



**HAL**  
open science

# Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural : application à l'ensoleillement

Daniel Siret

► **To cite this version:**

Daniel Siret. Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural : application à l'ensoleillement. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes, 1997. Français. NNT : 1997NANT2052 . tel-00573773

**HAL Id: tel-00573773**

**<https://theses.hal.science/tel-00573773v1>**

Submitted on 4 Mar 2011

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

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

Propositions pour une approche déclarative des ambiances  
dans le projet architectural.  
Application à l'ensoleillement

T H E S E D E D O C T O R A T

**Spécialité Sciences de l'Ingénieur Option Architecture**

Filière doctorale : *Ambiances architecturales et urbaines*

Présentée et soutenue publiquement par :

**Daniel Siret**

le 13 juin 1997 à Nantes  
devant le jury ci-dessous :

Jean-François AUGOYARD, Directeur de Recherche au CNRS  
Albert DUPAGNE, Professeur à l'Université de Liège, Belgique (Rapporteur)  
Michel LUCAS, Professeur à l'Université de Nantes, École Centrale de Nantes  
Pierre-Yves NIZOU, Professeur à l'Université de Nantes - ISITEM (Président du jury)  
Jean-Pierre PÉNEAU, Professeur à l'École d'Architecture de Nantes  
Bernard PÉROCHE, Professeur à l'École des Mines de Saint-Étienne (Rapporteur)  
Xavier SOULE, PDG de la Société *Abvent* à Paris

Directeur de thèse : Jean-Pierre PÉNEAU  
Laboratoire CERMA URA CNRS 1581, École d'Architecture de Nantes

Propositions pour une approche  
déclarative des ambiances dans le  
projet architectural  
Application à l'ensoleillement

# Remerciements

Renouvelant les serremments de mains et d'amitié — comme dit Alphonse Allais lorsqu'il économise ses mots — qui ont jalonné cette recherche, je me permets d'exprimer quelques vifs mercis à :

Bernard Belchun et Philippe Woloszyn,  
amicalement et ambialement,

Marie-Laure Nivet, Jean-Philippe Mounier, Didier Faucher, Sylvain Liège,  
amicalement et déclarativement,

L'équipe du CERMA,  
directement et inversement,

Le groupe GÉODE,  
sportivement.

Par ailleurs, il apparaît patamment — comme dit encore Alphonse Allais — que je suis redevable à Jean-Pierre Péneau et à Michel Lucas pour l'encadrement de mes errances. Merci à eux de savoir forcer les barrières disciplinaires et d'encourager les migrations scientifiques.

Redevable, je le suis aussi à l'administration des impôts grâce au Centre National de la Recherche Scientifique et à la Région Pays de la Loire qui ont financé ces années passées. Merci de leur soutien.

Sans qu'Alphonse Allais y soit pour quelque chose, je ne peux que remercier Messieurs Albert Dupagne et Bernard Péroche qui me font l'honneur de rapporter cette recherche, Messieurs Jean-François Augoyard, Michel Lucas ainsi que Pierre-Yves Nizou et Xavier Soule qui vont l'examiner.

Merci enfin à tous ceux qui, supporters ou insupportés, ont supporté mon travail et ma présence.

# Résumé

La conception architecturale est un processus complexe dans lequel des entités de diverses natures sont manipulées. Parmi celles-ci, les ambiances représentent les interactions perçues entre les phénomènes physiques et les formes de l'environnement construit. Dans cette recherche, nous interrogeons la prise en compte des ambiances dans le projet architectural : quels sont les outils les mieux adaptés pour ce faire ?

Nous donnons en premier lieu une représentation théorique de la question. Celle-ci nous conduit à définir des problèmes de simulation inverse des ambiances : il s'agit de modéliser des formes architecturales en partant des intentions d'ambiances du concepteur. Nous proposons de résoudre ces problèmes dans le cadre méthodologique défini par l'approche déclarative en modélisation géométrique.

Nous appliquons cette représentation théorique pour un phénomène particulier : l'ensoleillement. Un état de l'art nous permet de situer les limites des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement. Nous introduisons une formalisation nouvelle du phénomène en le considérant sous l'angle de la géométrie intégrale. Nous montrons que tous les problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses, s'expriment comme des problèmes d'intersection entre les objets d'une scène et un volume de rayons solaires que nous définissons comme la pyramide complexe d'ensoleillement. Ce volume est un artefact géométrique qui représente une contrainte spatio-temporelle d'ensoleillement. La détermination de sa frontière n'est pas triviale. Nous y apportons une solution en utilisant la somme de Minkowski. L'ensemble de ces résultats nous donne un modèle déclaratif de résolution des problèmes d'ensoleillement.

En dernier lieu, nous discutons des modalités d'adaptation de ce modèle dans le contexte de la conception architecturale. Nous présentons une maquette logicielle intégrant nos propositions. Trois exemples illustrent finalement l'utilisation de notre modeleur.

# Abstract

Architectural design is an intricate process during which the designer handles entities from various kinds. Among them, ambiances figure the interactions between the physical phenomenons and the built environment. In this research, we address the problem of taking into account the ambiances during the architectural design process : which tools are the most suitable to do so ?

Firstly, we answer the question from a theoretical point of view. This leads us to show the need of reversing the simulation of the ambiances. The point is to modelize architectural shapes from the designer's intents in terms of ambiances. We propose to solve these inverse problems within the frame of the declarative geometrical modeling approach.

We implement this theoretical model for the sunlighting phenomenons. We grasp the limits of direct sunlighting simulation methods into the design process. We introduce a new formalization of the phenomenon as we treat it with the help of the integral geometry. We show that sunlighting problems as a whole, whether they are direct or inverse, can be described as problems of intersection between the objects of a scene and a complex sunbeams volume. This volume is a geometrical artefact which figures a space-time constraint of sunlighting. Its boundaries are determined using the Minkowski sum. These results lead us to propose a declarative model that is able to solve any sunlighting problem.

At last, we discuss the ways we can adapt this model to the architectural design practice. We present a demonstration software that brings our proposals together. Three architectural design examples give an illustration of how our system can be used.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	11
<b>Chapitre 1</b> Éléments de la problématique, hypothèses et champ d'application .....	19
<b>Chapitre 2</b> Méthodes de simulation directe de l'ensoleillement .....	65
<b>Chapitre 3</b> Limites des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement Position du problème inverse .....	115
<b>Chapitre 4</b> Formalisation des problèmes d'ensoleillement Solution du problème inverse .....	149
<b>Chapitre 5</b> Interprétation géométrique Détermination de la frontière d'une pyramide d'ensoleillement .....	179
<b>Chapitre 6</b> Discussion de la méthode dans le cadre du projet d'architecture Développement du logiciel <i>Solimac</i> .....	219
<b>Chapitre 7</b> Illustrations .....	265
<b>Éléments de conclusion, perspectives de recherche</b> .....	293
Bibliographie .....	301
Table des matières .....	311
Table des figures .....	318

# Introduction générale

## Contexte de la recherche

L'architecture et la ville constituent un objet d'étude complexe dont les descripteurs potentiels sont nombreux et très divers. Pour les simplifier à l'extrême et pour introduire le plus simplement la problématique des ambiances, considérons que l'architecture et la ville définissent un environnement qui s'impose ou se propose à notre perception par des objets « stables » et par des objets « instables ». Les premiers sont bien connus : ce sont les manifestations matérielles, statiques et rigides qui délimitent les lieux, les habitacles, les réseaux, les décors que nous appréhendons de manière visuelle (par l'entremise de la lumière), tactile, kinesthésique et, dans certaines mesures, par le son et la chaleur.

Les seconds, objets instables par rapport aux premiers, à la fois dynamiques, volatiles et parfois insaisissables, représentent les ambiances dans cette dialectique simplifiée. Pour en donner une image, disons que les ambiances « remplissent » notre environnement et composent le milieu ambiant dans lequel nous sommes par nécessité, par plaisir ou par hasard — plongés. Elles s'offrent à notre perception sensorielle et sensible par l'entremise de la lumière, du vent, des sons, des odeurs, de la chaleur... phénomènes dits physiques bien qu'également architecturaux et paysagés.

De manière plus formelle, il est possible de considérer que les ambiances résultent de la perception que nous avons des interactions entre les phénomènes physiques et l'environnement architectural et urbain. Les ambiances sont donc doublement construites — et constructibles. D'une part, elles sont construites par l'environnement puisqu'elles résultent des interactions entre celui-ci et les phénomènes physiques, qu'ils soient ceux que le site et le climat nous imposent (le vent, la chaleur, la lumière naturelle), ou ceux (les sons, les odeurs, la lumière artificielle) que nous produisons dans notre pratique et notre usage des lieux. D'autre part, les ambiances sont construites par notre perception, relativement aux référents culturels qui sont les nôtres, à notre sensibilité, à notre usage et à notre partage des lieux que nous habitons, traversons ou admirons. Les ambiances ne sont donc pas seulement physiques et sensorielles mais elles deviennent sensibles voire sensuelles, induisant des paysages et des milieux à caractère esthétique ou hédonique.

Cette description des ambiances n'est pas une définition. Cette dernière relève encore de l'hypothèse. De fait, s'il existe une tradition de préoccupations relatives au milieu ambiant, l'étude des ambiances comme objet scientifique apparaît récente. Plusieurs raisons peuvent expliquer cet état des choses. En premier lieu la gamme des ambiances s'élargit en même temps que se complexifient nos environnements architecturaux et urbains, développant de nouveaux sons, de nouvelles lumières, de nouvelles odeurs, etc. :

les ambiances émergent donc de nos paysages ordinaires, en termes de nuisances notamment (nuisances sonores, olfactives, lumineuses, etc.). Que ce soit une cause ou un effet de cette émergence, nos exigences de confort se sont parallèlement accrues et nos « besoins » d’ambiances domestiques (domestiquées et stabilisées) se sont développés. Les ambiances ont acquis une légitimité sociale que ne dément pas l’apparition dans le champ de la conception des « designers » d’ambiances capables de dépasser les seules approches physiennes pour élaborer des ambiances paysagées.

En second lieu, nos moyens et nos connaissances pour quantifier et qualifier les interactions entre les phénomènes physiques et l’environnement construit se sont considérablement développés depuis que la recherche dispose de l’instrumentation numérique pour évaluer la pertinence des modèles physiques. Les méthodes de simulation des interactions entre les formes et les phénomènes devraient conduire à des modèles d’évaluation des ambiances. En l’état des choses, les interrelations complexes qu’entretiennent les phénomènes entre eux restent difficiles à modéliser et l’ambiance, envisagée comme un ensemble « inter-phénoménal » et intersensoriel, n’apparaît pas dans les résultats des simulations. Cependant, le développement des recherches et l’accroissement constant des puissances de calcul doivent conduire à rendre cette perspective plausible à moyen terme.

Dans le même ordre, les recherches sur la perception et la cognition ouvrent de nouvelles perspectives pour qualifier notre appréhension des milieux. C’est d’écologie humaine, de psychologie, d’anthropologie et d’esthétique dont il s’agit. De nombreuses connaissances restent à construire dans ces domaines autour de la notion d’ambiance.

L’étude des ambiances est donc fortement interdisciplinaire. Elle tente d’une part de dépasser les clivages phénoménologiques introduits par la séparation des sens et des sensations. Elle essaie en outre de dépasser les problématiques locales du confort ou de l’inconfort, en introduisant une dimension esthétique à la perception des interactions formes / phénomènes. Enfin, elle tente de mettre en oeuvre ces dimensions descriptives dans le champ de l’analyse des objets architecturaux et urbains, en renouvelant pour une part les savoirs de ce domaine. Elle n’en est qu’à ses débuts. On trouvera les principales pistes de recherche aujourd’hui proposées dans les articles de J-F. Augoyard (1991, 1995) et de J-P. Péneau (1991).

## **Position du questionnement**

La problématique des ambiances renouvelle en partie le savoir architectural, par trop souvent penché sur la rigidité construite offerte au plaisir de l’oeil et oublieux des « autres sens ». Les ambiances offrent au contraire une entrée sur l’architecture et la ville séduisante à maints égards : alors que le

style des choses à voir s'enferme dans des débats académiques, les ambiances sont des objets « immédiats » qui interrogent à chaque instant les lieux que nous habitons, que nous pratiquons ou que nous supportons. Les ambiances proposent également un enrichissement des problématiques architecturales, en particulier parce qu'elles ancrent ces problématiques aux champs de recherche les plus contemporains.

Si les ambiances sont construites par les environnements architecturaux et urbains, elles deviennent alors « constructibles » par ceux à qui incombe la réalisation du cadre bâti. Se pose alors la question de la prise en compte des ambiances dans le processus d'élaboration et de réalisation de ces environnements. Plusieurs pistes de réflexion sont ouvertes à ce sujet. Certaines concernent les moyens de représentation et de communication des intentions d'ambiances dès la phase de programmation des ouvrages. Le processus de conception est alors envisagé dans sa dimension sociale, comme un jeu d'acteurs impliqués dans la réalisation collective du cadre bâti.

D'autres recherches parmi lesquelles nous situons nos travaux s'intéressent au caractère à la fois cognitif et instrumental du processus de conception. Celui-ci est alors considéré comme le travail de création et d'ajustement du projet effectué par l'architecte isolé. C'est du métier d'architecte dont il s'agit alors, de sa complexité intrinsèque entre création personnelle et adaptation sociale. Le problème se pose globalement comme suit : comment permettre que soient prises en compte les ambiances par l'architecte dans la mise en forme du projet ?

La difficulté apparaît ici manifeste. Si les objets stables de l'environnement se laissent facilement manipuler dans le cadre du projet, il n'en va pas de même avec les objets instables que sont les ambiances. Les interactions entre les formes et les phénomènes introduisent deux niveaux de difficulté. D'une part, leurs limites sont floues, formées de gradients dans une géométrie qui ignore généralement la droite et l'angle droit. Ces limites sont difficiles à représenter, encore plus à imaginer. D'autre part, les interactions entre les formes et les phénomènes sont dynamiques ; la dimension temporelle est essentielle à leur appréhension. Elles se manifestent suivant un rythme propre (deux phénomènes induisant une superposition de rythmes), dans une partition d'ambiances, le plus souvent complexe.

La prise en compte des ambiances dans le projet appelle alors des outils spécifiques de conception, capables de manipuler conjointement le flou des formes et la dynamique des phénomènes. La question que nous posons s'inscrit donc dans la problématique instrumentale de l'aide à la conception. Au niveau du projet, les interactions entre les formes construites et les phénomènes physiques se mesurent avec des outils de simulation. La simulation désigne pour nous le processus capable de reproduire les interactions entre les formes et les phénomènes physiques via un modèle de ces phénomènes.

Les résultats des simulations ne sont pas soumis à l'interprétation sensible in situ puisqu'ils ne s'adressent pas directement à nos sens. Ils sont interprétés par le concepteur qui inscrit par nécessité ou par jeu son propre imaginaire des ambiances dans le projet ou les représentations qu'il se fait de l'imaginaire et des attentes des futurs usagers de la construction.

La notion de simulation apparaît centrale pour la prise en compte des ambiances au niveau du projet et c'est elle que nous interrogeons dans notre hypothèse principale. La question que nous posons devient alors : quels outils de simulation mettre en oeuvre pour maîtriser les interactions entre phénomènes physiques et formes du projet dans le processus de conception architecturale ? Cette question nous invite à mettre en perspective les modalités actuelles d'utilisation des outils de simulation dans le projet. Il apparaît que ce sont des outils d'évaluation des interactions entre les formes et les phénomènes qui sont proposés au concepteur. Or, ces outils ont une caractéristique commune : ils ne peuvent être mis en oeuvre que sur des formes architecturales ou urbaines parfaitement déterminées. Ils ne sont donc utilisés qu'une fois le projet défini, c'est-à-dire a posteriori du travail de conception proprement dit par lequel le projet *est* défini.

Dès lors, ces outils de *simulation directe* ne remplissent pas leur rôle dans la conception des ambiances puisqu'ils ne participent pas à la mise en forme du projet. Ils interviennent comme outils d'évaluation et n'offrent que des solutions correctives sur le projet, lorsque les intentions initiales s'avèrent peu ou pas réalisées au vu des résultats des simulations.

Pour permettre l'intégration des ambiances dans le projet, il devient nécessaire d'envisager la mise en oeuvre d'outils de *simulation inverse*, telle est du moins notre hypothèse. Ces outils sont ainsi qualifiés parce qu'ils renversent la démarche habituelle de simulation : partant des intentions du concepteur, ils permettent de déterminer les conditions que doivent remplir les formes du projet afin de réaliser ces intentions. Ils garantissent en conséquence que les intentions initiales, ou l'interprétation que l'on en fait, sont prises en compte dans la mise en forme du projet.

La simulation inverse appartient à une catégorie plus générale de problèmes inverses traités dans les champs des sciences physiques, de la modélisation géométrique, de l'automatique ou de l'imagerie. Un domaine de recherche particulier, dit de modélisation déclarative, adresse une problématique similaire dans le champ de la modélisation géométrique sous contraintes. Les collaborations scientifiques engagées entre notre laboratoire et le groupe de recherche sur la modélisation déclarative nous ont permis de prendre appui sur les résultats établis dans ce domaine. C'est ainsi que nous proposons une approche déclarative des ambiances dans le projet d'architecture en nous appuyant sur la notion de simulation inverse. Nous préciserons les modalités pratiques de cette approche dans le prochain chapitre.

## Développement de la recherche

Pour valider cette approche, nous avons réduit notre problématique à un phénomène physique particulier : l'enseillement. Nous définissons l'enseillement comme l'ensemble des interactions géométriques entre la lumière naturelle, dans sa composante directe, et l'environnement construit. Le choix de ce phénomène est justifié par diverses considérations que nous discuterons, ayant trait d'une part au caractère transversal de l'enseillement dans la qualification des ambiances et d'autre part au fait que la description de ce phénomène s'effectue de manière seulement géométrique.

Précisément, dans la suite de ce rapport, nous ne confondrons pas enseillement et éclairement. L'enseillement limite les interactions entre la lumière et l'environnement construit aux seules taches géométriques. L'univers de l'enseillement est donc binaire, en blanc et noir. Il est défini par les taches dynamiques d'ombre et de lumière qu'impose un soleil voyageur dans un ciel uniformément bleu. Au contraire, l'éclairement appréhende les interactions physiques entre la lumière et l'environnement et pose le problème, en partie non résolu, de la diffusion lumineuse. L'univers de l'éclairement est en demi-teintes, du gris foncé au gris clair, sous un ciel diffus non homogène. Ce ne sera pas le nôtre dans cette étude, strictement focalisée sur les questions d'enseillement. Lorsque des valeurs « grises » interviendront dans nos propos, ce sera parce que nous aborderons l'intégration des états d'enseillement dans le temps ; ces valeurs ne traduiront alors que des moyennes temporelles d'enseillement.

Considérant cette réduction nécessaire de notre champ d'application, nos objectifs pour cette recherche peuvent se formuler ainsi : définir une méthode de simulation inverse de l'enseillement et vérifier sa pertinence dans le processus de conception architecturale.

Nous rendons compte de nos résultats en développant le plan suivant. Dans le chapitre premier nous construisons plus rigoureusement notre problématique et nos hypothèses. A travers un modèle simplifié du processus de conception en architecture, nous tentons de faire émerger l'existence de problèmes directs et des problèmes inverses dans le projet. Nous ne réduisons pas le projet à ces problèmes mais nous montrons que ceux-ci sont appelés à être résolus dans le cours de la conception. En appliquant ce modèle aux ambiances, nous définissons des problèmes de simulation directe et des problèmes de simulation inverse des interactions entre formes et phénomènes. Nous tentons de montrer que la résolution de ces deux types de problèmes est également nécessaire à la conception. Cette hypothèse justifie notre ambition de définir une méthode générale de simulation inverse de l'enseillement adaptée au projet d'architecture. Nous montrons que le cadre méthodologique défini par l'approche déclarative en modélisation

géométrique est adapté pour appréhender cette question. C'est dans ce cadre général que nous situons finalement nos propositions.

Les chapitres 2 et 3 dressent un état de l'art des connaissances concernant la simulation d'ensoleillement. Au chapitre 2, nous présentons une synthèse de l'ensemble des méthodes de simulation directe. Au chapitre 3, nous observons les tentatives effectuées pour résoudre le problème inverse. Nous constatons qu'aucune des méthodes proposées ne résout le cas général tel que nous le définirons.

Les chapitres suivants font état de nos propositions. Au chapitre 4, nous introduisons une nouvelle formalisation des problèmes d'ensoleillement en nous appuyant sur la géométrie intégrale. Cette formalisation met principalement au jour un nouvel être géométrique : la pyramide complexe d'ensoleillement. Celle-ci est définie comme un volume de rayons solaires et représente géométriquement une contrainte spatio-temporelle d'ensoleillement. Nous montrons que tous les problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses, s'expriment de manière homogène avec cette notion. Nous proposons un modèle déclaratif de formulation et de résolution de ces problèmes et nous apportons une solution générale au problème inverse de l'ensoleillement.

Pour mettre en application ce modèle, nous proposons au chapitre 5 une méthode de construction d'une pyramide complexe d'ensoleillement en utilisant la somme de Minkowski (intégration spatio-temporelle). Nous développons ensuite dans le chapitre 6 quelques modalités pratiques de mise en oeuvre de ces résultats dans le contexte de la conception architecturale. Nous présentons le prototype logiciel que nous avons développé.

Enfin, le dernier chapitre discute les difficultés de la validation de nos propositions. En lieu et place d'une validation stricto sensu, nous exposons trois projets que nous avons réalisés en utilisant notre outil.

# Chapitre 1

## Éléments de la problématique hypothèses et champ d'application



## 1.1 Problématique et hypothèses

Comment permettre la prise en compte des ambiances dans le projet architectural ? Notre hypothèse résulte avant tout d'une intuition personnelle et s'appuie sur un modèle du processus de conception en architecture qui nous est propre. Elle est représentée par la notion de « simulation inverse » appliquée aux ambiances architecturales. Cette notion nous conduit à considérer une mise en oeuvre instrumentale dans le cadre méthodologique défini par l'approche déclarative en modélisation géométrique. Il en résulte ce que décrit l'intitulé de ce rapport, c'est-à-dire un ensemble de propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Nous développerons pratiquement ces propositions pour un phénomène d'ambiance particulier : l'ensoleillement, dont nous décrirons les implications ambiantales et architecturales dans la section suivante.

Dans cette section, nous tentons de construire notre problématique et nos hypothèses. Pour ce faire, nous procédons par une démarche déductive en trois points. En premier lieu, nous adoptons une représentation couramment admise du projet architectural : le projet est un problème qui est formulé en même temps qu'il est résolu. Nous tentons de schématiser cette représentation en introduisant deux notions simples : les formes et les intentions du projet. Nous considérons alors que le projet constitue un double processus de démarcation simultanée de formes et d'intentions réalisé par la notion intermédiaire d'effet. Cette proposition nous amène à considérer qu'il existe deux classes de problèmes appelés dans le projet ; nous les définissons comme problèmes directs et problèmes inverses.

En second lieu, nous introduisons les ambiances dans ce modèle théorique pour faire apparaître de nouvelles notions : les effets d'ambiance, les problèmes directs d'ambiance et les problèmes inverses d'ambiance. Pour spécifier ces notions et leurs relations, nous faisons appel à une définition générale de la simulation : celle-ci est un processus capable de reproduire les interactions entre les formes et les phénomènes physiques. Nous pouvons alors définir des problèmes de simulation directe des ambiances et des problèmes de simulation inverse des ambiances dans le projet d'architecture. Nous montrons les limites des méthodes de résolution des problèmes de simulation directe. Parallèlement, nous montrons l'existence implicite ou explicite de la notion de simulation inverse dans divers travaux adressant une problématique analogue à la notre.

En dernier lieu, il nous reste à mettre en oeuvre nos hypothèses. Pour ce faire, il nous faut définir un cadre méthodologique susceptible d'accueillir nos travaux. Quel cadre choisir ? Pour répondre à cette question, nous spécifions notre problème comme une forme particulière d'un problème de mo-

délisation géométrique sous contraintes. Il s'agit en effet pour nous de modéliser des formes architecturales par les contraintes résultant d'intentions d'ambiance. Nous proposons de mettre en oeuvre ce programme dans le cadre méthodologique défini par l'approche déclarative en modélisation géométrique, plus couramment dénommé modélisation déclarative. Nous décrivons brièvement les objectifs de cette approche. Nous concluons enfin cette section en montrant les spécificités de notre problématique dans ce cadre et en exposant les principales questions qui se posent à nous.

### 1.1.1 Caractérisation de la conception architecturale

Ce que l'on appelle le processus de conception en architecture, c'est-à-dire l'ensemble des actions menant un architecte à la constitution du projet, a fait l'objet et continue de faire l'objet d'investigations importantes et variées. Une synthèse pertinente des recherches historiques dans ce domaine est donnée dans l'annexe 2 de l'ouvrage de D. Guibert (1987). On pourra par ailleurs se rendre compte de l'étendue des questionnements contemporains en lisant le compte-rendu averti que P. Boudon (1993) fait d'un séminaire sur le sujet. L'ouvrage de M. Conan (1990) participe également d'une tentative d'état de l'art. D'autres références bien connues (Boudon 1992, Prost 1992) apportent des hypothèses que nous ne développons pas ici.

Notre objectif n'est pas de faire l'analyse comparée des théories du processus de conception en architecture. Plus simplement, nous allons dans cette section tenter de développer un modèle simplifié de ce processus en utilisant une représentation généralement admise. Sur cette base, nous proposons plusieurs notions simples qui concernent successivement les éléments du projet (formes et intentions), les actions du projet (exposition et réalisation d'effets) et enfin les problèmes appelés par ces actions dans le projet (problèmes directs et problèmes inverses). Ce schéma ne prétend pas restituer la complexité du processus de conception. Il n'en constitue pour nous qu'une vision simplifiée, capable de supporter notre questionnement sur la prise en compte des ambiances.

#### 1.1.1.1 Les éléments du projets : formes et intentions

Le projet architectural est généralement considéré dans les catégories des problèmes mal définis (*ill-defined problems*), mal structurés (*ill-structured problems*) ou encore des problèmes dits « vicieux » (*wicked*). D. Guibert (1987) résume les caractéristiques de ces problèmes telles qu'elles ont été énoncées par différents auteurs :

- leur formulation n'est jamais définitive,
- chaque formulation implique telle solution et réciproquement,
- il n'existe pas de règle d'arrêt à la solution du problème, la terminaison

- du processus de conception provenant de pressions extérieures,
- la résolution du problème ne comprend pas de liste exhaustive d'opérations possibles ; tout est permis et rien n'est obligatoire,
- chaque problème est unique parce qu'il est situé différemment,
- aucune solution ne peut être testée de façon définitive,
- chacun des problèmes est imbriqué dans un ensemble de problèmes de niveau supérieur,
- pour chacune des solutions, il y a plusieurs explications possibles.

Les recherches méthodologiques sur le processus de conception ont mis en avant une représentation synthétique du projet architectural sous la forme suivante : le projet est un « problème » qui est formulé *en même temps* qu'il est résolu. Cette formulation revient à décrire la conception comme un processus « d'élaboration *conjointe* du problème (programme architectural) par spécification des contraintes et de la solution (le produit de la conception) » (Guibert 1987). Autrement dit, la conception doit être envisagée comme un processus dynamique de formulation / résolution concomitante d'un problème implicite, jamais posé ni jamais résolu définitivement.

C'est sur cette représentation générale que nous situons nos travaux. Pour schématiser cette représentation et raisonner sur quelques notions simples, capables de représenter la nature du projet d'une part et la dynamique du processus de conception d'autre part, nous proposons d'introduire deux classes d'éléments : les formes et les intentions du projet. Nous avançons les définitions suivantes :

- les *formes* représentent les « solutions » du projet, c'est-à-dire l'ensemble des spécifications de l'objet architectural à construire ; elles regroupent les caractéristiques matérielles, constructives, plastiques, d'usage... du projet dans son contexte, sans distinction dans ces catégories ;
- les *intentions* représentent l'« énoncé » du projet, c'est-à-dire l'ensemble des spécifications qui conduisent à la résolution du problème ; elles regroupent les propriétés du site, les contraintes / normes, les références et l'imaginaire du concepteur, sans plus de distinction dans ces catégories.

Ces éléments nous amènent à considérer le projet comme une composition de deux entités (figure 1.1). D'une part le projet est un *objet architectural*, défini par l'articulation des formes et soumis à une contrainte de crédibilité matérielle, constructive, esthétique, d'usage, etc. D'autre part, le projet est un *discours*, défini par l'articulation des intentions (le « parti » ou, suivant une terminologie plus contemporaine, le « concept » du projet). Le discours apparaît comme « théorique » (les théories de l'architecture sont en ce sens des canevas de discours du projet), ou plus souvent « rhétorique », c'est-à-dire mettant en jeu une argumentation appuyée sur des figures de sens dont, principalement, des métaphores.

Notons que contrairement à l'objet, le discours du projet n'est pas livré à l'usage mais à la critique. Il n'est pas « objectivable » en ce qu'il mêle des intentions contractuelles et des intentions personnelles, subjectives et parfois implicites. Les distorsions entre le discours et l'objet architectural peuvent faire l'objet d'analyses fines que nous n'aborderons pas ici.



Figure 1.1. Le projet architectural comme objet et discours

#### 1.1.1.2 Les actions du projet : exposition / réalisation d'effets

Nous avons considéré la conception architecturale comme un processus dynamique de formulation / résolution concomitante d'un problème implicite représenté par le projet. Ce sont donc les formes et les intentions du projet, suivant nos propositions, qui sont manipulées conjointement dans ce processus. Ces manipulations conduisent à la définition *simultanée* de l'objet et du discours associé constituant ensemble le projet architectural, c'est-à-dire la formulation du problème et sa solution à un instant donné de la conception.

Nous pouvons alors représenter la conception comme un double processus :

- un processus de démarcation de formes,
- un processus de démarcation d'intentions.

La démarcation des formes représente l'ensemble des actions mises en oeuvre pour isoler et articuler les formes du projet dans l'infinité potentielle des formes architecturales (esthétiques, constructives, d'usage, etc.). Parallèlement, la démarcation des intentions représente les actions conduisant à isoler et à articuler les intentions du projet. Ces processus sont de type décisionnel : ils conduisent par choix successifs à réduire le « champ des possibles » et à construire les articulations cohérentes de l'objet et du discours.

La démarcation des formes est réalisée par des outils graphiques (Lebahar 1983). Celle des intentions fait appel aux outils théoriques (la pensée logique) et rhétoriques (la pensée verbale). Hormis la pensée logique qui ne caractérise pas le travail de conception, ces outils apparaissent remarquables par leur aptitude à supporter le flou des premières formes et intentions. Une notion commune de la pensée graphique et de la pensée verbale est la notion de figure. Il pourrait exister dans le processus de conception une « pensée figurative » qui s'exercerait à la fois dans les formes et dans le discours.

Une hypothèse en ce sens est proposée par Boudon et al. (1988). Un point de vue concomitant situant la conception dans le champ de l'analyse rhétorique est donné par C.J. Baljon (1997).

Quelles sont les actions qui conduisent à démarquer les formes et les intentions du projet ? Quelles transactions entre formes et intentions permettent-elles d'assurer la cohérence de ces actions, c'est-à-dire l'adéquation relative des formes et des intentions ? Pour répondre à ces deux questions, il nous faut introduire un élément nouveau du projet, que l'on peut considérer à la fois comme *intermédiaire* et *médiateur* entre les formes et les intentions. Nous représentons cet élément par la notion d'*effet*.

Pour le définir par l'absurde, l'effet n'est ni une forme ni une intention, ni un objet ni un discours. L'effet est un médiateur qui permet, dans le projet, de confronter les formes et les intentions. Il représente une *interprétation* des unes relativement aux autres dans les divers registres du projet (usage, construction, plastique, ambiances, etc.). L'effet permet donc :

- d'interpréter les formes du point de vue des intentions ; les formes produisent alors différents effets dont certains seront exposés et confrontés aux intentions courantes (effet esthétique d'une forme, effet de la disposition d'une paroi sur la stabilité de la structure, etc.),
- d'interpréter les intentions du point de vue des formes : pour réaliser une intention, il est nécessaire de définir un effet, ou un ensemble d'effets, qui induisent des formes (les intentions constructives, d'usages, etc. prennent « forme » par des effets).

Dès lors, le projet comme objet et discours peut être considéré comme une articulation d'effets, plus ou moins explicites, souvent contradictoires et de natures très diverses. Certains de ces effets ne renvoient qu'à l'architecture elle-même, par des parodies formelles qui explicitent des intentions critiques ou référentielles. Une manifestation tangible de ces effets est accessible dans les croquis d'architecture qui mêlent dans une même *figure* des formes dessinées et des intentions écrites, les unes renvoyant aux autres.

Suivant ce schéma, les processus de démarcation des formes et des intentions peuvent être considérés comme deux types d'actions mettant en jeu les effets. Nous observons (figure 1.2 page suivante) :

- des actions d'*exposition*, qui permettent de démarquer les formes : il s'agit d'interpréter les formes du point de vue des intentions, pour confronter les effets résultants aux intentions courantes d'une part, et pour faire émerger de nouvelles intentions d'autre part ;
- des actions de *réalisation*, qui permettent de démarquer les intentions : il s'agit d'interpréter les intentions du point de vue des formes, pour comparer les effets induits aux formes courantes d'une part, et pour faire émerger de nouveaux effets et les formes associées enfin.

Cette dialectique exposition / réalisation au travers de l'effet permet de représenter ce que nous désignons, par une analogie mécanique, comme le moteur du projet. Deux phénomènes d'émergence apparaissent dans cette mécanique du projet : l'émergence des intentions par les formes et l'émergence des formes par les intentions. Ces phénomènes représentent selon nous la dynamique de la conception.



Figure 1.2. La notion intermédiaire d'effet

#### 1.1.1.3 Les problèmes du projet : problèmes directs et problèmes inverses

Nous avons défini les éléments du projet (formes et intentions, objet et discours) et les actions sur ces éléments (exposition / réalisation d'effets). A partir de ces actions, nous proposons de mettre en évidence deux classes de problèmes qui sont appelés à être résolus dans le projet (figure 1.3) :

- les problèmes directs (actions d'exposition),
- les problèmes inverses (actions de réalisation).

Suivant ce découplage, la dynamique du projet n'est rendue possible que par la capacité du concepteur à résoudre, de manière explicite ou implicite, des problèmes directs et des problèmes inverses. Il nous faut dès lors envisager qu'il existe des méthodes de résolution de ces problèmes qui sont mises en oeuvre, explicitement ou implicitement, dans le processus de conception. Quels sont ces problèmes et quelles sont les méthodes associées ?

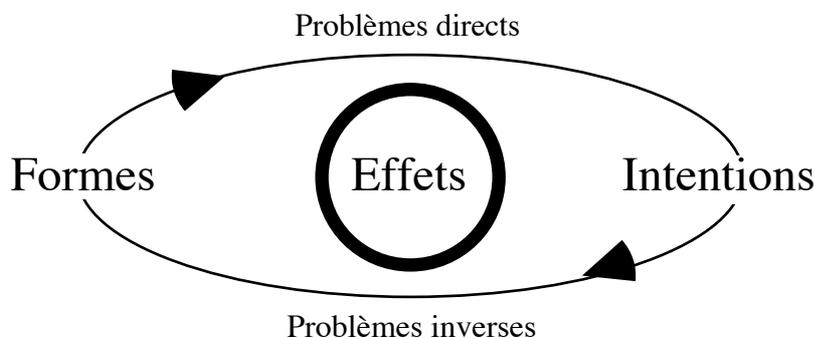


Figure 1.3. Problèmes directs en inverses du processus de conception

Pour définir la notion de problème inverse, nous pouvons recourir à une acception générale utilisée dans le champ des sciences physiques. Il existe dans ce champ une forme de théorie des problèmes inverses. Résoudre un tel problème consiste à « déterminer les causes inconnues d'effets connus ». Les effets sont donnés par les mesures effectuées sur un système ; les causes à déterminer correspondent alors aux valeurs des paramètres du système susceptibles de produire ces effets. La résolution de ces problèmes s'effectue par des méthodes mathématiques dont une importante littérature fait état (cf. par exemple Alifanov 1996, Menke 1989).

Si l'on admet que les problèmes inverses partent des effets pour déterminer les causes susceptibles de produire ces effets dans un contexte donné (ce en quoi ils inversent les problèmes classiques consistant à déterminer les effets de causes connues), différentes applications de ces problèmes apparaissent alors. On en trouve des exemples dans les domaines de l'automatique (pilotage inverse) ou de l'imagerie (reconnaissance de formes). Dans le champ de la modélisation géométrique, les problèmes de modélisation sous contraintes peuvent être considérés comme des problèmes inverses : les effets sont représentés par les contraintes et les causes à déterminer sont les propriétés géométriques ou topologiques des objets à modéliser capables de vérifier ces contraintes. Nous reviendrons sur ce point dans le § suivant.

Dans le domaine de la conception, les problèmes directs et inverses trouvent une interprétation immédiate : les effets connus représentent les intentions du concepteur et les causes à déterminer sont les formes du projet susceptibles de réaliser ces intentions. Nous retrouvons là une équivalence formelle entre l'effet de la physique et l'effet comme notion intermédiaire entre formes et intentions : les formes-causes produisent des effets-intentions (problème direct) et les intentions-effets produisent des causes-formes (problème inverse).

Suivant cette dialectique effets / causes, les problèmes directs du projet consistent à exposer les effets d'un ensemble de formes articulées pour comparer ces effets aux intentions courantes. Ces problèmes peuvent être résolus de manière triviale (mesurer l'effet de la largeur d'une voie sur le passage d'un véhicule), faire appel à un savoir expert (lire un plan, évaluer une structure) ou appeler des outils de calcul spécialisés (déterminer le facteur de lumière du jour dans une pièce).

Suivant la même dialectique, un problème inverse est défini dès qu'une intention est identifiée comme un effet potentiel du projet. La résolution du problème inverse consiste alors à déterminer les formes, ou plus généralement les conditions à appliquer sur les formes, pour *réaliser* l'effet représentant l'intention. Il s'agit donc de réaliser une intention par l'intermédiaire d'un effet donné, c'est-à-dire métaphoriquement, de « transformer l'effet » en lui donnant forme dans le projet. Comme pour les problèmes directs,

cette transformation peut être triviale (passer d'un effet carré à une forme carrée est généralement facile), nécessiter un savoir expert ou appeler des outils spécialisés.

#### 1.1.1.4 L'aide à la conception architecturale

En résumé, nous sommes partis d'une représentation générale de la conception comme processus dynamique de formulation / résolution concomitante d'un problème implicite, jamais posé ni jamais résolu définitivement. Nous avons identifié les éléments de ce projet comme des formes et des intentions. Celles-ci évoluent parallèlement dans la fabrication du projet, défini à la fois comme un ensemble de formes articulées (l'objet construit) et comme un ensemble d'intentions articulées (le discours associé à l'objet).

Entre les formes et les intentions, nous avons introduit la notion d'effet comme objet intermédiaire et médiateur du projet. D'un côté, l'effet résulte de l'articulation des formes et permet de juger de leur pertinence par rapport aux intentions. De l'autre côté, l'effet permet de représenter une intention pour contraindre les formes. La dynamique de la conception s'exprime alors par des actions d'exposition des effets produits par les formes et par des actions de réalisation des effets induits par les intentions. Cette dynamique est mise en oeuvre à travers la résolution de problèmes directs et inverses. Nous avons noté que ces problèmes se situent dans un cadre scientifique connu. Comme il est souvent remarqué, la difficulté de la conception architecturale se situe alors dans le choix du « bon outil » au « bon moment ». Ceci suppose au minimum une information des savoirs et savoir-faire scientifiques contemporains du projet.

Il résulte de ce modèle qu'un outil d'aide à la conception est un outil de résolution des problèmes du projet — et non pas du projet comme problème, cette acception à la fois présomptueuse et trompeuse aboutissant nécessairement à une impasse. Pour être adaptés, les outils d'aide à la conception doivent permettre la résolution des problèmes directs et des problèmes inverses qui se posent au concepteur dans le jeu des effets entre formes et intentions. Qu'en est-il de ces problèmes et outils dans le champ des ambiances qui nous intéresse ?

### 1.1.2 Ambiances et projet d'architecture

En introduisant les ambiances dans ce modèle, nous voyons apparaître trois nouvelles notions : l'effet d'ambiance, les problèmes directs relatifs aux ambiances et les problèmes inverses d'ambiances. Nous allons en premier lieu tenter de préciser ce que recouvre la notion d'effet d'ambiance. En second lieu, nous introduisons la notion de simulation pour tenter de classer

les problèmes directs et inverses relatifs aux ambiances. Apparaissent alors des problèmes de simulation directe et inverse des effets d'ambiances. Nous montrons les limites des méthodes de simulation directe telles qu'elles sont exprimées par de nombreux auteurs et nous proposons l'esquisse d'une nomenclature des méthodes de simulation inverse des ambiances.

### 1.1.2.1 Les effets d'ambiance

La notion d'effet que nous plaçons au centre de notre modèle nous conduit à considérer, au sujet des ambiances, la notion d'*effet d'ambiance*. Qu'est-ce qu'un effet d'ambiance dans le projet architectural ?

Pour répondre à cette question, il est possible de recourir à la notion d'effet sonore (Augoyard 1991) mise en oeuvre dans le Répertoire des effets sonores (Augoyard et al. 1995). L'effet sonore est présenté comme une notion transversale, représentant les interactions *perçues*, tant physiques qu'esthétiques, entre les phénomènes acoustiques et l'environnement urbain. L'intérêt manifeste de cette notion est d'organiser la complexité intrinsèque des interactions formes / phénomènes suivant une modalité perceptive. Pour la plupart des phénomènes physiques, ces interactions se présentent comme des objets aux contours à la fois flous et dynamiques. Les représentations graphiques ou descriptives ne peuvent pas rendre compte facilement de ces objets, soit parce qu'elles expriment des situations statiques, soit parce qu'elles ne représentent que des objets aux contours (visuels) nets. En outre, elles n'introduisent que partiellement (dans la forme, graphique ou verbale) la perception de ces interactions. En renvoyant aux sens, la notion d'effet permet suivant J-F. Augoyard (1991) « un aller et retour cohérent entre le donné sonore et l'interprété ».

Par extrapolation de cette représentation des effets sonores, il est possible de considérer les effets d'ambiance du projet comme une notion intermédiaire entre les données d'ambiance (les interactions formes / phénomènes) et l'interprétation qu'en a le concepteur. Nous retrouvons le rôle médiateur de l'effet introduit dans notre modèle. Les effets d'ambiance correspondent alors à une interprétation des interactions formes / phénomènes du point de vue des intentions (exposition) et à une interprétation de ces interactions du point de vue des formes (réalisation). Cette notion d'interprétation est résumée par L. Mudri (1994) qui en donne une vision sensible et juste :

*« Si l'architecte n'a pas de rêve, le bâtiment n'a pas d'âme. Mais s'il ne respecte pas les contraintes physiques ou s'il ne sait pas interpréter son rêve dans le langage des contraintes physiques, son rêve ne trouvera pas de matérialisation. »*

Il s'agit bien d'interpréter le rêve (les intentions) dans un langage (les effets) capable de renvoyer à la matérialité physique, c'est-à-dire aux formes et à leurs interactions avec les phénomènes.

Cependant, l'interprétation des effets par les formes et par les intentions est soumise aux distorsions imaginaires propres au processus de conception. La sensibilité du concepteur, ses références et son expérience vécue sont seules mises en cause. Plusieurs remarques résultent de ce constat. La première est que l'effet d'ambiance du projet est relatif à l'expérience sensible du concepteur. La seconde, corollaire, est qu'un concepteur ne peut mettre en oeuvre une interprétation des effets d'ambiances que sur l'expérience des ambiances qu'il s'est construite ; cette remarque met en évidence la responsabilité esthétique du concepteur et son implication sensible. Une troisième remarque enfin, déduite des précédentes : à travers l'interprétation du concepteur, nous pouvons considérer que la conception d'effets d'ambiance est une démarche potentiellement artistique puisqu'elle fait montre d'une sensibilité personnelle. Les ambiances sont alors introduites, au même titre que les objets matériels du projet, comme un élément de l'esthétique architecturale.

#### 1.1.2.2 Exposition des effets d'ambiances par simulation directe

Comment s'effectuent les actions d'exposition et de réalisation des effets d'ambiances dans le projet architectural ? Considérons en premier lieu l'exposition d'un effet d'ambiance. Il s'agit par définition d'exposer les interactions entre les phénomènes physiques et les formes du projet pour les soumettre à l'interprétation. Ces interactions sont généralement peu intuitives parce qu'elles mettent en jeu des phénomènes physiques complexes et parce qu'elles s'expriment à la fois dans le temps et dans l'espace. Les outils et méthodes réalisant cette exposition sont généralement désignés comme outils et méthodes de *simulation*.

Cette notion de simulation est centrale dans la problématique des ambiances et de la conception. Pour réduire l'ambiguïté de ce terme qui renvoie implicitement aux idées de simulacre et de dissimulation, nous définissons la simulation comme le processus capable de reproduire les interactions entre un ou plusieurs phénomènes physiques et les formes construites, *via* un modèle de ces phénomènes. Le modèle peut être simpliste ou sophistiqué ; l'essentiel est que le processus puisse reproduire avec *fidélité* les interactions formes / phénomènes — la fidélité étant alors définie par la quantité et la qualité d'informations suffisantes pour *interpréter* ces interactions en termes d'effets dans un contexte de conception architecturale (c'est l'une des spécificités de la simulation appliquée à l'architecture que d'admettre une échelle de fidélité cohérente avec les échelles de la perception).

Les outils et méthodes de simulation capables d'exposer les interactions formes / phénomènes sont donc des outils de résolution du problème direct des ambiances. Désignons-les comme outils de simulation directe. Ces outils bien connus sont mis en oeuvre suivant le processus schématisé dans la

figure 1.4. Quel que soit le modèle utilisé (modèle simplifié, modèles analogiques ou numériques de différents niveaux de complexité), il s'agit d'évaluer les interactions entre les formes du projet et un ou plusieurs phénomènes physiques. Ce processus permet d'exposer les interactions, d'interpréter les effets d'ambiance résultants et de comparer ces effets aux intentions courantes : les effets satisfont-ils les intentions ? Peuvent-ils faire émerger de nouvelles intentions ?

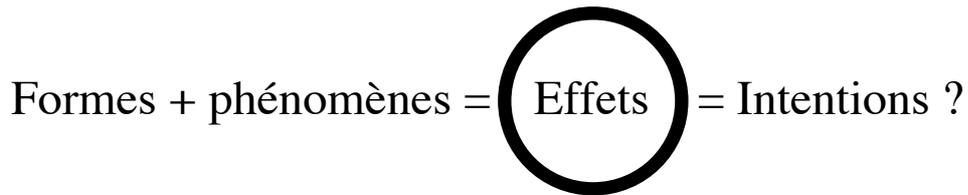


Figure 1.4. Simulation directe des effets d'ambiance

Ces outils d'exposition sont nécessaires à la conception. Cependant, ils ne sont pas suffisants parce qu'ils ne permettent pas la formulation, la manipulation ni la réalisation d'intentions concernant les ambiances. Leurs limites ont été soulignées par de nombreux auteurs. Nous pouvons les résumer par les trois propositions suivantes :

- ils ne peuvent intervenir que sur des formes définies,
- en conséquence, ils ne peuvent être mis en oeuvre qu'une fois le projet déterminé, c'est-à-dire lorsque le « parti » du projet a été arrêté ;
- d'où il résulte qu'ils ne participent pas à la mise en forme du projet : ils interviennent a posteriori de la conception, comme outils d'évaluation et de correction du projet.

La mise en oeuvre de ces outils n'est possible qu'en considérant le projet comme un processus de type essai-erreur. Suivant ce processus, il s'agit de produire une forme (essai), de la soumettre à la simulation, d'en observer les effets et de comparer ces effets aux intentions courantes. Si les effets s'avèrent contraires aux intentions (erreur), un nouvel essai doit être tenté dont rien ne garantit a priori qu'il sera plus concluant que le premier.

Ce processus par essai-erreur n'est pas adapté à la conception architecturale pour deux raisons. En premier lieu, ce processus suppose que les intentions sont données a priori et que le projet correspond à un ensemble d'actions conduisant simplement à leur réalisation. La conception est alors envisagée comme un processus de résolution d'un problème global décomposé en sous-problèmes correspondant chacun à une intention particulière. Or, nous considérons au contraire que les intentions sont, comme les formes, des objets dynamiques du projet : elles sont définies, transformées et réalisées au

fur et à mesure de la conception. Le discours qu'elles déterminent n'est donc pas donné a priori.

La seconde raison est propre à l'aspect multi-critères de la conception architecturale. Pour définir une hypothèse formelle (essai), il faut adopter un « parti » architectural qui constitue une ébauche du projet. Ce parti contient en lui-même toutes les intentions fondatrices du projet. Dès lors, si l'évaluation de ce parti par un outil de simulation directe montre des dysfonctionnements importants du projet (erreur), deux choix seulement s'offrent au concepteur : définir un nouveau parti, c'est-à-dire recommencer le projet, ou corriger les erreurs constatées. L'expérience montre que la transformation du parti à une étape avancée du projet est toujours difficile ; en effet, elle oblige le concepteur à remanier le discours associé au projet et, en conséquence, à modifier ses engagements. La correction du projet a posteriori apparaît comme une forme hybride de conception qui s'avère généralement délicate (elle remet en cause les choix initiaux) et coûteuse. Elle n'est donc jamais satisfaisante.

#### 1.1.2.3 Réalisation des effets d'ambiances par simulation inverse

Les limites des méthodes de simulation directe des ambiances peuvent être considérées dans le cadre général de la mécanique de la conception. Celle-ci est représentée selon nous par un double processus d'exposition / réalisation, mis en oeuvre par la résolution de problèmes à la fois directs et inverses. L'exposition des effets d'ambiance n'est pas suffisante. Il faut donc qu'il existe des méthodes de résolution du problème inverse pour rendre effective la dynamique du projet autour des ambiances. La résolution du problème inverse des ambiances consiste à réaliser les intentions d'ambiances du projet, c'est-à-dire pour le concepteur, à passer des intentions aux formes en définissant un effet capable de contraindre les formes. C'est ce que nous désignons comme le processus de simulation inverse des ambiances dans le projet architectural (figure 1.5).

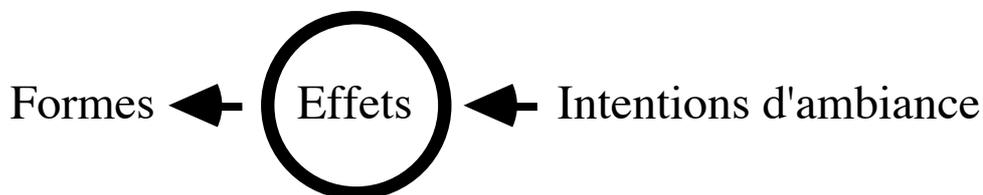


Figure 1.5. La simulation inverse des ambiances

S'agit-il encore de simulation ? Nous avons défini celle-ci comme le processus capable de *reproduire* les interactions entre un ou plusieurs phénomènes physiques et les formes construites, *via* un modèle de ces phénomènes. Sans

jouer sur les mots, considérons simplement la polysémie de l'action de « reproduction ». Reproduire est à la fois imiter et engendrer. L'imitation des interactions formes / phénomènes est bien ce que recouvre la simulation directe du projet. Qu'est-ce alors qu'engendrer ces interactions dans le projet ? C'est générer les formes du projet de telle manière que ces interactions existent : ceci revient à réaliser par les formes par les effets d'ambiances et correspond à ce que nous désignons comme le problème inverse des ambiances. Notre définition de la simulation recouvre donc bien à la fois les processus de simulation directe et de simulation inverse.

Conformément à notre modèle de la conception, les outils et méthodes de simulation inverse des ambiances doivent satisfaire trois conditions :

- permettre de formuler des intentions d'ambiance, c'est-à-dire de définir des effets particuliers du projet concernant les ambiances,
- autoriser la manipulation et la transformation de ces intentions, au fil de la conception, pour permettre le développement du discours du projet,
- être capables de réaliser les effets donnés en déterminant les conditions à appliquer sur les formes pour ce faire et, pratiquement, en déterminant les formes elles-mêmes réalisant ces effets.

Ces outils existent-ils ? Un témoignage de la validité de notre modèle serait que soient partagées nos hypothèses et, en particulier, que soient proposés dans la littérature des outils et des méthodes de simulation inverse des effets des interactions entre formes et phénomènes. Une investigation bibliographique s'impose donc. Nous avons effectué cette investigation dans notre champ d'application restreint à l'ensoleillement et aux implications de l'ensoleillement (éclairage naturel, énergétique) — nous en donnerons les résultats au chapitre 3. Pour synthétiser ces résultats, nous pouvons faire ici un constat et une proposition.

Pour ce qui est du constat : la notion de simulation inverse existe de manière explicite dans la littérature concernant des problématiques voisines de celle que nous posons. Ainsi, Radford et Gero (1979), G. Stevens (1990) ou Schoeneman et al. (1993) utilisent cette notion pour introduire certains problèmes d'optimisation appliqués à la conception (nous y reviendrons au chapitre 3). Dans une perspective analogue, Augenbroe et Winkelmann (1991) spécifient les types de problèmes posés par l'intégration des outils de simulation dans le projet. Selon les auteurs, ces problèmes sont de type inverse (« que dois-je faire pour obtenir ce résultat »), de type interrogatif (« pourquoi ce que j'obtiens n'est pas ce que j'avais prévu ») et enfin de type incrémental (« faire comme avant mais un peu différent »). Les auteurs préconisent des approches « intelligentes » de la simulation (systèmes experts) pour aider à la résolution de ces problèmes, et en particulier des problèmes inverses. De fait, les méthodes de raisonnement automatique apparaissent comme des outils potentiels de résolution de problèmes inverses.

Pour ce qui est de notre proposition : nous considérons que les recherches recourant explicitement à la notion de simulation inverse représentent la face émergée d'un volumineux iceberg de connaissances. En réalité, il apparaît que de nombreuses approches d'aide à la conception utilisent implicitement cette notion et mettent en oeuvre des méthodes très diverses visant toujours à la résolution d'un problème inverse du projet. Nous proposons une classification de ces approches en trois catégories que nous désignons comme (cf. Siret 1996) :

- les approches par optimisation,
- les approches d'aide experte,
- les approches de type génératif (*Generate and Test*).

Toutes ces approches possèdent en commun le fait de pouvoir formuler un objectif à atteindre (l'effet à réaliser) et de déterminer les conditions que doivent vérifier les formes du projet pour satisfaire cet objectif (réaliser l'effet). Nous décrivons au chapitre 3 les avantages et inconvénients de chacune d'elles en nous appuyant sur des exemples ayant trait à notre champ d'application.

#### 1.1.2.4 L'aide à la conception des ambiances

Notre proposition présente un double intérêt :

- d'une part, elle nous permet de mettre au jour des méthodes connues de résolution de problèmes inverses et d'envisager l'application de ces méthodes au problème que nous posons (cf. chapitre 3),
- d'autre part, elle offre un contexte problématique commun à des recherches considérées souvent comme disparates bien que toutes appliquées à l'aide à la conception.

Ces recherches s'appuient toutes sur les limites des méthodes de simulation directe et proposent en échange des méthodes de simulation inverse, dans le cadre méthodologique qu'elles supposent être le mieux adapté.

Si l'aide à la conception n'est que l'aide à la résolution des problèmes qui se posent dans le projet à travers le jeu des formes et des intentions (ce que nous avons suggéré plus haut), alors l'aide à la conception des ambiances se situe dans une problématique générale : la résolution des problèmes de simulation directe et inverse des interactions formes / phénomènes. Les approches mises en oeuvre pour ce faire ne sont finalement différenciées que par les hypothèses méthodologiques qu'elles utilisent.

C'est dans ce contexte problématique que nous situons nos propres travaux. La nouveauté de notre approche vient alors de ce que nous nous plaçons dans un cadre méthodologique qui n'a pas été utilisé dans le champ des ambiances : celui de l'approche déclarative en modélisation géométrique.

### 1.1.3 Mise en oeuvre d'une approche déclarative

En proposant la notion de simulation inverse, nous apportons un cadre général de représentation et de résolution des problèmes relatifs à l'intégration des ambiances dans le projet. Cette hypothèse est compatible avec le modèle du processus de conception que nous proposons puisqu'elle en est directement issue. Il est donc possible d'envisager sa mise en oeuvre pour résoudre le problème que nous posons.

Pour cela, il nous faut à présent constituer un cadre méthodologique susceptible d'accueillir nos travaux. La notion de simulation inverse est utilisée dans de nombreuses approches scientifiques qui peuvent toutes prétendre être utiles à l'étude des ambiances dans le projet. Quelle approche choisir ?

Pour répondre à cette question, nous devons considérer la finalité de notre problème. Nous souhaitons produire des formes qui réalisent des intentions d'ambiance ; pour ce faire, nous avons introduit la notion d'effet d'ambiance représentant un type particulier d'interactions entre les formes et les phénomènes physiques et nous avons supposé que ces effets peuvent être réalisés par une méthode de simulation inverse. Ce processus nous conduit à considérer deux étapes :

- en premier lieu, il nous faut pouvoir déterminer les conditions que doivent vérifier les formes pour réaliser l'effet donné ; ceci constitue le problème physique de simulation inverse proprement dit,
- en second lieu, il nous faut pouvoir produire l'ensemble des formes elles-mêmes vérifiant ces conditions.

Ces formes sont finalement les « solutions » de la simulation inverse dans le cadre du projet. Leur construction s'identifie à un problème de modélisation géométrique sous contraintes. Il s'agit en quelque sorte de modéliser des formes architecturales sous « contraintes » d'effets d'ambiances (figure 1.6 ci-dessous).

Notre problème glisse donc par nécessité dans le champ de la modélisation géométrique. Les méthodes de modélisation sous contraintes et leurs appli-

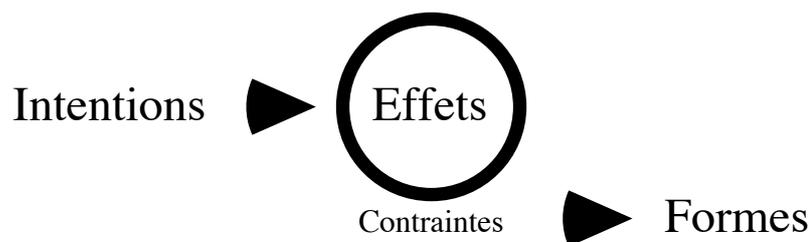


Figure 1.6. Notre problème sous l'angle de la modélisation géométrique

cations font l'objet d'une littérature abondante ; notre objectif n'est pas d'en faire l'inventaire ici. Parmi les différentes approches mises en oeuvre dans ce domaine, nous proposons d'appuyer nos travaux sur l'approche dite déclarative, plus couramment dénommée « modélisation déclarative » (Lucas et al. 1990, 1995). Il existe en effet une analogie méthodologique entre nos objectifs et ceux que se donnent les promoteurs de l'approche déclarative. En effet, celle-ci peut être vue comme une méthodologie de résolution de problèmes géométriques inverses capable de prendre en compte des effets de haut niveau conceptuel comme les effets d'ambiances.

Pour faire comprendre cette analogie, nous allons préciser les objectifs de la modélisation déclarative dans le paragraphe qui suit ; nous proposons parallèlement quelque éléments de caractérisation d'un modèle déclaratif de résolution de problèmes. Nous décrivons ensuite brièvement le fonctionnement d'un modèleur déclaratif. Enfin, nous montrons comment cette approche peut être appliquée pour notre problème de simulation inverse des effets d'ambiance et quels sont les questions qui se posent alors à nous.

#### 1.1.3.1 Caractérisation de la modélisation géométrique déclarative

D'un point de vue très général, la modélisation déclarative se donne pour objectif de modéliser des objets et des ensembles d'objets (notion de scène) par les propriétés qu'ils vérifient, indépendamment des modèles géométriques, topologiques, formels... sous-jacents. Pour ce faire, les modèleurs déclaratifs utilisent la connaissance (les propriétés) relative à l'objet à modéliser. Que cette connaissance soit univoque ou imprécise, le modèleur est capable de générer plusieurs, voire toutes les solutions correspondantes. Une exploration de l'ensemble des objets ainsi produits doit conduire l'utilisateur à choisir une ou plusieurs solutions répondant à ses attentes, particulièrement lorsque celles-ci s'énoncent de manière floue ou confuse dans les premières étapes d'un processus de conception.

Cette « philosophie » déclarative peut être caractérisée de plusieurs manières. Une façon simple de le faire est de l'opposer aux méthodes classiques de modélisation géométrique. Une façon plus difficile consiste à spécifier la notion de déclarativité dans le contexte de la modélisation géométrique. Précisons ces deux points de vue.

Il est facile d'opposer l'approche déclarative aux approches classiques de la modélisation géométrique, dites impératives ou procédurales. Ces dernières apparaissent à la fois explicites et concrètes :

- explicites parce qu'elles ne peuvent être mises en oeuvre qu'à partir d'une connaissance géométrique précise des objets à modéliser,
- concrètes parce qu'elle offrent des modèles réalistes dont l'objectif est essentiellement de simuler les formes matérielles ou naturelles.

La modélisation d'un objet ne peut s'opérer qu'au prix d'une « déconstruction » de cet objet suivant le modèle supporté par l'outil. Il s'agit globalement de déformer et d'assembler des primitives géométriques prédéfinies à l'aide de méthodes procédurales. Cette déconstruction est possible, quoique souvent laborieuse, lorsque l'objet est connu précisément. Elle devient impossible lorsque l'objet, en cours de conception, est une entité aux contours flous, sujette à d'importantes modifications. De fait, les modeleurs impératifs ne sont utilisés que dans les phases les plus avancées du processus de conception. Ils opèrent alors comme outils de représentation du projet.

A l'opposé, la modélisation déclarative propose une approche à la fois implicite et abstraite de la modélisation géométrique :

- implicite parce que le mode de construction géométrique de l'objet n'est pas donné a priori et peut être fonction du contexte d'utilisation ;
- abstraite parce que l'objet est défini par des propriétés conceptuelles plutôt que par son aspect matériel réaliste.

Pour reprendre notre terminologie, l'objet à modéliser est défini par ses effets et non pas par ses formes. La modélisation déclarative permet la représentation des intentions du concepteur par l'intermédiaire des propriétés appliquées aux objets. De fait, la description des propriétés peut être considérée comme une déclaration d'intentions. De ce point de vue, la modélisation déclarative se situe comme outil potentiel d'aide à la conception plutôt que comme outil de représentation.

Peut-on définir plus précisément la notion de déclarativité dans le contexte de la modélisation géométrique ? On s'accorde généralement à opposer le « déclaratif » au « procédural ». Une procédure est un enchaînement d'actions menant à un résultat déterminé. La résolution impérative d'un problème consiste à appliquer convenablement une suite de procédures jusqu'à l'obtention du résultat cherché. La *nature* de ce résultat et les moyens de l'obtenir sont donc donnés a priori. Il s'agit d'explicitier « comment » obtenir le résultat.

Au contraire, l'approche déclarative se contente du « quoi ». Une déclaration (ou description) spécifie les propriétés que doit avoir le résultat attendu, sans expliciter les méthodes pour atteindre ce résultat. Le rôle du système déclaratif consiste alors à fournir au moins une, sinon toutes les solutions du problème vérifiant ces propriétés.

Ceci n'est possible que dans une classe de problèmes donnée délimitant un domaine de connaissance fermé. En considérant cet aspect, nous pouvons introduire la notion de *modèle déclaratif d'une classe de problèmes*. Un tel modèle est caractérisé par deux éléments. D'une part, il possède un *langage de description* capable de représenter n'importe quel problème dans la classe considérée. D'autre part, il possède des *méthodes de résolution* de ces

problèmes, capables de déterminer les inconnues du problème spécifié. Suivant cette proposition, la mise en oeuvre d'un modèle déclaratif suppose une formalisation de la classe de problèmes considérée. C'est cette formalisation qui permet de définir le langage de description et d'associer des méthodes de résolution connues à chacun des types de problèmes énoncés.

Les modelers déclaratifs géométriques ajoutent un élément à ce modèle : ce sont les *méthodes de visualisation* des solutions générées. En effet, les solutions géométriques sont parfois des objets ou des ensembles d'objets complexes qui peuvent être difficiles à appréhender. Lorsqu'il existe plusieurs, voire une infinité de tels objets vérifiant une description donnée, le modeler doit fournir des méthodes capables de visualiser ces objets et, en particulier, d'en exposer les propriétés inconnues de l'utilisateur.

### 1.1.3.2 Structure d'un modeler géométrique déclaratif

Comment passer des intentions aux formes dans un contexte de conception en utilisant un modeler déclaratif géométrique ? Le schéma de la figure 1.7 ci-dessous tente d'explicitier ce passage en donnant le principe de mise en oeuvre d'un tel modeler. Trois zones apparaissent sur ce schéma : la zone de l'utilisateur manipulant les formes et les intentions du projet, celle de la machine (en grisé) supportant le modeler déclaratif et celle de l'interface entre l'utilisateur et la machine.

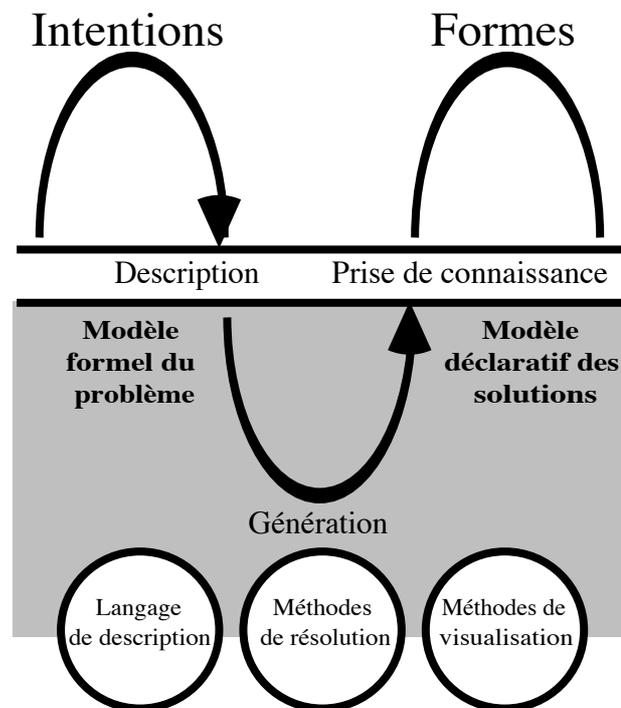


Figure 1.7. Principe d'utilisation d'un modeler géométrique déclaratif

Dans la zone de la machine, on reconnaît les trois éléments caractéristiques du modeleur : le langage de description, les méthodes de résolution et celles de visualisation. Le passage des intentions aux formes s'effectue en trois étapes qui correspondent à ces trois éléments :

- la description,
- la génération,
- la prise de connaissance.

