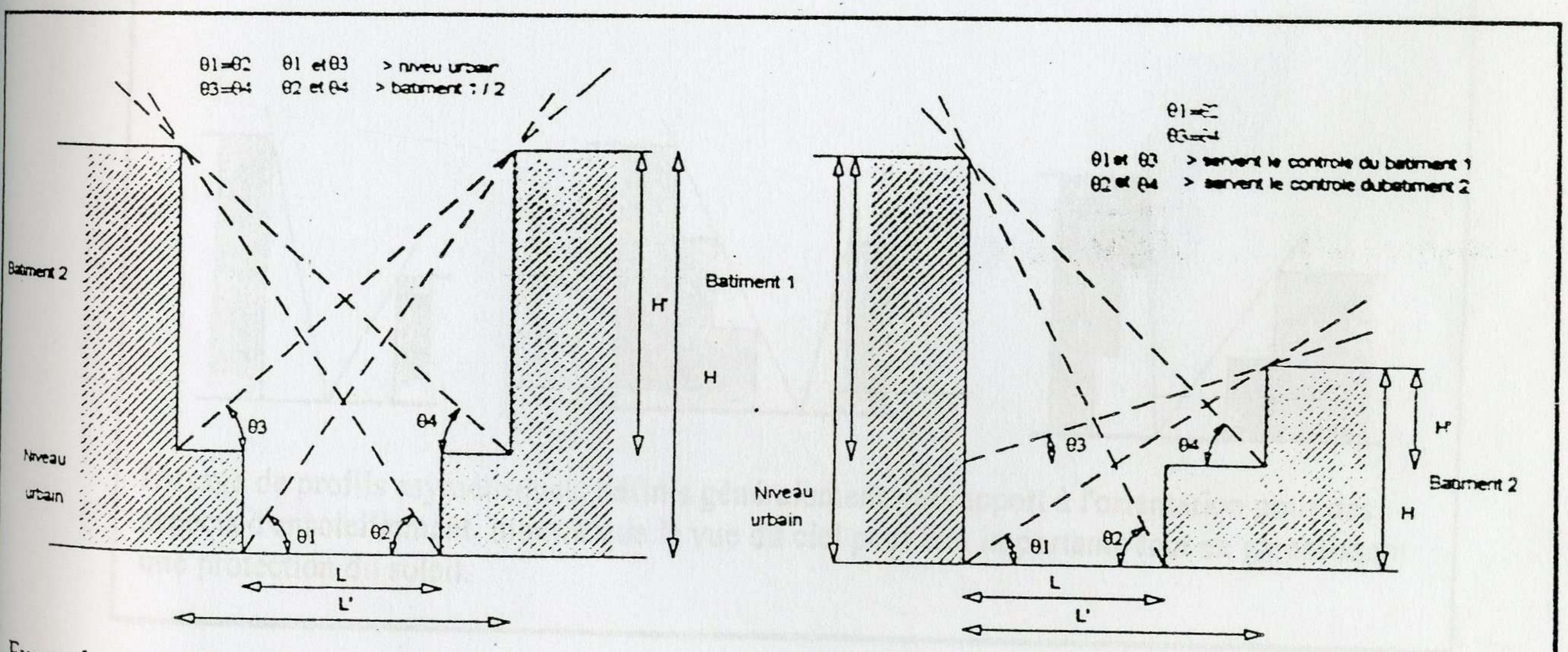
(1) Le facteur de vue du ciel (F.V.C) : ratio de la radiation solaire reçue par une surface à partir du ciel, rapportée à la radiation totale hémisphérique radiative.



Le profil de la rue peut être divisé en deux niveaux selon l'accès au soleil recherché :

1. Niveau urbain : ensoleillement de l'espace extérieur, avec possibilité de distinction entre bordures urbaines, destinées au piéton et partie centrale.
2. Niveau supérieur du bâtiment : concerne l'ensoleillement intérieur.

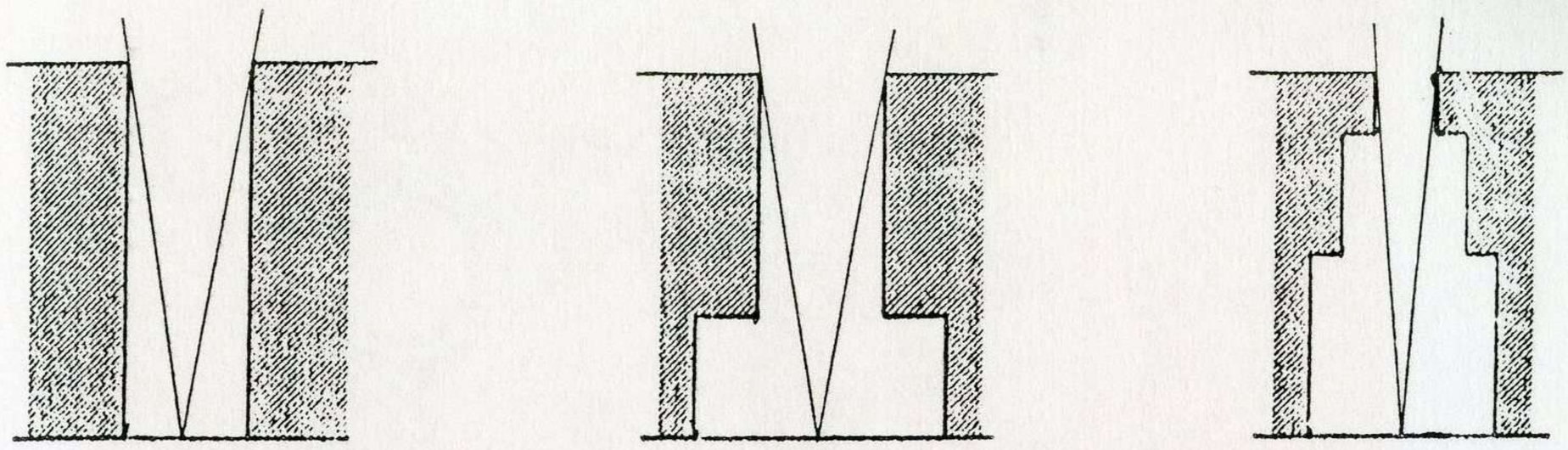
Figure 7.4 : Schéma des différentes parties d'un profil urbain par rapport à leur accès au soleil (Cf. Arnfield 1990).



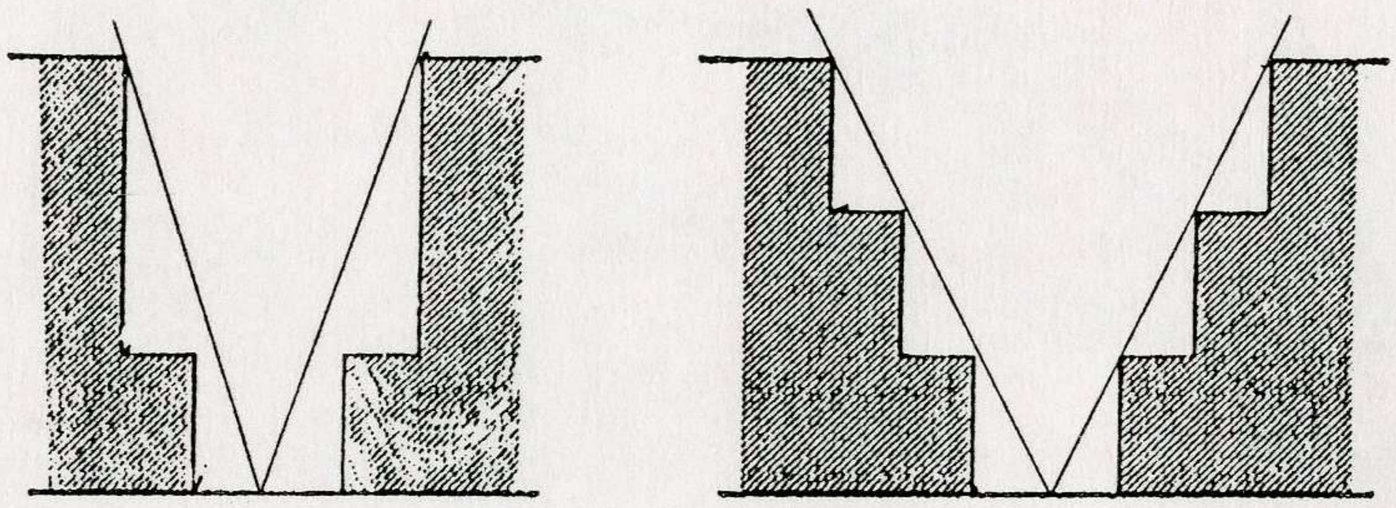
Exemple de profil symétrique et asymétrique, montrant, de manière détaillée, les ratios H/L qui régissent l'ensleillement intérieur et extérieur, au nombre de (04). Ces ratios peuvent, cependant etre limités à deux seulement, controlant réspectivement le batiment 1 et 2

Figure 7.5 : Description de la géométrie d'une rue par le biais des différents ratios H/L.

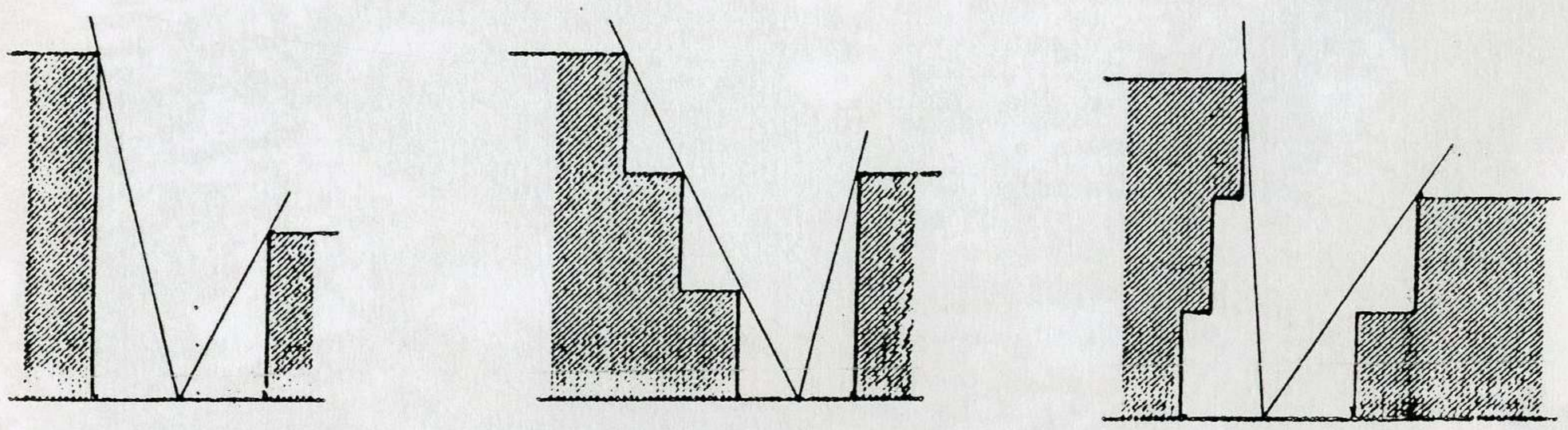
Le facteur de vue du ciel $\varphi = \cos(\tan^{-1}(H/0.5L))$ Oke 1988a.



La profondeur du profil et l'usage d'encorbellements réduit la vue du ciel et par conséquen la potentiel de refroidissement nocturne. Ce choix de profil dépend du niveau d'accès au soleil recherché et peut être intéressant pour les orientations qui assurent une faible absorption de la radiation.



Le retrait des façades avec la hauteur permet une plus grande vue du ciel et donc un potentiel important pour la refroidissement nocturne, tout en maintenant une densité relativement élevée..



L'usage de profils asymétriques, définis généralement par rapport à l'orientation pour des aspects d'ensoleillement, montre que la vue du ciel peut être importante tout en garantissant une protection du soleil.

Figure 7.6 : Relation entre profils urbains et refroidissement urbain nocturne.

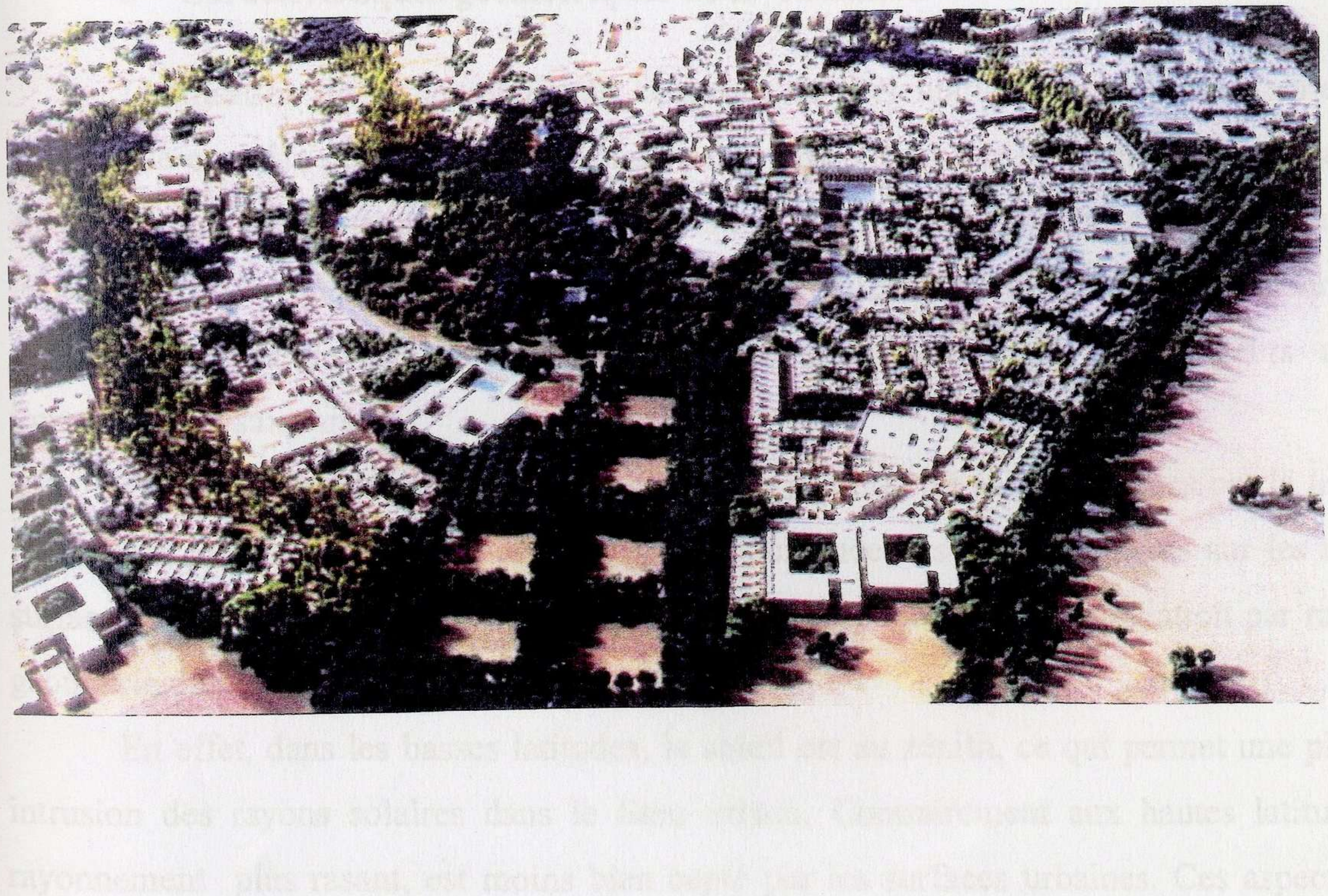


Figure 5.5 : Plan d'aménagement végétal et urbain de la ville nouvelle de Salahldeen, Irak. Cet exemple montre la trame extensive de verdure qui constitue l'un des premiers principes d'aménagement de la ville pour une adaptation au climat (Sloan et al 1989).

Globalement, il est apparu que l'orientation est plus déterminante pour l'ensoleillement des murs que les rues, ces dernières étant plus dépendantes de la profondeur du profil (Arnfield 1990). L'importance de l'orientation est également plus sensible l'été que l'hiver. L'exposition des bâtiments orientés N/S permet le contrôle saisonnier de l'accès au soleil car les murs sont protégés l'été et exposés l'hiver (Arnfield 1990).

Il importe de rappeler que la considération de l'orientation est capitale dans la considération de la qualité de l'ensoleillement, liée aux besoins d'exposition ou de protection des espaces bien plus qu'elle ne l'est pour la quantité d'énergie globale reçue. En effet, l'architecture bioclimatique a établi que l'orientation est et ouest fournissent la même quantité d'énergie mais la situation d'inconfort due à l'exposition ouest en fin de journée est bien plus importante que celle à l'est en début de journée; de même que pour l'orientation sud qui présente l'avantage de permettre un contrôle facile des exigences saisonnières d'exposition et de protection. Cette importance est à relever en particulier pour les surfaces verticales (murs) du profil urbain qui connaissent des situations contrastées entre exposition l'hiver et protection l'été et qui régissent l'exigence climatique fondamentale qu'est l'ensoleillement intérieur.

3- Caractéristiques géométriques de la radiation

L'utilisation de la géométrie de la rue et de l'orientation par rapport au soleil comme moyens de contrôle de l'ouverture au ciel se fait par rapport aux caractéristiques de la radiation solaire donnée par la nature du climat en question. Elle se base, d'abord, sur la connaissance de l'intensité de la radiation solaire, sur sa nature : directe et/ou diffuse, conditionnée par la présence ou pas de couverture nuageuse, des températures de l'air et leurs amplitudes journalières et saisonnières

En effet, il est apparu que la géométrie ou position du soleil, données par la latitude, est importante puisqu'elle détermine les angles d'incidence des rayons solaires sur les différentes surfaces urbaines et par conséquent le potentiel de disponibilité de la radiation par rapport à la géométrie de rue considérée (Arnfield 1990).

En effet, dans les basses latitudes, le soleil est au zénith, ce qui permet une plus grande intrusion des rayons solaires dans le tissu urbain. Contrairement aux hautes latitudes où le rayonnement plus rasant, est moins bien capté par les surfaces urbaines. Ces aspects ont une incidence directe sur la profondeur des profils urbains à choisir.

De même, les surfaces réceptrices, dépendent de cette hauteur ; par exemple les surfaces horizontales que sont les rues et les toitures sont les plus exposées lorsque le soleil est haut.

7.2.3 Recommandations générales

Pour l'ensoleillement deux aspects principaux sont à considérer dans la détermination de la géométrie de la rue :

1) Le choix de l'orientation par rapport au soleil intervient en premier lieu puisque les ratios H/L sont définis en fonction de cette orientation. Pour cela, il est généralement plus décisif de considérer l'orientation par rapport à l'ensoleillement des murs pour plusieurs raisons :

- L'orientation joue un rôle important dans la qualité de l'ensoleillement intérieur tel que cela a été largement rapporté par l'architecture bioclimatique où la préférence reconnue à l'exposition au sud des façades est unanime. Son importance réside dans sa capacité à contrôler les exigences saisonnières et journalières d'exposition et de protection du soleil.
- Les effets de l'orientation sont plus grands pour l'ensoleillement des murs que pour les rues et la dépendance des murs par rapport à la géométrie est plus forte que la rue puisque ce dernier peut recevoir un aménagement complémentaire tel que végétation.
- L'ensoleillement intérieur est prioritaire car il signifie de grandes économies d'énergie par l'exploitation du chauffage passif et de l'éclairage naturel.

2)Déterminer les ratios H/L préférentiels en distinguant les deux niveaux dans le profil urbain : le niveau urbain, et la partie supérieure des bâtiments pour pouvoir prendre en charge les besoins de l'espace extérieur et ceux des espaces intérieurs séparément. A chaque niveau va alors correspondre un ou deux ratios H/L, selon que le profil serait symétrique ou asymétrique c'est à dire selon l'orientation choisie de la rue.

Hormis les différences substantielles qui existent entre irradiations des murs et des rues expliquées plus haut, la division du profil urbain en deux niveaux est conseillée parce qu'elle est compatible avec les exigences urbanistiques en matière d'ensoleillement.

En effet, à la différence d'une conception architecturale où seul l'ensoleillement intérieur est considéré, l'accès au soleil en milieu urbain doit tenir compte simultanément du confort dans l'espace intérieur que dans l'espace extérieur, lequel pourrait être assimilé au niveau urbain prés du sol, utilisé par le piéton. De cette manière, l'utilisation des divers espaces peut être prise en compte dans la détermination du profil de rue ; l'importance de l'ensoleillement du niveau urbain

est tributaire de son utilisation : piétonne, mécanique, qui supposent respectivement la garantie du confort dans toute la rue ou seulement aux bordures utilisées par le piéton.

3) Enfin, il convient de remarquer que la considération de l'accès au soleil est plus décisive que le refroidissement nocturne. Plusieurs arguments peuvent être donnés :

- L'ensoleillement est plus contraignant que le refroidissement car lié à la fois à la géométrie du profil urbain et à l'orientation, par conséquent tout choix d'ouverture au ciel doit être décidé en priorité par rapport à l'ensoleillement.
- Les besoins d'ensoleillement sont plus importants à garantir que le refroidissement nocturne, si des dispositions complémentaires de réflectance urbaine qui limitent l'absorption de la radiation et une ventilation soutenue pour dissiper la chaleur sont considérées en parallèle (Cf. 7.3 et 7.4).

Néanmoins, il convient de remarquer que du fait que l'orientation demeure sans incidence sur le niveau de refroidissement urbain, ceci laisse supposer que sa combinaison avec les impératifs d'ensoleillement peuvent être facilités. Une ouverture au ciel "orientée" de manière à contrôler l'accès au soleil peut permettre un refroidissement nocturne considérable.

7.2.4 Exemple d'ouverture au ciel

A titre d'exemple nous donnons ci-après quelques propositions d'ouverture au ciel pour un site précis par rapport aux aspects discutés plus haut.

Il s'agit de la zone de biskra, dans le sud algérien, située à une latitude de 34°N.Ce site est caractérisé par un climat aride, chaud et sec. Les caractéristiques générales de la zone sont la grande intensité de la radiation solaire, des températures élevées l'été et de grandes amplitudes saisonnières et journalières. Ceci implique la nécessité d'une protection du soleil l'été durant une grande partie de la journée tout en assurant une exposition au soleil l'hiver. Les besoins en refroidissement nocturne sont également importants.

Le choix de cet exemple est motivé par deux raisons :

Cette zone correspond à un climat saharien où le contrôle solaire et énergétique est un impératif majeur de composition urbaine. Egalement, Ce site a fait l'objet d'une recherche qui fournit un éventail important des modes de distribution de la radiation solaire dans des profils urbains en fonction de leur géométrie (H/L), de leur orientation par rapport au soleil et de la saison (Cf. Djenane 1998).

Quelques conclusions sont rappelées pour permettre la compréhension des modèles géométriques proposés (Cf. Djenane 1998, Arnfield 1990).

- La quantité d'énergie reçue dépend fortement du ratio H/L. L'irradiation du profil diminue à mesure que le ratio H/L augmente.
- La quantité d'énergie totale reçue varie peu avec le changement de l'orientation pour un profil donné, ce qui signifie que l'échauffement de l'espace de la rue dépend peu de l'orientation. Cependant, la distribution de cette radiation sur les murs et les rues est étroitement liée à l'orientation en particulier l'été où la contrainte de chaleur est décisive en matière de conception.
- Les rues reçoivent plus de radiation lorsque le profil est orienté E/O et les murs reçoivent plus de radiation lorsque le profil est orienté N/S. L'orientation NE/SO offre une situation d'ensoleillement intermédiaire. Ceci rappelle le caractère qualitatif dans le choix de l'orientation lié à l'ensoleillement dans les bâtiments.

Les figures 7.7 a, b et c présentent des propositions de géométrie de rue orientées respectivement Est/Ouest, Nord/sud et N-E/ S-O. Ils ont été élaborés par rapport aux idées suivantes :

La figure 7.7 a, rue Est/Ouest :

- Le profil est asymétrique avec dominance de la paroi sud pour permettre l'ensoleillement d'hiver. Cette asymétrie permet un accès au soleil suffisant tout en offrant un potentiel de refroidissement suffisant grâce à une grande vue du ciel.
- La rue est très exposée même pour des profils profonds, ceci suggère la préférence de géométrie du profil large à la forte vue du ciel plutôt que des profils étroits qui empêchent la restitution de chaleur importante stockée. Les espaces piétons doivent dans ce cas être protégés par des galeries ou des arbres
- Les façades sud se développent en gradin en guise de brise soleil pour satisfaire les besoins de protection des espaces intérieurs l'été.

La figure 7.7 b, rue Nord/Sud :

- Les profils sont symétriques en accord avec la course du soleil.
- L'usage de profils profonds a révélé une bonne protection du niveau urbain. Ces cas semblent bien s'adapter à un usage piéton.

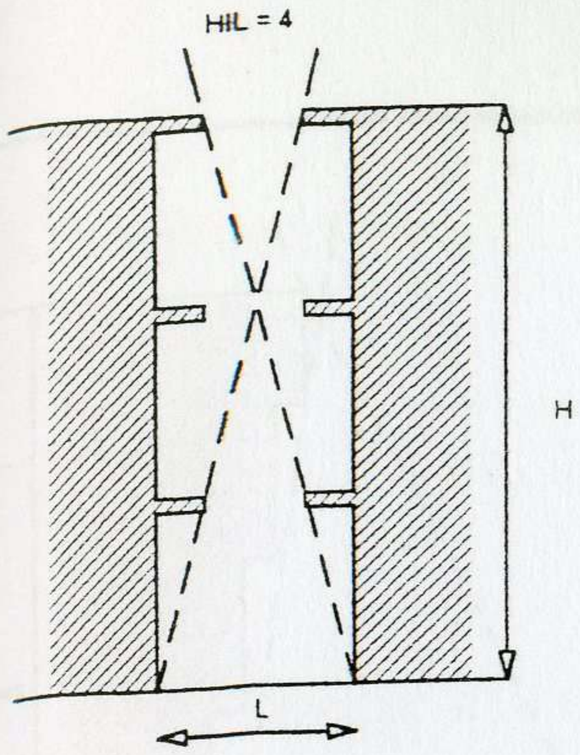
- L'exposition des murs est relativement importante et varie peu avec la profondeur du profil et nécessite dans tous les cas une protection, donnée ici par des brise-soleil horizontaux sur les deux façades.
- Les bordures urbaines sont protégées par les murs. Toutefois, pour un profil de rue large, la protection de la partie centrale de la rue est nécessaire car exposée à la mi- journée.

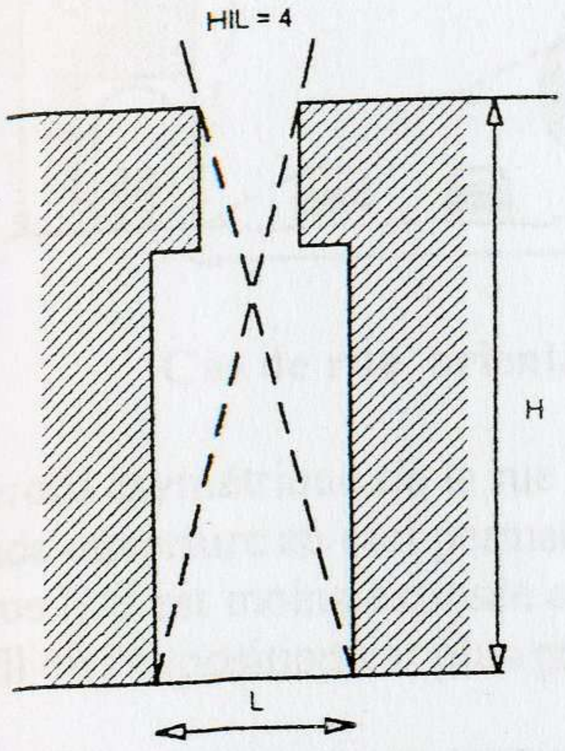
Pour la figure 7.7 c, rue N-E/S-O, les géométries proposées révèlent des similitudes avec les deux cas expliqués précédemment :

- Cette orientation permet une meilleure protection de la rue que l'orientation E/O et un meilleur ensoleillement des murs que la rue N/S. Elle est plus intéressante pour l'accès au soleil des murs que l'orientation N/S et plus intéressante pour l'accès au soleil des rues que l'orientation E/O.
- Le profil est asymétrique pour permettre le contrôle saisonnier de l'accès au soleil avec dominance des façades SE. (Cf. figure 7.7 a)
- Les deux façades sont protégées par des brise-soleil horizontaux (Cf. figure 7.7 b).
- Les espaces piétons présentent des contrastes : la bordure prés du bâtiment haut est exposée et nécessite l'utilisation d'arbre ou de galerie, mais la bordure prés du bâtiment bas est protégé par les parois du profil.

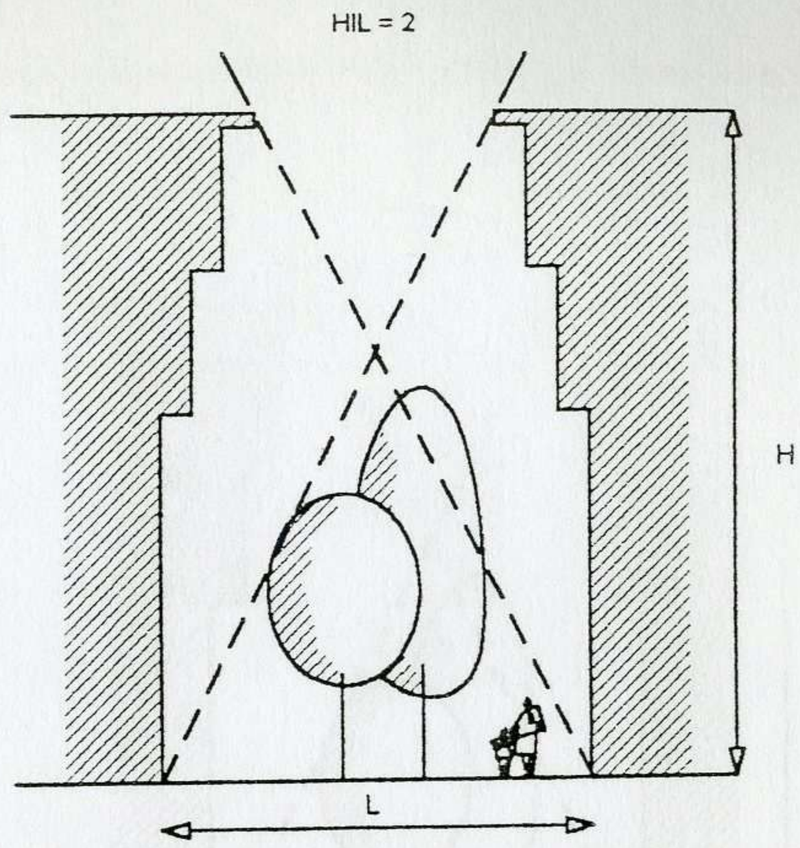
Enfin, il convient de mentionner que le refroidissement nocturne est adapté au taux de captage de la radiation, puisque la rue E/O est très ouverte au ciel, mais la rue N/S présente une vue du ciel plus faible au niveau du sol car celle-ci n'est pas exposée, par contre le niveaux supérieur du même profil a une meilleure vue du ciel. (Figure 7.7 d).

