

RÉSUMÉ

Ce livre présente des stratégies pour réduire l'impact de la demande croissante de climatisation dans l'union européenne et établit le lien entre cette demande et l'« effet d'îlot thermique urbain ». La consommation énergétique liée à la climatisation des bâtiments devient particulièrement importante en environnement urbain car la température de l'air des secteurs urbains denses est plus élevée qu'aux alentours. Ce phénomène, ainsi que l'augmentation du niveau de vie et d'autres facteurs, contribue à la croissance de la demande traditionnellement basse de climatisation artificielle en Europe.

Le livre est basé sur une étude appelée URBACOOOL (Vers des stratégies efficaces urbaines pour le rafraîchissement) financée par la Commission Européenne. Cet ouvrage donne une vue d'ensemble des pratiques, des techniques et des matériaux qui peuvent aider à atténuer l'effet d'îlot de chaleur et d'autres conséquences résultant de la demande croissante de rafraîchissement. La priorité est accordée aux pratiques qui évitent le besoin de climatisation artificielle tels que la planification urbaine et énergétique prenant en compte l'environnement, l'utilisation de la végétation et de matériaux « rafraîchissants » pour la construction des trottoirs et des bâtiments. Pour les besoins de restants, les systèmes de climatisation actifs sont également abordés du point de vue de l'efficacité énergétique.

L'équipe qui a réalisé l'étude était composée de l'Université d'Athènes -Grèce (coordination), de l'Université de Séville - Espagne et de l'Ecole des Mines de Paris - France. Les travaux menés à bien dans URBACOOOL ont conduit à des études de cas qui permettent de mesurer l'effet d'îlot thermique, de caractériser la consommation supplémentaire pour les bâtiments en milieu urbain, et de calculer l'effet des mesures adoptées à tous les niveaux, de la planification urbaine au choix des appareils de climatisation. Les études de cas effectuées à Séville ont permis de mesurer la dispersion des besoins de climatisation ainsi que leur valeur moyenne pour les différentes zones de la ville. Une des études de cas évalue le bénéfice associé à l'implantation d'arbres. Une autre étude de cas effectuée à Paris, mesure l'intérêt des solutions centralisées de climatisation en milieu urbain. D'autres études de cas ont été effectuées à Athènes. L'impact de l'effet d'îlot thermique urbain est évalué, en accroissement de température puis en terme de consommation d'énergie électrique additionnelle pour la climatisation. Ces études de cas sont décrites dans le livre et les documents associés peuvent être fournis par les auteurs.

L'EFFET D'ILOT THERMIQUE URBAIN

La température de l'air dans des secteurs urbains denses est sensiblement plus élevée qu'aux alentours. Le phénomène est connu sous le nom d'« effet d'îlot thermique » et constitue la manifestation climatique la plus évidente de l'urbanisation. Il peut être défini comme une "oasis à l'envers" - un secteur de la ville qui est plus chaud que la campagne environnante suite au manque d'arbres et de végétation, et à l'utilisation de surfaces peu réfléchissantes pour les toits et les trottoirs qui absorbent et stockent l'énergie solaire.

Les principales différences entre les conditions climatiques urbaines et rurales concernant le confort des habitants sont les différences entre les températures d'air et les vitesses de vent dans les rues. Ces différences sont provoquées par la

modification de l'équilibre radiatif, un échange de chaleur par convection avec la terre et les bâtiments plus faible, l'air s'écoulant au-dessus du secteur urbain sans le rafraîchir, et la production de chaleur de la ville. La répartition des températures dans ces zones est également fortement affectée par l'équilibre radiatif. Le rayonnement solaire incident sur les surfaces urbaines est absorbé puis transformé en chaleur sensible au lieu d'être réfléchi.

L'équilibre net entre les gains solaires et la perte de chaleur par rayonnement dans l'infrarouge long détermine l'équilibre thermique de ces secteurs urbains. Puisque la perte par chaleur radiante est ralentie en milieu urbain, l'équilibre s'établit plus haut que dans les secteurs ruraux environnants, et les températures sont beaucoup plus élevées. La conception efficace des bâtiments refroidis de manière « passive » (sans équipements) exige une bonne compréhension des caractéristiques du climat urbain, en particulier des distributions de la température et du vent.