La description est l'étape de saisie de l'ensemble des propriétés qui caractérisent l'objet à modéliser : il s'agit de poser le problème en utilisant le langage de description. Celui-ci est un code symbolique qui peut prendre différentes formes. Il peut s'agir d'un formalisme logique (programmation logique par contraintes), d'une convention graphique (description par dessin), d'un langage pseudo-naturel ou de toute autre forme qui correspond à la classe de problèmes considérée. Nous verrons que dans le cas des effets d'ensoleillement, une description à la fois graphique et verbale du problème est nécessaire.

L'interprétation de la description conduit à instancier ce que nous appelons le modèle formel du problème. Celui-ci représente le problème posé dans le formalisme propre au modeleur (systèmes d'équations, graphe de contraintes, etc.). Il s'agit alors de résoudre ce problème : c'est l'étape de génération des solutions réalisée par la machine. Deux catégories de méthode interviennent à cette étape : celles qui permettent la réduction de l'espace des solutions et celles qui permettent l'exploration de cet espace. Les méthodes de réduction s'appuient sur des algorithmes spécifiques du problème étudié, sur des mécanismes de raisonnement logique ou sur la résolution de systèmes de contraintes. Les méthodes d'exploration utilisent des arbres de recherche, des systèmes de tirages, des algorithmes génétiques, etc. Une littérature importante peut être trouvée sur ces méthodes (cf. Lucas et al. 1995).

La génération conduit à ce que l'on définit comme un modèle déclaratif des solutions. Ce modèle contient l'information nécessaire à la construction géométrique des solutions mais aussi d'autres connaissances déduites de la génération. La prise de connaissance de ces solutions est la dernière étape du processus de modélisation déclarative. Elle consiste à organiser la présentation visuelle des solutions, en permettant une sélection sur différents critères, en organisant différentes fenêtres d'affichage, ou encore en déduisant automatiquement les meilleurs points de vue. Cette étape doit être naturellement très interactive.

Ces trois étapes sont généralement organisées en cycles, comme le suggère la sinusoïde de notre schéma. Ceci signifie qu'il est possible de préciser la description initiale (c'est-à-dire de préciser ses intentions) en fonction des

résultats obtenus. La modélisation déclarative présente alors un aspect incrémental adapté au processus de conception puisqu'elle permet de formuler et de manipuler des intentions de manière dynamique. Elle satisfait donc à cette exigence de notre modèle de conception.

### 1.1.3.3 Notre problème du point de vue de la modélisation déclarative

L'approche déclarative en modélisation géométrique fournit un cadre méthodologique capable d'accueillir le problème que nous posons. Elle offre en effet deux caractéristiques pour nous indispensables :

- d'une part, elle se présente comme une méthodologie de résolution de problèmes géométriques inverses, ce qui correspond à notre ambition de résoudre le passage des intentions d'ambiances aux formes du projet,
- d'autre part, elle permet de considérer des propriétés de haut niveau conceptuel comme les effets d'ambiances que nous manipulons entre les intentions et les formes ; ces effets représentent des interactions sensibles entre les phénomènes physiques et l'environnement construit ; ils ne peuvent pas être représentés dans les modèles explicites et concrets des approches géométriques plus classiques.

Pour mettre en oeuvre une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural, il nous faut désormais nous soumettre à une contrainte nécessaire d'une part et envisager la résolution d'au moins deux problèmes d'autre part.

En premier lieu, il nous faut réduire notre champ de recherche à une classe de « problèmes d'ambiances », c'est-à-dire à une classe d'effets d'ambiance représentés par un type d'interaction entre les phénomènes et les formes. Ceci constitue la contrainte imposée par notre approche. Il est de fait impossible de raisonner sur tous les problèmes que posent les interactions formes / phénomènes. La réduction de notre investigation à un phénomène particulier correspondant à une classe fermée de problèmes est donc nécessaire. Nous avons choisi de nous intéresser aux problèmes d'ensoleillement pour différentes raisons que nous développons dans la section suivante.

Cette contrainte prise en compte, il nous faut envisager de résoudre deux problèmes. Le premier consiste à définir une formalisation de la classe de problèmes que nous considérons, c'est-à-dire de la classe des problèmes d'ensoleillement dans le projet architectural. Cette formalisation doit nous fournir un langage de description des problèmes d'ensoleillement d'une part et des méthodes de résolution de ces problèmes d'autre part. Le langage de description doit permettre de décrire les effets attendus, c'est-à-dire de formuler des déclarations d'intentions au sujet de l'ensoleillement dans le projet. Les méthodes de résolution doivent réaliser ces effets, c'est-à-dire effectuer la simulation inverse des interactions entre formes et phénomènes

physiques. Les méthodes de génération des solutions seront donc pour nous des méthodes de simulation inverse de l'ensoleillement qui nous permettront de déterminer les conditions à appliquer sur les formes du projet pour réaliser un effet donné.

Le second problème consiste à modéliser les solutions ainsi définies et à en permettre la prise de connaissance dans un contexte d'aide à la conception en architecture. Ce problème est intrinsèquement dépendant des solutions que nous aurons apportées à la simulation inverse. Nous l'aborderons lorsque nous aurons présenté notre formalisation et nos méthodes de résolution des problèmes d'ensoleillement.

## 1.2 Champ d'application : l'ensoleillement

Pour valider notre hypothèse, il nous faut l'appliquer, c'est-à-dire proposer une approche inverse des ambiances, au sens où nous l'avons définie, dans un contexte de conception architecturale. Cet objectif nous oblige à segmenter la définition générale des ambiances en nous focalisant sur un type d'interaction particulier entre un phénomène physique et l'environnement construit. Quel phénomène retenir ?

Nous avons choisi l'ensoleillement. Les raisons de ce choix sont multiples. Des raisons circonstancielles font que le laboratoire qui accueille nos travaux possède une expérience reconnue des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement (logiciel *Solène*, cf. chapitre 2). De manière plus générale, l'ensoleillement apparaît comme l'un des rares phénomènes physiques dont on maîtrise la simulation directe. Il nous est donc apparu possible d'envisager la mise en oeuvre d'une approche inverse de l'ensoleillement.

Des raisons plus fondamentales font de l'ensoleillement un phénomène transversal des ambiances architecturales et urbaines, par ses implications à la fois énergétiques, lumineuses et plastiques. La prise en compte de l'ensoleillement dans le projet apparaît donc essentielle à la qualité future de la construction. Dans une perspective complémentaire, nous pouvons considérer que les intentions d'ensoleillement formulées dans le processus de conception couvrent un large spectre d'intentions d'ambiance : lumineuses, énergétiques ou esthétiques. L'ensoleillement apparaît de ce point de vue comme un « catalyseur » des ambiances du projet.

Enfin, du point de vue pratique, la nature géométrique de l'ensoleillement a plusieurs implications importantes pour nous. D'une part, elle permet de considérer la modélisation des phénomènes d'ensoleillement comme une forme particulière de modélisation géométrique, et donc de l'envisager d'un point de vue déclaratif. D'autre part, il est possible d'intégrer les méthodes de simulation de l'ensoleillement, qu'elles soient directes ou inverses, à un modèleur géométrique du type de ceux proposés aux architectes. Ce facteur nous a paru important pour envisager la mise en oeuvre pratique de notre méthode et sa validation.

La suite de cette section détaille les différentes facettes de l'ensoleillement, du point de vue des ambiances et du point de vue du projet architectural. Nous montrons l'aspect transversal de l'ensoleillement dans la problématique des ambiances et les relations organiques existant entre formes du projet et intentions d'ensoleillement dans le processus de conception. Notre champ d'application ainsi délimité, nous concluons ce chapitre par la formulation de nos objectifs de recherche et par l'exposé du plan de ce rapport.

### 1.2.1 Ensoleillement et ambiances

Nous définissons l'ensoleillement comme l'ensemble des interactions entre la lumière naturelle directe, dans sa composante géométrique, et les objets d'un environnement architectural ou urbain localisé. Ces interactions se manifestent sous la forme de taches d'ombre ou de soleil sur les surfaces composant l'environnement. Ces taches sont les traces des interactions entre la lumière solaire directe et l'environnement considéré et représentent des effets d'ensoleillement potentiels. Elles ont des formes variables dans l'espace et mouvantes dans le temps. Par nature, une tache d'ensoleillement est un objet dynamique ; sa complexité est relative à la complexité géométrique de l'environnement et à la période temporelle pendant laquelle on la considère.

Les taches d'ensoleillement acquièrent différentes valeurs suivant le point de vue que l'on adopte pour les observer. Nous examinons ici ces valeurs du point de vue énergétique, lumineux et plastique. Par ce panorama, nous délimitons les implications de l'ensoleillement dans la problématique des ambiances et nous tentons de montrer l'intérêt, sinon l'importance, de la prise en compte de ce phénomène dans le projet d'architecture.

#### 1.2.1.1 Implications énergétiques

L'énergie fournie par le soleil — le gisement solaire — est à la fois abondante, naturelle et gratuite ; elle répond donc aux exigences environnementales et économiques de nos sociétés. Les crises énergétiques des années 70 ont permis de considérer sous un jour nouveau ces préoccupations oubliées dans le développement urbain de notre siècle. Une littérature particulièrement abondante peut être trouvée sur ce sujet ; nous nous en tiendrons ici à quelques généralités étayées d'indications bibliographiques.

L'ensoleillement représente les interactions géométriques entre la lumière solaire directe et les objets de l'environnement. Suivant cette définition, les taches d'ensoleillement peuvent être considérées comme des sources locales d'énergie, positives (taches de soleil) ou « négatives » (taches d'ombre). L'énergie fournie par une tache de soleil est fonction de sa surface, de l'angle d'incidence du rayon solaire instantané en chaque point, du temps d'exposition au soleil et du matériau exposé (transmission, réflexion et absorption). Par le croisement de ces éléments, la dynamique de l'ensoleillement induit donc une dynamique énergétique complexe de notre environnement.

Du point de vue des ambiances, cette dynamique est généralement abordée par la notion de confort, considérée de manière restrictive sous l'angle normatif (le confort considéré comme un état neutre d'équilibre thermique), ou de manière plus extensive sous un angle psycho-physiologique, culturel ou esthétique (le confort considéré comme un état complexe d'interrelations perceptives). En outre, on distingue le plus souvent l'analyse du confort ex-

térieur, à l'échelle urbaine, de celle du confort intérieur, à l'échelle architecturale. Dans ce dernier cas, cette distinction est doublée sous nos latitudes d'une séparation entre ce que l'on désigne comme le confort d'hiver et le confort d'été. L'ensoleillement joue un rôle différent suivant les situations.

A l'échelle de la ville, l'influence énergétique de l'ensoleillement dépend de la morphologie des objets urbains et de leurs relations spatiales. Différents auteurs tentent de quantifier cette influence, en considérant les théories des formes urbaines (Stemers 1993), certains sites connus (Miller-Chagas 1982) ou plus finement, en échantillonnant les types de tissus urbains les plus courants (Groleau et al. 1995). On pourra trouver une revue générale de ces questionnements dans les actes du colloque CERMA (1986). Du point de vue du confort extérieur, l'influence de l'ensoleillement est étudiée au travers des microclimats. A cette échelle, C. Sacré (1983) a mis en évidence le rôle prépondérant du rayonnement solaire (notion de température globale) et de la vitesse du vent dans la qualification du confort ressenti. Plusieurs recherches tentent de préciser ces résultats en élargissant la notion de confort à certains paramètres plus subjectifs (cf. Belchun 1993).

A l'échelle architecturale, les implications énergétiques de l'ensoleillement sont analysées dans le cadre de la thermique des enveloppes construites. Pour s'en tenir aux paramètres physiques, l'ouvrage coordonné par Sacadura (1982) donne une somme complète des problèmes posés par les transferts thermiques. Les applications générales du rayonnement solaire sont décrites par Bernard et al. (1979). Les problèmes spécifiques des transferts thermiques et du rayonnement solaire dans les constructions sont abordés à différents niveaux de détail par R. Dehausse (1988), P. Chemiller (1986) et P. Lavigne (1981). Bien d'autres ouvrages, revues et actes de conférences proposent de multiples résultats théoriques et pratiques.

Par delà la seule considération physique, les courants dits « d'architecture solaire » ou bioclimatique des années 70 et 80 ont apporté une nouvelle dimension aux implications énergétiques de l'ensoleillement dans la construction. Plaidant pour une adaptation régionale des modes constructifs (en réaction à l'uniformisation issue des théories du Mouvement moderne), ces recherches tentent de concilier les exigences contemporaines de confort et la nécessité de constructions économes. Cette approche a conduit à redécouvrir certaines solutions traditionnelles visant à capter l'énergie solaire disponible en hiver tout en se protégeant des effets solaires d'été. L'adaptation de ces solutions aux modes constructifs contemporains a conduit à différentes propositions dont le prototype extrême est celui de la « maison capteur » (figure 1.8 page suivante). P. Dard (1986) a analysé avec justesse les transformations symboliques et imaginaires introduites par cet habitat « solaire », tant au niveau de l'usage, de l'esthétique de la maison, que du confort vécu dans sa dimension sociale autant que thermique.

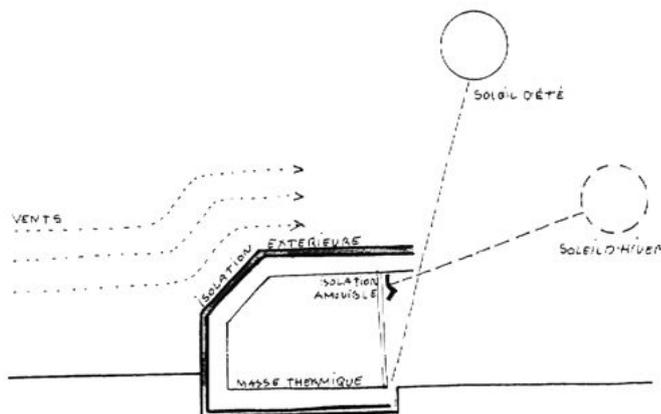


Figure 1.8. Prototype de la « maison capteur »  
(Construire avec le climat, Ministère de l'Environnement, 1979)

### 1.2.1.2 Implications lumineuses

Le rayonnement solaire est perçu par notre peau comme de la chaleur et par notre vue, dans un spectre restreint, comme de la lumière. L'enseillement produit donc des taches à la fois sources d'énergie et sources d'éclairage. Fondamentalement, l'éclairage naturel interroge notre système de perception visuelle. Deux voies de recherches permettent d'en rendre compte : les recherches sur les modèles physiques qui visent à quantifier et à qualifier les interactions entre la lumière naturelle et l'environnement d'une part ; les recherches sur la perception qui visent à comprendre les mécanismes physiologiques et cognitifs participant à notre appréhension visuelle de l'environnement d'autre part.

Au niveau physique, de nombreux modèles d'éclairage existent et sont développés à des fins différentes. En imagerie de synthèse, ces modèles tendent à restituer une image plausible de la réalité, sans souci des grandeurs physiques mises en cause. Il s'agit d'éclairer une maquette numérique de telle sorte que l'image ainsi produite soit conforme à l'image rétinienne que nous avons de l'environnement réel. Dans ces travaux, l'enseillement est modélisé par la technique du lancer de rayons qui permet de simuler toutes les composantes géométriques de l'éclairage naturel. D'autres méthodes restituant l'aspect diffus de la lumière sont également employées.

Dans une perspective plus analytique, différents modèles physiques visent à quantifier les grandeurs physiques caractérisant les interactions entre la lumière naturelle et l'environnement. Ces modèles utilisent des données statistiques traduisant les conditions lumineuses d'un site donné : on parle de modèle de ciel. Certains de ces modèles ne prennent en compte que l'aspect diffus de la lumière naturelle et annulent de ce fait la dynamique spatio-temporelle de l'enseillement. Un indice souvent utilisé comme le facteur de

lumière du jour (CSTB 1991) considère ainsi un ciel uniformément lumineux et statique. D'autres modèles plus réalistes apparaissent au fur et à mesure de l'évolution des puissances de calcul qui permettent de les mettre en oeuvre. Ces modèles considèrent le ciel comme une surface sphérique d'émission non homogène, avec une luminance maximale dans la direction du soleil et décroissante autour de cette direction. Ils sont mis en oeuvre par la technique des radiosités et permettent de simuler les conditions réalistes d'éclairage dans des environnements architecturaux (Lestrat 1990) ou urbains (Miguet et al. 1996) à un instant donné.

Au niveau de la perception visuelle, les recherches tentent de qualifier notre appréhension de l'environnement à travers l'image, à la fois physiologique (image rétinienne) et mentale (interprétation subjective) que nous en avons. La perception visuelle fait intervenir des phénomènes complexes qui ne sont pas tous élucidés (cf. Ninio 1989). Dans l'analyse lumineuse de l'environnement construit, ce sont essentiellement des notions relatives qui permettent d'en rendre compte : contraste lumineux, rapport figure / fond (bruit de fond visuel), luminance extérieure / intérieure, activité / affectivité, attente lumineuse, etc. La notion qualitative d'effet lumineux, intégrant à la fois les interactions phénomènes / formes et notre perception sensible de ces interactions, apparaît centrale dans ces recherches. On trouvera des indications pertinentes à ce sujet dans les deux ouvrages de référence que W. M.C. Lam a consacré à l'éclairage naturel (1986) et artificiel (1982).

Sur le plan du confort, l'ensoleillement traduisant la composante directe de la lumière est essentiellement interprété du point de vue de la gêne potentielle qu'il représente. Le confort d'ensoleillement est alors défini comme un inconfort en puissance : il s'agit d'éviter les phénomènes d'éblouissement tout en assurant un niveau d'éclairage suffisant selon les activités. Des considérations énergétiques viennent s'ajouter à ce programme ; elles tendent à diminuer les besoins en éclairage artificiel en recourant tant que faire se peut à l'éclairage naturel (l'heure d'été en est une conséquence).

Cette interprétation du confort apparaît généralement restrictive. Si l'ensoleillement induit un univers lumineux de « taches blanches » et de « taches noires » qui s'avèrent parfois gênantes, il induit également une esthétique particulière qui participe à la construction de notre sentiment de confort. Cette esthétique du clair-obscur se manifeste à notre perception chaque fois que l'éclairage atteint cette crudité binaire, parfois douloureuse, due à une surexposition et à un contraste maximal. Les objets de notre environnement apparaissent alors dans une gamme lumineuse binaire : ils sont *blancs* ou *noirs*. La netteté des ombres définit ainsi une image que l'on se plaît à regarder pour elle-même. Ce sont ces effets plastiques de l'ensoleillement, participant de notre perception visuelle, que nous abordons dans le point suivant en nous appuyant sur les travaux de M. Twarowski.

### 1.2.1.3 Implications esthétiques : la plastique solaire de M. Twarowski

Dans une étude théorique et pratique consacrée au Soleil et à l'Architecture (1967), M. Twarowski développe diverses méthodes permettant d'assurer un « bon » ensoleillement des espaces construits. Il propose un diagramme solaire inédit que nous décrivons dans le prochain chapitre (cf. § 2.1.2.2). Poursuivant son étude exhaustive, M. Twarowski aborde finalement un point original auquel il consacre près d'une centaine de pages : celui de l'hélioplastique ou la *plastique solaire* des objets construits.

Pour ce faire, il s'appuie sur le constat suivant : les objets de notre environnement prennent des valeurs différentes suivant leur éclairage naturel ou artificiel. Il remarque que parmi ces valeurs, certaines produisent des *effets* particuliers et significatifs qui « maximalisent » ou non l'expression plastique propre à l'objet. Il suggère même que, dans le cas des compositions artistiques, cette expression plastique appartient en propre à l'oeuvre et ne peut être modifiée impunément :

*« (...) Aucun sculpteur n'accepterait que l'acquéreur de son oeuvre change à son gré sa sculpture. Personne ne proteste cependant lorsque la lumière solaire déforme l'expression plastique, crée des effets fortuits, en diminuant ainsi, souvent dans une grande mesure, la valeur de l'oeuvre. » (Op. Cit., p. 68)*

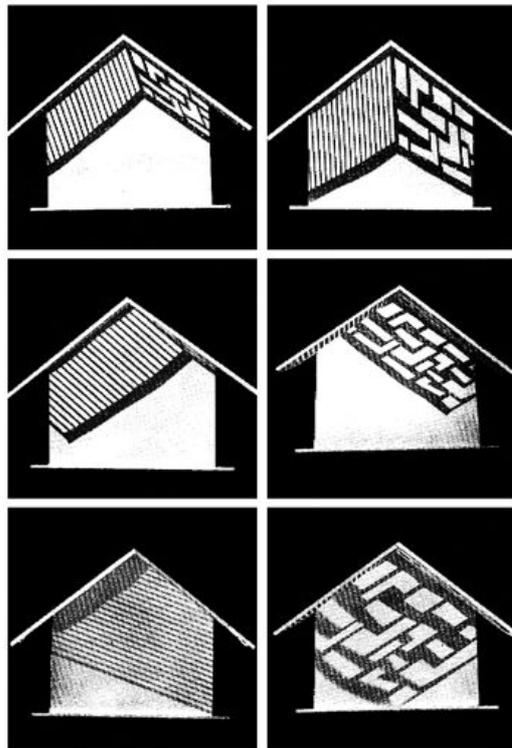
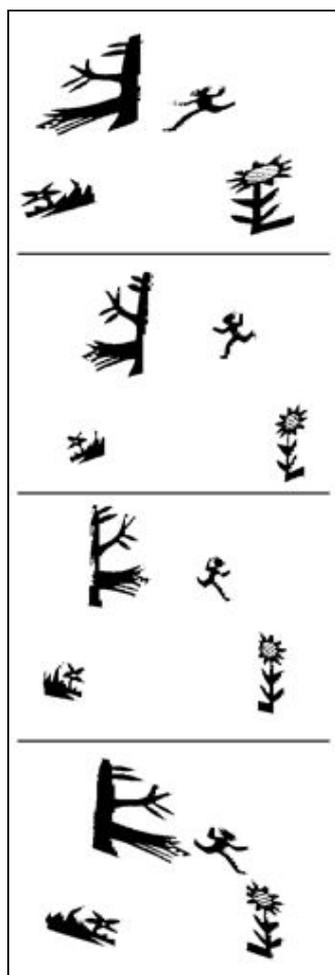


Figure 1.9. Dynamique des formes d'ensoleillement (Twarowski 1967)

M. Twarowski se propose alors d'étudier les méthodes permettant d'obtenir un effet solaire singulier pour les compositions plastiques en situation intérieure ou extérieure. Suivant la même approche, il s'intéresse au projet d'architecture et étend finalement sa théorie de la plastique solaire aux bâtiments d'une ville, aux espaces intérieurs et même aux paysages et jardins (Cf. § 3.1.1.3). Il étudie la dynamique des taches d'ombre et de soleil et définit par cette dynamique une « vie des formes » architecturales. La figure 1.9 page précédente montre ainsi la dynamique des formes d'ensoleillement engendrées sur le pignon d'un bâtiment par deux projecteurs d'ombre de formes différentes. La projection d'ombres dessinées (plutôt que celle plus courante de taches de lumière) est caractéristique du travail de cet auteur.

Les compositions plastiques que propose M. Twarowski sont toujours étonnantes. Elles oscillent entre l'abstraction et la figuration naïve. L'une de ses compositions naïves raconte par exemple une petite histoire aux enfants d'une école par le simple jeu d'un projecteur d'ombre. Nous reproduisons cette composition et sa légende dans la figure 1.10 ci-dessous.



*« Le matin, l'écolier court après le loup. A midi, les ombres deviennent de plus en plus courtes. L'après-midi, le loup se met à courir après l'écolier... »*

Figure 1.10. La vie des formes (Twarowski 1967)

L'originalité de cette démarche tient selon nous à deux points principaux : d'une part, M. Twarowski considère que l'effet plastique produit par l'ensoleillement appartient en propre à l'objet qui le reçoit (il le constitue même, puisqu'il lui donne son expression) ; d'autre part, il postule que les principaux effets plastiques (dont il prend garde de ne pas donner de nomenclature, laissant le lecteur juge de sa propre esthétique d'ensoleillement) sont reproductibles et peuvent être prévus et même conçus dans le projet d'architecture, d'urbanisme ou d'aménagement. Ce faisant, il fonde ce que nous pourrions désigner comme une esthétique pratique de l'ensoleillement appliquée à l'architecture, à l'urbanisme ou encore à l'art des jardins.

Cette approche place finalement l'effet plastique au même niveau que les effets énergétiques et lumineux de l'ensoleillement et elle met en avant, pour la conception esthétique d'un objet, des méthodes de même nature que celles qui permettent de concevoir un pare-soleil efficace ou un éclairage suffisant. L'hélioplastique devient une des composantes « techniques » du projet qui appelle des outils spécifiques de conception dont certains apparaissent encore aujourd'hui très originaux.

## **1.2.2 Ensoleillement et processus de conception**

La plastique solaire de M. Twarowski fournit une bonne transition entre les aspects ambiantaux de l'ensoleillement et leur prise en compte dans le processus de conception architecturale. Suivant le modèle simplifié que nous proposons pour décrire ce processus, l'ensoleillement doit intervenir à la fois au niveau de la manipulation des formes et au niveau de la manipulation des intentions. Ce sont ces deux points que nous présentons dans les paragraphes qui suivent. Nous ajoutons dans un dernier paragraphe quelques considérations sur la figuration de l'ensoleillement dans le projet qui montrent les distorsions existant entre l'ensoleillement physique et l'ensoleillement imaginaire des architectes.

### **1.2.2.1 L'ensoleillement et la manipulation des formes**

Par sa forte dimension géométrique, l'ensoleillement apparaît, plus que tout autre phénomène, comme « générateur de formes » du projet architectural et urbain. Il est en effet possible de simuler et de contrôler les effets d'ensoleillement par des méthodes graphiques (cf. chapitre 2), celles-là mêmes qui constituent les procédures de mise en forme du projet. Il existe donc ce que nous pouvons définir comme une adéquation instrumentale entre la simulation de l'ensoleillement et la mise en forme du projet. Cette affinité est renforcée par le fait que les considérations relatives à l'ensoleillement interviennent à toutes les étapes de la mise en forme du projet, depuis l'esquisse (arrangement des masses) jusqu'au détail du pare-soleil.

A l'échelle urbaine, la « mise en ensoleillement » du projet passe par la manipulation des formes caractéristiques que sont la trame, la rue, l'îlot, la place, l'alignement, etc. A cette échelle, l'ensoleillement possède une forte autorité sur les formes et rend périlleuse toute tentative d'optimisation. C'est ainsi que du seul point de vue de l'ensoleillement, la forme urbaine optimale est celle proposée par le Mouvement moderne, faite de blocs parallélépipédiques, suffisamment éloignés les uns des autres pour permettre un accès au soleil égal pour tous (cf. § 3.2.3.2). On connaît les déboires historiques de ce modèle urbain.

La manipulation des formes urbaines doit généralement se satisfaire de subtils compromis entre les intentions d'ensoleillement (toujours louables) et les nombreuses autres contraintes qui pèsent dans la formation de la ville. Un panorama complet des propositions faites en ce sens par les théoriciens de l'urbanisme à travers l'histoire est dressé par J-P. Péneau (1985). Remarquons certaines solutions ingénieuses, comme celle de H. Sauvage, conciliant l'îlot urbain et l'ensoleillement par ses immeubles en gradins (figure 1.11). Dans la même perspective d'analyse historique, Z. Guenadez (1993) a montré les aspects pertinents, du point de vue de l'ensoleillement, des propositions urbaines de C. Sitte à la fin du siècle dernier.

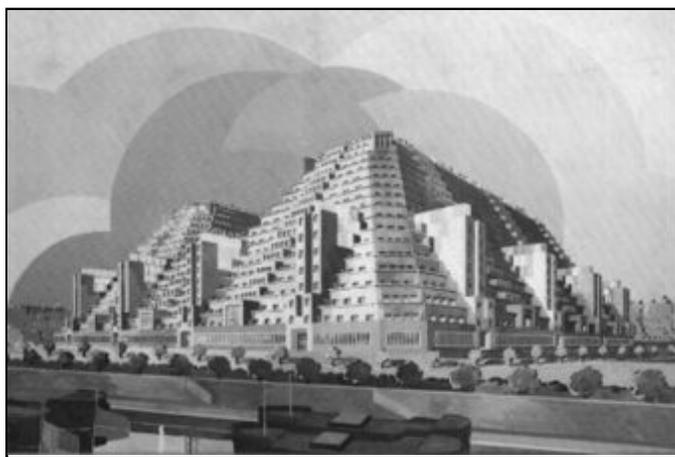


Figure 1.11. Ilot urbain et immeubles en gradin de H. Sauvage (1928)  
(H. Sauvage, Ed. Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles 1978)

Du point de vue opérationnel, J-P. Péneau (1982) expose la démarche mise en oeuvre dans un processus de conception d'une forme urbaine au cours duquel d'intéressants compromis, échappant au dogmatisme, ont été réalisés entre l'ensoleillement et d'autres critères. Dans un article intéressant, deux architectes (Nicolas & Remon, 1985) délimitent le problème de la confrontation, lors du projet urbain, entre ce qu'ils désignent comme la dialectique de la trame urbaine et la dialectique avec le Sud mise en avant par l'archi-

ecture bioclimatique. Comment concilier ces deux dialectiques pour la prise en compte de l'ensoleillement dans le projet ? L'ensoleillement intervient également dans un registre complémentaire des formes urbaines proprement dites, celui de l'aménagement et du décor urbains. Dans ce registre, la végétation joue un rôle important comme régulateur naturel et saisonnier de l'ensoleillement et des ambiances en général (cf. Guyot 1988). A ce rôle s'ajoutent la diversité et la symbolique propres aux formes végétales que l'on peut considérer comme des formes urbaines à part entière.

A l'échelle architecturale, la « mise en ensoleillement » du projet passe par deux catégories de formes : les formes générales du projet qui sont souvent imposées par des contraintes indépendantes de l'ensoleillement (implantation, alignements, occupation du sol, etc.) et les formes dédiées à l'ensoleillement que sont les évidements (baies, embrasures, fenêtres, etc.) et les masques. Il existe une infinie diversité de ces formes qui sont fonctions, outre l'ensoleillement, du climat local, des modes de vie et d'usage des constructions, des critères de confort associés, des techniques constructives, des matériaux disponibles, etc. Une étude détaillée des prototypes architecturaux de contrôle de l'ensoleillement est proposée par W. M.C Lam (1986) dans un ouvrage que l'on peut considérer comme une référence en la matière. Nous reproduisons sans les commenter quelques-uns de ces prototypes (figure 1.12 page suivante) dont la mise en oeuvre architecturale peut prendre des formes insoupçonnées. Des éléments de même nature peuvent être également trouvés dans l'ouvrage fondateur de V. Olgyay (1963).

Quelle que soit l'échelle considérée, la manipulation des formes du projet conduit, du point de vue de l'ensoleillement, à la réalisation de propriétés à la fois énergétiques, lumineuses et plastiques. Les relations quasi organiques existant entre ces propriétés et les formes du projet imposent une prise en compte continue de l'ensoleillement dans le processus de conception.

Or, cette prise en compte dépend pour une part de l'outillage instrumental dont dispose le concepteur pour exposer les effets d'ensoleillement produits par les formes et pour réaliser ses intentions en la matière. De ce point de vue, les solutions prototypées et les préceptes mis en avant dans les ouvrages experts apparaissent comme des pis-aller qui compensent une défaillance instrumentale. Ces ouvrages n'examinent pour la plupart — c'est une loi du genre — que des situations simplistes de constructions parallélépipédiques, orientées suivant les directions cardinales et isolées de tout environnement réaliste. En situation de conception, les préceptes ainsi dégagés apparaissent difficiles à adapter au projet. C'est ce constat qui justifie notre objectif de réalisation d'une méthode de simulation inverse de l'ensoleillement, liant formes et effets à toutes les étapes du projet, quelle que soit la complexité de celui-ci et de son contexte.

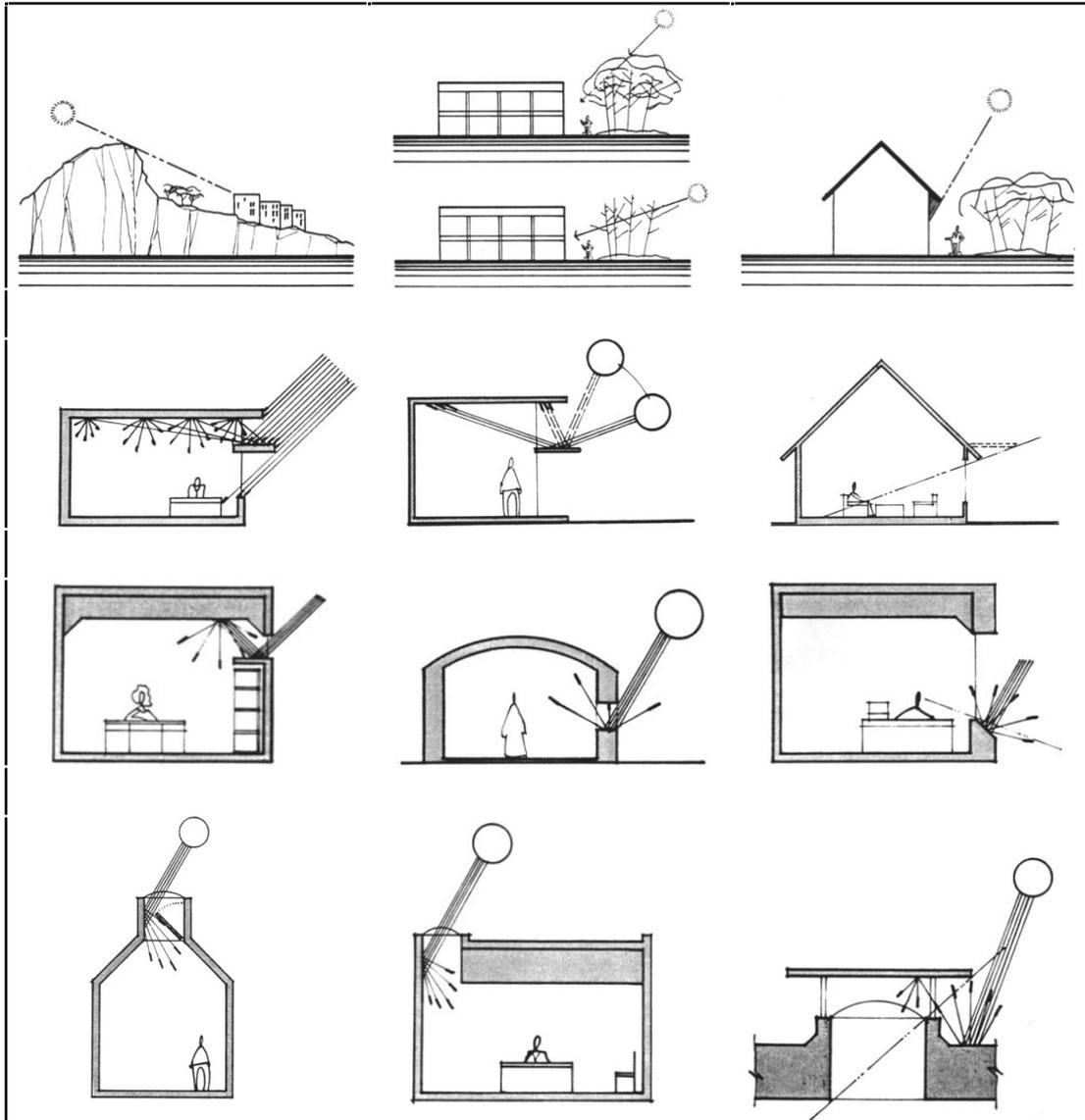


Figure 1.12. Quelques dispositifs de contrôle de l'ensoleillement  
(Lam 1986)

### 1.2.2.2 L'ensoleillement et les intentions du projet

Si l'ensoleillement est générateur de formes dans le projet d'architecture, il apparaît également comme « générateur d'intentions » dans le processus de conception du projet. L'ensoleillement est ainsi l'un des prétextes argumentaires de nombreux discours associés aux projets. Il permet au concepteur de justifier les formes du projet sans que l'on sache toujours si cette argumentation rhétorique correspond à une réalité physique. Ainsi, l'écart entre intention et réalisation apparaît de manière flagrante dans certains projets pour lesquels l'ensoleillement est donné comme intention fondatrice. Malhonnêteté de l'architecte ? Nous croyons plutôt que le processus de conception

introduit des distorsions imaginaires entre le projet et la réalité construite dont le concepteur est la première victime. Ces distorsions sont manifestes dans la figuration architecturale (cf. § suivant). Elles sont explicables s'agissant des ambiances pour lesquelles le concepteur dispose de peu d'outils de conception, quelle que soit la pertinence de ses intentions.

Les intentions d'ensoleillement apparaissent dans plusieurs courants architecturaux de notre siècle qui véhiculent autant de discours justifiant le projet. A travers la symbolique de la ville « radieuse », Le Corbusier et le Mouvement moderne ont fait de l'ensoleillement l'un des quatre piliers de l'architecture moderne. Les intentions en matière d'ensoleillement sont ici édifiées comme un dogme qu'il est aventureux de démolir : elles agissent comme un mot d'ordre sur le projet. Ce sont les implications lumineuses et plastiques de l'ensoleillement qui sont principalement mises en valeur. La figuration moderne utilise d'ailleurs abondamment les effets de clairs-obscurs tranchés, proches de l'abstraction picturale, dans ses compositions architecturales.

Bien qu'antinomiques à tout autre point de vue des thèses modernes, les approches défendues par les courants d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques des années 60 ont également érigé l'ensoleillement comme un dogme. La métaphore sociale de la cité radieuse est ici appliquée, plus crûment, en maison « solaire », préfigurant la faillite du modèle urbain moderne au profit du modèle pavillonnaire. Ce sont principalement les effets énergétiques de l'ensoleillement qui sont ici considérés. Les intentions bioclimatiques se situent en effet dans une perspective économique, sinon écologique, que ne défendait pas le Mouvement moderne.

Ces deux courants ont placé le soleil à un tel niveau d'intentionnalité que l'architecture et l'urbanisme post-modernes des années 80 semblent, en réaction, se définir comme délibérément « a-solaire », sinon anti-solaire. Cette position est défendue de différentes manières. Les uns plaident pour le charme de la ville historique construite de manière chaotique, sans planification de l'ensoleillement ; les autres s'appuient sur les innovations technologiques pour climatiser de l'intérieur les constructions qu'ils proposent. C'est ainsi que les enveloppes de verre, niant effrontément les effets du soleil, ne peuvent être construites que munies de dispositifs de contrôle mécanique des ambiances thermiques et lumineuses intérieures.

Cette position de refus intentionnel de l'ensoleillement peut être considérée elle aussi, à bien des égards, comme dogmatique. Sans doute une position d'équilibre intégrant subtilement l'ensoleillement sans contraindre le projet apparaît-elle aujourd'hui nécessaire. C'est dans cette perspective que nous situons nos propositions instrumentales, indépendamment de toute idéologie de l'ensoleillement.

### 1.2.2.3 La figuration d'ensevelissement, entre simulation et simulacre

Le processus de conception architectural est fortement marqué par la figuration graphique ; celle-ci en constitue un moyen mais aussi parfois une fin, lorsque le rendu du projet prime sur le projet rendu... Au niveau de ses fonctions, le rendu donne à voir et à comprendre le projet considéré comme une future construction. Mais il est plus que cela : il donne également à voir les intentions qui ont présidé à la conception, par de subtils procédés graphiques qui imposent des analogies entre la construction de l'image elle-même et celle de l'objet qu'elle figure. Cet art du rendu suggestif est typique de la figuration architecturale et confère à ce type de figuration une dimension plastique souvent appréciée des architectes et du public. Il arrive ainsi un moment où le rendu cristallise en une même image des formes rêvées, des formes construites et des intentions multiples. C'est en ce sens que la figuration d'architecture hésite constamment entre la simulation et le simulacre des objets qu'elle donne à voir.

La figure 1.13 ci-dessous montre une image typique du rendu chargé de sens par lequel les architectes aiment à montrer leurs projets. La maison est-elle « mélodique » par la composition de ses façades, par l'usage qu'en feront ses commanditaires ou encore par la qualité de ses ambiances sonores ? Sans doute ces intentions ont-elles toutes présidé à la conception ; c'est la fonction de ce rendu que de nous le faire comprendre dans une même image.

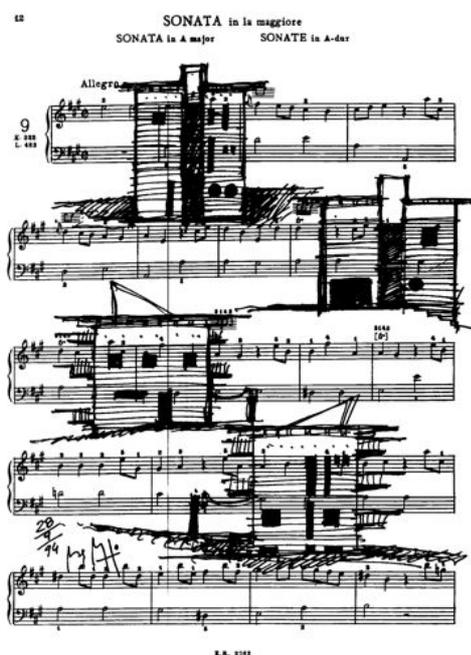


Figure 1.13. Les ambiguïtés du rendu d'architecture  
 « The singer's house », Diego Peruzzo, 1995-96  
 (Catalogue de la Biennale de Venise, Electa, Sept. 1996, page 309)

Qu'en est-il de cette figuration pour l'ensoleillement ? Nous retrouvons ici la question des effets plastiques solaires de M. Twarowski. Cependant, M. Twarowski fait l'hypothèse que l'expression plastique des objets qu'il considère doit correspondre à un état plausible d'ensoleillement de ces objets. Il n'imagine pas que l'esthétique de l'ensoleillement puisse être seulement figurative et c'est pour cette raison qu'il s'astreint à fournir les méthodes permettant d'atteindre à cette esthétique dans la réalité construite.

La figuration architecturale se libère souvent de cette hypothèse de crédibilité. C'est alors un ensoleillement imaginaire qui est figuré : la lumière solaire, dépossédée de toute réalité physique, devient malléable à merci pour la reproduction d'effets de rendu lumineux. L'ensoleillement ainsi représenté hésite entre simulation et simulacre. C'est par ailleurs cette même connivence dans le simulacre, plutôt que dans la simulation, que proposent les outils contemporains d'infographie dans lesquels la définition de deux, trois ou  $n$  « soleils » localisés de manière aléatoire est une invitation à reproduire autant d'effets lumineux, réalistes ou non, de la scène à figurer.

L'architecture classique préconise elle-même le simulacre d'ensoleillement puisqu'elle utilise, suivant le code académique, les seuls « rayons solaires » définis par la diagonale d'un cube parallèle au plan de vue. Cette convention est encore largement utilisée (figure 1.14). Si le plan de vue est horizontal ou s'il est vertical et orienté au Sud, la direction des rayons ainsi considérés correspond aux instants de 10h et 14h, les 20 avril et 23 août (temps solaire vrai à la latitude  $47^\circ$ , cf. §. 2.1.1.4). Dans tout autre plan de projection, la signification temporelle des rayons est différente et souvent improbable.

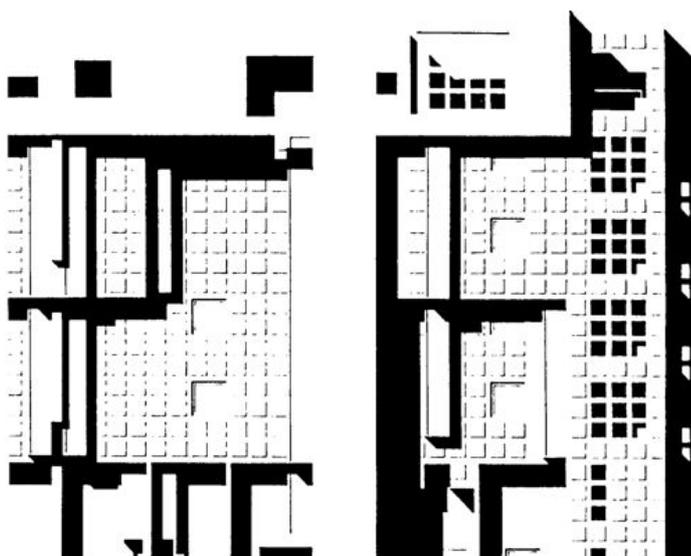


Figure 1.14. Les ombres à  $45^\circ$  (dessin H. Ciriani)  
(J. Belmont, *Modernes et Postmodernes*, Ed. du Moniteur, Paris, 1987)

Ce mode de figuration se justifie si l'on considère que la représentation des effets d'ensoleillement a pour fonction de permettre la compréhension des volumes du projet. Ainsi, le rayon solaire à 45° permet-il, par la mesure des ombres portées, de figurer géométriquement la dimension absente de la projection. L'image d'ensoleillement possède alors une fonction informative autant que figurative.

Cependant, cette fonction n'est pas la seule. Il existe une esthétique du rendu lumineux propre à la figuration architecturale qu'un ouvrage récent de J.-P. Jungman (1995) illustre de manière ambiguë. L'auteur s'interroge sur les effets de lumière, dans leur relation avec les effets d'architecture et dans leur expression figurée. Il donne une nomenclature de ces effets et plusieurs méthodes géométriques rigoureuses pour construire les ombres portées. L'ambiguïté de cet ouvrage vient de ce que la direction réelle du rayon lumineux n'est jamais considérée. Seul compte l'effet que l'image du projet produira par une mise en scène lumineuse savante. Cette esthétique de l'ensoleillement met la figuration architecturale en concurrence avec la peinture ou l'illustration dessinée. On trouve au fil de l'histoire d'étroites relations entre ces différents types d'expression graphique aux fonctions très différentes. Ainsi, l'esthétique constructiviste russe des années 30 a-t-elle souvent déteint sur la figuration architecturale jusqu'à nos jours, en inventant des effets plastiques d'ensoleillement toujours très ambigus (figure 1.15).

La figuration de l'ensoleillement dans le projet architectural peut parfois s'affranchir de toute vraisemblance. Dans le croquis de la figure 1.16 page suivante, on reconnaît de prime abord des objets architecturaux doublés de



Figure 1.15. Figuration ambiguë de l'ensoleillement (Jungman 1995)  
Gauche : dessin de Chernikov (1933) Droite : projet de Rogers (1986)

leurs ombres portées. Une lecture plus détaillée de ce dessin fait naître un doute : les ombres émanent de plusieurs directions en même temps et ne s'imposent qu'au sol. Il semble qu'à travers la diversité des ombres, ce soit la diversité des découpes architecturales des immeubles de même gabarit cubique qui est représentée. Que devient cette image si l'on rétablit les ombres vraisemblables ? L'intention du concepteur (celle de formes diversifiées dans le même gabarit) n'est plus visible ; le « discours » du projet n'apparaît plus dans le rendu.

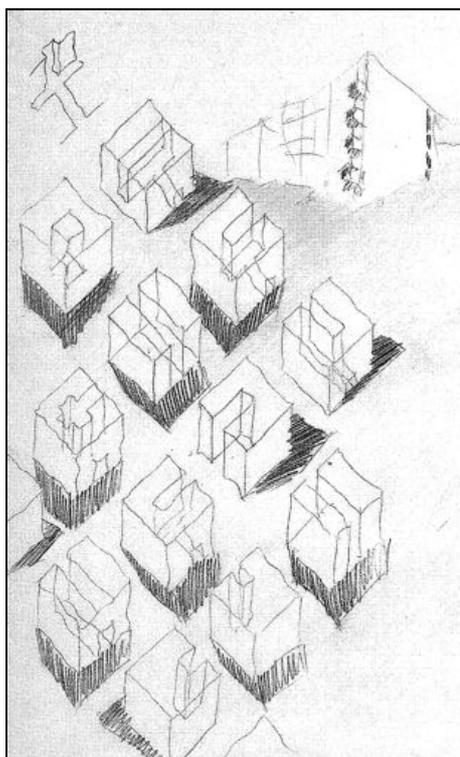


Figure 1.16. Des ombres improbables  
 Projet de K.T. Brenner et B. Tonon (1982-84)  
 (Internationale Bauausstellung Berlin 1987, Klett-Cotta, Stuttgart, 1986)

Les effets d'ensoleillement jouent un rôle ambigu dans la figuration architecturale. Cependant, si la conception est une boîte noire au sens systémique, le rendu d'architecture constitue le seul « output » capable d'en montrer les traits caractéristiques. A travers le rendu, c'est donc la question de la représentation imaginaire des objets du projet qui est posée. Qu'en est-il pour les ambiances ? L'ambiance imaginée est-elle réaliste ? Si oui, est-elle réalisable ? A-t-elle été réalisée ? Quel décalage existe-t-il entre la dimension rhétorique du projet proposé et sa dimension physique dans les formes construites ? Au niveau de l'ensoleillement, on peut se demander comment représenter ensemble une image « éclairée » des formes, en utili-

sant quelque artifice lumineux, et une simulation d'ensoleillement réaliste. La représentation scientifique des ambiances est-elle compatible avec l'imaginaire du projet architectural ?

Les réponses à ces questions nous donneraient probablement des indications utiles sur les processus complexes qui sont à l'oeuvre autour des ambiances dans le projet. Sans doute pourrait-on de cette manière qualifier l'une des formes de « distorsion imaginaire » qui entourent la prise en compte des ambiances dans le travail de conception — ces distorsions apparaissant manifestes dans la figuration architecturale. Nous pourrions sur cette base spécifier plus précisément les outils d'aide à la conception que nous proposons. Cette investigation constitue un objectif plus lointain de nos recherches que nous n'aborderons pas dans ce rapport — bien que fondamentalement, il ne puisse être dissocié du problème que nous posons.

### **1.2.3 Formulation des objectifs et plan du rapport**

#### 1.2.3.1 Objectifs de recherche

Notre problématique est celle de la prise en compte des ambiances dans le processus de conception en architecture. Nous avons montré les difficultés de cette intégration, à la fois par le caractère complexe du processus de conception et par le caractère immatériel et dynamique des ambiances, même réduites aux seules interactions entre phénomènes physiques et environnement construit.

Nous faisons l'hypothèse que la prise en compte des ambiances est possible à condition de renverser le processus de simulation des interactions entre phénomènes physiques et formes architecturales. Nous avons défini la simulation inverse comme le processus capable de déterminer les conditions de réalisation d'un effet d'ambiance, c'est-à-dire d'un état singulier des interactions entre les phénomènes et les formes. Cette hypothèse nous a amené à considérer la possibilité d'une approche déclarative des ambiances en montrant la capacité de la modélisation déclarative à résoudre les problèmes inverses de modélisation géométrique.

Pour valider cette hypothèse, nous avons choisi de nous intéresser à l'ensoleillement que nous définissons comme l'ensemble des interactions géométriques entre la lumière naturelle et les objets d'un environnement. Nous avons montré les importantes implications de l'ensoleillement, du point de vue des ambiances et du point de vue du processus de conception architecturale. L'imbrication quasi organique des formes du projet et des effets d'ensoleillement apparaît difficile à maîtriser par les seuls outils de simulation directe. Nous nous donnons donc pour objectif de définir une méthode de

simulation inverse de l'ensoleillement et de la mettre en oeuvre dans un module déclaratif capable d'assister la conception architecturale.

La principale spécification d'un tel outil est de permettre la manipulation conjointe des formes et des intentions relatives à l'ensoleillement dans le projet et, en particulier, de réaliser les intentions d'ensoleillement en déterminant les conditions que doivent vérifier les formes pour ce faire. Cet objectif doit pouvoir être atteint à n'importe quelle étape du projet, quelle que soit la complexité de celui-ci et de son environnement, en particulier urbain. Il s'agit donc de réaliser un outil général de résolution des problèmes d'ensoleillement, indépendamment de toute intention ou forme préétablie.

En aucune façon nous ne prétendons pouvoir préjuger de la pertinence des intentions ni des formes ainsi produites. Nous n'avons donc pas l'ambition de comprendre et encore moins de juger de la motivation des intentions ni de la qualité des formes. Dans le même esprit, nous ne faisons pas de distinction entre les intentions d'ensoleillement à finalité énergétique, lumineuse ou plastique. Notre proposition reste donc sur un registre purement instrumental, sans jamais envisager d'expertise ou d'optimisation, comme il est proposé par ailleurs. Nous nous contenterons donc d'apporter une solution pratique au problème inverse de l'ensoleillement à travers une formalisation géométrique nouvelle du phénomène.

### 1.2.3.2 Plan du rapport

La suite de ce rapport développe ces propositions et nos résultats. Dans le prochain chapitre (**chapitre 2**), nous dressons un état de l'art des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement. Nous montrons la grande diversité de ces méthodes. Nous les introduisons par une exposition rapide des problèmes de représentation des trajectoires solaires apparentes et nous présentons quelques traitements possibles des résultats qu'elles fournissent.

Au **chapitre 3**, nous situons les limites de ces méthodes dans le cadre du projet d'architecture et nous tentons de positionner le problème inverse dans la littérature que nous connaissons. Nous montrons qu'il existe plusieurs approches inverses de l'ensoleillement mais qu'aucune de ces approches ne résout le problème général tel que nous l'entendons : si la simulation directe permet d'exposer les états d'ensoleillement d'une zone de l'espace pour une période donnée, le problème inverse consiste à déterminer les conditions applicables sur l'espace pour qu'une zone donnée vérifie un état d'ensoleillement donné pour une période donnée.

Pour résoudre ce problème, nous introduisons au **chapitre 4** une formalisation des problèmes d'ensoleillement. Nous proposons une nouvelle géométrie de l'ensoleillement que nous espérons à la fois générale et pratique. Cette géométrie met principalement en oeuvre la notion de pyramide com-

plexe d'ensoleillement. Nous montrons que tous les problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses, s'expriment dans notre formalisme comme des problèmes d'intersection entre une pyramide d'ensoleillement et les objets d'une scène. Nous apportons de cette manière de nouvelles solutions à certains problèmes de simulation directe en même temps qu'une solution générale au problème inverse de l'ensoleillement. Ces résultats nous permettent d'introduire finalement un modèle déclaratif de l'ensoleillement par lequel tous les problèmes relatifs à l'ensoleillement peuvent être posés et résolus de manière homogène.

Ces résultats constituent l'avancée principale de notre recherche. Pour les mettre en oeuvre, il nous faut pouvoir représenter le volume géométrique défini par une pyramide complexe d'ensoleillement. Ce problème n'est pas trivial. Nous y apportons une réponse au **chapitre 5** en réduisant notre propos aux pyramides à bases planes polygonales. Notre solution s'appuie sur la somme de Minkowski dont nous présentons la nature et les propriétés. Nous exposons enfin plusieurs cas pratiques au travers desquels nous vérifions l'exactitude géométrique de notre méthode.

Cependant, notre méthode reste générale et géométrique. Nous proposons au **chapitre 6** diverses modalités pratiques pour envisager son application dans le cadre du projet d'architecture. Nous présentons ces modalités comme des éléments de discussion, susceptibles d'être remis en cause par une future évaluation dans des conditions réelles de conception. Parmi ces éléments, nous introduisons une représentation nouvelle du repérage temporel (le « temps vécu »), ainsi qu'une méthode d'exploration graphique interactive de l'infinité potentielle des solutions d'un problème inverse d'ensoleillement. En dernier lieu, nous présentons le logiciel *Solimac* que nous avons développé pour mettre en oeuvre nos propositions.

Munis de l'ensemble de ces résultats, il nous serait possible d'envisager une validation de nos hypothèses en introduisant notre outil logiciel dans un processus de conception professionnel. Cette validation reste cependant difficile pour plusieurs raisons que nous discutons au **chapitre 7**. Sans prétendre à la validation, nous présentons quelques projets simples et démonstratifs réalisés par nous-mêmes à l'aide de *Solimac*. La réalisation de ces projets montre au moins l'adéquation de notre outil au processus de conception.

En guise de conclusion, nous considérons nos résultats comme une preuve de faisabilité de la simulation inverse pour le projet d'architecture et nous montrons quelles perspectives de recherches ouvrent ces résultats, à court, moyen et long terme.

## Références bibliographiques du chapitre

### Sur la problématique et les hypothèses

**Alifanov O.M. D.** 1996 — Inverse Problem Methodology in Mathematical Modeling and Experimental Simulation, in Proceedings of Second International Conf. on Inverse Problems in Engineering : Theory and Practice, Le Croisic (France), 16 p.

**Augenbroe G., Winkelmann F.** 1991 — Integration of Simulation into the Building Design Process, in Proceedings of the International Conference on Building Simulation, Sophia-Antipolis (France), pp. 367-374

**Augoyard J-F.** 1991 — Un outil interdisciplinaire : l'effet sonore, in Actes du Colloque international sur la Qualité sonore des espaces habités, CRESSON, Grenoble (France), pp. 249-260

**Augoyard J-F., Torgue H.** 1995 — A l'écoute de l'environnement : Répertoire des effets sonores, Éditions Parenthèses, Marseille (France), 174 p.

**Baljon C.J** 1997 — Design justification as an instance of modal logic, or of rhetoric (Viewpoint), Design Studies, Vol. 18, n°1, pp. 125-126

**Boudon P., Pousin F.** 1988 — Figures de la conception architecturale, manuel de figuration graphique, Éditions Dunod, Paris (France), 111 p.

**Boudon P.** 1992 — Introduction à l'architecturologie, Éditions Dunod, Paris (France), 258 p.

**Boudon P.** 1993 — Conceptions de la conception, Les cahiers de la recherche architecturale, n° 34 (« Concevoir »), pp. 71-82

**Conan M.** 1990 — Concevoir un projet d'architecture, Éditions de l'Harmattan, Paris (France), 185 p.

**Guibert D.** 1987 — Réalisme et architecture, Éditions Mardaga, Bruxelles (Belgique), 175 p. (Voir en particulier l'annexe 2 : *La critique opératoire et la méthodologie dans l'institution professionnelle, pédagogique et de recherche*, pp. 143-160)

**Lebahar J-C.** 1983 — Le dessin d'architecte, Simulation graphique et réduction d'incertitude, Éditions Parenthèses, Roquevaire (France), 134 p.

**Lucas M., Martin D, Martin P., Plemenos D.** 1990 — Le projet Explo-Formes : Quelques pas vers la modélisation déclarative de formes, Bigre, n° 67, pp. 35-49

**Lucas M., Desmontils E.** 1995 — Les modeleurs déclaratifs, Revue internationale de CFAO et d'Informatique graphique, Vol. 10, n° 6, pp. 559-585

**Menke W.** 1989 — Geophysical Data Analysis : Discrete Inverse Theory, Academic Press Inc., San Diego, California (USA), 285 p.

**Mudri L.** 1994 — Structure dynamique de critères pour l'éclairage naturel et son impact sur l'énergétique pour un outil d'enseignement du projet en architecture, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1143-1148

**Ninio J.** 1989 — L'empreinte des sens, Perception, mémoire, langage, Éditions Odile Jacob / Points Seuil, Paris (France), 310 p.

**Prost R.** 1992 — Conception architecturale, une investigation méthodologique, L'Harmattan, Paris (France), 190 p.

**Radford A.D., Gero J.S.** 1979 — On the design of windows, Environment and Planning B, Vol. 6, n°1, pp. 41-45

**Schoeneman C., Dorsey J., Smits B., Arvo J., Greenberg D.** 1993 — Painting with Light, in Computer Graphics Proceedings (Annual Conference Series), Anaheim, California (USA), pp. 143-146

**Siret D.** 1996 — Sunlighting Design : an Inverse Approach of Simulation for CAD Tools, in : Santo H.P. (Ed.), Advances in Computer-Aided-Design (Proceedings of CADEX'96, Hagenberg, Autriche), IEEE Computer Society Press, Los Alamitos California (USA), pp. 32-40

**Stevens G.** 1990 — The Reasoning Architect : Mathematics and Science in Design, McGraw-Hill International Editions, New-York (USA), 362 p.

## Sur l'ensoleillement

**Belchun B.** 1993 — Caractérisation polydisciplinaire d'une ambiance extérieure, Rapport de DEA, Université de Nantes, École d'architecture de Nantes (France), 98 p.

**Bernard R., Menguy G., Schwartz M.** 1986 — Les rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Techniques et Documentation Lavoisier, Paris (France), 215 p.

**CERMA** 1986 — Actes du colloque Conception des formes urbaines et contrôle énergétique, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 274 p.

**Chemiller P.** 1986 — Sciences et bâtiment, CSTB, Presses Nationales de l'École des Ponts et Chaussées, Paris (France), Deuxième partie : L'hygrothermique et l'aéraulique, pp. 45-254

**CSTB** 1991 — Éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Division Eclairage et Colorimétrie, Nantes (France), 68 p.

**Dard P.** 1986 — Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expériences et d'innovations thermiques dans l'habitat, Plan Construction, Paris (France), 175 p.

**Dehausse R.** (Coordonnateur) 1988 — Énergétique des bâtiments, PYC Éditions, Paris (France), Vol. 1 (Situations, besoins) 275 p., Vol. 2 (Calcul des enveloppes) 353 p.

**Groleau D., Marenne C.** 1995 — Environmental specificities of the urban built forms, in Proceedings of European conference on Integration of Renewable Energies in established Urban Structures, Corfou (Grèce), 8 p.

**Guenadez Z.** 1993 — Esthétique urbaine et ambiances micro-climatiques chez Camillo Sitte, Rapport de DEA, Université de Nantes, École d'Architecture de Nantes (France), 80 p.

**Guyot A.** 1988 — L'arbre élément vivant du confort, in Vivre dehors, Confort des espaces publics, Actes du colloque de Manosque (France), Éditions du STU, Ministère de l'Équipement, pp. 71-80

**Jungmann J.-P.** 1995 — Ombres et lumières, Éditions de la Villette, Paris (France), 151 p.

**Lavigne P.** 1981 — Énergie, climat, confort, soleil et architecture, Volume 1 (Cours), École d'Architecture de Grenoble (France), 189 p.

**Lam W. M.C.** 1982 — Éclairage et architecture, Éditions du Moniteur, Paris (France), 301 p.

**Lam W. M.C.** 1986 — Sunlighting as Formgiver for Architecture, Van Nostrand Reinhold Company, New York (USA), 250 p.

**Lestrat G.** 1990 — Modélisation du champ radiatif, Application à la simulation des ambiances lumineuses naturelles intérieures sur écran graphique couleur, Thèse de Doctorat, Université de Nantes (France), 203 p.

**Miguet F., Groleau D., Marenne C.** 1996 — A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 4th European conference on architecture, Berlin (Germany), pp. 338-341

**Miller-Chagas P.** 1982 — Apports énergétiques solaires, microclimats et configurations urbaines dans trois cités à Strasbourg, in Problèmes énergétiques de la ville (Actes du séminaire ARDEPA, AFME / Direction de l'Architecture / Plan Construction), École d'Architecture de Nantes (France), pp. 97-133

**Nicolas F., Remon M.** 1985 — Architecture urbaine bioclimatique, in Actes du séminaire Architecture, urbanisme et énergie, Bilan et perspectives, École d'Architecture de Paris-la-Villette (France), pp. 95-113

**Olgay V.** 1963 — Design with Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (USA), 190 p.

**Péneau J.-P.** 1982 — Exemples de prises en compte de l'aménagement bioclimatique, in Problèmes énergétiques de la ville (Actes du séminaire ARDEPA, AFME / Direction de l'Architecture / Plan Construction), École d'Architecture de Nantes (France), pp. 135-146

**Péneau J.-P.** 1985 — L'ajustement climatique dans les théories architecturales et urbaine, École d'Architecture de Nantes (France), 2 tomes, 142 p. (Cours)

**Sacadura J.-F.** (Coordonnateur) 1982 — Initiation aux transferts thermiques, Technique et Documentation Lavoisier, Paris (France), 445 p.

**Sacré C.** 1983 — Le confort dans les espaces extérieurs, analyse micro-climatique, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Etablissement de Nantes (France), 138 p. (Rapport de recherche)

**Stemmers K.A.** 1993 — Low Energy Urban Design, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 3th European conference on architecture, Florence (Italy), pp. 501-504

**Twarowski M.** 1967 — Soleil et architecture, Dunod, Paris (France), 175 p.

## Chapitre 2

# Méthodes de simulation directe de l'ensoleillement

« (...)

— Outrage, outrage, tonnait oncle Vania.

— Mais qu'y a-t-il ? dit père en s'avançant pour voir. Nous nous approchâmes tous, et poussâmes un cri de surprise.

Là, sur le plancher rocheux, il y avait l'ombre d'oncle Vania, mais séparée de lui, immobile. Son ombre sans aucun doute possible : personne n'eût pu se tromper sur ces vastes épaules voûtées, ces jambes velues, ce dos courbé, ces fesses broussailleuses, cette mâchoire prognathe et surtout, surtout sur ce bras simiesque étendu dans un geste d'accusation typique. Et voici, l'ombre était là, immuable et fixée de la façon la plus étonnante, au milieu de nos ombres à nous qui dansaient et frémissaient dans la lumière du feu.

— Qu'est-ce que c'est ? demanda l'oncle Vania d'une voix terrible, bien qu'il ne pût y avoir qu'une seule réponse désastreuse.

— De l'art fi-figuratif, sanglota Alexandre.

— Sale mouflet ! hurla oncle Vania. Qu'as-tu fait de mon ombre ?

— Tu l'as toujours, dit père pour l'apaiser. Ou bien il t'en est poussé une seconde très vite. Regarde derrière toi.

— Ah ! dit oncle Vania. Sa rage se fit moins violente. Le fait est, je l'ai. Mais je ne permettrai à personne, fût-ce pour un moment, qu'il ampute mon ombre. Ton sale marmot aurait pu me blesser, Edouard, et même grièvement. Rends-la-moi, dit-il à l'enfant, tu n'as aucun droit sur aucune de mes ombres ni sur celle-ci ni sur aucune autre. Rends-la-moi tout de suite, tu m'entends ?

— Ramasse-la et donne-la-lui, Alexandre, dit père d'un ton sévère.

Le malheureux s'y essaya en vain.

— Je ne peux pas, dit-il en reniflant. Ce n'est qu'une image. »

R. Lewis, *Pourquoi j'ai mangé mon père*, Actes Sud (Paris), 1990

## Introduction

La simulation directe de l'ensoleillement est le processus instrumental visant à déterminer les propriétés d'ensoleillement d'un ensemble d'objets localisés. Il s'agit pour ce faire de reproduire les états spatio-temporels d'ensoleillement de ces objets en simulant les relations géométriques qu'ils entretiennent avec le soleil au cours du temps.

Ces états spatio-temporels sont de toute évidence dynamiques. L'instrumentation ne peut donc s'opérer qu'au prix d'une réduction artificielle à un état statique d'ensoleillement. Deux processus généraux apparaissent, suivant que l'on choisit de discrétiser le temps ou de discrétiser l'espace. Le premier réduit le temps à un instant pour déterminer les ombres et les zones ensoleillées dans l'espace continu en cet instant. Le second processus réduit l'espace à un point pour déterminer sur ce point les périodes temporelles continues d'ombre et de soleil. Par itération de l'un ou l'autre de ces deux processus, on reconstitue une approximation généralement suffisante des états spatio-temporels d'ensoleillement des objets considérés.