Rue Nord- Sud





Exemples de rues piétonnes étroites, protégées par des brise-soleil horizontaux

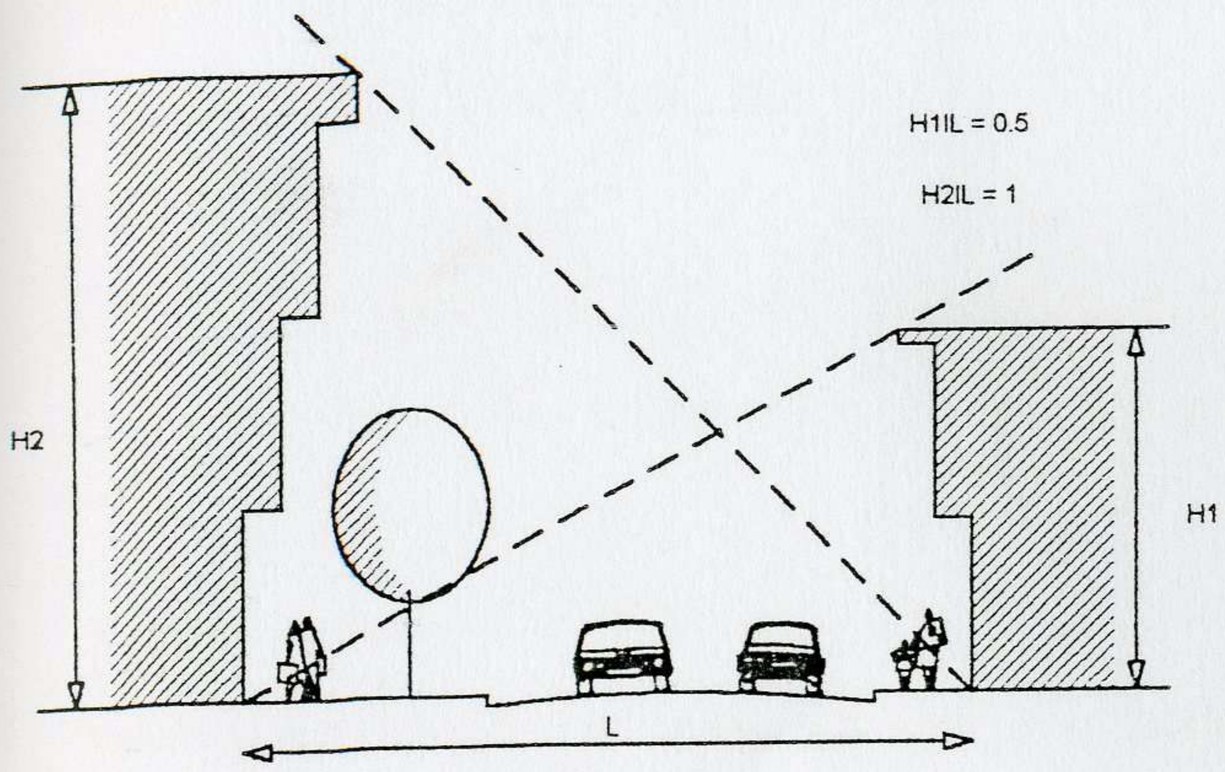


Exemple de rue pietonne large, pouvant abriter une activité

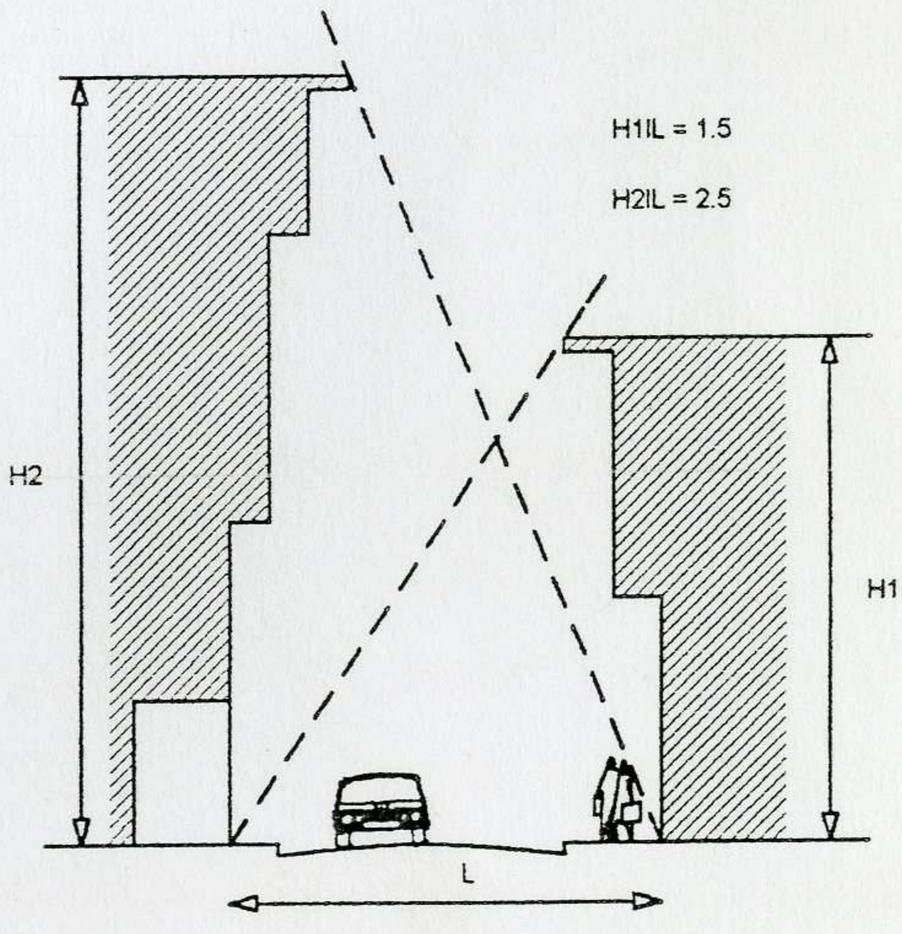
- Profil urbain symétrique.
- La profondeur du profil favorise la protection des rues, favorables à un usage piéton.
- L'exposition des murs est relativement importante, et nécessite des brise-soleil.

Figure 7.7 b : Exemples d'ouverture au ciel pour des rues N-S à Biskra, Algérie, latitude34°N.

Rue Nord Est- Sud Ouest



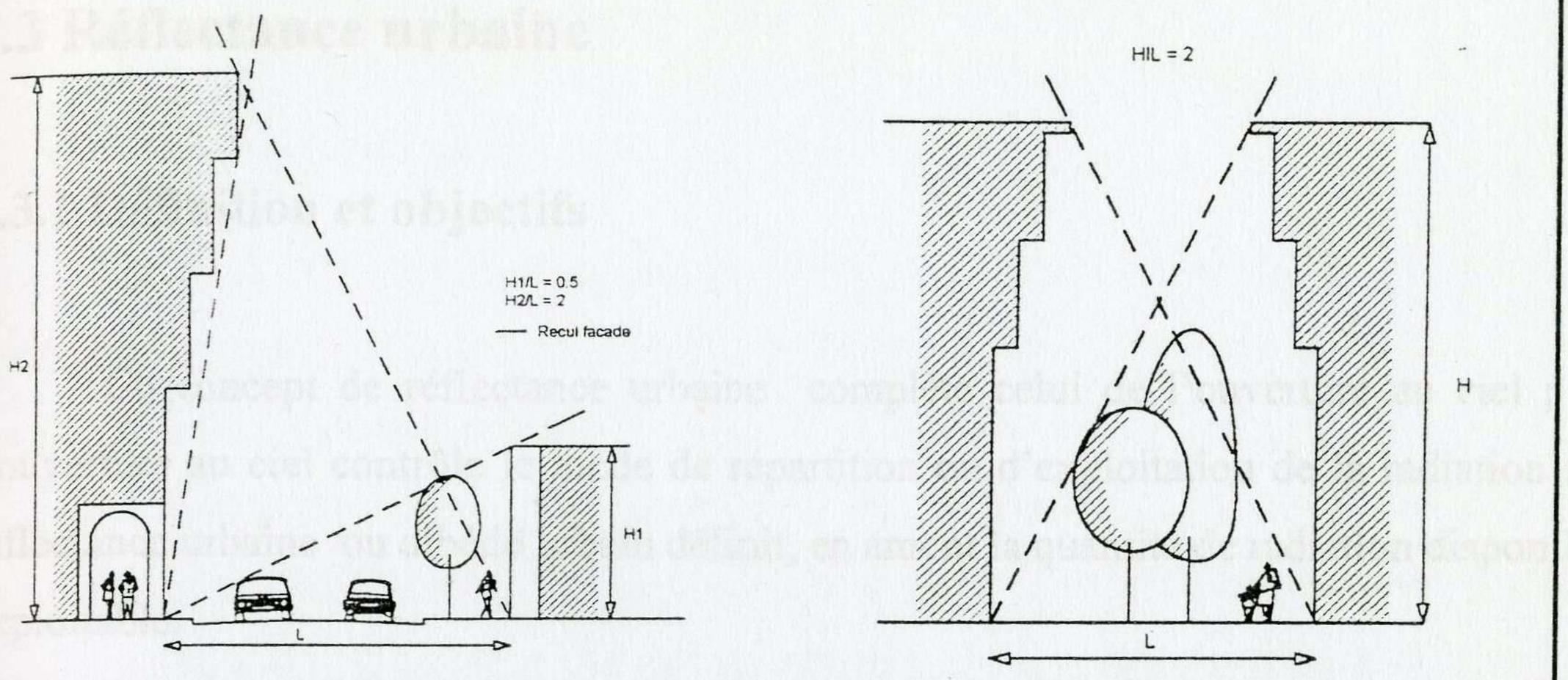
Exemple de grande rue large



Exemple de petite rue, plus étroite

Profil asymétrique comme pour la rue E/O avec protection des murs tel que pour la rue N/S
Espaces piétons protégés sur la bordure SE exposée

Figure 7.7 c : Exemples d'ouverture au ciel pour des rues NE-SO à Biskra, Algérie, latitude34°N.



Cas de rue orientée E/O **Cas de rue orientée N/S**

Le profil asymétrique de la rue E/O est plus éxposé pour assurer l'ensoleillemet, mais présente une grande ouverture au ciel permettant le refroidissement nocturne des bâtiments.
La rue N/S est moins exposée et moins ouverte, prés du sol, mais la vue du ciel est grande en haut du profil où l'exposition est plus grande.

Figure 7.7 d: Compatibilité entre accès au soleil et refroidissement nocturne grâce au contrôle de la forme du profil urbain.

7.3 Réflectance urbaine

7.3.1 Définition et objectifs

Ce concept de réflectance urbaine complète celui de l'ouverture au ciel ; Alors que l'ouverture au ciel contrôle le mode de répartition ou d'exploitation de la radiation solaire ; la réflectance urbaine ou albédo urbain définit, en amont la quantité de radiation disponible et donc exploitable.

Ce concept décrit la capacité d'une entité urbaine à réfléchir la radiation solaire incidente. Cette considération est importante en urbanisme puisque le niveau de réflectance urbaine a un impact direct sur la quantité de chaleur emmagasinée dans le tissu urbain et sur les températures urbaines de surface et de l'air résultantes. Egalement, elle conditionne la quantité de radiation de grande longueur d'onde émise la nuit et de ce fait les besoins de refroidissement nocturne de l'entité urbaine. Tous ces aspects vont influencer les besoins de chauffage et refroidissement nécessaires au confort thermique.

Cette nomination fait référence à la réflectance d'une surface connue sous le nom d'albédo. Ainsi, de la même manière la réflectance urbaine varie de 0 à 1 qui correspondent respectivement à une situation d'absorption totale et de réflexion totale.

Cette réflectance peut être contrôlée, non seulement par le choix de matériaux à l'albédo approprié mais surtout par une géométrie urbaine adaptée, d'où son importance pour l'urbaniste lors de la conception urbaine.

Cette préoccupation liée à la quantité d'énergie absorbée a été délibérément isolée dans un concept spécifique - indépendamment de l'ouverture au ciel - pour deux raisons :

D'une part, tout en concernant la radiation solaire cet aspect relève de paramètres géométriques différents de l'ouverture au ciel. D'autre part la répercussion du niveau de réflectance urbaine sur le climat global en accentuant les effets d'îlot de chaleur nous ont suggéré de présenter les moyens de son contrôle séparément.

7.3.2 Paramètres déterminants

1- La densité du plan

L'analyse (Cf. 6.2.3) a révélé plusieurs paramètres influants sur la réflexion de la radiation solaire par une entité urbaine. Au point de vue de l'urbanisme il est utile de rappeler le rôle important de la densité urbaine.

La densité du plan (ρ) est donnée pour être le paramètre urbain le plus décisif dans la modification de l'albédo urbain (Aida et Gotoh 1982). Elle est exprimée par le ratio surface toiture / surface totale ($\rho = L_1/L_1+L_2$), qui décrit le niveau d'exposition d'un tissu urbain au soleil. Il est apparu que plus la densité est importante plus la réflectance urbaine augmente et par conséquent la quantité d'énergie exploitable diminue. Ainsi, une géométrie urbaine compacte réfléchit plus de radiation solaire qu'un tissu avec faible emprise au sol (Aida et Gotoh 1982).

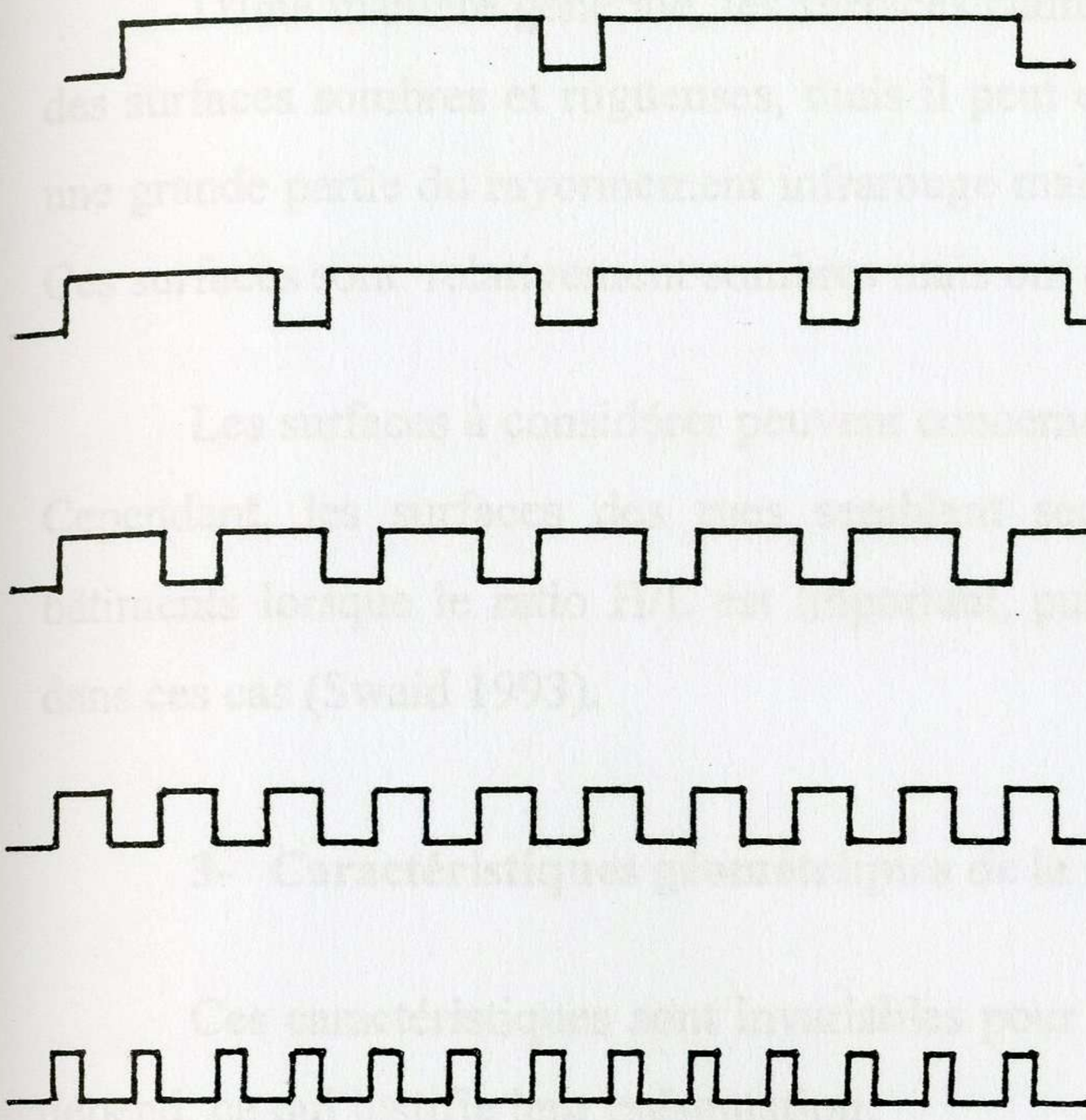
Le profil H/L a également été identifié comme ayant un effet sur la réflectance (Aida 1982). Globalement, plus le profil urbain est profond plus grande est l'absorption de la radiation solaire due aux inter-réfléxions entre les parois. Toutefois, cet effet est secondaire comparativement à la densité. D'une part parce qu'il semble plus pertinent et plus probable dans la pratique, que le ratio H/L soit dicté par des préoccupations d'ouverture au ciel plutôt que de réflectance urbaine. D'autre part parce que les effets de stockage dus à la géométrie de la rue sont partiellement pris en compte à travers le contrôle de la vue du ciel par rapport au refroidissement nocturne. Ainsi le rôle de la densité est dominant.

Enfin, il convient de rappeler que malgré l'importance de la géométrie solaire sur l'incidence du rayonnement, il est apparu, dans ce cas précis de réflectance, que l'orientation / soleil a peu d'effets (Aida et Gotoh 1982).

La figure 7.8 présente quelques profils de géométrie urbaine mettant en relation la densité du plan et leur albédo correspondant, H/L étant maintenu constant.

2- Albédo des surfaces

L'albédo d'une surface définit la capacité d'une surface à réfléchir la radiation, et qui dépend de ces propriétés intrinsèques à savoir : la nature du matériau, sa couleur, sa texture, etc. Nous savons que ces propriétés ont des effets sur le climat urbain global par effet cumulatif (Cf. 4.2.1). L'albédo des surfaces peut être utilisé pour modifier la réflectance urbaine puisque



L'albédo urbain ou réflectance urbaine dépend de la densité du plan. Plus le ratio surface t oiture/surface totale augmente, plus importante sera la réflexion de la radiation solaire.

Figure 7.8 : Albédo de quelques géométries urbaines pour différentes densités de plan.

l'utilisation substantielle de surfaces claires à l'albédo élevé s'est révélée efficace dans la réduction sensible des températures urbaines de l'air et de surfaces (Taha 1997).

D'une manière générale, les surfaces claires et lisses offrent des albédos plus élevés que des surfaces sombres et rugueuses, mais il peut exister des surfaces sélectives qui réfléchissent une grande partie du rayonnement infrarouge mais absorbent une partie du rayonnement visible. Ces surfaces sont relativement sombres mais ont un albédo élevé (Akbari et al 1995).

Les surfaces à considérer peuvent concerner aussi bien les toitures, les murs que les rues ; Cependant, les surfaces des rues semblent secondaires comparativement aux surfaces des bâtiments lorsque le ratio H/L est important, puisque les rues sont relativement peu exposées dans ces cas (Swaid 1993).

3- Caractéristiques géométriques de la radiation

Ces caractéristiques sont invariables pour un site donné mais tout choix urbanistique en dépend, ce qui justifie leur présentation.

La position du soleil donnée par la latitude et la saison détermine l'angle d'incidence des rayons solaires sur les surfaces. Ceci est important en ce qui concerne la réflectance urbaine pour deux raisons : La première est que l'angle d'incidence modifie la quantité de radiation réfléchie même si l'albédo de la surface est fixe puisque l'absorption augmente à mesure que l'incidence devient perpendiculaire. La seconde est que la position du soleil définit les principales surfaces réceptrices. Ainsi, lorsque le soleil est proche du zénith (latitudes basses et moyennes) les toitures sont les surfaces qui reçoivent l'essentiel de la radiation. La position du soleil joue, de ce fait, un rôle fondamental dans la variation de la réflectance. Par contre, lorsque le soleil est bas (hautes latitudes) les surfaces réceptrices sont réparties entre murs et toitures.

D'autre part la nature du climat est d'une grande importance car elle définit la situation thermique du lieu, l'intensité de la radiation, et les besoins en termes de captage ou de réflexion du rayonnement, comme nous l'expliquons ci-après.

7.3.3 Recommandations générales

Nous pouvons distinguer deux possibilités pouvant dicter les choix d'urbanisme en matière de réflectance urbaine. D'une part, la volonté de réfléchir le maximum de radiation solaire pour minimiser l'absorption de chaleur dans l'entité urbaine, comme c'est le cas pour les climats chauds où le rayonnement solaire est intense et les températures de l'air élevées. D'autre part, la volonté de capter le maximum de radiation solaire, requise principalement dans les climats froids où le potentiel de radiation est faible et les températures de l'air basses.

Des variations saisonnières peuvent conduire à rechercher l'une et l'autre de ces solutions, ce qui nécessite une géométrie assurant un compromis, tels que dans les climats tempérés.

Dans les climats chauds

Dans le but d'assurer la meilleure réflectance urbaine possible, des structures "horizontales" sont à préférer aux structures "verticales", c'est à dire, une densité du plan (ρ) importante avec un maximum de surfaces horizontales, et un minimum de surfaces verticales, exposées, comme il est souvent recommandé dans un climat chaud (Figure 7.9).

A titre d'exemple, un ratio : $L_1/ L_2 = 8$ ($\rho = 0,88$), donne un albédo de 0,31 à 0,39 durant toute l'année. Tandis que pour un ratio : $L_1/ L_2 = 1$ ($\rho = 0,5$), l'albédo varie entre 0,23 et 0,28.

De même, en raison de la position élevée du soleil dans ces climats (basse latitude), les surfaces réceptrices principales sont les toitures, ce qui confirme l'intérêt d'augmenter leurs proportions par rapport à la surface totale. Cette disposition pourrait être associée au contrôle de l'albédo spécifique de ces surfaces par l'usage de couleurs claires par exemple, pour réduire encore l'absorption.

En addition à cela, les profils urbains larges(H/L faibles) sont à préférer aux profils urbains profonds, mais la référence ici à l'ouverture au ciel est importante. Egalement, dans ce type de climat où le taux d'éblouissement dus à la réflexion du rayonnement peut être important et gênant, le recours à des surfaces très réfléchissantes, prés du sol (trop claires ou lisses) est à déconseiller.

A titre d'exemple, les villes traditionnelles du Sahara (Ghardaïa, Timimoun, Marrakech) sont remarquables dans l'illustration de ce concept de réflectance urbaine grâce à la géométrie adoptée.

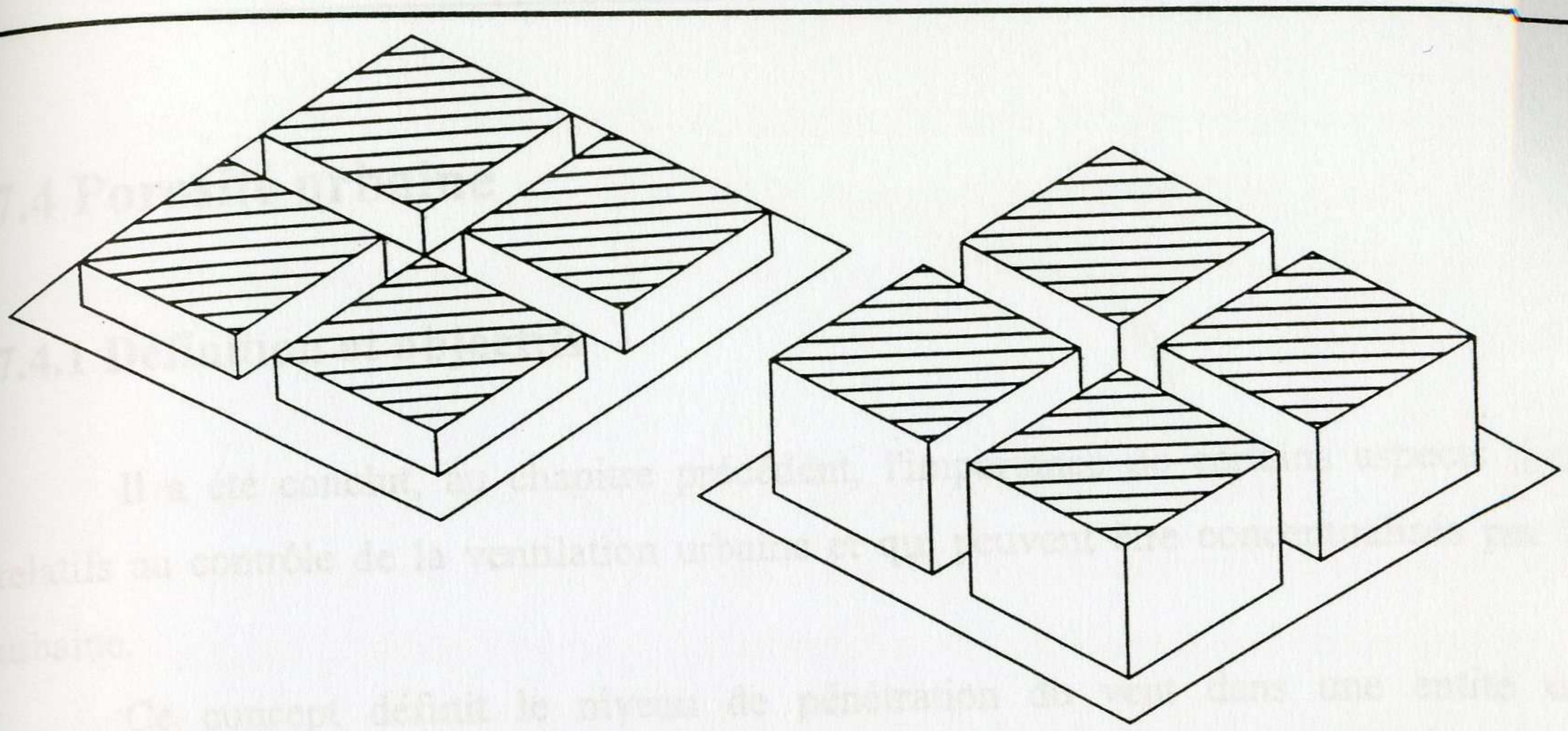
Ceci s'explique par le choix d'une forte densité où le ratio surface toiture / surface totale est élevé ; l'exposition est minime et concerne principalement les toitures aux couleurs claires. Un albédo élevé les caractérise, variant entre 0,3 et 0,45 alors que les albédos urbains moyens varient entre 0,1 et 0,2 (Taha et al 1997).

Dans les climats froids et tempérés

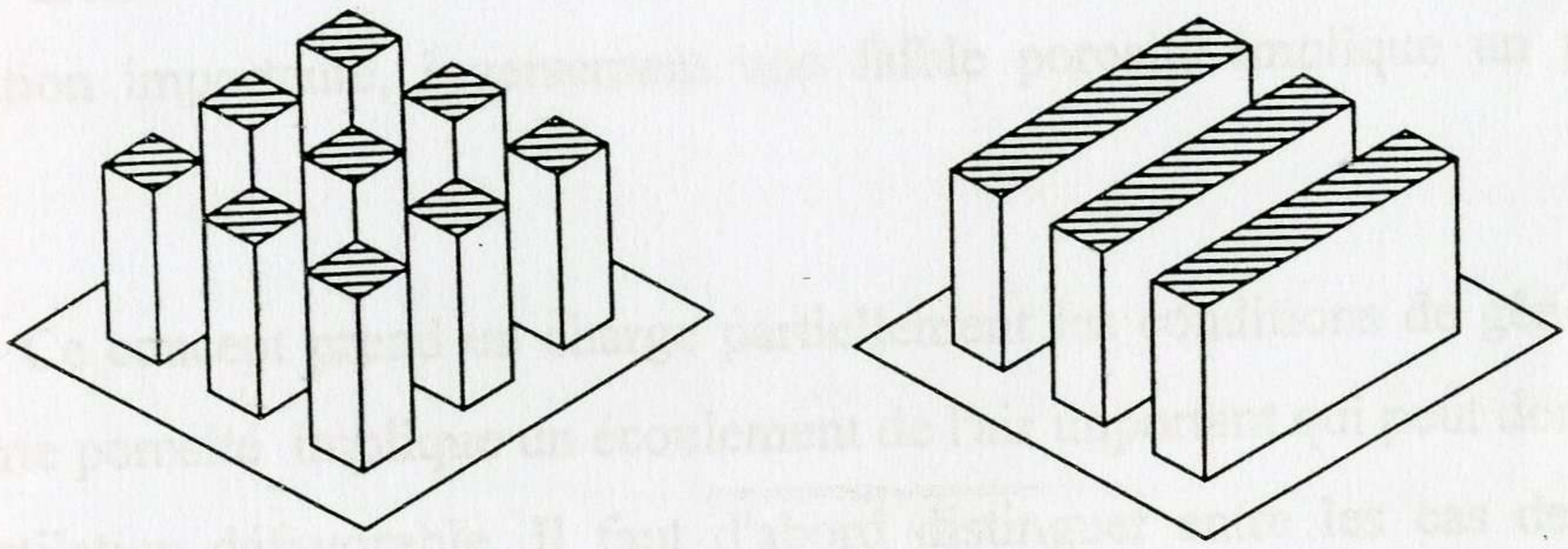
Le but est de retenir le plus de chaleur possible, c'est à dire réduire au maximum la capacité de réflectance urbaine. Il est conseillé un ratio L_1 / L_2 proche de 0,5 soit (ρ) égal à 0,33 et qui donne une valeur minimale d'albédo d'environ 0,25 (Aida et Gotoh 1982). De même qu'un ratio H/L élevé est préférable dans ce cas pour augmenter les inter-réflexions sur leurs murs tel que requis pour un climat froid.

Toutefois, si l'on préfère un albédo minimal en hiver, il faut tenir compte du fait que ce même albédo est valable l'été, lorsque cette absorption est peu souhaitable, comme c'est le cas généralement dans les climats tempérés. Dans ce cas, il est recommandé d'introduire des changements saisonniers dans la réflexivité des surfaces urbaines, en particulier pour les toitures et au niveau de la rue, par l'usage d'arbustes à feuillages caducs dans les rues ou des plantes grimpantes recouvrant les murs ou l'usage de peintures claires (Aida et Gotoh1982).

Enfin, nous pouvons remarquer que du fait que la réflectance d'un tissu urbain dépend principalement de la densité, et l'ouverture au ciel dépend du profil de la rue et de l'orientation, ceci laisse supposer que ces deux concepts qui contrôlent la radiation solaire sont compatibles ; Ce qui rend possible la définition d'une géométrie urbaine qui permet de satisfaire ces exigences, toutes les deux, liées au contrôle de la radiation solaire.



Forte densité de plan favorisant une réflectance importante, recommandée en climat chaud.



Faible densité de plan favorisant une faible réfectance (absorption élevée),
recommandée en climat froid

Figure 7.9 : Exemple de géométries urbaines montrant les densités préférentielles par rapport à la réflectance urbaine , pour climat chaud et climat froid .

7.4 Porosité urbaine

7.4.1 Définition et objectifs

Il a été conclut, au chapitre précédent, l'importance de certains aspects géométriques relatifs au contrôle de la ventilation urbaine et qui peuvent être conceptualisés par la porosité urbaine.

Ce concept définit le niveau de pénétration du vent dans une entité urbaine, sa distribution dans les espaces extérieurs urbains, et par conséquent, détermine le potentiel de ventilation extérieure et intérieure. Ce concept permet de décrire le pouvoir de ventilation en milieu urbain de la manière suivante : une porosité importante signifie une capacité de ventilation importante, inversement une faible porosité implique un potentiel de ventilation réduit.

Ce concept prend en charge partiellement les conditions de gêne dus au vent. En effet, une forte porosité implique un écoulement de l'air important qui peut donner lieu à des situations de ventilation défavorable. Il faut d'abord distinguer entre les cas de petits groupements de bâtiments et celui d'un réseau étendu de bâtiments. Dans le premier cas, il est capital d'éviter les associations critiques, mettant en relation certaines géométries, dispositions des bâtiments et incidence du vent conduisant à des effets aérodynamiques gênants où l'action mécanique du vent peut occasionner de grands risques (Cf. 6.3.1). D'une manière plus générale, le concept de porosité développé ci-après est consacré à des structures urbaines plus étendues.

Les objectifs de contrôle de la ventilation urbaine doivent correspondre à la destination des espaces, aux activités qui s'y déroulent, et aux besoins de ventilation induits par le climat. Ainsi, ils peuvent varier entre une recherche d'exposition ou au contraire une protection de ces espaces ; Le plus souvent les deux simultanément, selon la saison, la nature du vent, etc.