La plupart des études européennes avant celle-ci s'étaient concentrées sur l'effet d'îlot thermique pendant les nuits d'hiver, mais peu d'études avaient cherché à analyser l'effet d'îlot thermique diurne en été. Naturellement, dans des climats froids, l'effet d'îlot thermique peut être positif en termes de consommation d'énergie parce qu'il réduit les besoins de chauffage. Réciproquement, l'effet d'îlot thermique pour les climats chauds augmente l'utilisation d'énergie pour la climatisation en été. Les différences de température entre les milieux urbain et rural peuvent être représentées par le schéma 1. Il faut noter que le profil de température dépend fortement du moment de la journée considéré.

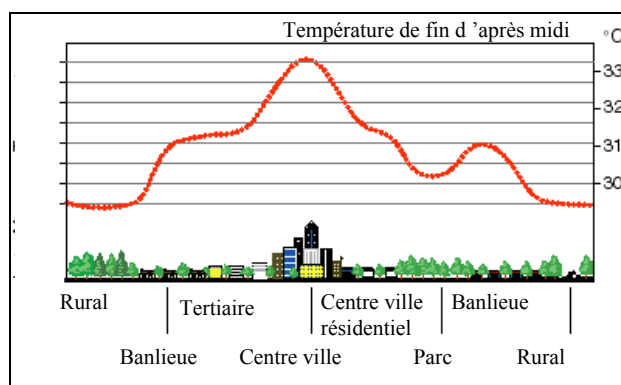


Figure 1. Représentation d'un profil de température type d'îlot thermique urbain (Source: Heat Island Group <http://eetd.lbl.gov/HeatIsland>)

Le phénomène est caractérisé par une variation spatiale et temporelle importante liée au climat, à la topographie, à la disposition physique et aux conditions atmosphériques à court terme. Les modèles d'effet d'îlot sont fortement influencés par les caractéristiques particulières de chaque ville. Certains facteurs sont néanmoins communs à toutes les villes :

- la géométrie radiative de la rue (représentée comme un *canyon* étroit) qui contribue à diminuer l'évacuation de la chaleur par rayonnement infrarouge hors des rues et qui dépend de l'échange complexe entre les bâtiments et de la fermeture de l'horizon. Le rayonnement infrarouge est émis par diverses surfaces de bâtiment et de rue dans les canyons urbains ;
- les propriétés thermiques des matériaux qui augmentent le stockage de chaleur

sensible de la ville pendant la journée et relâchent la chaleur stockée après le coucher du soleil ;

- la chaleur anthropogénique qui est libérée par la combustion des carburants et des combustibles des sources fixes ou mobiles d'énergie et du métabolisme humain ;
- l'effet de serre qui contribue à augmenter le rayonnement infrarouge entrant qui est emprisonné par l'atmosphère urbaine polluée ;
- la réduction de l'évaporation sur les surfaces dans la ville qui produit plus de chaleur sensible et moins de chaleur latente qu'à la campagne.

Des mesures détaillées ont été faites à Athènes, où trente stations automatiques donnant la température et l'humidité heure par heure ont été installées pendant plus de 3 ans, de 1996 à 1999. L'objectif principal du projet était d'étudier diverses conditions micro climatiques urbaines. Les conclusions ci-dessous résultent de cette expérience :

- les degrés heures de climatisation (la partie des besoins provenant directement du climat) dans la zone centrale de la ville sont environ 350% des besoins des secteurs périphériques ;
- l'intensité maximale de l'effet d'îlot thermique urbain (la différence entre la température urbaine la plus élevée et la température limite rurale) dans l'hyper centre est de près de 16 °C, alors qu'une valeur moyenne pour le centre ville d'Athènes est de près de 12°C;
- la région occidentale d'Athènes, caractérisée par une végétation rare, une densité élevée de bâtiments et une émission anthropogénique élevée, subit deux fois plus de degrés jours de climatisation que les régions Nord et Sud d'Athènes. L'intensité de l'îlot thermique urbain du Parc Central est de l'ordre de 6°C, à comparer aux 10 °C des 10 stations voisines. Le parc présente presque 40 % de moins de degrés heures de climatisation que les autres stations urbaines à proximité ;
- les degrés heures de chauffage dans l'hyper centre d'Athènes sont d'environ 40 à 60 % inférieurs à ceux des secteurs environnants.

Ces résultats indiquent clairement l'impact de l'aménagement urbain, de l'existence de végétation et des matériaux de construction utilisés sur la demande énergétique de climatisation des bâtiments urbains.