Chacun de ces processus peut être mis en oeuvre par diverses méthodes instrumentales. Nous classons ces méthodes en trois groupes :

- les méthodes graphiques qui mettent en oeuvre les techniques de projection géométrique au trait en deux dimensions,
- les méthodes analogiques qui reproduisent par des dispositifs mécaniques ou optiques les positions relatives de la Terre et du soleil et l'ensoleillement résultant,
- les méthodes numériques enfin qui utilisent les procédures de la géométrie algorithmique et de la synthèse d'image.

Quelle que soit la méthode mise en oeuvre, des traitements préalables et postérieurs à la simulation proprement dite sont nécessaires. Les premiers concernent la détermination de la position du soleil en chaque instant et la construction de représentations pratiques de ces données, sous forme de diagrammes solaires. Les seconds s'appliquent aux résultats de la simulation pour, d'une part en permettre la prise de connaissance, d'autre part en extraire des indices utiles à l'analyse.

Nous présentons dans ce chapitre les éléments intéressants de chaque étape. En premier lieu, nous donnons les principes de calcul et de représentation des trajectoires solaires suivant différentes projections. Nous abordons ensuite les méthodes spécifiques de simulation suivant les trois groupes proposés : graphiques, analogiques et numériques. Nous présentons enfin quelques méthodes de traitement analytique des résultats. En conclusion, nous donnons un exemple de détournement de ces méthodes pour la simulation de

l' « accessibilité visuelle » d'un objet architectural dans son environnement urbain.

Notons que la simulation de l'ensoleillement ne produit que des résultats géométriques, lesquels, une fois croisés, peuvent fournir des indices analytiques et permettre de dégager des propriétés d'ensoleillement plus générales. D'autres méthodes existent pour la simulation réaliste de la lumière naturelle dans ses composantes directes, réfléchies (lancer de rayon) et diffuses (radiosité). Ces méthodes produisent des images (lancer de rayons) ou des quantifications physiques de l'énergie reçue en différents points des objets considérés (radiosité). Elles ne permettent généralement pas la détermination géométrique exacte des taches d'ensoleillement. Des méthodes mixtes sont proposées pour la simulation à la fois géométrique et physique des états lumineux. Ces techniques font l'objet d'une littérature abondante que nous n'évoquons pas dans ce rapport.

## 2.1 Les trajectoires solaires

Sans paradoxe aucun, les trajectoires solaires représentent le mouvement du soleil *autour* de la Terre. Plus exactement, elles décrivent le mouvement apparent du soleil sur la voûte céleste pour un observateur situé en un point fixe de la Terre. Pour cet observateur, les trajectoires apparentes figurent le chemin perceptible du soleil, du lever au coucher, tout au long de l'année.

Les trajectoires solaires sont définies par le mouvement de la Terre autour du soleil, formalisé par les lois de Kepler. Pour une localisation fixe, la direction du soleil est donnée à chaque instant par ses coordonnées angulaires dont nous décrivons le calcul ci-après (figure 2.9). Différents types de projections peuvent être appliqués aux trajectoires solaires pour construire des diagrammes utilisables dans les deux dimensions de la table à dessin. Nous présentons ces diagrammes solaires avant de développer leur mise en oeuvre dans les méthodes de simulation graphique de l'ensoleillement (section suivante 2.2.1).

### 2.1.1 Coordonnées angulaires du soleil

#### 2.1.1.1 Le mouvement de la Terre autour du soleil

La Terre est une pseudo-sphère qui tourne sur elle-même et qui se déplace sur une orbite elliptique de faible excentricité dont le soleil occupe l'un des foyers (figure 2.1). L'axe de rotation de la Terre (ou axe des pôles) reste parallèle à lui-même durant ce déplacement, avec une inclinaison quasi-constante par rapport à la normale au plan de l'écliptique (plan de déplacement du soleil). Sur l'orbite terrestre, le segment de droite soleil-Terre balaie des aires égales en des temps égaux (deuxième loi de Kepler) ; en conséquence, la Terre se déplace avec une vitesse variable — les jours solaires possédant de même une durée variable. D'autres phénomènes oscillatoires (nutation, précession des équinoxes) perturbent sensiblement ce mouvement avec des périodes imperceptibles à l'échelle humaine.

On simplifie généralement ce système en supposant que l'orbite terrestre est un cercle dont le soleil occupe le centre. Suivant cette approximation, la Terre se déplace sur son orbite avec une vitesse constante et les jours solaires possèdent des durées égales (24 heures, par convention). L'inclinaison de l'axe des pôles par rapport à la normale au plan de l'écliptique est supposée invariable et égale à  $23^{\circ}27'$ .

L'axe des pôles reste parallèle à lui-même lors du déplacement de la Terre. Il occupe en conséquence des positions différentes par rapport au cercle de

l'orbite terrestre (figure 2.2 page suivante). Ces positions peuvent être mesurées par l'angle, ou *déclinaison*, que fait cet axe avec le plan d'illumination de la Terre (plan par lequel la lumière solaire coupe la sphère terrestre en deux).

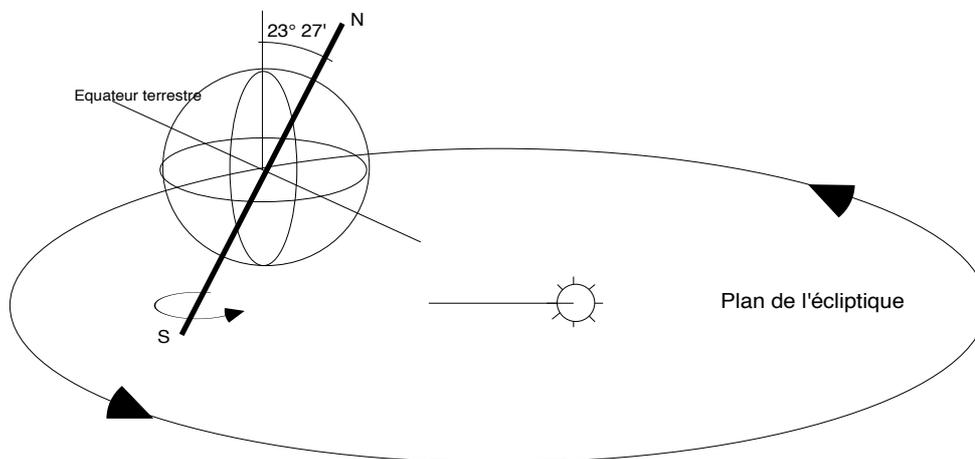


Figure 2.1. Mouvement de la Terre autour du soleil

La déclinaison est nulle en deux points de l'orbite terrestre, lorsque l'axe des pôles appartient à un plan tangent à cette orbite (position droite et position gauche du plan de la figure 2.2). Quelle que soit la latitude, la durée du jour est alors égale à celle de la nuit : ce sont les équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (22 septembre).

La déclinaison est maximale et égale à l'inclinaison de la Terre ( $23^{\circ}27'$ ) en deux points de l'orbite terrestre, lorsque l'axe des pôles appartient à un plan orthogonal à cette orbite (position haute et position basse du plan de la figure 2.2). Pour l'un de ces points, le jour atteint sa durée maximale dans l'hémisphère Nord (solstice d'été) et minimale dans l'hémisphère Sud (solstice d'hiver). Le phénomène inverse se produit pour l'autre point (solstice d'hiver dans l'hémisphère Nord et solstice d'été dans l'hémisphère Sud). Entre ces positions, la déclinaison varie journalièrement et définit traditionnellement les saisons.

La variation de la déclinaison est souvent présentée comme un « balancement » de la Terre autour de l'axe normal à l'écliptique. Ce mouvement est symétrique : il est ascendant du solstice d'hiver au solstice d'été (hiver, printemps) puis descendant du solstice d'été au solstice d'hiver (été, automne). En conséquence, le mouvement de la Terre autour du soleil est parfaitement décrit sur une demi-année, du solstice d'hiver au solstice d'été (figure 2.3). De fait, en un point quelconque de l'hémisphère Nord terrestre, le soleil paraît « monter » dans le ciel à partir du début de l'hiver, pour

culminer au 22 juin, puis « redescendre » jusqu'à l'hiver suivant. Le phénomène s'inverse dans l'hémisphère Sud : le soleil culmine au 22 décembre (solstice d'été) puis décroît quotidiennement jusqu'au 22 juin (solstice d'hiver de l'hémisphère Sud).

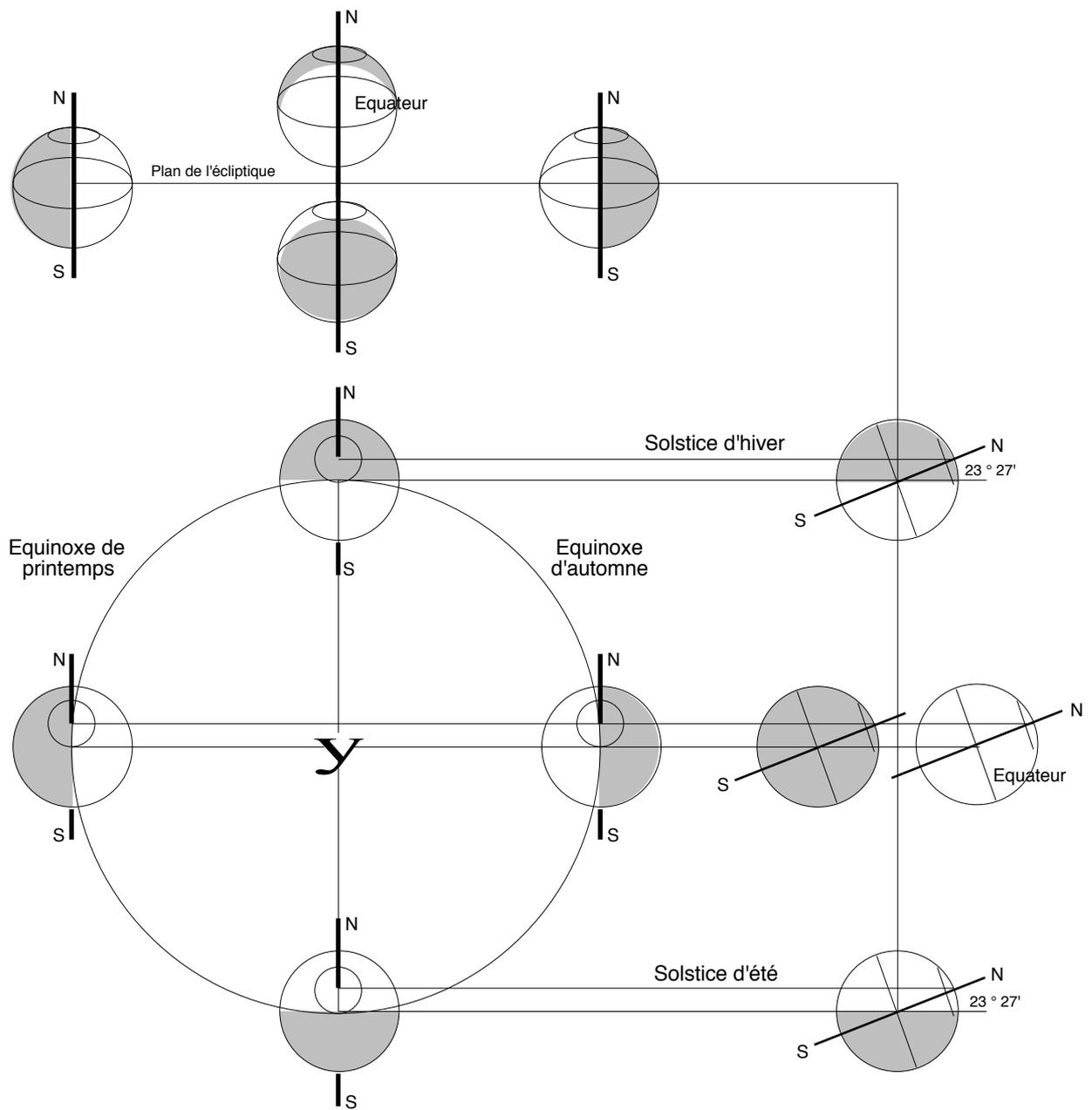


Figure 2.2. Positions de la Terre en géométral aux solstices et aux équinoxes

### 2.1.1.2 Le mouvement apparent du soleil autour de la Terre

Pour figurer le mouvement *apparent* du soleil autour de la Terre, il est d'usage de faire appel à l'abstraction géométrique qu'est la *sphère céleste* de la cosmographie traditionnelle. Suivant la définition de Lespinard et al. (1957), la sphère céleste (ou sphère des fixes) est « une sphère fictive, de rayon extrêmement grand, ayant pour centre l'observateur, sur laquelle il semble que les étoiles sont fixées et que les autres astres se déplacent. » La sphère céleste est définie pour n'importe quel point terrestre (l'observateur). Elle contient l'ensemble des « météorites » au sens aristotélicien : les astres (dont le soleil), les planètes, les constellations..., supposés s'y déplacer suivant des courbes représentant leur trajectoire apparente au cours du temps depuis le point d'observation considéré. L'intersection de la sphère et d'un plan parallèle à l'écliptique passant par le point d'observation est un cercle autour duquel l'inclinaison de la Terre définit le cylindre du zodiaque.

La sphère céleste n'a pas d'échelle puisqu'elle est considérée de rayon extrêmement grand. Le soleil est donc supposé rayonnant depuis l'infini et ses rayons, convergeant vers la Terre, sont supposés *parallèles*. Cette hypothèse sera implicite dans toutes les méthodes de simulation de l'ensoleillement que nous décrirons dans la suite de ce rapport (l'angle solide d'incidence de la lumière solaire sur la Terre est en réalité très faible, de l'ordre de  $68.10^{-5}$  stéradian).

Le mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste n'est que le miroir du mouvement réel de la Terre sur son orbite. Supposons que la sphère céleste accompagne le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même, c'est-à-dire qu'elle tourne continuellement autour de son diamètre parallèle à l'axe des pôles terrestre ; cet axe de rotation est encore appelé axe du monde dans la cosmographie traditionnelle. Dans le repère défini par l'axe du monde et le plan diamétral orthogonal, le soleil placé sur la sphère céleste semble parcourir une double spirale dont la pente reflète la déclinaison régulière et sy-

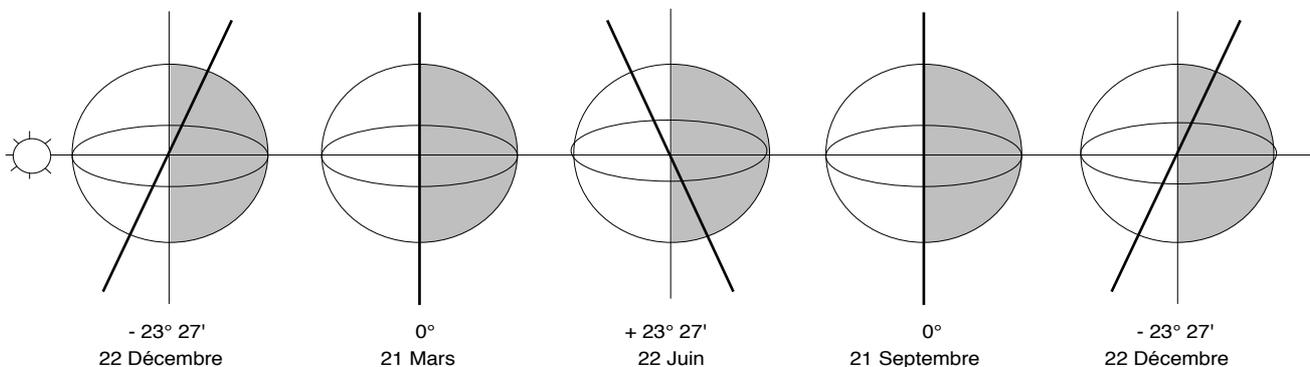


Figure 2.3. Variation de la déclinaison terrestre au cours de l'année

métrique de la Terre — déclinaison ascendante du 22 décembre au 22 juin et descendante du 22 juin au 22 décembre. Sur cette spirale, le soleil parcourt un tour complet de la sphère, et revient dans le même plan, en une journée solaire (24 heures).

Nous avons représenté ce mouvement sur la figure 2.4 ci-dessous (à gauche) en réduisant l'année à trois jours solaires, c'est-à-dire en considérant que la Terre effectue sa révolution autour du soleil en trois révolutions autour d'elle-même. Dans cette configuration fictive, la déclinaison de la spirale solaire sur la sphère céleste lors d'une même journée solaire est considérable. Sur l'année réelle de 365 jours, la déclinaison journalière devient beaucoup plus faible et l'arc de spirale que parcourt chaque jour le soleil peut être aisément approché par un cercle, parallèle au plan équatorial céleste. C'est cette approximation qui est généralement mise en oeuvre pour décrire les trajectoires apparentes du soleil sur la sphère céleste. Elle discrétise la course annuelle du soleil en un ensemble de cercles parallèles, chacun représentant une journée, et dont la hauteur relative au plan équatorial est égale à la déclinaison moyenne du soleil pendant cette journée (figure 2.4 à droite). Cette représentation nous oblige donc à concevoir un « saut » discret journalier du soleil, d'un cercle à l'autre, du solstice d'hiver au solstice d'été puis, de manière symétrique, du solstice d'été au solstice d'hiver.

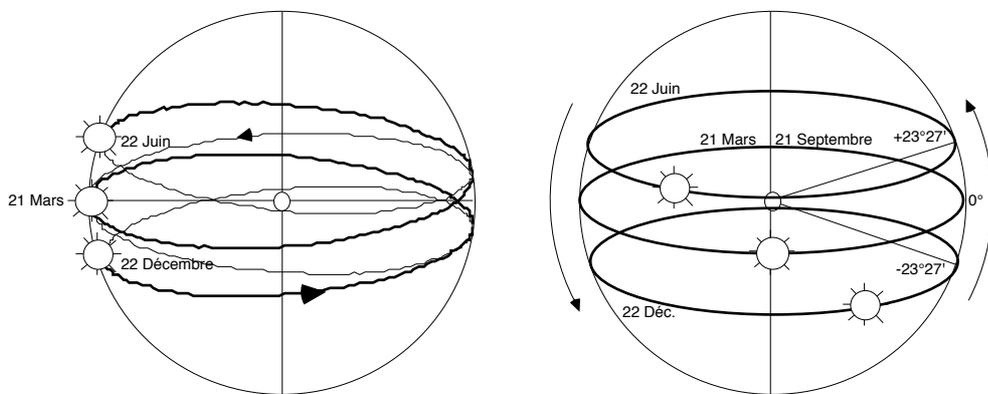


Figure 2.4. Mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste

Le mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste est supposé identique, quel que soit le centre de la sphère, puisque celle-ci est considérée de rayon infini. Pour définir les trajectoires solaires apparentes en un point terrestre  $P$  quelconque, il nous suffit de représenter la sphère céleste, *centrée en ce point*. Le plan horizon de  $P$  — plan tangent à la sphère terrestre en  $P$  — coupe alors la sphère céleste en deux hémisphères, dont l'un contient les parties *visibles* des trajectoires solaires depuis  $P$  (figure 2.5 en bas). Ces trajectoires correspondent aux périodes pour lesquelles le soleil peut être vu

depuis P, c'est-à-dire aux jours. Les trajectoires invisibles correspondent inversement aux nuits.

Pour simplifier la lecture, on effectue une rotation des trajectoires visibles de telle sorte que la verticale de P devienne colinéaire à la verticale du repère de présentation (figure 2.5 haut). Cette rotation qui transforme les trajectoires équatoriales en trajectoires locales a pour axe le diamètre Est-Ouest de la Terre et pour angle le complémentaire de la latitude de P, ou *colatitude* de P (voir l'application de cette propriété dans le Girasol, section suivante).

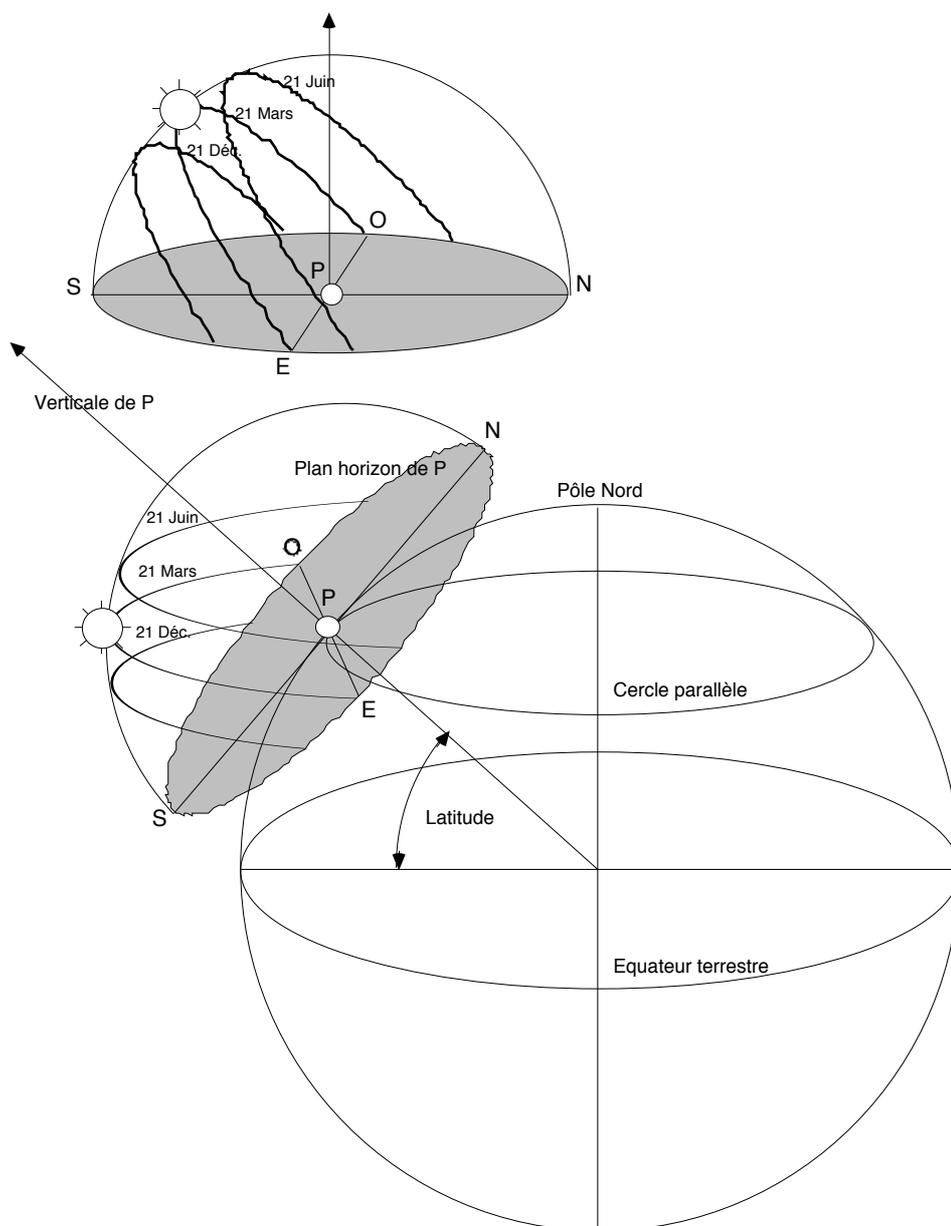


Figure 2.5. Trajectoires solaires apparentes en un point P sur la Terre

Les trajectoires apparentes en P sont donc des arcs de cercles de différentes longueurs, correspondant aux durées des jours. Elles sont complètement définies sur une demi-année, ce pourquoi on les représente le plus souvent pour le 21 de chaque mois, du solstice d'hiver au solstice d'été (hiver et printemps). Les trajectoires correspondantes de l'été et de l'automne, lorsqu'elles ne sont pas explicitées, peuvent être facilement déterminées suivant le tableau ci-dessous (à 1 journée près).

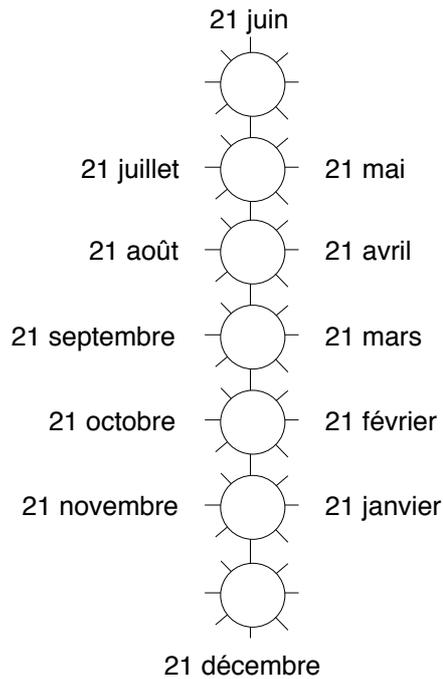


Figure 2.6. Correspondance des trajectoires solaires sur l'année

### 2.1.1.3 Les coordonnées angulaires du soleil

Les coordonnées angulaires du soleil représentent la direction apparente du soleil sur sa trajectoire, pour un observateur fixe sur la Terre, en un instant donné. Ces coordonnées sont exprimées en azimut et hauteur, notés respectivement  $A$  et  $H$ . L'azimut  $A$  est l'angle que fait le plan azimutal du soleil avec le plan méridien du lieu, si l'on définit le plan azimutal du soleil comme le plan vertical (orthogonal au plan horizontal local) contenant le soleil supposé ponctuel et le point d'observation. L'azimut est mesuré à partir de la direction du Sud (azimut 0 ou midi solaire — le soleil passe dans le méridien du lieu), positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

La hauteur  $H$  du soleil est l'angle que fait la direction apparente du soleil avec le plan horizontal du lieu dans le plan azimutal du soleil (figure 2.7 page suivante). Elle varie dans un intervalle  $[0, \alpha]$ , où 0 représente la hau-

teur au lever et au coucher (intersection du plan horizon du lieu avec la sphère céleste) et  $\alpha$ , la hauteur maximale, fonction de la latitude du lieu d'observation.

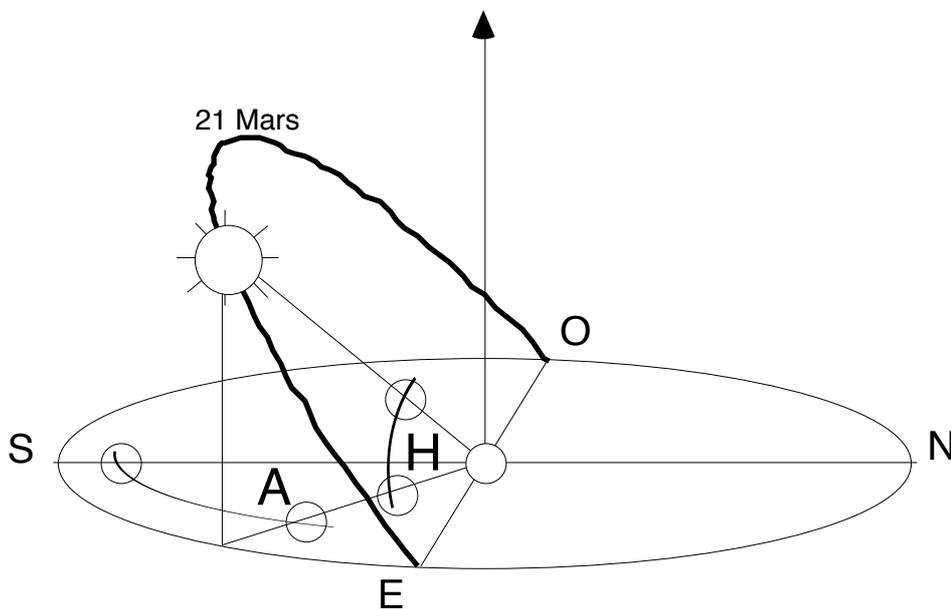


Figure 2.7. Azimut  $A$  et hauteur  $H$  du soleil

Les calculs nécessaires à la détermination de la position du soleil en un lieu terrestre, pour un jour et un instant donnés, sont exposés dans l'encadré 2.9. Les variables considérées sont la latitude (dépendant du lieu), la déclinaison (dépendant du jour) et l'angle horaire (dépendant de l'instant). Les relations permettent de calculer la direction apparente du soleil pour l'instant, le jour et le lieu considérés. Elles donnent également la hauteur à midi et l'azimut au lever (et au coucher) pour le jour et la latitude considérés.

Notons que ces trois dernières données sont suffisantes pour la détermination complète de la trajectoire apparente du soleil au jour et à la latitude considérés. Elles déterminent en effet trois points sur la sphère céleste (lever, culmination et coucher) qui suffisent à la caractérisation géométrique ou analytique de la trajectoire circulaire du soleil pour la journée et la latitudes considérées.

#### 2.1.1.4 La correction temporelle

Les coordonnées angulaires du Soleil sont données à une erreur près, celle-ci résultant de l'approximation par un cercle de la trajectoire de la Terre autour du soleil. Par cette approximation, la durée variable du jour solaire vrai (fonction de la vitesse variable de la Terre sur son orbite elliptique) est

transformée en une durée moyenne constante de 24 heures. L'erreur engendrée est variable pour chaque jour de l'année et fait l'objet d'une publication par le Bureau des Longitudes. On peut cependant, le plus souvent, se satisfaire de sa valeur moyenne, sensiblement sinusoïdale, dénommée « équation du temps » et représentée sur la figure 2.8 ci-dessous.

Il convient bien sûr d'ajouter à cette valeur de l'équation du temps le décalage horaire propre de la longitude du lieu d'observation (ou correction de longitude par rapport au méridien de référence, comptée négativement vers l'Est et positivement vers l'Ouest) ainsi que les majorations horaires effectuées dans certains pays (heures d'hiver et d'été). Au total, pour une direction apparente du soleil à déterminer au « temps civil »  $TC$  (ou temps légal), on utilise le « temps solaire vrai »  $TSV$  correspondant :

$$TSV = TC - Equation\_temps - Correct\_Longitude - Maj\_Horaire$$

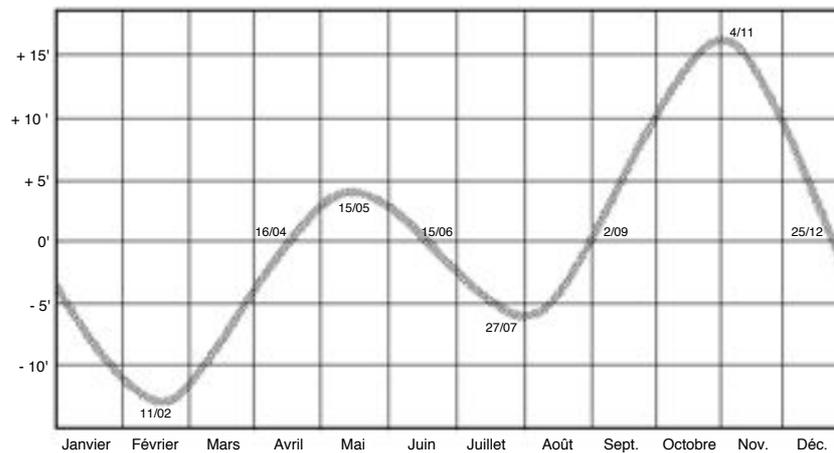


Figure 2.8. Valeur moyenne de l'équation du temps (d'après Mazria 1981)

**Calcul de la direction du soleil en azimut et hauteur**  
pour une latitude  $L$ , un jour  $j \in [1, 365]$  et un instant  $t$ .

Le jour  $j$  détermine la déclinaison  $D$  du soleil suivant les formules :

$$\sin D = 0.398 \cdot \sin(w(j - a)) \text{ avec } a = 81 - 2 \cdot \sin(w(j - 2))$$

$$\sin D \approx 0.4 \cdot \sin(w(j - 81)) \text{ pour une erreur absolue } < 1^\circ$$

où  $w$  représente la vitesse angulaire de la Terre soit  $w = 2\pi / 365.25 \text{ rd/jour}$ .

L'instant  $t$  exprimé en temps solaire vrai définit l'angle horaire  $Ah$  suivant les conventions :

$$\begin{cases} Ah = 0 \text{ à midi solaire vrai (le soleil est dans le plan méridien du lieu)} \\ Ah \pm 15^\circ / \text{heure autour de midi} \\ Ah \geq 0 \text{ vers l'Ouest et } Ah \leq 0 \text{ vers l'Est} \end{cases}$$

La déclinaison et l'angle horaire étant calculés, l'azimut  $A$  et la hauteur  $H$  du soleil sont donnés par :

$$\sin H = (\sin L \cdot \sin D) + (\cos L \cdot \cos D \cdot \cos Ah)$$

$$\sin A = \frac{\cos D \cdot \sin Ah}{\cos H} \text{ et } \cos A = \frac{(\sin L \cdot \cos D \cdot \cos Ah) - (\cos L \cdot \sin D)}{\cos H}$$

Ces relations permettent d'établir la hauteur du soleil à midi ( $Ah$  nul) :

$$\cos Ah_{\text{midi}} = 1, \text{ d'où:}$$

$$\sin H_{\text{midi}} = (\sin L \cdot \sin D) + (\cos L \cdot \cos D) = \cos(L - D), \text{ soit:}$$

$$H_{\text{midi}} = (\pi / 2) - L + D$$

et l'angle horaire correspondant aux heures de lever et coucher ( $H$  nulle) :

$$\sin H_{\text{Lever}} = 0, \text{ d'où:}$$

$$\cos Ah_{\text{Lever}} = -\frac{\sin L \cdot \sin D}{\cos L \cdot \cos D} = -\tan L \cdot \tan D$$

On en déduit l'azimut du soleil au lever :

$$\cos A_{\text{Lever}} = \frac{(\sin L \cdot \cos D \cdot \cos Ah_{\text{Lever}}) - (\cos L \cdot \sin D)}{\cos H_{\text{Lever}}}, \text{ soit:}$$

$$\cos A_{\text{Lever}} = -(\sin L \cdot \cos D \cdot \tan L \cdot \tan D) - (\cos L \cdot \sin D), \text{ d'où}$$

$$\cos A_{\text{Lever}} = -\frac{\sin D}{\cos L}$$

Figure 2.9. Calcul des coordonnées angulaires du soleil

## 2.1.2 Abaques et diagrammes solaires

Les abaques et diagrammes solaires ont généralement une double fonction. Ils permettent d'une part de déterminer, avec une approximation suffisante, les coordonnées angulaires du soleil pour une date et un instant donné ; d'autre part, ils sont le support des constructions géométriques nécessaires à la simulation graphique de l'ensoleillement, tant pour la détermination des ombres que pour celle des périodes d'ensoleillement. Nous exposons ces méthodes graphiques dans la section suivante, après la présentation des principaux diagrammes que sont le panorama solaire, le gnomon, la projection stéréographique et le Girasol.

Il existe de nombreux autres types de diagrammes solaires, plus spécifiques de la science de cadrans solaires : diptyques, cylindriques, analemmatiques, etc. Un ouvrage récent en donne un éventail intéressant et didactique sous la forme d'objets en carton à découper et à plier (Oudenot 1995).

### 2.1.2.1 Le panorama solaire

Le panorama solaire est une représentation cartésienne des trajectoires apparentes du soleil pour une latitude donnée (figure 2.10). Les azimuts  $y$  sont portés en abscisses et les hauteurs en ordonnées ; cette représentation permet donc une lecture immédiate des coordonnées angulaires du soleil pour une date et un instant donnés. Dourgnon et al. (1961) proposent une règle à curseur mobile permettant, par simple translation d'un panorama solaire, de lire

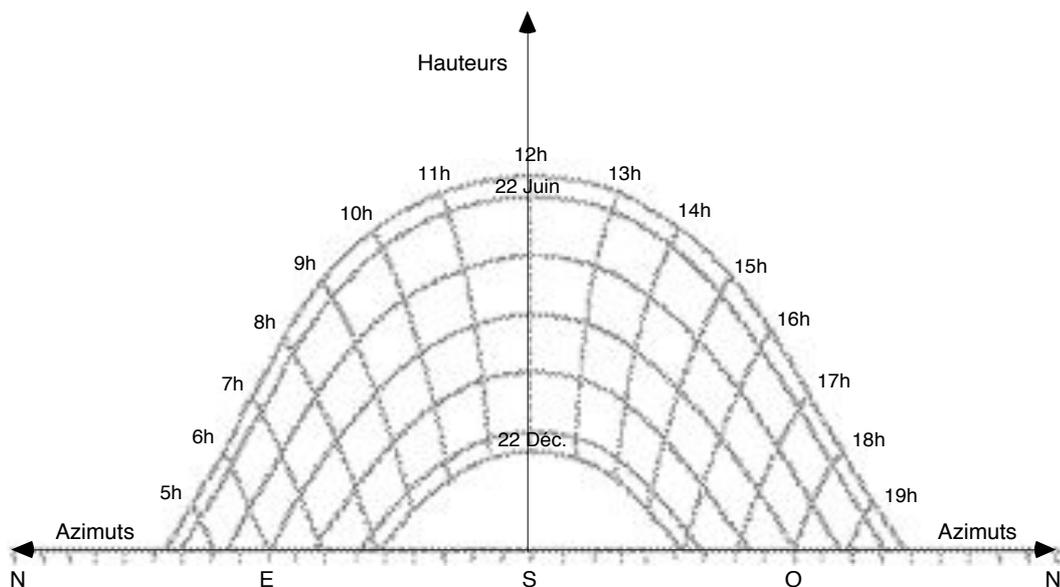


Figure 2.10. Panorama solaire 49° N (D'après Dourgnon 1961)

directement les périodes d'ensoleillement en différents points d'un même environnement. Cette représentation demande cependant des constructions graphiques complexes des objets de l'environnement en azimuts et hauteurs (les droites non verticales sont transformées en courbe, cf. Mazria 1981).

### 2.1.2.2 Le Gnomon

Le gnomon ( $\gamma\nu\omega\mu\omega\nu$ ) est originellement le stylet vertical portant ombre sur une table plane d'inclinaison quelconque. Par extension, le gnomon représente le tracé des lignes définies au cours du temps par l'ombre mobile de la pointe du stylet sur la table. La *gnomonique* est ainsi l'étude et la réalisation des gnomons, principalement dans leur office de cadrans solaires (Oudenot 1983, 1995).

Géométriquement, les lignes que décrivent l'ombre portée de l'extrémité d'une tige verticale sur une table correspondent à la projection perspective conique des trajectoires apparentes du soleil au point terrestre considéré (figure 2.11). Le centre de la transformation perspective est ce point lui-même et le plan de projection est celui de la table. La distance  $d$  du plan de projection au centre de la perspective définit la hauteur du gnomon.

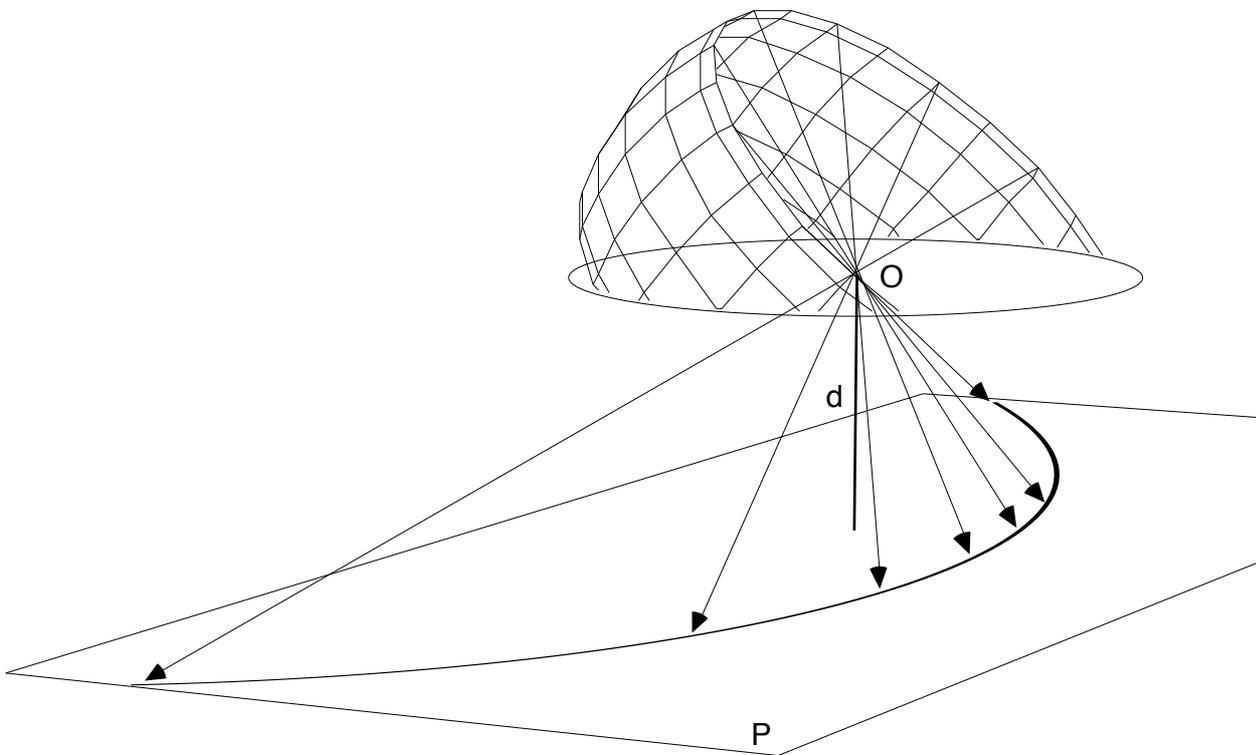


Figure 2.11. Principe de détermination du gnomon

Les diagrammes solaires réalisés suivant ce principe utilisent généralement une projection perspective sur un plan horizontal. Dans ce cas, l'azimut du soleil pour une date et un instant donné (à la latitude du gnomon) peut être relevé directement sur le diagramme. La hauteur du soleil au même instant est donnée par une simple élévation de la ligne d'ombre suivant la hauteur de la tige (figure 2.12). J. Dourgnon (1961) note que la longueur de l'ombre mesurée sur le diagramme est proportionnelle à la cotangente de la hauteur du soleil ; il y voit l'explication du nom d'*umbra* donné à la notion de tangente à son apparition en Occident au XIII<sup>e</sup> siècle.

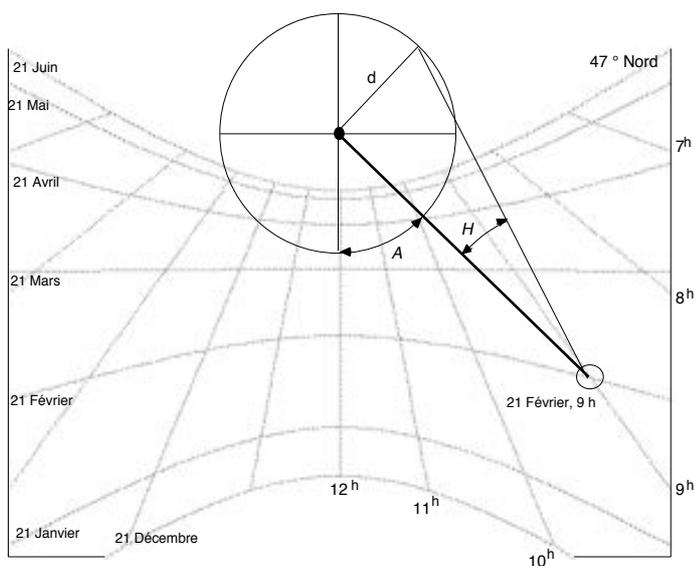


Figure 2.12. Lecture des coordonnées angulaires  $A$ ,  $H$  sur le gnomon

M. Twarowski (1967), dont nous avons exposé les travaux sur la plastique solaire au chapitre précédent, propose une variante simplifiée du gnomon sous la forme d'un diagramme solaire construit pour une journée donnée (dit diagramme solaire MT, figure 2.13 page suivante). Sur ce diagramme apparaissent d'une part les faisceaux horaires rayonnants, d'autre part des droites parallèles représentant les ombres d'un point à différentes altitudes d'un stylet vertical. L'intersection d'une droite d'altitude avec une droite horaire donne l'ombre d'un point à cette altitude, pour l'heure considérée et pour la date du diagramme. Cette représentation simplifie donc, pour une date donnée, toutes les constructions graphiques permises par les gnomons conventionnels.

### 2.1.2.3 La projection stéréographique des trajectoires solaires

Cette projection particulière fait correspondre un point d'un plan à chaque point d'une sphère par une transformation perspective (ou inversion) ayant

pour centre un point de la sphère elle-même (Deltheil 1946). Elle est principalement mise en oeuvre pour la réalisation des cartes géographiques puisqu'elle réalise la conservation des angles. Elle possède deux autres propriétés intéressantes : les cercles de la sphère passant par le centre d'inversion sont projetés suivant des droites rayonnantes tandis que des cercles parallèles sur la sphère sont transformés en cercles concentriques sur le plan.

La projection stéréographique peut être appliquée aux trajectoires circulaires du soleil sur la sphère céleste en un point de la Terre (figure 2.14). Les trajectoires et les lignes horaires apparentes se projettent alors suivant des arcs de cercles qu'il est possible de déterminer graphiquement ou analytiquement (CRMAA 1977, AFEDES 1980). En utilisant le pôle Sud de la sphère céleste comme centre de projection, les grands cercles de même azimut (méridiens) sont projetés suivant des droites rayonnantes tandis que les cercles parallèles de même hauteur sont transformés en cercles concentriques (figure 2.15). Construite pour une latitude fixe, cette projection permet donc une lecture facile des coordonnées angulaires du soleil. En outre, dans le cadre du projet, elle facilite l'ajustement, en azimuts et hauteurs, des objets étudiés (cf. § 2.2.1.2).

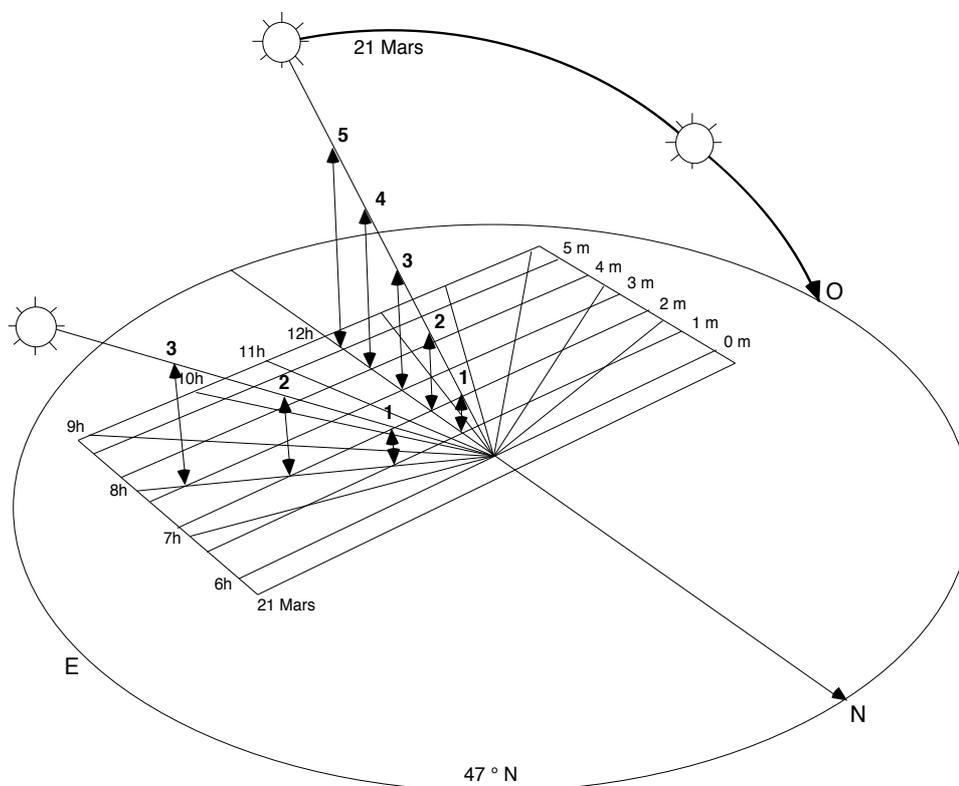


Figure 2.13. Construction du diagramme solaire MT (Twarowski 67)

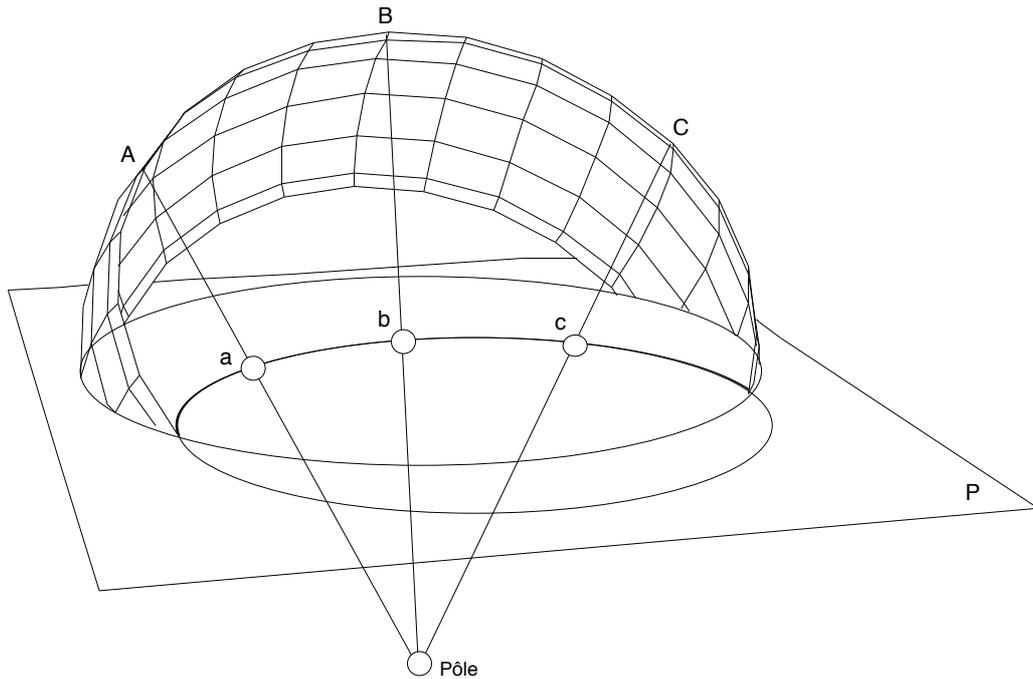


Figure 2.14. Principe de la projection stéréographique des trajectoires solaires

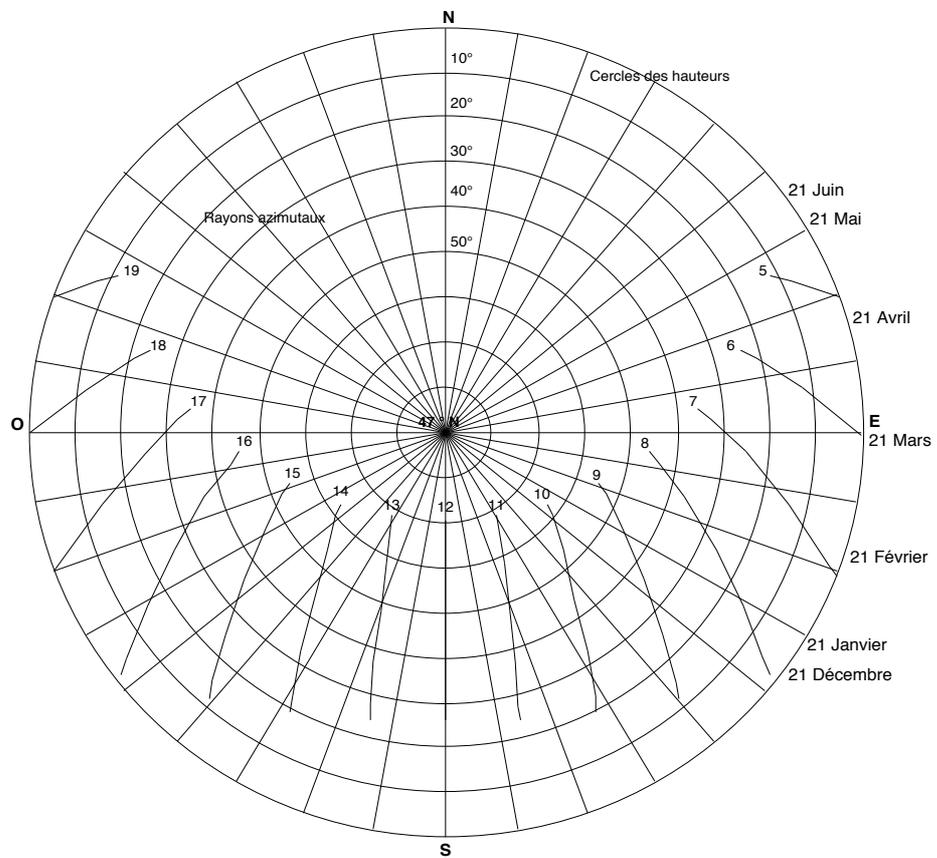


Figure 2.15. Projection stéréographique des trajectoires solaires 47° N

#### 2.1.2.4 Le Girasol

Contrairement aux diagrammes précédents établis pour une latitude fixe — à chaque latitude correspond un diagramme différent —, le Girasol proposé par le CRMAA (1979) offre une représentation des trajectoires apparentes du soleil applicable pour tous les lieux terrestres. Il constitue en cela un abaque solaire universel. Pratiquement, le Girasol se présente sous la forme d'un support opaque sur lequel pivote un disque transparent. Sur le support sont représentées les courbes d'iso-azimut et d'iso-hauteur figurant la sphère céleste en tout point terrestre. Le disque transparent visualise les courbes solaires autour du 21 de chaque mois et les arcs horaires de 0 à 24 heures. On fixe la latitude d'étude en faisant pivoter le disque sur le support. Les courbes alors visibles sur la sphère céleste correspondent à la projection stéréographique des trajectoires apparentes du soleil pour cette latitude (figure 2.16 ci-dessous).

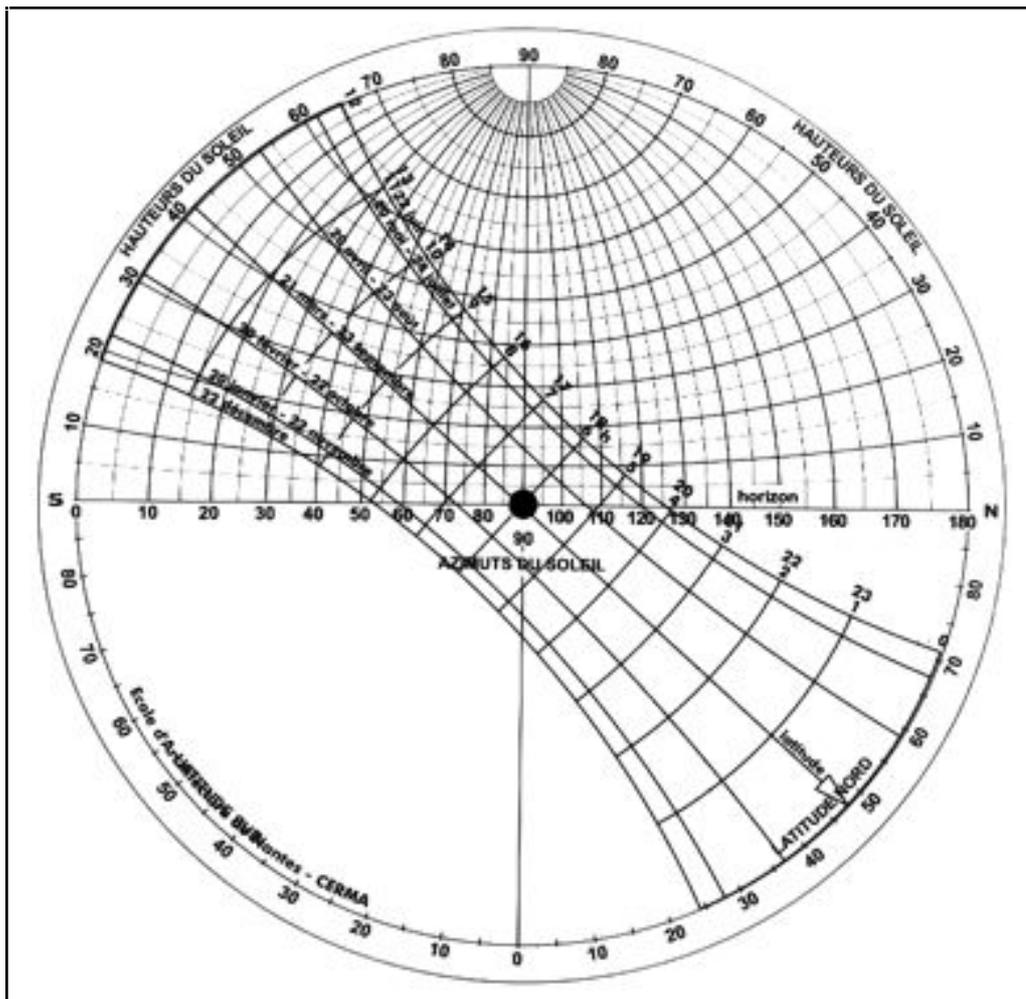


Figure 2.16. Le Girasol (CRMAA 1979)

La construction du Girasol repose sur un principe simple : les trajectoires solaires apparentes en n'importe quelle latitude se superposent toutes, à une rotation près, aux trajectoires équatoriales (figure 2.17 ci-dessous). La rotation qui transforme les trajectoires équatoriales en trajectoires locales a pour axe le diamètre Est-Ouest de la Terre et pour angle, la colatitude du lieu (cf. § 2.1.1.2). Il est possible de construire une projection stéréographique de ces trajectoires circulaires en utilisant le pôle Est (ou Ouest) de la Terre comme pôle d'inversion et un plan vertical passant par l'axe des pôles (dans le repère de la sphère céleste) comme plan de projection.

Les trajectoires transformées suivant cette projection se superposent, à une rotation près, quelle que soit la latitude. La rotation a pour centre l'image du pôle d'inversion et pour angle la latitude (la projection stéréographique conserve les angles). Les trajectoires solaires apparentes à n'importe quelle latitude peuvent donc être visualisées comme un unique ensemble de courbes « pivotant » sur la projection stéréographique de la sphère céleste, identique en tout lieu.

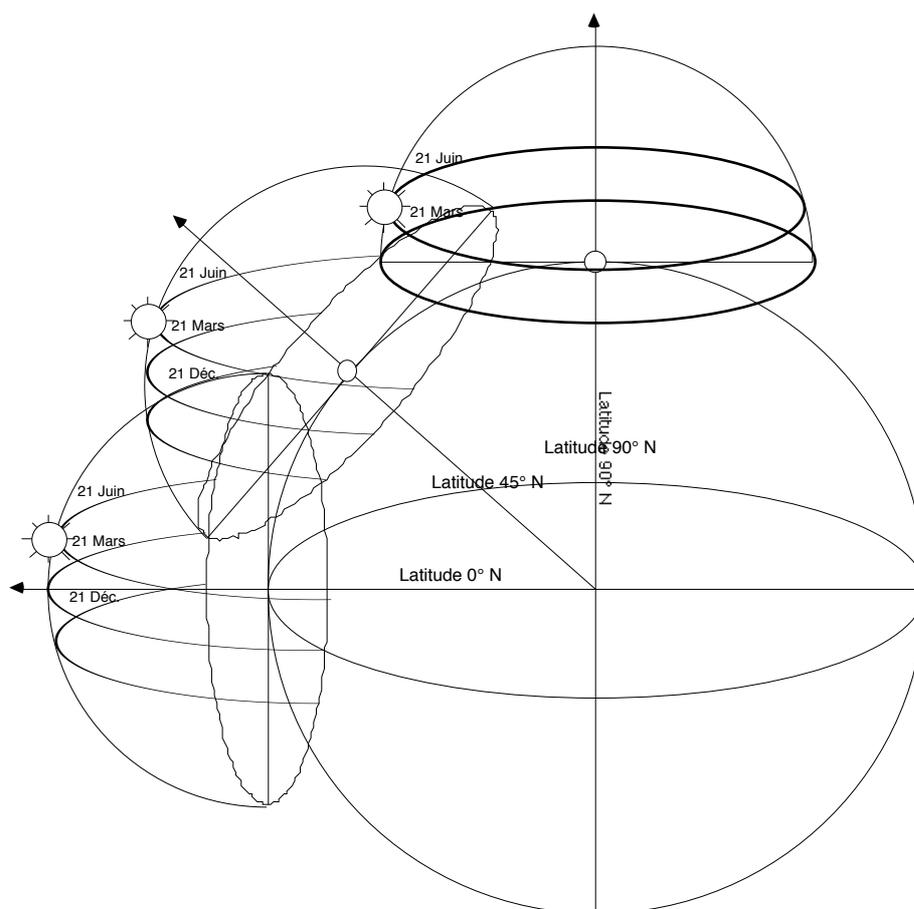


Figure 2.17. Trajectoires solaires apparentes en différentes latitudes

## 2.2 Méthodes de simulation graphiques, analogiques, numériques

La connaissance de la direction du soleil en tout instant permet d'opérer la simulation de l'ensoleillement, c'est-à-dire de reproduire les états spatio-temporels d'ensoleillement d'un ensemble d'objets localisés. Nous distinguons deux processus généraux de simulation, suivant que l'on choisit de discrétiser le temps ou de discrétiser l'espace, et trois grandes classes de méthodes : graphiques, analogiques et numériques. Nous présentons ici différentes techniques permettant de réaliser ces deux processus pour chacune des trois classes de méthodes. Nous envisageons également les méthodes mixtes, principalement les méthodes graphiques à support numérique.

Le premier processus vise à déterminer géométriquement, pour un instant donné, les parties ensoleillées et les parties ombrées des objets étudiés. Cette visualisation instantanée est le plus souvent établie pour quelques heures représentatives et quelques dates clés (équinoxes et solstices), entre lesquelles il est généralement possible d'extrapoler la dynamique de l'ensoleillement. Ce processus répond aux questionnements pour lesquels la dimension spatiale de l'ensoleillement prime sur la dimension temporelle. Il s'agit par exemple de déterminer l'ombre portée par un objet (effet visuel, impact énergétique), d'évaluer le dimensionnement d'un pare-soleil ou encore de quantifier les taches solaires sur une façade ou dans une pièce intérieure.

Le second processus consiste à déterminer les périodes d'ensoleillement et d'ombrage en un point singulier de l'environnement étudié. Cette vision ponctuelle est établie pour quelques points représentatifs de l'environnement, autour desquels les résultats peuvent être extrapolés sur des zones plus ou moins larges. Ce processus privilégie la dimension temporelle de l'ensoleillement et offre des réponses plus pertinentes en termes de bilan d'ensoleillement ou d'évaluation énergétique par exemple.

### 2.2.1 Les méthodes graphiques

Les méthodes graphiques réalisent la simulation de l'ensoleillement à l'aide des techniques de tracé géométrique dans les deux dimensions de la table à dessin. Elles utilisent les abaques solaires ou, plus finement, elles mettent à profit les propriétés géométriques des différents diagrammes solaires. Nous présentons ces méthodes pour les deux processus généraux que sont le tracé des ombres à un instant (détermination des zones ensoleillées) et le tracé des masques en un point (détermination des périodes d'ombrage).

### 2.2.1.1 Le tracé des ombres

Les méthodes de la géométrie descriptive permettent de construire la projection sur un plan, suivant une direction donnée, de n'importe quel volume élémentaire. Le tracé des ombres est analogue à une telle projection. Pour une direction correspondant au rayon solaire à l'instant considéré, il représente la projection des objets étudiés sur le plan du sol et, le cas échéant, sur les différentes surfaces des objets eux-mêmes. La figure 2.18 ci-dessous

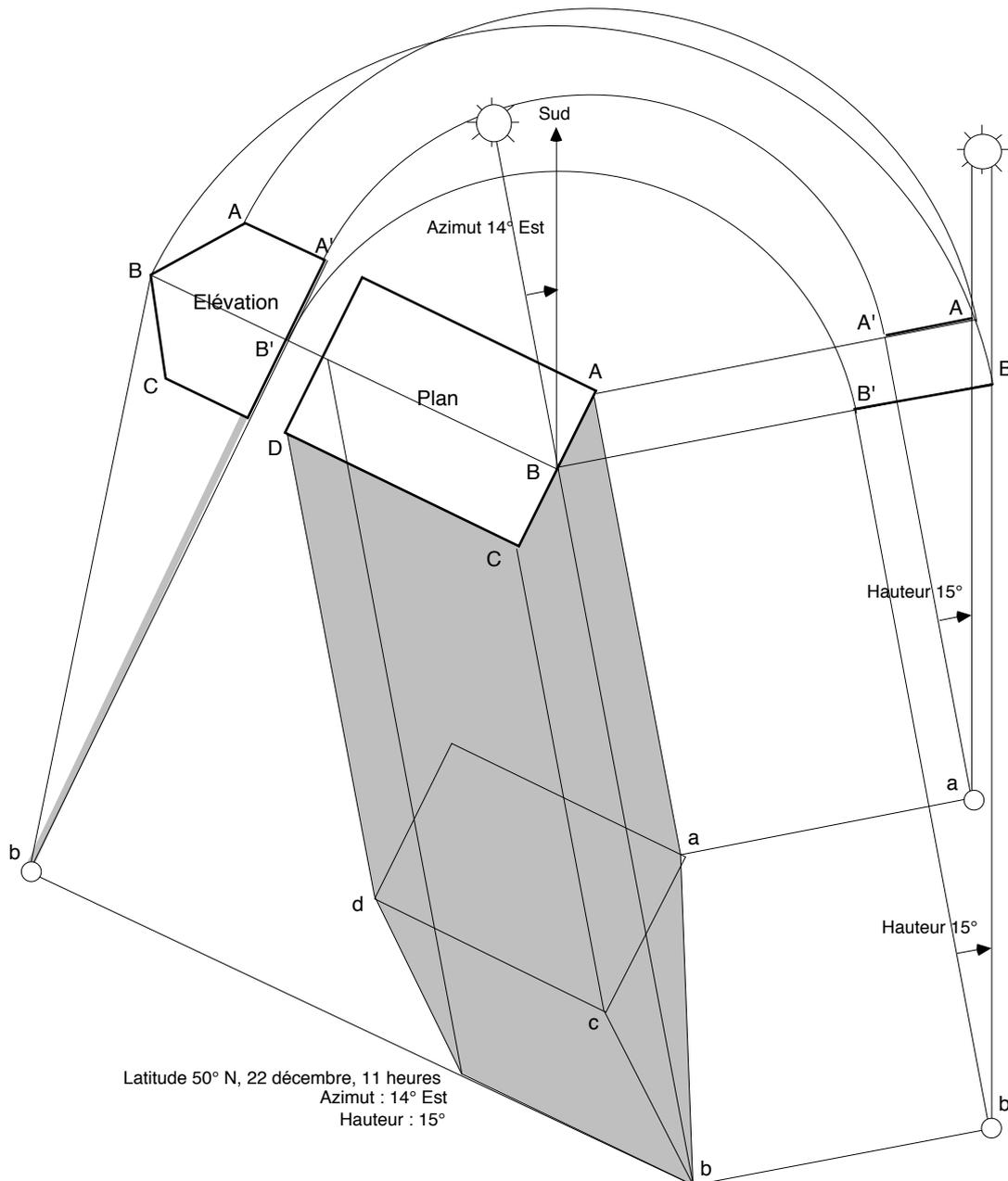


Figure 2.18. Tracé des ombres portées en dessin géométral

montre ainsi l'épure de l'ombre portée au sol par un volume simple, pour une date et un instant donnés. La direction du soleil correspondante est relevée sur le Girasol ou sur tout autre abaque ou diagramme solaire *ad hoc*.