Dans tous les cas, le niveau de ventilation requis doit être préalablement déterminé par l'urbaniste selon qu'il recherche l'exposition ou la protection des espaces à concevoir au regard des propriétés du climat en question et des impératifs de confort liés à la destination des lieux. De ce fait, nous expliquerons ce concept en termes d'exposition et de protection au vent sans se référer aux raisons qui les suggèrent. Celles-ci étant nécessairement définies au préalable.

Enfin, il convient de rappeler que cette porosité est définie exclusivement sur la base des caractéristiques géométriques du tissu urbain. Ces écoulements de l'air conditionnent le niveau de confort de plusieurs manières et qui représentent les principaux objectifs de la ventilation urbaine :

1- Contrôle de la ventilation extérieure et dilution des polluants

La ventilation des espaces extérieurs conditionne le confort thermique en dissipant la chaleur et permet le refroidissement des structures. Il contrôle également le niveau de confort dans les espaces extérieurs liées à la circulation de l'air. Aussi, cette ventilation permet la dispersion des polluants car le milieu urbain est connu pour être générateur de polluants. La circulation mécanique et les activités urbaines en sont les principales causes.

2- Contrôle du potentiel de ventilation intérieure

Des dispositions urbaines prises au préalable pour garantir une arrivée suffisante de l'air à l'intérieur de l'entité urbaine, à travers une bonne distribution des pressions, fournissent à l'architecture les moyens de satisfaire les besoins d'une ventilation intérieure. La circulation de l'air dans les bâtiments permet une ventilation hygiénique, un confort thermique et leur refroidissement.

7.4.2 Paramètres déterminants

Les paramètres suivants ont été identifiés dans l'analyse comme les plus pertinents dans le contrôle du vent. Il convient de noter que l'interdépendance de ces paramètres géométriques est très forte dans la détermination du résultat final. En effet, contrairement au contrôle de la radiation où l'impact de chacun des paramètres est à la fois précis et relativement autonome, le cas de la ventilation urbaine est plus complexe. Ils sont à considérer simultanément car leurs effets se combinent. A cela s'ajoute le caractère peu prévisible du vent qui fait que l'évaluation est souvent qualitative et comme nous l'avons mentionné dans l'analyse le concours d'aérodynamiciens est souvent nécessaire.

1- Densité du plan et écartements entre bâtiments/Hauteur

La géométrie de l'espace libre est la plus décisive des caractéristiques urbaines dans la définition des écoulements de l'air en milieu urbain. Cette géométrie intègre tous les espacements entre bâtiments. Ces espacements conditionnent le niveau de pénétration du vent, la nature de flux et leur vitesse.

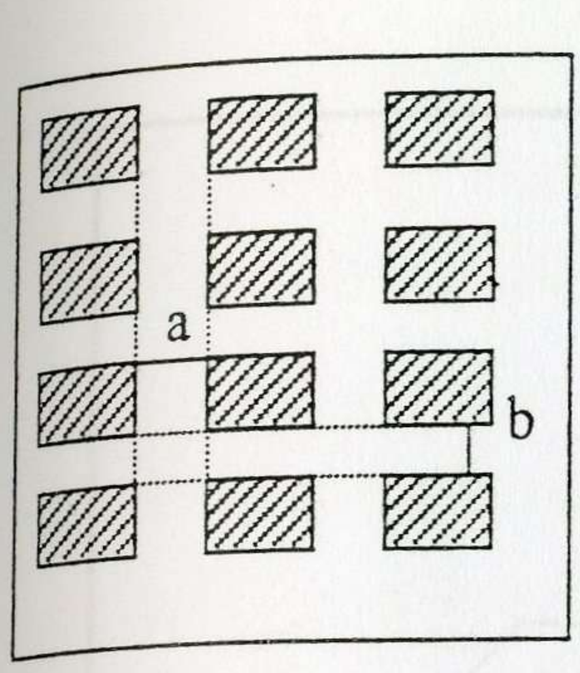
Sommairement, ces espacements peuvent être partiellement décrits par la densité du plan, donnée par le rapport surface toiture / surface sol. Plus l'emprise au sol est importante, plus grande est la rugosité et moins l'air circule dans le tissu, tel que cela a été suggéré par Oke(1988a) et Givoni (1989) ; La pénétration de l'air le long des rues et par les toitures est diminuée, par conséquent le niveau de porosité est réduit.

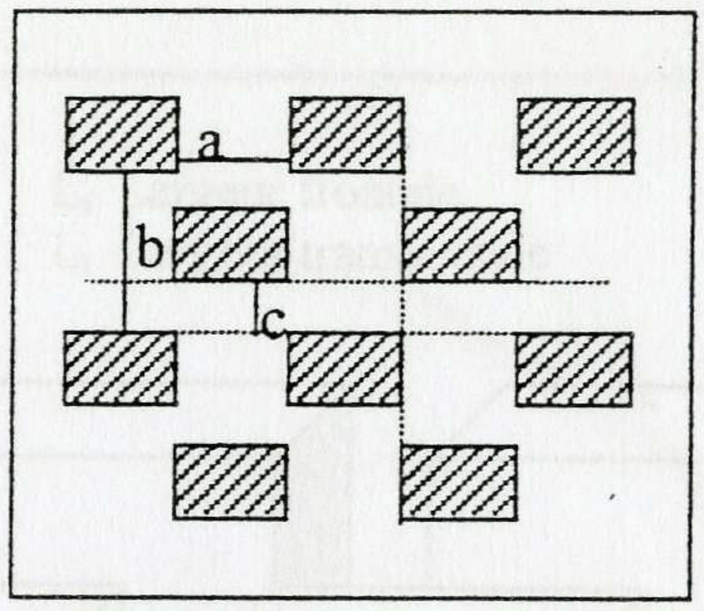
La figure 7.10 montre plusieurs exemples de densités ; Globalement on peut remarquer :

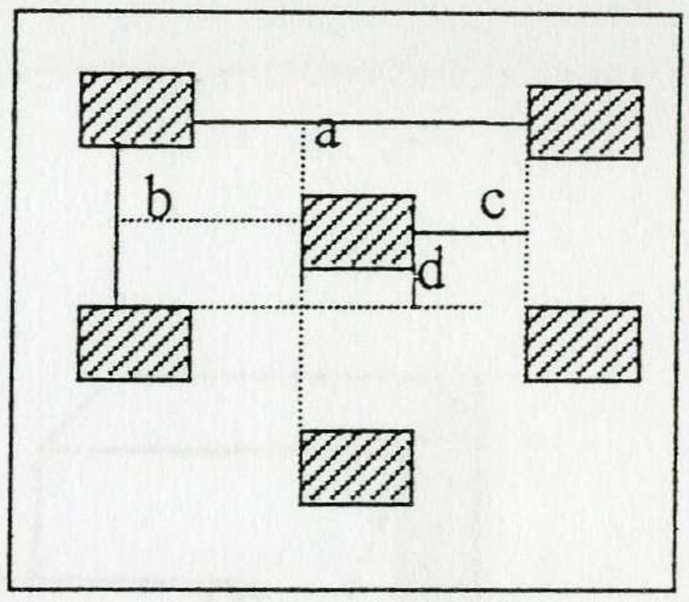
- Plus la densité est faible, plus les espacements entre bâtiments sont importants. Ces réseaux permettent certains passages libres du vent et des zones mieux protégées entre les bâtiments. Dans ces cas le vent peut venir des rues ou à partir des toitures. La ventilation est potentiellement meilleure /tissu de forte densité de plan .
- Les réseaux en quinconce avec des espacements entre bâtiments importants offrent meilleur potentiel de ventilation que les réseaux en damier. Toutefois lorsque les espacements sont très faibles éliminent toute possibilité de canalisation ; dans ce cas la ventilation est plus faible et se fait nécessairement par retour d'air à partir des toitures .
- La géométrie des bâtiments décide de la géométrie de l'espace libre.

Toutefois, la densité, à elle seule, ne suffit pas à définir les modes de ventilation urbaine ; Il est essentiel de rapporter l'emprise au sol à la hauteur des bâtiments donnés par les profils verticaux (Soliman 1976, Hussain 1978) car les effets d'obstacles dus aux gabarits des bâtiments conduit à une déviation des vents. Ces profils peuvent être transversaux ou frontaux ; Le profil transversal est le ratio H/L dans la direction du vent tel que le bâtiment fait face au vent. Le profil frontal est le ratio H/L où les bâtiments ne constituent pas d'obstacle (Figure 7.11).

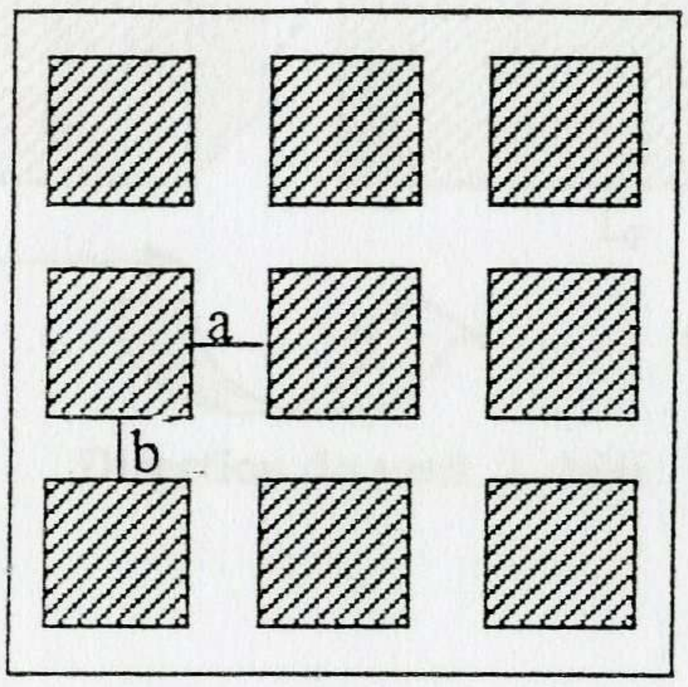
L'impact de l'écartement frontal doit être considéré en combinaison avec la longueur des bâtiments et leurs hauteurs, car, c'est la proportion entre surfaces des bâtiments face au vent et les vides entre bâtiments qui conditionne le niveau d'infiltration du vent dans les rues parallèles au vent. Le vent s'engouffre dans les rues si la proportion entre surfaces pleines et vides est

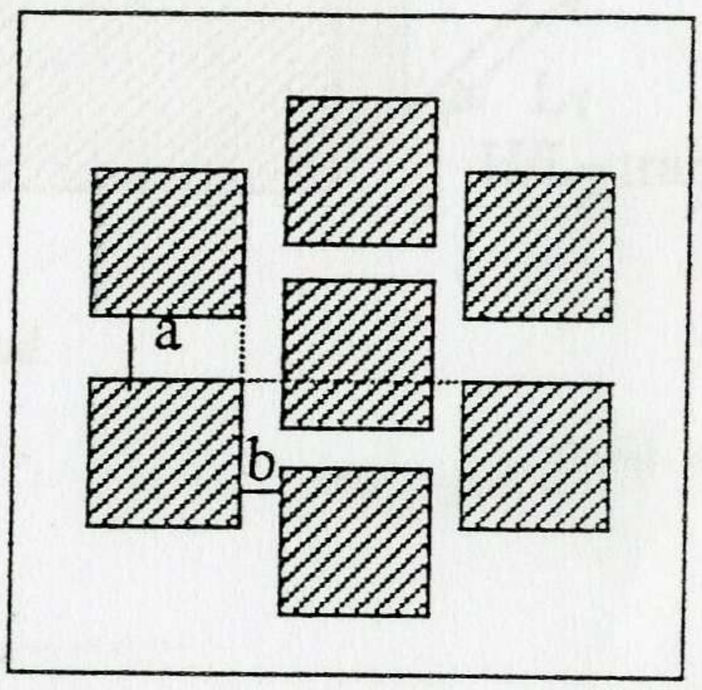




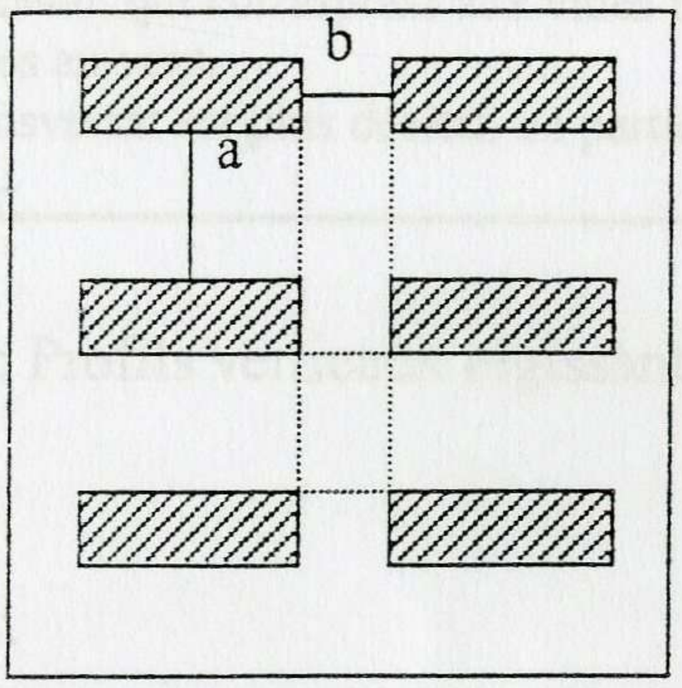


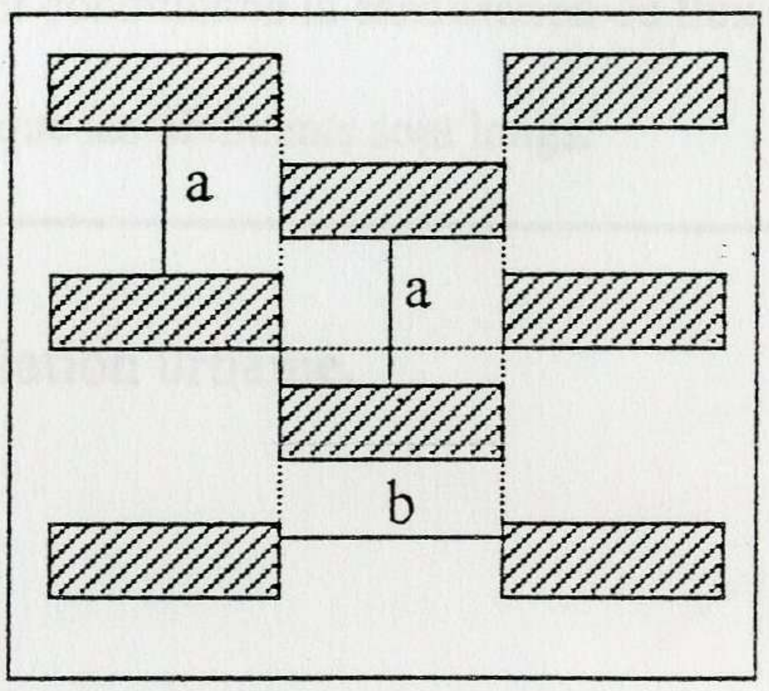
1) Le réseau de bâtiments en damier permet de plus grands espacements et un plus grand ratio H/L (H constant) qui permet une meilleure ventilation urbaine.





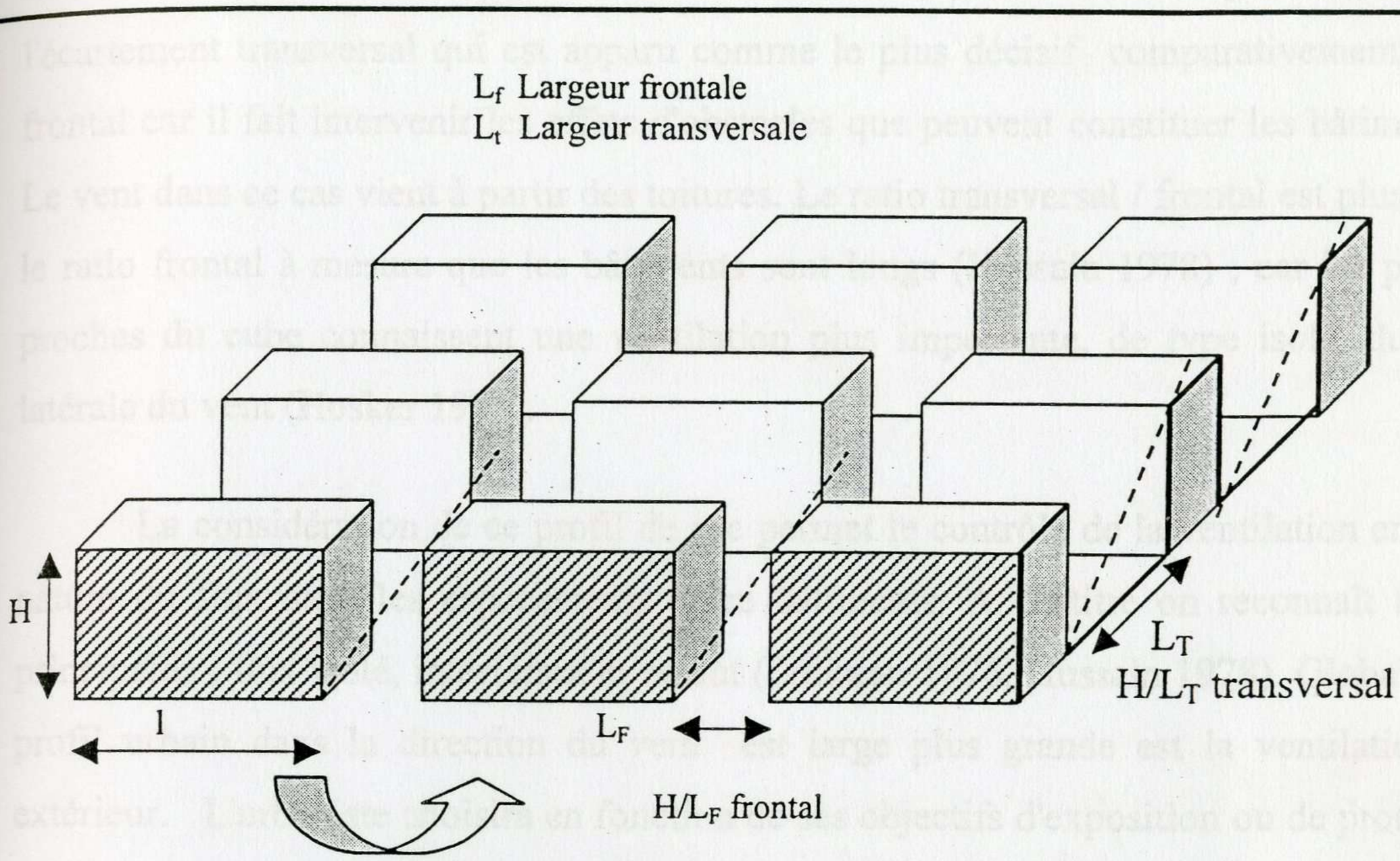
2) Lorsque les espacements sont réduits, un réseau en quinconce élimine toute possibilité de canalisation comparativement au damier. Le potentiel de ventilation urbaine dépend de la hauteur des bâtiments (H/L).





3) La géométrie des bâtiments induit un mode d'assemblage, qui détermine à son tour la géométrie de l'espace extérieur à savoir les espacements entre bâtiments. (Voir **1)** et **2)**).

gure 7.10 : Impact de la densité du plan et de la géométrie des batiments sur les espacements entre bâtiments et ventilation urbaine.



L'écoulement de l'air dépend :
Du ratio H/L transversal, c'est-à-dire dans la direction du vent, où la ventilation entre bâtiments se fait par retour d'air à partir des toitures.
Du profil frontal, qui correspond aux vides face au vent conditionne la canalisation du flux d'air dans les rues parallèles au vent.
Le profil transversal est plus décisif, en particulier lorsque les bâtiments sont longs.

Figure 7.11 : Profils verticaux régissant la ventilation urbaine.

suffisante. Ceci fait référence à l'interface entre zone d'influence de chaque bâtiment qui décide de la perméabilité du tissu (Cf. Beranek 1984)

Toutefois, Soliman (1976) et Hussain (1978) ont montré que c'est essentiellement l'écartement transversal qui est apparu comme le plus décisif comparativement à l'écartement frontal car il fait intervenir les effets d'obstacles que peuvent constituer les bâtiments entre eux. Le vent dans ce cas vient à partir des toitures. Le ratio transversal / frontal est plus important que le ratio frontal à mesure que les bâtiments sont longs (Hussain 1978) , car les petits bâtiments proches du cube connaissent une ventilation plus importante, de type isolé, due à l'intrusion latérale du vent (Hosker 1985).

La considération de ce profil de rue permet le contrôle de la ventilation en définissant la nature du flux dans les espacements entre bâtiments. A ce titre on reconnaît trois situations principales : flux isolé, interférant et rasant (Soliman 1976, Hussain 1978). Globalement, plus le profil urbain dans la direction du vent est large plus grande est la ventilation de l'espace extérieur. L'urbaniste choisira en fonction de ses objectifs d'exposition ou de protection du vent le profil optimal en connaissant les propriétés de chaque type de flux (Tableau 7.1).

L'importance des espacements entre bâtiments et des profils transversaux est également à rappeler par rapport au potentiel de ventilation intérieure qu'elle engendre ; Comme attendu, celle-ci est réduite à mesure que les espacements diminuent (Chand 1976).

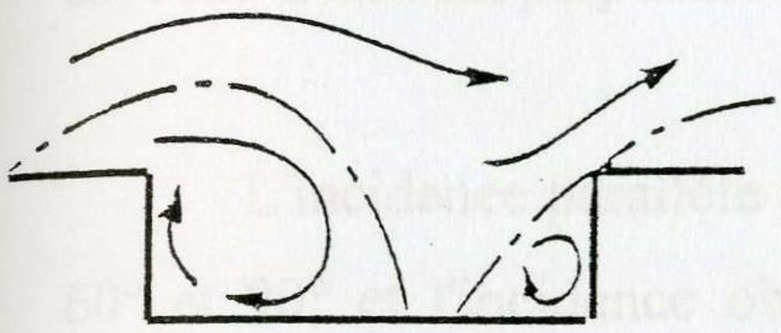
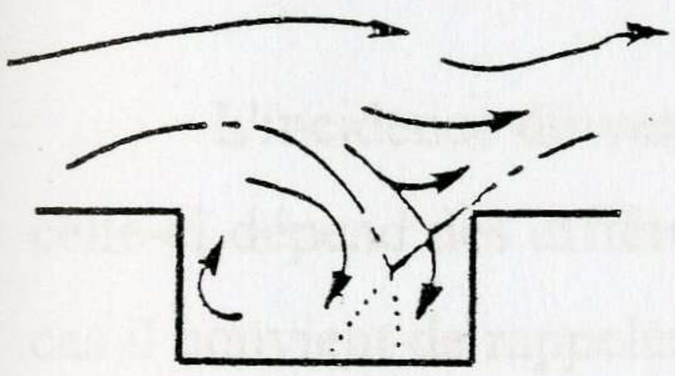
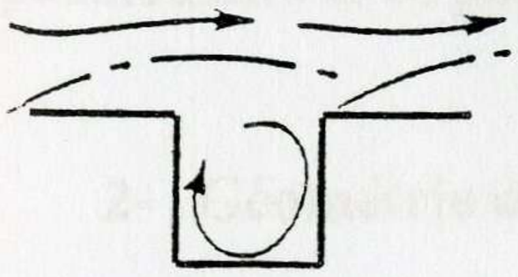
Enfin, il convient de mentionner que la vitesse du vent est sensiblement réduite en milieu urbain, même si la densité est faible et les espacements importants.

2- Incidence du vent par rapport au bâti

L'écartement entre bâtiments doit être évalué en combinaison avec l'incidence du vent. En effet, l'orientation du bâti par rapport à la direction du vent est au même titre déterminante, puisqu'elle conduit à l'amplification ou la diminution du taux d'infiltration de l'air dans le tissu. Elle contrôle sa vitesse, sa canalisation ou son blocage et donc le niveau d'exposition et de protection des espaces urbains extérieurs.

Lorsque le vent est parallèle au bâti, il a tendance à s'engouffrer dans les rues, et à être canalisé, par contre, dans les dispositions urbaines normales au vent l'air nouveau vient du dessus des toitures. Quant au vent oblique, l'infiltration de l'air est latérale et se fait à la fois par les rues et par les toitures.

Tableau 7.1 : Rôle du profil vertical transversal dans la définition de la nature des flux d'air.

Nature du flux	Caractéristiques
(1) **Flux isolé** 	- Assimilé à des bâtiments isolés d'où mixage de l'air important, donc forte exposition. Possibilité de gêne au niveau piéton - Ventilation extérieure et dispersion des polluants importants. - Différences de pressions sur les façades opposées importante qui implique un bon potentiel de ventilation intérieure. - Petits bâtiments : H/L< 0.4 (*). - Bâtiments longs : H/L< 0.3 (*)
(2) **Flux interférant** 	- Interaction des flux et bon mixage de l'air. - Meilleur protection que (1) notamment pour le niveau de la rue. - Bon niveau de renouvellement d'air - Ventilation extérieure et dilution des polluants bonne. - Différences de pressions sur les façades, d'où bon potentiel de ventilation intérieure. - Petits bâtiments : 0.75> H/L > 0.4 (*) - Bâtiments longs : 0.3< H/L< 0.6 (*)
(3) **Flux rasant** 	- Vent dévié au dessus des toitures avec circulation tourbillonnaire stable dans le profil. - Faible potentiel de ventilation extérieure. - Faible dilution des polluants car le renouvellement d'air est très réduit. - Faible potentiel de ventilation intérieurs car toutes les façades sont plongées dans des zones de faible pressions. - Petits bâtiments : H/L> 0.75 (*) - Bâtiments longs : H/L > 0.65 (*)

(*)Cf. Figure 6.25 page , Hosker 1985

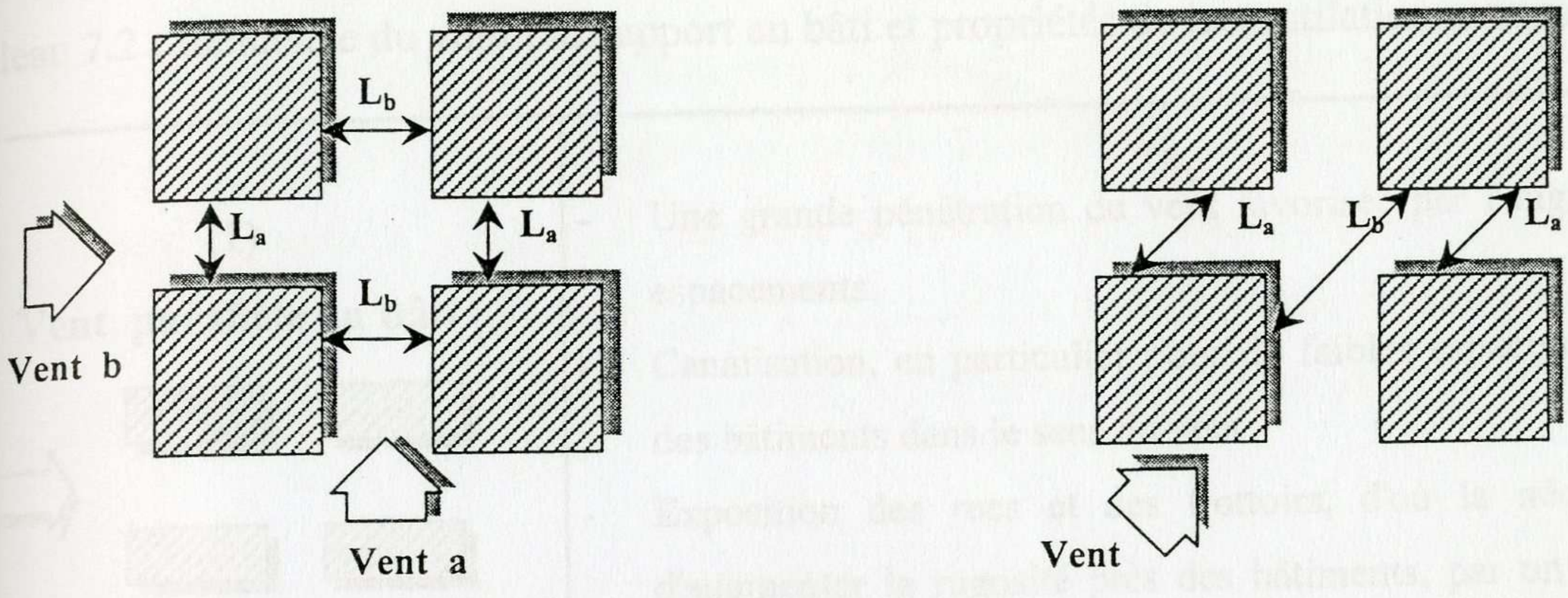
Dans tous les cas, l'incidence oblique fournit la meilleure pénétration de l'air dans les espaces extérieurs, comparativement à une orientation parallèle ou perpendiculaire du vent (Wiren 1985,1987). Ceci peut s'expliquer par le fait que l'écartement transversal relatif à considérer est plus grand que l'écartement transversal absolu donné par la disposition des bâtiments (Figure 7.12). Cette ventilation est évidemment grandissante à mesure que les espacements augmentent. A l'inverse l'association la plus défavorable à la ventilation extérieure est celle d'un vent perpendiculaire aux bâtiments et des espacements très étroits (tableau 7.2).

L'incidence parallèle peut être comprise entre 0° et 30°, L'incidence perpendiculaire entre 60° et 90° et l'incidence oblique entre 30° et 60° (Cf. Wiren 1985,1987). Il convient ici de mentionner que le choix d'un angle oblique doit se faire en tenant compte de la disposition et des espacements des bâtiments entre eux et de leur géométrie qui conditionnent le niveau d'obstruction au vent des bâtiments en amont du vent. La figure 7.13 illustre un cas où l'incidence à 60° est préférable à l'incidence à 30°.

L'incidence du vent affecte aussi l'écoulement de l'air à l'intérieur des bâtiments, puisque celle-ci dépend des différences de pressions qui existent entre les parois d'un bâtiment. Dans ce cas il convient de rappeler que l'incidence parallèle implique de faibles pressions sur les façades opposées (Wiren 1985,1987) ce qui suppose un faible potentiel de ventilation. L'incidence perpendiculaire engendre des différences de pressions si les espacements sont importants (Wiren 1985, 1987) mais l'incidence oblique permet une meilleure distribution des pressions positives et négatives (Wiren 1985,1987). L'incidence oblique s'est confirmée comme plus favorable à une ventilation intérieure des bâtiments comparativement à une incidence parallèle ou perpendiculaire et ce pour diverses géométries de bâtiments (Bensalem 1991).