STRATEGIES DE RAFRAICHISSEMENT A L'ECHELLE DE LA VILLE

Ces températures urbaines plus élevées ont un effet direct sur la consommation d'énergie dans les bâtiments, particulièrement pendant la période d'été. D'ailleurs, la production de CO₂ et de divers polluants augmente également pendant cette période. Afin de limiter l'impact de l'îlot de chaleur sur la demande énergétique et le confort d'été, diverses mesures pouvant être prises au niveau de la ville sont présentées dans ce chapitre. Elles conduisent à l'utilisation de matériaux plus appropriés, à une plus grande plantation de végétaux et à l'utilisation de « puits de fraîcheur ».

Le rôle des matériaux. L'utilisation des matériaux appropriés pour réduire l'effet d'îlot de chaleur et améliorer l'environnement urbain est étudié depuis quelques années. Un certain nombre d'études ont permis de déterminer l'impact de matériaux de construction aux propriétés optiques et thermiques variées sur la température urbaine et sur la consommation d'énergie liée à la climatisation. Elles ont prouvé que des gains importants sont possibles quand des surfaces réfléchissantes sont

employées en combinaison avec la plantation de nouveaux arbres. Les villes, et les quartiers ont aujourd'hui une réflectivité solaire relativement réduite (l'albédo) pour deux raisons : des bâtiments et des surfaces urbaines plus foncés absorbant de plus en plus le rayonnement solaire, et des canyons, sièges de réflexions multiples en leur sein, se comportant donc comme des corps noirs. L'albédo typique des villes européennes et américaines est aujourd'hui de 0.15 à 0.30, alors que des chiffres beaucoup plus élevés ont été mesurés dans quelques villes nord-africaines allant de 0.45 à 0.60 (couleur blanche plus réfléchissante). L'absence de recherche sur les caractéristiques des matériaux à fort albedo existants, sur le maintien de cette propriété à long terme ainsi que le manque de développement de matériaux de construction alternatifs à albedo élevé reflète le manque de conscience de ces problèmes de climatisation urbaine.

Le rôle des rues et des trottoirs. Les surfaces pavées ou revêtues comme les routes, les cours de récréation et les parkings peuvent être rendues plus claires en améliorant le revêtement ou en changeant le pavement. Beaucoup de villes resurfacent leurs espaces extérieurs périodiquement pour prolonger la vie d'une rue ou d'une aire de stationnement. Si le granulats utilisé est légèrement coloré, l'ajout d'une couche mince de ce matériau est une bonne manière d'augmenter l'albédo d'une surface pavée. Le bitume, un agrégat de particules fines mélangées à de l'asphalte, est souvent utilisé sur les surfaces pavées. Le coulis bitumineux typique est bon marché et à faible albédo à cause des matériaux foncés. Des coulis bitumineux moins foncés sont fabriqués en Europe et ont déjà été employés sur des cours de tennis, des places, et des bords de route. Si une surface pavée est structurellement endommagée et doit être remplacée, ou si une nouvelle surface est construite, utiliser l'asphalte ou le béton se traduit par des coûts semblables. Le remplacement de l'asphalte par du béton permet aussi une légère augmentation de l'albédo.

Le rôle des arbres et de la végétation. La végétation a divers effets sur l'environnement urbain. Au delà du rôle esthétique et de la sensation plaisante de proximité avec la nature que les arbres et la végétation fournissent, elle peut augmenter la valeur immobilière, stabiliser le sol, fournir un habitat à la faune, faire obstacle au bruit et améliorer la qualité de l'air. Par exemple, une ceinture d'arbres, de 30 mètres de large et de 15 mètres de haut peut réduire le bruit d'une route de 6 à 10 décibels (échelle logarithmique). En outre, le processus de photosynthèse réduit légèrement l'effet de serre. Les feuilles peuvent être un filtre efficace pour des polluants de l'air tels que le NO, le NO₂, le NH₃, le SO₂ et l'O₃. Surtout, la proximité des arbres et de la végétation modifie considérablement l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments, directement et indirectement : ombrage et protection contre le vent mais aussi effet de refroidissement dû à l'évapotranspiration. L'utilisation d'énergie pour la climatisation peut être réduite de 40 à 50 % en ombrageant fenêtres et murs).