Ces techniques graphiques résolvent également le tracé des ombres propres et portées en représentation axonométrique ou en perspective conique (Ruegg 1993). Dans la tradition des « Leçons de Ténèbres » classiques, elles portent même le tracé des ombres au niveau d'un art savant dont J.-P. Jungmann (1995) donnait encore récemment une illustration brillante.

Cependant, les diagrammes solaires permettent de s'affranchir de la construction des rayons solaires en géométral. Ainsi, le gnomon autorise le tracé immédiat des ombres portées au sol, sans relevé d'angle. La détermination de l'ombre s'effectue dans n'importe quel plan de projection avec les méthodes classiques de rabattements mises en oeuvre par la géométrie descriptive (figure 2.19 ci-dessous).

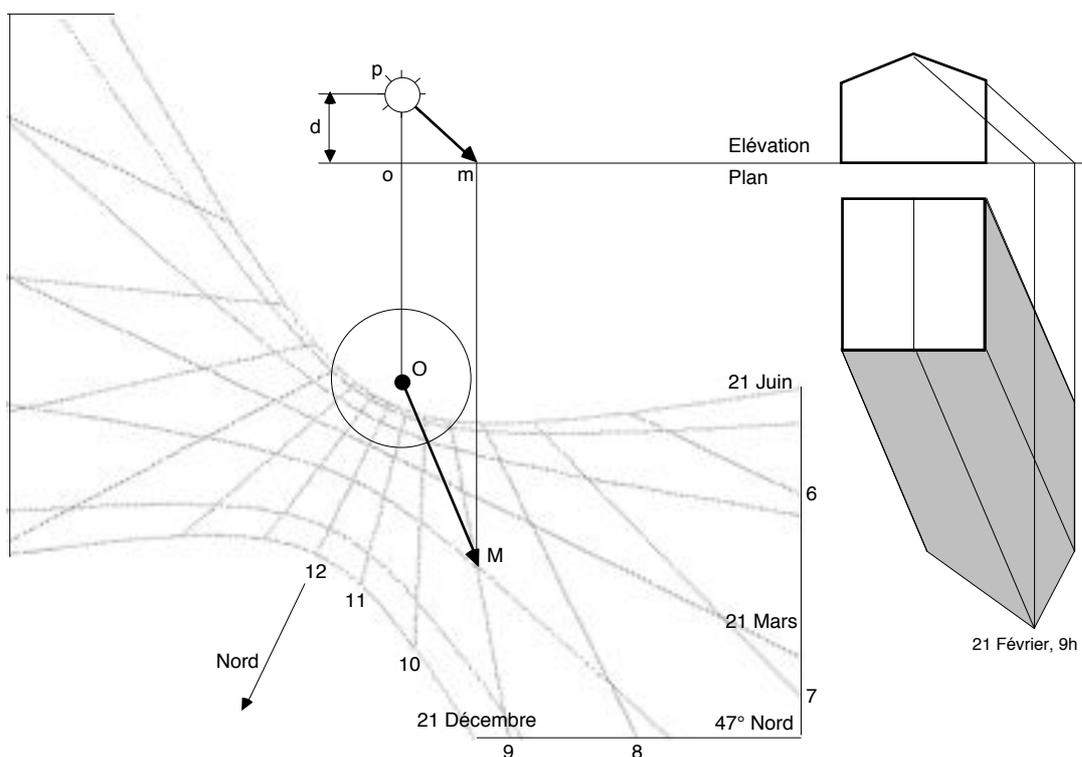


Figure 2.19. Tracé des ombres à l'aide du gnomon

Le diagramme solaire MT (Twarowski 67) simplifie encore les constructions puisque pour une date et une latitude fixes, il permet de se dispenser de l'élévation en effectuant un simple report des hauteurs. L'ombre est alors construite en autant de tracés que de hauteurs différentes (figure 2.20 page suivante).

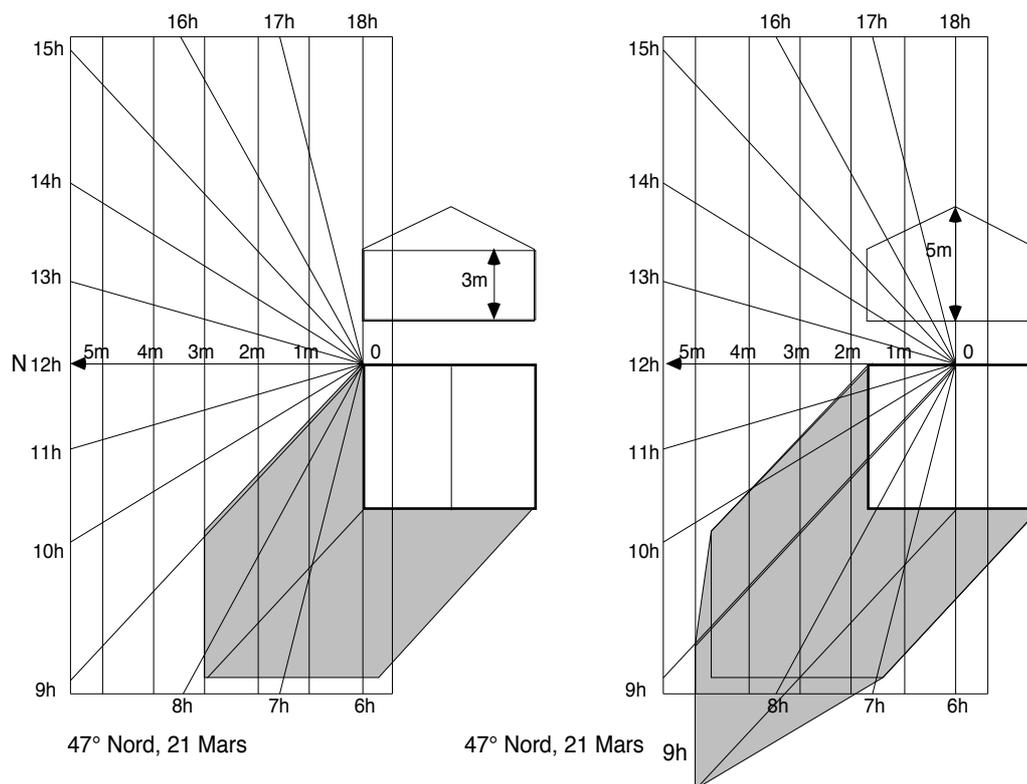


Figure 2.20. Tracé des ombres à l'aide du diagramme solaire MT

### 2.2.1.2 Le tracé des masques

L'environnement d'un point singulier constitue un ensemble de masques dont il est possible de donner une représentation conforme aux représentations des trajectoires apparentes du soleil. Si l'on superpose les masques ainsi figurés et les trajectoires solaires apparentes, on obtient une image synthétique des périodes d'ensoleillement et d'ombrage du point considéré : les parties des trajectoires masquées par l'environnement correspondent aux périodes d'ombrage du point tandis que les parties non-masquées représentent les périodes pendant lesquelles le point « voit » le soleil.

Toutes les représentations des trajectoires solaires peuvent être utilisées pour le tracé des masques. J. Dourgnon (1961) et E. Mazria (1981) proposent ainsi des canevas de courbes permettant de figurer les masques rectangulaires, conformément à la représentation cartésienne du panorama solaire. Les diagrammes solaires de type gnomon, utiles au tracé des ombres, peuvent également être mis à profit pour le tracé des masques. Ces diagrammes correspondent à la transformation perspective des trajectoires solaires, pour une latitude et une hauteur caractéristique (cf. § 2.1.2.2). La même transformation perspective (de distance principale égale à la hauteur du gnomon) peut être appliquée aux masques de l'environnement. P. Chauvel (1961)

donne ainsi deux méthodes de détermination des périodes d'ensoleillement à l'aide des diagrammes solaires, utilisant l'une une perspective à tableau horizontal et l'autre une perspective à tableau vertical.

De manière générale, toutes les vues perspectives représentant ensemble l'environnement étudié et les trajectoires apparentes du soleil sont applicables. Les outils numériques réalisant ces perspectives peuvent donc être facilement détournés à cet effet (figure 2.21). Il suffit pour cela de disposer d'un modèle géométrique des trajectoires apparentes du soleil à la latitude considérée. Lorsque l'on translate les trajectoires au point étudié, n'importe quelle perspective conique construite depuis ce point réalise le tracé des masques de l'environnement sur les trajectoires solaires.

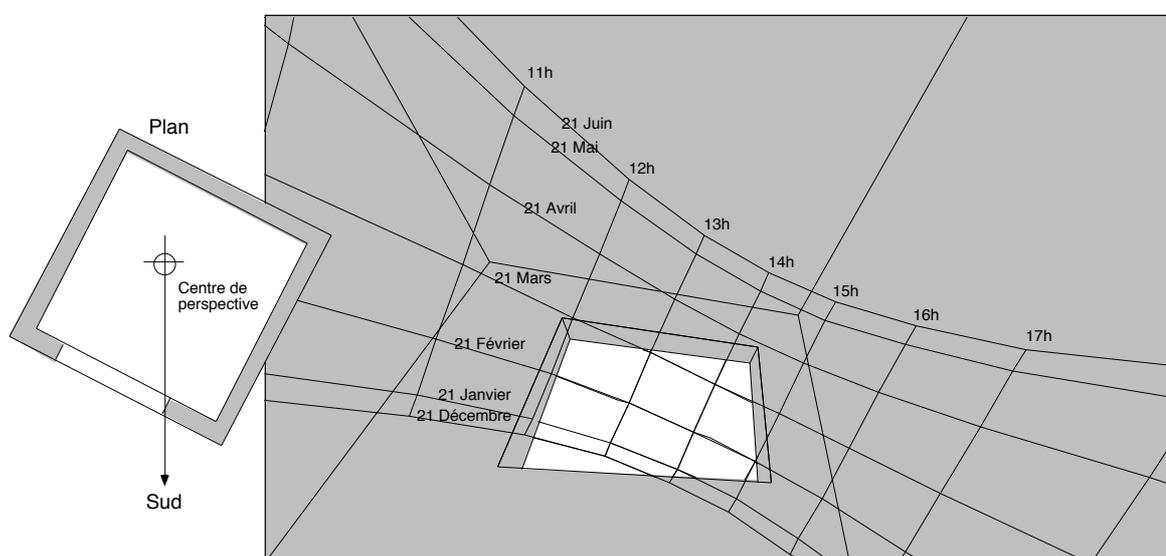


Figure 2.21. Périodes d'ensoleillement d'un point à travers une fenêtre

Bien que difficile à construire, la projection stéréographique est également utilisée pour le tracé des masques. Outre la lecture des périodes d'ensoleillement en un point, elle offre la possibilité d'ajuster facilement, de manière graphique, les gabarits d'objets en cours de définition dans le cadre du projet. Cet ajustement concerne principalement la hauteur angulaire des masques en fonction de contraintes d'ensoleillement au point considéré.

Le tracé des masques en projection stéréographique s'effectue à l'aide d'un diagramme angulaire construit pour un plan de référence quelconque (CRMAA 1979). Le diagramme angulaire représente les images projetées de plans parallèles et orthogonaux (verticalement et horizontalement) au plan de référence. Ces plans sont considérés pour des inclinaisons successives de  $10^\circ$  par rapport au plan de référence. On peut donc construire sur ce diagramme l'image stéréographique de n'importe quel masque parallélépipé-

dique, par un simple report des valeurs angulaires comprises entre les plans délimitant le masque et un plan de référence, choisi arbitrairement, contenant le centre de projection (figure 2.22 ci-dessous). Le masque une fois construit est reporté sur la projection stéréographique des trajectoires solaires, conformément à l'azimut du plan de référence. Les périodes d'ensoleillement et d'ombrage du point considéré se lisent alors immédiatement (figure 2.23 page suivante).

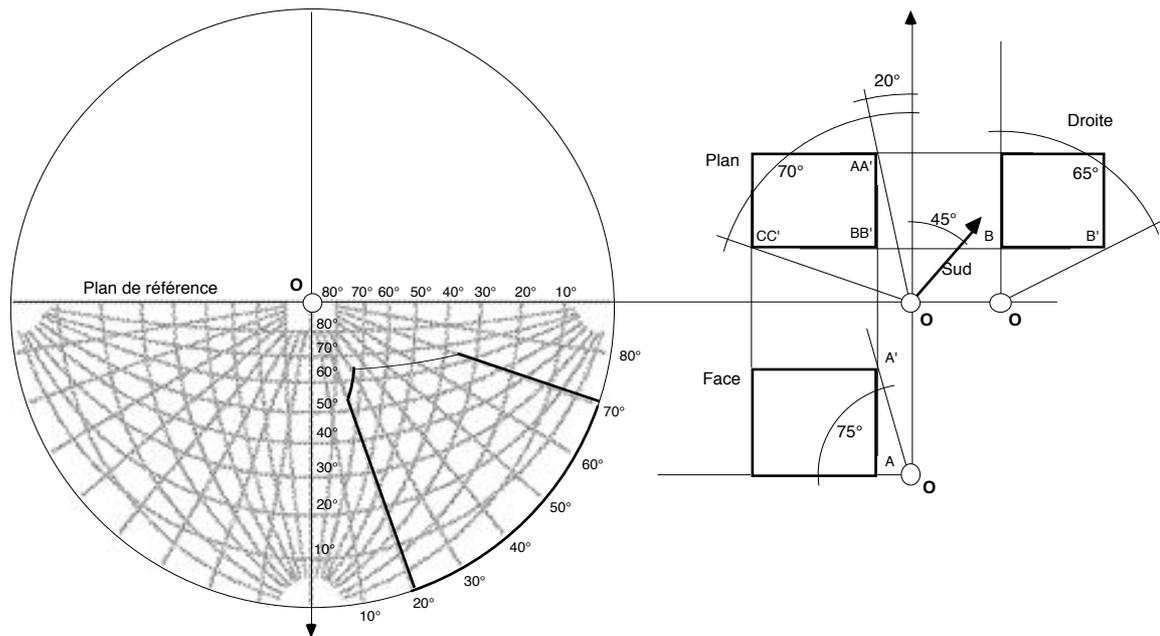


Figure 2.22. Construction d'un masque sur le diagramme angulaire

## 2.2.2 Les méthodes analogiques

Nous qualifions d'analogiques les méthodes permettant de reproduire les positions relatives de la Terre et du soleil et l'ensoleillement résultant. Ces méthodes sont mises en oeuvre par des dispositifs mécaniques ou optiques simulant un état statique d'ensoleillement sur une maquette des objets étudiés. Plusieurs systèmes ingénieux ont été construits. Ils permettent à la fois la représentation des ombres (l'héliodon) et la celle des périodes d'ensoleillement (l'horizontoscope).

### 2.2.2.1 L'héliodon

L'héliodon a donné son nom aux méthodes de simulation de l'ensoleillement par discrétisation du temps. Ce dispositif reproduit les taches d'ombre et de soleil sur une maquette, pour un instant correspondant à une direction solaire pour une latitude donnée.

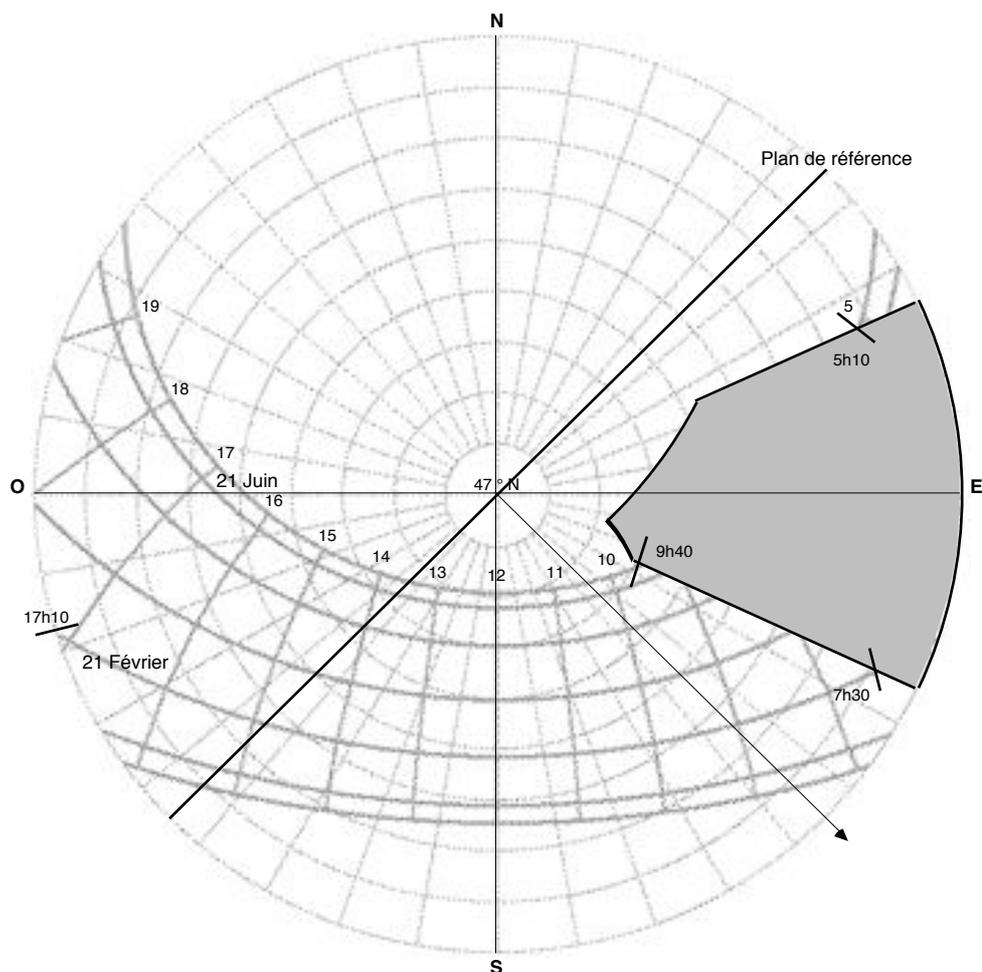


Figure 2.23. Report du masque et lecture des périodes d'enseillement

L'héliodon est composé d'un plateau articulé et d'une source lumineuse fixe (figure 2.24 page suivante). P. Steadman (1992) appelle *solarscope* (en anglais) le dispositif analogue muni d'un plateau fixe et d'une source articulée. Quel que soit le système, la source est placée au foyer d'un miroir parabolique reproduisant les rayons parallèles du soleil. Les différentes positions du plateau et de la source simulent les positions relatives de la Terre et du soleil.

Par ce dispositif, une maquette installée sur le plateau reçoit un ensoleillement factice correspondant aux jours et heures simulés pour une latitude donnée. Le réglage des paramètres temporels s'opèrent suivant les diagrammes propres à l'héliodon (Hermant 1943) ou, aussi facilement, au moyen d'un gnomon placé sur le plateau ; celui-ci fait alors office de cadran solaire dans le système analogue : le réglage est correct dès que le gnomon indique l'heure et la date choisies pour la simulation. Les états d'enseillement résultants sont simplement observés ou photographiés (Dourgnon 1961).

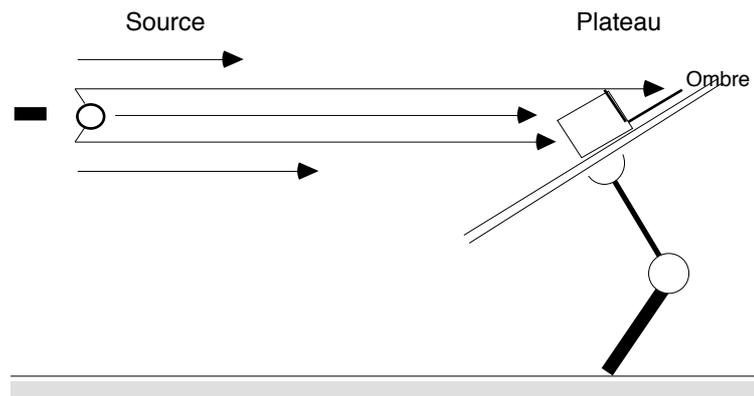


Figure 2.24. Schéma de principe de l'héliodon

#### 2.2.2.2 L'horizontoscope

Ce dispositif mal connu réalise la simulation analogique de l'ensoleillement par discrétisation de l'espace. L'horizontoscope permet de superposer les trajectoires solaires et les masques résultant de l'environnement autour d'un point donné d'un plan, d'une maquette ou d'un site réel. Les parties non-masquées des trajectoires représentent les périodes pour lesquelles le point considéré est potentiellement ensoleillé. L'horizontoscope fournit donc les périodes continues d'ombrage et d'ensoleillement pour un point de l'espace.

Un horizontoscope dit allemand daté de 1952 est présenté par le CRMAA (1977). Ce dispositif fonctionne pour une latitude fixe. Il est composé d'un plateau horizontal recouvert d'une surface parabolique transparente (figure 2.25 page suivante). La paraboïde simule sur le plateau horizontal la projection stéréographique de centre P de n'importe quel point M de l'espace. Les trajectoires solaires pour la latitude donnée sont dessinées sur le plateau suivant la même projection.

Par ce dispositif, l'horizontoscope reproduit la superposition graphique des trajectoires solaires dessinées et des masques reflétés au point de l'espace auquel il est placé. Un observateur regardant verticalement l'horizontoscope effectue la lecture directe des périodes d'ombrage et d'ensoleillement du point considéré.

Le CRMAA (1977) a proposé un appareil similaire baptisé latitudoscope. Dans cet appareil, les trajectoires solaires sont calculées suivant la projection stéréographique mise en oeuvre pour le Girasol (CRMAA 1979). Elles sont donc indépendantes de la latitude. Dès lors, le plateau pivotant autour de l'axe Est-Ouest du latitudoscope permet de paramétrer la localisation d'observation. Comme le Girasol, le latitudoscope est donc un instrument universel.

Notons qu'un dispositif de simulation analogue peut être obtenu à l'aide d'un appareil photographique muni d'un objectif de faible focale (Steadman 1992). Les images produites avec l'appareil visant la verticale d'un point correspondent à des projections quasi-stéréographiques des masques de l'environnement en ce point. La superposition des trajectoires solaires permet alors une lecture à plat des périodes d'ombrage et d'ensoleillement du point considéré (l'expérience montre cependant que les trajectoires solaires doivent être étalonnées pour l'objectif utilisé).

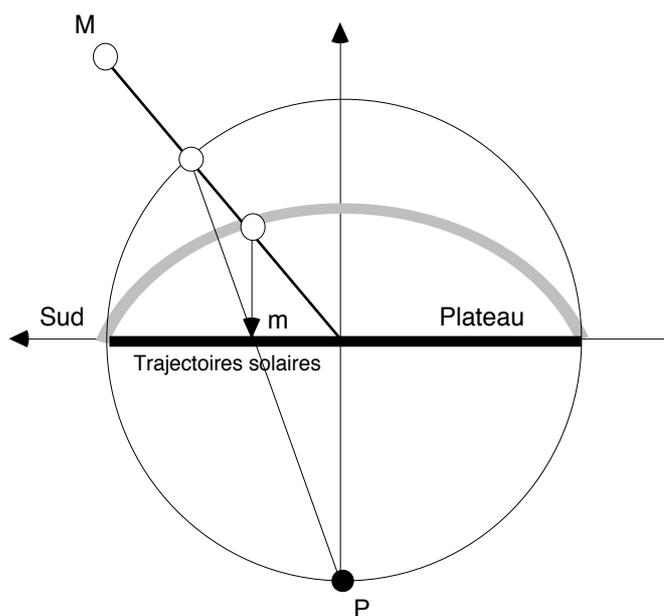


Figure 2.25. Schéma de principe de l'horizontoscope

### 2.2.3 Les méthodes numériques

Les techniques informatiques et, particulièrement, celles de la géométrie algorithmique et de la synthèse d'image ont notablement amplifié les possibilités de simulation de l'ensoleillement. A la différence des techniques analogiques ou graphiques, elles permettent une connaissance à la fois exacte et formelle (polygones géométriques ou intervalles temporels) des états d'ensoleillement d'une maquette numérique d'objets existants ou projetés. En conséquence, elles offrent de nouvelles possibilités de croisement et de traitement analytique des résultats. Nous examinons ces potentialités dans la section suivante.

Les méthodes numériques reprennent, en les automatisant, les techniques traditionnelles. Nous présentons ici les procédures mises en oeuvre dans le logiciel *Solène* développé au CERMA (Groleau 1987, Péneau 1989, Groleau

& al. 1991, 1992, 1993). Il s'agit d'une part du calcul des projections axonométriques pour la détermination des ombres dans un ensemble de faces (discrétisation du temps), d'autre part du calcul des projections perspectives pour la détermination des périodes d'ensoleillement en un point d'une face (discrétisation de l'espace). Nous proposons en dernier lieu une méthode directe basée sur la technique du lancer de rayon (discrétisation simultanée du temps et de l'espace).

### 2.2.3.1 Détermination des polygones d'ombre dans *Solène*

Les objets dont on veut simuler les états d'ensoleillement sont représentés par des faces planes à contour polygonal, éventuellement munies de trous. Ces faces sont constituées des coordonnées de leurs sommets successifs dans l'espace. La maquette numérique ainsi produite peut être étudiée dans un héliodon fictif capable de simuler les ombres propres et portées par chaque face, pour un instant et une localisation donnés.

Pour réaliser cette simulation, on considère que le soleil « regarde » la maquette suivant la direction correspondant au temps et au lieu donnés sur la Terre. Dans cette transposition, les parties de la maquette « vues » par le soleil sont les surfaces ensoleillées à cet instant. Les parties « cachées » au soleil (cachées *du* soleil si l'on se place dans la maquette) sont donc les surfaces à l'ombre au même instant.

Le soleil étant supposé placé à l'infini et ses rayons parallèles, l'image « qu'il se fait » de la maquette est une projection perspective cylindrique sur un plan perpendiculaire à l'axe de vue, c'est-à-dire une simple axonométrie (Locquet 1988). Géométriquement, cette projection équivaut à la composition de deux rotations simples autour des axes du repère. On établit facilement la matrice correspondante en fonction de l'azimut et de la hauteur du soleil, soit :

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \cos\alpha.\sin\theta & \cos\alpha.\cos\theta & -\sin\alpha \\ \sin\alpha.\sin\theta & \sin\alpha.\cos\theta & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

avec  $\theta = \pi + \text{azimut}$  et  $\alpha = \pi/2 - \text{hauteur}$ , pour un repère orthogonal avec l'axe des  $y$  orienté positivement vers le Nord et l'axe des  $x$  vers l'Est.

La maquette numérique transformée par cette matrice fournit un nouvel ensemble de faces « vues du soleil » pour l'instant et le lieu considérés (figure 2.26 a, page suivante). Une procédure géométrique d'élimination des parties cachées permet d'extraire de ces faces les polygones « réellement vus » par le soleil, c'est-à-dire les parties ensoleillées (figure 2.26 b). Par application de la matrice inverse de  $R$ , ces polygones sont projetés dans la maquette originale (figure 2.26 c). La différence booléenne entre les faces originales et

les polygones ensoleillés produit les polygones d'ombres recherchés pour l'instant et le lieu considérés. Définis géométriquement, les polygones d'ombre peuvent être visualisés sous n'importe quel angle.

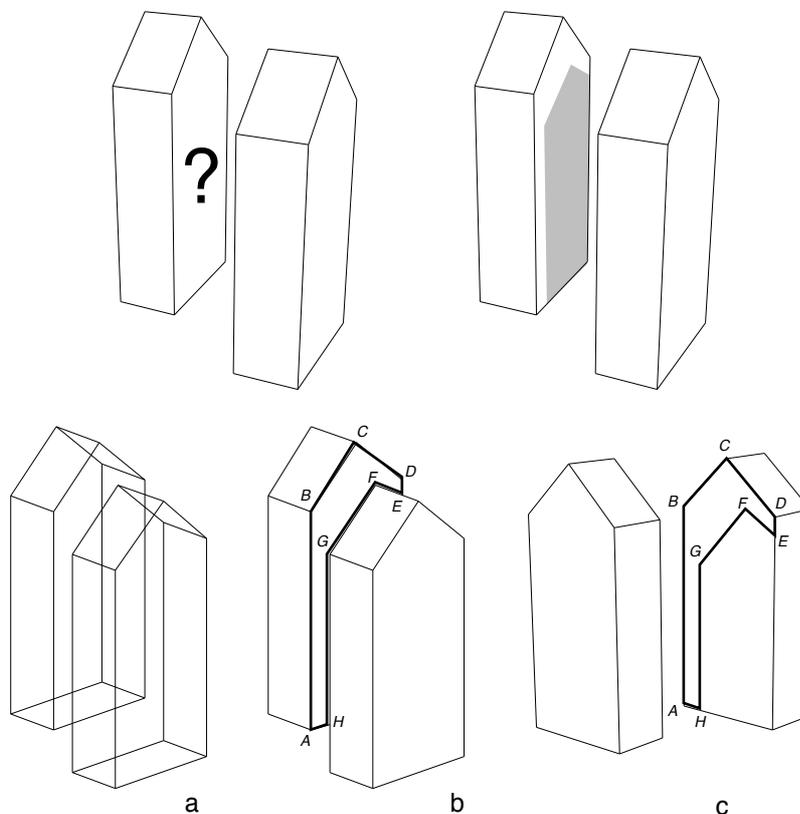


Figure 2.26 (a, b, c). Détermination des polygones d'ombre dans *Solène*

Ce processus de simulation par héliodon numérique utilise principalement les opérations booléennes entre polygones. Plusieurs algorithmes effectuent ces opérations. Ils apparaissent plus ou moins complexes selon que les polygones considérés sont convexes ou concaves, qu'ils présentent ou non des singularités géométriques (Péroche 1988, Hégron 1985, Preparata 1985). La méthode utilisée dans *Solène* est basée sur l'algorithme d'Atherton et Weiler (1977) qui résout tous les cas. Elle consiste en un parcours alternatif des listes des sommets des polygones, une fois leurs intersections ajoutées. Le contour correspondant aux différences entre deux polygones, à leur union ou à leur intersection résulte simplement du changement de sens du parcours à chaque passage sur un sommet commun (figure 2.27 page suivante).

Une méthode équivalente utilisant un algorithme analogue est proposée par Grau et al (1995) pour la détermination géométrique des ombres portées. Les auteurs ajoutent une fonctionnalité intéressante, envisagée dans *Solène* mais non implémentée : la gestion des transparences des masques. Chaque

masque est qualifié par un facteur de transparence variant de 0 (totalement opaque) à 1 (totalement transparent). Les polygones d'ombre résultants reçoivent un facteur de transparence égal au produit des facteurs de transparence des divers polygones masques. Cette méthode permet de mieux qualifier les ombres portées par des objets de matériaux hétérogènes ou de différentes porosités à la lumière (les masques végétaux par exemple).

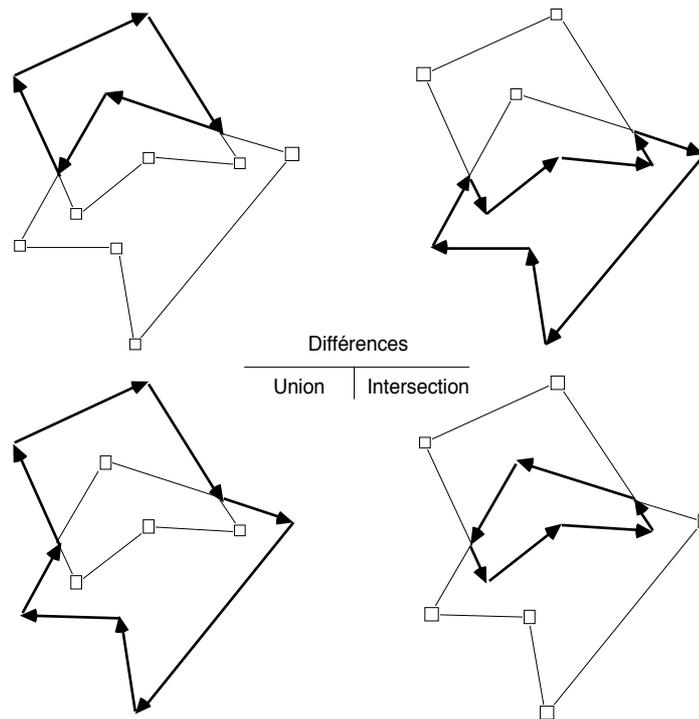


Figure 2.27. Principe de résolution des opérations booléennes entre polygones quelconques (Atherton et Weiler 1977)

### 2.2.3.2 Détermination des périodes d'ensoleillement dans *Solène*

Les méthodes graphiques et analogiques permettent de reconstituer les périodes d'ensoleillement et d'ombrage en un point de l'espace, par superposition des projections des masques et des trajectoires solaires. Les méthodes numériques utilisent le même principe. Des outils de calcul automatique des projections stéréographiques ont été développés de longue date (Dabat 1982, Dupagne & al. 1985, 1991). Ces systèmes ne reproduisent généralement que les seules constructions graphiques : l'environnement d'un point et les trajectoires solaires sont projetés sur une même figure. Les périodes d'ensoleillement et d'ombrage du point étudié peuvent alors être interprétées visuellement, à l'écran ou sur papier. Ces méthodes ne donnent cependant aucune connaissance numérique des périodes ; elles ne font que préfigurer les méthodes mixtes que nous décrivons dans le paragraphe suivant.

Le logiciel *Solène* détermine automatiquement et numériquement les périodes d'ensoleillement et d'ombrage d'un point d'une maquette en utilisant une simple projection perspective conique. Pour un cône de vision très ouvert, cette projection produit des déformations des trajectoires et des masques difficiles à interpréter avec précision pour l'oeil humain (figure 2.28 ci-dessous), ce pour quoi elle n'est pas fréquemment mise en oeuvre dans les méthodes graphiques traditionnelles. L'utilisation du calcul numérique permet de lever cette difficulté.

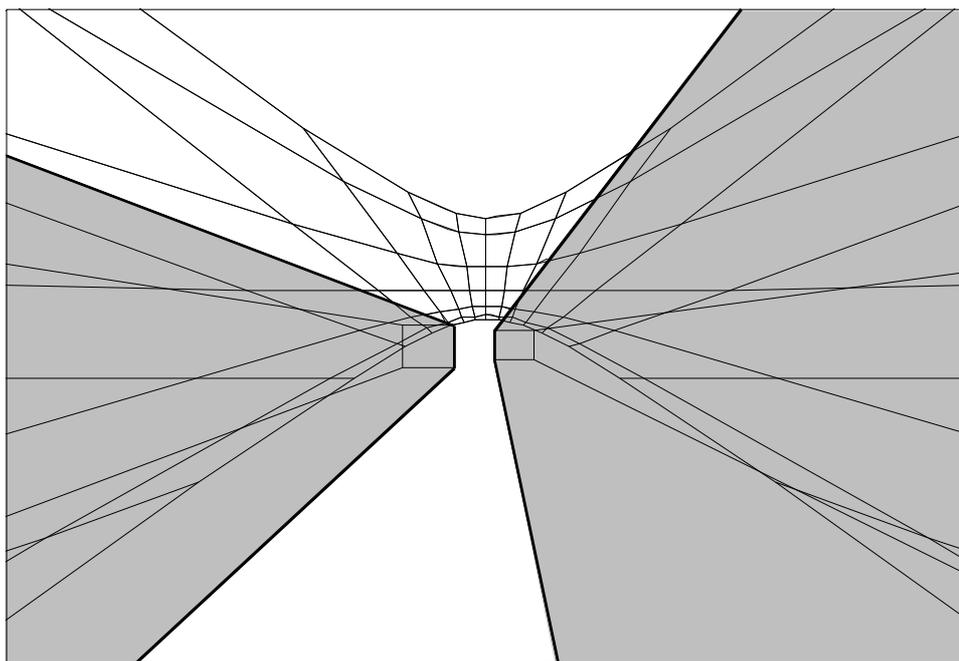


Figure 2.28. Détermination des périodes d'ensoleillement dans *Solène*

La projection perspective conique résulte de la concaténation d'une transformation perspective et d'une projection sur un plan (Gardan 1985). Dans le cas des masques, le centre de la perspective est situé au point étudié, l'axe de visée est vertical et le plan de projection est n'importe quel plan horizontal. En fixant à 1 la distance du plan de projection au point étudié, ces données permettent de réduire la projection perspective à sa plus simple expression : tout point  $M(x, y, z)$  appartenant au cône de vision projette une image  $M'(x/z, y/z)$ .

Les faces masques ainsi transformées, les périodes d'ensoleillement du point étudié peuvent être déterminées de deux manières. La première consiste à calculer les intersections de chaque face masque avec les hyperboles images des trajectoires solaires. Les parties communes aux hyperboles et aux faces correspondent aux périodes d'ombrage du point. La seconde méthode, plus simple, considère l'image perspective d'une position solaire

pour un instant donné. Le point étudié est à l'ombre pour cet instant si l'image perspective de la position solaire correspondante est contenue par au moins une face masque. Corrolairement, le point est au soleil à cet instant si aucune face masque ne contient le point image de la position solaire. En itérant cette vérification simple de l'appartenance d'un point à un polygone, on reconstitue plus ou moins fidèlement les périodes d'ombrage et d'enseillement du point considéré. Dans *Solène*, ce calcul est fait pour des instants répétés toutes les deux minutes.

### 2.2.3.3 Une méthode directe par lancer de rayons

Les méthodes mises en oeuvre dans le logiciel *Solène* reprennent les techniques de projection pour résoudre les problèmes d'enseillement dans les deux dimensions de la table à dessin : la projection cylindrique pour la détermination des polygones d'ombre et les projections perspectives coniques pour celle des périodes d'enseillement. Cependant, le calcul numérique permet de s'affranchir des projections. Pour un instant donné, l'ombre d'un point est en effet donnée directement par l'intersection d'une demi-droite et d'une face. La demi-droite a son origine au point considéré et son vecteur directeur correspond à la direction du soleil à l'instant donné. La face d'intersection est, parmi toutes les faces de la maquette intersectant la demi-droite, celle dont le point d'intersection est le plus proche du point considéré (figure 2.29 ci-dessous).

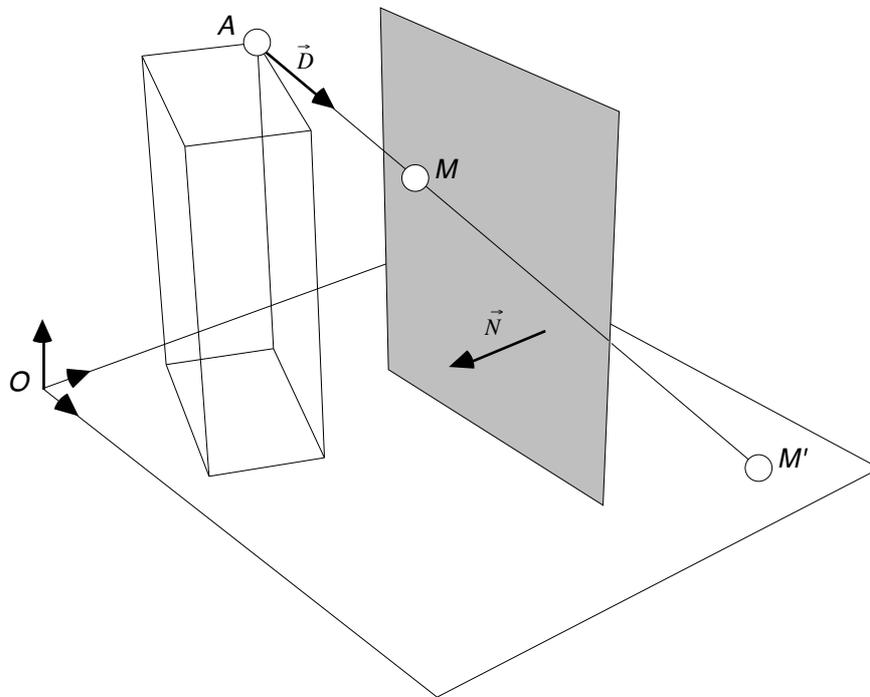


Figure 2.29. Calcul de l'ombre d'un point sur un plan

Cette technique permet a priori de déterminer les polygones d'ombre de n'importe quel objet polyédrique directement en trois dimensions, même si les algorithmes à mettre en oeuvre apparaissent plus complexes que ceux basés sur la projection cylindrique (axonométrie). Elle permet surtout de savoir si un point est à l'ombre ou au soleil à un instant donné, par un simple lancer de rayon. Le point est au soleil si le rayon solaire ne rencontre aucune face de la maquette numérique. Corollairement, le point peut être considéré à l'ombre dès que le rayon solaire intersecte une face.

C'est cette méthode de simulation directe que nous avons mise en oeuvre dans notre prototype *Solimac* pour la construction de ce que nous appelons les cartes spatio-temporelles d'ensoleillement (cf. § 6.1.2.5). Outre sa simplicité, cette méthode lève un grand nombre de problèmes de modélisation géométrique puisque le calcul du point d'intersection d'un rayon solaire et d'une face est indépendant du sens de la normale de celle-ci. Cependant, contrairement aux méthodes basées sur les projections, ce lancer de rayons impose une discrétisation simultanée du temps et de l'espace (le rayon ne peut être lancé que d'un point pour un seul instant). Il ne permet donc de reconstituer la continuité spatiale et temporelle de l'ensoleillement que de manière approchée.

## 2.2.4 Les méthodes mixtes

Le panorama qui précède donne les principales méthodes de simulation directe de l'ensoleillement sous leurs formes graphiques, analogiques et numériques. D'autres méthodes, que nous désignons comme méthodes mixtes, peuvent également être mises en oeuvre. Ces méthodes résultent de l'adaptation des procédures graphiques et analogiques au support numérique fourni par un logiciel de modélisation géométrique en trois dimensions. Elles ne peuvent être qualifiées de numériques puisqu'elles ne produisent pas une connaissance exacte de la géométrie des polygones d'ombre ou des intervalles temporels d'ensoleillement. Elles offrent cependant des outils intéressants par leurs fonctions de visualisation et d'animation notamment.

Nous avons ainsi développé plusieurs méthodes de simulation directe de l'ensoleillement avec l'aide du modèleur géométrique *Zoom* (version 4.6) distribué par la société *Abvent*. Cet outil offre les fonctions « classiques » de modélisation polyédrique, de visualisation et d'animation utilisées par les architectes. Nous avons détourné ces fonctions pour la représentation des périodes d'ensoleillement en un point et pour la visualisation, statique ou dynamique, des zones ensoleillées d'une scène en un instant. Pour ce faire, nous utilisons un modèle géométrique en trois dimensions des trajectoires solaires apparentes à la latitude de la scène considérée (voir les figures 2.11 et 2.14 et 2.30). Ce modèle est facile à produire dans l'un des formats d'en-

trée du modelleur ou dans un format d'échange standardisé. Les trajectoires sont considérées par le modelleur comme un objet quelconque qui peut être manipulé et visualisé comme n'importe quel autre objet de la scène.

Nous avons expliqué et illustré au paragraphe 2.2.1.2 l'utilisation d'un tel modèle pour la représentation des périodes d'ensoleillement en un point quelconque d'une scène. Il nous suffit de translater les trajectoires au point considéré et d'afficher une vue en perspective conique de la scène centrée en ce point. Les parties des trajectoires visibles représentent les périodes d'ensoleillement pour le point étudié (voir la figure 2.21). L'interprétation de ce résultat se fait visuellement, à l'écran ou sur papier, comme l'imposent par ailleurs les méthodes graphiques conventionnelles.

Nous utilisons le même modèle géométrique des trajectoires solaires pour la visualisation statique et dynamique des zones ensoleillées d'une scène. Nous savons que ces zones peuvent être considérées comme les parties « vues du soleil » de la scène, autrement dit, comme les parties visibles d'une vue axonométrique calculée pour la direction du soleil à l'instant considéré (cf. § 2.2.3.1). Le modelleur *Zoom* offre un mode de visualisation en perspective parallèle (axonométrie) suivant une direction quelconque.

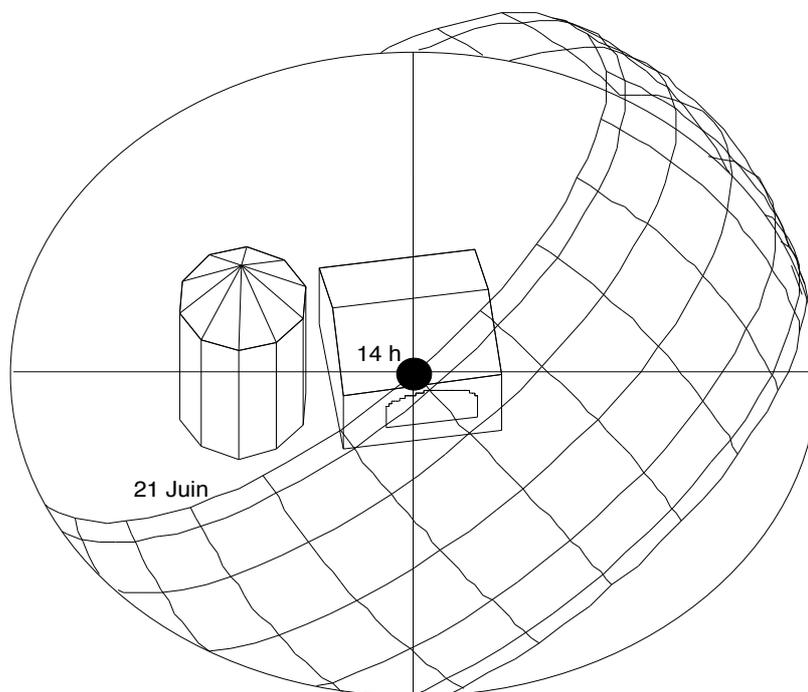


Figure 2.30. Visualisation des parties ensoleillées le 21 juin à 14 heures.

Pour produire les parties ensoleillées d'une scène en un instant donné, il nous suffit d'utiliser les trajectoires solaires comme abaque tridimensionnel. Nous fixons la direction du soleil suivant cet abaque puis nous affichons une vue axonométrique de la scène — en rendu faces cachées — depuis cette direction. Les parties visibles de la scène sont alors les parties ensoleillées pour l'instant considéré. La figure 2.30 page précédente donne une visualisation des parties ensoleillées d'une scène simple le 21 juin à 14 heures. Dans cette représentation, le point représentant l'instant considéré sur les trajectoires solaires et le centre géométrique de la scène sont naturellement confondus.

Nous pouvons systématiser cette procédure en détournant les fonctions d'animation de notre modéleur. Celui-ci permet en effet de constituer une séquence de vues sous la forme d'un « film » pouvant être joué indépendamment. Il utilise pour ce faire une trajectoire de « caméra » et une trajectoire de « visée » : les vues sont calculées pour chaque point de la trajectoire de caméra, dans la direction des points successifs de la trajectoire de visée. Naturellement, il nous est possible de désigner une trajectoire solaire journalière (le 21 mars par exemple) comme parcours de la caméra et un point fixe (le centre des trajectoires) comme point de visée. En utilisant une visualisation axonométrique, on reconstitue alors une sorte d'héliodon dynamique avec affichage en « temps réel » des parties ensoleillées, du matin au soir, pendant la journée considérée. Suivant le même principe, il est possible de choisir les arcs horaires, plutôt que les courbes journalières, comme trajectoires de la caméra. On visualise alors la dynamique de l'ensoleillement pour l'heure correspondant à l'arc choisi, tout au long de l'année. Ainsi le détournement des fonctions de visualisation et d'animation des modéleurs géométriques permet-il la réalisation de simulations directes d'ensoleillement particulièrement simples et efficaces.

## 2.3 Traitement des résultats

Quelle que soit la méthode qui la supporte, graphique, analogique ou numérique, l'étape de simulation reproduit des états statiques d'ensoleillement : les ombres propres et portées en un instant ou les périodes d'ensoleillement et d'ombrage en un point. Les séquences animées créées par les méthodes mixtes ne sont elles-mêmes qu'une suite d'états statiques enchaînés. Un traitement de ces résultats statiques est généralement nécessaire à l'évaluation pertinente de la dynamique de l'ensoleillement d'une scène complexe (urbaine par exemple) pour une période considérée. Dans sa forme la plus simple, ce traitement vise à reconstituer l'information spatio-temporelle d'ensoleillement par le croisement de plusieurs résultats de simulation. Cette information peut être représentée sous forme d'images ou de bases de données. Dans des formes plus complexes, le traitement des résultats de simulation permet l'analyse d'ensoleillement des objets architecturaux ou des tissus urbains par l'extraction d'indices pertinents. Nous examinons ces deux formes de traitement dans les paragraphes suivant.

### 2.3.1 Reconstitution des états d'ensoleillement

#### 2.3.1.1 Les images d'ensoleillement

Ces images ont pour objectif de traduire en deux dimensions les états dynamiques d'ensoleillement d'une maquette réelle ou projetée. Suivant que l'on a opéré une simulation par le tracé des ombres ou une simulation par la détermination des périodes d'ensoleillement, deux classes d'images peuvent être produites. La première résulte de la superposition, dans l'espace continu, des différentes ombres calculées en différents instants. Ce traitement peut être simplement graphique, par assemblage de calques, comme le montrent par exemple Dourgon & al. (1961). Les méthodes numériques permettent de systématiser ce principe. Le logiciel *Solène* calcule ainsi les intersections et les différences booléennes d'un ensemble de polygones d'ombre résultant de plusieurs simulations de type héliodon. Pour deux instants  $t_1$  et  $t_2$ , les polygones d'intersection correspondent aux zones géométriques exactes, à la fois à l'ombre en  $t_1$  et  $t_2$ . Les polygones de différence correspondent aux zones à l'ombre exclusivement en  $t_1$  ou en  $t_2$  (figure 2.31 page suivante). Des procédures de synthèse ont été mises au point pour la restitution imagée des résultats (Hierry 1987).

La deuxième classe d'images résulte des simulations effectuées par détermination des périodes d'ensoleillement. Les méthodes numériques permettent d'itérer ces simulations en un grand nombre de points de la maquette

étudiée. Le croisement des résultats offrent différentes interprétations imagées, comme par exemple la restitution des durées d'ensoleillement pour une journée, sur un maillage complet d'un espace urbain (figure 2.32 page suivante).

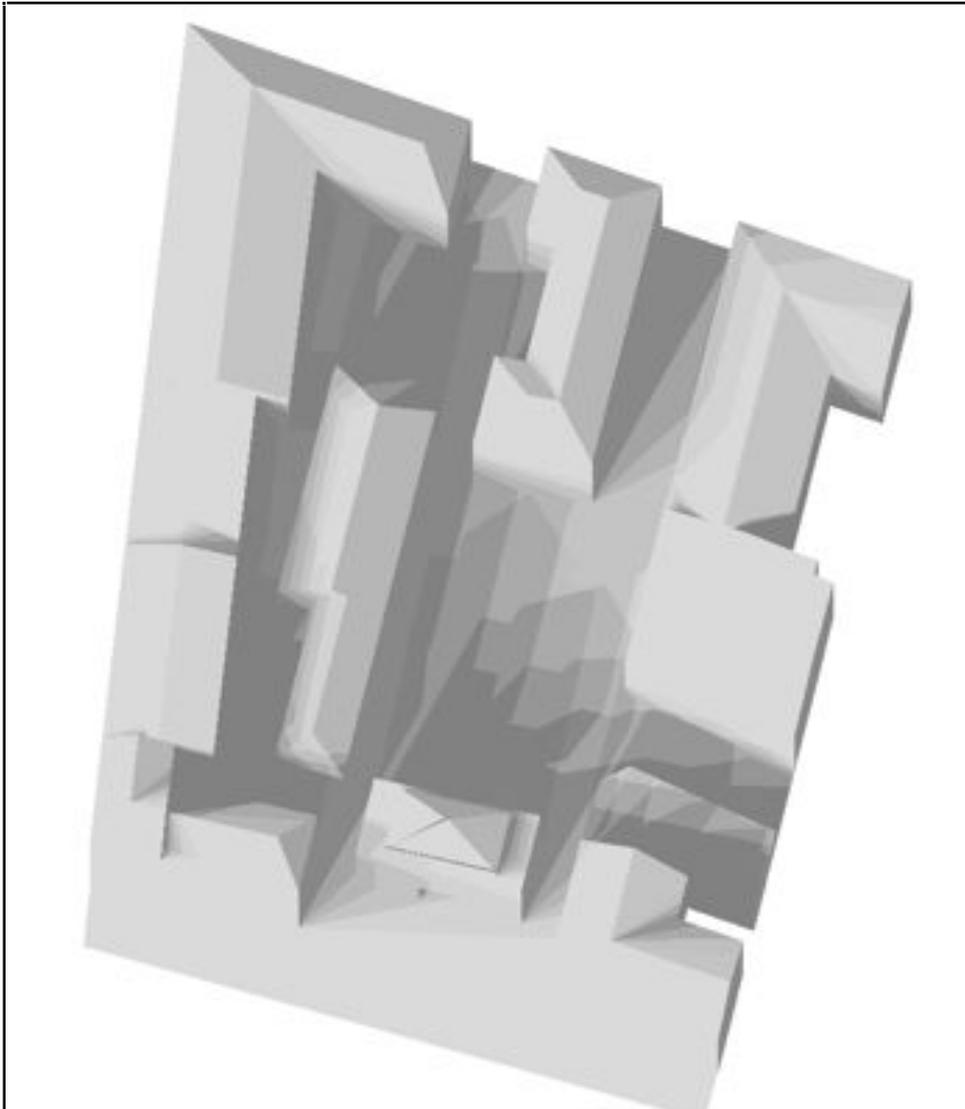


Figure 2.31. Superposition des ombres pour différents instants d'une même journée dans un espace urbain (Document CERMA)

### 2.3.1.2 Les bases de données d'ensoleillement

La réalisation d'images d'ensoleillement est une manière efficace de rassembler, de croiser et de présenter les résultats de plusieurs simulations. Cependant, en amont de ces images, les méthodes numériques permettent également de constituer des bases de données des états d'ensoleillement de

la maquette étudiée. De telles bases maintiennent une mémoire organisée des états statiques d'ensoleillement (polygones géométriques ou intervalles temporels) résultant de plusieurs simulations. Ces données permettront d'abord de produire des images mais aussi des valeurs ou des indices analytiques (cf. § 2.3.2.1).

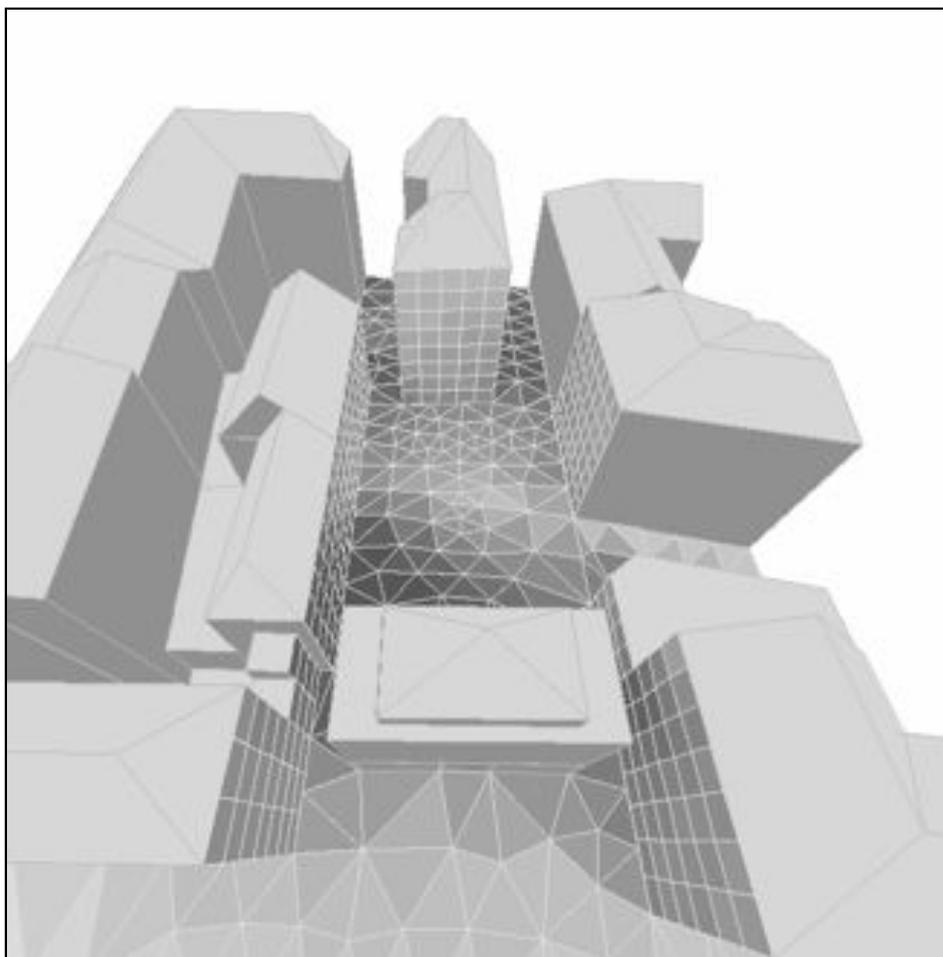


Figure 2.32. Durées d'ensoleillement associées au maillage d'un espace urbain (Document CERMA)

Le logiciel *Solène* permet de constituer ces bases de données d'ensoleillement sous la forme de périodes d'ensoleillement associées à un ensemble de polygones représentant la maquette étudiée. Ces polygones résultent indifféremment du croisement des ombres géométriques exactes dans des simulations de type « héliodon » (auquel cas les périodes d'ensoleillement associées sont approximées) ou du maillage utilisé dans une simulation de type « masques » (les polygones sont des mailles triangulaires ou rectangulaires dont on calcule de manière exacte les périodes d'ensoleillement au centre).

Les données ainsi rassemblées font l'objet de traitements qui génèrent des valeurs répondant à diverses requêtes. Celles-ci peuvent être des requêtes élémentaires — durée d'ensoleillement d'un polygone, puissance solaire directe reçue, etc. — ou composées par des opérateurs logiques, arithmétiques ou relationnels — zones à l'ombre l'été *et* au soleil l'hiver, points ensoleillés plus de quatre heures par jours, etc. La figure 2.33 ci-dessous représente ainsi (en clair) les zones d'un espace urbain à la fois au soleil à 10 heures et ensoleillées plus de trois heures le 21 décembre.

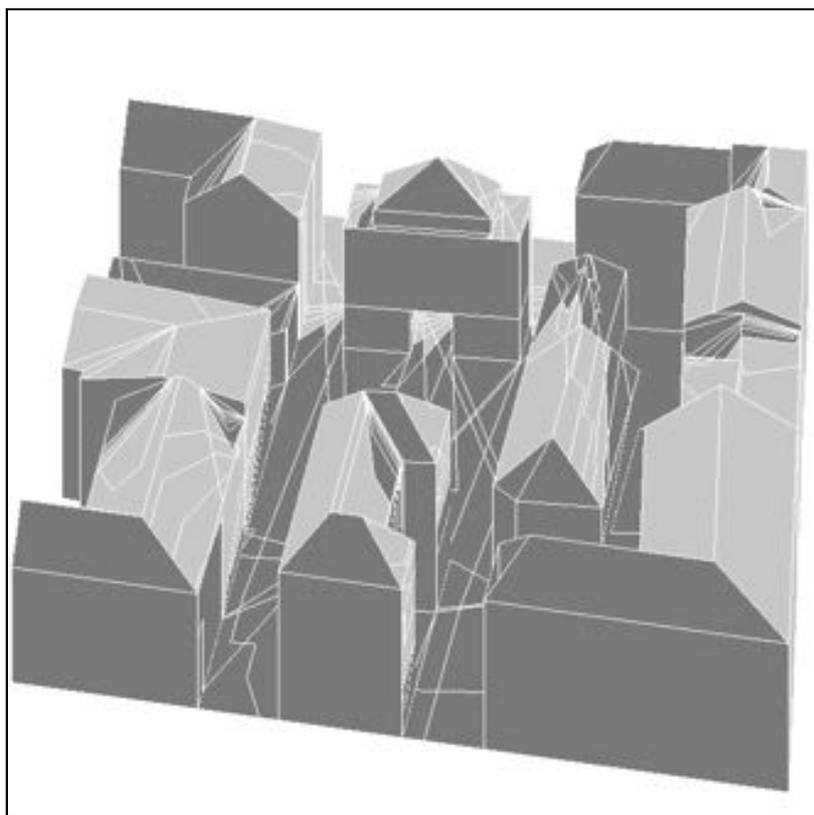


Figure 2.33. En clair : zones au soleil à 10 heures *et* ensoleillées plus de trois heures le 21 décembre (logiciel *Solène*, CERMA)

## 2.3.2 Analyses d'ensoleillement

### 2.3.2.1 Les indices d'ensoleillement

La simulation et la reconstitution de données spatio-temporelles vise finalement l'analyse des objets étudiés du point de vue de l'ensoleillement : leur intégration, leur qualité énergétique, d'usage ou plastique, leur possible affinement, etc. Cette analyse d'ensoleillement est généralement réalisée de manière empirique, au vu des résultats produits par les simulations gra-

phiques, analogiques ou numériques. Cependant, l'examen « manuel » de ces résultats ne permet pas toujours une interprétation fiable et rapide, particulièrement lorsque les données sont en nombre important — c'est le cas lorsque l'on étudie des objets géométriquement complexes, comme l'environnement urbain.

La démarche peut être considérablement affinée par l'utilisation d'indices exprimant une information synthétique d'ensoleillement. Ces indices peuvent être calculés automatiquement si l'on utilise les bases de données produites par les simulations numériques. Un premier indice est ainsi donné sous la forme du coefficient d'ensoleillement d'une face plane constituant une partie d'un objet (Groleau 1987, Hierry 1987). Ce coefficient  $C_e$  exprime simplement le rapport entre la surface ensoleillée et la surface totale de la face  $F$  en un instant  $t$ . Il est possible d'intégrer  $C_e$  sur une période  $[t_1, t_2]$ , pour laquelle on définit alors le coefficient d'ensoleillement moyen de la face  $F$  considérée :

$$C_{e_{moyen}}(F) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} C_e(F, t) \cdot dt$$

En discrétisant la période  $[t_1, t_2]$  en  $n$  intervalles égaux en chacun desquels on suppose le soleil immobile, on obtient :

$$C_{e_{moyen}}(F) = \frac{1}{n \cdot S} \sum_{i=1}^n \frac{Sh(F, t_i)}{\cos \alpha_i}$$

où  $S$  représente la surface de la face  $F$ ,  $Sh$  la surface « héliodon » de  $F$  à l'instant  $t_i$  (i.e. : la projection orthogonale de la surface ensoleillée de  $F$  sur un plan perpendiculaire au rayon solaire à l'instant  $t_i$ ) et  $\alpha$  l'angle d'incidence du rayon solaire sur  $F$  à l'instant  $t_i$ .

Cet indice représente la surface moyenne de la face potentiellement ensoleillée pendant la période  $[t_1, t_2]$  étudiée. Suivant le même principe, il est possible d'établir un indice énergétique représentant non plus la fraction moyenne d'ensoleillement d'une face mais le flux solaire direct moyen incident sur cette face pendant une période donnée (Hierry 1987). Des procédures de seuillage permettent d'extraire d'une maquette numérique l'ensemble des faces vérifiant une condition particulière sur ces indices.

Le coefficient d'ensoleillement utilise manifestement les données issues d'une simulation de type « héliodon » (discrétisation du temps) pour quantifier les surfaces ensoleillées. Un indice analogue, basé sur une simulation de type « masques » (discrétisation de l'espace), peut être calculé en différents points d'un environnement. Ce facteur de réduction d'ensoleillement représente le rapport entre la durée maximale d'ensoleillement possible pour un point sur une face et la durée effective d'ensoleillement de ce point ; il

peut être calculé simplement pour n'importe quelle période temporelle continue. Le facteur de réduction d'ensoleillement exprime donc la réduction de la durée d'ensoleillement potentielle d'un point par son environnement. Un facteur analogue de réduction du flux solaire direct permet d'exprimer la réduction du gain énergétique potentiel d'un point.

Ces indices très simples peuvent faire l'objet de traitements statistiques lorsqu'un grand nombre de données sont à analyser. Ils ont par exemple été mis en oeuvre pour la comparaison des caractéristiques d'ensoleillement associées à différents types de tissus urbains (Groleau 1995).

De nombreux autres indices peuvent être établis, suivant le type d'analyse d'ensoleillement envisagé et la nature, quantitative ou qualitative, du résultat à interpréter. Grau (1995) utilise les facteurs de transparence associés aux masques (cf. § 2.2.3.1) pour le calcul du coefficient d'ensoleillement. Salazar (1995) propose un indice plus qualitatif exprimant l'efficacité d'un masque par la combinaison d'un facteur d'obstruction géométrique et d'un facteur de réduction énergétique, pour une date et un instant donnés. La performance du masque est représentée graphiquement par l'élévation des valeurs de l'indice sur une grille figurant les dates et heures significatives (figure 2.34 ci-dessous).

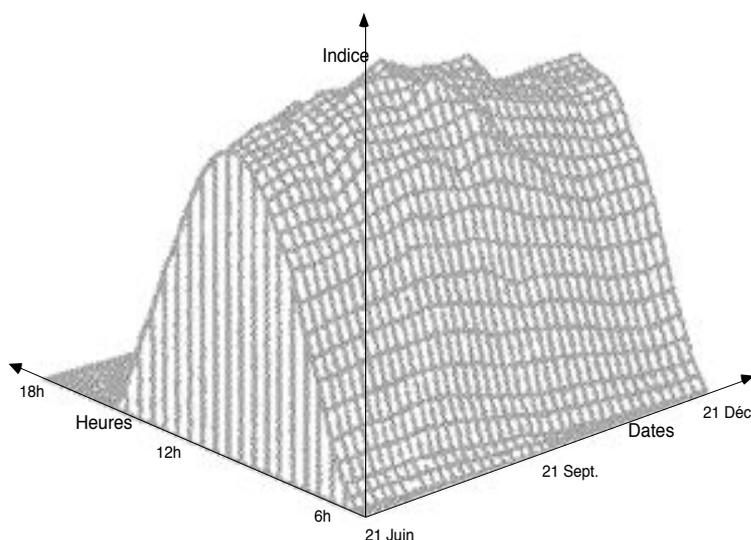


Figure 2.34. Indice de performance d'un masque (d'après Salazar 1995)

### 2.3.2.2 L'appréciation de l'ensoleillement effectif

Ces indices et l'analyse qu'ils permettent sont établis pour un ensoleillement supposé constant tout au long de l'année, indépendamment des conditions atmosphériques locales. Une appréciation plus réaliste peut être réalisée si

l'on considère la durée *effective* d'ensoleillement au lieu considéré, en fonction de la nébulosité (AFEDES 1980). Celle-ci est mesurée par les héliographes des stations de la Météorologie Nationale et fait l'objet de traitements statistiques dont les résultats sont consignés sous la forme de tableaux ou de cartes. De cette durée effective, on peut extraire le taux (ou fraction) d'ensoleillement qui exprime, pour une journée et un lieu donnés, le rapport entre la durée maximale d'ensoleillement (durée du jour) et la durée effective d'ensoleillement. Ces éléments permettent de corriger les résultats issus des simulations et d'effectuer des analyses plus réalistes des conditions d'ensoleillement d'un objet ou d'un ensemble d'objets.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un état de l'art des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement. Sans que l'on puisse prétendre à l'exhaustivité, ce panorama donne l'essentiel des connaissances en la matière. Nous avons par ailleurs exposé les hypothèses relatives aux trajectoires solaires apparentes mises en oeuvre par ces méthodes et quelques traitements possibles des résultats qu'elles produisent.