2- Géométrie du bâtiment

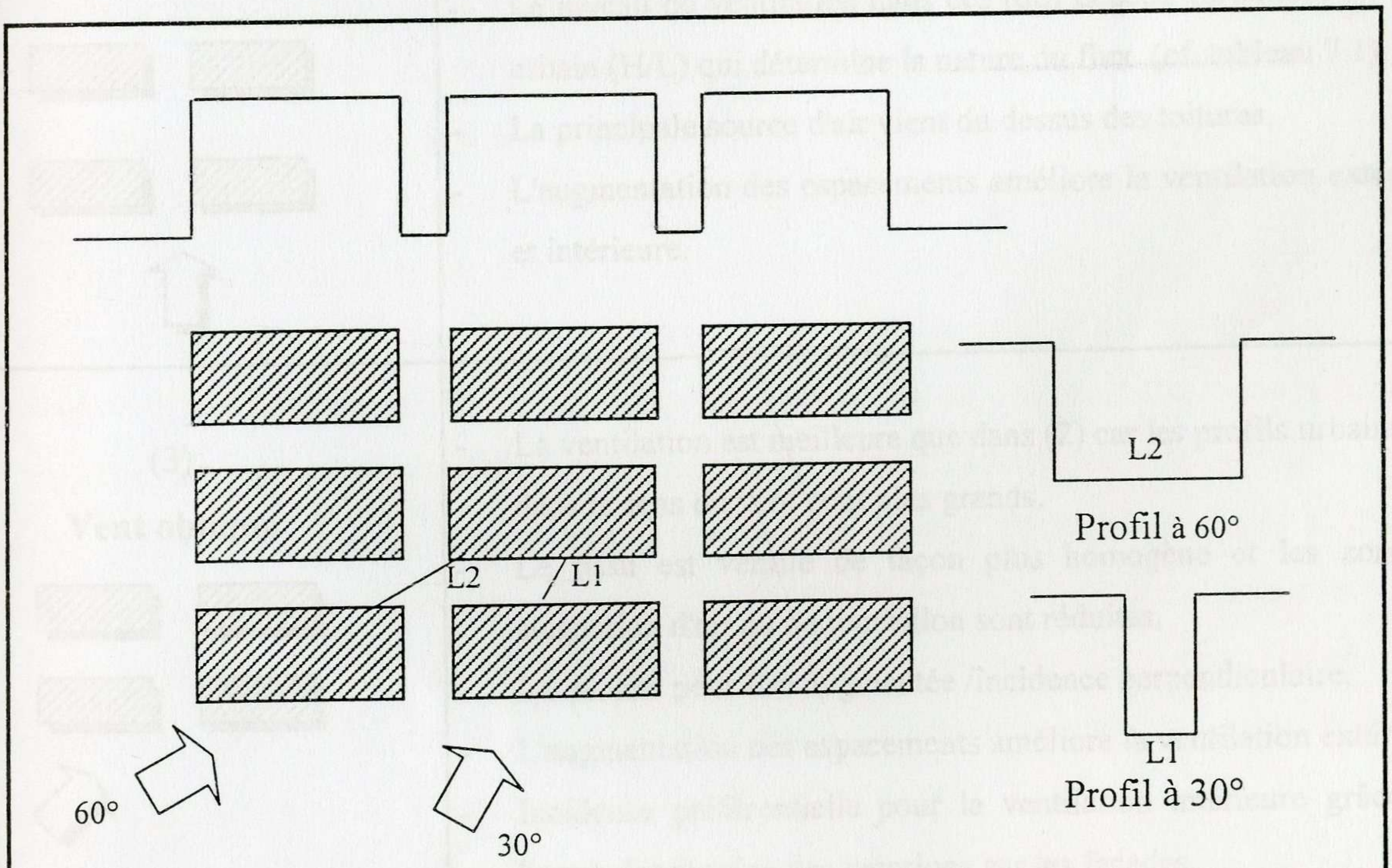
La géométrie du bâtiment est un paramètre à considérer en matière de porosité urbaine par rapport au potentiel de ventilation intérieure qu'il offre. L'architecture bioclimatique a établi que la circulation de l'air à l'intérieur d'un bâtiment est facilitée lorsqu'il est de faible largeur. Ceci permet la ventilation transversale en maintenant une différence de pressions suffisante entre les deux façades pour induire le déplacement du vent. Cette propriété a été confirmée en milieu urbain. Ainsi dans tous les cas, une géométrie oblongue de type barre présente un meilleur potentiel de ventilation intérieure qu'une géométrie compacte.



La ventilation urbaine pour un vent oblique est meilleure que pour un vent parallèle ou perpendiculaire pour deux raisons :

- Les espacements liés au passage du vent oblique sont plus grands d'où meilleur potentiel de ventilation.
- L'écoulement de l'air pour un vent oblique se fait par la toiture et par les cotés latéraux du bâtiments, tandis que pour un vent perpendiculaire le vent vient par la toiture seulement.

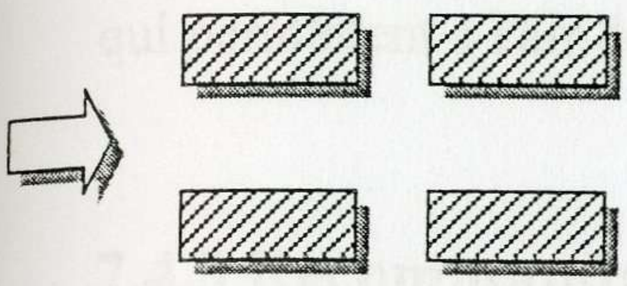
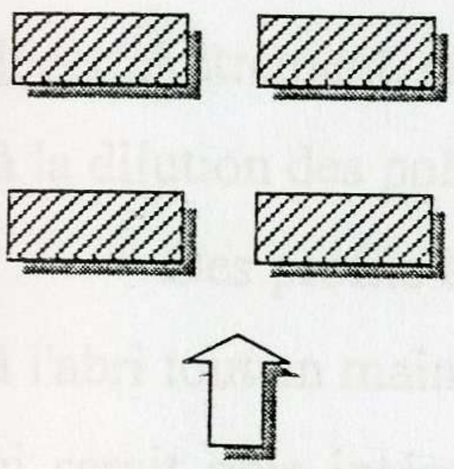
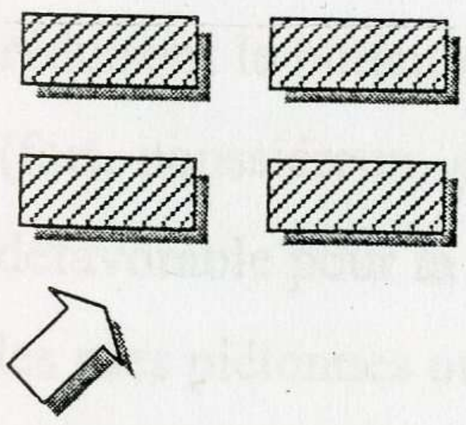
Figure 7.12 : Rôle de l'incidence du vent dans la définition du profil transversal décisif dans la ventilation urbaine.



L'incidence à 60° fournit une meilleure ventilation qu'une incidence de 30° car les profils transversaux à 60° sont plus larges et les effets d'obstacle des bâtiments en amont est plus faible.

Figure 7.13 : Rôle de la géométrie des bâtiments et de la géométrie de l'espace extérieur dans l'incidence oblique du vent optimal.

Tableau 7.2 : Incidence du vent par rapport au bâti et propriétés de la ventilation urbaine.

(1) **Vent parallèle au bâti** 	- Une grande pénétration du vent favorisée par l'augmentation des espacements. - Canalisation, en particulier pour de faibles espacements/ Hauteur des bâtiments dans le sens du vent - Exposition des rues et des trottoirs, d'où la nécessité parfois d'augmenter la rugosité près des bâtiments, par un aménagement végétal par exemple. - Renouvellement de l'air important. - Faibles pressions sur les façades et donc faible potentiel de ventilation intérieure.
(2) **Vent perpendiculaire au bâti** 	- Les espacements derrière les bâtiments sont largement protégés. - La vitesse du vent est réduite. - Le niveau de ventilation dans ces rues dépend fortement du profil urbain (H/L) qui détermine la nature du flux (cf. tableau 7.1). - La principale source d'air vient du dessus des toitures. - L'augmentation des espacements améliore la ventilation extérieure et intérieure.
(3) **Vent oblique** 	- La ventilation est meilleure que dans (2) car les profils urbains dans le sens du vent sont plus grands. - Le tissu est ventilé de façon plus homogène et les zones de stagnation d'air ou de tourbillon sont réduites. - La densité peut être augmentée /incidence perpendiculaire. - L'augmentation des espacements améliore la ventilation extérieure. - Incidence préférentielle pour la ventilation intérieure grâce à la bonne distribution des pressions sur les façades. - Le choix de l'angle optimal dépend des espacements entre bâtiments.

Pour des bâtiments compacts, les géométries à patio sont moins favorables à la ventilation que des géométries à atrium et ce même si la dimension du patio est importante. Ce potentiel est encore plus faible en site urbain dense car la ventilation extérieure est elle-même réduite (Bensalem 1991). Le bâtiment à atrium offre une meilleure ventilation intérieure, notamment en site urbain dense grâce à l'exploitation des faibles pressions au-dessus du bâtiment qui permettent à l'air de rentrer par toutes les façades et d'être expulsé par la toiture.

7.4.3 Recommandations générales

1- Pour la ventilation extérieure

D'une manière générale, pour favoriser la ventilation dans les espaces extérieurs, le renouvellement d'air et la dilution des polluants, des profils urbains très larges sont à préférer. Ces profils sont caractéristiques d'une situation de forte exposition pouvant être assimilée à un site dégagé (Flux isolé), et qui est tolérée lorsque le vent est de faible vitesse et les activités ne nécessitant pas de protection ou dans les cas où une ventilation continue est requise avec vent léger. Autrement, cette situation crée une forte gêne au niveau du piéton même s'il est favorable à la dilution des polluants et à une ventilation intérieure dans les bâtiments.

Des profils à flux interférent présentent une protection partielle du vent à savoir une rue à l'abri tout en maintenant un niveau de renouvellement d'air dans les niveaux supérieurs. Celle-ci serait plus intéressante pour les espaces urbains vécus puisqu'elle maintient un niveau de confort élevé pour le piéton au pied des bâtiments et un potentiel de renouvellement d'air suffisant pour des considérations hygiéniques et pour le refroidissement des structures.

Enfin des profils très étroits (Flux rasant) offrent de fortes conditions d'abri mais réduisent le potentiel de mixage de l'air, qui conviendraient dans les zones où le vent est gênant (fort, poussiéreux, etc.) ou pour des activités nécessitant un calme important. Toutefois elle est défavorable pour la dispersion des polluants et peut être préconisée pour des zones propres telles les rues piétonnes ou les zones résidentielles.

Ces profils étant définis par rapport à l'incidence du vent, il convient de remarquer que généralement, l'incidence parallèle et perpendiculaire existent simultanément dans un réseau urbain orthogonal et présentent des situations de ventilation contrastées entre exposition et protection, par contre l'incidence oblique offre une ventilation plus régulière. Elle permet d'éviter les canalisations directes, les zones de stagnation d'air et les tourbillons généralement gênants.

A ces recommandations générales peuvent s'ajouter quelques dispositions additives qui modifient les propriétés de ventilation urbaine notamment la variation de gabarits. En comparaison avec un tissu urbain uniforme la différenciation des hauteurs semble améliorer la ventilation en augmentant le potentiel de mixage de l'air en haut des bâtiments et l'amenée de l'air dans les rues. L'usage de tours élevés bien réparties dans le tissu amplifie le phénomène (Givoni 1989). Cependant les effets aérodynamiques gênants pouvant découler de l'usage de tours élevées doivent être contrôlés, ces aspects sont relativement bien connus (Cf. Gandemer 1979).

A rappeler enfin que la géométrie des espaces extérieurs qui contrôle la circulation du vent est le résultat de la géométrie des bâtiments et de leur mode d'association et qui peut conduire selon les cas à des rues plus ou moins continues ou un tissu aux intersections nombreuses. A ce titre il convient de dire que des formes allongées favorisent la canalisation de l'air lorsque celles-ci sont orientées plus ou moins dans le sens du vent (0° à 30°) en particulier lorsque le profil frontal en amont est large permettant la canalisation du vent.

A l'inverse un tissu aux intersections nombreuses, caractéristique d'un réseau de petits bâtiments provoque, à ses croisements de rues, des zones de turbulences pour toutes les directions de vent. Dans ces cas, des solutions d'appoint peuvent être envisagées pour réduire la vitesse du vent lorsque celle-ci est préférable pour le piéton à savoir l'augmentation de la rugosité prés du sol - en bordure des rues et aux intersections – par l'usage de végétation ou par des détails d'architecture tels que des galeries et des auvents.

La dilution des polluants est liée à la ventilation des espaces extérieurs ; elle est favorisée par tous les choix de géométrie visant la ventilation des espaces urbains. Cependant, il convient de préciser quelques spécificité. La dilution des polluants est sensible à la direction du vent qui conditionne leur déplacement. Ainsi, un vent parallèle au bâti engendre une situation relativement uniforme donnant une stratification horizontale de la teneur en polluants dans la rue ; Par contre une rue perpendiculaire à la direction du vent crée une situation différente où le coté face au vent est dégagé de pollution mais le coté sous le vent fortement pollué du à un retour du flux (Oke 1988a, Baumüller et al 1993).

2- Pour la ventilation intérieure

La ventilation intérieure est tributaire en premier lieu du niveau de ventilation qui existe dans les espaces extérieurs. Ainsi toutes les dispositions urbaines adoptées pour le contrôle du confort extérieur doivent être vérifiées par rapport au potentiel qu'elles offrent de renouveler l'air à l'intérieur des bâtiments. Généralement, plus les espaces urbains sont ventilés plus grand est le potentiel de ventilation intérieure, à savoir plus l'écartement entre bâtiments est important et les profils verticaux larges plus importante est la ventilation intérieure.

Cependant, quelques compléments sont nécessaires. Il s'agit d'une part du rôle de l'incidence du vent et d'autre part de la géométrie du bâtiment.

L'orientation du bâti par rapport au vent affecte différemment l'espace intérieur. La direction oblique favorise la création de zones de pressions différentes sur les façades opposées des bâtiments. Cette direction est donc la plus favorable pour une ventilation interne puisque cette différence de pressions est la condition nécessaire pour une ventilation transversale. Ceci à l'inverse d'une direction parallèle du vent qui maintient les façades des bâtiments dans le même champ de pressions et par conséquent rend la circulation de l'air à l'intérieur des bâtiments improbable bien qu'elle implique une ventilation importante des rues.

Par ailleurs, la ventilation transversale est effective lorsque les bâtiments sont de faible largeur de type barre. Cependant, des géométries de bâtiments plus compactes sont plus caractéristiques d'un contexte urbain de densité plus ou moins grande. Dans ces cas la ventilation intérieure peut se faire par l'introduction d'atrium ou tours à vent destinés à cet effet.

3- Dispositions liées au type de climat

La nature du climat dicte au départ l'exigence d'une ventilation continue ou discontinue (nocturne). Ceci a un impact direct sur la morphologie urbaine générale. La ventilation continue, nécessaire en climat chaud et humide requiert des densités faibles d'où des espacements importants, H/L faibles, etc. Par contre des climats chauds et secs où seule la ventilation nocturne est souhaitée autorise de plus fortes densités.

De même, que les caractéristiques qualitatives de vent est une donnée essentielle pour la conception (vent faible ou fort, froid ou chaud, gênant ou favorable, chargé de poussières, etc.). Autant de données qui déterminent les dispositions premières à prendre. Ces dispositions font référence à la notion de confort.

7.5 Directionnalité

7.5.1 Définition et objectifs

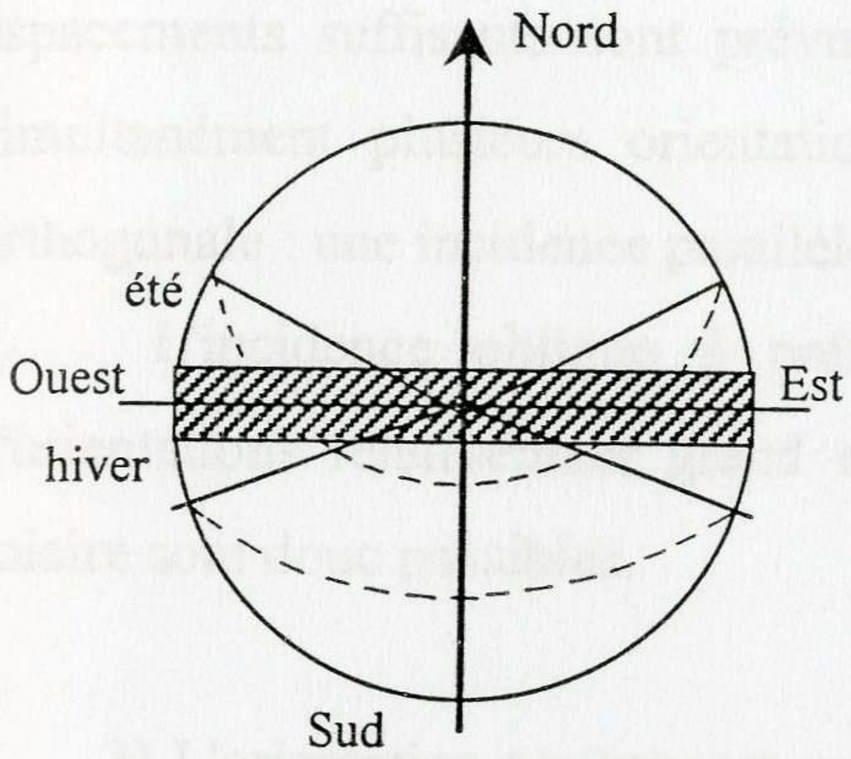
Les deux concepts d'ouverture au ciel et de porosité urbaine ont montré l'importance des choix d'orientation à la fois par rapport au soleil et par rapport au vent. Le concept de directionnalité vient en complément à ces deux concepts puisqu'il explique les compromis à faire entre ces deux exigences. Cette question est isolée dans un concept spécifique car les choix d'orientation de la trame urbaine dans les projets d'urbanisme constitue l'une des premières décisions à prendre d'où la nécessité de fournir séparément les critères qui orientent ces choix.

7.5.2 Paramètres déterminants

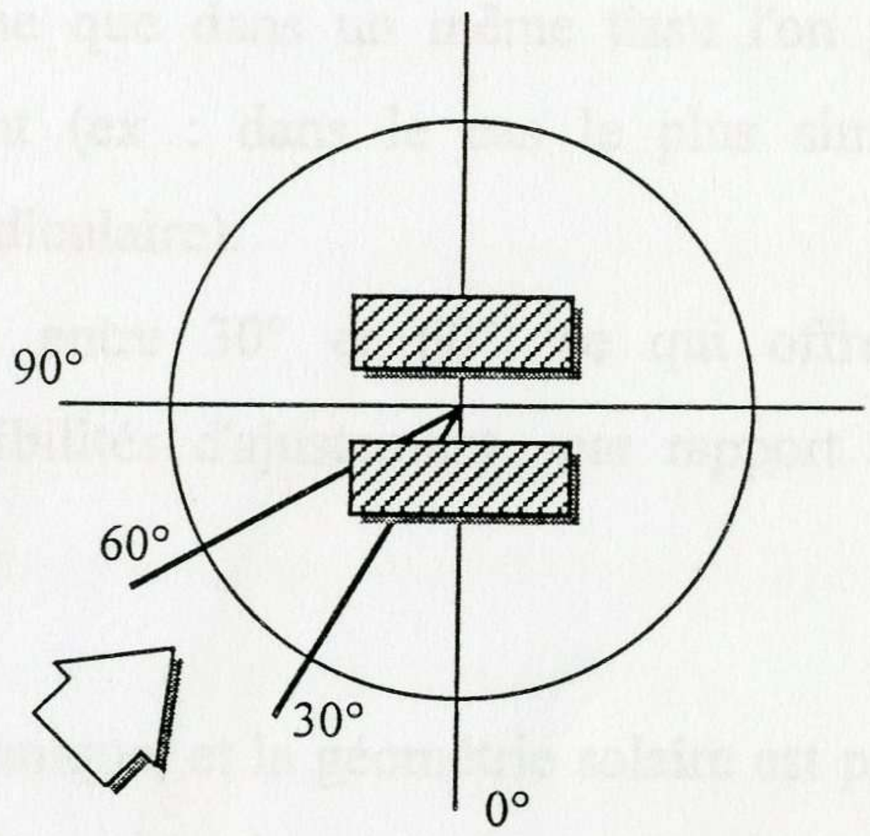
Les paramètres à considérer sont évidemment l'orientation des bâtiments par rapport au soleil et l'incidence du vent par rapport au bâti. Ces deux paramètres ont été détaillés précédemment (Cf.7.2.2 et 7.4.2). L'orientation solaire – préférentielle au sud - nous semble plus déterminante que l'orientation par rapport au vent dans la détermination de la directionnalité d'un tissu urbain (Figure 7.14) et ce pour plusieurs raisons :

1) L'orientation par rapport au soleil a été identifiée comme étant primordiale dans la satisfaction des besoins d'ensoleillement. Les exigences journalières et saisonnières d'ensoleillement souhaitable ou à éviter se sont révélées fortement dépendantes de l'orientation solaire. Les différences entre profils urbains Est-Ouest et Nord- Sud sont très importantes ; De même que les différences entre l'une de ces orientations principales et la direction intermédiaire sud-est/ nord-ouest est également substantielle. Ces différences concernent aussi bien l'ensoleillement intérieur qu'extérieur, ce qui montre que toute inclinaison modifie l'accès au soleil, de façon significative et affecte l'usage des espaces urbains, le potentiel de fonctionnement passif des bâtiments et par conséquent les économies d'énergie.

L'ouverture au ciel a montré aussi que le choix du profil vertical est fortement dépendant de l'orientation choisie. C'est l'orientation qui décide des gabarits, des espacements entre bâtiments et de la forme du profil.



Orientation préférentielle Sud



Direction préférentielle oblique

L'orientation du bâti par rapport au soleil au sud est décisive dans le contrôle saisonnier et journalier de l'ensoleillement.
La direction oblique du vent par rapport au bâti est la plus intéressante pour contrôler la ventilation urbaine, cette direction varie entre 30° et 60°.
L'orientation de la trame urbaine devrait privilégier la direction solaire car elle est plus contraignante puisque la direction oblique offre un éventail de directions plus grand. La trame peut, néanmoins suivre une direction intermédiaire.

Figure 7.14 : Choix de la directionnalité de la trame urbaine par rapport au soleil et au vent.

2) La porosité urbaine a montré que l'incidence du vent par rapport au bâti est importante dans la détermination du niveau de ventilation, cependant, celle-ci ne peut être évaluée que par rapport aux espacements entre bâtiments. L'incidence oblique du vent permet seulement d'améliorer la ventilation extérieure et intérieure comparativement à une incidence parallèle ou perpendiculaire, puisque dans tous les cas, la ventilation est possible dès lors que des espacements suffisants sont prévus, de même que dans un même tissu l'on peut retrouver simultanément plusieurs orientations du vent (ex : dans le cas le plus simple de trame orthogonale : une incidence parallèle et perpendiculaire).

L'incidence oblique à préférer varie entre 30° et 60°, ce qui offre un éventail d'orientations relativement grand et les possibilités d'ajustement par rapport à l'orientation solaire sont donc possibles.

3) L'orientation par rapport au soleil est unique, et la géométrie solaire est précise et varie de manière cyclique dans l'année ce qui signifie que les besoins d'ensoleillement sont constants et semblables à la même date. Tandis que les impératifs de ventilation dépendent de la nature des vents, froids ou chauds qui induisent respectivement la protection et l'exposition. Ces vents peuvent se manifester à des périodes différentes dans l'année et peuvent venir de plusieurs directions. Une direction unique de vents dominants est improbable.

7.6 Enveloppe bâtie

7.6.1 Définition et objectifs

Ce concept est de fondement architectural, il est préconisé pour rendre compte du rôle de la géométrie des bâtiments dans le contrôle climatique à l'échelle urbaine.

En effet, la structure urbaine est habituellement décrite comme une composition ordonnée de bâti et de non bâti, tel que l'un constitue la limite de l'autre. Les concepts précédents introduisent le climat en tenant compte principalement de la géométrie de l'espace extérieur. Or c'est la géométrie du bâti qui détermine cet espace extérieur puisque les bâtiments constitue ses parois. Il est de ce fait complémentaire aux précédents concepts.

Egalement, le concept d'enveloppe bâtie est une vision plus large du concept d'enveloppe solaire (Cf. Knowles 1981), en ce sens qu'il intègre à la question de l'ensoleillement, des considérations de ventilation et d'éclairage ; de même qu'il porte une attention particulière aux espaces extérieurs.

Pour des considérations urbaines de conception climatique, les objectifs liés à la détermination de cette enveloppe sont :

1. Définir les propriétés que doit posséder un bâtiment pour être de grande qualité environnementale. La performance d'un bâtiment dépend fortement de sa géométrie, qui détermine son potentiel de fonctionnement passif et d'exploitation des ressources énergétiques naturelles.
2. Evaluer sa performance à une échelle urbaine suite à l'association de plusieurs de ces bâtiments car le bâtiment est considéré comme l'unité de base répétitive qui définit le tissu urbain. Chaque forme architecturale induit un assemblage particulier, une configuration urbaine globale spécifique et par conséquent un potentiel d'accès au soleil, de ventilation urbaine et de refroidissement particuliers.

7.6.2 Paramètres déterminants

Pour ce concept aussi, l'intérêt de recourir à des paramètres urbains simples, qui décrivent avec précision la relation forme bâtie - processus environnementaux est confirmé.

1- La géométrie du bâtiment

Les dimensions d'un bâtiment : hauteur, largeur et épaisseur décident des échanges avec l'environnement en matière de gains solaires, de conservation ou déperditions de chaleur, de ventilation et d'éclairage. La référence à l'architecture bioclimatique, dans ce cas, est évidente. Elle a révélé l'importance de ces dimensions aussi bien absolues que relatives, autrement dit la taille et la forme du bâtiment dans sa capacité de fonctionnement passif. Le fonctionnement passif étant la capacité d'un bâtiment à utiliser des moyens passifs de chauffage, de refroidissement et d'éclairage.

Le ratio Surface/Volume se présente comme l'indicateur privilégié de ces échanges (Markus et Morris 1981). C'est le ratio entre les surfaces de l'enveloppe rapportées au volume qu'elle renferme. Ce ratio est pertinent dans la description d'une géométrie de bâtiment parce qu'il permet de déterminer la taille et la forme optimales d'un bâtiment par rapport à ces échanges.

Le ratio S/V renvoie à un autre indicateur à savoir le pourcentage d'aire passive lequel évalue la proportion du bâtiment qui utilise des énergies naturelles pour le fonctionnement passif du bâtiment rapporté à la partie qui doit nécessairement utiliser des moyens actifs de contrôle climatique car non exposées à l'extérieur. Cette surface passive équivaut à la partie du bâtiment située à $5 \div 6$ mètres de l'enveloppe (Baker et al 1996).

Ainsi, le recours au ratio surface/volume et la définition du pourcentage d'aire passive pour estimer à la fois la taille et la forme du bâtiment se présentent comme une approche intéressante pour la détermination de l'enveloppe bâtie.

L'analyse a montré que plus la taille du bâtiment est grande, plus le ratio S/V diminue, ce qui signifie la réduction de ces échanges avec l'extérieur. Ceci est vérifié par l'indicateur d'aire passive P (%) qui montre que l'aire de fonctionnement passif est moindre à mesure que le bâtiment est grand (Figure 7.15a).

De même, la forme du bâtiment s'est révélée régie par S/V et P(%). Il est apparu que pour un même volume, le cube est la forme la plus compacte avec S/V minimal, ce qui signifie que c'est la forme la plus inerte par rapport à l'extérieur.

Plus le bâtiment s'allonge, plus son potentiel d'exposition et donc de fonctionnement passif (apports solaires, ventilation, lumière) augmente en comparaison avec le cube (Figure 7.15b). Pour évaluer S/V et P, il est nécessaire de comparer la géométrie en question à un cube de même volume.

Le tableau 7.3 compare trois variantes d'une même géométrie de base. Elle est présentée pour montrer que l'utilisation de ces indicateurs est pertinente, et pour montrer le caractère large des choix formels rapportés à ces indicateurs. La géométrie à atrium semble être la plus intéressante comparativement aux deux autres car elle permet de concilier à la fois une bonne exposition à l'extérieur (P élevé) avec une forte inertie par rapport à l'extérieur (S/V faible).

Les critères de choix d'une géométrie sont directement liés à la nature du climat qui peut dicter selon les cas : la nécessité d'une forte exposition au soleil, stockage de la chaleur pour contrôler les amplitudes journalières de températures, une ventilation plus ou moins grande, continue ou nocturne, etc.

3- Géométrie de l'espace extérieur

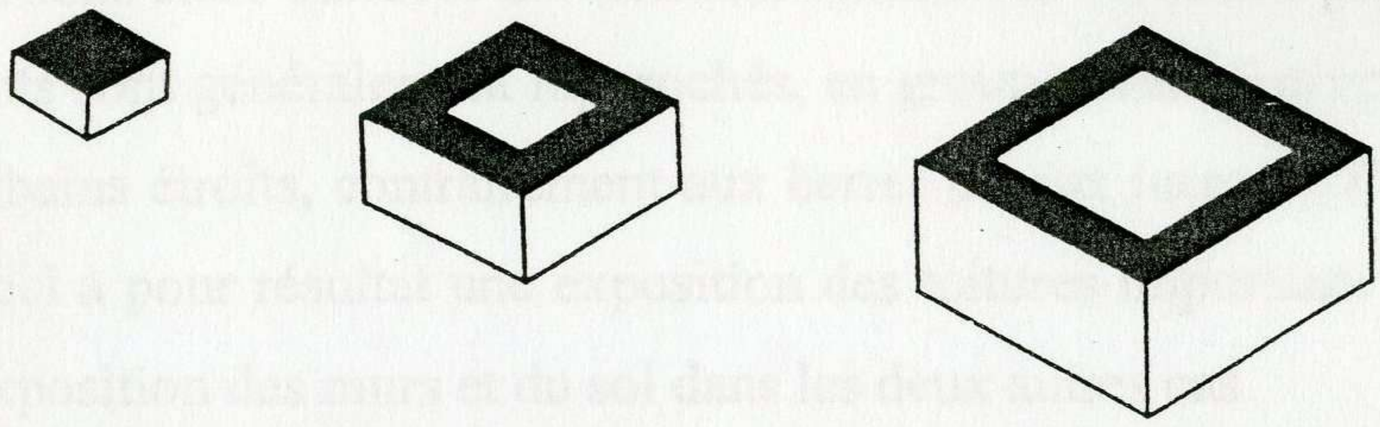
Au-delà de l'importance de la géométrie expliquée, plus haut, les propriétés d'assemblage de la forme urbaine sont au même titre déterminantes que ses qualités environnementales propres. En effet, les avantages d'une géométrie de bâtiment peuvent être limités par un contexte urbain plus ou moins dense où le niveau d'obstruction au soleil et au vent est grand et limite à la fois le fonctionnement bioclimatique du bâtiment et le confort dans les espaces extérieurs.

Cependant c'est cette même géométrie du bâtiment qui est en grande partie responsable de la configuration globale d'un tissu urbain. Chaque forme de bâtiment suppose une forme d'association spécifique car l'emprise au sol, les profils verticaux et les espacements en dépendent. A titre d'exemple, la figure 7.16 illustre un réseau d'îlots, de barres ou de tours qui s'associent différemment et engendrent des géométries d'espaces extérieures différentes (1).

---

(1) La comparaison est valable car le ratio bâti/ non-bâti et le ratio surface passive/aire active est maintenus constants, ce qui isole le rôle du mode d'association du groupement

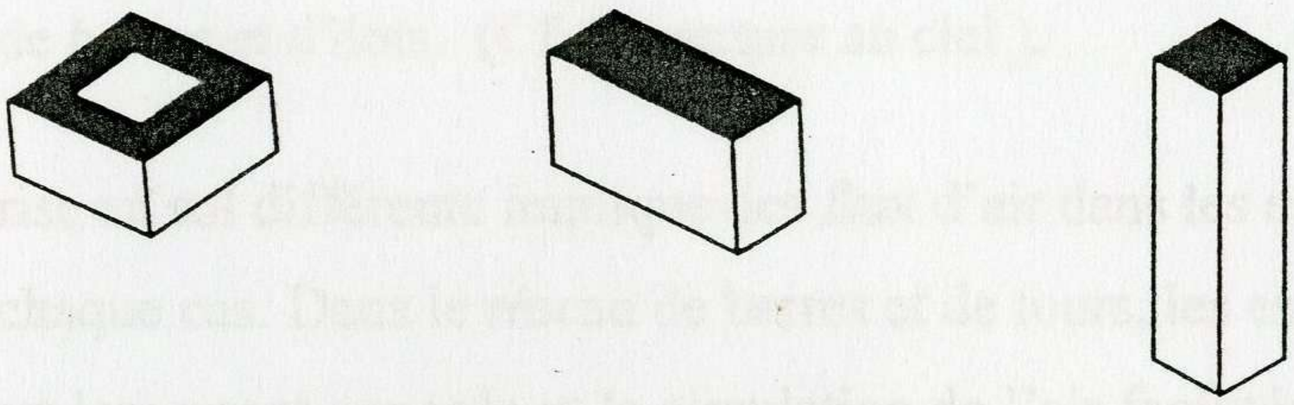
a)



Aire passive

Plus le bâtiment est grand (même forme), plus le ratio S/V augmente, c'est-à-dire sa compacité et le pourcentage d'aire passive P(%) ou sa capacité de fonctionnement passif diminue.