Le rôle de l'eau et des puits de fraîcheur. Une masse d'eau présente un comportement thermique différent de la plupart des autres surfaces qu'on rencontre sur terre. La présence d'une grande masse d'eau provoque une baisse de température de l'air sous le vent que l'on peut chiffrer selon la vitesse du vent et la longueur de la masse de l'eau. Les étangs et les fontaines peuvent être des dispositifs de climatisation efficaces dans des espaces ouverts en raison de leur capacité à maintenir des températures de l'eau inférieures à la température de l'air, et à leur faible réflectivité. Pendant que l'eau s'évapore, sa température diminue. L'évaporation est proportionnelle à la surface de contact air/eau, et donc il vaut mieux utiliser des fontaines et des pulvérisateurs (gouttes ayant un diamètre de

COOLING THE CITIES RAFRAÎCHIR LES VILLES

CONTENTS

PREFACE	2
INSTITUTIONS PARTENAIRES	3
CONTENTS	6
RESUME	11
SUMMARY	25
Chapter 1: Cooling in Cities : local and global solutions	39
1.1 Urbanization and Climate	39
1.2 The Role of Urban Climate on the Cooling of Buildings	40
1.2.1 How the Urban Environment influences the Energy Consumption of Buildings	40
1.2.2 How the ventilation of streets (Canyon effect) affects Passive Cooling of Buildings	41
1.2.3 The impact of Urban Temperatures on Energy Consumption for Active Cooling.	42
1.2.4. Urban Cooling Energy Studies in United States from utility data	42
1.2.5. Urban Cooling Energy Studies from field monitoring in Athens	43
1.3 Introduction of the techniques with a capability to solve part of the problems	47
1.3.1 Improving the Urban Microclimate	48
1.3.2 Adapting the Urban Buildings to the Urban Microclimate	50
1.3.3 Using Advanced Air Conditioning with improved efficiency	52
1.3.4 Using District cooling and Demand Side Management Techniques	53
Chapter 2: Improving the Microclimate in Urban Areas	55
2.1 Modelling the Urban Climate	55
2.1.1 Heat Island effect	55
2.1.2 Thermal Balance in the Urban Environment	62
2.1.3 Air movement in the Urban Environment	64
2.1.4 Some practical results	68
2.2 Use of high albedo materials to improve the urban microclimate	71
2.2.1 General and Physical Principles	71
2.2.2. Optical and Thermal Behavior of Materials	71
2.2.3 Choosing Places For Light-Colored Surfacing	74

COOLING THE CITIES RAFRAÎCHIR LES VILLES

2.3 Use of trees and green spaces	75
2.3.1 General - Physical Principles	75
2.3.2 The Impact of Trees and Urban Parks on Ambient Temperature	77
2.3.3 Cooling a Neighborhood Or City	80
2.4. Solar Control of Open Spaces	81
2.4.1 Sun penetration into urban streets	81
2.4.2 Shade as Prerequisite for Cooling Outdoor Spaces	82
2.5. Use of Cool Sinks	83
2.5.1 Use of Water to Cool Outdoor Spaces	83
2.5.2 Lowering The Surface Temperature In Shaded Outdoor Spaces	85
2.6 Comfort In Outdoor Spaces	88
Chapter 3: Adapting the Urban Buildings to the Urban climate	91
3.1 Introduction	91
3.2 Ventilation	92
3.2.1 Introduction	92
3.2.2 Air Quality (Indoor and Outdoor)	92
3.2.3 Urban Pollution modelling	94
3.2.4 Impact of additional filtering requirements on the energy consumption to face Urban pollution	97
3.2.5 Urban Air Temperatures	99
3.2.6 Urban Air Velocities	103
3.2.7 Best Practice Techniques for adapting the Building to the urban microclimate	106
3.3 Daylighting and Solar Control	111
3.3.1 Loss of Solar Radiation in Urban Areas	111
3.3.2 Providing Daylight and Sunlight in Urban Areas	113
3.3.3 Adapting the Building and Best Practice relative to Daylight	118
3.4 Natural Cooling Techniques for Urban buildings	122
3.4.1 Vegetation In The Building Envelope (Planted roofs)	122
3.4.2 Passive Downdraft Evaporative Cooling Towers	126
Chapter 4: Advanced low energy consumption air conditioning systems available to the end user	129
4.0 Introduction	129
4.1 Individual Air Conditioners: present techniques and potential improvements	129