Ces méthodes de simulation font appel à un ensemble de constructions géométriques, parfois complexes, qui peuvent être mises en oeuvre par diverses méthodes — graphiques, analogiques ou numériques. Elles s'appuient sur une discrétisation du temps ou de l'espace et, suivant le type de discrétisation mis en oeuvre, elles produisent le tracé des ombres en un instant ou les intervalles temporels d'ensoleillement en un point. La nature des résultats détermine leur possible traitement. Ainsi, la simulation numérique permet-elle d'effectuer des analyses fines de l'ensoleillement d'objets architecturaux ou urbains. Ces résultats peuvent encore être utilisés comme données pour d'autres simulations numériques, concernant par exemple la thermique (Fragnaud 1985), l'aérodynamique (Marenne & al. 1995) ou l'éclairage naturel (Miguet 1996, Miguet & al. 1996).

Considérant que les méthodes de simulation directe sont nécessaires mais non suffisantes dans le contexte de la conception architecturale, nous examinons dans le prochain chapitre la position du problème inverse. Nous faisons la synthèse des propositions existantes, qu'elles soient de nature géométrique ou non, et nous remarquons l'absence d'une méthode générale. Notre contribution principale pour cette recherche consiste à mettre en oeuvre une telle méthode, présentée au chapitre 4.

Signalons en dernier lieu que les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement peuvent être détournées de leurs fins. Ainsi, les procédures développées dans le logiciel *Solène* ont été mises en oeuvre pour la simulation de l'accessibilité visuelle d'un bâtiment dans son environnement urbain (Morin 1995). L'accessibilité visuelle peut être définie comme la capacité d'un bâtiment à émerger du paysage urbain, suivant différents points d'observation. Si l'on considère que le profil du bâtiment étudié constitue la course apparente d'un « soleil » factice, on peut déterminer les périodes d'ensoleillement correspondantes en différents points de l'espace urbain. Ces « périodes » représentent la part du bâtiment vue depuis chacun des points pris en compte.

Ainsi, il est possible d'établir une carte d'accessibilité visuelle qui associe à chaque élément du maillage d'un environnement, une quantification de la

visibilité d'un bâtiment (figure 2.35 ci-dessous). Cette empreinte visuelle s'avère particulièrement éloquente sur les relations complexes qu'entretiennent un espace urbain et certains de ses bâtiments marquants.

De manière analogue, nous verrons dans les perspectives ouvertes par cette recherche qu'il est possible de détourner notre méthode de simulation inverse de l'ensoleillement pour réaliser la simulation inverse de l'accessibilité visuelle d'un bâtiment, particulièrement lorsque celui-ci est en cours de conception.



Figure 2.35. Simulation de l'accessibilité visuelle de la cathédrale dans le centre de Nantes (Document CERMA)  
(en noir : zones de plus forte visibilité, en blanc : zones de non-visibilité)

## Références bibliographiques du chapitre

**AFEDES** (Association Française pour l'Étude et le Développement des applications de l'Énergie Solaire) 1980 — Mémento d'héliothermie, Éditions Européennes Thermique et Industrie, Paris (France), 238 p.

**Atherton P., Weiler K.** 1977 — Hidden Surface Removal Using Polygon Area sorting, *Computer Graphics*, Vol. 11, n° 2, pp. 214-222

**Chauvel P.** 1961 — Diagrammes solaires et Mode d'emploi des diagrammes solaires CSTB, *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, Vol. 414, n° 52, 8 p.

**CRMAA** 1979 — Le Girasol : hauteur et azimut du soleil pour toutes les latitudes, construction et applications, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 55 p.

**CRMAA** 1977 — Projection stéréographique des trajectoires solaires diurnes et des lignes horaires et application à une latitude donnée, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 16 p.

**Dabat M.-A., Izard J.-L.** 1982 — Système combiné de simulation des ambiances dues au rayonnement solaire, Groupe ABC, École d'Architecture de Marseille-Luminy (France), 52 p. (Rapport de recherche)

**Deltheil R., Caire D.** 1946 — Cours de géométrie (transformations, coniques), J.-B. Baillièrre et Fils, Éditeurs, Paris (France), 303 p.

**Dourgnon J., Chauvel P., Kokka L.** 1961 — Déterminations graphiques et mécaniques de l'enselement, *Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, Vol. 407, n° 51, 33 p.

**Dupagne A.** 1991 — A computer package to facilitate inhabitants' participation in urban renewal, *Environment and Planning B : Planning and Design*, Vol. 18, n° 1, pp. 119-134

**Dupagne A., Renson M.** 1985 — Étude des nuisances environnementales d'un projet de construction en site urbain, Laboratoire de physique du bâtiment, Université de Liège (Belgique), 35 p. (Rapport de recherche)

**Etzion Y.** 1992 — An improved solar shading design tool, *Building and Environment*, Vol. 27, n° 3, pp. 297-303

**Fragnaud F.** 1985 — Développement de modules complémentaires au logiciel de simulation thermique Simula, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 95 p. (Rapport de recherche)

**Gardan Y.** 1985 (sous la direction de) — Mathématique et CAO, méthodes de base, Hermès, Paris (France), 164 p.

**Grau K., Johnsen K.** 1995 — General shading model for solar building design, *ASHRAE Transactions*, Vol. 101, Pt. 2, 13 p.

**Groleau D., Marenne C.** 1995 — Environmental specificities of the urban built forms, in *Proceedings of European conference on Integration of*

Renewable Energies in established Urban Structures, Corfou (Grece), 8 p.

**Groleau D., Marenne C., Gadihe A.** 1993 — Climatic simulation tools : an application for a building project in an urban space, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 3th European conference on architecture, Florence (Italy), pp. 346-349

**Groleau D., Marenne C.** 1992 — Simulation numérique de l'ensoleillement dans les projets urbains, in Actes des séminaires interchercheurs, Réseau Recherche Informatique Architecture, GIP Acacia, Paris (France), pp. 159-171

**Groleau D., Marenne C.** 1991 — Solène et la simulation solaire, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 250 p. (Rapport de recherche)

**Groleau D.** 1987 — Modélisation des interactions entre les formes urbaines et les facteurs physiques de l'environnement, in Proceedings of 1st European Conference on Architecture, Munich (Germany), pp. 547-552

**Hégron G.** 1985 — Synthèse d'image : algorithmes élémentaires, Bordas, Paris (France), 199 p.

**Hermant A.** 1943 — Les mouvements du soleil, Technique et Architecture, n° 7-8 (Numéro spécial Le Soleil), pp. 173-176

**Hierry P.** 1987 — Utilisation des techniques de synthèse d'image pour la visualisation des phénomènes solaires et énergétiques, Rapport de CEEA, École d'architecture de Nantes (France), 48 p.

**Jungmann J.-P.** 1995 — Ombres et lumières, Éditions de la Villette, Paris (France), 151 p.

**Lespinard V., Pernet R., Gauzit J.** 1957 — Cours d'algèbre et de cosmographie, Classe de philosophie, Librairie A. Desvignes, Lyon (France), 8<sup>ème</sup> édition refondue

**Locquet J.-J., Perrot N.** 1988 — Perspectives cavalières et axonométriques, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris (France), 180 p.

**Marenne C., Lefeuvre M., Groleau D.** 1995 — 3D Air flow simulation with solar constraints in a large covered street, in Proceedings of 2nd International Conference on Indoor Air Quality-Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Montréal (Canada), pp. 937-945

**Mazria E.** 1981 — Le guide de l'énergie solaire passive, Éditions Parenthèses, Roquevaire (France), 339 p.

**Miguet F.** 1996 — Eclairages énergétiques et lumineux en milieu urbain, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 67 p. (Rapport de recherche)

**Miguet F., Groleau D., Marenne C.** 1996 — A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 4th European conference on architecture, Berlin (Germany), pp. 338-341

**Morin M.** 1995 — Lecture de la tour Bretagne, développement d'un outil de lecture de la ville, École d'Architecture de Nantes (France), 68 p.

(Travail personnel de fin d'études)

**Oudenot G.** 1983 — Les cadrans solaires classiques, *L'Astronomie*, pp. 419-428

**Oudenot G.** 1995 — 17 cadrans solaires à découper et à plier, Éditions du lézard, St Jean-Pied-de-Port (France), 29 p.

**Péneau J.-P.** 1989 — Imagerie numérique de l'ensoleillement en milieu urbain, in MICAD'89, Actes de la 8<sup>ème</sup> conférence internationale sur la CFAO, l'infographie et les technologies assistées par ordinateur, Paris (France), pp. 417-429

**Péroche B., Argence J., Ghazanfarpour D., Michelucci D.** 1988 — La synthèse d'images, Hermès, Paris (France), 295 p.

**Preparata F. P., Shamos M. I.**, 1985 — Computational geometry, an introduction, Springer-Verlag, New York (USA), 398 p.

**Ruegg A., Burmeister G.** 1993 — Méthodes constructives de la géométrie spatiale, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 134 p.

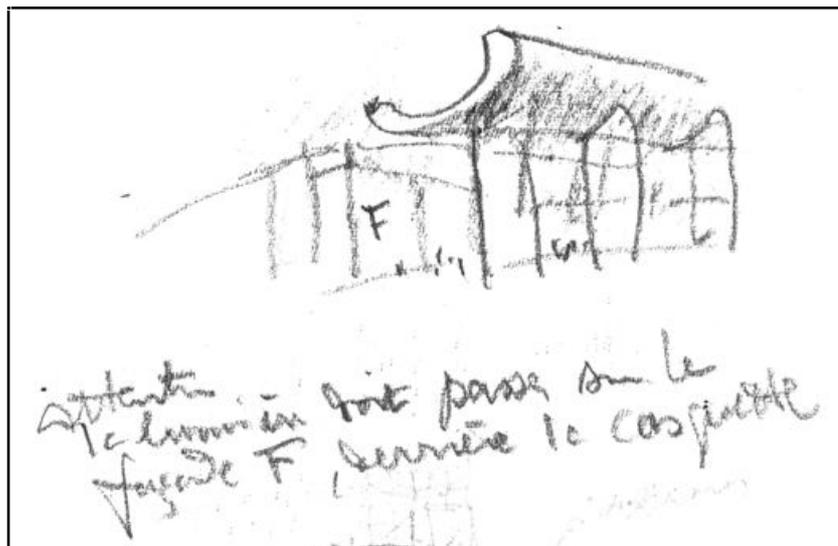
**Salazar J.H.** 1995 — Sunlighting evaluation in buildings, *Building Research and Information*, Vol. 23, n° 3, pp. 182-187

**Steadman P.** 1992 — Design, Principles and practice, The Open University, Milton Keynes (UK), Block 4 Chapter 5, *Heating, the forms of houses and the path of the Sun*, pp. 106-130

**Tworowski M.** 1967 — Soleil et architecture, Dunod, Paris (France), 175 p.

## Chapitre 3

### Limites des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement Position du problème inverse



« Attention, la lumière doit passer sur la façade F, derrière la casquette »

Le Corbusier, Chandigarh 1955  
*Le Corbusier Carnets*, Vol. 3, 1954-1957,  
Fondation Le Corbusier, Ed. Herscher / Dessain et Tolra (Paris), 1982  
(Croquis ref. 571)

## Introduction

Les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement sont nécessaires mais non suffisantes dans le contexte de la conception architecturale. Nécessaires, elles permettent de qualifier les environnements projetés du point de vue de l'ensoleillement, d'extraire leurs propriétés caractéristiques et, le cas échéant, d'en montrer les dysfonctionnements en termes énergétiques, lumineux ou plastiques. Insuffisantes :

- elles demandent une définition géométrique complète des éléments du projet et de leur environnement,
- elles n'agissent en conséquence qu'en outil correctif sur des hypothèses architecturales déjà constituées,
- elles s'inscrivent donc dans un processus itératif de type essai-erreur dont on a montré les limites dans le cadre de la conception (§ 1.1.2.2).

Ces limites sont celles de toutes les méthodes de simulation directe. En outre, l'ensoleillement présente encore plusieurs difficultés propres liées notamment à la complexité géométrique des méthodes de simulation et à la sensibilité dimensionnelle du phénomène. La première difficulté peut être atténuée par l'utilisation d'un modelleur géométrique ou d'un outil spécialisé. La seconde est plus difficile à contourner. De fait, toute modification dimensionnelle même légère des objets du projet impose généralement une réévaluation complète des résultats des simulations. Or, nous savons que les premières phases de la conception architecturale supportent un « flou » dimensionnel qui varie du mètre (esquisse) au centimètre (avant-projet). Cette échelle d'incertitude apparaît le plus souvent incompatible avec la précision exigée par les méthodes de simulation directe. Elle fournit un nouvel argument pour reléguer ces méthodes à la fin du processus de conception, lorsque le parti du projet est arrêté et que tous ses éléments sont dimensionnés précisément.

Un outil de simulation adapté au projet peut pallier ces limites en autorisant la réalisation des propriétés qu'il adresse plutôt que leur seule exposition. Telle est du moins notre hypothèse. Pour ce faire, cet outil doit fonctionner de manière inverse autant que directe : partant des propriétés attendues, il doit permettre d'obtenir *les conditions pour lesquelles ces propriétés peuvent être réalisées*. Lorsque ces propriétés se démarquent comme intentions du projet, les conditions de leur réalisation deviennent des contraintes de conception et participent à la mise en forme conjointe des ambiances et de l'architecture.

Conformément à la définition que nous avons donnée de l'ensoleillement, nous considérons une propriété d'ensoleillement comme la conjonction de

trois paramètres : une zone localisée et dimensionnée de l'espace, une qualification d'ensoleillement appliquée à cette zone et une plage temporelle. Ainsi, les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement permettent d'exposer les propriétés d'ensoleillement d'une scène en déterminant quelles zones de l'espace de la scène vérifient quelles qualifications pour quelles périodes (ce que nous avons appelé les « états spatio-temporels » d'ensoleillement de la scène au chapitre précédent).

A l'opposé, une méthode de simulation inverse de l'ensoleillement doit déterminer quelles conditions permettent d'assurer qu'une zone donnée de l'espace vérifie une qualification d'ensoleillement donnée pour une période donnée. Ces conditions sont de toute évidence géométriques : il s'agit de l'agencement des formes du projet tel que les rayons du soleil puissent atteindre ou non la zone visée pendant la période donnée. Un outil capable de déterminer ces conditions et leurs compositions est susceptible de proposer des solutions géométriques en termes d'*évidement* ou de *masquage* des éléments du projet. La figure 3.1 ci-dessous schématise ce processus.

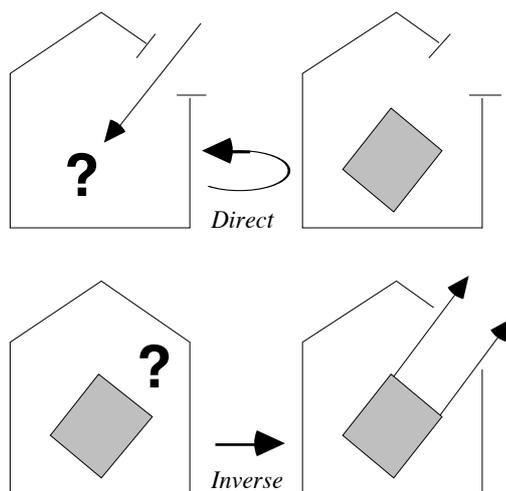


Figure 3.1. Processus direct et inverse de simulation de l'ensoleillement

Cet outil n'existe pas et c'est l'objectif de notre recherche que d'en proposer une esquisse. Cependant, avant de développer notre méthode, il est opportun d'en situer la position dans un contexte plus général. C'est ce que propose ce chapitre dans lequel nous inventorions diverses méthodes adressant directement ou indirectement la question de l'ensoleillement et mettant en oeuvre une approche inverse de la simulation.

Nous présentons ces méthodes en trois sections. Dans la première, nous décrivons différentes approches géométriques apportant des solutions à plusieurs sous-problèmes du problème inverse de l'ensoleillement. Dans la se-

conde section, nous passons en revue plusieurs approches qui adressent un problème inverse similaire à celui que nous posons mais dans une perspective plus focalisée de maîtrise énergétique ou lumineuse du projet. Nous décrivons ces approches en suivant les trois classes de méthodes que nous avons dégagées dans la littérature (cf. § 1.2.1.3) : les méthodes génératives, d'aide experte et d'optimisation. Aucune de ces méthodes ne résout notre problème. Leur description donne cependant une bonne idée du contexte problématique dans lequel nous nous inscrivons.

Enfin, dans une troisième section, nous présentons plus précisément deux approches originales, l'une symbolique et l'autre analogique, dont l'objectif commun est de permettre la représentation et la manipulation des intentions d'ambiances lumineuses dès les premières esquisses du projet. Nous verrons en effet que le problème de la représentation des intentions comme propriétés à réaliser est intrinsèque aux approches inverses dans le contexte de la conception.

## 3.1 Méthodes géométriques

A défaut de réaliser une propriété d'ensoleillement quelconque, certaines méthodes géométriques permettent d'atteindre une propriété particulière. Ces méthodes sont généralement présentées dans l'ensemble des outils de simulation directe de l'ensoleillement. Certaines d'entre elles ne font d'ailleurs que renverser la mise en oeuvre de ces dernières. Nous les présentons dans le premier paragraphe de cette section. D'autres plus subtiles donnent les moyens d'atteindre un objectif explicitement formulé et se positionnent ainsi comme « méthodes inverses ». Nous en donnons quelques exemples au paragraphe 3.1.2.

### 3.1.1 Réversibilité des méthodes directes

Les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement s'appuient toutes sur une discrétisation du temps ou de l'espace de la scène étudiée. En discrétisant le temps, elles déterminent les ombres géométriques en un instant. Si c'est l'espace que l'on discrétise, elles donnent les plages temporelles continues d'ensoleillement en un point singulier (cf. section 1.2, chapitre précédent).

L'inversion de ces méthodes s'effectue suivant la même logique. En discrétisant le temps, il est possible de réaliser une tache d'ombre ou de soleil en un instant. En discrétisant l'espace, ce sont des propriétés temporelles d'ensoleillement en un point que l'on peut atteindre.

#### 3.1.1.1 Réalisation d'une tache d'ensoleillement en un instant

La détermination des taches d'ombre en un instant est réalisée graphiquement ou numériquement par un ensemble de constructions géométriques utilisant différents systèmes de projection. En inversant ces méthodes, il est possible de déterminer les conditions de réalisation de propriétés du type : *cette zone doit être à l'ombre ou au soleil à cet instant*.

En utilisant la projection de type gnomon (figure 2.19, chapitre précédent) ou le diagramme solaire de M. Twarowski (figure 2.20), nous pouvons par exemple construire le volume d'ensoleillement capable de produire une tache de soleil ou d'ombre en un instant donné. Il suffit pour cela d'appliquer « à l'envers » les méthodes de la géométrie descriptive (en partant de la tache). Le prisme obtenu détermine les conditions de réalisation de la propriété. Il doit être totalement obstrué pour réaliser une tache d'ombre et totalement libre de toute construction pour réaliser une tache de soleil (on trouvera dans CRMAA 1979 des principes analogues établis avec le Girasol).

Une autre méthode de simulation directe consiste à construire une projection axonométrique de la scène suivant la direction apparente du soleil à l'instant considéré (cf. § 2.2.3.1). Sur l'image ainsi produite, les parties cachées sont à l'ombre à l'instant considéré et les parties visibles, au soleil.

Cette méthode peut être facilement inversée pour ajuster la position relative ou l'orientation de plusieurs objets suivant les ombres qu'ils portent en un instant. Les propriétés réalisées sont alors du type : *l'objet A doit (ne pas) porter d'ombre sur B à cet instant*. Dans la figure 3.2 ci-dessous, deux configurations d'objets réalisent au même instant deux propriétés d'ensevelissement opposées sur une face de l'un d'eux (en trait fort). Dans le premier cas (à gauche) l'objet B masque complètement la face considérée de l'objet A. Dans le second cas, cette face est complètement ensoleillée au même instant (dans cet exemple, seule l'orientation des volumes est modifiée).

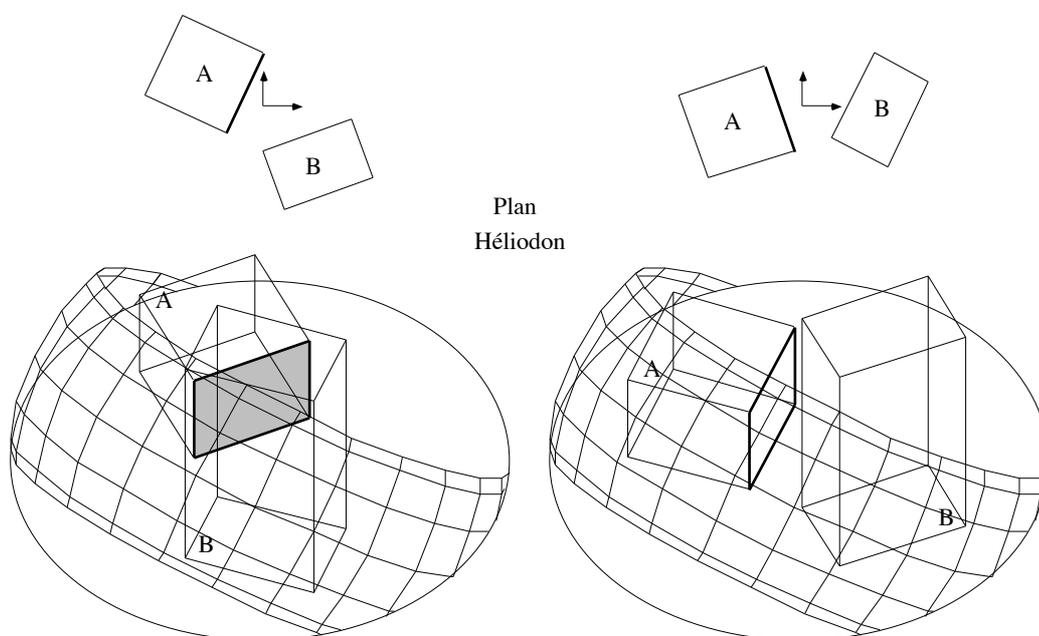


Figure 3.2. Ajustement de deux volumes pour réaliser des propriétés d'ensevelissement opposées au même instant

### 3.1.1.2 Réalisation d'une plage temporelle d'ensevelissement en un point

Les méthodes directes déterminant les plages temporelles d'ensevelissement en un point effectuent la superposition, dans une même projection, des masques apparents autour du point considéré et des trajectoires solaires. Les parties masquées des trajectoires correspondent aux périodes d'ombrage du point tandis que les parties visibles correspondent aux périodes d'ensevelissement de ce point (cf. § 2.2.1.2, 2.2.2.2 et 2.2.3.2).

Il est possible d'inverser ces méthodes pour réaliser une propriété du type : *ce point doit être au soleil ou à l'ombre pendant cette période*. Pour ce faire, il suffit de représenter sur une projection ad hoc les périodes d'ombrage ou d'ensoleillement souhaitées. La contrainte trouve alors une transcription géométrique qui dépend du type de projection utilisé.

Sur une projection stéréographique par exemple (cf. figure 2.23, chapitre précédent), la représentation d'une propriété d'ombrage sur un point peut être réalisée par le dessin d'une tache sur les trajectoires solaires. Cette tache représente à la fois la plage temporelle d'ombrage souhaitée sur le point et la projection stéréographique du masque minimal à réaliser pour satisfaire la contrainte. Géométriquement, une infinité de solutions masques possèdent cette même projection. Elles sont toutes contenues dans un « volume d'ombre » défini par les hauteurs angulaires et les azimuts relevés sur le diagramme. Il est possible de reconstituer ce volume au prix de certaines constructions géométriques généralement délicates. On obtient alors une condition nécessaire et suffisante d'obstruction (et réciproquement, d'évidement) pour réaliser la propriété.

En utilisant une projection perspective centrale et un modèle des trajectoires solaires (cf. § 2.2.1.2), il est également possible d'ajuster la position d'un masque ou celle d'un percement pour réaliser une propriété d'ensoleillement en un point singulier (le centre de la perspective). Cette opération est facilitée par l'utilisation d'un modeleur géométrique. Sur la figure 3.3 ci-dessous, les trois hypothèses de percements figurées réalisent des propriétés d'ensoleillement différentes en un même point.

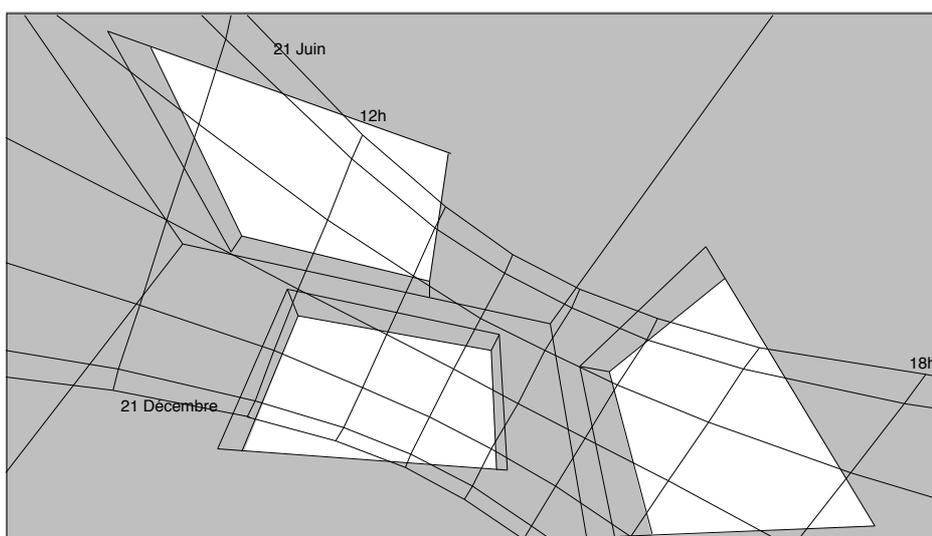


Figure 3.3. Ajustement de percements pour réaliser différentes propriétés d'ensoleillement en un même point

### 3.1.1.3 Reproduction des conditions d'existence d'une propriété

Une autre manière, empirique, de renverser les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement consiste à mettre en oeuvre un processus de type observation → reproduction. En observant l'ensemble des conditions qui permettent à une propriété d'ensoleillement donnée d'être réalisée, il suffit de reproduire ces conditions pour que cette propriété soit à nouveau réalisée.

Cette approche est triviale pour certaines propriétés. Elle l'est moins lorsqu'il s'agit de la recherche d'effets plastiques comme ceux étudiés par M. Twarowski (1967). Dans cet objectif, l'auteur propose plusieurs méthodes permettant de réaliser un effet d'ensoleillement donné. Ces méthodes s'appliquent par exemple à la mise en scène des sculptures (expression plastique solaire des oeuvres réalistes), des bâtiments ou encore des jardins.

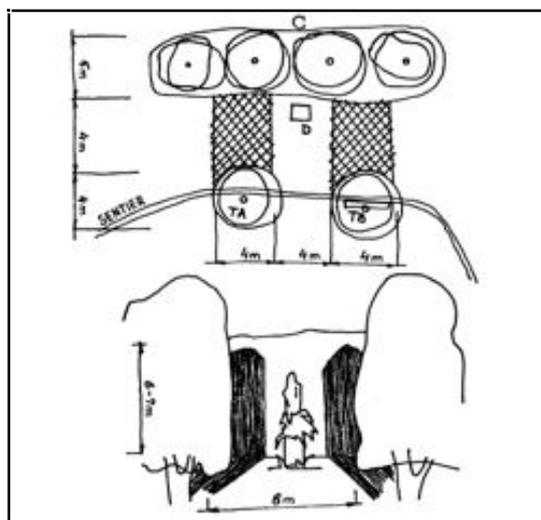


Figure 3.4. M. Twarowski (1967) : relevé d'une composition solaire obtenue dans un jardin le 18 septembre à 11 heures

L'approche de M. Twarowski repose sur une démarche simple et invariable. L'observation de l'ensoleillement dans des situations existantes lui permet d'abord de répertorier et de relever précisément les effets intéressants (figure 3.4 : relevé d'une composition solaire). L'analyse géométrique de ces effets fournit ensuite les conditions spatio-temporelles de leur existence. Enfin, par extension, ces conditions peuvent être reproduites et même améliorées dans les projets nouveaux en utilisant les méthodes de simulation directe appropriées. Ainsi résume-t-il pour ce qui concerne les jardins :

*« (...) Il est assez facile de mettre à profit, dans un projet, toute la multiplicité des compositions créées par les rayons solaires dans les forêts et dans les clairières, dans les vallées, sur les collines et sur les plaines, dans les jardins et dans les prés. Il suffit d'observer avec*

*attention, aux diverses heures de la journée, les plus belles compositions formées par les rayons solaires et de les noter. On pourrait alors aisément projeter, même pour un petit jardin, des compositions répondant aux exigences des habitants et se succédant progressivement, depuis les premières heures matinales, lorsque le soleil émerge à l'horizon, jusqu'à la tombée de la nuit, au moment où le jardin baigne dans la pénombre. » (Op. cit., p. 122)*

Nous insistons sur cette démarche en ce qu'elle nous paraît originale à plusieurs titres. M. Twarowski est l'un des rares auteurs à aborder l'ensoleillement dans une perspective de projet plus que d'analyse. Ce point de vue l'amène naturellement à considérer les effets plutôt que les causes et, en conséquence, à inverser de manière empirique les méthodes de simulation directe pour permettre la réalisation d'un effet donné. Ses propositions ingénieuses constituent des outils de conception capables de réaliser une grande part des intentions d'ensoleillement manipulées dans un projet, quelle que soit leur finalité, énergétique, lumineuse ou plastique.

### **3.1.2 Méthodes géométriques inverses partielles**

Les méthodes précédentes ne font que « prendre à l'envers » les constructions géométriques directes. Outre ces méthodes, il existe dans la littérature quelques approches géométriques posant explicitement le problème inverse de la simulation de l'ensoleillement et qui ne trouvent pas d'équivalent en termes de simulation directe. Ces méthodes résolvent divers sous-problèmes du problème général de la simulation inverse de l'ensoleillement, ce pourquoi nous les désignons comme méthodes inverses partielles.

Il est intéressant de constater que ces méthodes s'affranchissent de la nécessité de discrétisation propre aux approches directes. Au contraire, elles permettent la réalisation de propriétés d'ensoleillement définies sur des zones continues de l'espace et pour des périodes temporelles également continues. Elles effectuent donc une intégration géométrique de l'ensoleillement dans le temps et dans l'espace, ce en quoi elles préfigurent notre propre méthode (notion de pyramide complexe d'ensoleillement, cf. chapitre suivant).

#### **3.1.2.1 Enveloppe solaire d'une parcelle**

Achard (1986) présente une méthode déterminant « l'enveloppe solaire » d'une parcelle, c'est-à-dire le volume à l'intérieur duquel doit s'insérer une construction sur cette parcelle si l'on veut garantir que cette construction ne portera pas d'ombre significative à aucun moment sur les parcelles voisines.

Le principe de la détermination de cette enveloppe, pour une parcelle supposée parfaitement plane, est résumé dans la figure 3.5 page suivante. En premier lieu, une pyramide solaire dite simple est calculée pour un segment

$OO'$  de hauteur l'altitude maximale prévue ou autorisée sur la parcelle. Le point  $O'$  porte une ombre significative de plus grande longueur au solstice d'hiver, en deux points  $A$  et  $B$  symétriques par rapport à l'axe Nord-Sud de la parcelle (l'ombre significative peut être choisie, par exemple, pour les instants correspondant à une heure après le lever et avant le coucher du soleil ; en deçà et au-delà, on admet que l'ombre portée n'est pas significative en termes lumineux, énergétiques ou plastiques). Les deux points  $A$  et  $B$  projetés orthogonalement sur l'axe Est-Ouest en  $A'$  et  $B'$  définissent complètement la base rectangulaire de la pyramide de sommet  $O'$  (figure 3.5 en haut). Ce volume contient toutes les lignes d'ombre significatives portées par le segment considéré.

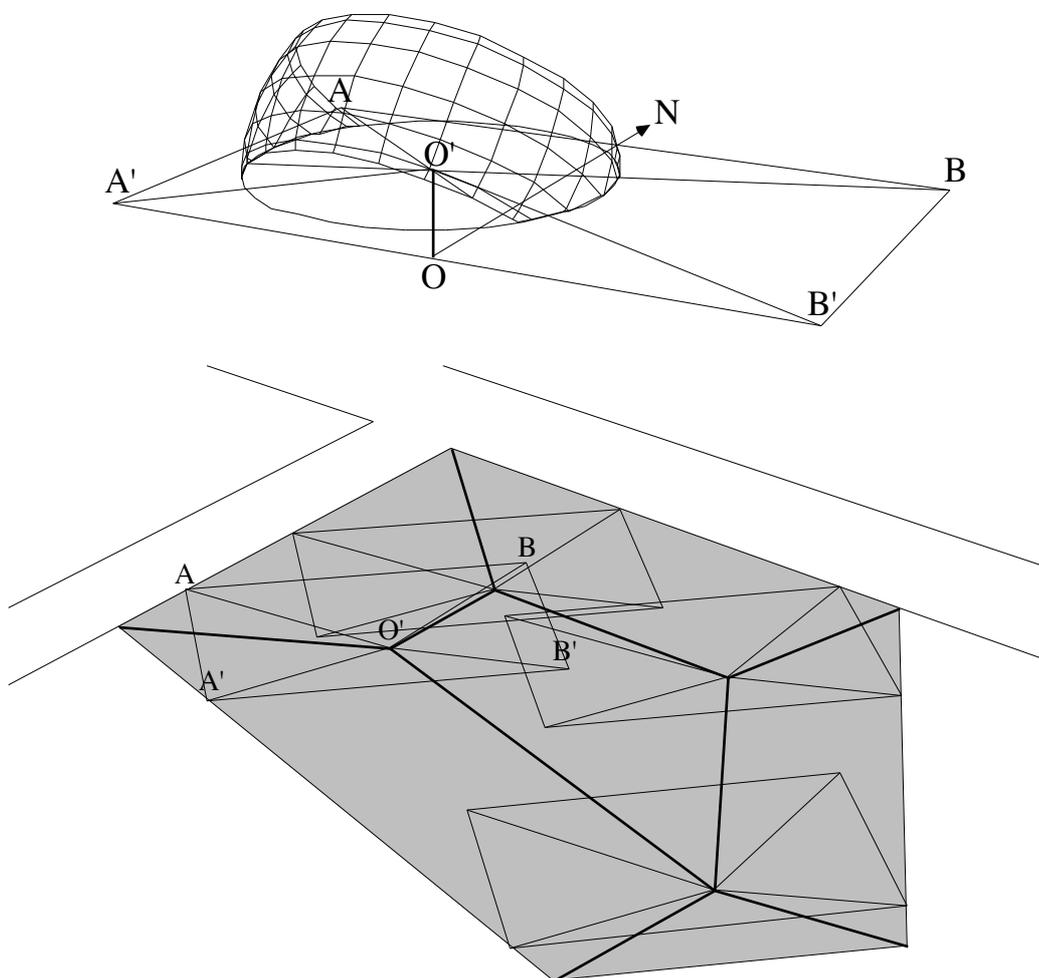


Figure 3.5. Enveloppe solaire d'une parcelle (Achard 1986)

La pyramide solaire obtenue est alors intégrée sur l'ensemble des points de la parcelle par un simple glissement le long des arêtes de celle-ci (figure 3.5 en bas). Les sommets de la parcelle et ceux de la pyramide permettent de

reconstituer l'enveloppe solaire dans laquelle doit être incluse la construction pour satisfaire la propriété. Le même principe, avec une construction géométrique plus complexe, peut être mis en oeuvre sur une parcelle pentue.

### 3.1.2.2 Courbes de niveau solaire

La méthode précédente est facile à mettre en oeuvre. Elle apparaît cependant très limitative puisqu'elle ne permet de réaliser qu'une propriété d'ensoleillement globale, appliquée à l'ensemble d'une parcelle pour l'ensemble des instants de l'année. Une extension de cette méthode est proposée par M. Twarowski (1967) sur le principe des courbes de niveau solaire qu'illustre la figure 3.6 ci-dessous. Il ne s'agit plus de garantir qu'une construction donnée ne porte pas d'ombre sur les parcelles voisines, mais d'assurer qu'un ensemble de constructions ne se portent pas d'ombre mutuelle pendant une période donnée.

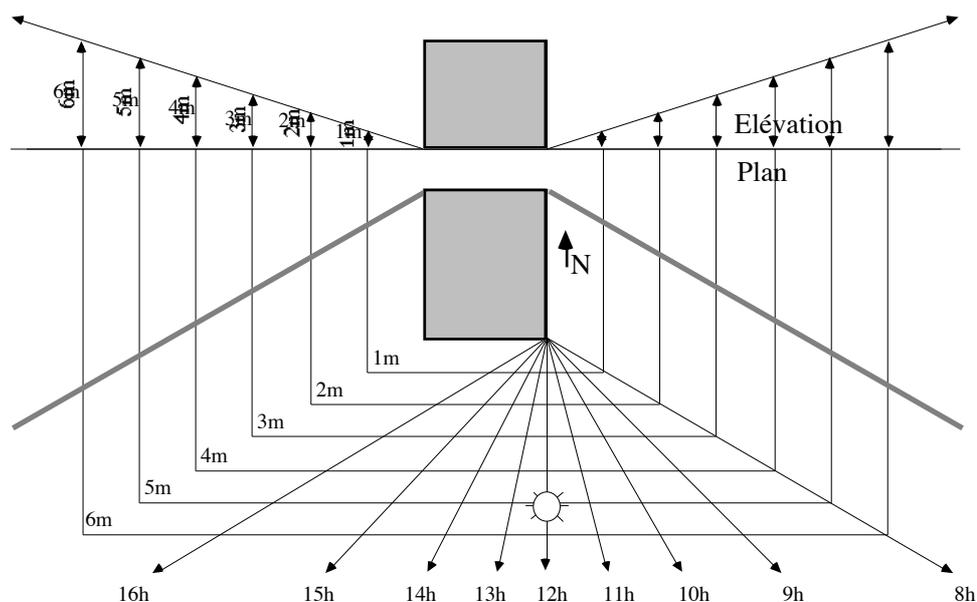


Figure 3.6. Courbes de niveau solaire (Twarowski 1967)

Considérons le bloc parallélépipédique grisé de la figure 3.6. On souhaite assurer l'ensoleillement de ce bloc de 8 heures à 16 heures, aux équinoxes. En utilisant le diagramme solaire MT centré sur un sommet du bloc (cf. § 2.1.2.2), il est facile de construire la trace au sol des rayons solaires pour toutes les heures de la période considérée. Le diagramme donne également pour chacune de ces heures la hauteur des points susceptibles de porter ombre sur le sommet étudié. Cette construction peut être répétée identiquement en chaque sommet du bloc. Les séquences des points d'ombre définis-

#### Position du problème inverse



Girasol par exemple. Nous obtenons ainsi pour les heures significatives de la période la trace au sol des rayons solaires et le point limite d'enseulement pour une hauteur  $h$  donnée (1 mètre sur la figure). Cette construction peut être répétée identiquement pour tous les points de la tache ABCD puisque les rayons solaires sont parallèles en chaque instant. Si ABCD est convexe, il suffit de translater les rayons obtenus en A sur le contour ABCD pour reconstituer la limite de recul d'une construction de hauteur  $h$  garantissant l'enseulement de l'ensemble de la tache pendant la période donnée. La limite de recul pour une hauteur quelconque est alors obtenue simplement en considérant cette hauteur comme un multiple de  $h$ .

Cette méthode est intéressante en ce qu'elle préfigure la construction de ce que nous définirons comme la pyramide complexe d'enseulement associée à la tache ABCD et à la période temporelle considérée (chapitre suivant). La réalisation de la tache de soleil est garantie par une condition de recul fonction des hauteurs des constructions avoisinantes. Nous verrons que dans le cas général, cette condition peut être vérifiée par une simple opération booléenne entre la pyramide complexe d'enseulement et l'ensemble des objets composant la scène dans laquelle est définie la tache à réaliser.

## 3.2 Autres approches inverses

Le seul aspect géométrique de l'enseillement apparaît parfois rédhibitoire ou réducteur dans le contexte de l'aide à la conception en architecture :

- rédhibitoire parce que les constructions géométriques demandées sont complexes, difficiles à mettre en oeuvre et d'une grande sensibilité dimensionnelle ; les résultats obtenus à un instant donné sont généralement invalidés par toute modification ultérieure du projet ;
- réducteur parce que les problèmes concernant la maîtrise énergétique, lumineuse et plastique du projet, appellent d'autres paramètres d'évaluation que les seuls résultats des simulations d'enseillement.

Les recherches que nous présentons dans cette section mettent toutes en avant l'intérêt d'une approche inverse de la simulation dans le processus de conception. Cependant, elles se situent dans une perspective plus focalisée de maîtrise énergétique ou lumineuse du projet. Dans une telle perspective, l'enseillement apparaît comme une variable isolée dans l'ensemble des paramètres descriptifs du champ. En outre, sa prise en compte demande une manipulation du temps qui peut paraître délicate à mettre en oeuvre dans un système d'aide à la conception.

Nous décrivons ces recherches suivant les trois classes que nous avons dégagées de la littérature concernant les problèmes inverses : les méthodes génératives, l'aide experte et les techniques d'optimisation. Nous présentons les hypothèses et les limites de chacune de ces approches et nous les illustrons par un ou plusieurs résultats représentatifs. Nous analysons brièvement la capacité de chacune d'elle à mettre en oeuvre la simulation inverse de l'enseillement, au sens où nous l'avons introduite dans ce chapitre.

Remarquons que ces approches utilisent toutes un support informatique sans lequel elles ne seraient pas applicables. Ceci les différencie encore des méthodes précédentes qui peuvent être mises en oeuvre soit de manière graphique, soit par l'intermédiaire d'un modéleur géométrique.

### 3.2.1 Méthodes génératives

Cette approche dite encore *Generate and Test* (Stevens 1990), repose essentiellement sur la polyvalence de l'outil informatique. Il s'agit, dans un même programme, de générer d'abord un grand nombre de solutions plausibles à un problème donné, puis de tester ces solutions (par une méthode de simulation directe) pour en extraire la ou les meilleures conformément à l'objectif ou la contrainte fixée. Le même support de calcul numérique est donc

utilisé pour effectuer deux actions de natures différentes — l'unicité apparente des moyens donnant l'illusion de la créativité de l'outil informatique. Notons en passant que ces approches partagent de nombreux points communs avec certaines méthodes de modélisation déclarative.

Les principales limites de cette approche sont les suivantes (Siret 1996). D'une part, les solutions doivent être basées sur un modèle a priori et leur génération s'expose au problème de l'explosion combinatoire dès qu'un grand nombre de paramètres interviennent. D'autre part, la méthode de simulation employée doit être suffisamment simple et rapide pour être appliquée de manière automatique sur un très grand nombre de solutions. Elle doit par ailleurs fournir une appréciation synthétique des résultats, sous la forme d'indices par exemple. Sont donc exclues toutes les méthodes qui fournissent des résultats difficiles à interpréter ou dont l'interprétation appelle un savoir expert.

### 3.2.1.1 Illustration

Une proposition représentative de cette approche est celle de L. Khemlani (1995) qui s'intéresse à la fois à la performance énergétique et à l'éclairement naturel d'un espace intérieur localisé et orienté de manière quelconque. Par simplification, la pièce est supposée parallélépipédique et ne possède qu'une façade ouverte. L'outil proposé génère des configurations de baies sur cette façade sous la forme d'assemblages de percements rectangulaires (en nombre choisi par l'utilisateur). Ces percements sont effectués par l'exploration exhaustive de toutes les configurations permises sur un maillage quadrangulaire paramétré de la façade. Les configurations retenues sont celles qui satisfont au double objectif d'une « bonne » répartition lumineuse et d'une performance énergétique optimale suivant les critères pris en compte. La propriété réalisée par cet outil est du type : *la pièce doit présenter un éclairage naturel de niveau supérieur à... et de répartition homogène, tout en minimisant les déperditions thermiques.*

Les méthodes de simulation directe employées pour évaluer les solutions apparaissent relativement classiques. Pour l'éclairement, il s'agit du facteur de lumière du jour (voir par exemple CSTB 1991 pour la définition de cet indice établi sous un ciel couvert uniforme qui ne tient pas compte de l'ensoleillement). Le facteur de jour est calculé pour chaque point d'une grille maillant un plan de référence de la pièce. Pour les performances thermiques, la méthode s'appuie sur un coefficient de surface de vitrage susceptible de minimiser en même temps les besoins de chauffage et d'éclairage.

Pour chaque configuration étudiée, les informations fournies par ces deux indices sont comparées aux objectifs à atteindre. Les configurations sont classées suivant leur adéquation à ces critères et présentées à l'utilisateur dans l'ordre de leurs performances globales.

### 3.2.1.2 Extension à l'enseillement

Cette approche n'utilise pas de véritable simulation d'enseillement puisque la dimension temporelle n'est pas prise en compte. Cependant, une démarche similaire s'appuyant sur la géométrie spatio-temporelle de l'enseillement pourrait être mise en oeuvre. En utilisant une méthode générative analogue à celle que nous venons de présenter, nous pourrions par exemple simuler en chaque point d'une grille de référence les durées annuelles d'enseillement correspondant à différentes configurations de percements sur une ou plusieurs façades (cf. § 2.2.3.2, *Détermination des périodes d'enseillement dans Solène*). Les configurations retenues seraient alors celles qui permettraient d'obtenir une durée d'enseillement donnée pour un ensemble de points donnés dans la grille — c'est-à-dire de reconstituer des taches de soleil localisées dans l'espace et dans le temps. La figure 3.8 ci-dessous donne une image schématique du processus susceptible d'atteindre ce résultat.

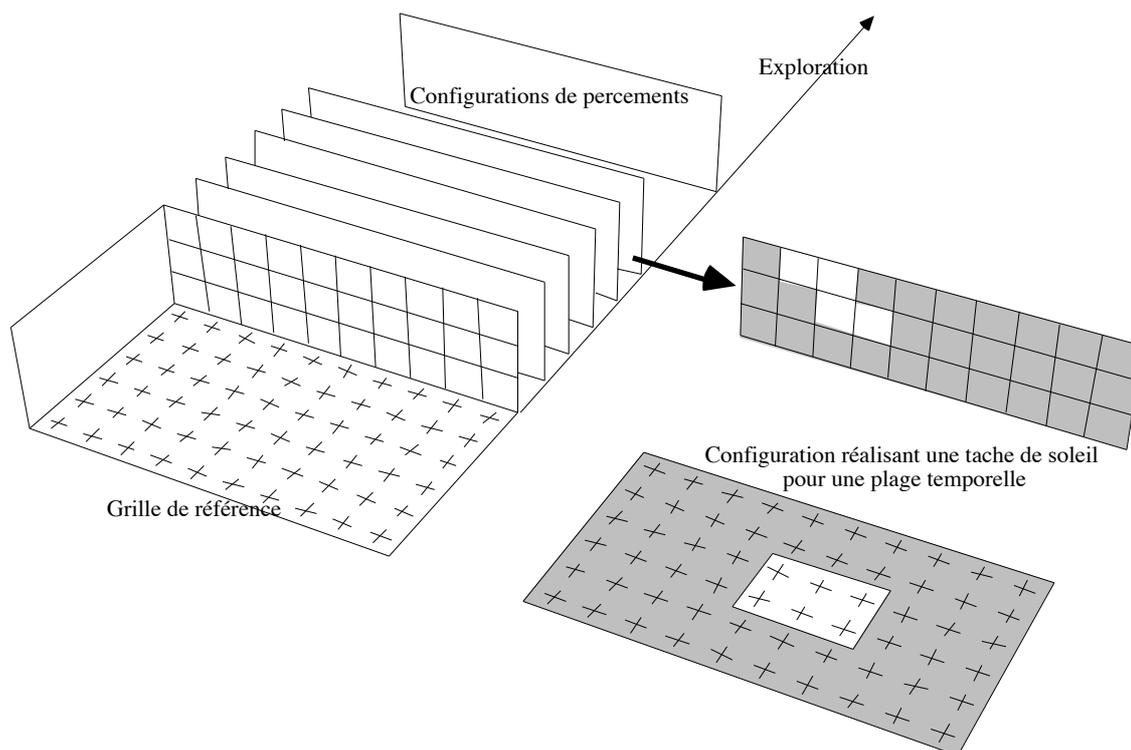


Figure 3.8. Principe d'une approche générative pour la simulation inverse de l'enseillement

Une procédure analogue testant des configurations de masques potentiels (par exemple, sur un pare-soleil horizontal) permettrait de réaliser de la même manière une tache d'ombre pour une plage temporelle donnée.

Cette méthode nous donnerait un système général capable de réaliser la simulation inverse de l'ensoleillement. Nous ne l'avons pas mise en oeuvre pour deux raisons qu'il est facile de concevoir :

- d'une part, les solutions calculées (configurations de percements ou d'obstructions) seraient nécessairement approchées et ne rendraient pas compte de la géométrie de l'ensoleillement ;
- d'autre part, une application de cette approche dans un contexte de conception apparaît peu crédible étant données les difficultés inhérentes au processus de recherche exhaustive des solutions.

Un algorithme de recherche plus efficace, de type « génétique », pourrait être mis en oeuvre mais il ne nous assurerait pas d'obtenir toutes les solutions satisfaisantes ni même d'obtenir la meilleure.

### 3.2.2 Aide experte

Ces approches ont fait l'objet d'une littérature abondante qu'il est difficile de synthétiser ici. Elles reposent sur l'idée que la connaissance experte nécessaire à une bonne intégration (par exemple climatique) des constructions fait parfois défaut au concepteur architecte ou n'est pas prise en compte par lui dans les phases amont de la conception, faute d'outils adaptés. Dès lors, les propositions convergent toutes pour l'intégration, dans un système de conception assistée par ordinateur, d'un savoir expert manipulé par des mécanismes de raisonnement automatique (ou plus généralement d'intelligence artificielle) et appliqué aux objets en cours de conception dès les stades les plus précoces du processus. Le système propose une expertise sur l'état courant du projet qui doit conduire, si nécessaire, à une solution satisfaisant « mieux » les objectifs ou les contraintes fixés. Il s'agit donc de stratégies d'amélioration du projet (*improvement procedures*) telles que les définit G. Stevens (1990), même si lui-même ne fait pas mention des systèmes experts.

Cette approche pose différentes difficultés (Siret 1996). En premier lieu, le système d'expertise s'appuie sur des règles normatives ou sur des corrélations n'exprimant généralement que des lois de comportement moyen ; il se peut que l'ensemble de ces connaissances ne fournisse pas d'expertise correcte pour une construction innovante. D'autre part, cette approche ne permet pas de proposer directement une solution réalisant une propriété donnée ; elle ne peut qu'orienter l'évolution du projet vers une solution supposée meilleure. Enfin, l'approche experte suppose une conduite globale du projet sur la plateforme du système et exclut tout autre support de conception puisque l'information architecturale doit être structurée de manière à permettre l'expertise (les travaux intéressant spécialement ce problème de l'intégration des outils sont par ailleurs nombreux, cf. Augenbroe et al. 1993 par exemple).

### 3.2.2.1 Applications à la maîtrise énergétique et lumineuse du projet

Dans les champs d'application voisins de nos préoccupations, les recherches les plus représentatives de cette approche apparaissent dans le domaine de la maîtrise énergétique du projet. Un système expert (Silvestrini et al. 1993) propose par exemple une assistance à la maîtrise du confort thermique d'été en système passif. L'expertise s'appuie sur des règles simples issues d'analyses statistiques des performances de constructions connues. Le système propose des solutions d'amélioration du projet courant qui vont, dans le cas des ouvertures, de la modification du type de verre employé, à l'implantation d'un masque en passant par la réduction de la taille ou le changement de position. Ces résultats sont exprimés en termes de principe correctif et aucune solution pratique, par exemple géométrique, n'est fournie à l'utilisateur demandeur. Les propriétés réalisées sont globales et s'expriment par une contrainte du type : *minimiser les déperditions thermiques du projet*.

Les connaissances utilisées dans ce type d'expertise mettent en oeuvre des modèles simplifiés des phénomènes en jeu représentés le plus souvent par des règles logiques ou des lois statistiques entre les paramètres des constructions et les paramètres environnementaux. La pertinence de ces lois est par ailleurs discutée par certains auteurs (Palomo 1993). Des techniques plus complexes de *réduction de modèles physiques* sont également proposées (Peuportier et al. 1991). Lorsque ces modèles deviennent insuffisants pour un diagnostic précis — c'est-à-dire lorsque le système reste muet ou risque d'induire le concepteur en erreur — des méthodes plus fines de simulation s'avèrent nécessaires.

Des recherches ont été faites pour mettre en oeuvre une coopération entre l'approche d'aide experte et les méthodes de simulation directe de telle sorte qu'elles se complètent utilement. Dans le domaine de la maîtrise énergétique du projet, notons les propositions de Shaviv et al. (1996) pour l'intégration de modules de simulation physique dans un système plus général d'aide experte. L'un des modules de simulation proposé calcule par exemple les indices d'ensoleillement (cf. § 2.3.2.1) des façades significatives du projet. Ces indices peuvent alors être manipulés par des règles qui les intègrent dans leurs conclusions. Dans une perspective analogue, un outil assurant une forte coopération entre des méthodes de simulation éprouvées et différents systèmes intelligents (systèmes experts et réseaux de neurones) pour l'aide à la conception énergétique est décrit par A-M. Malkawi (1995).

Cette voie permet d'intégrer des outils de simulation produisant des résultats de différentes natures dans un même environnement d'aide à la conception, autorisant la gestion de compromis et la prise en compte d'objectifs multicritères. En outre, un jeu de règles approprié permet d'utiliser l'outil de simulation le mieux adapté au stade courant du processus de conception, suivant les données disponibles et la précision des objectifs à atteindre.

### 3.2.2.2 Applications didactiques

Cependant, malgré leurs promesses, les approches d'aide experte n'ont pas sensiblement déteint dans la pratique des architectes. Une voie parallèle consiste à utiliser ces approches à des fins pédagogiques plutôt que pratiques. Plusieurs systèmes de ce type dans le domaine de la maîtrise énergétique du projet ont été proposés. Ces systèmes visent à l'apprentissage « en situation » des connaissances du domaine plutôt qu'à leur mise en oeuvre projectuelle. Dans ce cadre, l'expertise fournie par le logiciel apparaît comme une forme particulière d'enseignement : l'étudiant doit pouvoir s'approprier ces résultats sur des cas d'école avant de les réutiliser dans sa pratique architecturale (devenant de fait lui-même l'expert du domaine).

Le didacticiel VADT (Adolphe 1991) fournit ainsi une expertise thermique de bâtiments simples en avisant l'étudiant sur les conséquences énergétiques de ses choix d'orientation, de géométrie, de distribution des percements ou de technologie de construction. Cette forme d'apprentissage est supposée réconcilier la physique et la plastique des constructions, souvent opposées dans l'enseignement de l'architecture.

Une approche du même ordre est mise en oeuvre par Morel et al. (1994). Dans la même voie, le didacticiel CALIN (Adolphe 1994) propose une aide susceptible de s'adapter à plusieurs stratégies de conception : déductive, inductive ou analogique. Il inclue pour cette dernière des exemples de références architecturales qu'il est possible de comparer à la proposition courante. La même voie de l'utilisation de références « expertes » comme assistance à la conception est par ailleurs explorée par G. Lassance (1996) dans le domaine de la lumière naturelle.

Suivant la même optique didactique et dans le champ de la maîtrise lumineuse du projet, citons l'approche particulièrement originale proposée par L. Mudri (1994). Cette approche met en oeuvre une structure de critères capable de modéliser les caractéristiques de l'ambiance lumineuse d'un espace intérieur ouvert sur l'extérieur. Ces critères sont manipulés par un système de raisonnement utilisant les méthodes de la logique floue, plutôt que la logique du premier ordre généralement adoptée par les systèmes experts. L'ambiance lumineuse est décomposée en deux classes de propriétés qui décrivent son « dynamisme » et le niveau d'éclairage moyen. Le dynamisme est représenté par des qualificatifs comme : « dramatique, dynamique, plutôt calme, très calme, triste ». Les niveaux d'éclairage sont décrits par les propriétés : « très clair, plutôt clair, plutôt sombre et très sombre » (on reconnaît dans ces modulations les valeurs de vérité manipulées en logique floue). Ces propriétés permettent à l'étudiant de formaliser ses intentions initiales, de manière particulièrement évocatrice. A tout moment du processus de conception, le système est capable d'évaluer l'adéquation entre ces intentions et les propriétés lumineuses actuelles du projet.

Ce système ne fournit pas de solution correctrice, le cas échéant, mais il permet à l'étudiant de « faire la synthèse entre l'enseignement de l'art et l'enseignement des techniques, [... et facilite] la formation de ses propres critères, de son propre point de vue », selon les mots de l'auteur. En d'autres termes, le système permet l'apprentissage de la manipulation des intentions d'ambiances dans le projet, parallèlement à l'apprentissage de la manipulation des formes architecturales et constructives.

### 3.2.2.3 Extension à l'ensevelissement

Les approches d'aide experte sont nombreuses, variées et font toujours l'objet d'une littérature intéressante, en particulier pour leur capacité d'intégration des méthodes de simulation plus classiques. Dans le contexte de l'ensevelissement, ces approches n'apportent pas de réponse pertinente puisqu'elles ne manipulent pas, a priori, la géométrie. Elles peuvent cependant constituer une sur-couche « intelligente » d'un outil de simulation (directe ou inverse) de l'ensevelissement, en particulier lorsque les résultats des simulations doivent être intégrés dans une évaluation multi-critères pour la maîtrise énergétique ou lumineuse du projet.

En particulier, un système « intelligent » peut être spécifié pour réaliser en même temps des propriétés de différentes natures (ensevelissement, visibilité, règles constructives, etc.) dans un système d'aide à la conception multi-critères. La méthode de simulation inverse que nous proposerons dans les chapitres suivants peut être intégrée à un tel outil, comme nous le verrons en conclusion de ce rapport.

### 3.2.3 Techniques d'optimisation

Ces approches considèrent le projet comme un problème à résoudre. Elles font l'hypothèse qu'il existe au moins une solution à ce problème et que, lorsque plusieurs solutions existent, l'une d'elles peut être qualifiée d'optimale par rapport à certains critères. Il s'agit donc de formaliser le problème en isolant les variables significatives et en écrivant les relations qu'entre-tiennent ces variables entre elles. Une fois le problème posé, les valeurs des variables maximisant ou minimisant différents critères sont obtenues par des méthodes mathématiques. Ces valeurs optimales définissent la ou les meilleures solutions relativement aux critères choisis. Cette démarche correspond effectivement à la résolution du problème inverse de la simulation comme Radford et Gero (1979) ont été parmi les premiers à le formuler explicitement : partant de l'état voulu d'un système, il s'agit de déterminer les valeurs des paramètres de ce système susceptibles de produire cet état. Dans le cas de l'optimisation cependant, l'état recherché est paradoxalement limité à une seule valeur : le *meilleur possible*.

Le principal enjeu des techniques d'optimisation est de formaliser et de résoudre des problèmes multi-critères, c'est-à-dire capables de prendre en compte l'ensemble des variables caractérisant le problème. Cette ambition constitue également la limite de ces approches dans le cadre de la conception. Pour ce qui concerne le projet d'architecture au moins, nous savons qu'un grand nombre de critères de conception ne peuvent être envisagés comme des variables quantifiables (critères d'usage, esthétiques, historiques, etc.). Quand bien même ces critères pourraient-ils être quantifiés, il serait encore impossible d'établir une relation de comparaison pour ordonner les solutions qu'ils produiraient.

Les techniques d'optimisation ne sont donc pas adaptées à la résolution des problèmes mal-définis que sont les projets d'architecture. Elles résolvent des problèmes parallèles au projet dans lesquels ne sont prises en compte que les variables objectives. Le fait que ces variables constituent un sous-ensemble des critères de conception ne doit pas laisser croire que le problème qu'elles déterminent constitue un « sous-problème » du projet : le projet est un problème global qu'il est généralement périlleux de segmenter. Cependant, les approches par optimisation ont une valeur didactique en ce qu'elles mettent à jour l'interdépendance complexe des différents critères de conception, c'est-à-dire des intentions multiples du concepteur.

### 3.2.3.1 Illustrations

Les approches par optimisation appliquées à l'architecture apparaissent relativement anciennes. La première proposition de Radford et Gero (1979) s'intéresse à l'optimisation de la géométrie et de la topologie des ouvertures d'une pièce. Les mêmes auteurs (Gero 1983) proposent plus tard une approche multi-critères pour l'optimisation énergétique des bâtiments. Ils identifient un espace de décision à  $n$  dimensions et un espace de performances à  $m$  dimensions, chacun d'eux étant délimité par un ensemble de contraintes. Chaque point ( $n$ -uplet) de l'espace de décision représente une solution potentielle et est associé à un point de l'espace des performances. Le problème est alors de déterminer le meilleur couple solution-performances, ce que les auteurs réalisent par une optimisation de Pareto.

L'exemple donné prend en compte trois critères définis chacun par un modèle à plusieurs variables : le comportement thermique, le coût global et la surface utile d'une même construction parallélépipédique. Il s'agit de déterminer la ou les solutions géométriques (orientation, nombre d'étages, pourcentage de vitre sur chaque façade, type de vitrage, masques extérieurs) minimisant le coût et maximisant la surface utile et le comportement thermique. Les auteurs établissent ainsi un ensemble de relations générales entre les variables de décision et celles des performances qu'ils supposent utiles dans un processus de conception architecturale.

Dans le champ de la maîtrise des ambiances, un exemple contemporain représentatif est celui proposé par A. Mahdavi et al. (1995) — par ailleurs qualifié d'approche « générative » dans un sens qui n'est pas celui que nous adoptons. Les auteurs mettent en avant l'aspect mono-directionnel des méthodes conventionnelles de simulation (approches directes) et proposent en échange la notion de méthodes multi-directionnelles ou « ouvertes », capables de mettre en oeuvre à la fois les approches directe et inverse de la simulation. Le problème est alors celui de la manipulation conjointe des paramètres décrivant l'architecture et des paramètres décrivant les propriétés d'ambiance, chacun d'eux étant étroitement corrélé à tous les autres.

S'intéressant à l'éclairage naturel, les auteurs proposent un système basé sur des *fonctions de préférences*, réversibles, capables d'effectuer le passage direct et inverse entre les paramètres géométriques des objets modélisés et leurs performances en termes d'éclairage (indice de luminance moyenne et indice d'homogénéité). Dans l'outil présenté, deux sortes d'actions sont proposées à un concepteur éventuel : d'une part, la modification géométrique d'un espace parallélépipédique muni d'une ouverture et d'un pare-soleil provoque en parallèle l'actualisation des indices qualifiant l'éclairage intérieur de cet espace ; d'autre part, la modification même de ces indices conduit à une transformation automatique de la volumétrie. Le passage des indices d'éclairage aux paramètres de volumétrie est effectué par les fonctions de préférences établies sur l'analyse statistique de cas équivalents.

Dans le domaine de l'éclairage artificiel, une technique d'optimisation originale est proposée par Schoeneman et al. (1993). Cette approche est intéressante en ce qu'elle ne cherche pas à obtenir a priori *le meilleur éclairage possible*, mais à réaliser *le mieux possible* un éclairage donné. Elle permet donc de réaliser une intention d'éclairage sans préjuger de la pertinence de cette intention. Le concepteur représente l'effet lumineux qu'il souhaite obtenir en dessinant littéralement un ensemble de taches de lumière sur les éléments d'une pièce intérieure. Cette pièce est munie d'un nombre fixe de lampes dont les positions géométriques sont données. L'outil détermine la *meilleure* intensité lumineuse à appliquer à chacune de ces lampes pour obtenir globalement la *meilleure* approximation de l'effet recherché. Mathématiquement, la méthode est basée sur l'inversion de la matrice des radiosités de la pièce éclairée.

### 3.2.3.2 Extension à l'enselement

Les techniques d'optimisation ne concernent pas directement le problème que nous adressons puisqu'il n'existe pas a priori de critère à optimiser dans la réalisation d'une propriété d'enselement telle que nous l'avons définie. S'ajoutent à ce constat toutes les limites que nous avons signalées concernant l'application de ces techniques dans le cadre de la conception en

architecture. L'optimisation ne s'avère efficace que lorsqu'un grand nombre de paramètres interdépendants interviennent dans la formalisation d'un problème et que tous ces paramètres sont objectivables. Ces deux conditions ne sont pas réunies dans le projet architectural.

L'optimisation en matière d'ensoleillement a cependant donné lieu à d'intéressantes controverses dans l'histoire de l'architecture. G. Stevens (1990) propose ainsi une discussion sur ce qu'il appelle le « problème du logement de Walter Gropius ». En 1931, Gropius fournit plusieurs justifications du modèle de construction de logements en barres parallèles proposé par le Mouvement moderne. L'une de ces justifications concerne l'ensoleillement et plaide pour le *meilleur* et le *plus équitable* accès au soleil pour chaque appartement. La configuration de blocs parallélépipédiques parallèles est certes la mieux adaptée pour réaliser cette contrainte. Cependant, pour une surface de terrain et une population données, pour un angle d'incidence du soleil donné (garantissant par exemple l'ensoleillement de toutes les barres en hiver), combien de barres de combien d'étages permettent-elles de loger les habitants en respectant la contrainte d'ensoleillement ? Ce problème est un problème d'optimisation qui peut recevoir plusieurs solutions que discute G. Stevens. Gropius plaide pour un optimum de 10 à 12 étages par barre qu'il justifie par trois règles fondamentales établissant les interrelations entre les variables de surface, de population et d'angle d'incidence du soleil.

La figure 3.9 ci-dessous schématise les données du problème auquel nous laissons le lecteur apporter sa solution. On suppose constantes la hauteur d'un étage, l'épaisseur des barres et la surface minimale par habitant. La longueur des barres et la distance entre elles sont des variables intermédiaires.