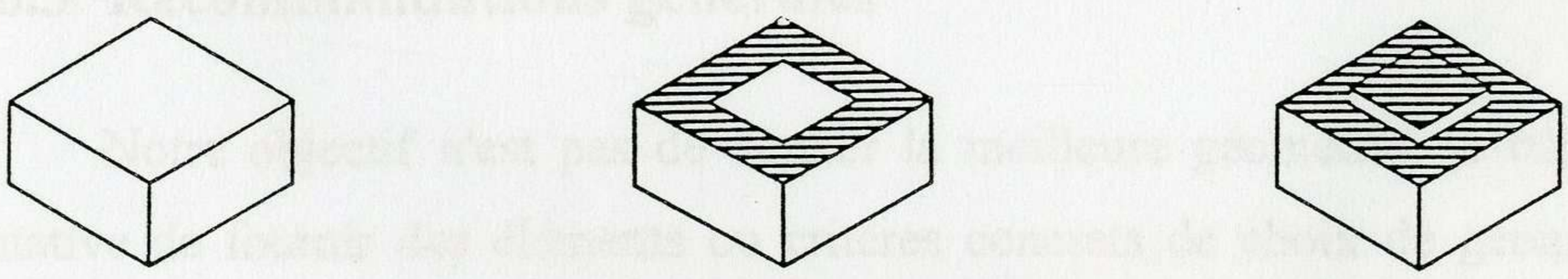
b)



Plus la forme du bâtiment s'allonge, plus l'exposition à l'extérieur augment donnée par un ratio S/V croissant. Le potentiel de fonctionnement passif donné par P(%) augmente.

Figure 7.15: Evaluation de la géométrie du bâtiment par les indicateurs S/V et P (%).

Tableau 7.3 : Exemple de la performance climatique de bâtiment à patio et à atrium par le biais du Ratio S/V et du pourcentage d'aire passive P (%).



L'aire hachurée correspond à l'aire passive

(1) S/V faible, P faible	(2) S/V élevé , P élevée	(3) S/V Faible, P élevée
Proche du cube d'où bon potentiel de conservation de l'énergie ou faibles déperditions. Faible exposition, aire active dominante. Nécessité d'un chauffage, éclairage et ventilation actifs.	Forte exposition à l'extérieur d'où faible conservation de l'énergie. Déperditions importantes, inconfort thermique. Exposition importante. Apports passifs d'énergie (Chauffage, lumière). Faible ventilation naturelle.	Bonne conservation de l'énergie. Bonne exposition à l'extérieur d'où bon potentiel d'apports passifs (ensoleillement, lumière). Bon potentiel de ventilation naturelle.

Les proportions entre surfaces horizontales et surfaces verticales pour chaque réseau sont différentes ; les îlots sont généralement rapprochés, en groupement relativement compact, ce qui crée des profils urbains étroits, contrairement aux barres ou aux tours où l'espace libre peut être plus important. Ceci a pour résultat une exposition des toitures importante pour les îlots, contre une plus grande exposition des murs et du sol dans les deux autres cas.

L'accès au soleil sur les différentes surfaces est fortement dépendant de cette géométrie en particulier du profil vertical. Potentiellement le réseau de tours est bien plus exposé au soleil que le réseau de barres et d'îlots. (Cf. Ouverture au ciel).

L'emprise au sol différente implique des flux d'air dans les espaces extérieurs et intérieurs spécifiques à chaque cas. Dans le réseau de barres et de tours, les espacements sont importants et donc l'entité est largement exposée et la circulation de l'air facilitée. Par contre le réseau d'îlots est moins favorable à la circulation de l'air et crée des zones d'abri, notamment au cœur d'îlots (Cf. Porosité urbaine).

Le choix d'une de ces géométries urbaines ou une autre exige l'évaluation de l'ensemble de ses effets de contrôle climatique Ceux-ci sont à évaluer nécessairement en se référant aux concepts détaillés plus haut dont les principaux sont l'ouverture au ciel et la porosité urbaine.

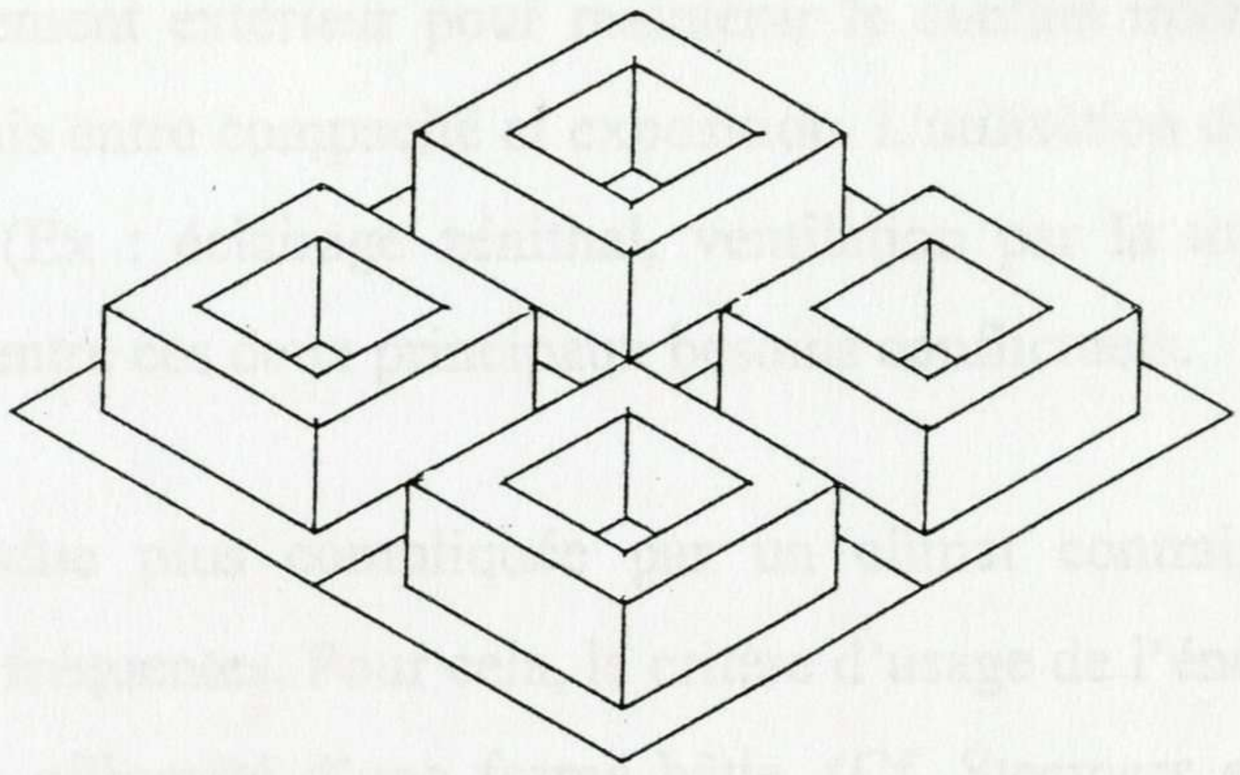
7.6.3 Recommandations générales

Notre objectif n'est pas de donner la meilleure géométrie de bâtiment, mais c'est une tentative de fournir des éléments ou critères concrets de choix de géométrie par rapport à la situation urbaine qu'ils engendrent tout en satisfaisant un niveau de performance environnemental suffisant du bâtiment lui-même. Quelques critères sommaires d'évaluation sont donnés ci-après :

1) Pour favoriser le fonctionnement passif à savoir des apports passifs de chaleur et de lumière, ventilation transversale : des plans étroits (faible largeur) sont plus favorables que les plans profonds (base large) car l'aire passive est dominante. Ainsi, préférer une aire passive P importante ; Ceci est atteint par l'usage de petits bâtiments et/ou des formes allongées de faible largeur. Inversement pour la conservation de l'énergie préférer un S/V faible par l'utilisation de grands volumes et/ou des formes compactes proche du cube.

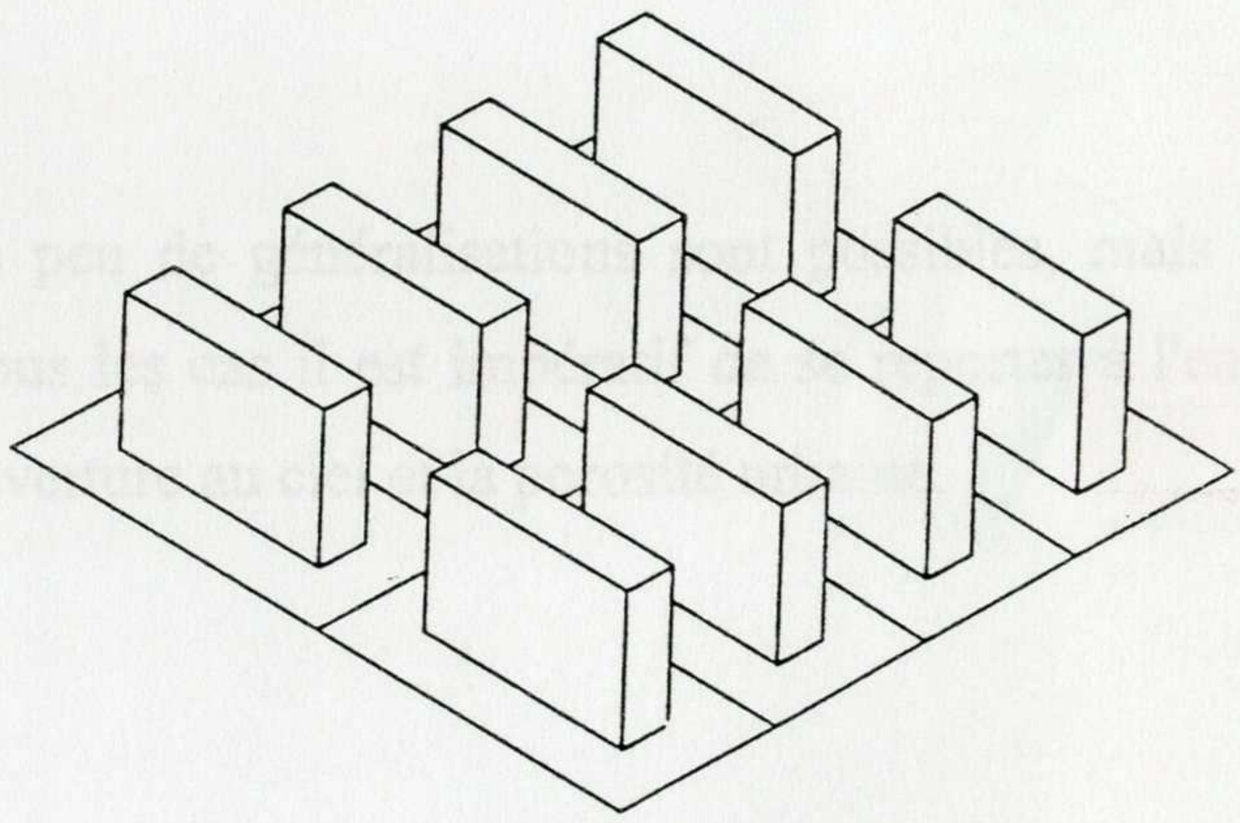
1)

L'îlot implique un réseau urbain compact,
C'est-à-dire une forte emprise au sol.
Les surfaces horizontales sont dominantes.
Les espacements entre bâtiments sont
Réduits.
Les effets d'obstructions
au soleil et au vent peuvent être
importants et dépendent des ratios H/L.



2)

Le réseau de barres est un réseau
de faible densité de plan, généralement
fait d'éléments espacés.
Les surfaces verticales sont dominantes.
Les obstructions au soleil et au vent
sont plus faible qu'en 1) mais
dépendent de l'orientation /soleil
et de l'incidence du vent.
Existence d'une exposition dominante
Par rapport au soleil.



3)

Le réseau de tours offre la plus faible
au sol avec des espacements
entre bâtiments très importants.
Les effets d'obstacle au soleil et au vent
Plus faibles qu'en 1) et 2).
Existence d'effets aérodynamiques.

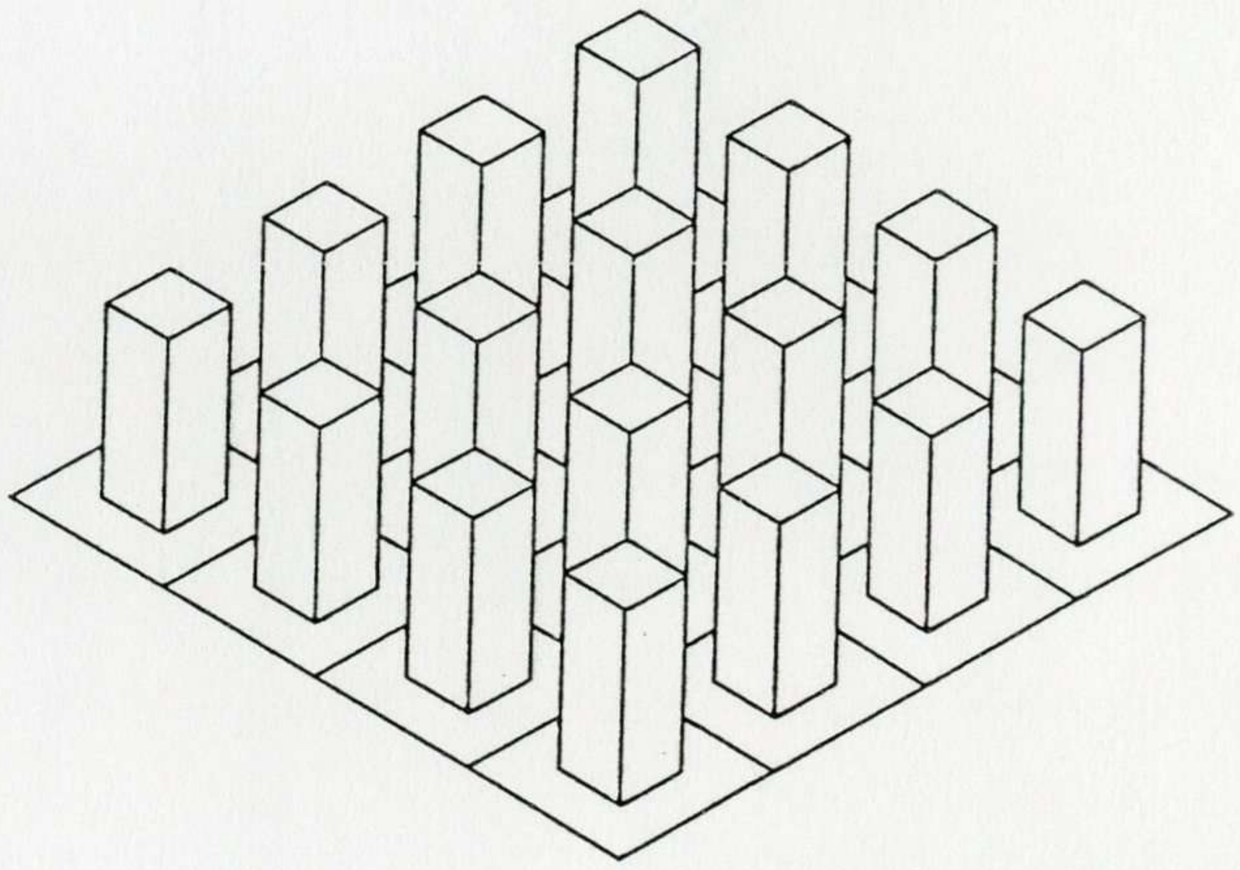


Figure 7.16 : Association urbaine de trois géométries de bâtiments élémentaires au fonctionnement climatique potentiellement très différent.

Les critères de fonctionnement passif d'un bâtiment s'opposent à ceux de la conservation de l'énergie. Effectivement, lorsque les exigences d'exposition du bâtiment sont associées à une nécessité de protection de l'environnement extérieur pour maintenir le confort intérieur, alors S/V et P (%) doivent être un compromis entre compacité et exposition. L'utilisation de la toiture comme paroi réceptrice de l'énergie (Ex : éclairage zénithal, ventilation par la toiture, etc.) permettrait de réaliser des compromis entre ces deux principaux besoins conflictuels.

Cette difficulté peut être rendue plus compliquée par un climat contraignant aux variations saisonnières et journalières fréquentes. Pour cela, le critère d'usage de l'énergie est le meilleur moyen d'évaluer la véritable efficacité d'une forme bâtie. (Cf. Steemers et al 1989, 1996). Il importe de comparer entre économies réalisées grâce à l'exposition de la zone passive, à la présence d'une zone protégée de l'extérieur (active) et la consommation énergétique nécessaire dans la zone active.

2) Pour l'assemblage des bâtiments peu de généralisations sont possibles, mais une infinie variétés d'associations existe. Dans tous les cas il est impératif de se reporter à l'ensemble des concepts précédents en particulier l'ouverture au ciel et la porosité urbaine.

7.7 Verdurisation

7.7.1 Définition et objectifs

Pour conclure, la verdurisation est un concept qui introduit la végétation en tant que moyen de contrôle climatique. Nous donnons quelques éléments sur la démarche à suivre pour concilier l'usage du végétal imbriqué au tissu urbain avec les exigences de contrôle climatique à l'échelle de la composition urbaine. Les principaux objectifs liés au choix de la végétation à ce stade de conception sont :

1- Conservation de l'accès au soleil et de la ventilation

La végétation idéale est celle qui permet une protection du soleil en été et garantit une grande perméabilité à l'irradiation solaire en hiver. La conservation de l'ensoleillement en hiver est un impératif majeur lors de la projection d'arbres. Cet aspect est le plus déterminant en climat chaud où la recherche de l'ombre pourrait reléguer au second plan cet aspect pourtant important.

Pour les considérations de ventilation à l'intérieur du tissu urbain nous savons que les arbres influent sur le transport de l'air frais et des polluants par leur espacement, l'étendue de leur couronnes, et la distribution verticale des feuilles. La protection du vent réduit le taux d'infiltration de l'air en hiver mais elle ne doit pas gêner la ventilation naturelle en été en obstruant les brises estivales.

2- Economies d'énergie

Hormis le confort que peut favoriser l'usage de la végétation, c'est principalement en termes d'économie d'énergie que celle-ci doit être évaluée. Ces économies concernent la réduction de la demande d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments, grâce aux propriétés climatiques des arbres (Ombrage, réduction du vent, etc.) Cette approche permet d'optimiser les choix des espèces, leur localisation et leur association au domaine bâti.

7.7.2 Paramètres déterminants

1- Type d'arbre

Toutes les caractéristiques d'un arbre ont un impact sur le contrôle climatique qu'il permet. Il s'agit à la fois de sa forme, de son volume, de son âge, de sa densité et de son cycle foliaire à savoir caduc ou persistant. La forme de l'arbre est plus importante que la densité en matière d'ombrage, et les arbres au volume important sont plus ombrant que des arbres hauts et étroits. (Mc Pherson et Simpson 1995). Globalement, Les arbres aux couronnes larges favorisent l'ombrage permettent la circulation partielle de l'air. Les arbres denses favorisent la réduction du vent mais sont peu ombrants. Les espèces à feuillage caduc permettent le contrôle de l'accès au soleil et les espèces à feuillage persistant sont plus favorables à une protection des vents. Une variété d'espèces par type de climat liée à sa performance climatique est donnée par Nottat (1980) et Mc Pherson et al (1994b)

2- Localisation de la végétation

Le choix de la localisation des arbres est déterminant par rapport au contrôle de l'accès au soleil, mais aussi, par rapport à l'optimisation des économies d'énergie. A ce titre, la localisation à l'ouest s'est révélée comme étant la plus intéressante au point de vue de l'économie d'énergie sans gêner l'accès au soleil puisque, dans ce cas, l'ombrage des ouvertures est recommandé. La localisation à l'est est également appropriée mais une évaluation de l'obstruction à l'irradiation d'hiver est nécessaire. Les arbres au sud doivent impérativement être caducs, d'une structure suffisamment légère (McPherson *et al* 1994a) avec des couronnes ouvertes pendant la saison d'hiver et qui perdent leurs feuilles relativement tôt. (Cãnton et al 1994) afin de minimiser le blocage de l'irradiation solaire indispensable pour cette orientation.

3- Usage des sols et nature du climat

L'efficacité énergétique de la végétation dépend à la fois de l'usage des sols et du type de climat. Les arbres brise-vent sont plus souhaitables dans les aires suburbaines résidentielles, de faible densité que dans les zones denses dans les centres urbains potentiellement protégés du vent. Egalement, pour maximiser les économies d'énergie dans les climats chauds, la végétation doit être bien répartie pour exploiter l'ombrage, et favoriser la circulation de l'air pour permettre le refroidissement des bâtiments ; par contre en climat froid la protection du vent et l'accès au soleil sont déterminants, ce qui suggère à l'inverse une végétation plus compacte.

7.7.3 Recommandations générales

La figure 7.17 illustre des propositions d'aménagement végétal en milieu urbain (Mc Pherson 1992). Quelques recommandations d'aménagement par type de climat peuvent, également, être données en complément à toutes celles déjà énoncées (Cf. Mc Pherson et al 1994a). Elles concernent les principaux climats : chauds et froids.

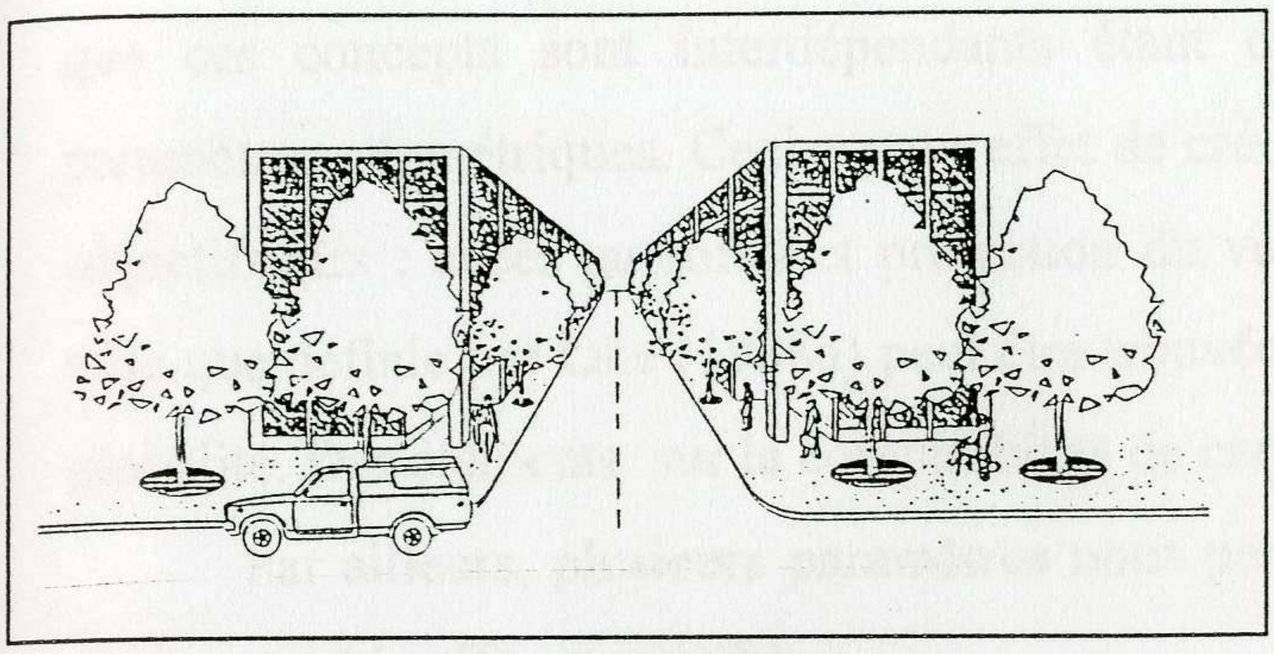
Pour les climats froids

1- Plantations denses et hautes à feuillage persistant et qui constitueraient des zones tampons entre quartiers. L'effet d'agrégation est ainsi favorisé. Les brise-vent sont faits d'arbres et de haies denses et hautes à feuillage persistant surtout dans les zones exposées telles les bordures de villes en périphérie.

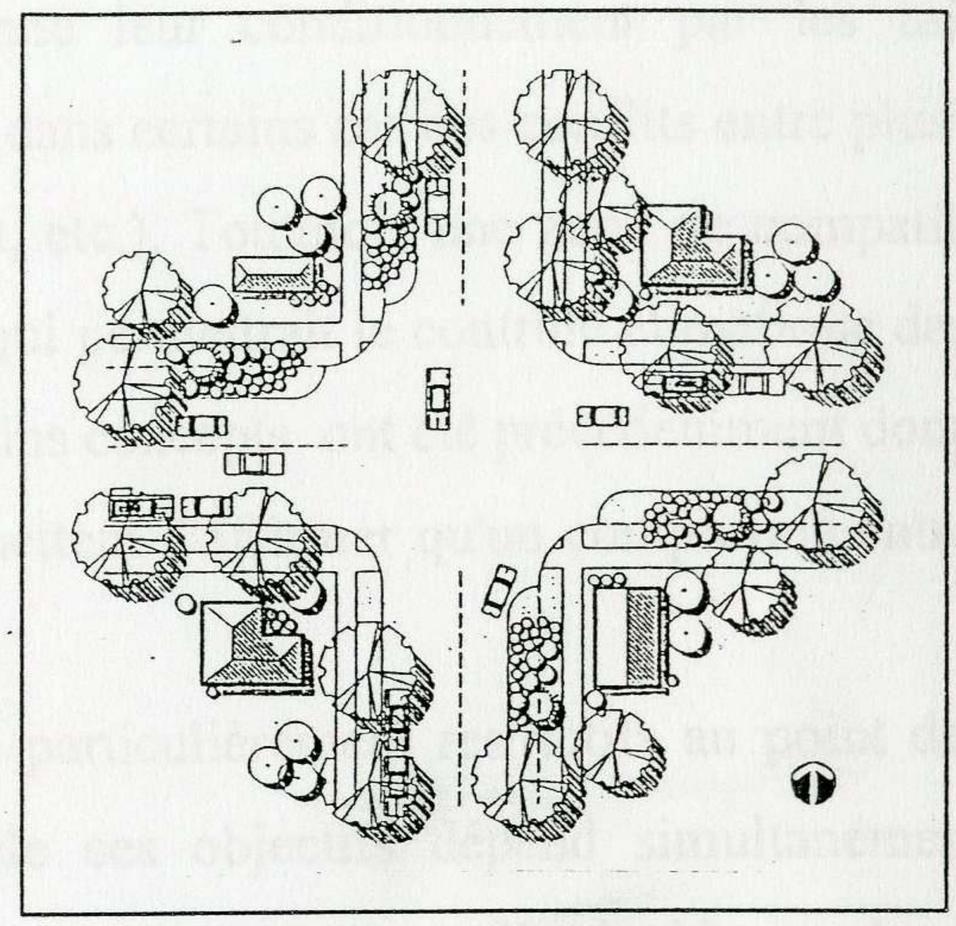
2- Arbres caducs dans la structure bâtie, pour l'ombrage des trottoirs, parkings, et autres surfaces pavées et pour la réduction de la vitesse du vent. Des arbustes et des vignes pour les surfaces orientées à l'ouest. L'orientation sud et est ne doivent pas être obstruées pour préserver l'accès au soleil.

Pour les climats chauds :

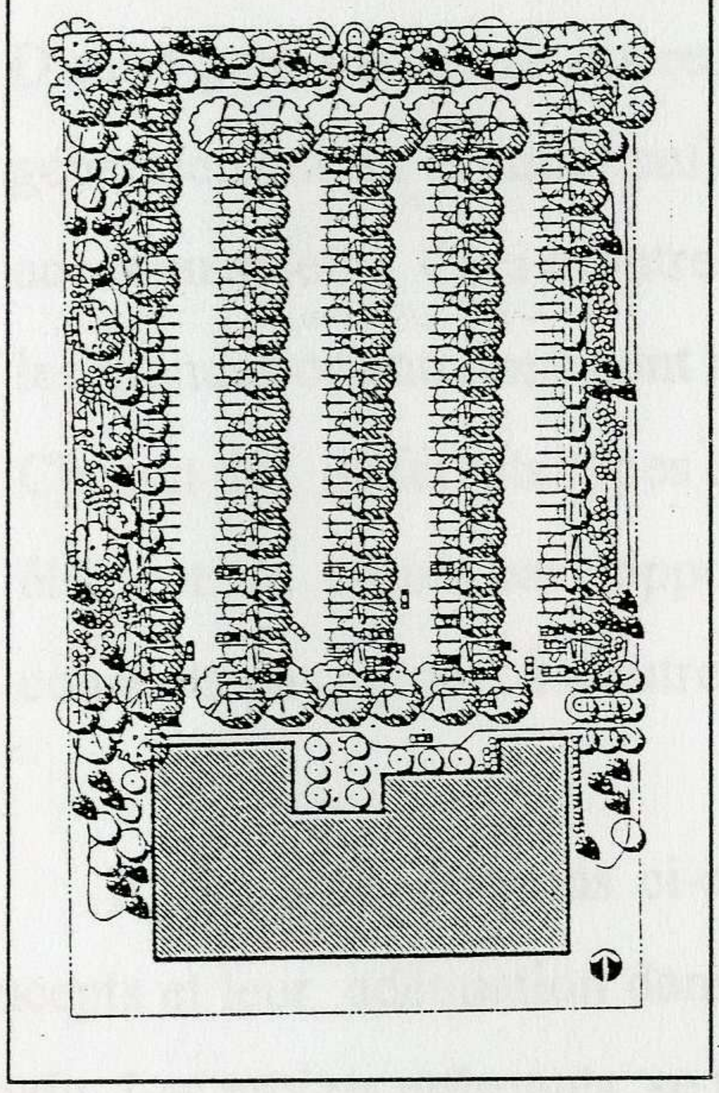
1. Les arbres à feuillage persistant sont à implanter dans les zones où le conflit avec l'accès au soleil ne se pose pas, tels que dans les espaces urbains extérieurs et qui assureraient une protection des vents, dans les aires sujettes à des tempêtes de sables, notamment aux bordures urbaines exposées.
2. L'ombrage maximal est à assurer dans la structure bâtie pour les trottoirs, parkings et toutes les surfaces urbaines pavées et bâties, notamment, les murs et les fenêtres orientés à l'ouest et à l'est. Préférer des arbres aux grandes couronnes qui ombragent largement les murs.
3. Dans les rues, assurer une ventilation naturelle par un aménagement d'arbres qui permet l'ouverture aux niveaux inférieurs des rues.
4. Favoriser une végétation dispersée, en petites oasis avec arbres pour l'ombrage et gazon pour un refroidissement par évapotranspiration.
5. Choisir une végétation peu consommatrice d'eau pour garantir sa rentabilité.