COOLING THE CITIES RAFRAÎCHIR LES VILLES

4.1.1 Technical Definitions	129
4.1.2 Cost and efficiency of individual solutions	132
4.1.3 Technical improvements of Individual Air Conditioners	136
4.1.4 Availability of improved solutions	139
4.2 Central Air Conditioning: present techniques and potential improvements	141
4.2.1 Technical Definitions	141
4.2.2 Cost and efficiency of “all water” Systems	146
4.2.3 Technical Improvements in Central Air Conditioning	153
4.3 Trade off concerning central and individual systems	157
4.3.1 Bases for comparing RAC and CAC	157
4.3.2 Diffusion dynamics of central and individual systems	159
4.3.3 RAC and CAC actual markets in Europe	160
4.3.4 Consumption of Central and Individual systems	163
4.3.5 Example of economic computation	166
4.3.6 Potential actions for Energy Efficiency	167
4.4 Non mechanical solutions for cooling	171
4.4.1 Alternative solutions to electrically driven compressors	171
4.4.2 Performance and cost of absorption units operated with gas	172
4.4.3 Absorption recovery systems (Waste Heat, Solar Energy, Cogenerated Heat)	173
4.4.4 Cooling without compression	175
4.5 Societal costs and partial costs for users citizens and utilities	177
4.5.1 Societal perspective: Full development costs of Air Conditioning	177
4.5.2 Environmental problems	178
4.5.3 Consequences of environmental costs on economic optimum	181
Chapter 5: District cooling and Demand Side Management as tools for energy efficiency	185
5.0 Introduction	185
5.1 Principles of District Cooling (DC) Techniques	185
5.1.1 Central production and local use of chilled water	185
5.1.2 Networks: either a network for chilled water only or combination with another network	186
5.1.3 Bi-and Trigeneration in DC (Heating/Cooling/Electricity)	187
5.1.4 Structure of costs, global performance	187
5.1.5 Dynamics of diffusion of DH and DC	189

COOLING THE CITIES RAFRAÎCHIR LES VILLES

5.2 Existing D-C applications: typology and strategies	191
5.2.1 Traditional Northern realisations in business districts	191
5.2.2 Commercial operations based on temporary overcapacities	194
5.2.3 Extension of DC based on local trigeneration	196
5.2.4 Overall Statistics on DC	197
5.2.5 Ratios of cost, pathways to creation, necessary densities of uses	198
5.3 Principles of Demand Side Management	199
5.3.1 The American history of DSM/IRP and the European experience	199
5.3.2 The Restructuring of the European Electricity Sector	201
5.3.3 DSM objectives of unbundled and competitive utilities	203
5.3.4 DSM techniques on the field: types and results	207
5.3.5 DSM & Energy Efficiency as public policies	210
5.4 Data for existing and prospective DSM	212
5.4.1 Load Management: storage of cold water or ice storage	212
5.4.2 Direct control of equipment by utilities	215
5.4.3 The European action plan on electric appliances	217
5.4.4 Magnitude of the unused economic potentials for Air Conditioning	220
5.5 Towards implementation of cost effective DC/DSM strategies	222
5.5.1 Energy and Cities – a global approach	222
5.5.2 Improvement potential in Mediterranean countries	226
Chapter 6: Case Studies	229
6.1 Introduction	229
6.2 Common Methodology of the Case Studies	229
6.2.1 Clustering the city	230
6.2.2 Sampling Technique	230
6.2.3 Energy performance evaluation	233
6.2.4 Extrapolation of the results	233
6.3 Summary of the Case Studies	233
6.4 Modification of the Microclimate	235
6.4.1 AICIA Case Study 2 : tree planting in Seville	235
6.4.2 UoA Case Studies 2 to 5 : maximum potential on the Western Athens Municipality	236
6.4.3 UoA Case Study 2 : tree planting in Athens	237
6.4.4 UoA Case Studies 3 and 5 : new materials	239

COOLING THE CITIES RAFRAÎCHIR LES VILLES

6.4.5 UoA Case Study 4 : street design	240
6.5 Adaptation of the Building and Use of Alternative Cooling Techniques	241
6.5.1 AICIA Case Study 3 Daylighting	241
6.5.2 AICIA Case Study 4 : the new PDEC technique	242
6.6 Modification of the HVAC's Systems and Strategies	244
6.6.1 ARMINES Case study 1: CAC versus RAC	244
6.6.2 ARMINES/TMU Case study 2 : extension of the DC system in Paris thanks to a GIS	247
6.6.3 ARMINES Case study 3 : Load Management in a liberalised electricity market	249
References – Further reading	252
Chapters 1 & 2	252
Chapter 3	255
Chapters 4 & 5	257