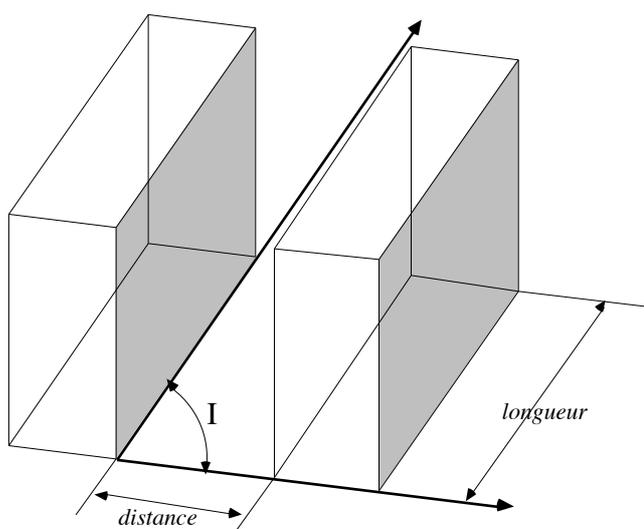


Figure 3.9. Le problème du logement de W. Gropius (G. Stevens 1990)

### 3.3 Représentation des intentions d'ambiances

Quelles que soient les méthodes mises en oeuvre dans les approches inverses de simulation, un problème sous-jacent est celui de la représentation des résultats attendus. Les approches inverses partagent en effet le fait de partir du résultat pour déterminer une ou plusieurs configurations architecturales susceptibles de vérifier ce résultat. Dans le contexte de la conception, les résultats s'expriment en termes de propriétés à réaliser et ces propriétés représentent les intentions du concepteur. Nous savons par ailleurs que la démarcation des intentions (la définition du parti) est en elle-même une part significative du projet.

La question de la représentation des intentions est traitée de manière inégale dans les systèmes que nous avons présentés. Dans certaines approches, les objectifs sont implicites (minimiser les déperditions thermiques, par exemple) et ils sont généralement « codés en dur ». Le concepteur est supposé partager ces intentions a priori. Dans d'autres, les intentions sont définies par le paramétrage initial du système et ne se prêtent pas facilement à une manipulation intuitive dans le cadre du projet. Le concepteur est libre de les formuler mais il n'a pas la capacité de les moduler au fil de la conception. Dans des systèmes plus élaborés cependant, certains auteurs apportent un soin particulier à leur expression : nous avons vu par exemple que L. Mudri (1994) propose une représentation sémantique très suggestive des propriétés lumineuses à réaliser. Schoeneman et al. (1993) permettent au concepteur de dessiner de manière intuitive les taches de lumière à réaliser dans une scène en trois dimensions.

Plusieurs travaux abordent ce problème dans une perspective plus dynamique. Plutôt que de considérer les intentions à réaliser comme des entrées statiques du processus de conception, ces recherches mettent en avant l'intérêt de la manipulation et de l'ajustement progressif des intentions, parallèlement à l'ajustement des formes. Nous décrivons dans ce paragraphe deux contributions intéressantes spécialement cette question. Ces deux approches portent sur la maîtrise lumineuse du projet. L'une met en oeuvre un système symbolique de notation et l'autre s'appuie au contraire sur une forme analogique de manipulation d'effets lumineux caractéristiques.

#### 3.3.1 Une approche symbolique

Cette approche originale est proposée par Rogora et al. (1996) et s'intéresse à la représentation linguistique et à la codification symbolique des intentions d'ambiance lumineuse dans le projet d'architecture. Les auteurs remarquent

avant tout que le langage architectural du projet (langage graphique) et celui du contrôle des phénomènes (langage physique) ne peuvent être manipulés simultanément dans le processus de conception : le langage physique est relégué à la fin du processus où des méthodes de « traduction » (simulation directe) agissent comme outils de contrôle de la cohérence du « discours » physique par rapport au « discours » architectural sous-tendu par le projet (par ce vocabulaire imagé, nous extrapolons, sans la déformer, la démonstration des auteurs).

La métaphore est intéressante en ce qu'elle suggère que les difficultés de compréhension et de collaboration entre les approches plastiques et physiques de l'architecture (souvent mises en évidence pour justifier les méthodes d'aide experte à vocation didactique, cf. *supra* : Adolphe 1991-1994, Mudri 1994) n'est peut-être qu'un problème de « communication » propre au processus de conception. L'architecte pourrait maîtriser les aspects physiques de son projet s'il possédait un « langage » susceptible de les représenter correctement, notamment d'en assurer la traduction « simultanée » avec le langage architectural.

En retour, les auteurs apportent une solution originale à ce problème en proposant un « langage de lumière » capable aussi bien de qualifier des situations existantes que de permettre la formalisation des intentions en phase de conception. Ce langage possède une grammaire, une syntaxe et un vocabulaire que les auteurs définissent. Il est surtout mis en oeuvre par un code graphique symbolique de onze paramètres représentant pour sept d'entre eux les propriétés du champ lumineux et pour les quatre autres les propriétés de l'activité contenue dans ce champ.

Utilisé dans sa fonction descriptive, ce langage permet de caractériser les situations existantes, à la fois par les propriétés du champ lumineux et par celles de l'espace architectural associé (figure 3.10 page suivante, description symbolique de trois types de champs lumineux dans différents espaces d'une bibliothèque. La sémantique des pictogrammes n'est pas décrite par les auteurs).

Dans sa fonction créative, il permet de formaliser des intentions lumineuses et de conduire le projet autour de ces intentions (*Light-driven planning process*). L'ambition est analogue à celle de l'approche inverse de la simulation telle que nous l'avons définie. Ainsi, suivant les auteurs : les qualités lumineuses (ou, de manière équivalente, thermiques, acoustiques, etc.) deviennent les objectifs à atteindre tandis que les formes architecturales, constructives, etc. sont le « matériau » permettant de les réaliser. Il s'agit donc de traduire les propriétés lumineuses souhaitées en propositions architecturales. Selon les auteurs, ce passage est possible directement, sous certaines conditions, à travers le langage proposé, ce qui confère à celui-ci un pouvoir créatif intéressant.

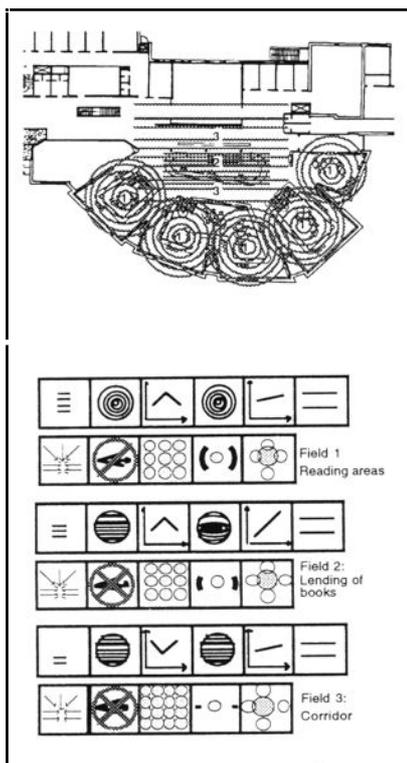


Figure 3.10. Description symbolique (en bas) de trois champs lumineux (en haut) dans une bibliothèque (Rogora et al. 1996)

### 3.3.2 Une approche analogique

Cette approche séduisante proposée par Demers et al. (1994-1996) partage le même objectif que l'approche précédente mais elle met en oeuvre des moyens différents. Nous la qualifions d'analogique puisqu'elle est basée sur la manipulation d'images numérisées représentant certains effets lumineux caractéristiques des environnements architecturaux. Ces effets sont des taches de lumière diffuse produites sous un ciel artificiel (ciel couvert standard) par différentes ouvertures dans une pièce noire (points, segments, rectangles, etc.). Ils constituent selon les auteurs une représentation tangible, au moins qualitative, d'ambiances lumineuses caractéristiques (figure 3.11 page suivante). La méthode consiste à utiliser ces images comme « primitives » lumineuses susceptibles de représenter les intentions du concepteur et de contraindre en partie les espaces qui les contiennent. Ces primitives peuvent être dupliquées, composées (en théorie au moins, dans une pièce noire, la composition des effets lumineux peut s'effectuer par simple superposition numérique des images, cf. figure 3.12 page suivante), ou transformées (homothéties, symétries, etc.).

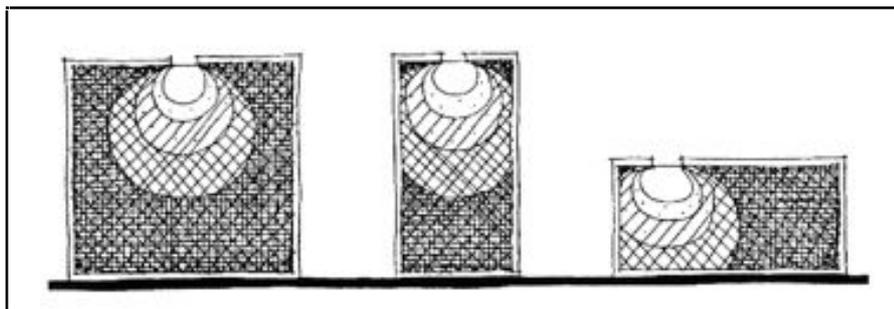


Figure 3.11. Représentation analogique des intentions lumineuses (Demers et al. 1994)

Cette approche se veut intuitive et doit permettre à un concepteur de définir progressivement ses intentions lumineuses en manipulant et en comparant différentes configurations caractéristiques. Cependant, de nombreuses limites apparaissent dans la démarche. En premier lieu, aucune méthode n'est proposée pour garantir que les effets composés ont une chance d'être vérifiés. En effet, les transformations et les collages des taches de lumière ne sont plausibles que si l'environnement architectural possède une réflectance nulle, c'est-à-dire si l'on fait l'hypothèse que la pièce est entièrement noire (outre l'hypothèse d'un ciel couvert diffus homogène niant les taches géométriques d'ensoleillement).

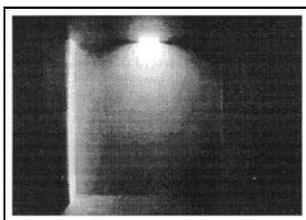


Figure 3.12. Composition d'effets lumineux (Demers et al. 1994)

En second lieu, cette approche est par nature qualitative. Elle ne permet pas, seule, de formaliser des intentions plus quantitatives même si différents outils de contrôle des caractéristiques physiques des effets manipulés (courbes isolux et histogrammes de contraste, Demers et al. 1996) peuvent être associés à la méthode.

Enfin, ce type de représentation des intentions d'ambiances n'est possible qu'avec les phénomènes visibles, au contraire de l'approche symbolique applicable à tous les phénomènes sensibles.

Ces limites rendent sans doute inefficace la méthode proposée. Néanmoins, nous considérons que cette approche reste doublement intéressante : d'une

part, elle ouvre la voie de travaux plus précis sur la représentation analogique des intentions d'ambiance dès les premières phases du projet (le support de l'image numérique paraît bien adapté à cet objectif) ; d'autre part, elle encourage le développement d'outils de simulation inverse susceptibles d'assurer que les effets manipulés ont une chance d'être réalisés.

Ces deux problèmes se posent identiquement dans le cas particulier de l'ensoleillement. D'une manière plus générale, ils recourent également certaines préoccupations de l'approche déclarative en modélisation géométrique.

## Conclusion

En écho aux méthodes de simulation directe de l'ensoleillement, ce chapitre a montré l'existence de différentes approches mettant en avant le problème inverse dans un contexte de conception architecturale. Comment réaliser une propriété d'ensoleillement dans le projet en cours de définition ? Les méthodes géométriques proposent des solutions partielles pour certaines propriétés en fixant des conditions d'orientation, de recul ou de hauteur des éléments du projet. Ces méthodes sont généralement délicates à mettre en oeuvre et elles souffrent de la même « sensibilité dimensionnelle » que les méthodes directes. Elles sont peu compatibles avec l'échelle d'incertitude qui caractérise les premières phases de la conception architecturale.

Les autres approches, génératives, d'aide experte ou d'optimisation, n'apportent pas de solution à ce problème. Elles donnent cependant différentes méthodes pour la réalisation de propriétés connexes concernant l'énergétique ou l'éclairage du projet. Ces approches illustrent également les traits fondamentaux du processus de simulation inverse dans un contexte de conception :

- elles permettent au concepteur de formuler un objectif explicite sur le projet dans leur domaine de compétence,
- elles assurent de pouvoir accéder à une ou plusieurs solutions (dont elles définissent la nature) supposées réaliser l'objectif fixé, de manière incrémentale (aide experte) ou directe (méthodes génératives et techniques d'optimisation),
- enfin, conséquence de ces deux points, elles permettent d'envisager la conception comme un processus de démarcation d'intentions suscitant plus ou moins directement la mise en forme du projet.

Prendre le problème de la simulation « à l'envers » ressortit plus à un état d'esprit qu'à une démarche scientifique. Nous le constatons chez M. Twarowski qui propose « naturellement » des méthodes empiriques, simples et astucieuses, d'inversion de la géométrie de l'ensoleillement chaque fois que se pose pour lui la question du projet. Son ambition n'est pas tant de perfectionner l'analyse de l'ensoleillement existant dans le projet que de permettre à l'architecte de réaliser une intention d'ensoleillement donnée.

Cependant, lorsque cet état d'esprit se formalise en hypothèse scientifique, nous observons que des résultats originaux et novateurs peuvent être avancés. Les travaux récents adressant la question de la représentation et de la manipulation des propriétés d'ambiance dans le projet en sont un bon exemple, même si les techniques de simulation sous-jacentes restent rudimentaires aux yeux du physicien.

Nous avons introduit dans ce chapitre une formulation intuitive du problème inverse de la simulation d'ensoleillement en posant la question : quelles conditions permettent d'assurer qu'une zone donnée de l'espace du projet vérifie une qualification d'ensoleillement donnée pour une période temporelle donnée ?

Nous précisons au prochain chapitre les éléments de cette question et nous tentons de formaliser logiquement le problème sous-jacent, indépendamment de toute finalité architecturale. Nous introduisons pour ce faire la notion de *proposition d'ensoleillement* et nous définissons la pyramide complexe d'ensoleillement associée à la proposition, préfigurée par certaines méthodes géométriques inverses exposées dans ce chapitre.

## Références bibliographiques du chapitre

**Achard P., Gicquel R.** (Edited by) 1986 — European Passive Solar Handbook (Preliminary Edition), Commission of the European Communities DG XII, Bruxelles (Belgique), 287 p.

**Adolphe L.** 1991 — L'aide à la décision technique dans la conception architecturale, Thèse de Doctorat, École des Mines de Paris (France), 217 p.

**Adolphe L.** 1994 — A Computer Aided Learning Integration System for Architectural Engineering Education : the CALIN Project, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1222-1227

**Augenbroe G., Nederlof L., Rombouts W., Voorden (Van der) M., Vries (de) P.** 1993 — An integrated Urban Solar Design Tool, in Proceedings of the Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy), pp. 295-298

**CRMAA** 1979 — Le Girasol : hauteur et azimut du soleil pour toutes les latitudes, construction et applications, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 55 p.

**CSTB** 1991 — Eclairage naturel et artificiel dans le bâtiment, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Division Eclairage et Colorimétrie, Nantes (France), 68 p.

**Demers C-M-H., Hawkes D-U.** 1994 — The Image as a Tool for Composition, Light as Generator of Space, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1155-1160

**Demers C-M-H., Hawkes D-U.** 1996 — Images of Light, an Approach to Space Generation from Lights, in Proceedings of the Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany), pp. 382-385

**Gero J.S., D'Cruz N., Radford A.D.** 1983 — Energy in Context : a Multi-criteria Model for Building Design, Building and Environment, Vol. 18, n°3, pp. 99-107

**Khemplani L.** 1995 — GENWIN : A Generative Computer Tool for Window Design in Energy-Conscious Architecture, Building and Environment, Vol. 30, n°1, pp. 73-81

**Lassance G.** 1996 — Drawing Out Daylighting Intentions, Forms and Devices from Architectural Precedents, in Proceedings of the Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany), pp. 262-265

**Mahdavi A., Berberidou-Kallivoka L.** 1995 — A Generative Simulation Tool for Architectural Lighting, in Proceedings of the Fourth International Conference on Building Simulation, Madison, Wisconsin (USA), pp. 395-402

**Malkawi A-M.** 1995 — Simulation and Reasoning : Intelligent Building Thermal Problem Detection, in Proceedings of the Fourth International Conference on Building Simulation, Madison, Wisconsin (USA), pp. 176-182

**Morel N., Citherlet S., Faist A., Forte E., Marchand B.** 1994 — BatMan, A Computer Aided Learning Module for Architecture Students, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1241-1246

**Mudri L.** 1994 — Structure dynamique de critères pour l'éclairage naturel et son impact sur l'énergétique pour un outil d'enseignement du projet en architecture, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1143-1148

**Palomo E., Marco J.** 1993 — The Pertinence and Limitations of Different Statistical Tools for Empirical Model Validation Purposes, in Proceedings of the Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy), pp. 330-333

**Peuportier B., Blanc Sommereux I.** 1991 — COMFIE : A Software for Passive Solar Design, in Proceedings of the International Conference on Building Simulation, Sophia-Antipolis (France), pp. 521-527

**Radford A-D., Gero J-S.** 1979 — On the Design of Windows, Environment and Planning B, Vol. 6, pp. 41-45

**Rogora A., Scudo G.** 1996 — Proposal for a Light Language in Architectural Planning, in Proceedings of the Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany), pp. 294-296

**Schoeneman C., Dorsey J., Smits B., Arvo J., Greenberg D.** 1993 — Painting with Light, in Computer Graphics Proceedings (Annual Conference Series), Anaheim, California (USA), pp. 143-146

**Shaviv E., Yezioro A., Capeluto I-G., Kalay Y-E.** 1996 — Simulations and Knowledge Based CAAD Systems for Passive and Low Energy Architecture, Energy and Buildings, Vol. 23, n°3, p. 257

**Silvestrini G., Cacopardi S.** 1993 — Use of an Expert System for Passive Cooling Building Design, in Proceedings of the Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy), pp. 358-360

**Siret D.** 1996 — Sunlighting Design : an Inverse Approach of Simulation for CAD Tools, in : Santo H.P. (Ed.), Advances in Computer-Aided-Design (Proceedings of CADEX'96, Hagenberg, Autriche), IEEE Computer Society Press, Los Alamitos California (USA), pp. 32-40

**Stevens G.** 1990 — The Reasoning Architect : Mathematics and Science in Design, McGraw-Hill International Editions, New-York (USA), 362 p.

**Twarowski M.** 1967 — Soleil et architecture, Dunod, Paris (France), 175 p.

# Chapitre 4

## Formalisation des problèmes d'ensoleillement, Solution du problème inverse

« (...) Qui, de nous ou de la lumière, connaît le mieux la géométrie ? »

(A propos de la relativité générale)

G. Lochak, *La géométrisation de la physique*, Flammarion (Paris), 1994

« (...) Nous ne sommes pas capables de descendre par l'imagination plus bas que par la sensation. (...) Nous ne pouvons plus penser que mathématiquement ; du fait même de la défaillance de l'imagination sensible, nous passons donc sur le plan de la pensée pure où les objets n'ont de réalité que dans leurs relations. Voilà donc bien une borne humaine du réel imaginé, autrement dit, une limite à la détermination imagée du réel. »

G. Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, PUF (Paris), 1934  
(Réédition 1994)

## Introduction

Au contraire des approches de simulation directe qui permettent l'exposition de propriétés d'ensoleillement, l'approche inverse adresse le problème de la réalisation de ces propriétés. Si l'on considère qu'une telle propriété décrit l'état d'ensoleillement d'une zone de l'espace donnée pour une plage temporelle donnée, le problème inverse est alors celui de la détermination des conditions pour lesquelles une zone donnée peut vérifier un état d'ensoleillement donné pour une plage temporelle donnée. C'est sur cette formulation intuitive que nous avons positionné le problème au chapitre précédent.

Nous avons constaté qu'aucune méthode ne résout ce problème même si certaines apportent des solutions partielles. L'approche que nous exposons dans ce chapitre et le suivant constitue donc une innovation. Du seul point de vue formel cependant, cette approche aurait pu être mise en oeuvre depuis plusieurs années. Nous aimons à cet égard nous rappeler l'introduction trop modeste que J. Dourgnon et al. (1961) donnaient à leur fascicule sur les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement :

*« Les problèmes que le mouvement du soleil pose aux architectes et aux urbanistes et en particulier le problème des ombres portées, ont été retournés dans tous les sens par les générations d'esprits ingénieux. La seule initiative qui nous reste est celle du choix des méthodes de détermination les mieux appropriées. »*

A notre tour donc de montrer qu'il est possible de retourner le problème dans un sens nouveau et radical : le sens inverse.

Pour ce faire, nous allons dans ce chapitre donner une formalisation générale des problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses. Cette formalisation s'appuie sur ce que nous appelons la géométrie de l'ensoleillement que nous définissons dans une première section. Cette géométrie recouvre les notions caractéristiques de la description des phénomènes d'ensoleillement, c'est-à-dire des interactions géométriques entre la lumière directe et les objets d'un environnement localisé. Nous introduisons en particulier la notion de pyramide complexe d'ensoleillement qui représente un volume quelconque de rayons solaires et dont nous verrons qu'elle constitue le coeur de tous les problèmes d'ensoleillement.

Munis de cette géométrie, nous exposons dans la seconde section une interprétation nouvelle des problèmes de simulation directe de l'ensoleillement présentés au chapitre 2. Nous constatons que ces problèmes peuvent tous être représentés, et parfois résolus, par l'expression d'une intersection entre une pyramide complexe d'ensoleillement et les objets d'une scène. Ce résultat confirme, selon nous, l'intérêt d'une formalisation spécifique.

Enfin, dans la troisième section, nous posons et nous formalisons le problème de la simulation inverse en nous appuyant sur la notion de proposition d'enseillement. Nous définissons cette notion comme l'unité nécessaire et suffisante pour représenter une intention d'enseillement dans un contexte de conception. Nous exposons les solutions géométriques d'une proposition d'enseillement comme des transformations élémentaires de la scène dans laquelle elle est définie, par obstruction et par évidement. Nous introduisons les notions de halo caractéristique d'une solution et de solution duale d'une proposition. En dernier lieu, nous étudions la composition de propositions élémentaires et la partition de l'espace qu'elles induisent.

Outre ceux que nous définirons dans le corps de l'exposé, nous utilisons dans ce chapitre les symboles suivants dont nous rappelons la signification :

$\{x, \dots\}$	Ensemble des $x$ tels que ...
$\forall x$	Quel que soit $x$
$\cup$	Union booléenne
$\cap$	Intersection booléenne
$\Leftrightarrow$	Équivalence logique
$\Rightarrow$	Implication logique
$\neg$	Négation logique
$ $	Ou logique (non exclusif)
$\wedge$	Et logique
$\in$	Appartient à
$\notin$	N'appartient pas à

## 4.1 Géométrie de l'enseillement

Pour une localisation terrestre donnée, les phénomènes d'enseillement sont généralement décrits comme les états d'enseillement des points d'un espace euclidien muni d'une dimension temporelle. C'est sous cette forme générale que nous avons présenté les résultats des méthodes de simulation directe au chapitre 2. Du point de vue pratique, ce niveau d'expression suffit généralement à faire comprendre les méthodes utilisées — à quelques approximations scientifiques près — et à décrire les résultats obtenus. Dans une perspective de formalisation, il apparaît cependant utile de nous munir de notions spécifiques définissant plus précisément et plus rigoureusement les entités mises en jeu et leurs relations. C'est cette ambition qui justifie la géométrie de l'enseillement que nous proposons ici.

La géométrie de l'enseillement met en oeuvre l'ensemble de la géométrie euclidienne complétée de plusieurs notions caractéristiques de la description des phénomènes d'enseillement. Ces notions peuvent être regroupées en trois catégories :

- celles relatives à l'espace d'enseillement (instants, plages temporelles, points matériels, scène et transformations élémentaires de la scène),
- celles représentant les phénomènes géométriques spatio-temporels de l'enseillement (rayons solaires et pyramides d'enseillement),
- celles décrivant les états d'enseillement dans l'espace et dans le temps.

Ce sont ces notions que nous définissons dans cette section et que nous utilisons aussi rigoureusement que possible tout au long de ce chapitre. Nous verrons qu'elles offrent un cadre général et homogène pour la représentation de tous les problèmes d'enseillement, qu'ils soient directs ou inverses.

### 4.1.1 Espace d'enseillement

#### 4.1.1.1 Instants et directions solaires apparentes

Les phénomènes d'enseillement sont périodiques et leur période est égale à l'année solaire, si l'on définit celle-ci comme la demi-année nécessaire et suffisante pour décrire le mouvement symétrique du soleil sur l'année civile (cf. § 2.1.1.2). L'année solaire est donc l'intervalle temporel nécessaire et suffisant pour décrire l'ensemble des phénomènes d'enseillement en un point terrestre quelconque.

Soit  $D_\lambda$  l'ensemble des directions apparentes du soleil au long de l'année solaire à la latitude terrestre  $\lambda$ . Nous appelons instant  $t$  un élément quel-

conque de  $D_\lambda$  c'est-à-dire une direction apparente du soleil à la latitude  $\lambda$ . La représentation géométrique de  $t$  est un vecteur de  $\mathfrak{R}^3$ .

Notons que, hormis les cas particuliers des solstices d'hiver et d'été, un instant  $t$  de  $D_\lambda$  représente toujours deux instants symétriques de l'année civile pour lesquels les phénomènes d'ensoleillement sont identiques, donc redondants du point de vue de la description.

#### 4.1.1.2 Plage temporelle, hypothèse de continuité

Nous définissons une plage temporelle  $T$  comme un ensemble continu d'instant  $t$  de  $D_\lambda$ . Cette définition n'est possible qu'au prix d'une hypothèse de continuité des trajectoires solaires apparentes sur la dimension annuelle de l'année solaire.

En effet, nous savons que les trajectoires apparentes du soleil sur la voûte céleste sont représentées par un ensemble d'arcs de cercles discrets, définissant chacun une journée (cf. § 2.1.1.2). Dans cette représentation, la continuité temporelle d'une journée à l'autre n'est pas associée à une continuité géométrique d'un arc à l'autre (nous avons montré que les arcs sont une approximation d'une spirale représentant la déclinaison réelle du soleil).

L'hypothèse de continuité temporelle consiste à « grossir » les trajectoires solaires apparentes de telle manière qu'elles définissent un ensemble  $D_\lambda$  géométriquement continu. Il existe alors des instants de  $D_\lambda$  qui ne représentent aucun instant de l'année solaire, c'est-à-dire qui n'ont pas de signification temporelle réelle à la latitude  $\lambda$ . Par contre, toute plage temporelle  $T$  peut alors être considérée comme un sous-ensemble continu de  $D_\lambda$ .

#### 4.1.1.3 Espace d'ensoleillement

Nous appelons espace d'ensoleillement  $E_\lambda$  l'espace euclidien  $\mathfrak{R}^3$  muni de l'ensemble continu des directions apparentes du soleil à la latitude  $\lambda$ , c'est à dire de la plage temporelle  $D_\lambda$  définissant l'année solaire à la latitude  $\lambda$ .

#### 4.1.1.4 Point matériel, volume matériel, scène et englobant d'une scène

Tout point  $p$  de l'espace  $E_\lambda$  possède par définition un état binaire, matériel ou non matériel. Un ensemble continu de points de l'espace  $E_\lambda$  constitue un volume que nous notons  $V$ . Un volume de points matériels est un volume matériel (respectivement non matériel). Un ensemble quelconque de volumes matériels est une scène de l'espace  $E_\lambda$  que nous notons  $S$ . Le complémentaire de  $S$  est l'ensemble des volumes non matériels de l'espace  $E_\lambda$ .

A toute scène  $S$  nous associons un englobant  $G(S)$  représenté comme une surface quelconque, fermée et continue, définissant un intérieur et un extérieur à la scène. De manière plus rigoureuse,  $G(S)$  représente la frontière

d'une boule fermée, au sens topologique, « plongée » dans l'espace  $E_\lambda$ . Tous les points matériels de  $S$  sont strictement intérieurs à  $G(S)$ . Une représentation géométrique pratique de  $G(S)$  est une sphère.

#### 4.1.1.5 Transformations élémentaires

Dans l'espace d'ensoleillement  $E_\lambda$ , nous définissons deux transformations élémentaires d'une scène  $S$  : l'évidement et l'obstruction.

L'évidement de la scène  $S$  par un volume  $V$  consiste à transformer tous les points matériels de  $S$  contenus dans  $V$  en points non matériels. Nous notons cette transformation :  $S \leftarrow S - V$ .

L'obstruction de la scène  $S$  par un volume  $V$  consiste à transformer tous les points non matériels de  $S$  contenus dans  $V$  en points matériels. Nous notons cette transformation :  $S \leftarrow S + V$ . L'obstruction consiste donc à ajouter le volume matériel  $V$  à la scène  $S$ .

Pratiquement, ces deux transformations peuvent toujours être ramenées aux opérations booléennes équivalentes sur des volumes définis, soit respectivement : la différence et l'union.

### 4.1.2 Entités géométriques élémentaires

#### 4.1.2.2 Rayon solaire

On appelle rayon solaire et on note  $R(p, t)$  une demi-droite de l'espace d'ensoleillement, d'origine  $p$  et de direction l'instant  $t$ ,  $p$  et  $t$  étant quelconques dans l'espace  $E_\lambda$ . On note  $R(p, -t)$  le rayon solaire de sens opposé.

Nous posons qu'un rayon solaire qui coupe la scène  $S$  ne coupe pas l'englobant  $G(S)$ . A contrario, nous posons qu'un rayon solaire qui ne coupe pas la scène  $S$  coupe l'englobant  $G(S)$ .

#### 4.1.2.3 Pyramide complexe d'ensoleillement

Soit  $P$  un ensemble continu de points de l'espace  $E_\lambda$  et  $T$  une plage temporelle de cet espace. Nous définissons la pyramide complexe d'ensoleillement associée à  $P$  et à  $T$ , et nous notons  $\prod(P, T)$ , l'ensemble des rayons solaires  $R(p, t)$  définis lorsque  $p$  décrit  $P$  et lorsque  $t$  décrit  $T$ , soit :

$$\prod(P, T) = \{R(p, t), p \in P, t \in T\}$$

Notons qu'en vertu de l'hypothèse de continuité temporelle que nous avons faite sur  $T$ , la pyramide complexe  $\prod(P, T)$  est un ensemble continu de rayons solaires, c'est-à-dire un volume de l'espace d'ensoleillement  $E_\lambda$ .

Selon la définition des rayons solaires, une pyramide d'enseillement dont tous les rayons coupent la scène  $S$  ne coupe pas l'englobant  $G(S)$ . A contrario, une pyramide dont aucun rayon ne coupe la scène  $S$  coupe l'englobant  $G(S)$ . Dans les autres cas, un sous-ensemble des rayons de la pyramide coupe la scène  $S$  et son complémentaire coupe l'englobant  $G(S)$ .

#### 4.1.2.4 Pyramide simple et prisme d'enseillement

Nous appelons pyramide simple d'enseillement et nous notons  $\pi(p, T)$  une pyramide complexe d'enseillement définie pour un ensemble  $P$  réduit à un point  $p$  de l'espace  $E_\lambda$  soit (figure 4.1) :

$$\pi(p, T) = \{R(p, t), t \in T\}$$

Symétriquement, nous appelons prisme d'enseillement et nous notons  $\varpi(P, t)$  une pyramide complexe d'enseillement définie pour une plage temporelle  $T$  réduite à un instant  $t$  de l'espace  $E_\lambda$  soit (figure 4.1) :

$$\varpi(P, t) = \{R(p, t), p \in P\}$$

Nous obtenons alors deux extensions de la définition d'une pyramide complexe d'enseillement  $\prod(P, T)$  :

$$\prod(P, T) = \{\pi(p, T), p \in P\} = \{\varpi(P, t), t \in T\}$$

Du point de vue géométrique, la pyramide complexe peut être considérée comme un volume de l'espace  $E_\lambda$ . Ainsi en est-il nécessairement de la pyramide simple. La pyramide complexe représente donc l'union booléenne de l'ensemble des pyramides simples  $\pi(p, T)$  en chaque point  $p$  de  $P$ . Le même raisonnement peut être appliqué avec le prisme d'enseillement, d'où :

$$\prod(P, T) = \bigcup_{p \in P} \pi(p, T) = \bigcup_{t \in T} \varpi(P, t)$$

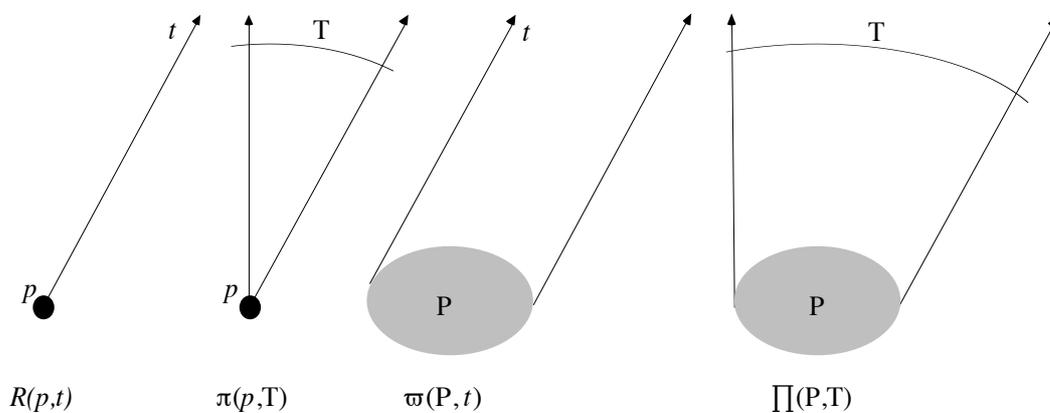


Figure 4.1. Entités géométriques de l'espace d'enseillement

### 4.1.3 États d'ensoleillement

#### 4.1.3.1 Définition

Soit  $P$  un ensemble de points de l'espace  $E_\lambda$  et  $T$  une plage temporelle du même espace. Nous définissons l'état d'ensoleillement de  $P$  pendant  $T$  et nous notons  $\sigma(P, T)$  le réel de l'intervalle  $[0, 1]$  représentant l'ensoleillement moyen de l'ensemble des points de  $P$  pour l'ensemble des instants de  $T$ .

Nous appelons états d'ensoleillement élémentaires les bornes de l'intervalle  $[0, 1]$ . Nous notons à *l'ombre* la borne 0 et *au soleil* la borne 1.

#### 4.1.3.2 États d'ensoleillement d'un point $p$ en un instant $t$

Un point  $p$  est *au soleil* à l'instant  $t$  si et seulement si il n'existe pas de point matériel de  $E_\lambda$  élément du rayon solaire  $R(p, t)$ . Autrement dit, le point  $p$  est *au soleil* à l'instant  $t$  si et seulement si le rayon solaire  $R(p, t)$  ne coupe pas la scène  $S$ , soit :

$$\sigma(p, t) = \text{au soleil} \Leftrightarrow R(p, t) \cap S = \emptyset$$

Dans le cas contraire, le point  $p$  est à *l'ombre* à l'instant  $t$ , soit :

$$\sigma(p, t) = \text{à l'ombre} \Leftrightarrow R(p, t) \cap S \neq \emptyset$$

Conformément à la définition du rayon solaire (cf. § 4.1.2.2), le point  $p$  est donc à *l'ombre* à l'instant  $t$  si et seulement si le rayon solaire  $R(p, t)$  ne coupe pas l'englobant  $G(S)$  de la scène  $S$ , soit :

$$\sigma(p, t) = \text{à l'ombre} \Leftrightarrow R(p, t) \cap G(S) = \emptyset$$

#### 4.1.3.3 États d'ensoleillement d'un point $p$ pour une plage temporelle $T$

Un point  $p$  de l'espace  $E_\lambda$  est *au soleil* pour la plage temporelle  $T$  si  $p$  est *au soleil* pour chacun des instants  $t$  de  $T$ . Cette condition est vérifiée si aucun des rayons solaires  $R(p, t)$  lorsque  $t$  décrit  $T$  ne coupe la scène  $S$ , c'est-à-dire si et seulement si l'intersection de la pyramide simple  $\pi(p, T)$  et de la scène  $S$  est vide, soit :

$$\sigma(p, T) = \text{au soleil} \Leftrightarrow \pi(p, T) \cap S = \emptyset$$

Dans le cas contraire,  $\sigma(p, T)$  est compris dans l'intervalle  $[0, 1[$ .

De manière symétrique, le point  $p$  est à *l'ombre* pour la plage temporelle  $T$  si et seulement si tous les rayons solaires  $R(p, t)$  lorsque  $t$  décrit  $T$  coupent la scène  $S$ , soit :

$$\sigma(p, T) = \text{à l'ombre} \Leftrightarrow \forall t \in T, R(p, t) \cap S \neq \emptyset$$

Si tous les rayons  $R(p, t)$  coupent la scène  $S$ , alors aucun rayon  $R(p, t)$  ne coupe l'englobant  $G(S)$ . Il en résulte :

$$\sigma(p, T) = \text{\textit{\`a l'ombre}} \Leftrightarrow \pi(p, T) \cap G(S) = \emptyset$$

Si cette seconde condition n'est pas vérifiée,  $\sigma(p, T)$  est compris dans l'intervalle  $]0, 1[$ .

#### 4.1.3.4 États d'ensoleillement d'un ensemble de points $P$ en un instant $t$

En suivant le même raisonnement, il est facile de conclure qu'un ensemble  $P$  continu de points de l'espace  $E_\lambda$  est *au soleil* à l'instant  $t$  si et seulement si l'intersection du prisme d'ensoleillement  $\varpi(P, t)$  et de la scène  $S$  est vide, soit :

$$\sigma(P, t) = \text{\textit{\`a l'ombre}} \Leftrightarrow \varpi(P, t) \cap S = \emptyset$$

Inversement,  $P$  est *\`a l'ombre* à l'instant  $t$  si et seulement si tous les rayons solaires de  $\varpi(P, t)$  coupent la scène  $S$ , c'est-à-dire si aucun des rayons solaires de  $\varpi(P, t)$  ne coupe l'englobant de  $S$ , soit :

$$\sigma(P, t) = \text{\textit{\`a l'ombre}} \Leftrightarrow \forall p \in P, R(p, t) \cap S \neq \emptyset$$

$$\sigma(P, t) = \text{\textit{\`a l'ombre}} \Leftrightarrow \varpi(P, t) \cap G(S) = \emptyset$$

Si aucune de ces deux conditions n'est vérifiée,  $\sigma(P, t)$  est compris dans l'intervalle réel  $]0, 1[$ .

#### 4.1.3.5 États d'ensoleillement d'un ensemble de points $P$ pour une plage $T$

Soient  $P$  un ensemble continu de points de l'espace  $E_\lambda$  et  $T$  une plage temporelle du même espace. Considérant les extensions de la définition de la pyramide complexe d'ensoleillement, nous avons naturellement au vu des résultats précédents :

$$\sigma(P, T) = \text{\textit{\`a l'ombre}} \Leftrightarrow \prod(P, T) \cap S = \emptyset$$

Inversement :

$$\sigma(P, T) = \text{\textit{\`a l'ombre}} \Leftrightarrow \prod(P, T) \cap G(S) = \emptyset$$

Si aucune de ces deux conditions n'est vérifiée,  $\sigma(P, T)$  est compris dans l'intervalle réel  $]0, 1[$ .

Remarquons que de ces deux relations peuvent être extraites toutes les précédentes si l'on considère que la pyramide simple  $\pi(p, T)$ , le prisme d'ensoleillement  $\varpi(P, t)$  et le rayon solaire  $R(p, t)$  sont des formes particulières de la pyramide complexe  $\prod(P, T)$ .

## 4.2 Formalisation des problèmes de simulation directe de l'enseillement

Les problèmes de simulation directe de l'enseillement s'organisent en deux classes qui dépendent d'une modalité de discrétisation de l'espace-temps (cf. section 2.2) : la détermination des ombres propres et portées en un instant (discrétisation du temps) et la détermination des périodes d'enseillement en un point (discrétisation de l'espace). Nous montrons dans cette section que ces problèmes trouvent une traduction générale dans notre formalisme. Qui plus est, nous montrons qu'il est possible de généraliser les notions d'ombre instantanée et de périodes d'enseillement en un point. Les méthodes résolvant ces problèmes apparaissent alors comme des cas particuliers d'un problème général qui s'exprime toujours par l'intersection entre une pyramide complexe et une scène dans un espace d'enseillement.

### 4.2.1 Volumes d'ombre et surfaces d'ombre

#### 4.2.1.1 Ombre d'un point $p$ à un instant $t$

On appelle volume d'ombre d'un point  $p$  pour un instant  $t$  l'ensemble des points  $m$  de l'espace  $E_\lambda$  tels que,  $p$  matériel  $\Rightarrow \sigma(m, t) = 0$  et, réciproquement,  $p$  non matériel  $\Rightarrow \sigma(m, t) = 1$ . Il s'agit donc du rayon solaire  $R(p, -t)$ .

On définit l'ombre  $\Omega(p, t)$  de  $p$  à l'instant  $t$  comme le premier point d'intersection de  $R(p, -t)$  et de la scène  $S$ , c'est-à-dire le point d'intersection dont la distance à l'origine du rayon est minimale (cf. § 2.2.3.3).

#### 4.2.1.2 Ombre d'un ensemble de points $P$ à un instant $t$

Soit  $P$  un ensemble continu de points de l'espace  $E_\lambda$ . Le volume d'ombre de  $P$  à l'instant  $t$  est l'ensemble des volumes d'ombre de tous les points  $p$  de  $P$  à

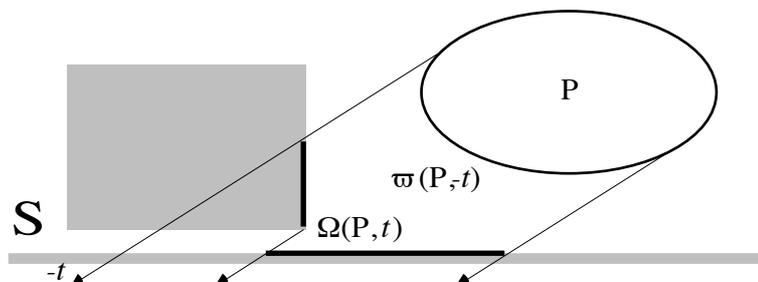


Figure 4.2. Ombre d'un ensemble de points  $P$  à un instant  $t$

l'instant  $t$ , autrement dit, l'ensemble des rayons  $R(p, -t)$ , c'est-à-dire le prisme d'ensoleillement  $\varpi(P, -t)$ .

L'ombre  $\Omega(P, t)$  est alors l'ensemble des premiers points d'intersection de  $\varpi(P, -t)$  et de la scène  $S$ . Ces points définissent un ensemble de surfaces dites surfaces d'ombres de  $P$  à l'instant  $t$  (figure 4.2 page précédente).

Les méthodes directes utilisent entre autres la projection axonométrique pour déterminer ces surfaces d'ombres (cf. § 2.2.3.1). Cette méthode est justifiée par le fait que  $\varpi(P, -t)$  est un prisme.

#### 4.2.1.3 Ombre généralisée d'un point $p$ pour la plage temporelle $T$

L'ombre d'un point ou d'un ensemble de points pour un instant  $t$  est une notion tangible qui correspond à la réalité perçue. Il est possible de généraliser la notion d'ombre en ne considérant plus un instant discret mais une plage temporelle continue. L'ombre  $\Omega(p, T)$  d'un point  $p$  pour la plage temporelle  $T$  est alors l'union de toutes les ombres de  $p$  pour tous les instants de  $T$ , c'est-à-dire la zone d'ombrage recouverte par  $p$  pendant  $T$  (tous les points de  $\Omega(p, T)$  sont à l'ombre de  $p$  pendant au moins un instant de  $T$ ).

Le volume d'ombre de  $p$  pour la plage  $T$  est l'ensemble des rayons  $R(p, -t)$  lorsque  $t$  décrit  $T$ , c'est-à-dire la pyramide simple  $\pi(p, -T)$ . L'ombre  $\Omega(p, T)$  est donc l'ensemble des premiers points d'intersection de la pyramide simple  $\pi(p, -T)$  et de la scène  $S$  (figure 4.3 ci-dessous).

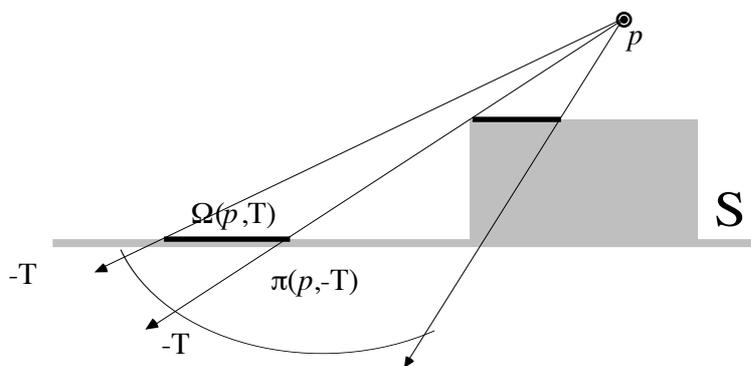


Figure 4.3. Ombre généralisée d'un point  $p$  pour une plage  $T$

#### 4.2.1.4 Ombre généralisée d'un ensemble de points $P$ pour la plage $T$

Suivant le même raisonnement, il est possible de définir l'ombre d'un ensemble de points  $P$  pour une plage temporelle  $T$ , c'est-à-dire l'union de l'ensemble des ombres décrites par  $P$  pour tous les instants de  $T$ , ou encore du point de vue physique, la zone d'ombrage recouverte par  $P$  pendant  $T$ .

Le volume d'ombre de  $P$  pour la plage  $T$  est l'ensemble des rayons  $R(p, -t)$  lorsque  $p$  décrit  $P$  et lorsque  $t$  décrit  $T$ , c'est-à-dire par définition la pyramide complexe d'enseillement  $\Pi(P, -T)$ . L'ombre  $\Omega(P, T)$  est donc l'ensemble des premiers points d'intersection de la pyramide  $\Pi(P, -T)$  et de la scène  $S$  (figure 4.4 ci-dessous).

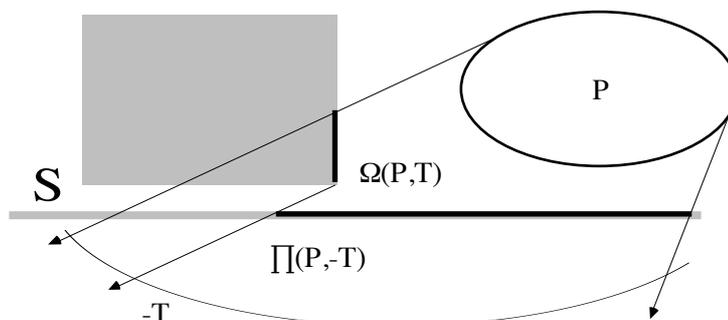


Figure 4.4. Ombre généralisée d'un ensemble  $P$  pour une plage  $T$

Cette expression est générale si l'on considère qu'un rayon solaire, qu'un prisme d'enseillement et qu'une pyramide simple sont des formes particulières de pyramides complexes d'enseillement. Le problème de la détermination des ombres, qu'elles soient simples ou généralisées, peut donc toujours se ramener à un problème d'intersection entre une pyramide complexe et une scène dans un espace d'enseillement.

Notons que dépourvues de la notion de pyramide complexe d'enseillement, les méthodes directes procèdent toutes par itération de résolutions discrètes lorsqu'elles veulent déterminer l'ombre d'un objet au fil du temps (elles utilisent l'expression du prisme d'enseillement). La pyramide complexe apporte une solution continue à ce problème. En contrepartie, elle ne permet pas seule de connaître les états d'enseillement en chaque point de l'ombre qu'elle détermine géométriquement — ce que réalisent en partie les méthodes directes par superposition des ombres instantanées (cf. § 2.3.1.1).

## 4.2.2 Périodes d'enseillement

### 4.2.2.1 Périodes d'enseillement d'un point $p$ pour une plage temporelle $T$

Les méthodes directes déterminent les périodes d'enseillement d'un point discret  $p$  sur l'ensemble de l'année solaire. Elles utilisent pour ce faire divers systèmes de projection en deux dimensions des trajectoires solaires apparentes et des objets d'une scène. Les parties des trajectoires masquées par les objets correspondent aux périodes d'ombrage du point considéré et, in-

versement, les parties des trajectoires visibles correspondent aux périodes d'ensoleillement du point sur l'année solaire (cf. § 2.2.1.2, 2.2.2.2, 2.2.3.2).

Ce problème peut être considéré comme un cas particulier d'un problème plus général : celui de la détermination des périodes d'ensoleillement d'un point  $p$  pour une plage temporelle  $T$  quelconque. Suivant notre formalisation, il s'agit alors de déterminer l'ensemble des plages temporelles  $T'$  incluses dans  $T$  telles que l'intersection de la pyramide simple  $\pi(p, T')$  et de la scène  $S$  soit vide (figure 4.5 ci-dessous).

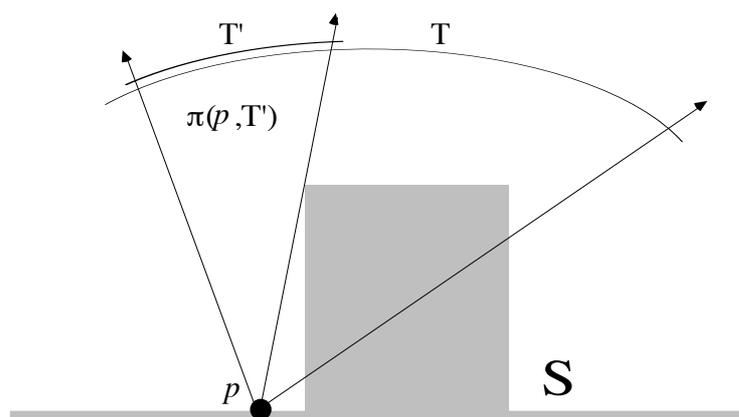


Figure 4.5. Périodes d'ensoleillement d'un point

#### 4.2.2.2 Périodes d'ensoleillement d'un ensemble P pour une plage T

Le résultat précédent peut être généralisé à n'importe quel ensemble  $P$  continu de l'espace d'ensoleillement. Les périodes d'ensoleillement de  $P$  pendant  $T$  représentent alors l'ensemble des plages temporelles  $T'$  incluses

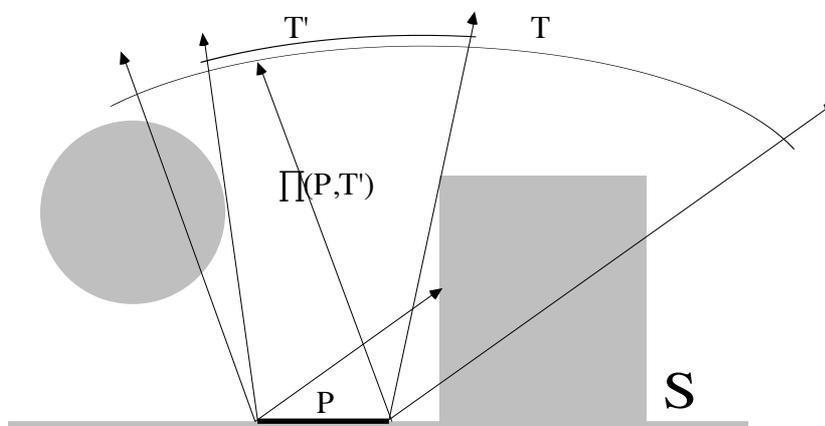


Figure 4.6. Périodes d'ensoleillement d'un ensemble de points

dans  $T$  telles que l'intersection de la pyramide complexe  $\prod(P, T')$  et de la scène  $S$  soit vide. Elles définissent les périodes pour lesquelles tous les points de  $P$  sont *au soleil* pour l'ensemble des instants de  $T$  (figure 4.6 page précédente).

Hormis les méthodes classiques de discrétisation et de projection, il serait possible de délimiter ces périodes en procédant par une subdivision récursive de la plage temporelle  $T$ . Il s'agirait alors de déterminer pour chaque plage  $T'$  réduite, l'existence d'au moins un point d'intersection entre la pyramide  $\prod(P, T')$  et la scène. L'ensemble des plages  $T'$  telles que cette intersection est vide constitue alors une approximation des périodes recherchées. Cette approximation peut être déterminée avec une erreur connue, c'est-à-dire à la profondeur de subdivision souhaitée.

Enfin, ce problème pourrait être généralisé pour un état d'enseillement quelconque. Il s'agirait alors de déterminer les plages temporelles incluses dans  $T$  telles que l'ensemble des points de  $P$  vérifient un état d'enseillement  $S$  donné, soit :  $\sigma(P, T) = S$ . A défaut d'apporter une solution pratique à ce problème, notre formalisation permet au moins de le représenter simplement.

## 4.3 Formalisation du problème inverse

Formellement, les problèmes de simulation directe de l'ensoleillement sont des problèmes d'*exposition* de propriétés d'ensoleillement. Il s'agit de déterminer dans une scène donnée quelles zones de l'espace vérifient quels états d'ensoleillement pour quelles plages temporelles. Le problème inverse, tel que nous l'avons formulé au chapitre précédent, consiste à déterminer les conditions pour lesquelles une zone donnée de l'espace peut vérifier un état d'ensoleillement donné pour une plage temporelle donnée. A l'exposition, nous substituons donc le problème de la *réalisation* d'une propriété d'ensoleillement. Intuitivement, la réalisation d'une propriété appelle des transformations élémentaires, par évidement et par obstruction, de la scène dans laquelle elle est composée. Ce sont ces transformations qui définissent les conditions de sa réalisation et les solutions du problème inverse.

Nous montrons dans cette section que ce problème inverse de l'ensoleillement trouve une expression générale dans notre formalisme. En premier lieu, nous introduisons la notion de proposition d'ensoleillement pour représenter une propriété d'ensoleillement à réaliser, c'est-à-dire, en situation de conception, une intention d'ensoleillement. La forme générale d'une proposition est un triplet  $(P, S, T)$  qui se lit : « P doit être S pendant T », c'est-à-dire « tous les points de P doivent vérifier l'état S pour tous les instants de la plage temporelle T ». A une proposition  $(P, S, T)$  nous associons une pyramide complexe  $\prod(P, T)$  et une valeur de vérité.

En second lieu, nous définissons la notion de solution d'une proposition  $(P, S, T)$  comme une transformation élémentaire de la scène telle que cette proposition devient vraie. Nous donnons une expression de l'ensemble des solutions des propositions élémentaires, c'est-à-dire de type  $(P, \text{au soleil}, T)$  et  $(P, \text{à l'ombre}, T)$ . Il existe une infinité de solutions à ces propositions. Nous montrons que chacune de ces solutions se différencie par son halo caractéristique. Nous introduisons la notion de « solution duale » d'une proposition  $(P, S, T)$ , c'est-à-dire une solution dont le halo caractéristique ne déborde pas l'ensemble des points de P.

En dernier lieu, nous généralisons ces résultats en étudiant la composition de propositions d'ensoleillement élémentaires.

### 4.3.1 Notion de proposition d'ensoleillement

Nous appelons proposition d'ensoleillement l'unité nécessaire et suffisante pour représenter une propriété d'ensoleillement dans un contexte de conception, c'est-à-dire une intention d'ensoleillement. A la différence d'une pro-

priété, une proposition d'enseillement possède une valeur de vérité dans la scène où elle est définie. L'objectif général d'une méthode de simulation inverse de l'enseillement est de rendre vraie une proposition d'enseillement quelconque. Cette vérification, ou réalisation de l'intention, met en jeu la pyramide complexe d'enseillement associée à la proposition.

#### 4.3.1.1 Définition

Nous appelons proposition d'enseillement le triplet  $(P, S, T)$  dans lequel  $P$  représente un ensemble continu de points de l'espace  $E_\lambda$ ,  $T$  une plage temporelle du même espace et  $S$  un état d'enseillement quelconque de l'intervalle  $[0, 1]$ .

#### 4.3.1.2 Pyramide complexe d'enseillement associée

A une proposition d'enseillement quelconque  $(P, S, T)$  nous associons la pyramide complexe d'enseillement  $\prod(P, T)$ . La pyramide  $\prod(P, T)$  représente par définition l'ensemble des rayons solaires  $R(p, t)$  définis lorsque  $p$  décrit  $P$  et lorsque  $t$  décrit  $T$  (cf. § 4.1.2.3).

#### 4.3.1.3 Valeur de vérité d'une proposition d'enseillement

Une proposition d'enseillement  $(P, S, T)$  possède une valeur de vérité caractérisant l'écart entre l'état d'enseillement attendu et l'état d'enseillement effectif de  $P$  pendant  $T$ , c'est-à-dire  $\sigma(P, T)$ . La proposition  $(P, S, T)$  est vraie lorsque  $\sigma(P, T)$  est égal à  $S$  autrement dit, lorsque tous les points de  $P$  vérifient la qualification  $S$  pour l'ensemble des instants de  $T$ .

Nous dirons que la proposition  $(P, S, T)$  est *fausse* si  $S$  et  $\sigma(P, T)$  sont complémentaires dans l'intervalle des états d'enseillement  $[0, 1]$ , c'est-à-dire si : pour  $S \neq \sigma(P, T)$ ,  $S + \sigma(P, T) = 1$ . Dans les autres cas, nous dirons que la proposition  $(P, S, T)$  est *indéterminée*. Remarquons que la proposition  $(P, S, T)$  est fausse si la proposition complémentaire  $(P, S', T)$  est vraie,  $S'$  étant le complémentaire de  $S$  dans  $[0, 1]$ .

### 4.3.2 Solutions d'une proposition d'enseillement

L'objectif général de la simulation inverse de l'enseillement est de rendre vraie une proposition  $(P, S, T)$  quelconque, c'est-à-dire de faire en sorte que l'état d'enseillement  $\sigma(P, T)$  devienne égal à  $S$ . Nous appelons solution d'une proposition d'enseillement  $(P, S, T)$  toute transformation élémentaire de la scène  $S$  telle que  $(P, S, T)$  devient vraie. Ces transformations sont des évidements ou des obstructions définis au § 4.1.1.5. L'ensemble des solutions d'une proposition  $(P, S, T)$  est donc l'ensemble des transformations élémentaires de la scène  $S$  permettant de rendre vraie cette proposition.

Nous décrivons ici les ensembles des solutions des propositions que nous appelons élémentaires — i.e. de type  $(P, \textit{au soleil}, T)$  et  $(P, \textit{à l'ombre}, T)$ . Nous introduisons ensuite deux notions nouvelles : le halo caractéristique d'une solution et les solutions duales d'une proposition élémentaire.

#### 4.3.2.1 Ensemble des solutions d'une proposition de type $(P, \textit{au soleil}, T)$

Une proposition de type  $(P, \textit{au soleil}, T)$  est vraie si  $\sigma(P, T) = 1$ , c'est-à-dire, si et seulement si la pyramide complexe associée ne possède aucun point matériel de l'espace  $E_\lambda$ . Nous avons alors (cf. § 4.1.3.5) :

$$(P, \textit{au soleil}, T) \Leftrightarrow \prod(P, T) \cap S = \emptyset$$

En corollaire, une proposition de type  $(P, \textit{au soleil}, T)$  devient vraie dès lors que l'intersection de la pyramide complexe associée et des objets de la scène est rendue vide. Une solution d'une proposition de type  $(P, \textit{au soleil}, T)$  est donc un évidement de la scène  $S$  par un volume  $V$  tel que  $V$  contient tous les points de  $S \cap \prod(P, T)$ . Une solution de la proposition s'écrit donc :

$$(P, \textit{au soleil}, T) \Rightarrow S \leftarrow S - V \\ V \subset E_\lambda, (\prod(P, T) \cap (S - V) = \emptyset) \Leftrightarrow ((S \cap \prod(P, T)) \subset V)$$

Cette expression représente l'ensemble des solutions de la proposition, c'est-à-dire l'ensemble des évidements de  $S$  par un volume  $V$  contenant l'intersection de  $S$  et de la pyramide  $\prod(P, T)$ . Autrement dit, tous les évidements de  $S$  par un volume  $V$  ainsi défini réalisent la proposition (figure 4.7).

Une proposition d'enseillement  $(P, \textit{au soleil}, T)$  est rendue vraie dès lors que la scène dans laquelle elle est définie est évidée d'au moins l'ensemble

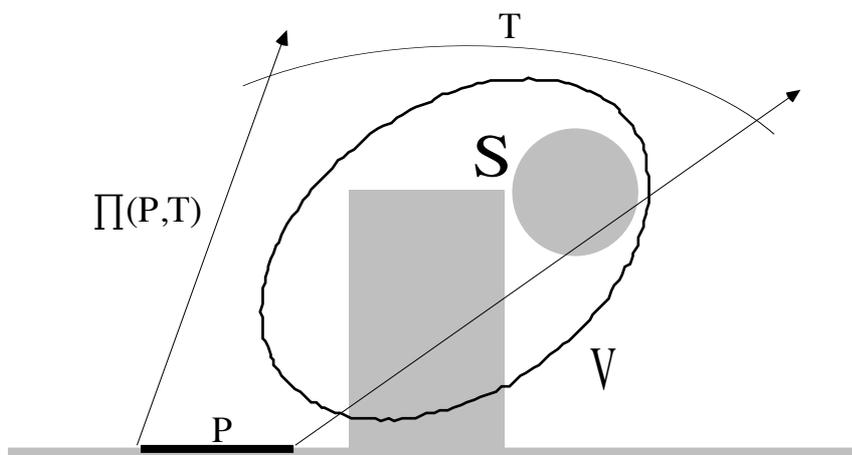


Figure 4.7. L'évidement de  $S$  par  $V$  est solution de la proposition  $(P, \textit{au soleil}, T)$

des points de la pyramide d'ensoleillement associée à la proposition. Ceci s'écrit par la règle d'évidement minimal suivante :

$$\forall (P, S, T), S \leftarrow S - \prod(P, T) \Rightarrow (P, \text{au soleil}, T)$$

Notons que cette règle s'applique quelle que soit la valeur de vérité de la proposition  $(P, \text{au soleil}, T)$  puisque l'évidement ne modifie pas l'état d'un ensemble de points non matériels. Si la proposition est vraie a priori, alors l'évidement de  $S$  par  $\prod(P, T)$  reproduit  $S$ , soit :  $S - \prod(P, T) = S$ .

#### 4.3.2.2 Ensemble des solutions d'une proposition de type $(P, \text{à l'ombre}, T)$

Une proposition de type  $(P, \text{à l'ombre}, T)$  est vraie si  $\sigma(P, T) = 0$ , c'est-à-dire si et seulement si tous les rayons de la pyramide complexe associée rencontrent un point matériel de l'espace  $E_\lambda$  ou encore, si aucun rayon de la pyramide ne coupe l'englobant de la scène. Nous avons alors :

$$(P, \text{à l'ombre}, T) \Leftrightarrow \prod(P, T) \cap G(S) = \emptyset$$

En corollaire, une proposition de type  $(P, \text{à l'ombre}, T)$  devient vraie dès lors qu'il existe un ou plusieurs volumes matériels de la scène  $S$  coupant l'ensemble des rayons solaires de la pyramide. Rendre vraie une proposition de ce type consiste donc à construire ces objets s'ils n'existent pas déjà. Une solution d'une proposition de type  $(P, \text{à l'ombre}, T)$  est alors une obstruction de la scène  $S$  par un volume  $V$  tel que chaque rayon de la pyramide  $\prod(P, T)$  soit coupé par la scène obstruée  $S + V$ , soit (figure 4.8) :

$$\begin{aligned} (P, \text{à l'ombre}, T) &\Rightarrow S \leftarrow S + V \\ V \subset E_\lambda, \prod(P, T) \cap G(S + V) &= \emptyset \end{aligned}$$

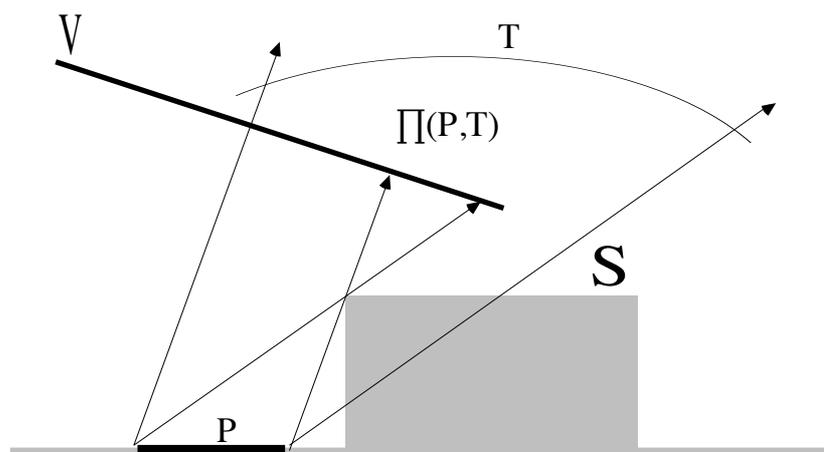


Figure 4.8. L'obstruction de  $S$  par  $V$  est solution de la proposition  $(P, \text{à l'ombre}, T)$

L'expression précédente représente l'ensemble des solutions de la proposition, c'est-à-dire l'ensemble des obstructions de  $S$  par un volume  $V$  tel que l'intersection de  $\prod(P, T)$  et de l'englobant de  $S$  obstruée par  $V$  soit vide. Toutes les obstructions de  $S$  par un volume  $V$  ainsi défini réalisent la proposition ( $P$ , à l'ombre,  $T$ ).

Contrairement aux propositions de type ( $P$ , au soleil,  $T$ ), il n'est pas possible de formuler une règle d'obstruction minimale pour les propositions de type ( $P$ , à l'ombre,  $T$ ). En effet, non seulement il existe une infinité de solutions à ce type de proposition (comme pour les propositions *au soleil*), mais encore, il existe une *infinité de solutions minimales* réalisant la proposition (à la différence des propositions *au soleil*).

Lorsque la proposition ( $P$ , à l'ombre,  $T$ ) est fautive (c'est-à-dire lorsque la proposition complémentaire ( $P$ , au soleil,  $T$ ) est vraie, cf. § 4.3.1.3) alors une solution minimale est une obstruction de la scène par un volume correspondant à l'intersection d'une surface partageant l'espace en deux demi-espaces et de la pyramide  $\prod(P, T)$ . Il existe une infinité de telles solutions comme l'illustre la figure 4.9 ci-dessous.