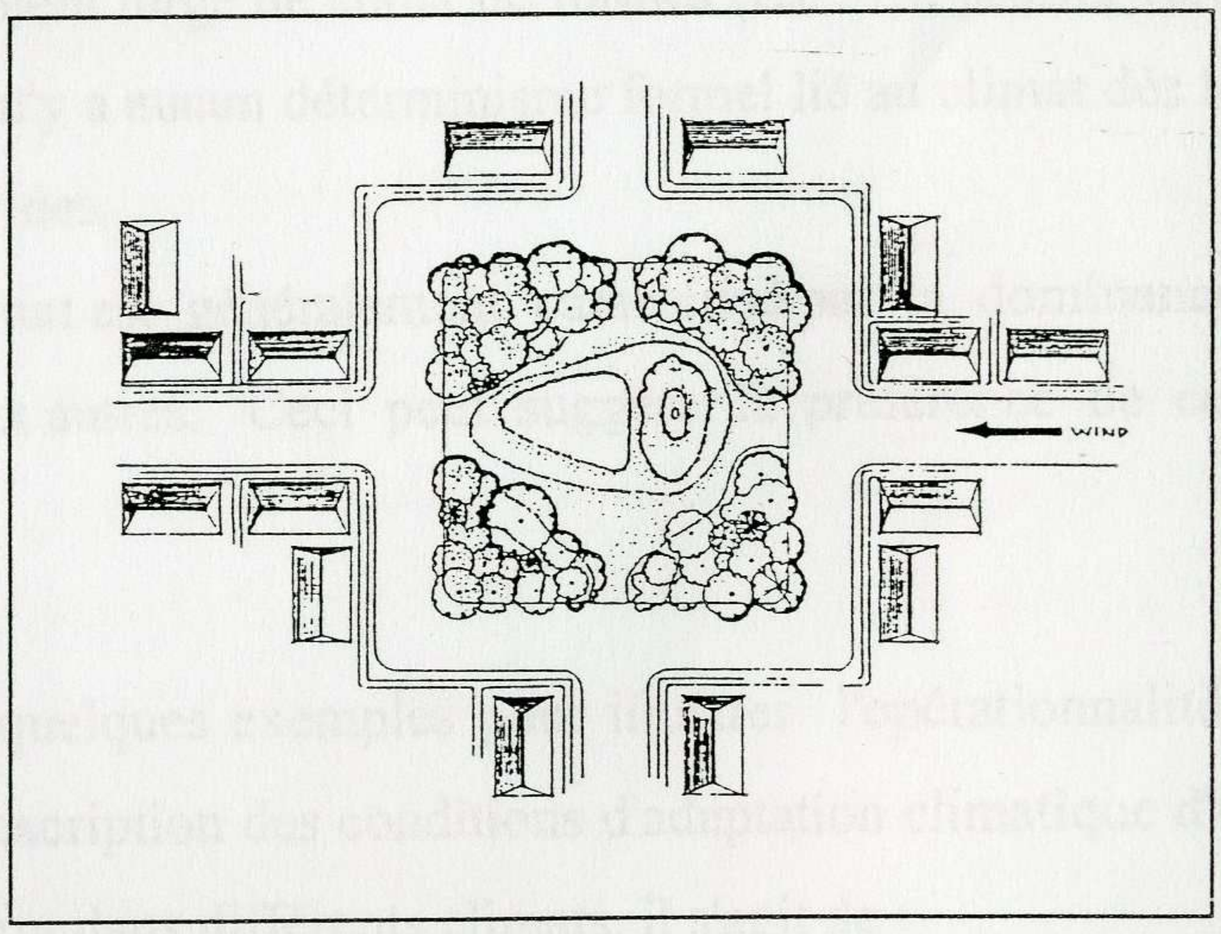
Alignement le long des rues



Dans les zones résidentielles
et le long des rues



Dans les parkings



Dans les places

Figure 7.17 : Exemples d'utilisation de la végétation dans un tissu urbain

7.8 Discussion et conclusion

Le tableau 7.4 résume l'ensemble des concepts exposés dans ce chapitre. Il est apparu que ces concepts sont interdépendants étant donné leur conditionnement par les mêmes paramètres géométriques. Ceci a pour effet de créer dans certains cas des conflits entre plusieurs objectifs (Ex : accès au soleil et protection du vent, etc.). Toutefois une zone de compatibilité telle que définie par Oke (1988a) peut être trouvée qui permettrait le contrôle climatique dans sa globalité. Des éléments sur la compatibilité de certains concepts ont été précédemment donnés.

Par ailleurs, plusieurs paramètres nous permettent d'affirmer qu'un compromis entre ces différents objectifs est possible :

1. Les critères de contrôle climatique ne sont pas particulièrement restrictifs au point de vue géométrique. D'une part, parce que chacun de ces objectifs dépend simultanément de plusieurs paramètres (Ex : la porosité dépend : espacements, profils, incidence du vent). D'autre part, parce que les recommandations liées à l'un ou à l'autre de ces paramètres laisse généralement un éventail suffisamment large de choix de formes (Ex : Cf. profils verticaux / accès au soleil). Ceci montre qu'il n'y a aucun déterminisme formel lié au climat dès lors que les grandes orientations sont respectées.
2. Chacun des différents types de climat est généralement caractérisé par la dominance d'un élément du climat par rapport aux autres. Ceci peut suggérer la préférence de certains concepts par rapport à d'autres.

Enfin, nous donnons ci-après quelques exemples pour illustrer l'opérationnalité de ces concepts et leur adéquation dans la description des conditions d'adaptation climatique d'un tissu urbain. Les projets présentés se trouvent dans différents climats, il s'agit de :

1. Chandigarh, la nouvelle capitale du Penjab, Inde, en climat chaud et humide.
2. La ville nouvelle de la province du Khuzestan, Iran, en climat chaud et sec.
3. Parc Bit à Majorque, Espagne, en climat tempéré (méditerranéen).
4. La ville solaire Linz-Pichling, Autriche, en climat tempéré (continental).

Le choix de ces villes est motivé d'une part, par la possibilité de comparaison entre des villes situées dans des climats divers, et ce par le biais des concepts définis dans cette méthodologie, et d'autre part pour la conception climatique dont a fait l'objet chacun ce ces projets.

1-Exemple de Chandigarh, Inde

Suite aux dispositions prises à l'échelle du plan directeur : Forte perméabilité, paysagisme, usage des sols différencié, etc. expliqués au chapitre 5 (Cf.5.8). Nous illustrons maintenant la prise en charge du climat dans la composition urbaine sur la base des concepts définis s'y rapportant.

Pour décider de la **directionnalité** de la trame urbaine, l'équipe a reporté les orientations préférentielles par rapport aux vents dominants et par rapport aux meilleures conditions d'ensoleillement (Figure 7.18a). Il a été décidé que l'orientation optimale des rues serait beaucoup plus influencée par les vents que par le soleil, vu la forte chaleur et l'humidité de la région (Aronin 1953). En effet, ces conditions requièrent une ventilation continue d'où la nécessité d'une forte porosité urbaine.

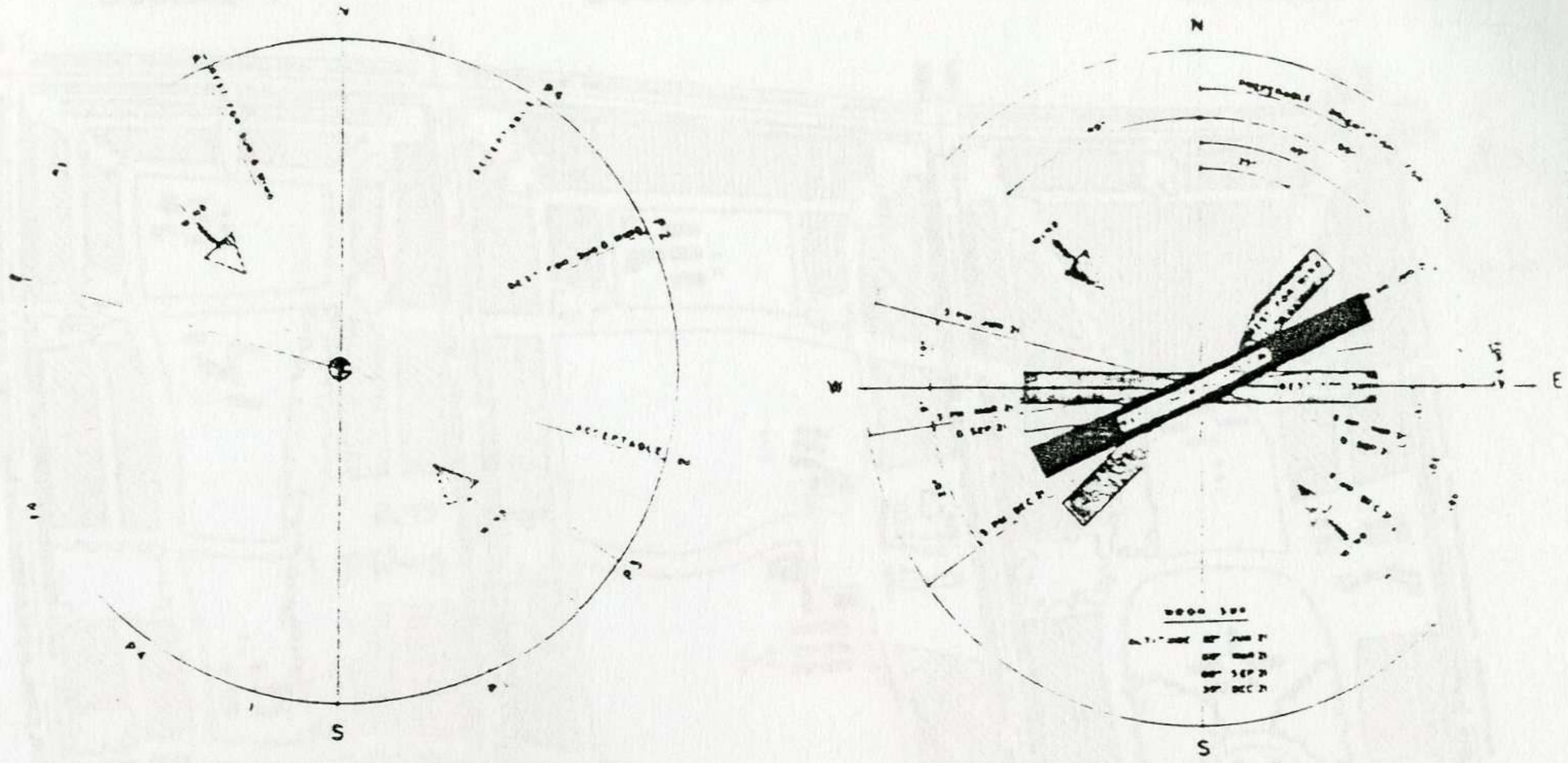
Ainsi, la trame des rues a été décidée parallèle au vent ou légèrement déviée, jusqu'à 20° de part et d'autre de la direction du vent. De cette manière, le vent devient parallèle à oblique, ce qui favorise l'écoulement de l'air (Figure 7.18b).

Dans le bloc urbain, cette disposition visant une forte **porosité urbaine** est appuyée par un élargissement des espacements pour améliorer la ventilation notamment, intérieure. Dans le cas de rues où le vent ne peut être canalisé tel que celles perpendiculaires au vent, l'exploitation des brises de campagne est adoptée pour pallier cette insuffisance. Ce souci de porosité est d'autant plus important que le vent régional est très faible (atteint rarement 10m/s). La figure 7.19 illustre cette forte porosité avec une faible densité de plan et des espaces extérieurs importants au centre des secteurs d'habitat.

A l'échelle du bâtiment, **l'enveloppe bâtie** est dictée principalement par la nécessité de garantir une ventilation transversale. La recommandation est faite de privilégier des bâtiments de faible largeur, avec des ouvertures directement opposées et des cloisons intérieures à mi-hauteur pour ne pas gêner la ventilation. Egalement, la ventilation par la toiture a été recommandée et l'association des bâtiments respecte le principe d'un plan ouvert (Aronin 1953).

Concernant, **l'ouverture au ciel,** l'élargissement des espacements pour garantir une forte porosité a garantit, par voie de conséquence, un bon potentiel d'ensoleillement et de refroidissement, puisque les obstructions sont évitées.

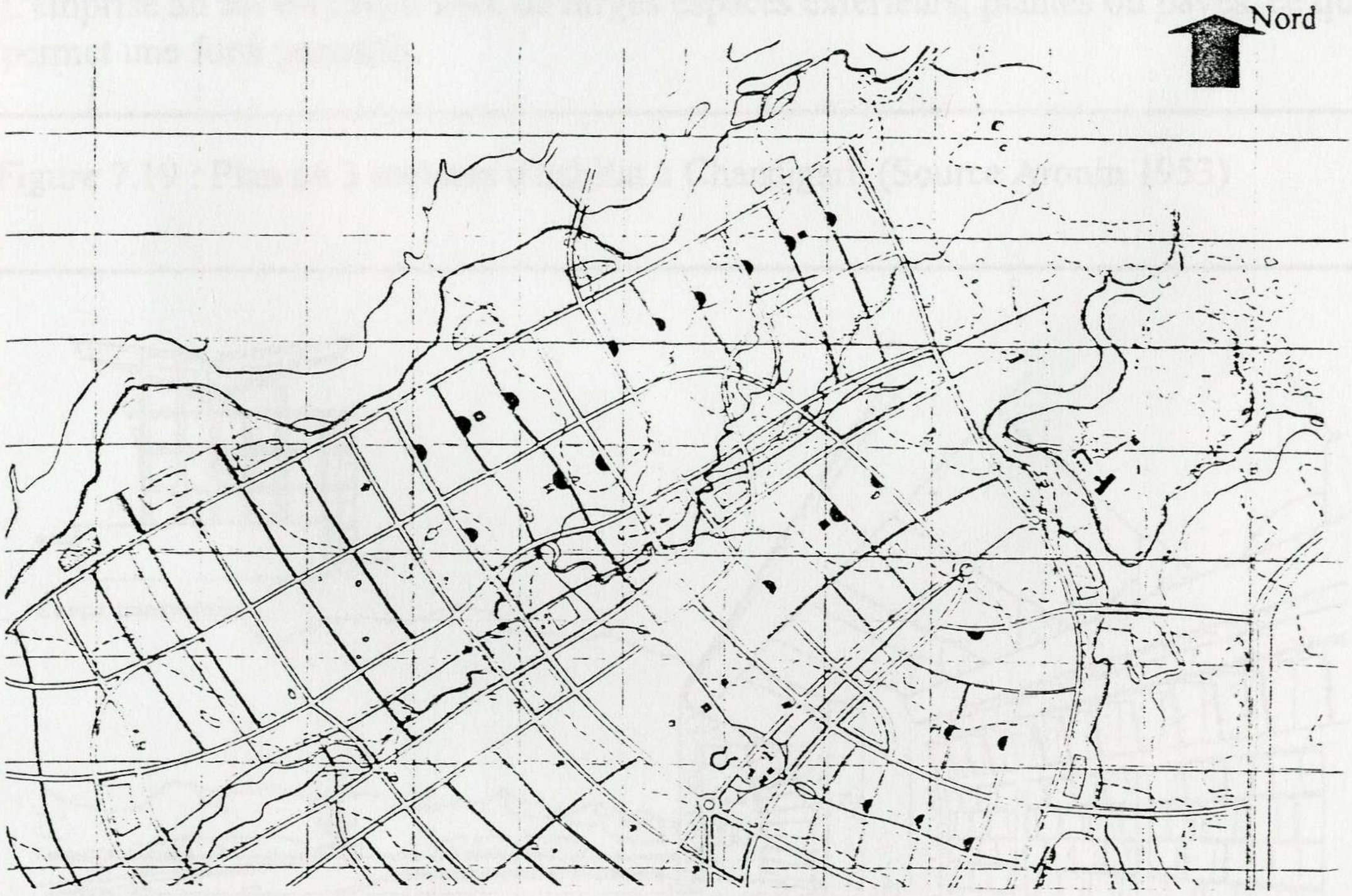
a)



Orientation du bloc (secteur) orientation de la maison

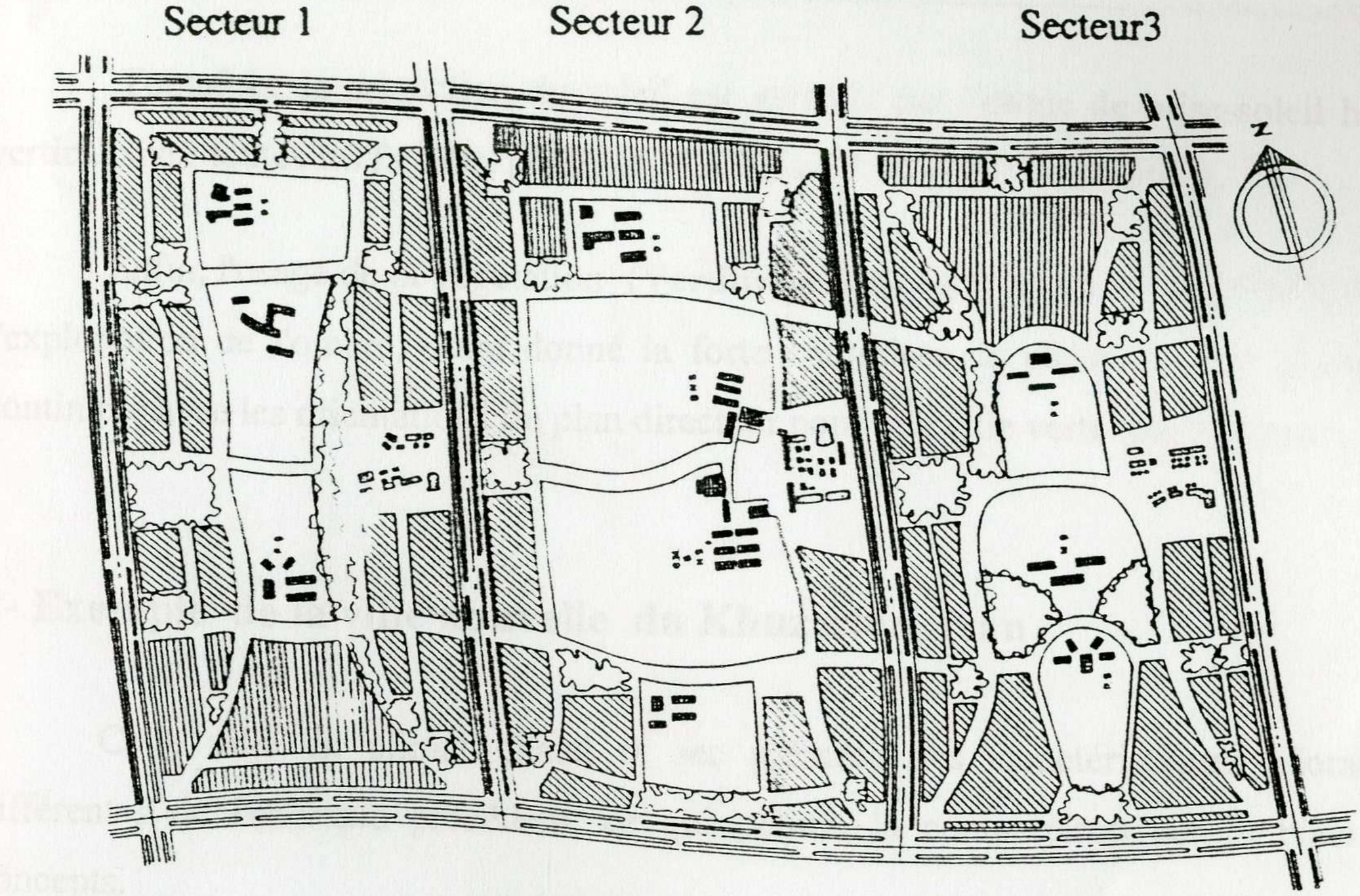
L'orientation du secteur a été recommandée dans le sens du vent ou légèrement déviée (jusqu'20°). L'orientation de la maison est optimale plein sud par rapport au soleil et perpendiculaire au vent pour la ventilation. La direction NE-E permet de réaliser le compromis.

b)



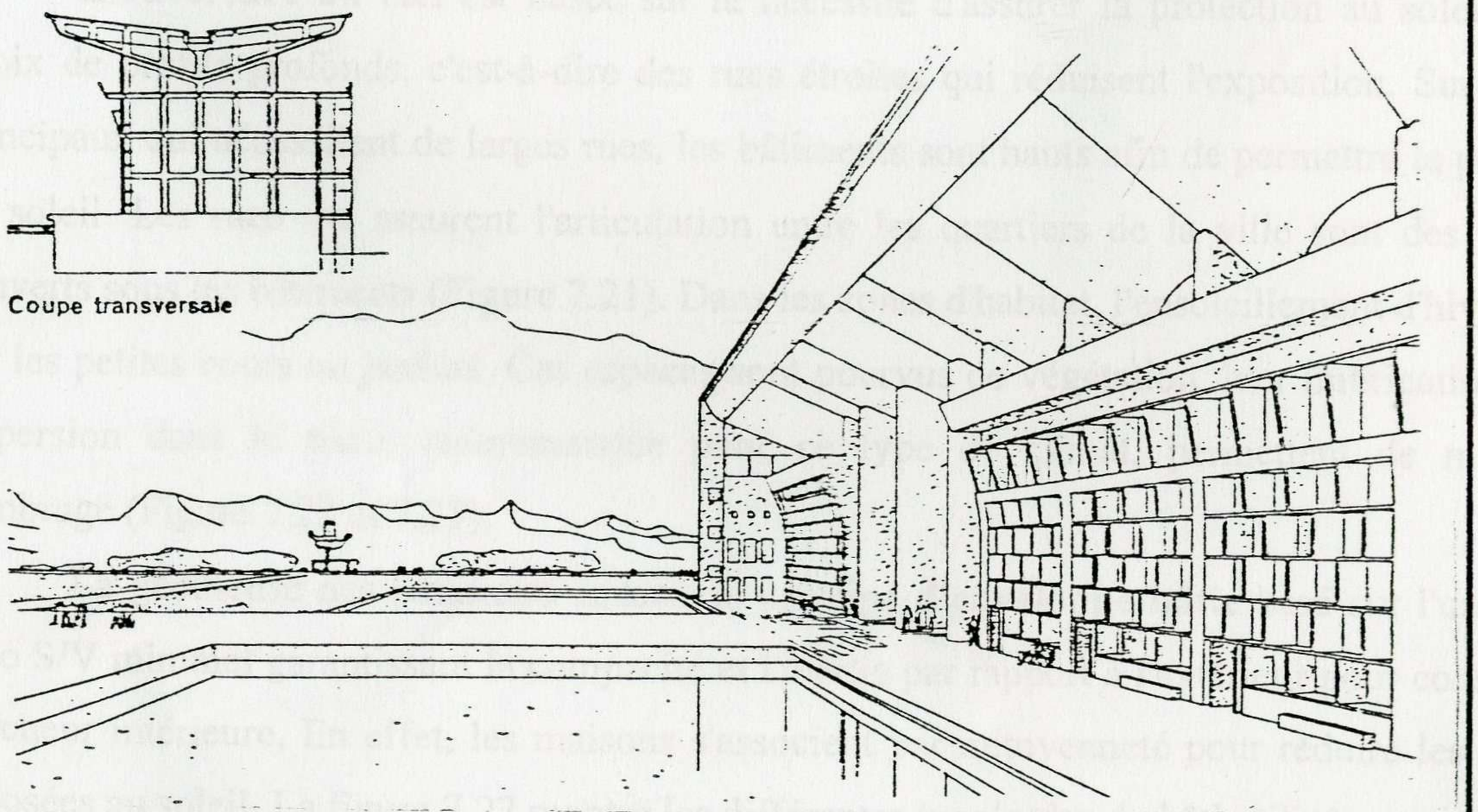
La directionnalité de la trame urbaine a été detérminée par rapport à la direction des vents dominants afin de permettre une forte porosité, vu l'importance de la ventilation pour ce type de climat.

gure 7.18: a) Analyse climatique pour le choix de l'orientation préférentielle des blocs urbains et de la maison (Source Aronin 1953).
b) Plan de la ville de Chandigarh montrant la directionnalité choisie par rapport au vent (Source : Aronin 1953).



L'emprise au sol est faible avec de larges espaces extérieurs, plantés ou pavés, ce qui permet une forte porosité.

Figure 7.19 : Plan de 3 secteurs d'habitat à Chandigarh (Source Aronin 1953)



Parmi les principes de l'enveloppe bâtie : La faible largeur pour favoriser la ventilation continue et des façades avec brise-soleil horizontaux et verticaux .

Figure 7.20 : La cour de justice par Le corbusier illustrant quelques-uns des principes d'enveloppe bâtie à adopter, notamment dans l'habitat (Source Boesiger 1956).

Toutefois, la protection du soleil est garantie par l'usage de brise-soleil horizontaux et verticaux sur toutes les façades poreuses. La figure 7.20 en est un exemple.

Enfin, l'usage de la végétation **(Verdurisation)** est extensif. Il concerne, principalement, l'exploitation de l'ombre, étant donné la forte contrainte de chaleur. Cette disposition est en continuité avec les orientations du plan directeur pour une ville verte (paysagisme).

2- Exemple de la ville nouvelle du Khuzestan, Iran

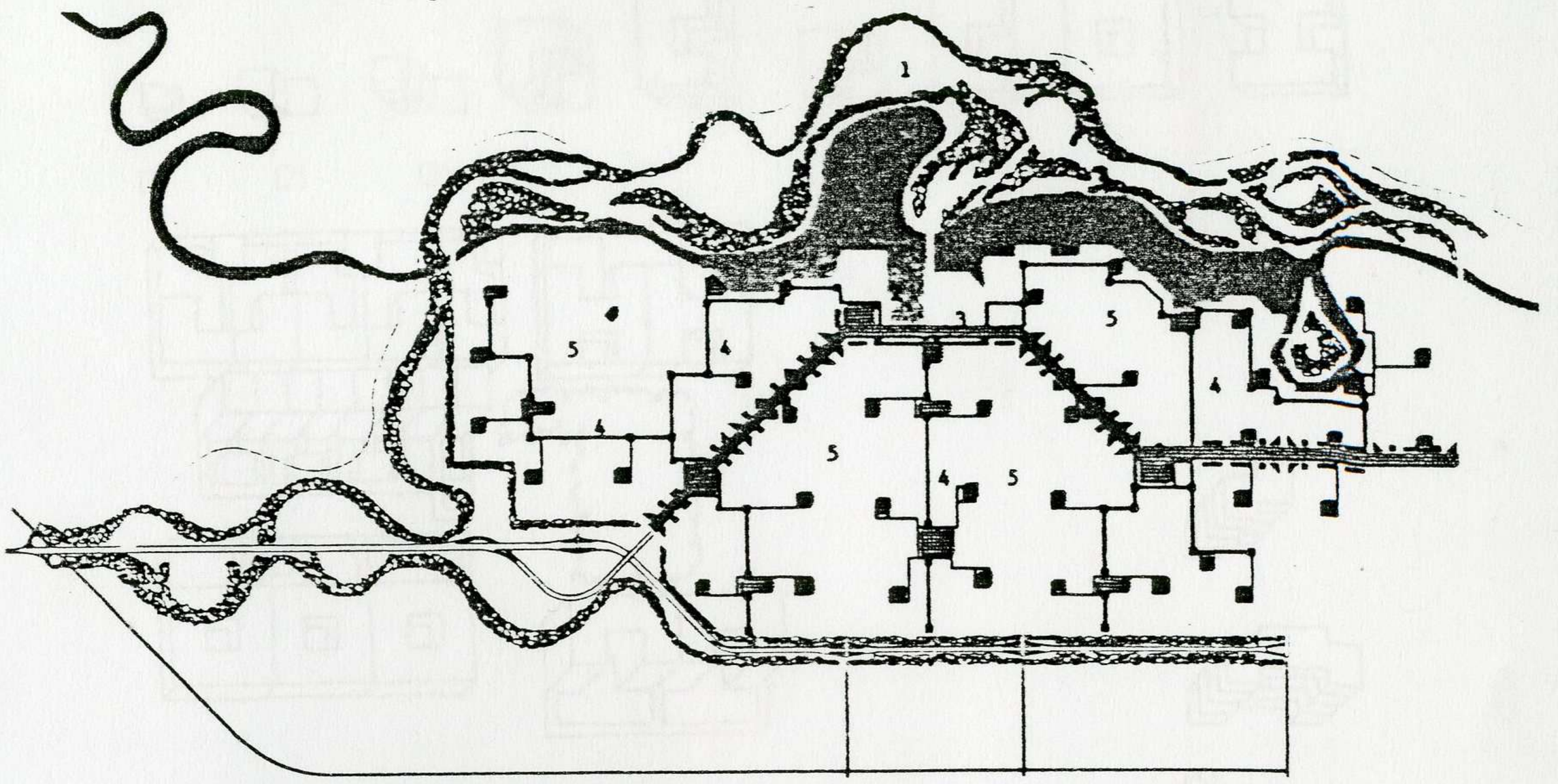
Cette ville en climat chaud et sec présente des caractéristiques géométriques très différentes de l'exemple précédent, ce qui permet la comparaison par le biais des mêmes concepts.

Le climat est caractérisé par une radiation solaire intense, des amplitudes de températures journalières et saisonnières importantes et un vent faible. L'exigence climatique fondamentale, pour ce type de climat, est la protection du soleil dans les espaces intérieurs et extérieurs.

Une forte compacité caractérise ce tissu urbain ; la densité du plan est très élevée pour permettre la réflexion d'une partie de la radiation solaire car satisfaisant une forte **réflectance urbaine** tel que recommandée pour ce type de climat (Figure 7.21).

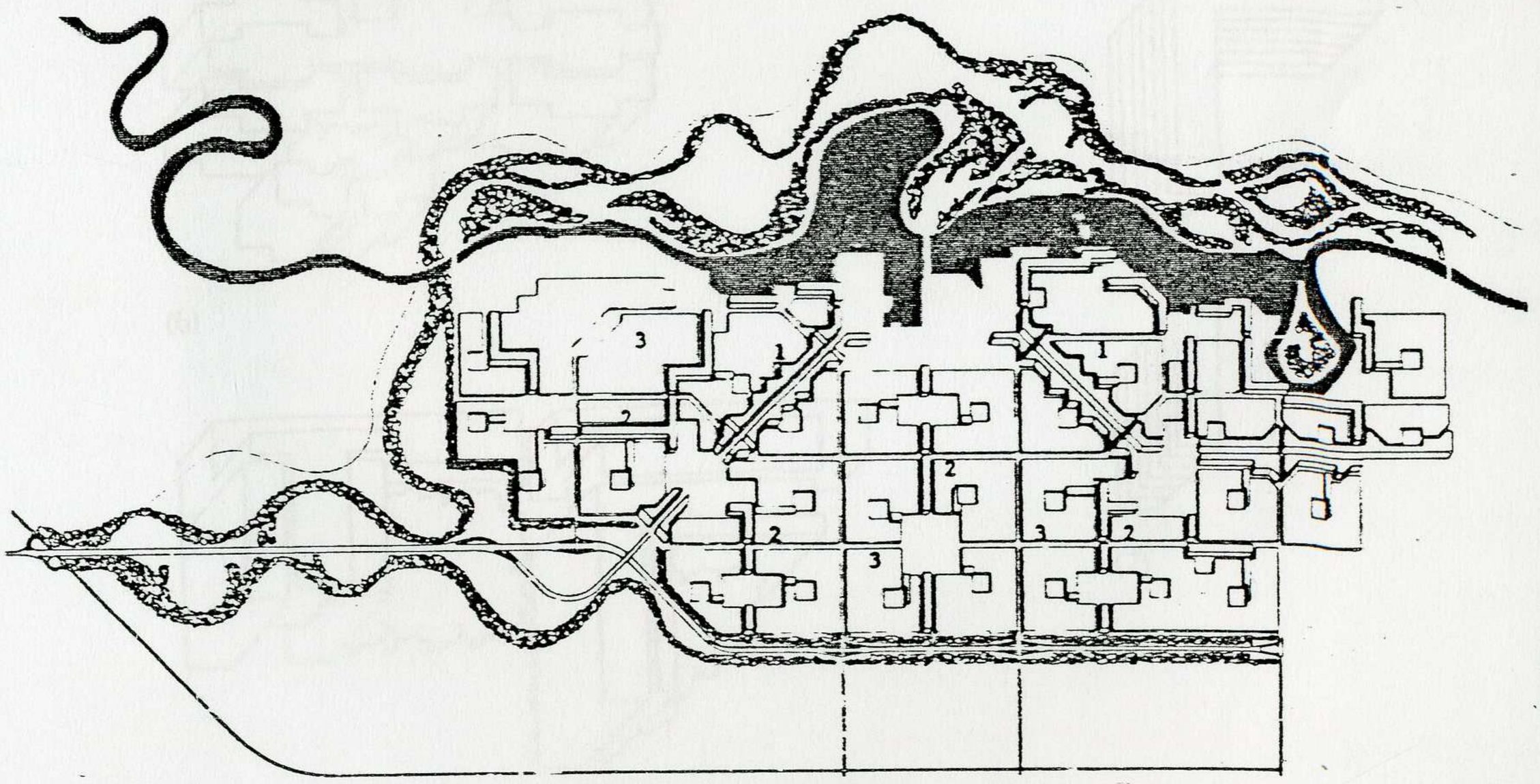
L'ouverture au ciel est basée sur la nécessité d'assurer la protection au soleil d'où le choix de profils profonds, c'est-à-dire des rues étroites qui réduisent l'exposition. Sur les axes principaux qui nécessitent de larges rues, les bâtiments sont hauts afin de permettre la protection du soleil. Les rues qui assurent l'articulation entre les quartiers de la ville sont des passages couverts sous les bâtiments (Figure 7.21). Dans les zones d'habitat, l'ensoleillement d'hiver se fait par les petites cours ou jardins. Ces espaces sont pourvus de végétation, leur imbrication et leur dispersion dans le tissu, recommandée pour ce type de climat, permettent de maximiser l'ombrage (Figure 7.22 et 7.23).

La géométrie des bâtiments illustre le principe **d'enveloppe bâtie** basé sur l'usage d'un ratio S/V minimal garantissant la compacité et l'inertie par rapport à l'extérieur pour conserver la fraîcheur intérieure. En effet, les maisons s'associent par mitoyenneté pour réduire les surfaces exposées au soleil. La figure 7.22 montre les différentes typologies du bâti utilisées.



Ce plan montre la hiérarchie des voies qui correspond également des principes d'ombrage (ouverture au ciel)

1) Parc régional garantissant l'ombre par la végétation
2) Places publiques ombrées par le bâti (places couvertes).
3) Bazar: marché couvert.
4) Passage urbain articulant les différents quartiers ombré (passage couvert)

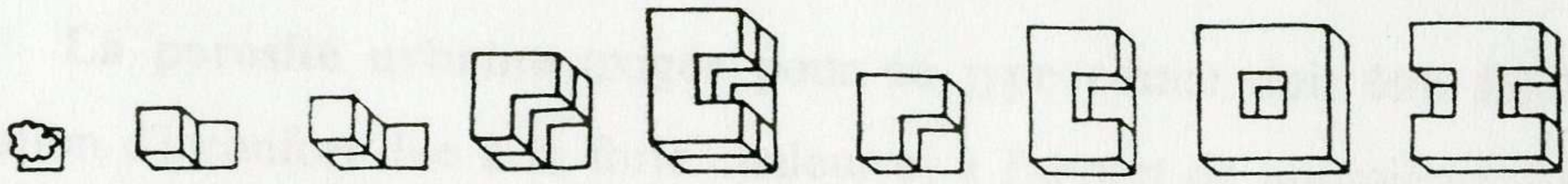


1 Logements hauts le long de l'artère principale, garantissant la protection du soleil.
2 Logements en bande.
3 Habitat individuel.

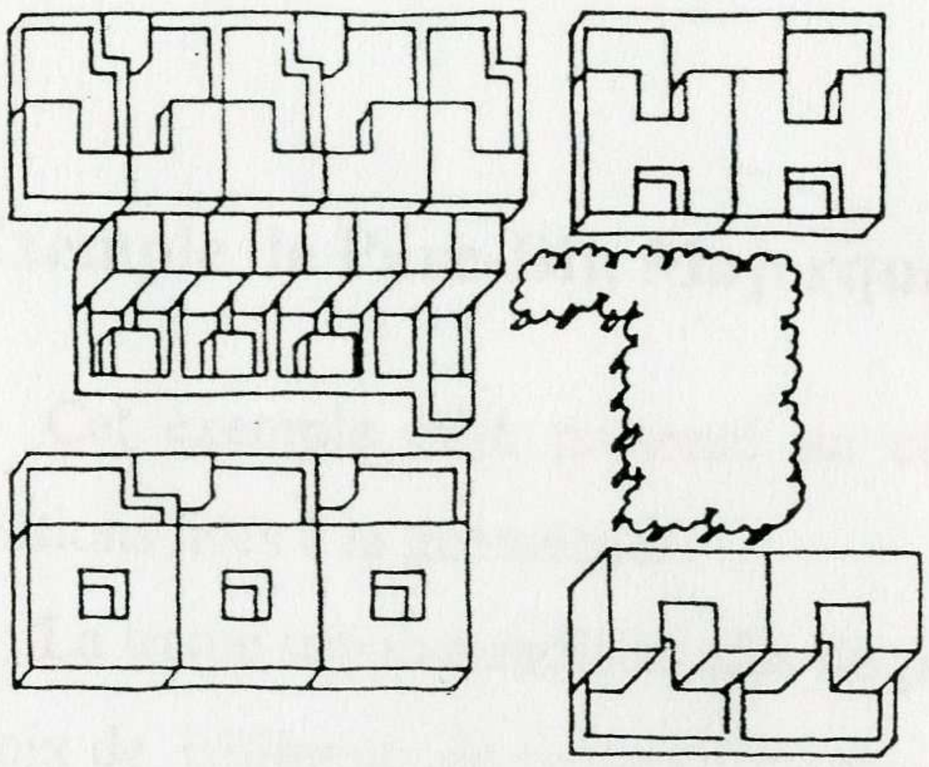
Ce plan compact montre :

- Une ouverture au ciel basée sur la protection du soleil par le biais de profils étroits et de rues couvertes.
- La forte réflectance urbaine pour réfléchir une partie de l'intense radiation par le biais d'une forte densité de plan.
- Une faible porosité pour se protéger des vents chauds et chargés de poussière.

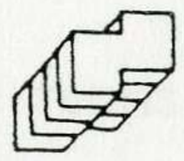
Figure 7.21 : Plan de masse de la ville du Khuzestan (Source : Lind Kriken 1982).

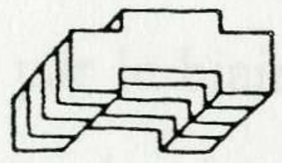


(1) (2) (3)

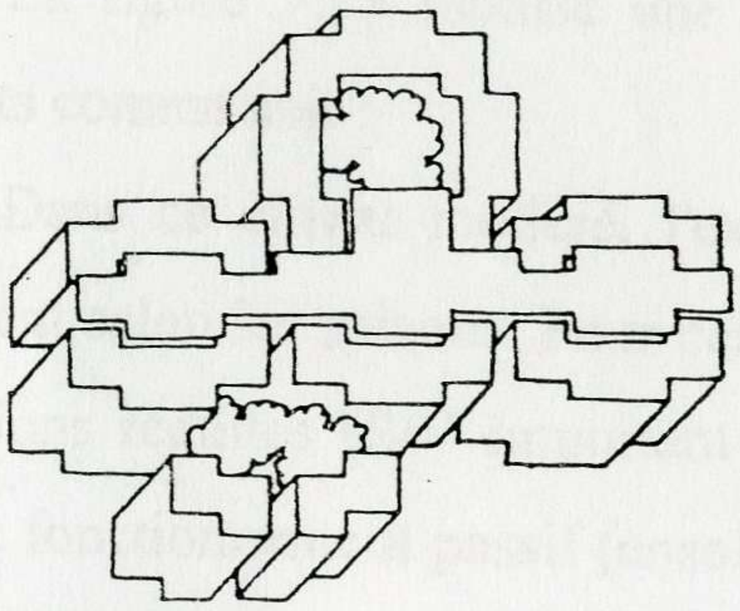


(4)

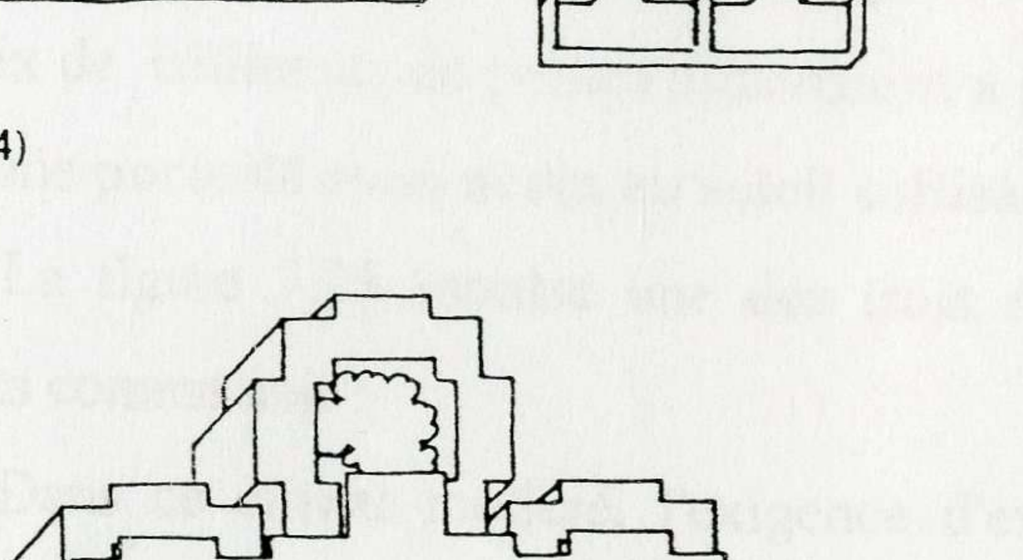


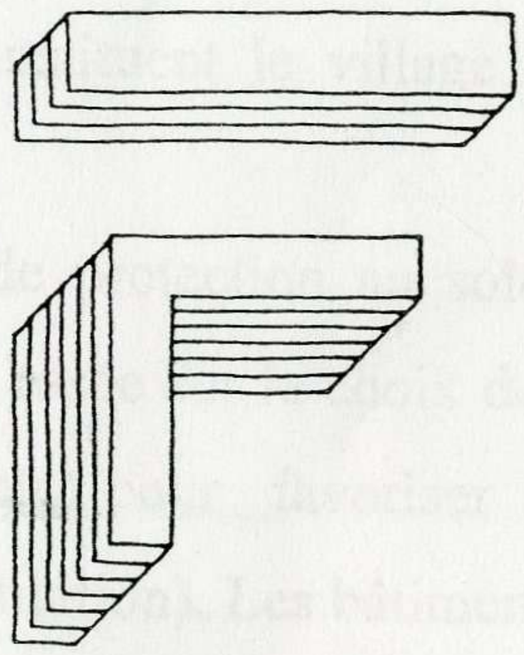


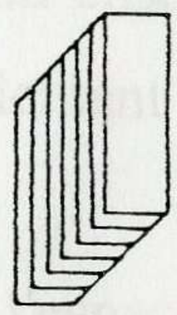
(5)



(6)







(7)

1) à 4) Groupement de maisons individuelles associées par mitoyenneté pour réduire l'exposition au soleil (S/V diminue avec l'association des maisons). L'usage de végétation imbriquée au bâti (verdurisation) est important dans ces cas. De même que les cours permettent l'accès au soleil d'hiver

5) et 7) Habitat collectif . Cette typologie est utilisée dans les artères reliant les quartiers ; elle constituent les parois de profils étroits, ce qui permet la réduction de l'absorption de chaleur, due à sa forme allongée. Le niveau urbain représente des passages piétons couverts (voir 1 fig 7.21).

6) et 8) Groupement d'habitat collectif avec des passages piétons et végétation intégrée , permettant à la fois une enveloppe bâtie compacte pour minimiser l'exposition au soleil et des circulations ombragées (S/V faible).

Figure 7.22 : Typologies d'habitat illustrant le concept d'enveloppe bâtie (Source : Lund Kriken 1982).

La porosité urbaine exigée pour ce type climat doit être faible car augmentant la sensation d'inconfort due à la forte chaleur et à l'apport de poussières. Elle est, effectivement, réduite en raison de la forte compacité du tissu.

3- Exemple de Parc-Bit, Majorque, Espagne

Cet exemple déjà présenté au chapitre 5 (Cf.5.8) est repris ici pour expliquer les dispositions liées à la géométrie.

La trame urbaine radiale, afin de permettre la ventilation par le biais des brises marines. Le choix de bâtiments de petites dimensions a permis de créer une densité de plan qui permet à la fois une **porosité** et un **accès au soleil** suffisants (Figure 7.24).

La figure 7.25 montre une des trois entités qui constituent le village et illustre ces concepts comme suit :

Dans ce climat modéré, l'exigence d'exposition et de protection au soleil et au vent s'alternent selon les saisons. Pour cela, **l'enveloppe bâtie** est basée sur le choix de bâtiments de dimensions réduites (S/V important et aire passive importante) pour favoriser l'exposition et donc, le fonctionnement passif (ensoleillement, éclairage, ventilation). Les bâtiments résidentiels sont de forme allongée orientée S-E afin de permettre un bon ensoleillement. La typologie de l'îlot est adoptée principalement pour les activités, potentiellement plus exigeantes en matière d'éclairage que d'ensoleillement.

Une **ouverture au ciel** importante est assurée par l'espacement des bâtiments et la diminution de la densité dans les zones résidentielles grâce à la présence de végétation dans ces espaces extérieurs notamment dans l'axe orienté S-E.

Cependant, les espaces extérieurs relativement larges sont protégés du vent par la végétation, à la fois le long des rues et dans les places et espaces publics afin de garantir l'ombrage (**verdurisation**). L'usage de l'eau permet de renforcer le rôle de la végétation à modérer les microclimats.

Des solutions bioclimatiques à l'échelle de l'architecture sont adoptées (brise-soleil, ventilation transversale, etc.) pour contrôler les besoins de protection et d'exposition au vent l'été.

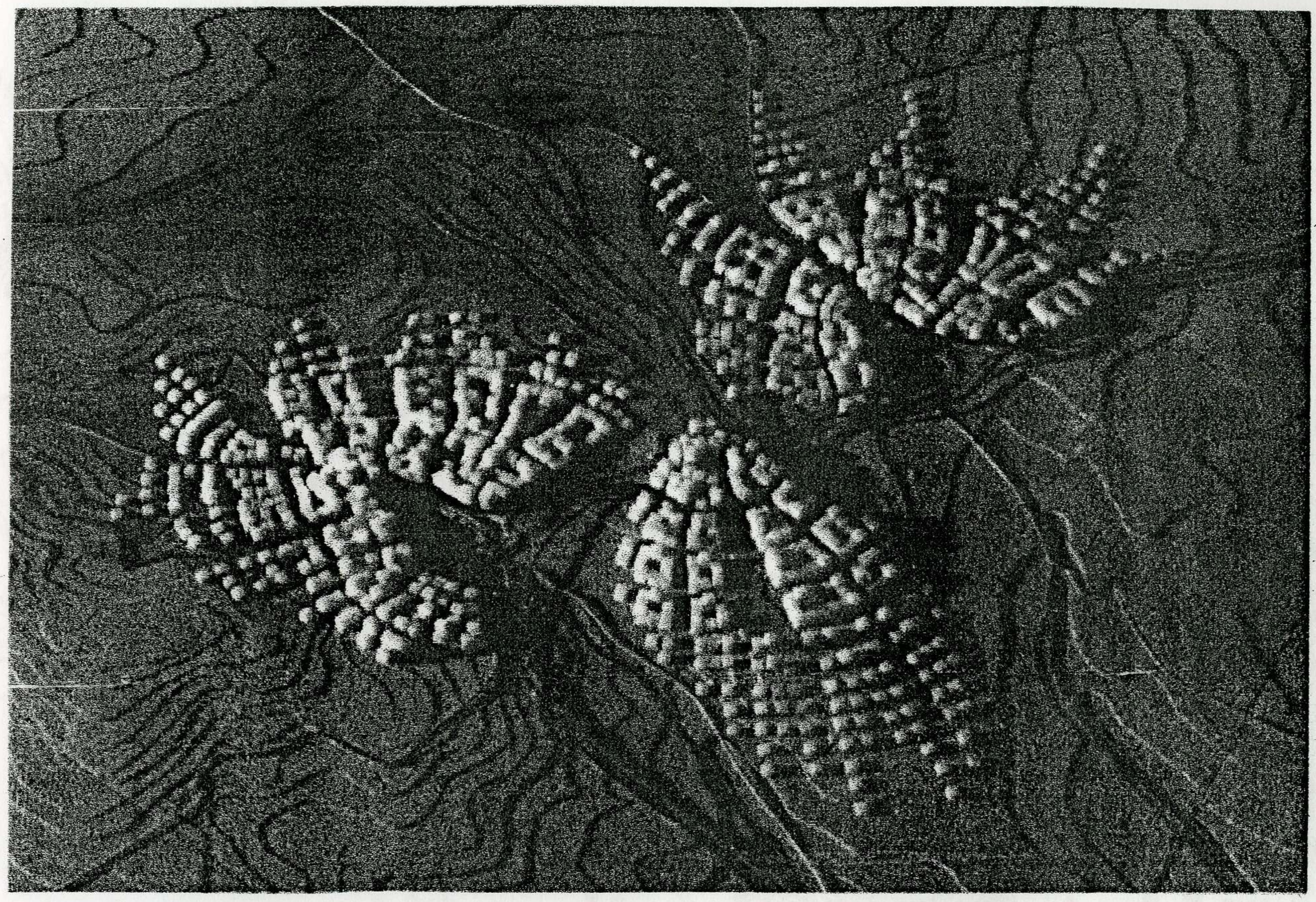


Figure 7.24 : Vue d'ensemble des entités bâties constituant le village solaire de Parc- Bit, Majorque, Espagne. (Source Herzog, T. ed.).

Ce plan montre notamment :

- Une forte porosité et une directionnalité basée sur l'exploitation des brises marines grâce à la structure radiale des rues.

- L'ouverture au ciel est favorisée par des espacements importants et une orientation face au soleil, en particulier, dans les zones résidentielles. Les bâtiments en îlots, plus compacts, près du centre, affectés aux services, sont exigeants par rapport à l'éclairage, bien plus que par l'ensoleillement.

- Pour l'enveloppe bâtie, les bâtiments résidentiels sont de taille réduite afin de maximiser l'exposition à l'environnement (fonctionnement passif pour l'ensoleillement, l'éclairage et la ventilation, S/V élevé, P (%) élevé).

- Le concept de verdurisation se traduit par la présence de végétation le long des rues, dans les places et près de l'habitat pour permettre l'ombrage et la protection des vents.

0 100 m 200 m 300 m 400 m 500 m

Agricultural terraces

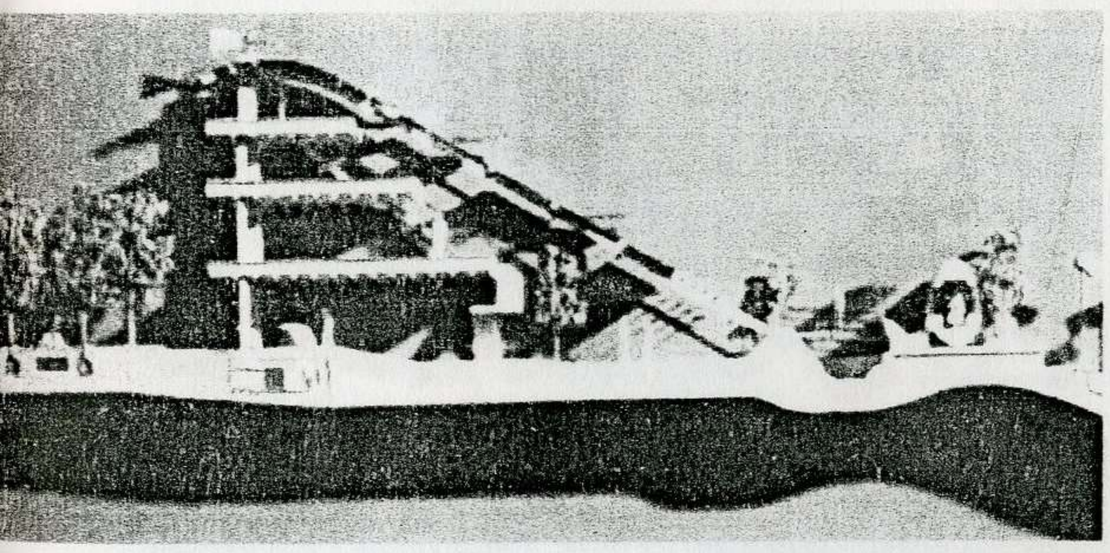
Quieter residential areas

Integrated working zone with narrow pedestrian streets

Mixed public areas with compact urban squares

Main vehicular boulevard avoids the urban squares and does not cut off the lake

Torrent diversion



Locally based activities in contained urban pockets

Facades can be opened and varied to provide shade and encourage ventilation

Heavy structure provides coolth

Overflow system copes with seasonal tourism

Trees for shade

Tram

Torrent diversion

Public Square

Infrastructure

0 100 m 200 m 300 m 400 m 500 m

Agricultural terraces

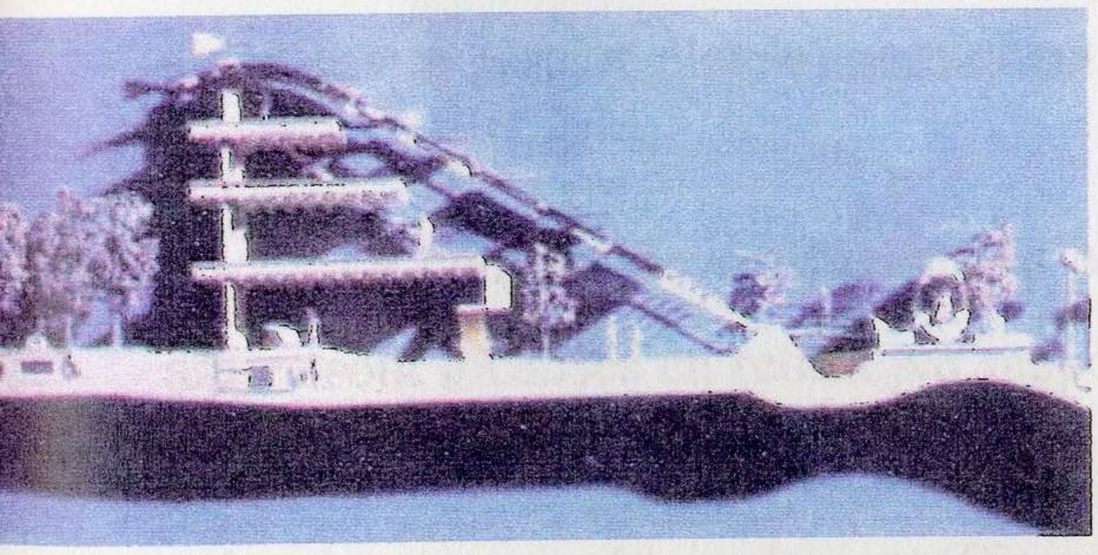
Quieter residential areas

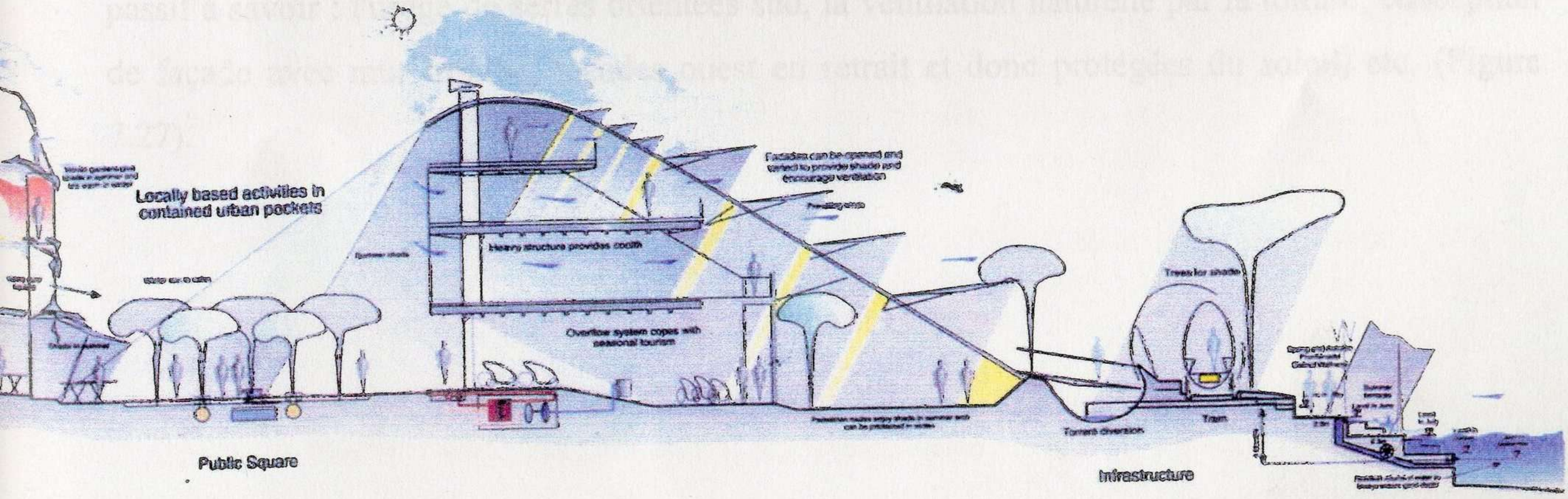
Integrated working zone with narrow pedestrian streets

Mixed public areas with compact urban squares

Main vehicular boulevard avoids the urban squares and does not cut off the lake

Torrent diversion





4- Exemple de Linz Pichling, Autriche

Cette ville nouvelle est destinée à 25000 habitants. Elle se situe dans un climat tempéré (continental) à une latitude de 48°N. L'objectif principal pour ce type de climat est de maximiser le captage de la radiation solaire pour l'ensoleillement et le gain de chaleur, et la protection des vents froids (venant de l'ouest).

L'importante **ouverture au ciel**, recommandée dans ce cas, se matérialise par des profils urbains faibles qui privilégient le captage solaire d'hiver en tenant compte de la faible hauteur du soleil due à la latitude. Le plan global de la ville montre une organisation linéaire favorisant l'exposition Sud pour optimiser l'ensoleillement, aussi bien dans les bâtiments que dans les espaces extérieurs (figure 7.26).

La **porosité urbaine** est, de ce fait, relativement importante, permettant la ventilation intérieure, cependant, la protection des vents froids est garantie par la disposition perpendiculaire au vent des bâtiments de la partie ouest et par la présence de végétation dans les espaces extérieurs.

La **directionnalité** est principalement dictée par rapport au soleil en raison de l'importance de l'accès au soleil déjà mentionné.

Pour **l'enveloppe bâtie**, les bâtiments sont de faible largeur, orientés face au sud (S/V élevé et aire passive élevée) permettant, ainsi, des gains de chaleur importants et une ventilation transversale.

Le concept de **verdurisation** est matérialisé par l'usage extensif de la végétation. Ces arbres sont localisés en retrait par rapport aux façades sud pour ne pas gêner l'accès au soleil, de même qu'ils sont disposés dans les espaces urbains extérieurs et le long des larges rues mécaniques pour réduire le vent (Figure 7.27).

Plusieurs dispositions architecturales sont adoptées pour optimiser le fonctionnement passif à savoir : l'usage de serres orientées sud, la ventilation naturelle par la toiture, conception de façade avec mur trombe, façades ouest en retrait et donc protégées du soleil, etc. (Figure 7.27).

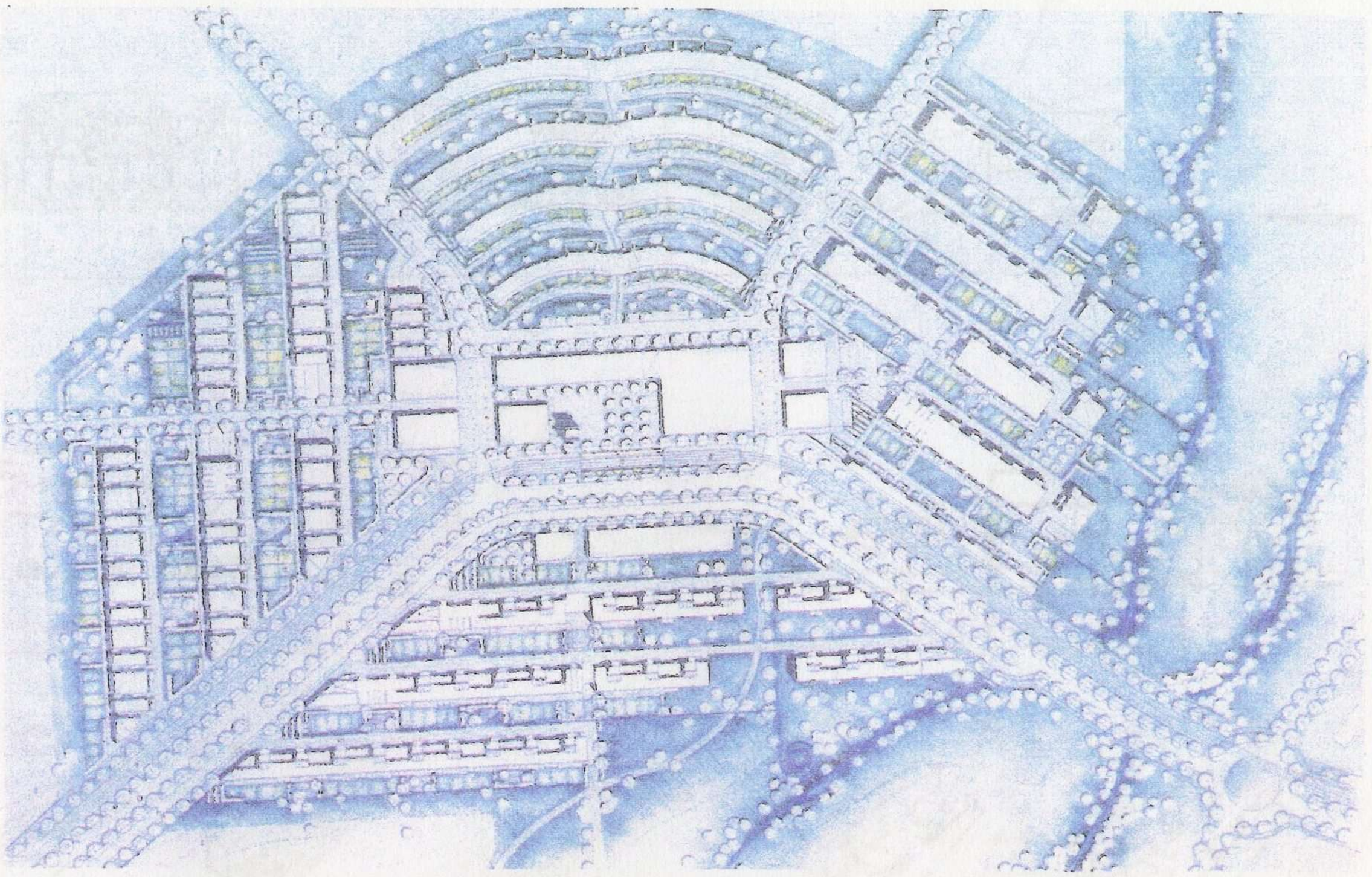


Figure 7.26 : Plan d'aménagement urbain de Linz - Pichling, Autriche, illustrant certains concepts définis pour l'adaptation au climat dans la composition urbaine (Source : Herzog, T. ed. 1996).

Ce plan montre notamment :

- Une ouverture au ciel importante pour favoriser l'ensoleillement intérieur et extérieur par le biais de bâtiments allongés, orientés Sud et des espacements importants entre les bâtiments.

- La directionnalité de la trame urbaine a été dictée par rapport au soleil en raison de l'importance de l'ensoleillement.

- La porosité relativement importante, induite par la recherche de l'ensoleillement est réduite par la disposition perpendiculaire des bâtiments situés à l'ouest et par l'usage de la végétation, pour permettre la réduction de la vitesse des vents ouest.

- Le concept de verdurisation se traduit par l'usage extensif de végétation pour assurer la protection des vents d'ouest dans les espaces extérieurs, tout en garantissant l'accès au soleil grâce à leur position en retrait par rapport aux façades sud.

- Le concept d'enveloppe bâtie apparaît ici par la préférence pour des géométries oblongues pour maximiser l'exposition au soleil (S/V élevé, P(%) élevé).