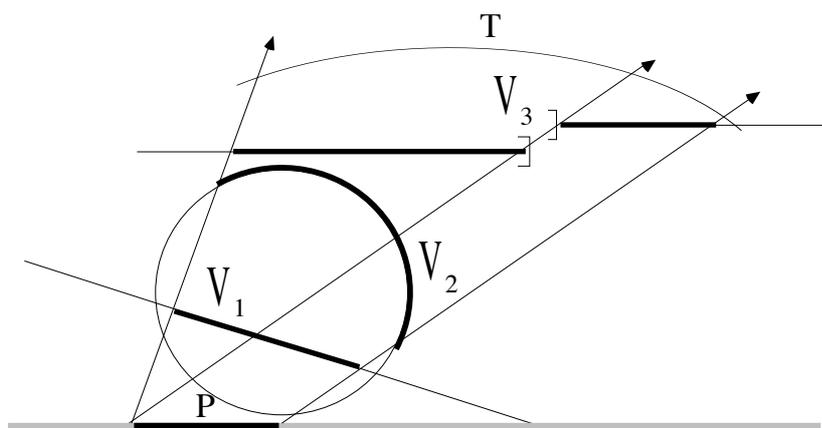


Figure 4.9. Trois solutions minimales d'une proposition ( $P$ , à l'ombre,  $T$ ) fautive

Lorsque la proposition ( $P$ , à l'ombre,  $T$ ) est indéterminée, c'est-à-dire lorsqu'elle n'est ni vraie ni fautive au sens défini au § 4.3.1.3, la détermination d'une solution minimale est rendue plus difficile. Dans ce cas, une telle solution peut être définie comme une solution minimale de la proposition fautive ( $P'$ , à l'ombre,  $T$ ) où  $P'$  est un sous-ensemble des points de  $P$  vérifiant le complémentaire de  $S$  pendant  $T$  (la figure 4.8 page précédente illustre en partie ce cas). L'ensemble  $P'$  correspond au complémentaire dans  $P$  de l'ombre généralisée de l'ensemble de la scène pendant  $T$  (cf. § 4.2.1.4).

#### 4.3.2.3 Halo caractéristique d'une solution d'une proposition

Soit  $(P, S, T)$  une proposition d'ensoleillement élémentaire réalisée par la solution  $V$  (i.e. l'obstruction ou l'évidement de la scène  $S$  par  $V$  rend la proposition vraie). Tous les points de  $P$  vérifient alors  $S$  pour tous les instants de la plage  $T$ . Ceci ne signifie pas que  $P$  représente la tache d'ensoleillement réalisée en chaque instant de  $T$ . Au contraire, si  $T$  n'est pas réduite à un instant,  $P$  n'est jamais réalisée en tant que telle à aucun instant discret de  $T$  puisque  $P$  est réalisée pour l'ensemble des instants de  $T$ .

Cette propriété s'explique plus facilement lorsque l'on considère que si  $P$  est réalisée par  $V$  en chaque instant  $t$  de  $T$ , alors  $P$  est contenue dans l'intersection géométrique de tous les volumes d'ombre décrits par  $V$  lorsque  $t$  décrit  $T$ . Si  $P$  est plan et si la scène  $S$  est réduite au plan de  $P$  (figure 4.10 ci-dessous), alors  $P$  est l'intersection géométrique exacte des surfaces d'ombre  $\Omega(V, t)$  dans le plan de  $P$  lorsque  $t$  décrit  $T$ , soit :

$$P = \bigcap_{t \in T} \Omega(V, t)$$

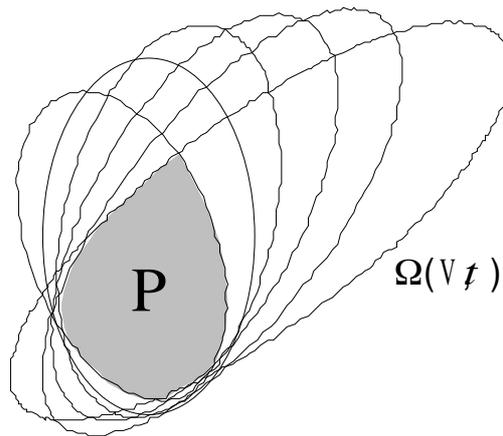


Figure 4.10. Nature géométrique de  $P$

Or, lorsque  $t$  décrit  $T$ , la surface d'ombre  $\Omega(V, t)$  décrit dans la scène  $S$  l'ombre généralisée  $\Omega(V, T)$  (cf. § 4.2.1.4). C'est cette ombre généralisée que nous appelons halo caractéristique  $H(V)$  de la solution  $V$  à la proposition  $(P, S, T)$ . Elle est définie comme l'union de toutes les surfaces d'ombre  $\Omega(V, t)$  lorsque  $t$  décrit  $T$ , soit :

$$H(V) = \bigcup_{t \in T} \Omega(V, t) = \Omega(V, T)$$

Nous savons en outre qu'elle correspond exactement à l'ensemble des premiers points d'intersection de la pyramide complexe  $\Pi(V, -T)$  et de la scène  $S$  (cf. § 4.2.1.4).

Il en résulte que la réalisation d'une proposition quelconque par une solution  $V$  conduit nécessairement à la réalisation du halo caractéristique de cette solution, c'est-à-dire de l'ombre généralisée de  $V$  pendant  $T$ . Ce halo est caractéristique en ce qu'il est différent pour chaque solution, même minimale, de la proposition comme l'illustre la figure 4.11 ci-dessous. Nous verrons que ce halo peut être un élément discriminant pour le choix d'une solution dans l'ensemble des solutions possibles lorsque nous aborderons la mise en oeuvre pratique de notre méthode dans le contexte de la conception architecturale (cf. chapitre 6).

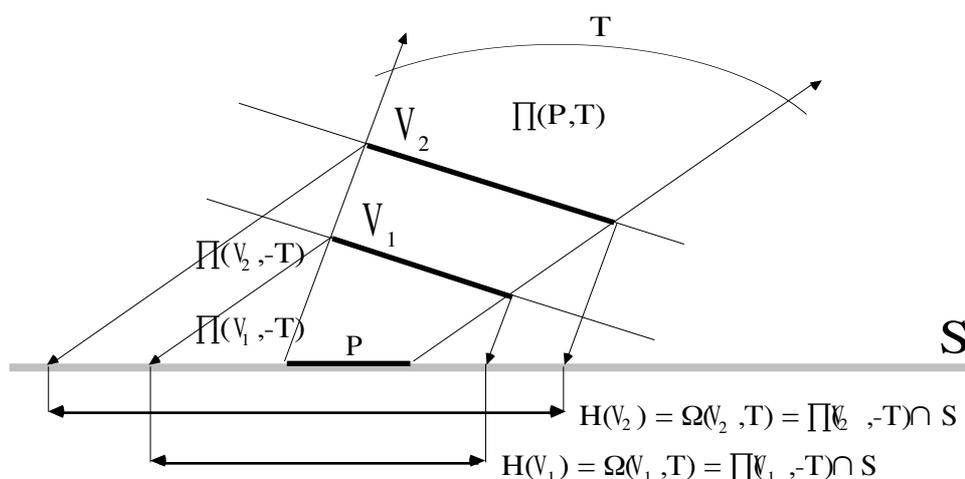


Figure 4.11. Halos caractéristiques de deux solutions d'une même proposition

#### 4.3.2.4 Solutions duales d'une proposition élémentaire

Nous avons défini l'ensemble des solutions des deux types de propositions d'ensoleillement élémentaires ( $P$ , *au soleil*,  $T$ ) et ( $P$ , *à l'ombre*,  $T$ ). Ces solutions réalisent la proposition, c'est-à-dire qu'elles permettent d'assurer que tous les points de  $P$  vérifient l'état  $S$  pour tous les instants de  $T$ .

Nous appelons solution duale de la proposition ( $P$ ,  $S$ ,  $T$ ) une solution permettant d'assurer qu'il existe au moins un point de  $P$  qui vérifie  $S$  pendant  $T$  tout en assurant qu'aucun des points extérieurs à  $P$  ne vérifie  $S$  pendant  $T$ . Plus simplement, une solution duale de ( $P$ ,  $S$ ,  $T$ ) est telle que son halo caractéristique, c'est-à-dire son ombre généralisée pendant  $T$ , ne débord pas  $P$ .

La détermination de l'ensemble des solutions duales d'une proposition rappelle le problème de l'enveloppe solaire d'une parcelle présenté au § 3.1.2.1 du chapitre précédent. Pour qu'une solution soit duale d'une proposition ( $P$ ,  $S$ ,  $T$ ) il faut et il suffit qu'elle appartienne à la pyramide complexe

$\Pi(P, T)$  diminuée en chaque point  $m$  du contour de  $P$  de la pyramide simple  $\pi(m, T)$ . En effet, toute solution d'obstruction ou d'évidement définie par la pyramide ainsi diminuée est telle que son ombre généralisée pendant  $T$  est incluse dans  $P$  (figure 4.12 ci-dessous).

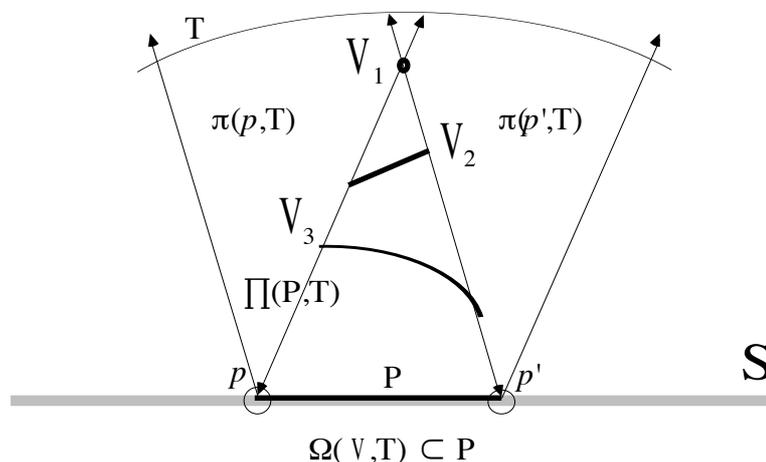


Figure 4.12. Trois solutions duales d'une proposition

Lorsque nous réalisons une proposition  $(P, S, T)$  par une solution duale, nous avons l'assurance que le halo caractéristique de la solution ne déborde pas l'ensemble des points de  $P$ . Cette propriété s'avère souvent importante pour la réalisation de certaines intentions d'ensoleillement. Par contre, nous ne savons pas a priori quelle part de  $P$  est effectivement recouverte par l'ombre généralisée de la solution pendant  $T$ . A fortiori, nous ne connaissons pas non plus la valeur de l'état d'ensoleillement de  $P$  pendant  $T$  —  $\sigma(P, T)$  — dans l'intervalle réel  $]0, 1[$ .

### 4.3.3 Composition de propositions élémentaires

De nombreuses propositions peuvent être composées dans la même scène, à différents moments d'un processus de conception et pour différents objets de cette scène. La composition de ces propositions pose un nouveau problème qui s'énonce de la manière suivante : comment vérifier ensemble  $n$  propositions d'ensoleillement concourantes dans une même scène ? Plus précisément, deux questions corollaires apparaissent : comment assurer que deux propositions ne sont pas incompatibles ? Pour  $n$  propositions compatibles, comment assurer que la solution choisie pour réaliser l'une n'empêche pas la réalisation d'une autre ?

Nous apportons ici une solution à ces problèmes. En premier lieu, nous définissons les conditions d'incompatibilité de deux propositions, qui peuvent

être généralisées à  $n$  en considérant ces propositions deux à deux. Nous étudions ensuite la composition de deux propositions élémentaires compatibles. Nous élargissons enfin ces résultats pour  $n$  propositions.

#### 4.3.3.1 Conditions d'incompatibilité de deux propositions élémentaires

Deux propositions d'enseillement élémentaires du même espace sont incompatibles si la réalisation de l'une empêche la réalisation de l'autre. Elles sont alors nécessairement de types complémentaires.

Soit donc  $(P, \text{au soleil}, T)$  et  $(P', \text{à l'ombre}, T')$  ces deux propositions, ainsi que  $\Pi$  et  $\Pi'$  les pyramides d'enseillement associées. Les propositions sont compatibles si, lorsque leurs plages temporelles  $T$  et  $T'$  ne sont pas disjointes, l'intersection de la pyramide  $\Pi$  et de  $P'$  est vide, soit (figure 4.13 ci-dessous) :

$$(P, \text{au soleil}, T) \& (P', \text{à l'ombre}, T') \Rightarrow [(T \cap T' \neq \emptyset) \Rightarrow (\Pi \cap P' = \emptyset)]$$

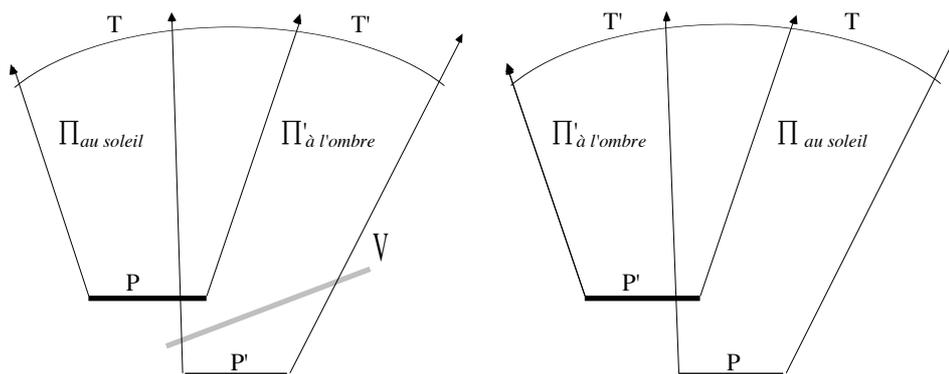


Figure 4.13. Propositions compatibles (à gauche) et incompatibles (à droite)

Dans le cas contraire, il ne peut pas exister de solution à la proposition à l'ombre qui ne soit évidée par la proposition au soleil (nous admettons ce résultat sans le démontrer).

#### 4.3.3.2 Solutions de la composée de deux propositions élémentaires

Soient deux propositions d'enseillement élémentaires compatibles et soit  $(O_1 \wedge O_2)$  la composition de ces deux propositions telle que si  $(O_1 \wedge O_2)$  est vraie, alors les deux propositions sont également vraies.

Si les deux propositions sont de type *au soleil*, alors il est évident que l'ensemble des solutions réalisant  $(O_1 \wedge O_2)$  est l'ensemble des transformations de la scène réalisant à la fois les deux propositions, c'est-à-dire l'ensemble des

évidements de  $S$  par un volume  $V$  contenant l'intersection de chacune des pyramides  $\Pi_1$  et  $\Pi_2$  avec la scène, soit (figure 4.14) :

$$(\text{au soleil})_1 \wedge (\text{au soleil})_2 \Rightarrow S \leftarrow S - (\Pi_1 \cup \Pi_2)$$

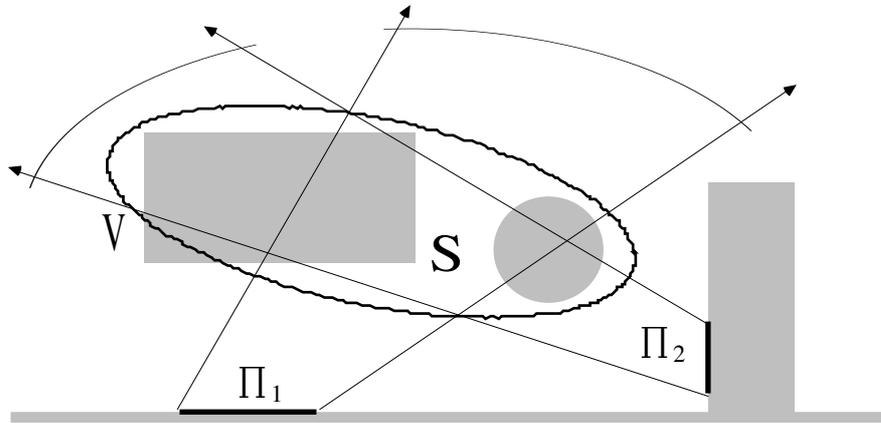


Figure 4.14. Solution de  $(\text{au soleil})_1 \wedge (\text{au soleil})_2$  de type *au soleil*

Si les deux propositions sont de type *à l'ombre*, alors l'ensemble des solutions réalisant à la fois les deux propositions est l'union des deux ensembles de solutions associées à chacune des propositions, soit :

$$\begin{aligned} (\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{à l'ombre})_2 &\Rightarrow S \leftarrow S + V_1 + V_2 \\ (\Pi_1 \cup \Pi_2) \cap G(S + V_1 + V_2) &= \emptyset \end{aligned}$$

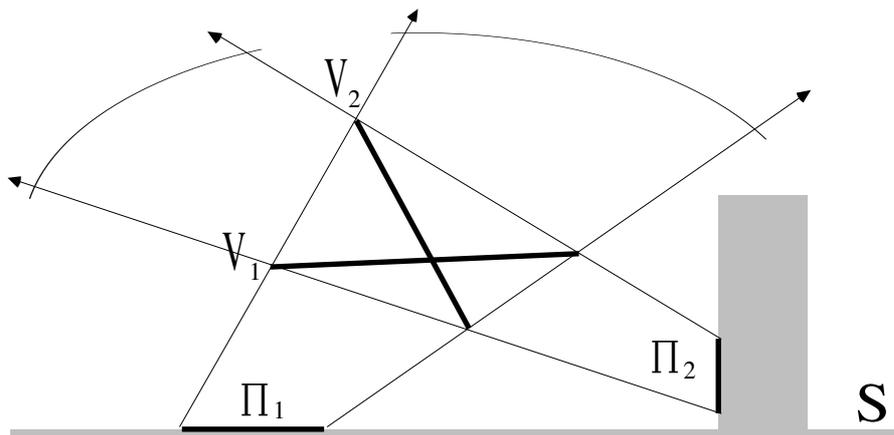


Figure 4.15. Solutions minimales de  $(\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{à l'ombre})_2$  de type *à l'ombre*

Il existe un ensemble d'obstructions particulières réalisant  $(\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{à l'ombre})_2$  : l'ensemble des surfaces coupant en même temps  $\Pi_1$  et  $\Pi_2$ . Ces solutions sont minimales pour la composée  $(\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{à l'ombre})_2$  (figure 4.15 ci-dessus).

Si les deux propositions élémentaires sont de types complémentaires, c'est-à-dire si l'une est de type *au soleil* et l'autre de type *à l'ombre*, alors elles sont réalisées en même temps si et seulement si l'obstruction réalisant la proposition *à l'ombre* n'appartient pas à la pyramide réalisant la proposition *au soleil*, soit :

$$\begin{aligned} (\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{au soleil})_2 &\Rightarrow S \leftarrow S - \Pi_2 + V \\ V \cap \Pi_2 &= \emptyset, \Pi_1 \cap G(S + V) = \emptyset \end{aligned}$$

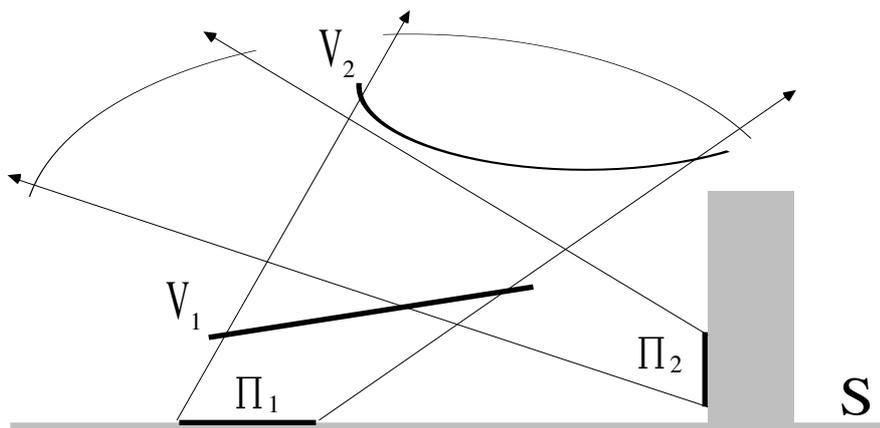


Figure 4.16.  $V_1$  n'est pas solution de  $(\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{au soleil})_2 - V_2$  oui

La figure 4.16 ci-dessus illustre ce cas. Il existe alors des solutions limites à la composition  $(O_1 \wedge O_2)$  qui sont les surfaces frontières de l'intersection des deux pyramides  $\Pi_1$  et  $\Pi_2$ .

#### 4.3.3.3 Partition de l'espace des solutions de $n$ propositions

Soit  $F = \{ (O_1), (O_2), (O_3), \dots, (O_n) \}$  un ensemble de  $n$  propositions d'ensoleillement élémentaires définies dans une même scène  $S$ . Supposons que  $F$  contient  $x$  propositions de type *au soleil* et  $y$  propositions de type *à l'ombre*. Nous pouvons toujours ordonner  $F$  de telle manière que les propositions  $(O_1), (O_2), \dots, (O_x)$  sont *au soleil* tandis que les propositions  $(O_{x+1}), (O_{x+2}), \dots, (O_n)$  sont *à l'ombre*.

En généralisant les résultats obtenus pour deux propositions, nous avons alors l'expression :

$$\begin{aligned} (O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \wedge \dots \wedge O_n) &\Rightarrow S \leftarrow S - \bigcup_{1 \leq i \leq x} \Pi_i + \bigcup_{x < i \leq n} V_i \\ \bigcup_{x < i \leq n} V_i \cap \bigcup_{1 \leq i \leq x} \Pi_i &= \emptyset, \bigcup_{x < i \leq n} \Pi_i \cap G(S + \bigcup_{x < i \leq n} V_i) = \emptyset \end{aligned}$$

Les ensembles des solutions des propositions *à l'ombre* sont donc diminués des évidements réalisant les propositions *au soleil*. L'expression précédente réalise une partition de l'espace d'ensoleillement en deux ensembles de vo-

lumes : d'une part l'ensemble  $\{au\ soleil\}$  des pyramides d'ensoleillement associées aux propositions *au soleil* et définissant les évidements minimaux de la scène nécessaires pour réaliser ces propositions ; d'autre part l'ensemble  $\{à\ l'ombre\}$  qui contient les pyramides nécessaires pour réaliser les propositions *à l'ombre*.

Alors, l'expression des conditions de réalisation de la composition de  $n$  propositions se ramène à l'expression obtenue pour deux, en substituant les pyramides par les ensembles équivalents, soit :

$$\begin{aligned} O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \wedge \dots \wedge O_n &\Rightarrow S \leftarrow S - \{au\ soleil\} + \{V\} \\ \{V\} \cap \{au\ soleil\} &= \emptyset, \{à\ l'ombre\} \cap G(S + \{V\}) = \emptyset \end{aligned}$$

La figure 4.17 ci-dessous illustre cette expression pour trois propositions et montre une solution minimale d'obstruction (en trait fort) réalisant en même temps ces propositions.

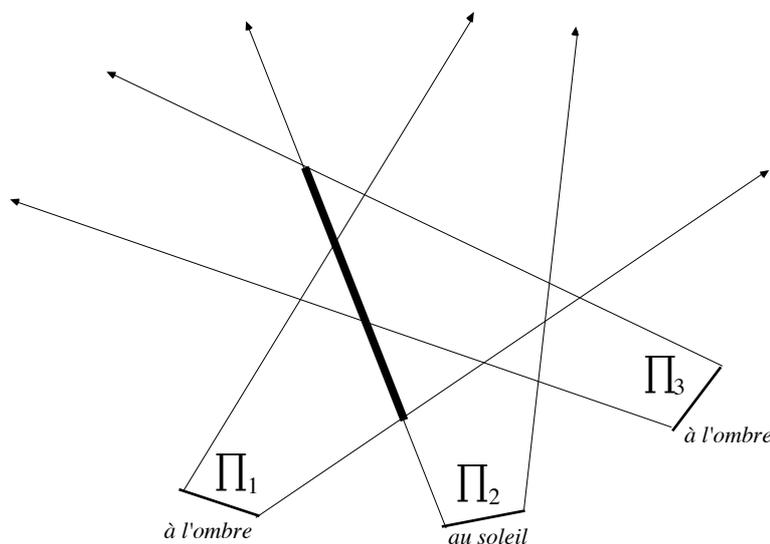


Figure 4.17. Pavage de l'espace et solution minimale de trois propositions élémentaires

Remarquons enfin que dans un processus où les propositions sont formulées et réalisées de manière séquentielle, il est plus facile lorsque cela est possible, de formuler et de réaliser les propositions *au soleil* avant de réaliser les propositions *à l'ombre*, c'est-à-dire d'éviter la scène avant de l'obstruer. Dans le cas contraire, les évidements nécessaires à la réalisation des propositions *au soleil* peuvent induire des modifications sur les solutions des propositions de type *à l'ombre* déjà réalisées.

## Conclusion

A quelles conditions une zone de l'espace donnée peut-elle vérifier une qualification d'ensoleillement donnée pour une plage temporelle donnée ? Transposé dans la géométrie de l'ensoleillement que nous avons définie, le problème de la simulation inverse de l'ensoleillement est représenté par une proposition d'ensoleillement  $(P, S, T)$  et les solutions de cette proposition sont des transformations élémentaires de la scène telles que, dans la scène transformée, tous les points de  $P$  vérifient l'état  $S$  pour tous les instants de  $T$ . En pratique, ces transformations s'expriment par des opérations booléennes entre les objets de la scène et une entité géométrique fondamentale de l'espace d'ensoleillement : la pyramide complexe d'ensoleillement  $\Pi(P, T)$ .

Nous avons donné dans ce chapitre une expression des ensembles de solutions des propositions élémentaires et nous avons montré que chacune de ces solutions peut être caractérisée par son ombre généralisée, ou halo caractéristique, pendant la plage temporelle de la proposition. Nous avons en outre proposé une représentation simple des solutions duales d'une proposition  $(P, S, T)$ , c'est-à-dire les transformations de la scène dont le halo caractéristique ne déborde pas  $P$ .

La géométrie de l'ensoleillement fournit donc un cadre homogène et rigoureux pour exprimer notre problème. En réalité, cette géométrie recouvre tous les problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses. Si nous généralisons la notion de proposition d'ensoleillement  $(P, S, T)$ , nous pouvons définir un *modèle de l'ensoleillement* représentant *tous* les problèmes qu'il est possible de poser à propos de l'ensoleillement dans une scène donnée. Ce modèle est défini par les quatre états du triplet  $(P, S, T)$  donnés dans le tableau ci-dessous. A chacun des problèmes représentés par ces états, nous pouvons associer une méthode de résolution. Ces méthodes s'expriment toujours par une intersection entre une pyramide complexe et la scène.

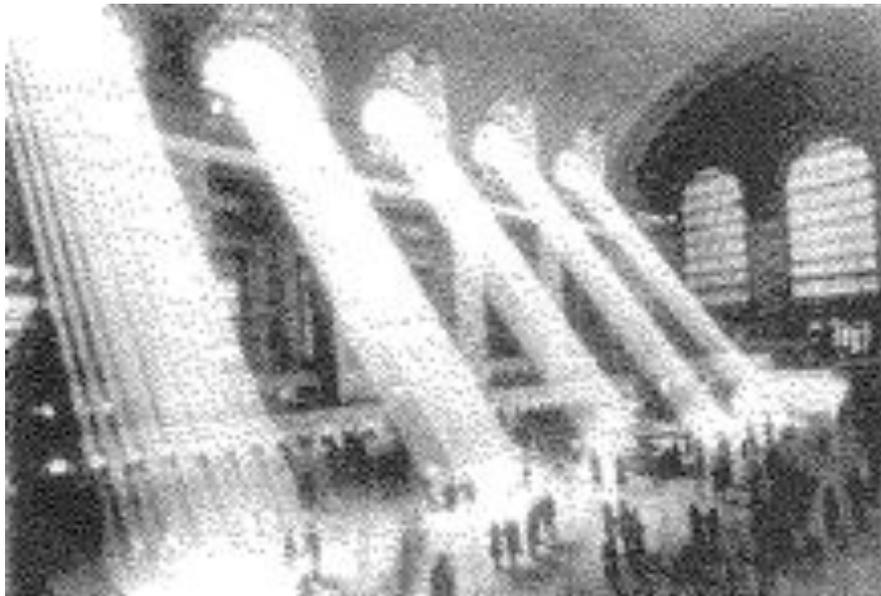
$(?, S, T)$	Déterminer l'ensemble des points de la scène vérifiant $S$ pour $T$ . Méthode : ombre généralisée $\Omega(P, T)$ (cf. § 4.2.1.4).
$(P, S, ?)$	Déterminer l'ensemble des périodes pendant lesquelles $P$ vérifie $S$ . Méthode : périodes d'ensoleillement (cf. § 4.2.2.2).
$(P, ?, T)$	Déterminer les états d'ensoleillement de $P$ pendant $T$ , i.e. $\sigma(P, T)$ . Méthode : croisement des résultats des méthodes précédentes.
$(P, S, T)$	Déterminer les conditions pour lesquelles $P$ vérifie $S$ pendant $T$ . Méthode : simulation inverse (cf. § 4.3.2).

Ce modèle est déclaratif en ce qu'il offre un langage capable de spécifier des inconnues et des méthodes capables de déterminer ces inconnues. Il est possible d'y adjoindre l'opérateur de composition défini au § 4.3.3. Son intérêt dans un système d'aide à la conception en architecture apparaît alors clairement. Dans une scène structurée définissant le projet en cours de conception, toutes les propositions énoncées à propos de l'ensoleillement doivent pouvoir être comprises par le système et représentées par l'un des états du modèle. Toutes les réponses à ces propositions peuvent être déterminées par les méthodes du modèle. Ces méthodes se ramènent toutes au calcul des surfaces ou volumes d'intersection entre une pyramide d'ensoleillement et les objets de la scène.

Au total, la géométrie de l'ensoleillement offre un support général et homogène de formalisation et de résolution des problèmes d'ensoleillement par l'intermédiaire de la notion de pyramide complexe d'ensoleillement. La détermination géométrique de la frontière de ce volume constitue donc le point central de la mise en oeuvre de cette géométrie. Ce problème n'est pas trivial, du moins pour nous. Nous y apportons une solution partielle dans le prochain chapitre en donnant une méthode de détermination de la frontière géométrique d'une pyramide complexe à base plane.

## Chapitre 5

### Interprétation géométrique Détermination de la frontière d'une pyramide d'ensoleillement



(Collection Hulton-Deutsch)

« Désormais l'espace en soi et le temps en soi devront disparaître pour faire place à une sorte d'union des deux qui seule subsistera »

H. Minkowski, *Espace et Temps*, 1908  
Cité par S. Giedon, *Espace, Temps, Architecture*, Ed. Denoël (Paris), 1978

## Introduction

La géométrie de l'enseillement met principalement à contribution la notion de pyramide complexe d'enseillement. Ce volume de rayons solaires représente un artefact géométrique effectuant, métaphoriquement, la transition de l'espace vers le temps. Il permet de formaliser et de résoudre tous les problèmes d'enseillement, qu'ils soient directs ou inverses.

Nous proposons dans ce chapitre une interprétation géométrique de ces résultats en donnant une méthode de détermination de la frontière d'une pyramide complexe d'enseillement. La détermination de cette frontière, dans le cas général, n'est pas un problème trivial. La solution que nous apportons ici ne résout qu'un cas restrictif de ce problème : celui des pyramides à base polygonale plane. Ce cas s'avère cependant suffisant pour nos besoins en conception architecturale.

Ce chapitre est organisé en trois sections. La première constitue l'exposé de notre méthode et contient un ensemble de démonstrations géométriques nécessaires à sa compréhension. Nous adressons d'abord le problème de la détermination de la pyramide complexe dans le cas où  $P$  est convexe. Dans ce cas, nous montrons que toutes les sections de la pyramide  $\Pi(P, T)$  par un plan parallèle au plan de  $P$  partagent une même structure géométrique que nous décrivons. Cette propriété est caractéristique des sommes de Minkowski que nous utilisons après en avoir brièvement rappelé la nature. Elle permet de reconstruire la frontière extérieure de la pyramide à partir d'une seule section de cette pyramide dans le cas où  $P$  est convexe. Nous pouvons en dernier lieu généraliser ce résultat à toutes les configurations de  $P$  plan et à certaines configurations de volumes de l'espace pour lesquelles notre méthode peut être appliquée.

La seconde section explicite la mise en oeuvre pratique de cette méthode pour la détermination de la frontière d'une pyramide d'enseillement à base plane rectangulaire. Nous détaillons étape par étape les opérations nécessaires à cette construction. Ce sont ces opérations qu'effectue le logiciel *Solimac* que nous présenterons dans le prochain chapitre.

La troisième section regroupe plusieurs vérifications géométriques de notre méthode. Ces vérifications nous permettent de conclure sur l'exactitude de nos résultats. Elles sont également l'occasion d'illustrer en pratique certaines notions de géométrie de l'enseillement définies de manière abstraite au chapitre précédent : la notion de halo caractéristique d'une solution et celle de solution duale d'une proposition élémentaire. Nous présentons également le cas de la composition de deux propositions.

## 5.1 Frontière géométrique de $\prod(P, T)$

Nous proposons dans cette section une méthode de détermination de la frontière d'une pyramide complexe d'ensoleillement  $\prod(P, T)$  lorsque  $P$  est un polygone plan de l'espace  $E_\lambda$ .

Notre exposé suit deux étapes. En premier lieu, nous réduisons le problème à deux dimensions en considérant une section d'une pyramide complexe  $\prod(P, T)$  par un plan  $Q$  parallèle au plan de  $P$ . Cette section est un polygone du plan  $Q$ . Nous montrons qu'il est possible de construire ce polygone par une somme de Minkowski faisant intervenir des projections de  $P$  et de  $T$ .

En second lieu, nous observons une propriété fondamentale de la pyramide complexe lorsque  $P$  est convexe. Dans ce cas, toutes les sections de  $\prod(P, T)$  par des plans  $Q$  parallèles au plan de  $P$  possèdent une même structure que nous décrivons. Nous utilisons cette propriété pour reconstituer la frontière de la pyramide à base convexe par la donnée de l'une de ses sections.

Nous pouvons généraliser ce résultat pour la détermination de la frontière d'une pyramide  $\prod(P, T)$  de base  $P$  plane quelconque. Conformément à la définition de la pyramide comme volume de rayons solaires (cf. § 4.1.2.3), si  $M_n$  est un pavage de  $P$  en  $n$  éléments convexes  $m_i$ , alors la pyramide  $\prod(P, T)$  peut être définie comme l'union des pyramides  $\prod(m_i, T)$ , soit :

$$\prod(P, T) = \bigcup_{m_i \in M_n} \prod(m_i, T)$$

Cette expression permet de reconstituer la frontière de n'importe quelle pyramide complexe à base plane dès lors que nous savons déterminer cette frontière pour une pyramide à base plane convexe. Nous étudions en dernier lieu quelques cas particuliers remarquables de  $\prod(P, T)$  et nous proposons une extension de notre méthode aux volumes polyédriques de l'espace.

### 5.1.1 Somme et différence de Minkowski

Ces opérations ensemblistes sont utilisées en morphologie mathématique où elles définissent les transformations générales « en tout ou rien » par dilatation et par érosion (Serra 1982, Coster & Chermant 1989). Nous en rappelons ici brièvement la nature et certaines propriétés.

#### 5.1.1.1 Somme de Minkowski

Soient  $X$  et  $Y$  deux ensembles quelconques de l'espace euclidien  $\mathfrak{R}^n$ . A tout point  $x$  de  $X$  et  $y$  de  $Y$  on peut faire correspondre la somme géométrique :

$x + y$ . Lorsque  $x$  et  $y$  décrivent respectivement  $X$  et  $Y$ , le point  $x + y$  décrit un ensemble noté  $X \oplus Y$  et appelé somme de Minkowski, soit :

$$X \oplus Y = \{x + y, x \in X, y \in Y\}$$

De manière équivalente, nous avons :

$$X \oplus Y = \bigcup_{x \in X} Y_x = \bigcup_{y \in Y} X_y$$

où  $Y_x$  désigne l'ensemble  $Y$  translaté de  $x$  et  $X_y$  désigne l'ensemble  $X$  translaté de  $y$ . La somme  $X \oplus Y$  représente donc l'union, lorsque  $x$  décrit  $X$ , des ensembles  $Y_x$  déduits de  $Y$  dans la translation  $x$  et, respectivement, l'union des ensembles  $X_y$  déduits de  $X$  dans la translation  $y$ . La figure 5.1 ci-dessous illustre le résultat de cette opération pour deux ensembles de points de  $\mathbb{R}^2$  définissant un triangle et un carré.

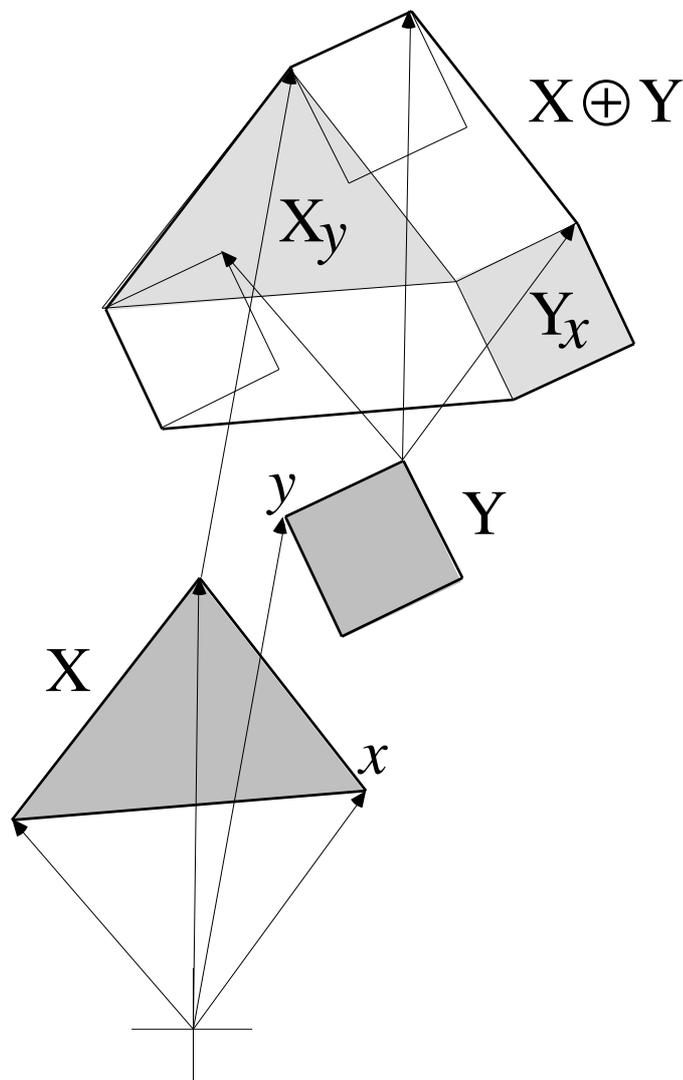


Figure 5.1. Somme de Minkowski des ensembles  $X$  et  $Y$

Soit  $c$  le centre du repère absolu de l'espace et  $Y_c$  l'ensemble  $Y$  centré en  $c$  (en morphologie mathématique,  $Y_c$  est appelé *élément structurant*). La somme de Minkowski  $X \oplus Y$  est alors définie géométriquement comme l'ensemble des points de l'espace décrits par  $Y$  centré en  $c$  lorsque  $c$  décrit l'ensemble des points de  $X$ , soit (figure 5.2 ci-dessous) :

$$X \oplus Y = \bigcup_{c \in X} Y_c$$

On a de manière équivalente :

$$X \oplus Y = \bigcup_{c \in Y} X_c$$

La forme de l'ensemble résultant est invariante par translation de  $X$  ou de  $Y$  et donc indépendante du repère absolu choisi (Serra 1982). En outre, elle est compatible avec les homothéties (i.e.  $h.(X \oplus Y) = h.X \oplus h.Y$ ). Il est donc

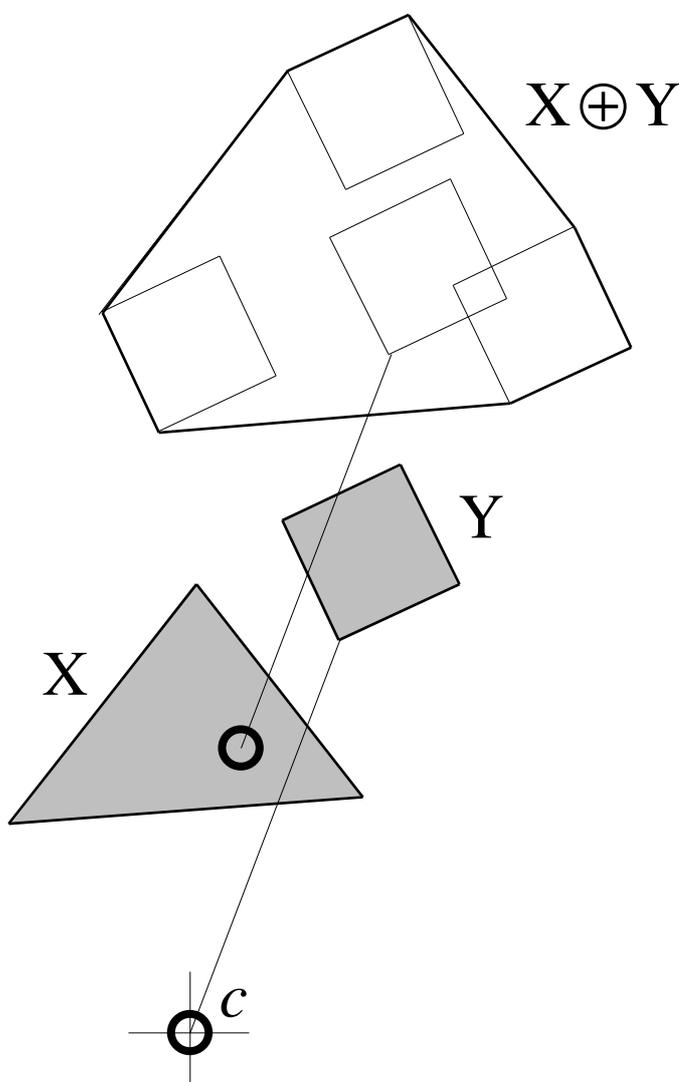


Figure 5.2. Représentation géométrique de  $X \oplus Y$

possible d'utiliser une notation symbolique comme celle de la figure 5.3 ci-dessous pour représenter cette opération :

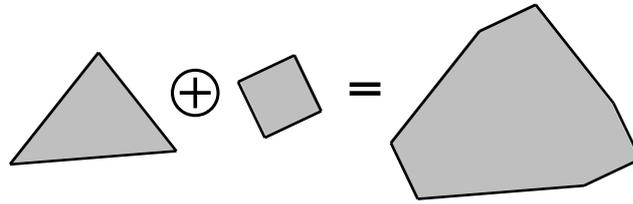


Figure 5.3. Notation symbolique de la somme de Minkowski

### 5.1.1.2 Différence de Minkowski

De la même manière, on définit la différence de Minkowski comme l'intersection, lorsque  $y$  décrit  $Y$ , des ensembles  $X_y$  déduits de  $X$  dans la translation  $y$ . Si l'on définit l'élément structurant  $X_c$  centré en  $c$ , nous avons alors l'expression (figure 5.4 page suivante) :

$$X \ominus Y = \bigcap_{c \in Y} X_c$$

### 5.1.2 Détermination d'une section de $\prod(P, T)$ par $Q // P$

Soit  $(P, S, T)$  une proposition d'ensoleillement à base polygonale  $P$  plane et  $\prod(P, T)$  la pyramide complexe associée. Soit  $Q$  un plan quelconque strictement parallèle au plan de  $P$ . Nous montrons dans ce paragraphe que la section polygonale  $S(Q)$  de  $\prod(P, T)$  par  $Q$  peut être construite par une somme de Minkowski.

Rappelons (§ 4.1.2.4) que la pyramide complexe  $\prod(P, T)$  peut être définie comme l'union des pyramides simples  $\pi(p, T)$  lorsque  $p$  décrit  $P$ , soit :

$$\prod(P, T) = \bigcup_{p \in P} \pi(p, T)$$

Soit  $T'_p$  le polygone résultant de la section de  $\pi(p, T)$  par le plan  $Q$ . La relation précédente nous permet de définir le polygone  $S(Q)$  comme l'union des polygones  $T'_p$  lorsque  $p$  décrit  $P$ , ce qui s'écrit :

$$S(Q) = \bigcup_{p \in P} T'_p$$

Considérons une pyramide simple  $\pi(p, T)$  définie pour un point  $p$  de  $P$  et une droite  $D$  orthogonale au plan de  $P$  passant par  $p$ . La droite  $D$  coupe le plan  $Q$  en un point  $p'$ . Soit  $T'_{p'}$  le polygone  $T'_p$  centré en  $p'$  dans  $S(Q)$ .

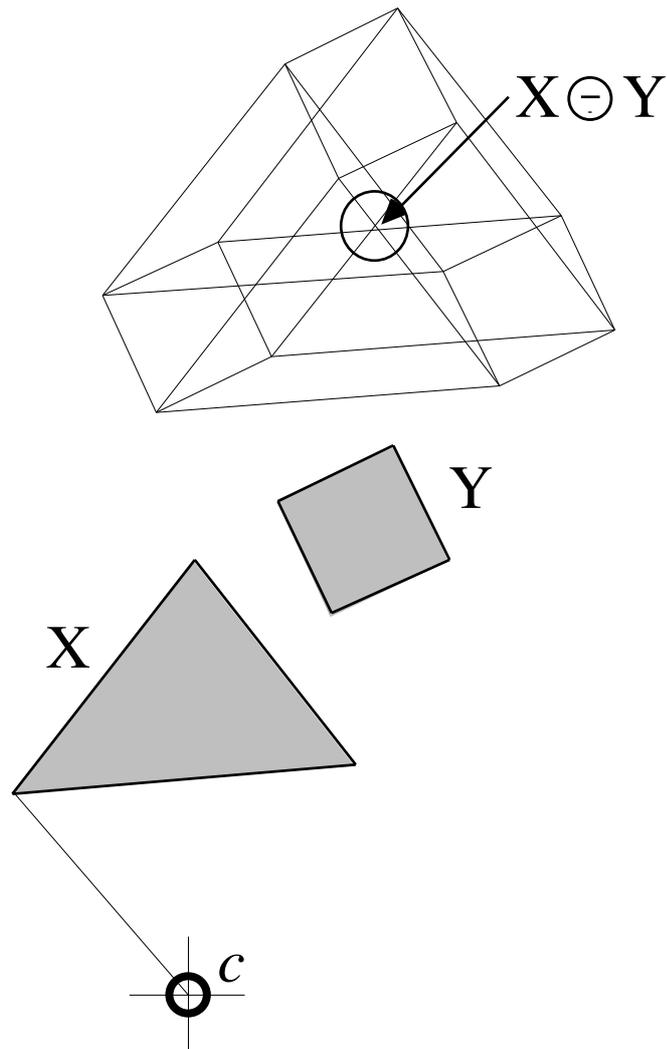


Figure 5.4. Différence de Minkowski de X et Y

Lorsque  $p$  décrit  $P$  :

- la pyramide simple  $\pi(p, T)$  décrit la pyramide complexe  $\coprod(P, T)$ ,
- le polygone  $T'_{p'}$  décrit la section  $S(Q)$ ,
- le point  $p'$  décrit dans le plan  $Q$  un polygone  $P'$  égal à  $P$  à la translation  $(p, p')$  près (figure 5.5 page suivante).

Nous avons donc dans le plan  $Q$  :

$$S(Q) = \bigcup_{p' \in P'} T'_{p'}$$

Or  $T'$  est invariant par translation dans le plan  $Q$  puisque toutes les pyramides simples  $\pi(p, T)$  sont égales. La relation précédente représente donc la somme de Minkowski de  $P'$  et de  $T'$  centré en  $p'$ , soit :

$$S(Q) = P' \oplus T'_{p'}$$

**Interprétation géométrique, frontière d'une pyramide d'ensoleillement**

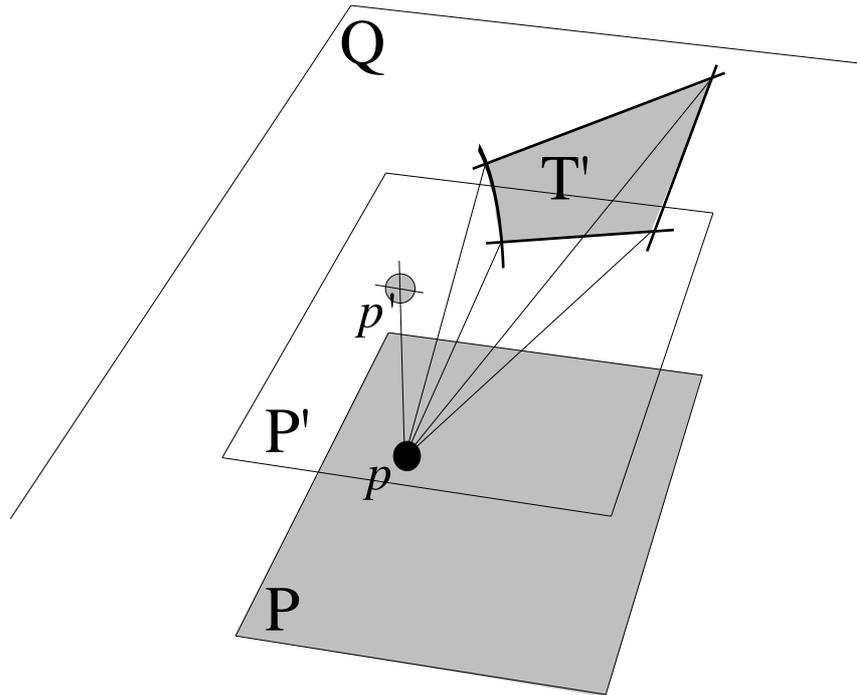


Figure 5.5.  $T'$  centré en  $p'$  décrit  $P'$  lorsque  $p$  décrit  $P$

Cette relation est indépendante du point  $p$  de  $P$  choisi. Autrement dit, quel que soit  $p$  appartenant à  $P$ , la section  $S(Q)$  est définie comme l'ensemble des points décrits par  $T'$  centré en  $p'$  lorsque  $p'$  décrit  $P'$ . La figure 5.6 ci-dessous illustre ce résultat.

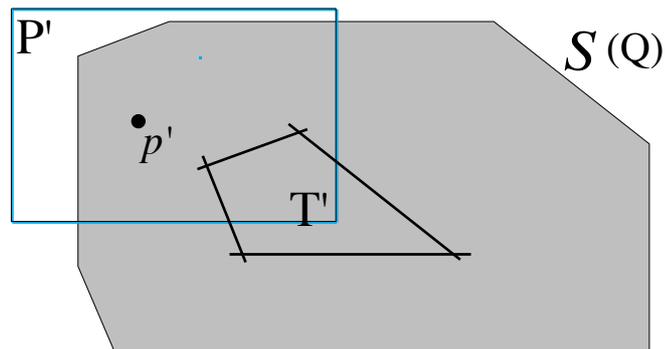


Figure 5.6. Le polygone  $S(Q)$  est la somme de  $P$  et de  $T'$

Or, d'après la définition de la somme de Minkowski,  $S(Q)$  peut être représentée symétriquement comme l'ensemble des points décrits par  $P'$  centré en  $p'$  lorsque  $p'$  décrit  $T'$ . Nous avons alors :

$$S(Q) = \bigcup_{p' \in T'} P'_{p'}$$

Cette relation nous est connue. Elle représente la définition de la pyramide complexe  $\prod(P, T)$  comme l'union des prismes d'enseillement  $\varpi(P, t)$  lorsque  $t$  décrit  $T$ , soit (cf. § 4.1.2.4) :

$$\prod(P, T) = \bigcup_{t \in T} \varpi(P, t)$$

$P'$  centré en  $p'$  représente alors la section du prisme  $\varpi(P, t)$  par le plan  $Q$ . Lorsque  $t$  décrit  $T$ , le prisme d'enseillement  $\varpi(P, t)$  décrit la pyramide complexe  $\prod(P, T)$ , le polygone  $P'$  centré en  $p'$  décrit le polygone  $S(Q)$  tandis que le point  $p'$  décrit le polygone  $T'_p$  puisque le rayon  $R(p, t)$  décrit la pyramide simple  $\pi(p, T)$ , comme l'illustre la figure 5.7 ci-dessous.

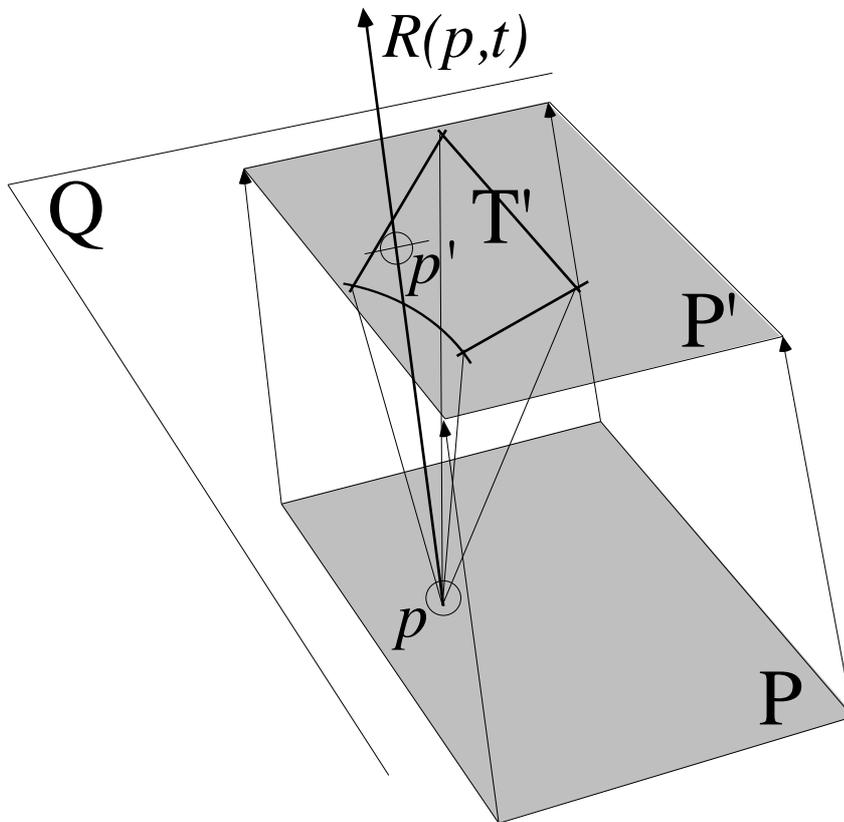


Figure 5.7.  $P'$  centré en  $p'$  décrit  $T'$  lorsque  $t$  décrit  $T$

Nous retrouvons par la somme  $P' \oplus T'$  les deux extensions de la définition de la pyramide  $\prod(P, T)$ . Nous avons donc de manière générale :

$$\forall Q // P, \forall p \in P, \forall t \in T, \prod(P, T) \cap Q = (\varpi(P, t) \cap Q) \oplus (\pi(p, T) \cap Q)$$

$P$  et  $T$  étant des polygones plans, leur somme de Minkowski est calculable et la section  $S(Q)$  peut être déterminée géométriquement.

**Interprétation géométrique, frontière d'une pyramide d'enseillement**

### 5.1.3 Frontière de $\Pi(P, T)$ lorsque $P$ est convexe

Les relations précédentes nous donnent une définition géométrique de la section de  $\Pi(P, T)$  par un plan  $Q$  parallèle à  $P$ . Nous allons montrer dans ce paragraphe que lorsque  $P$  est convexe, et seulement dans ce cas, une section  $S(Q)$  unique détermine complètement la frontière de la pyramide  $\Pi(P, T)$ .

#### 5.1.3.1 Structure d'une section $S(Q)$ lorsque $P$ est convexe

Soit  $\Pi(P, T)$  une pyramide d'enseillement à base  $P$  plane convexe et  $Q$  un plan strictement parallèle au plan de  $P$ . Soit  $S(Q)$  l'intersection de  $\Pi(P, T)$  et de  $Q$  et  $p$  un point de  $P$ . Si  $P'$  est le polygone  $P$  translaté orthogonalement dans  $Q$ ,  $p'$  le point  $p$  translaté orthogonalement dans  $Q$ , et  $T'$  l'intersection de  $\pi(p, T)$  et de  $Q$ , alors nous avons dans le plan  $Q$  d'origine absolue  $p'$  :

$$S(Q) = P' \oplus T'$$

Si  $P$  est convexe alors, par définition de la convexité, il n'existe pas deux points  $a$  et  $b$  de  $P'$  tels que le segment  $[a, b]$  coupe le contour extérieur de  $P'$ . Il en résulte que le contour extérieur du polygone  $S(Q)$  est complètement défini lorsque  $T'$  centré en  $p'$  décrit le contour extérieur de  $P'$ .

Désignons par  $C$  le contour extérieur de  $P'$ . Le contour extérieur du polygone  $S(Q)$  est alors défini lorsque  $T'$  décrit chaque arête  $a$  de  $C$  (i.e. lorsque  $p'$  décrit tous les points de  $a$ ). Pour chacune de ces arêtes, il existe au moins un point de  $T'$  tel que la distance de ce point à l'arête  $a$  soit maximale — si nous comptons la distance d'un point à une arête positivement si ce point est à l'extérieur de l'arête et négativement sinon. Désignons par  $t'_a$  ce point. Lorsque  $T'$  décrit l'arête  $a$ , alors  $t'_a$  décrit nécessairement une arête  $a'$ , identique à l'arête  $a$  à la translation  $(p', t'_a)$  près (figure 5.8 page suivante).

Ceci est vrai pour chaque arête  $a$  de  $P'$  convexe. Il en résulte que le contour extérieur du polygone  $S(Q)$  possède une structure particulière que nous pouvons décrire comme suit :

- d'une part, ce contour contient toutes les arêtes  $a$  de  $P'$ , à une translation près pour chacune de ces arêtes,
- d'autre part, ces arêtes sont dissociées, en chaque sommet  $s$  de  $P'$ , par des ensembles d'arêtes qui ne dépendent que de  $T'$ .

Cette structure est vérifiée quel que soit le plan  $Q$  parallèle au plan de  $P$ . Les polygones  $S(Q)$  ne sont donc pas homothétiques entre eux mais, quel que soit le plan  $Q$ , le contour de  $S(Q)$  est tel que : d'une part les arêtes translattées de  $P$  sont conservées (puisque  $P'$  est égal à  $P$  à une translation près), d'autre part les arêtes intermédiaires en chaque sommet  $s$  de  $P$  sont homothétiques entre elles (puisque elles ne dépendent que de  $T'$  — toutes les sections  $T'$  de la pyramide simple  $\pi(s, T)$  étant par ailleurs homothétiques entre elles).

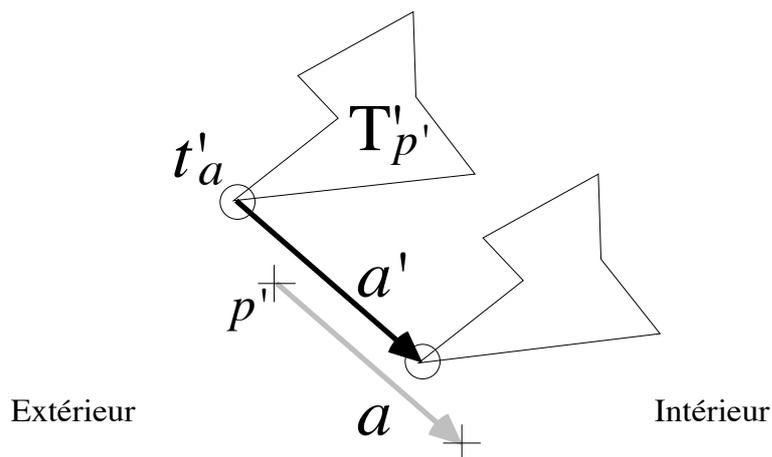


Figure 5.8. Déplacement de  $T'_{p'}$  sur l'arête  $a$

La figure 5.9 ci-dessous illustre ces propriétés. Nous observons la conservation des arêtes de  $P$  et l'homothétie des arêtes issues de  $T'$  dans deux sections  $S(Q_1)$  et  $S(Q_2)$  d'une même pyramide  $\Pi(P, T)$ . Cependant, les sections  $S(Q_1)$  et  $S(Q_2)$  ne sont pas homothétiques entre elles.

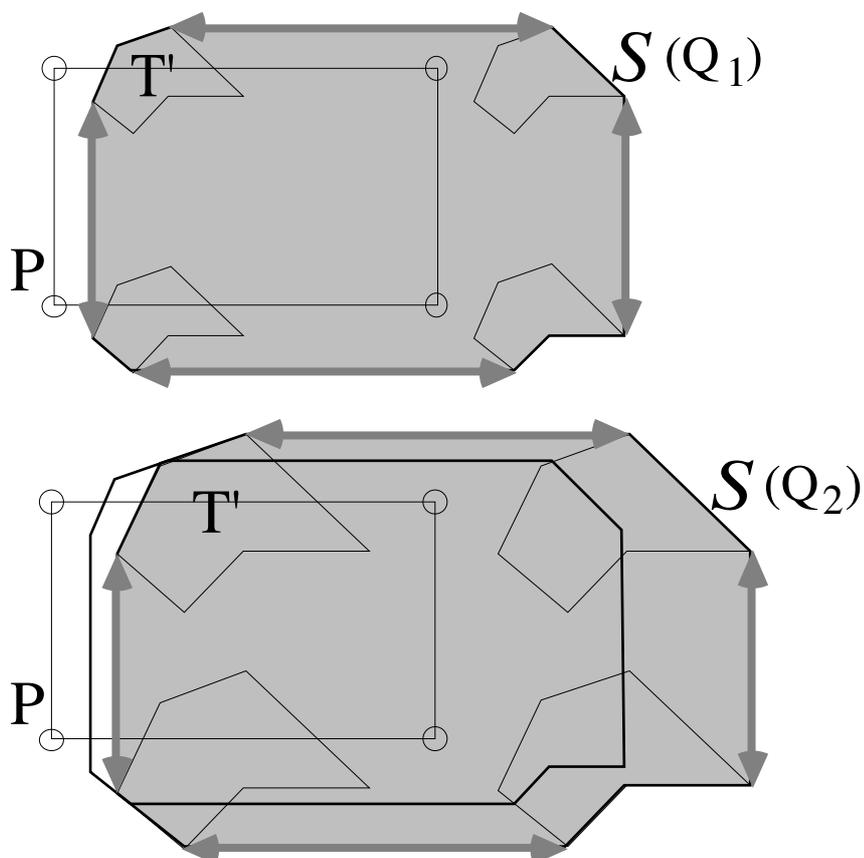


Figure 5.9. Deux sections parallèles d'une même pyramide

### 5.1.3.2 Construction de la frontière de $\mathbb{I}(P, T)$ lorsque $P$ est convexe

Lorsque  $P$  est convexe, la structure d'un contour  $S(Q)$  quelconque (quel que soit  $Q$  strictement parallèle au plan de  $P$ ) permet de reconstituer la frontière de la pyramide complexe  $\mathbb{I}(P, T)$ , c'est-à-dire de déterminer l'ensemble des rayons extérieurs de  $\mathbb{I}(P, T)$  en chaque point du contour de  $P$ .

Pour ce faire, il suffit de considérer séparément les arêtes et les sommets de  $P$ . Nous savons que chaque arête  $a$  de  $P$  est translatée en  $a'$  dans  $S(Q)$ . Le couple d'arêtes  $(a, a')$  détermine donc le plan balayé par les rayons extérieurs de  $\mathbb{I}(P, T)$  le long de la droite support de  $a$ . Ce plan est parfaitement défini par les deux rayons  $R(a_1, a'_1)$  et  $R(a_2, a'_2)$  si  $a_1$  et  $a_2$  sont les extrémités de  $a$ , et  $a'_1$  et  $a'_2$  celles de  $a'$  dans  $S(Q)$  (figure 5.10 ci-dessous).

Deux arêtes  $a$  et  $b$  de  $P$  ont une extrémité commune qui définit un sommet  $s$  de  $P$ . En ce sommet, nous savons que les rayons extérieurs de  $\mathbb{I}(P, T)$  forment un sous-ensemble des rayons de  $\pi(s, T)$ . Ils sont complètement définis par l'ensemble des demi-droites d'origine  $s$  et de direction  $sq$  si  $q$  est un sommet de  $S(Q)$  compris entre les arêtes  $a'$  et  $b'$  images dans  $S(Q)$  des arêtes  $a$  et  $b$  de  $P$  (figure 5.10).

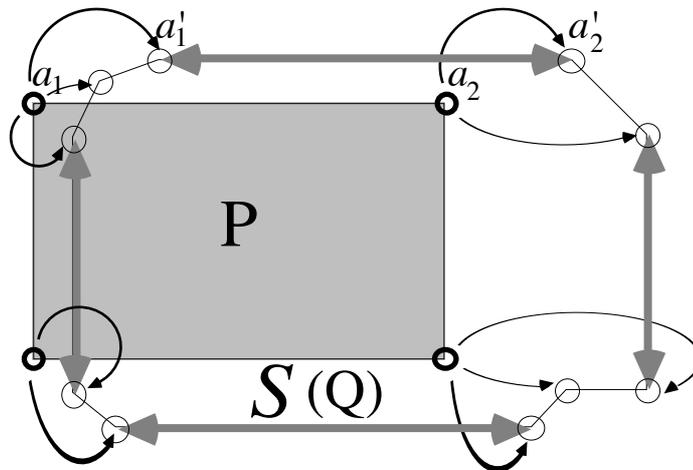


Figure 5.10. Relations entre les sommets de  $P$  et ceux de  $S(Q)$

### 5.1.3.3 Limites de $\mathbb{I}(P, T)$

Une conséquence intéressante de la structure de  $S(Q)$  s'exprime par la proposition suivante : lorsque  $P$  est convexe et sauf les singularités étudiées au paragraphe suivant, une pyramide  $\mathbb{I}(P, T)$  admet deux limites géométriques qui correspondent aux deux polygones  $P$  et  $T$ .

En effet, lorsque  $Q$  tend vers  $P$  (i.e. lorsque la distance de  $Q$  au plan de  $P$  tend vers zéro), alors le polygone  $S(Q)$  tend vers  $P$  puisque les arêtes de  $T'$  aux

sommets de  $P$  deviennent négligeables relativement aux arêtes conservées de  $P$ . Inversement, lorsque la distance de  $Q$  à  $P$  tend vers l'infini, alors le polygone  $S(Q)$  tend vers le polygone représentant la plage temporelle  $T$  sur la voûte céleste (supposée à l'infini) puisque les arêtes conservées de  $P$  deviennent négligeables relativement aux arêtes aux sommets. Si  $d$  représente la distance de  $Q$  à  $P$ , nous pouvons alors écrire (figure 5.11 ci-dessous) :

$$S(Q)_{d \rightarrow 0} = P \quad \text{et} \quad S(Q)_{d \rightarrow \infty} = T$$

Ces deux limites illustrent le fait que la pyramide complexe  $\mathbb{P}(P, T)$  est le volume intermédiaire effectuant la transition géométrique de  $P$  à  $T$  (métaphoriquement : la transition de l'espace vers le temps).

De manière plus générale, cette propriété de transition entre deux formes est caractéristique des sommes de Minkowski. C'est pour cette propriété qu'elles sont d'ailleurs utilisées lorsque l'on veut calculer les étapes de la métamorphose d'un objet dans un autre (Kaul & al. 1992, Galin & al. 1996). Dans cet objectif, la transition de  $A$  vers  $B$  est effectuée par une série de sommes de Minkowski dans lesquelles  $A$  est grossi homothétiquement à chaque étape tandis que  $B$  est diminué en raison inverse. L'objet somme  $A \oplus B$  tend ainsi vers l'objet  $A$  grossi (sans le rejoindre dans l'absolu) tandis qu'il s'éloigne de l'objet  $B$  diminué.