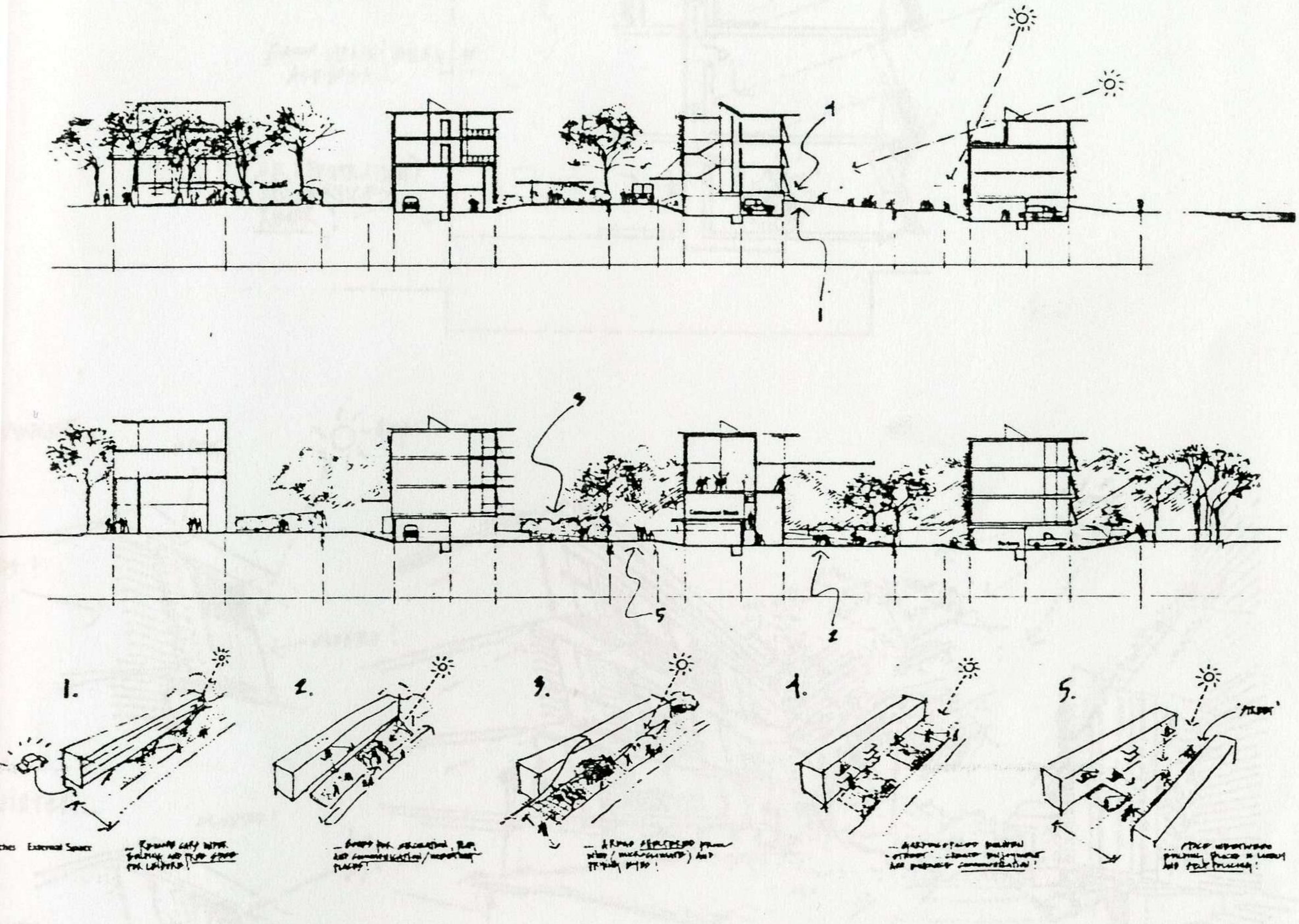
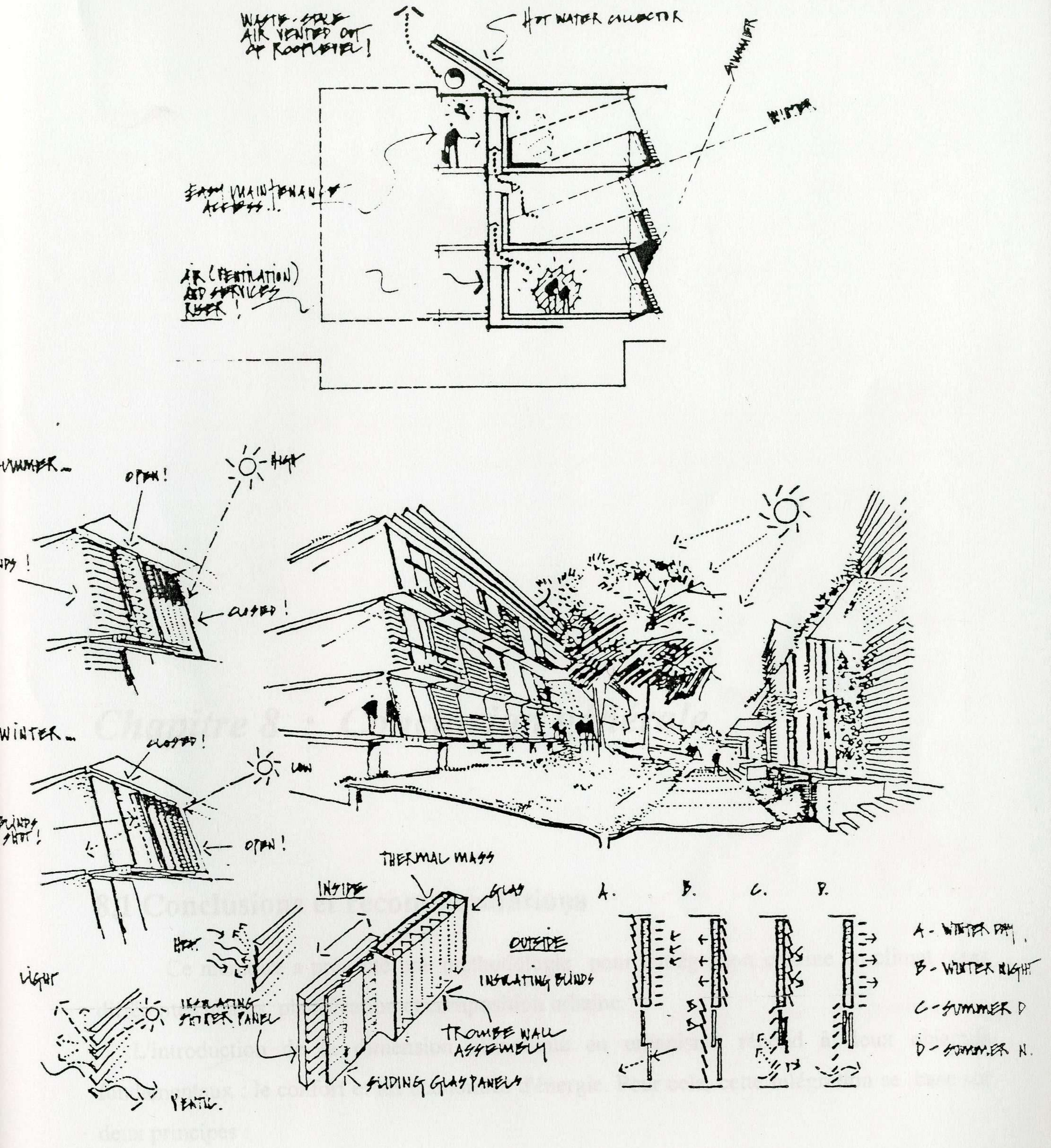


Figure 7.27 : Dispositions d'intégration climatique dans le quartier Sud de la ville Linz Pichling, Autriche. (Herzog, T, ed. 1996). Suite à la page suivante



Suite

Figure 7.27 : Dispositions d'intégration climatique dans le quartier Sud de la ville de Linz Pichling, Autriche (Herzog, T. ed. 1996).

Chapitre 8 : Conclusion générale

8.1 Conclusions et recommandations

Ce mémoire a présenté une méthodologie pour l'intégration urbaine au climat à ses différentes phases, planification et composition urbaine.

L'introduction de la dimension climatique en urbanisme répond à deux objectifs fondamentaux : le confort et les économies d'énergie. Pour cela, cette intégration se base sur deux principes :

1- La nécessité de s'adapter à une situation climatique donnée par le lieu.

2- L'exploitation du potentiel énergétique que constituent les différents éléments du climat, en particulier la radiation solaire et le vent.

De cette manière le climat se présente alternativement et/ou simultanément comme ressource énergétique ou comme contrainte.

A cette fin, plusieurs choix ont été faits quant à la documentation traitée et l'orientation donnée à cette méthodologie. La démarche développée a été conçue pour être exploitée directement par l'urbaniste, et par conséquent adoptant ces outils de travail principaux, en particulier géométriques. Par ailleurs, cette démarche a été voulue généralisable, sans référence à un climat unique ; ce qui a motivé notre choix pour une forme conceptualisée de cette méthodologie. Ces aspects sont importants à rappeler pour comprendre la structure de ce travail à ces différentes étapes.

Parmi les résultats de cette recherche bibliographique :

1. Cette lecture a permis de montrer qu'une méthodologie d'intégration du climat en urbanisme est possible. Bien plus, il est apparu que ce souci d'intégration climatique existe depuis les premiers établissements humains, et qu'une amorce de méthodologie remonte aux civilisations antiques où plusieurs aspects décisifs étaient déjà identifiés, notamment : le choix du site, choix de la directionnalité de la trame urbaine, contrôle des gabarits et des prospects pour l'accès au soleil, et la volonté de développer des outils rationnels d'évaluation, et l'établissement d'une réglementation de cette dimension. Plus récemment, quelques actions d'urbanisme très intéressantes, par rapport aux données nouvelles de développement durable à établir, ont permis de relever la faisabilité d'une telle démarche.

2. Un travail interdisciplinaire est rapidement apparu comme indispensable aussi bien pour l'élaboration de cette méthodologie que pour sa mise en œuvre, compte tenu de la complexité de certains phénomènes (Ex : îlot de chaleur, définition du climat local, etc.). La climatologie urbaine, certaines sciences de l'environnement et l'architecture bioclimatique se sont révélées comme étant les disciplines les plus importantes pour approfondir les connaissances dans ce domaine. Les travaux relevant directement de l'urbanisme sont à l'inverse peu nombreux, ce qui explique l'absence de tradition dans l'intégration du climat.

3. A l'instar des autres préoccupations de l'urbanisme, l'adaptation au climat distingue deux échelles principales d'intervention : la planification urbaine et la composition urbaine. La planification urbaine régit principalement le climat urbain global de la ville et dépend fortement de choix stratégiques liés à de nombreuses disciplines ; Dans ce cas l'influence de l'urbanisme est partielle, de même que son impact reste tributaire du niveau de conscience générale de la question environnementale. Pour la composition urbaine, en

revanche, des dispositions principalement géométriques et paysagères permettent de contrôler les microclimats urbains, ce qui montre que le rôle de l'urbaniste à ce niveau est décisif. Il convient, toutefois, de mentionner le caractère interdépendant et complémentaire entre ces deux phases de conception, clairement illustré par les exemples donnés dans ce mémoire.

4. Un certain nombre de concepts ont été défini pour satisfaire l'intégration de cette dimension en urbanisme. Ces concepts ont été résumés dans les tableaux 5.4 et 7.4.

8.2 Limites du travail

L'objectif de ce mémoire a privilégié une réflexion globale sur l'intégration de la dimension climatique dans les villes, au détriment d'un sujet limité à un aspect de contrôle précis. De ce fait, un certain nombre de choix ont été faits quant à l'orientation donnée à ce travail et qu'il convient de rappeler. Ainsi, la préférence a été accordée au caractère progressif de la démarche, ce qui a pour résultat des orientations d'ordre général qui mettent en avant les niveaux d'intervention possibles plutôt que des solutions figées.

L'étude a couvert plusieurs échelles et des domaines divers qui laissent inévitablement l'analyse et les recommandations assez générales. En effet, ce travail s'est basé sur un nombre restreint de recherches pour chacun des aspects étudiés ; certains de ces aspects ont été, donc, traité de manière superficielle (ex : pollution) car le caractère global de la réflexion rend difficile la maîtrise de chaque objectif de contrôle climatique. Ici, il convient de dire que les processus d'ensoleillement, de restitution de chaleur, de dilution des polluants etc. ont fait et continuent à faire l'objet de recherches spécifiques.

Par ailleurs, cette démarche a été voulue généralisable à tout climat. Celle-ci doit, de ce fait, être développée pour chacun des principaux climats pour parvenir à énoncer des recommandations plus précises.

Les concepts définis à l'échelle de la composition urbaine ont été exclusivement basés sur des aspects géométriques. Les moyens de vérification et d'évaluation de ces choix géométriques ont été approchés théoriquement. L'étude systématique des moyens de vérification existants est indispensable pour rendre plus opérationnelle cette démarche.

Une attention particulière doit, donc, être accordée aux outils permettant l'évaluation des performances climatiques de géométries urbaines. Un éventail considérable d'outils sont développés aujourd'hui. Les modèles numériques semblent être les plus intéressants. Des tentatives existent pour développer des moyens de vérification globaux qui intègrent l'ensemble des objectifs de contrôle climatiques en milieu urbain ; cette voie est, sans doute à explorer.

8.3 Orientations pour recherches futures :

Le concept d'urbanisme climatique vise à réaliser une étape de l'adaptation globale des villes à leur environnement. L'objectif de développement urbain durable à poursuivre, pour servir l'édification des villes futures, doit être élargi à tous les autres aspects environnementaux. Pour cela l'approche doit être à la fois environnementale et énergétique c'est-à-dire privilégiant le confort lié à toutes les composantes du milieu (climat, bruit, pollution, eau, etc.) et la réduction de la consommation énergétique. Parmi les aspects à considérer en complément à cette démarche ceux donnés ci-après ; Certains d'entre eux ont été cités dans ce mémoire mais nécessitent plus d'attention :

- Transport et infrastructure urbaine : La multiplication de l'infrastructure urbaine multiplie les sources d'émissions de polluants dus à la circulation et augmente la consommation énergétique en ville car fortement influencée par la distance.
- L'eau : comme facteur modifiant de l'environnement (ex : rôle climatique), et comme ressource rare nécessitant une bonne gestion (exploitation, distribution, recyclage, etc.).
- Contrôle de la pollution de l'air, des eaux et des sols : par la réduction des émissions notamment par le développement de procédés sobres et propres.
- Contrôle des déchets : Organisation territoriale, techniques de traitement, recyclage, etc.
- Aménagement paysager : comprenant aussi bien la végétation que l'eau. A étudier sous tous ces aspects, notamment, esthétique, social, absorption de la pollution, etc.
- Acoustique : prévention des émissions, traitement et étude de l'impact du bruit sur le confort, notamment en milieu urbain.

Bibliographie

Aida, M., (1982) : *Urban albedo as a function of the urban structure- A model experiment.* Boundary layer meteorology, vol 23, pp 405-413.

Aida, M. and Gotoh, K., (1982) : *Urban albedo as a function of the urban structure – A two dimensional numerical simulation.* Boundary layer meteorology, vol 23, pp 415-424.

Akbari, H., Rosenfeld, A.H. and Taha, H. (1995): *Cool construction materials offer energy saving and help reduce smog.* ASTM standardisation news, vol 23, n°11, pp 32 -37.

Akbari, H., Rosenfeld, A.H. and Taha, H. (1990): *Summer heat islands, urban trees, and white surfaces.* Report LBL28308, ASHRAE meeting, Atlanta, pp 1-8.

Architecture d'Aujourd'hui (1977) : *Quelle architecture*, n° 192. Paris

Architecture d'Aujourd'hui (1980) : *Solaire passif ou actif,* n° 209. Paris.

Arnfield, A.J. (1990a): *Street design and urban canyon solar access.* Energy and Buildings, vol 14, pp 117-131.

Arnfield, A.J. (1990b) : *Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: a simulation approach* . Physical geography, vol 11, pp 220-239.

Aronin, J.E. (1953) : *Climate & Architecture, progressive architecture book.* Reinhold publishing corporation, New York.

Atmospheric Environment (1998) : *Conference on the benefits of the Urban Forest, Sacramento Municipal Utility District, Sacramento, CA; 7 mars1995*, vol 32, n° 1.

Avissar, R. (1996): *Potential effects of vegetation on urban thermal environment.* Atmospheric environment, vol 30, n°3, pp 437-448.

Bairoch,P (1977) : *Taille des villes, conditions de vie et développement économique.* Paris.

Baker, N., Crowther, D., Nikolopoulou, M., Richens, P., Steemers, K. (1996) : *The urban porosity model: simplified parameters as indicators of environmental performance.* Proceedings of the 4th European conference on architecture, 29-29 mars 1996, Berlin, Germany, edited by H.S. Stephens, pp 300-305.

Bardet, G.(1943) : *Le facteur soleil en urbanisme.* techniques et Architecture, Juillet1943, pp 202-206.

Barry, G.R. and Chorley , R.J. (1978) : *Atmosphere, weather and climate, chapter 7 : Urban and forest climates.* Edition Lethuen, 3rd ed., pp 322-352.

Barlag, A.B. and Kuttler, W. (1990/91): *The significance of country breezes for urban planning.* Energy and Buildings, vol 15-16, pp 291-297.

Baümuller, J. (1986) : *The introduction of climatology into the administration and development of planning in the city of Stuttgart.* Urban climatology and its application with special regard to tropical areas, proceedings of the technical conference, 26-30 November 1984, Mexico, WMO- N° 652, pp 451-460.

Baümuller, J. and Reuter, U. (1992): *Urban climate and urban planning - The example of Stuttgart-* 5p. (document interne).

Baümuller, J. Hoffmann,U. and Reuter, U. (1993): *Stadtbauliche klimafibel. Heinweise fur die planung, folge 2.* Wirtschaftsministerium Baden- Wurttemberg.

Baümuller, J. and Reuter, U. (1996): *Stadtklimatologische Aspekte am Beispeil von Stuttgart.* GEO-wissenschaften, n°6. Edition Ernst & Sohn, pp 229-232.

Benevolo, L. (1980): *Histoire de la ville.* Edition parenthèses.

Bensalem, R. (1991): *Wind driven natural ventilation in courtyard and atrium- type buildings.* PhD thesis, University of Sheffield, Department of building science.

Beranek, W.J. (1984): *Wind environment around single buildings of rectangular shape and wind environment around building configurations.* Heron, vol.29, n °1, pp 2-70.

Bitan, A. (1988): *The methodology of applied climatology in planning and building.* Energy and Buildings, vol 11, pp 1-10.

Bitan, A. (1992): *The high climatic quality city of the future.* Atmospheric environment, vol 26b, n°3, pp 313-329.

Boesiger, W. (1956) : *Le corbusier - œuvres complétes, volume 5 (1946-1952) et volume 6 (1952- 1957).* Les editions d'architecture de Zurich.

Boyd, A. (1962) : *Chinese architecture and town planning, 1500 BC-1911 AC.* London, Alec Tiranti.

Brazel, A.J., Arnfield, A.J., Greenland, D.E. and Willmott, C.J., (1991) : *Physical and boundary- layer climatology.* Physical Geography, vol 12, n°3, pp 189-206.

Canton, M.A., Cortegoso, J.L. and De Rosa, C. (1994): *Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina.* Energy and Buildings, vol 20, pp 219-230.

Chand, I. (1976) : *Wind induced ventilation in shielded buildings.* Ventilation and air conditioning '76 Conference, Budapest 23-26 March 1976, Paper d19-d38.

Choisnel,E. et Payen, D. (1988) : *Les climats de la France.* La recherche (supplément) N°201, Juillet-Août, pp 32-41.

Cook, J. (1991) : *Searching for the bioclimatic city.* Proceedings of PLEA conference , 24-27 september 1991, Seville, Spain, Edited by S. Alvarez et al, pp 3-5.

Davis, I.R. (1986) : *The planning and maintenance of urban settlments to resist extreme climatic forces.* Urban climatology and its application with special regard to tropical areas, proceedings of the technical conference, 26-30 November 1984, Mexico pp 277-312 , WMO- N° 652.

Davis, S. (1990) : *Urban forestry.* Aristoteles University of Tessaloniki, School Forestry and natural environment. Laboratory of Silviculture and Highland Hydronomics. Tessaliniki 1990.

De Schiller, S. and Evans, J.M. (1994) : *Climate responsive urban development in tropical cities: training and practice.* Report of the technical conference on tropical urban climates, 28 march-2april 1993, Dhaka, Bangladesh, WCASP -30, WMO/TD-N°647, pp 357-364.

Djenane , M.(1998) : *Participation de la forme urbaine au contrôle de l'irradiation solaire. Référencce particulière au rôle de la rue dans les régions chaudes et sèches.* Mémoire de magister, Centre universitaire M. Kheider, Biskra, Algérie. Février 1998.

Donnadieu, C. et P., Didillon, J.M. (1977) : *Habiter le désert, les maisons Mozabites.* Edition Mardaga.

Drakakis-Smith, D. (1995): *Third world cities: Sustainable urban development 1.* Urban Studies, vol 32, n°4-5, pp 459-467.

Dwyer, J.F. Mc Pherson, E.G.Schroeder, H.W and Rowntree, R.A (1992) : *Assessing the benefits and costs of the urban forest.* Journal of Arboriculture, vol 18, n°5, pp 227-234.

Escourrou, G. (1983): *Le climat et l'environnement, les facteurs locaux du climat.* Masson, Paris.

Escourrou, G. (1991): *Le climat et la ville.* Edition Nathan, Géographie d'aujourd'hui, Paris.

Evans, J.M. et De Shiller, S. (1996) : *Application of microclimate studies in town planning : A new capital city, an existing urban district and urban river front development.* Atmospheric environment, vol 30, n° 3, pp 361-364.

Gandemer, J. (1979) : *Les effets aérodynamiques du vent dans les ensembles bâtis.* techniques et Architecture N°325.

Geiger, (1965) : *The climate near the ground.* Harvard University Press, Cambridge.

Givoni, B. (1989): *Urban design in different climates.* WCA-10, WMO/ TD -N° 346, W.M.O.

Givoni, (1992) : *Climatic aspects of urban design in tropical regions.*Atmospheric Environment, vol 26b, N°3, pp 397-406

Golany, ed (1982) : *Design for arid regions.* Van Nostrand Reinhold Compagny.

Golany, G. (1996) : *Urban design morphology and thermal performance.* Atmospheric Environment, vol 30, n°3, pp 455-465.

Hermant (1943) : *De l'orientation des bâtiments en rangées parallèles.* techniques et Architecture, Juillet1943, pp 197-198.

Herzog, T. , ed.(1996) : *Solar energy in Architecture and urban planning.* Herzog, T. editions, Prestel.

Hoa, L. (1981) : *Reconstruire la Chine, 30 ans d'urbanisme 1949-1979.* Edition Moniteur.

Hosker, R.P.Jr, (1985) : *Flow around isolated structures and building clusters: A review.* ASHRAE Transactions, vol 91, Part. 2B., pp 1671-1692.

Hussain, M. (1978) : *A study of the wind forces on low rise buildings arrays and their application to natural ventilation design methods.* PhD. Thesis, University of Sheffield, Department of building Science, Nov. 1978.

Journal Officiel (1987) : *Loi n° 87-03 DU 27 janvier 1987, relative à l'aménagement du Térritoire.* République Algerienne Démocratique et Populaire.

Journal Officiel (1990) : *Loi 90-29 du 1er decembre 1990, relative à l'amenagement et l'urbanisme.* J.O N°52. République Algerienne Démocratique et Populaire.

Journal Officiel (1991) : *Décret executif relatif aux régles générales d'aménagement et d'urbanisme.* J.O n° 26. République Algerienne Démocratique et Populaire.

Kaule, G. (1995): *Ecologically oriented planning.* Institut fur landschafts planning und ökologie. Universitat Stuttgart.

Knowles, R. (1974) : *Energy and form, an ecological approach to urban growth.* MIT press.

Knowles, R. (1981) : *Sun, Rhythm and Form.* MIT press. London.

Koenigsberger ,O.H., Ingersoll ,T.G , Mahyew, A. AND Szokolay , S.V. (1973) : *Manual of tropical housing and building. Part 1: climatic design.* Lorgman. London.

Krishan (1996) : ***The habitat of two deserts in India : hot-dry desert of Jaisailmer (Rajasthan)*** *and the cold-dry high altitude mountainous desert of leh (Ladakh).* Energy and Buildings, vol 23, pp 217-229.

Kuttler, W. and Romberg, E. (1992): *The occurrence and effectiveness of country breezes by means of wind tunnel and in situ- measurements.* Proceedings of the 9th world clean air congress, Montreal , Canada, PP.IU- 9A.04. pp 1-12.

Larousse (1975) : *Grand Larousse encyclopedique,* Vol 15.

Le corbusier (1957) : *La charte d'Athènes.* Edition de minuit.

Lindqvist, S. (1992) : *Local climatological modelling for road stretches and urban area.* Geografiska Annaler, vol 74A, n° 2-3, pp 265-358.

Lund Kriken, J. (1982) : *Town Planning and cultural responsiveness in the Middle East.* Design for arid regions, Golany editions, pp 97-120.

Lyons, T.J. (1986): *Climatic factors in the siting of new towns and specialised urban facilities.* Urban climatology and its application with special regard to tropical areas, proceedings of the technical conference, 26-30 November 1984, Mexico,WMO -N° 652, pp 473-486.

Magnan (1979) : *Le droit au soleil.* Urbanisme n°172, pp 64-65.

Markus,T.A. and Morris, E.N. (1980) : *Buildings, climate and energy.* Edition Pitman.

Martin.R (1981) : *L'urbanisme de la Grèce antique.* Edition :Picard et Cie.

Matzarakis, A., Mayer, H. (1992): *Mapping of urban air paths for planning in Munich.* pp13-22. (document interne).

McPherson, E.G. (1992): *Shading urban heat islands in U.S. desert cities.* Wetter lebben vol. 44, n° 1-3, pp 107-123.

McPherson, E.G. (1994a): *Cooling urban heat islands with sustainable landscapes.* The ecological city, MIT press Amherst, edited by Platt et al, pp 151-171.

McPherson, E.G. (1994b): *Energy-saving potential of trees in Chicago.* Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago urban forest climate project. USDA forest service, General technical report NE-186. pp 95-113.

Mc Pherson,E.G. (1994c) : ***Using urban forests for energy efficiency and carbon storage.*** Journal of forestry, vol. 92, n° 10, pp 36-41.

McPherson, E.G., and Simpson, J.R. (1995) : *Shade trees as a demand - side resource,* Home energy, pp11-17.

McPherson, E.G., Rowntree, R.A. and Wagar, J.A. (1994a) : ***Energy efficient landscapes.*** Urban Forest Landscapes. G.A. Bradley editions, pp 150-160.

McPherson,E.G., Nowak, D.J. and Rowntree, R.A (1994b): ***Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago urban forest climate project.*** USDA forest service, General Technical report NE-186.

Moffat, A.S. and Schiler, M. (1981) : *Landscape design that saves energy.* William Morrow and Cie, INC. New York.

Moore, F. (1984) : *Concepts and practice in architectural daylighting.* Van Nostrand Reinhold Compagny.

Nowak, D.J. Rowntree, R.A., Mc Pherson, E.G., Sisini, S.M., Kerkmann, E.R., Stevens, J.C. (1996) : *Measuring and analysing urban tree cover.* Landscape and urban Planning, vol 36, pp 49-57.

Nowicki, M., (1988) : *Planning of industrial sites in a city from the point of view of air pollution Control.* Energy and Buildings , vol. 11 , pp 171 -179.

Oke, T.R. (1984) : *Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning.* Energy and Building, vol. 7, pp 1-10.

Oke, T.R. (1988a) : *Street design and urban canopy layer climate.* Energy and Buildings, vol. 11, pp 103-113.

Oke, T.R. , (1988b) : *The urban energy balance.* Progress in Physical geography, vol. 12 , pp 471-508.

Oke, T.R. , (1994) : *Keynote address.* Report of the technical conference on tropical urban climates, 28 march-2april 1993, Dhaka, Bangladesh,WCASP-30, WMO-N° 647, pp xxiii-xxvii.

Ouahrani, D (1993) : *Light and housing in the desert : case study of Ghardaia, Algeria.* Lighting research, technology, vol. 25, n°1, pp 1-11.

Pacquot, T (1996) :*Le monde des villes.* Editions complexe.

Pawlowski, C.K (1992) : *Tony Garnier , Pionnier de l'urbanisme du XX siècle.* Edition : Les créations du pelikan.

Peirera, F.O.R and Minache, J.A.C. (1989) : *Insolation in the built environment : criteria for its normalisation and regulation.* Proceedings of the 2nd European conference on architecture, 4-8 december 1989, Paris, France, pp 36-38.

Ravereau, A (1982) : *Le M'zab, une leçon d'architecture.* Edition Sindbad. Alger.

Reps, J. (1969) : *La ville americaine, fondation et progrès.* Edition Mardaga.

Roche, M. (1973) : *Le M'zab, architectures ibadites en Algérie.* Edition Arthaud.

Schreck, H., Hillman, G., Nagel, J., Lohnert, G., and Schmid, H.M. (1989) : *Design context, design information booklet number two, July1989.* Report N° IEA SCHAC T.8.C.2. International Energy Agency : Solar heating and cooling program, TaskVIII.

Simpson. J.R. and McPherson (1998) : *Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento.* Atmospheric Environment, vol. 32, n°1, pp 69-74.

Sloan, D., Lecoin, G. et Thibault, C. (1989) : *Terre aride ...ville fraîche, la ville nouvelle universitaire de Salaheldeen en Irak.* Cahiers de l' IAURIF, n°87-88, pp 147-162.

Soliman , B.F.(1976) : *A study of the wind pressure forces acting on groups of buildings.* PhD thesis, University of Sheffield, Department of building Science, oct.1976.

Steemers, K. , Baker, N. and Hawkes, D. (1989) : *Energy use and urban development ,urban bloc analysis.* Proceedings of the 2nd European conference on architecture, 4-8 december 1989, Paris, France, pp 75-77.

Steemers, K., Baker, N., Crowther, D., Nikolopoulou, M., Clocquet, R. (1996) : *Project ZED : modelling environmental characteristics of urban forms.* Proceedings of the 4th European conference on architecture, 29-29 march 1996, Berlin, Germany, edited by H.S. Stephens, pp 4 -5.

Swaid, H. (1993) : *Numerical investigation into the influence of geometry and construction materials on urban street climate.* Physical Geography, vol. 14, n° 4, pp 342-358.

Taesler, R. (1986) : *Urban climatological methods and data.* Urban climatology and its applications with special regard to tropical area . Proceedings of the technical conference , 26-30 November 1984, Mexico, W.M.O. N°652 , pp 199-236.

Taha, H. (1997) : *Urban climates and heat islands : albedo, evapotranspiration , and anthropogenic heat.* Energy and Buildings, vol 25 , pp 99-103.

Taha, H. , Douglas, S., and Haney, J. (1997) : *Mesoscale meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetation.* Energy and Buildings, vol. 25, pp 169-177.

Todhunter,P.E.. (1990) : *Microclimatic variations attributable to urban canyon assymetry and orientation.* Physical Geography, vol 11,n° 2, pp 131-141.

Tafuri, M. (1981) : *Architecture et humanisme: de la renaissance aux réformes.* Edition Dunod, Bordas.

Terrail ed. (1995) : *L'architecture du futur.* Edition Pierre Terrail.

Urbanisme (1979) : *L'énergie et la ville 171, et les énergies n°172.* Paris.

Vitruve (1980) : *Les dix livres de l'architecture.* Edition errances, collection des Héspérides.

Wiren,B.G. (1985) : *Effect of surrounding buildings on wind pressure distribution and ventilation heat losses for single family houses. Part 1:1 ½ - Storey detached houses.* The international Swedish institute for building Research, Gavle, Sweden, Report N° M85:19.

Wiren,B.G. (1987) : *Effect of surrounding buildings on wind pressure distribution and ventilation heat losses for single family houses. Part 2:2 ½ - Storey detached houses.* The international Swedish institute for building Research, Gavle, Sweden , March 1987.

W.M.O. (1986) : *Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas.* Proceedings of the technical conference. 26-30 november 1984, Mexico, WMO. N° 652.

W.M.O. (1994) : *Report of the technical conference on tropical urban climates.* 28 march-2 april 1993, Dhaka, Bangladesh, WCASp-30, W.M.O / TD n° 647.

W.M.O (1996) : *Climate and urban development.* W.M.O n ° 844, 24p.