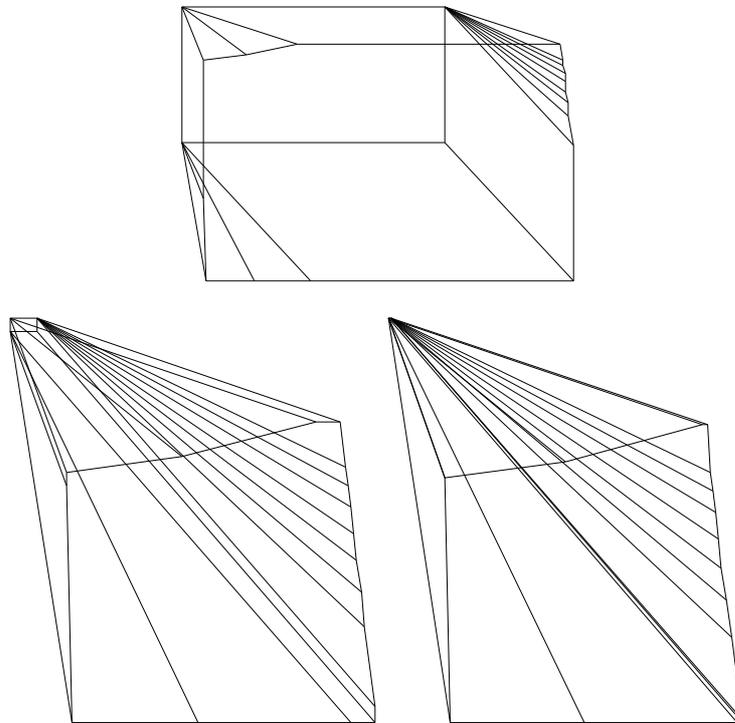


Figure 5.11. Notion de limites d'une pyramide d'ensoleillement (trois sections parallèles d'une même pyramide)

#### 5.1.3.4 Singularités du polygone $S(Q)$

Nous avons vu que lorsque  $P$  est convexe, toute section  $S(Q)$  de la pyramide complexe  $\Pi(P, T)$  conserve les arêtes de  $P$ . Entre ces arêtes conservées, le polygone  $S(Q)$  contient un ensemble d'arêtes toutes issues, a priori, du polygone  $T'$ , section de  $\pi(s, T)$  par  $Q$  si  $s$  est un sommet de  $P$ .

Certaines singularités de la somme de Minkowski peuvent cependant modifier ces arêtes lorsque  $T'$  est concave (ce qui est le cas général) et sous certaines conditions d'orientation et de formes relatives de  $P'$  et de  $T'$ . La figure 5.12 ci-dessous donne un exemple de ces singularités.

Cette figure représente la somme de  $T'$  (en grisé) et de  $P'$  rectangulaire. Lorsque  $T'$  centré en  $p'$  parcourt l'arête  $AB$  de  $P'$ , le point extérieur  $t_1$  de  $T'$  décrit l'arête équivalente  $A'B'$  de  $S(Q)$ . La structure générale de  $S(Q)$  est donc vérifiée, conformément à ce que nous avons montré pour  $P$  convexe. Cependant, dans le même temps, il existe un point  $t_2$  de  $T'$  qui parcourt une arête  $A''B''$  de  $S(Q)$  qui coupe  $T'$  en  $t_3$ . Ainsi, dans cette configuration de  $P'$  et de  $T'$ , les arêtes de  $T'$  ne sont pas conservées dans  $S(Q)$  au sommet  $A$ . Un nouveau rayon  $R(p', t_3)$  apparaît dans la pyramide. En conséquence, la limite de  $S(Q)$  lorsque  $Q$  tend vers l'infini n'est plus  $T$ .

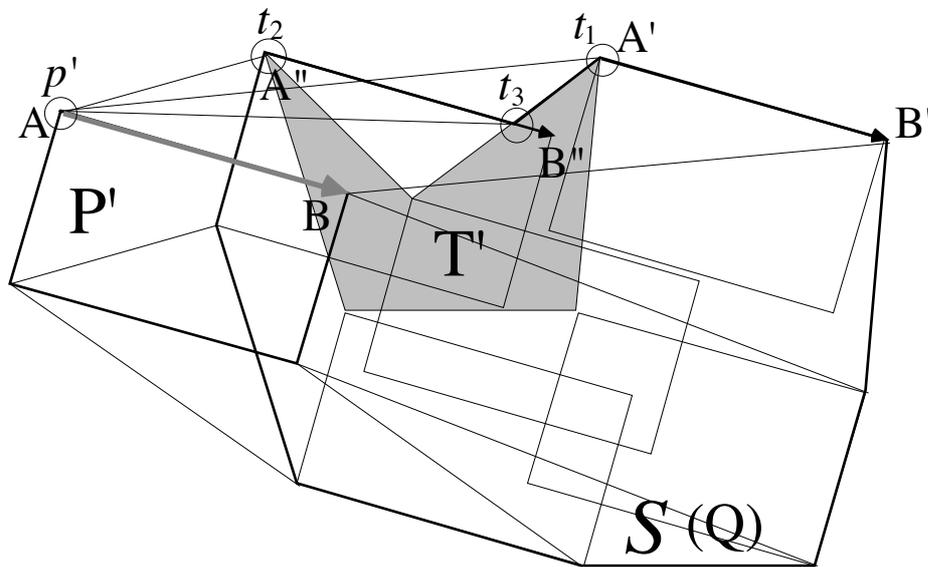


Figure 5.12. Singularité de  $S(Q)$

Sous certaines conditions, il est possible que  $T'$  coupe deux fois sa propre trace lors de son déplacement sur  $P'$ . Ce cas produit une pyramide  $\Pi(P, T)$  caractérisée par une concavité « pointue » au sommet de  $P$  concerné.

### 5.1.3.5 Transformations élémentaires de $P$ et transformations de $\Pi(P, T)$

Soit  $(P, S, T)$  une proposition d'enseillement à base plane convexe. Il existe deux transformations élémentaires de  $P$ , la translation et l'étirement, qui induisent des transformations élémentaires de la pyramide  $\Pi(P, T)$ .

Il est évident que les translations de  $P$  s'appliquent également à la pyramide  $\Pi(P, T)$  puisque les rayons du soleil sont supposés parallèles. Une translation quelconque de  $P$  dans l'espace translate donc identiquement  $\Pi(P, T)$ .

La transformation par étirement de  $P$  dans son plan utilise les propriétés des sections  $S(Q)$  lorsque  $P$  est convexe. Dans ce cas, nous savons qu'une section  $S(Q)$  conserve les arêtes de  $P$ . Dès lors, tout étirement de  $P$  dans son plan induit un étirement des arêtes conservées de  $P$  dans la section  $S(Q)$ , comme le montre la figure 5.13 ci-dessous. Cette propriété reste vraie pour les homothéties de  $P$  qui peuvent être considérées comme une composition d'étirements (la somme de Minkowski est compatible avec l'homothétie).

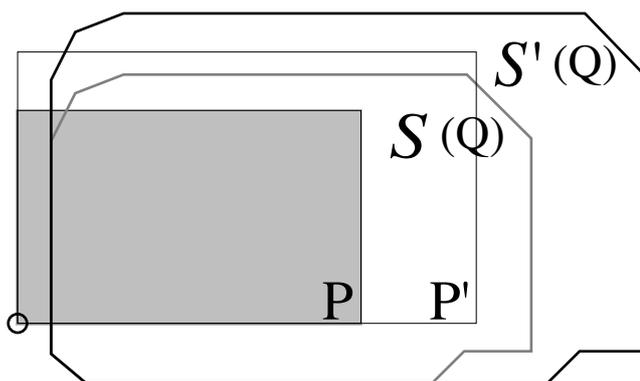


Figure 5.13. Étirement de  $P$  et étirement de  $S(Q)$

Les transformations élémentaires de  $P$  par rotation ne se traduisent pas, à notre connaissance, par des transformations élémentaires de  $\Pi(P, T)$ .

### 5.1.3.6 Pyramides à base concave

Soit  $\Pi(P, T)$  une pyramide d'enseillement de base  $P$  concave. Chaque section  $S(Q)$  de  $\Pi(P, T)$  par un plan  $Q$  parallèle à  $P$  peut toujours être définie comme la somme de Minkowski  $P' \oplus T'$ . Cependant, il n'est plus possible de montrer la conservation de la structure géométrique de  $S(Q)$  quel que soit  $Q$ . En effet, les concavités superposées de  $P'$  et de  $T'$  peuvent induire des recouvrements d'arêtes faisant apparaître ou disparaître certains points de différentes sections  $S(Q)$ , comme l'illustre la figure 5.14 page suivante. Ces singularités ne nous permettent pas de reconstruire les rayons de  $\Pi(P, T)$  à partir d'une section  $S(Q)$  unique et quelconque lorsque  $P$  est concave.

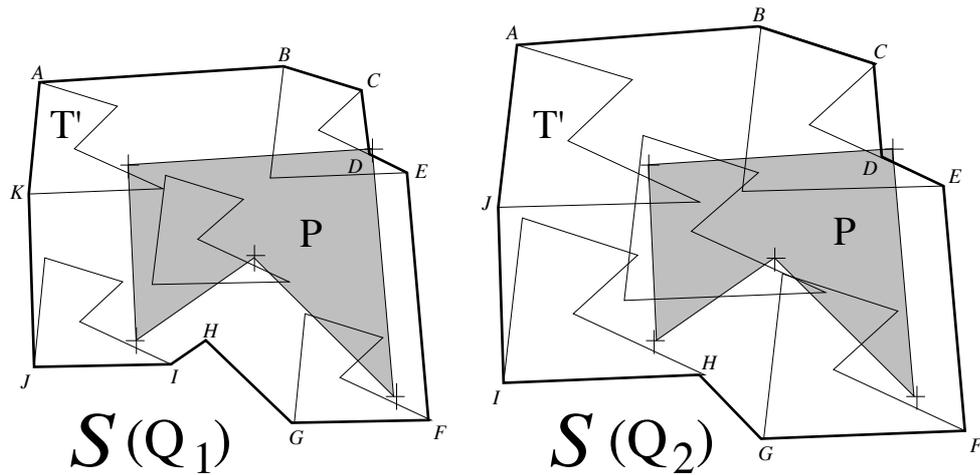


Figure 5.14. Non conservation de la structure de  $S(Q)$  lorsque  $P$  est concave

Cependant, un polygone  $P$  concave peut toujours être pavé par un ensemble de polygones convexes pour chacun desquels il est possible de déterminer la frontière d'une pyramide complexe d'enseillement. Comme nous l'avons montré en introduction de cette section, la pyramide  $\prod(P, T)$  s'exprime alors par l'union de toutes les pyramides définies sur chaque élément convexe du pavage de  $P$ . La figure 5.15 ci-dessous donne une image d'une pyramide d'enseillement construite sur une base  $P$  concave (en grisé).

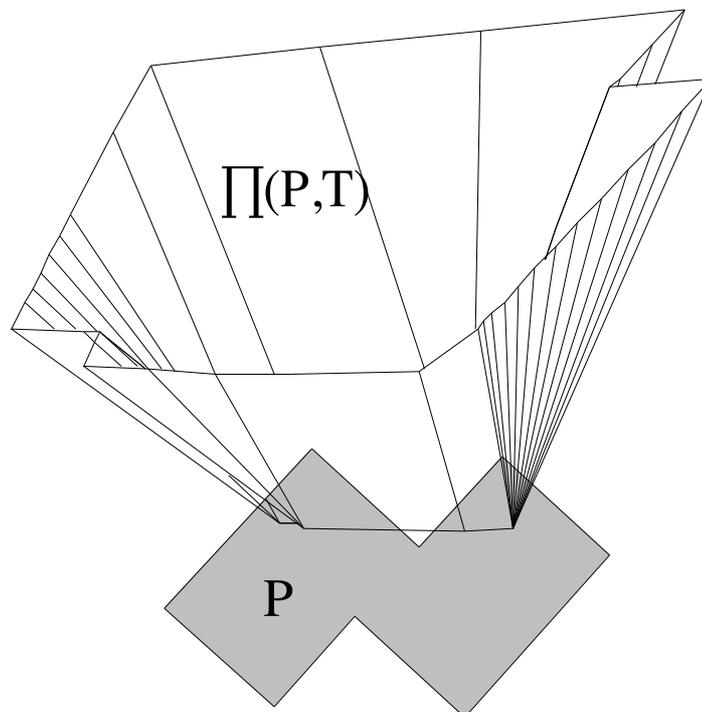


Figure 5.15. Une pyramide d'enseillement à base concave

### 5.1.4 Cas particuliers et extension de la méthode

Soit  $\Pi(P, T)$  une pyramide d'ensoleillement quelconque. Les résultats que nous avons établis pour la détermination de la frontière de cette pyramide ne sont applicables que si la *plage temporelle d'ombre propre du plan de P est disjointe de la plage temporelle T*. Si cette condition n'est pas vérifiée, un cas particulier de construction apparaît que nous présentons dans ce paragraphe. La résolution de ce cas particulier nous permet d'envisager une extension de notre méthode aux volumes polyédriques fermés.

#### 5.1.4.1 Plage temporelle d'ombre propre du plan de P

Tout plan P de l'espace d'ensoleillement  $E_\lambda$  partage l'espace en deux demi-espaces que nous appelons  $P_+$  et  $P_-$ . Nous appelons plage temporelle d'ombre propre de P et nous notons  $T_{P-}$  l'ensemble des instants  $t$  de l'année

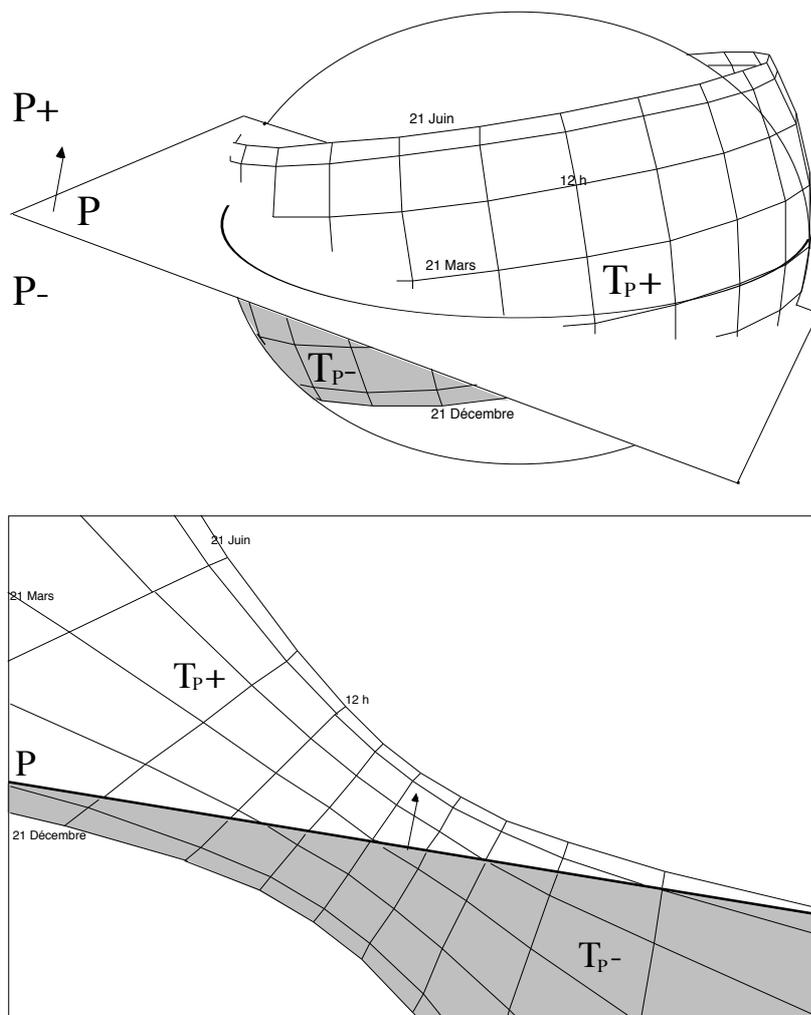


Figure 5.16. Plage temporelle d'ombre propre d'un plan P

solaire tels que, pour un point  $p$  quelconque de  $P$ , le rayon  $R(p, t)$  appartient à  $P^-$ . Son complémentaire sur l'année solaire est la plage temporelle d'ensoleillement potentiel de  $P$  que nous notons  $T_{P+}$ . Il existe un ensemble unique de plans tel que  $T_{P-}$  soit vide : l'ensemble des plans horizontaux de  $E_\lambda$ .

La figure 5.16 page précédente illustre ces plages temporelles pour un même plan  $P$  dans deux systèmes de représentations différents. Dans la représentation du bas, nous reconnaissons une projection perspective de type gnomon (cf. §. 2.1.2.2) dans laquelle le cercle d'intersection du plan et de la sphère céleste est transformé en droite.

La plage temporelle d'ombre propre d'un plan est une notion abstraite de l'espace d'ensoleillement mais elle représente une réalité tangible de l'espace réel. Il est naturel en effet de considérer qu'une façade plane verticale orientée à l'Ouest ne « peut pas » être ensoleillée à aucun instant de la matinée d'aucun jour de l'année. Le matin du solstice d'hiver au solstice d'été est la plage temporelle d'ombre propre du plan de la façade. L'après-midi de l'année solaire est sa plage d'ensoleillement potentiel, indépendamment des masques éventuels environnants.

#### 5.1.4.2 Frontière de $\square(P, T)$ lorsque $T$ et $T_{P-}$ ne sont pas disjointes

Soit  $\square(P, T)$  une pyramide d'ensoleillement. Si la plage temporelle d'ombre propre de  $P$  n'est pas disjointe de la plage temporelle  $T$ , alors la pyramide simple  $\pi(p, T)$  définie pour tout point  $p$  de  $P$  coupe nécessairement  $P$ , comme le montre schématiquement la figure 5.17 ci-dessous. Il n'est donc plus possible de trouver un plan  $Q$  parallèle à  $P$  tel que l'on puisse définir l'intersection  $T'$  de  $\pi(p, T)$  et de  $Q$ . Dans ce cas, notre méthode de détermination de la frontière de  $\square(P, T)$  ne peut plus être appliquée.

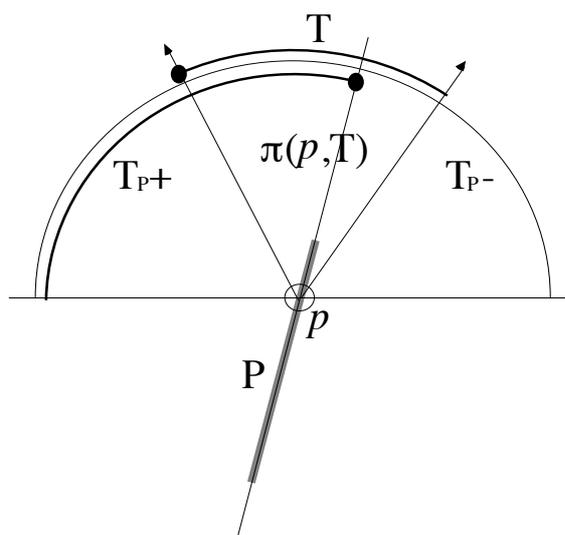


Figure 5.17.  $T$  et  $T_{P-}$  ne sont pas disjointes

Dans cette configuration, la pyramide  $\coprod(P, T)$  existe toujours puisqu'elle est définie comme l'union des pyramides simples  $\pi(p, T)$  lorsque  $p$  décrit  $P$ . Cependant, sa base n'est plus le polygone  $P$  mais une partie du contour extérieur de  $P$ . La pyramide possède alors une base composée de segments qui forment un sous-ensemble des arêtes du polygone  $P$ .

La construction d'une telle pyramide peut s'effectuer de diverses manières. Une solution consiste à déterminer a priori l'ensemble des arêtes de  $P$  qui constituent la base de la pyramide. Il est alors possible de déterminer la frontière extérieure définie par  $\pi(p, T)$  lorsque  $p$  parcourt l'ensemble des points de chacune de ces arêtes. Pour ce faire, il suffit de considérer un plan  $Q$  orthogonal au plan de  $P$  et parallèle à l'arête considérée. La frontière recherchée est définie dans  $Q$  par la somme de Minkowski de  $T'$  (intersection de  $\pi(p, T)$  par  $Q$ ) et de la projection orthogonale de l'arête dans  $Q$  (ces éléments peuvent être compris d'après nos démonstrations précédentes).

La pyramide  $\coprod(P, T)$  recherchée est alors l'union des pyramides définies sur chacune des arêtes supposées former sa base. La figure 5.18 ci-dessous représente une pyramide construite de cette manière. La base de cette pyramide est un segment de  $P$  qui est donc inclus dans  $\coprod(P, T)$ .

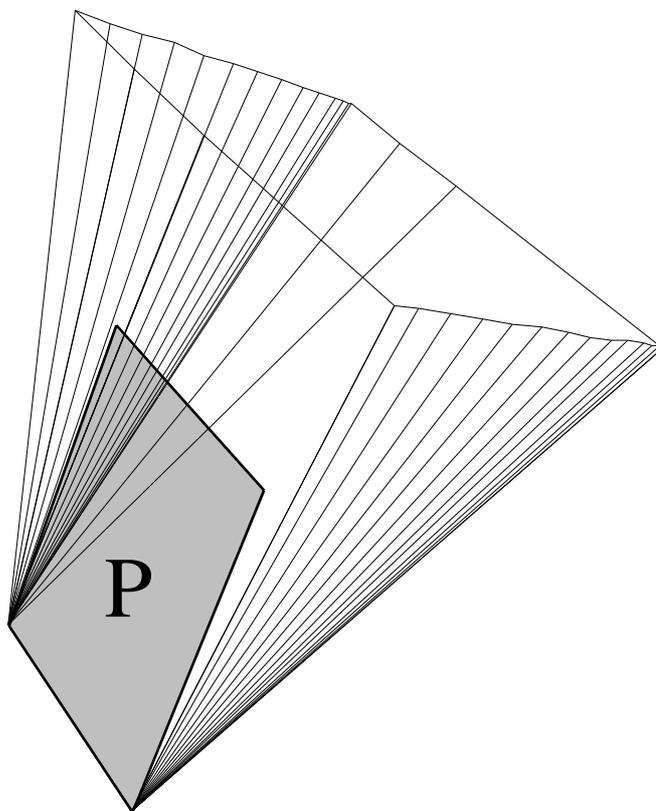


Figure 5.18.  $P$  est inclus dans  $\coprod(P, T)$

### 5.1.4.3 Extension de la méthode aux volumes polyédriques

Ce résultat nous permet d'envisager l'extension de notre méthode aux volumes polyédriques convexes fermés. En effet, ces volumes peuvent toujours être décrits par un ensemble de faces orientées jointives. Soit  $V$  un tel volume et  $F$  l'ensemble des faces qui le délimitent. La pyramide  $\prod(V, T)$  est alors définie comme l'union des pyramides  $\prod(f, T)$  si  $f$  est une face de  $F$ .

Cependant, considérant que  $V$  est fermé dans  $\mathfrak{R}^3$ , il est nécessaire que certaines faces  $f$  de  $F$  possèdent une ombre propre qui n'est pas disjointe de  $T$ . La pyramide  $\prod(f, T)$  associée à ces faces est alors une pyramide dont la base est un sous-ensemble des arêtes de  $f$  et qui peut être construite comme nous l'avons montré au paragraphe précédent.

L'union de l'ensemble des pyramides  $\prod(f, T)$  nous donne la pyramide complexe  $\prod(V, T)$  dont on sait qu'elle permet de résoudre tous les problèmes d'enseillement mettant en jeu  $V$  pendant  $T$ . En particulier, cette pyramide permet de déterminer *sans discrétisation* l'ombre généralisée de  $V$  pendant  $T$  dans la scène considérée (cf. § 4.2.1.4).

## 5.2 Mise en oeuvre pas à pas

Nous avons établi les résultats nécessaires à la construction de la frontière d'une pyramide complexe à base plane. Dans cette section, nous illustrons ces résultats en explicitant chacune des opérations utiles en pratique.

La méthode que nous décrivons est applicable pour la construction d'une pyramide  $\Pi(P, T)$  à base  $P$  convexe définie sur un plan quelconque et pour une plage temporelle  $T$  quelconque, dès lors que cette plage est disjointe de la plage d'ombre propre de  $P$  (cf. § 5.1.4.1). Par souci de clarté, nous considérons dans cet exemple une pyramide  $\Pi(P, T)$  à base  $P$  rectangulaire, définie dans un plan horizontal, et orientée suivant les directions cardinales. La plage temporelle  $T$  est définie de 8 heures à 10 heures solaires, du 21 mars au 21 juin. Les constructions sont établies pour la latitude  $47^\circ$  Nord.

Les trois étapes nécessaires à la construction de la pyramide sont successivement : la construction de la pyramide simple  $\pi(p, T)$ ,  $p$  étant un point de  $P$  ; les opérations correspondant à la somme de Minkowski de  $P'$  et de  $T'$  dans un plan  $Q$  parallèle à  $P$  ; la détermination des rayons extérieurs de la pyramide à partir du résultat de cette somme.

### 5.2.1 Construction de la pyramide simple

#### 5.2.1.1 Représentation polyédrique

En premier lieu, nous construisons une représentation polyédrique de la pyramide simple  $\pi(p, T)$  définie pour un point  $p$  du polygone  $P$  et pour la plage temporelle  $T$ .

Pour ce faire, nous discrétisons les arcs de cercles des trajectoires solaires apparentes définissant  $T$  en un ensemble d'instant  $t_i$  représentatifs. Dans notre exemple, nous utilisons un pas horaire de 20 minutes pour discrétiser les arcs diurnes et un pas journalier de 10 jours pour discrétiser les arcs horaires. Nous obtenons un polygone sphérique de  $n$  points approximant la plage temporelle  $T$ . La frontière de la pyramide simple  $\pi(p, T)$  est alors complètement décrite par l'ensemble des plans définis par les rayons  $R(p, t_i)$  successifs, comme le montre la figure 5.19 page suivante.

#### 5.2.1.2 Détermination de $T'$

L'image  $T'$  de la plage temporelle  $T$  dans un plan  $Q$  parallèle à  $P$  est représentée par la section polygonale de la pyramide simple  $\pi(p, T)$  par  $Q$ . Nous choisissons arbitrairement  $Q$  distant de l'unité du plan de  $P$ . Le polygone  $T'$

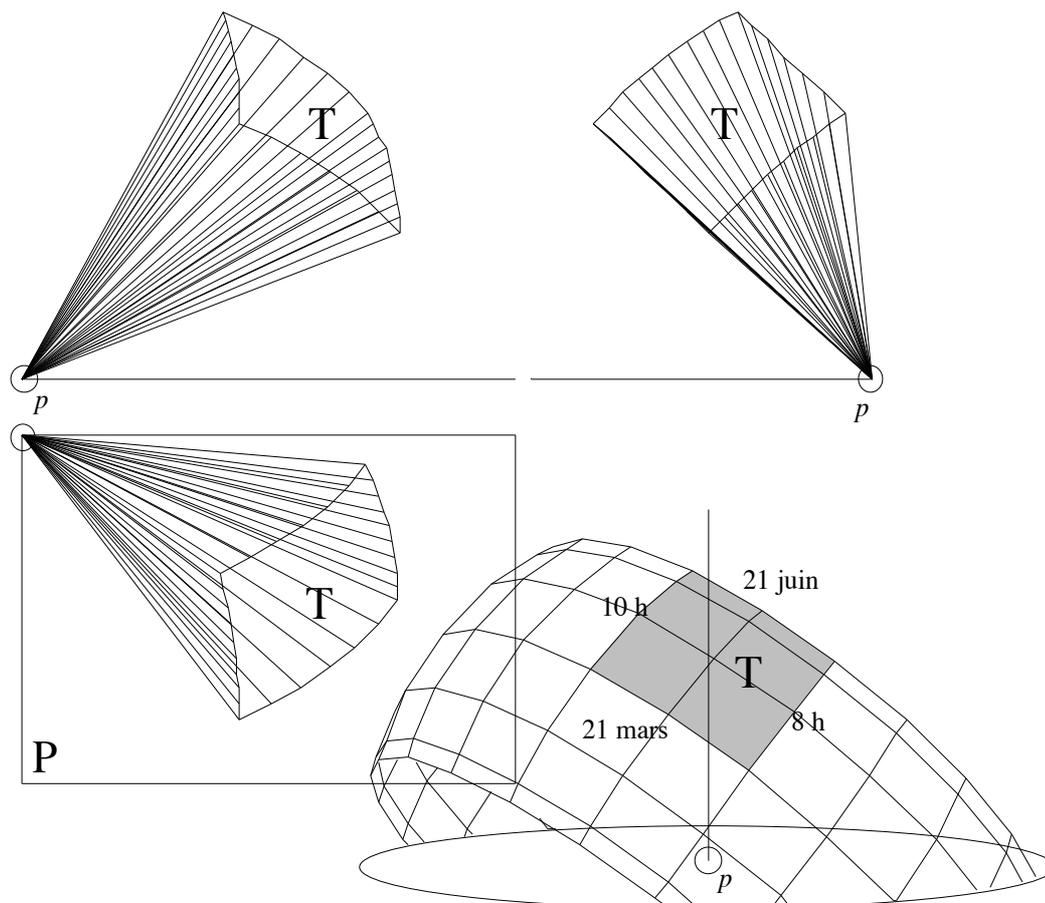


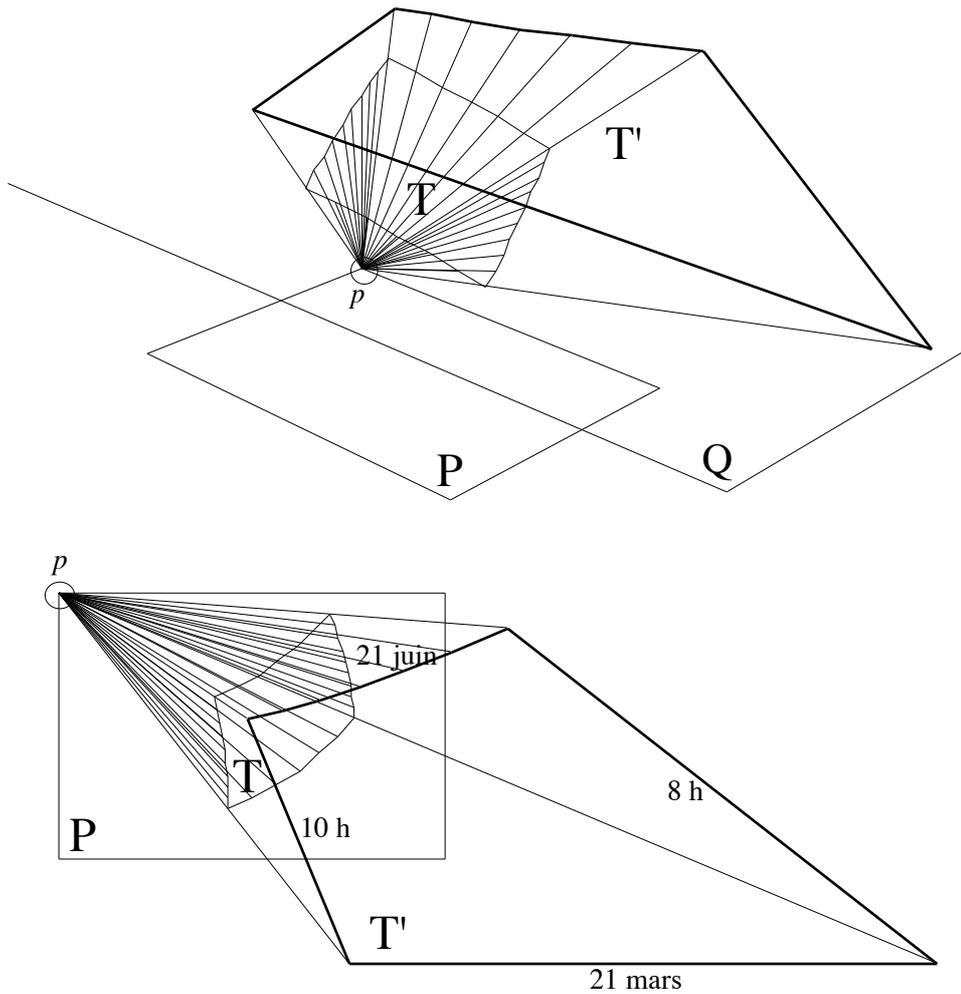
Figure 5.19. Représentation polyédrique de la pyramide simple  $\pi(p, T)$

est alors défini par l'intersection de tous les rayons  $t_i$  représentant  $\pi(p, T)$  avec le plan Q (figure 5.20 page suivante).

D'un point de vue différent,  $T'$  correspond à la transformation de  $T$  par une projection perspective centrale de centre  $p$  et de plan Q. En reprenant les termes de la simulation directe de l'ensoleillement,  $T'$  peut donc être comprise comme l'image de  $T$  dans un diagramme solaire de type « gnomon » centré en  $p$  et de distance principale l'unité (cf. § 2.1.2.2).

Nous savons que dans ce type de projection, les grands cercles de la sphère céleste centrée en  $p$  sont transformés en droites. Il en résulte que, dans notre exemple, les arcs horaires de 8 heures et de 10 heures entre le 21 mars et le 21 juin sont représentés dans  $T'$  par des segments de droite, comme le montre la figure 5.20.

En outre, la journée du 21 mars qui borne la plage temporelle  $T$  correspond à l'équinoxe de printemps et la trajectoire apparente associée aux équinoxes est par définition un grand cercle de la sphère céleste (les jours sont égaux aux nuits). L'intervalle de 8 heures à 10 heures le 21 mars est donc égale-

Figure 5.20. Section de  $\pi(p, T)$  par Q

ment représenté dans  $T'$  par un segment de droite parallèle à l'axe Est-Ouest de la scène, c'est-à-dire horizontal dans le repère de la figure 5.20. Seul l'intervalle de 8 heures à 10 heures le 21 juin est transformé en un ensemble de segments approximant l'arc d'hyperbole équivalent dans la projection.

### 5.2.2 Somme $P' \oplus T'$

Nous cherchons à déterminer le polygone  $S(Q)$  correspondant à la section de la pyramide complexe  $\Pi(P, T)$  par le plan Q. Nous connaissons le polygone  $T'$  déterminé par l'intersection de Q et de la pyramide simple  $\pi(p, T)$  définie pour un point  $p$  quelconque de P. Soit  $P'$  le translaté orthogonal du polygone P dans le plan Q et  $p'$  le translaté orthogonal du point  $p$  dans Q. Nous avons montré que dans le plan Q d'origine absolue  $p'$  :

$$S(Q) = P' \oplus T'$$

Nous avons alors l'expression équivalente :

$$S(Q) = \bigcup_{p' \in T} P'_{p'}$$

Autrement dit,  $S(Q)$  est défini par l'ensemble des points décrits par  $P'$  centré en  $p'$  lorsque  $p'$  décrit tous les points de  $T'$ .

Nous pouvons réduire ce problème d'intégration en considérant que le contour extérieur de  $S(Q)$  est égal au contour extérieur défini par l'ensemble des points décrits par  $P'$  centré en  $p'$  lorsque  $p'$  décrit *le contour* de  $T'$ . Or, cet ensemble est l'union de l'ensemble des points décrits par  $P'$  lorsque  $p'$  décrit chaque arête  $T'_i$  de  $T'$ . Si  $n$  est le nombre d'arêtes de  $T'$ , nous avons alors une expression approximative du type :

$$S(Q) = \bigcup_{i=1}^n P' \oplus T'_i$$

Cette expression est approximative puisqu'elle n'est vraie que pour les *contours* des polygones définis dans les deux membres de l'égalité.

Pour déterminer le contour de  $S(Q)$  (i.e. le contour de la somme  $P' \oplus T'$ ), il nous suffit donc de calculer l'union des polygones résultant de la somme de  $P'$  et de chaque arête de  $T'$ . Deux opérations nous sont alors nécessaires :

- une opération calculant dans le plan  $Q$  la somme de  $P'$  et d'un segment  $[a, b]$  représentant une arête quelconque de  $T'$ ,
- une opération d'union d'un ensemble de polygones coplanaires.

Nous décrivons chacune de ces opérations dans les deux paragraphes qui suivent.

#### 5.2.2.1 Somme d'un polygone et d'un segment dans un plan

La somme  $P' \oplus [a, b]$  dans le plan  $Q$  est définie comme l'ensemble des points décrits par  $P'$  centré en  $p'$  lorsque  $p'$  décrit tous les points de  $[a, b]$ . Puisque nous considérons  $P'$  convexe, cette somme correspond à l'enveloppe convexe des sommets de  $P'$  lorsque  $p'$  est translaté en chacune des extrémités de  $[a, b]$ .

Il existe différents algorithmes résolvant le problème de l'enveloppe convexe d'un ensemble de points (Preparata 1985, Adam 1996). Pour notre part, en considérant que la tache  $P$  est un rectangle, nous utilisons la procédure illustrée par la figure 5.21 page suivante.

Le rectangle  $P$  translaté aux extrémités de  $[a, b]$  définit un ensemble de huit points que nous pouvons numéroter  $[a_1, \dots, a_4]$  et  $[b_1, \dots, b_4]$ . En parcourant ces huit points ordonnés, nous construisons quatre enveloppes hexagonales

(éventuellement croisées) laissant toujours deux points isolés (en noir sur la figure). L'enveloppe convexe recherchée est l'hexagone qui contient les deux points isolés. Notons que cette procédure n'est applicable que si l'algorithme de détermination de l'appartenance d'un point à un polygone peut être mis en oeuvre pour des contours singuliers. En effet, le contour hexagonal testé est généralement croisé ; il peut en outre présenter des arêtes pendantes si  $[a, b]$  est parallèle à une arête de  $P'$ . L'algorithme décrit par Hégron (1985) vérifie ces contraintes.

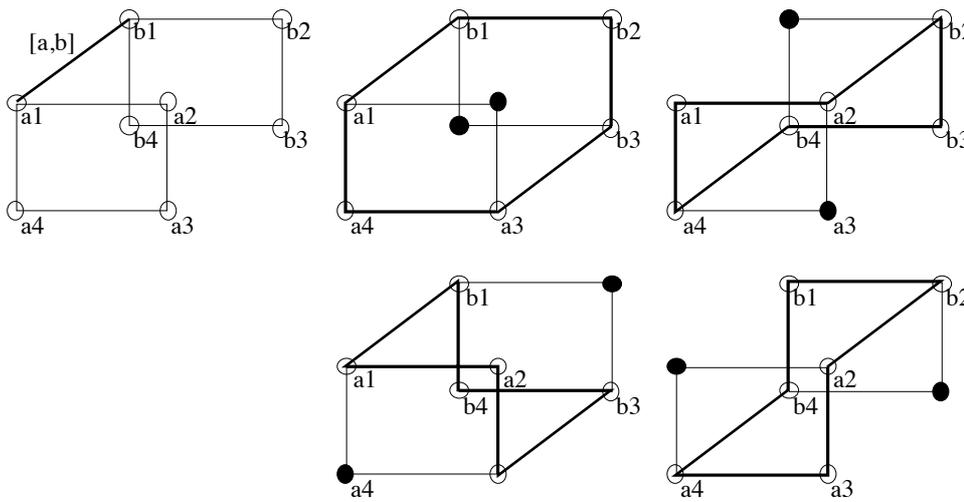


Figure 5.21. Principe du calcul de la somme de  $P'$  et d'une arête de  $T'$

#### 5.2.2.2 Détermination de $S(Q)$

Munis de cette procédure, nous pouvons calculer le contour de  $S(Q)$ , c'est-à-dire l'union des sommes  $P' \oplus T'_i$  pour chaque arête  $T'_i$  de  $T'$ .

Nous effectuons cette union de manière incrémentale en considérant successivement chacune des arêtes de  $T'$ . Cette opération se ramène alors au problème classique de l'union de deux polygones quelconques coplanaires. La procédure que nous utilisons est celle décrite au § 2.2.3.1 qui résout le cas général.

La figure 5.22 page suivante illustre ce processus en présentant quelques étapes du calcul de  $S(Q)$  pour les éléments de notre exemple. A chaque étape, le segment fléché indique l'arête courante  $T'_i$ . Le polygone en trait fort représente la somme de cette arête et de  $P'$ . Le polygone grisé correspond à l'union des sommes  $P' \oplus T'_i$  pour toutes les arêtes de 1 à  $i$ .

Le polygone grisé de la dernière étape est finalement le polygone  $S(Q)$  correspondant à la section de la pyramide complexe  $\coprod(P, T)$  par le plan  $Q$ .

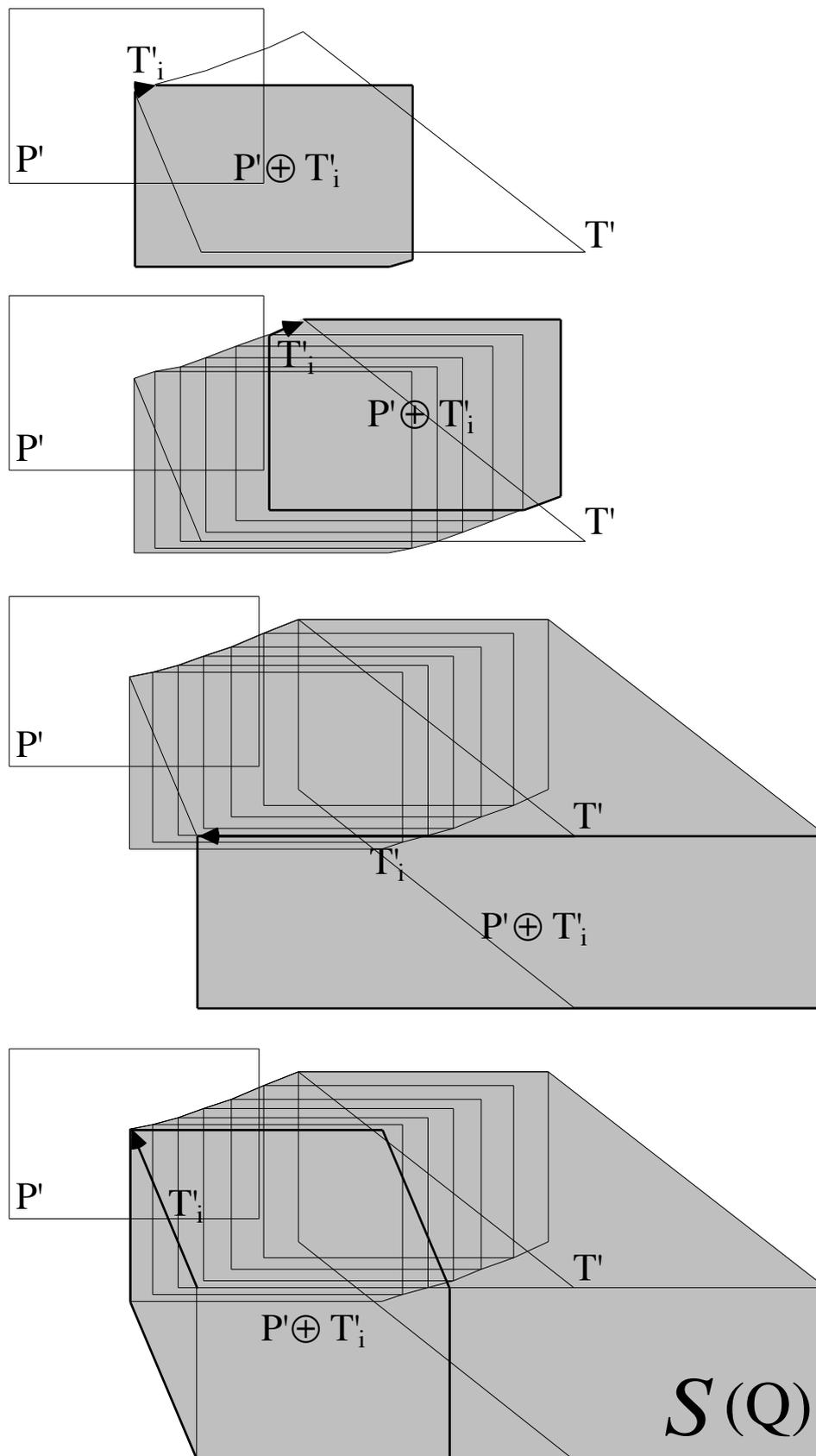


Figure 5.22. Quatre étapes du calcul de la somme  $P' \oplus T'$

### 5.2.3 Construction des rayons de $\Pi(P, T)$

Nous connaissons la structure du polygone  $S(Q)$  : il possède  $n$  arêtes égales à une translation près aux  $n$  arêtes de  $P$ . Ces arêtes déterminent l'alternance des rayons partant de chacun des sommets de  $P$ . Pour construire ces rayons, il nous suffit d'identifier les arêtes de  $S(Q)$  égales aux arêtes de  $P$ . La figure 5.23 montre ces arêtes pour notre exemple.

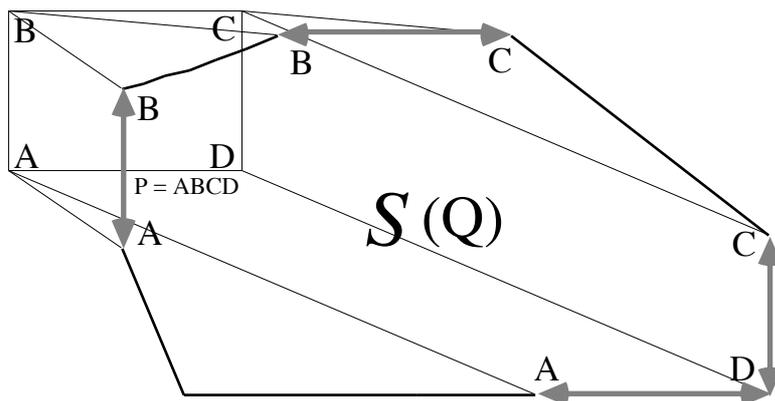


Figure 5.23. Reconnaissance des arêtes de  $P$  dans  $S(Q)$

La reconnaissance des arêtes de  $P$  dans  $S(Q)$  nous permet de reconstituer les rayons extérieurs de la pyramide complexe, en rattachant les sommets de  $S(Q)$  aux sommets de  $P$ . Ces rayons donnent une connaissance complète de  $\Pi(P, T)$  puisqu'ils définissent, deux à deux consécutivement, l'ensemble des plans formant sa frontière. Sur la figure 5.24 ci-dessous, nous observons ensemble les pyramides  $\Pi(P, T)$  et  $\pi(p, T)$  de notre exemple.

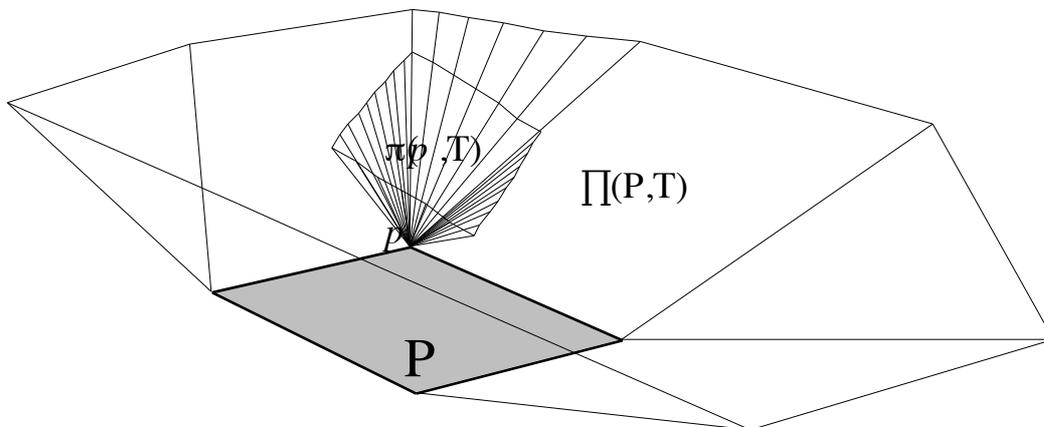


Figure 5.24. Construction des rayons de  $\Pi(P, T)$

## 5.3 Vérifications

Cette dernière section illustre notre méthode et permet sa vérification. Nous considérons deux propositions d'ensoleillement élémentaires pour chacune desquelles nous construisons une solution en utilisant la pyramide d'ensoleillement associée. Ces solutions sont des transformations de la scène initiale par évidement ou par obstruction. Nous appliquons différentes méthodes de simulation directe permettant de déterminer les états d'ensoleillement de la scène ainsi transformée. Par ce biais, nous vérifions la réalisation effective de la proposition et la validité de notre méthode. Nous montrons le halo caractéristique de la solution retenue pour chacun des exemples. Nous exposons enfin une méthode de construction d'une solution duale d'une proposition et nous considérons la composition de deux propositions.

### 5.3.1 Évidement solution d'une proposition ( $P$ , *au soleil*, $T$ )

Soit  $(P, \textit{au soleil}, T)$  une proposition d'ensoleillement élémentaire définie dans la scène  $S$ . Nous savons qu'une solution de cette proposition est un évidement de  $S$  par un volume  $V$  contenant l'intersection de  $S$  et de  $\prod(P, T)$ . La solution minimale de  $(P, \textit{au soleil}, T)$  est donc l'évidement de  $S$  par le volume de la pyramide  $\prod(P, T)$  (cf. § 4.3.2.1). Cette solution possède un halo caractéristique que nous savons déterminer.

#### 5.3.1.1 Construction de la solution évidement

Soit la scène  $S$  rudimentaire de la figure 5.25 page suivante composée de deux plans orthogonaux. Dans cette scène, on définit une proposition d'ensoleillement  $(P, \textit{au soleil}, T)$  pour laquelle on détermine la pyramide  $\prod(P, T)$  suivant la méthode présentée dans la section 5.2. Nous construisons la solution minimale de la proposition, c'est-à-dire l'évidement  $E$  correspondant à l'intersection de la pyramide  $\prod(P, T)$  et de la scène (figure 5.25).

#### 5.3.1.2 Halo caractéristique de l'évidement

L'évidement  $E$  réalise la proposition  $(P, \textit{au soleil}, T)$ , c'est-à-dire qu'il assure que tous les points de  $P$  sont *au soleil* pour tous les instants de  $T$ . Ceci ne signifie pas que la tache  $P$  est exactement réalisée en chaque instant de  $T$ . Au contraire, nous savons que  $P$  est l'intersection géométrique de toutes les taches d'ensoleillement réalisées par  $E$  pour tous les instants  $t$  de  $T$  soit, conformément aux notations du § 4.3.2.3 :

$$P = \bigcap_{t \in T} \Omega(E, t)$$

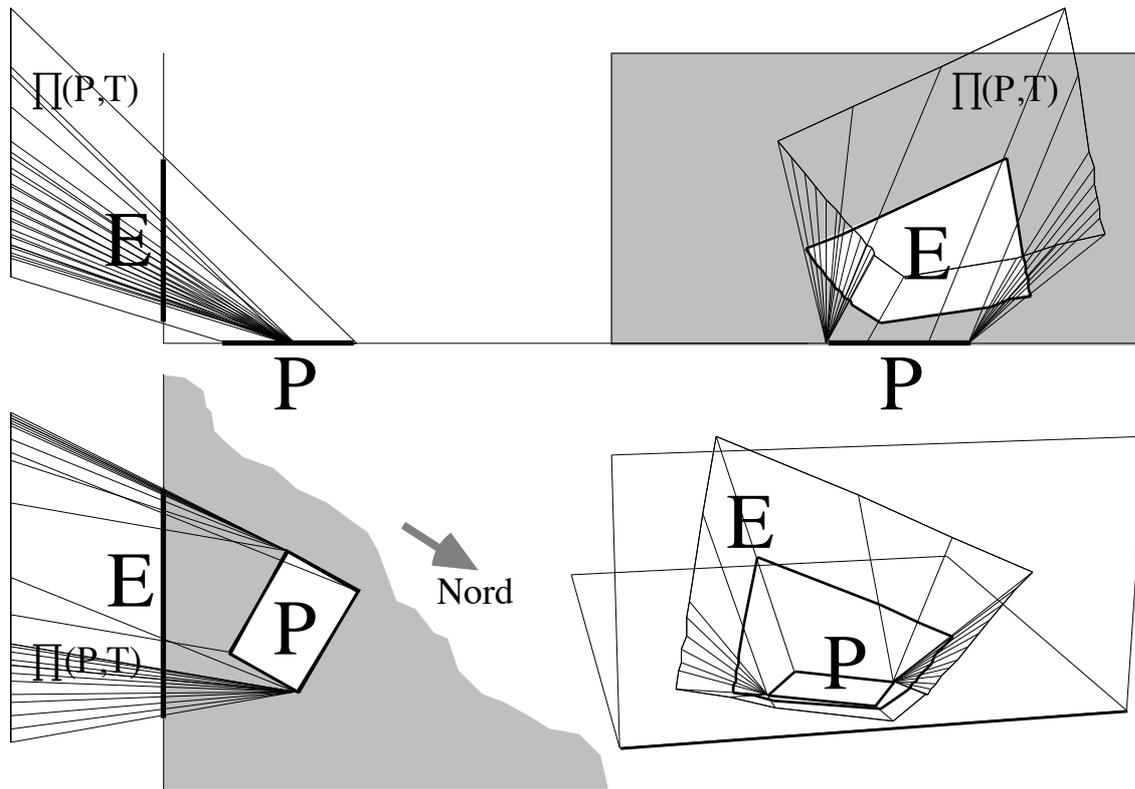


Figure 5.25. Évidement de la scène par la pyramide

Nous avons appelé halo caractéristique  $H(E)$  de l'évidement  $E$  l'ensemble correspondant à l'union de toutes les taches d'ensoleillement réalisées par  $E$  pour tous les instants de  $T$ . Du point de vue géométrique, le halo  $H(E)$  est équivalent à l'ombre généralisée de l'évidement  $E$  pendant  $T$ . Il est donc parfaitement déterminé par l'intersection de la scène et de la pyramide d'ensoleillement  $\Pi(E,-T)$  comme nous l'avons montré au § 4.3.2.3, soit :

$$H(E) = \bigcup_{t \in T} \Omega(E, t) = \Omega(E, T) = \Pi(E, -T) \cap S$$

Nous pouvons vérifier l'exactitude de notre méthode en composant ce halo caractéristique par une technique de simulation directe. Si nous construisons chacune des taches d'ensoleillement produites par  $E$  pour un ensemble discret d'instant de  $T$ , l'intersection de l'ensemble de ces taches doit correspondre au polygone  $P$ .

Ce résultat est montré dans la figure 5.26 page suivante. Les taches de soleil à chaque instant sont déterminées par une technique de projection parallèle du type de celle présentée au § 2.2.3.1. Nous vérifions sur la figure la réalisation de la proposition  $(P, \text{au soleil}, T)$  puisque l'intersection de toutes les taches  $\Omega(E, t)$  englobe effectivement  $P$  (la tache  $P$  est exactement réalisée pour l'ensemble des instants de la plage continue  $T$ ).

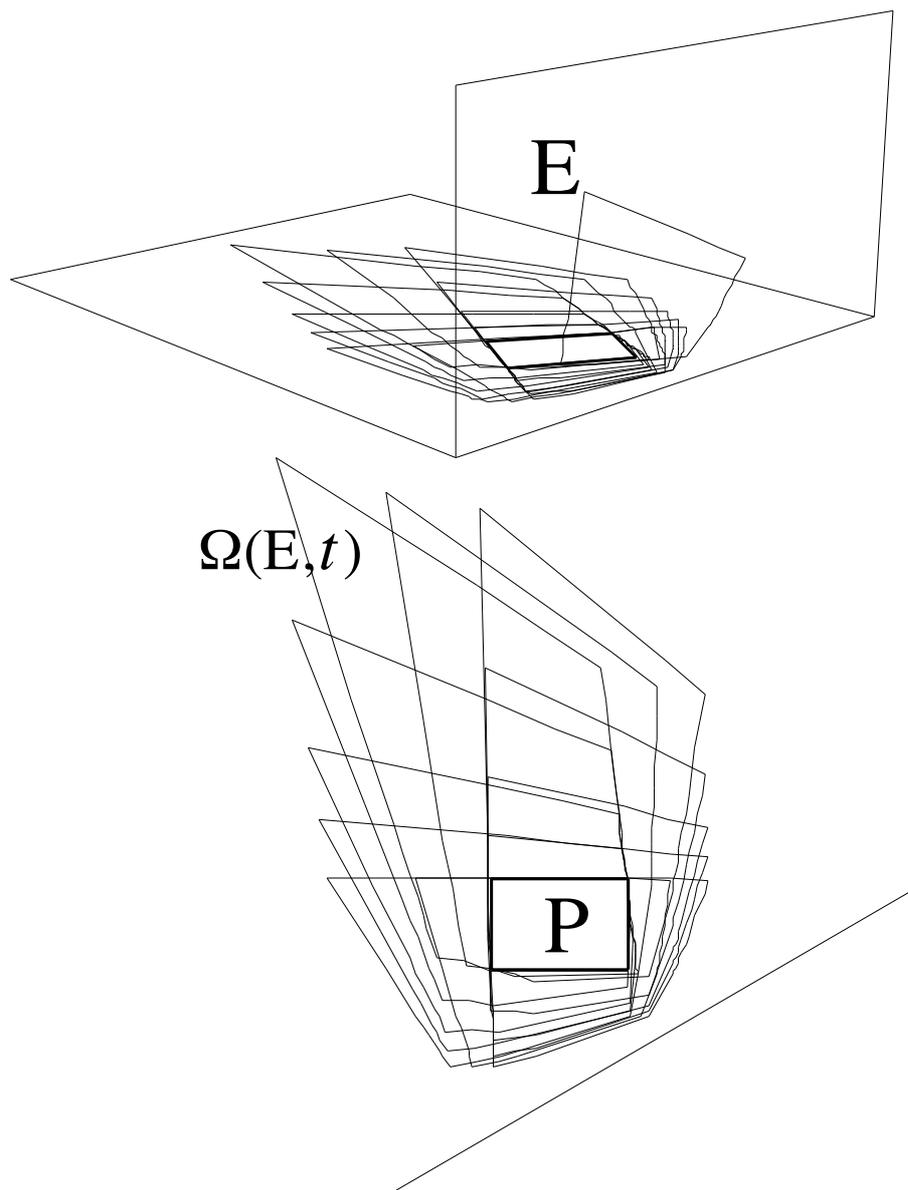


Figure 5.26. Vérification de la réalisation de P par l'évidement E

Pour la même scène transformée, nous observons sur la figure 5.27 page suivante les résultats d'une simulation directe de type masque (cf. § 2.2.3.2) donnant pour chaque point  $p$  d'un maillage de la scène l'état d'ensevelissement  $\sigma(p, T)$  —  $T$  étant la plage pour laquelle nous avons construit la pyramide  $\Pi(P, T)$ . Ces résultats représentent donc la moyenne d'ensevelissement des points  $p$  pendant  $T$ . Nous observons une nouvelle fois la réalisation effective de P par E puisque P délimite l'ensemble des points *au soleil* pour tous les instants de  $T$ . Nous observons en même temps la décroissance progressive de l'état d'ensevelissement des points du plan, de la frontière de P jusqu'à la frontière du halo  $H(E)$  superposé à la figure.

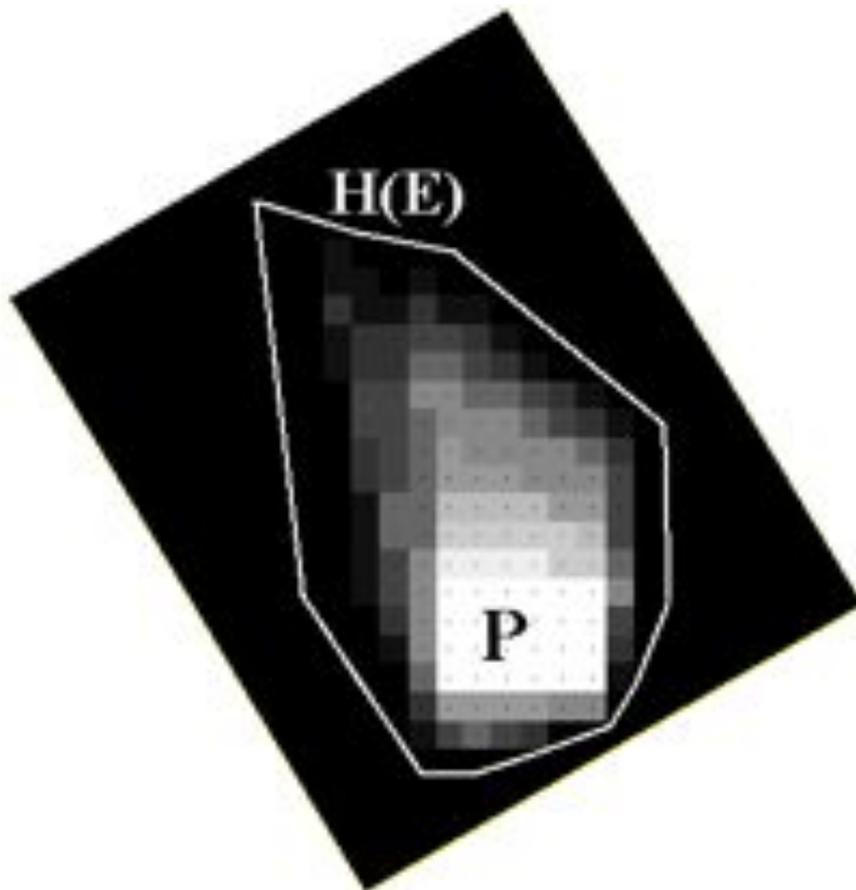


Figure 5.27. États d'enseillement et halo caractéristique sur le plan de P

### 5.3.2 Masques solutions d'une proposition (P, à l'ombre, T)

Soit (P, à l'ombre, T) une proposition d'enseillement fautive au sens défini au § 4.3.1.3 (i.e. la proposition complémentaire (P, au soleil, T) est vraie) et  $\prod(P, T)$  la pyramide d'enseillement associée. Une solution de cette proposition est n'importe quel volume coupant « complètement » les rayons de  $\prod(P, T)$ . Une solution minimale est le masque défini par l'intersection géométrique de cette pyramide par une surface partageant l'espace en deux demi-espaces (cf. § 4.3.2.2). Nous savons qu'il existe une infinité de telles solutions masques. Chacune de ces solutions possède un halo caractéristique unique pendant T.

#### 5.3.2.1 Construction des solutions masques

La scène de la figure 5.28 (page suivante) représente un plan vertical orienté Sud-Ouest sur lequel on a défini une proposition de type (P, à l'ombre, T) et construit la pyramide  $\prod(P, T)$ .

La construction d'une solution masque réalisant la proposition peut se faire de différentes façons. Il s'agit là d'un sujet de discussion sur lequel nous reviendrons (cf. section 6.2). Une manière simple de définir une telle solution est de considérer l'intersection de la pyramide avec un plan quelconque, pourvu que *ce plan coupe au moins l'un des rayons de la pyramide et ne coupe pas le polygone P*. Si ces deux conditions sont vérifiées, le plan coupe nécessairement tous les rayons de  $\Pi(P, T)$ . L'intersection de ce plan avec la pyramide est alors une solution minimale de la proposition.

Sur la figure 5.28 ci-dessous, nous observons deux masques plans  $M_1$  et  $M_2$  réalisant tous les deux  $(P, \text{à l'ombre}, T)$ . Le premier est un masque proche du plan de P et orienté de manière quelconque par rapport à P. Le second est un masque lointain parallèle au plan de P.

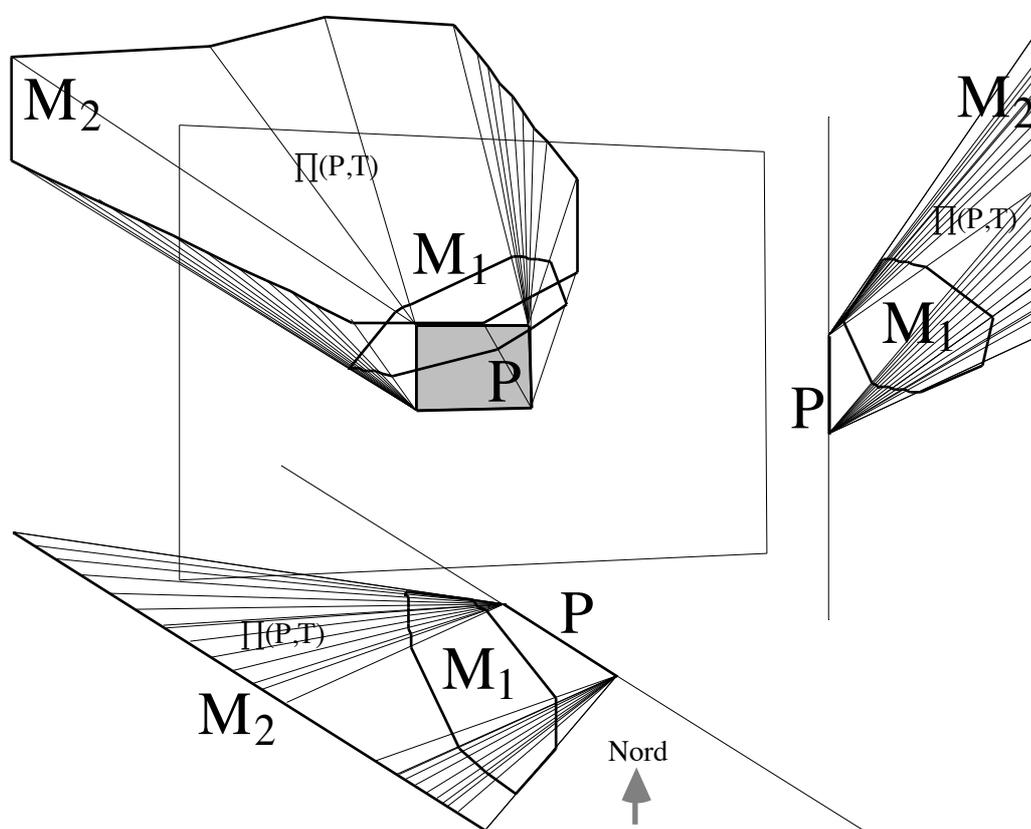


Figure 5.28. Deux solutions masques réalisant la proposition

### 5.3.2.2 Halos caractéristiques des solutions masques

Sur cet exemple, nous avons appliqué une méthode de simulation directe de type masques (cf. § 2.2.3.2) qui calcule la moyenne d'ensoleillement pendant T d'un ensemble de points maillant le plan de P. La figure 5.29 repré-

sente ces états d'enseillement pour chacun des masques  $M_1$  et  $M_2$ . Nous observons les deux résultats attendus :

- d'une part, chacun des deux masques réalise exactement la proposition, i.e. : dans la scène obstruée par  $M_1$  ou  $M_2$ , tous les points de  $P$  sont à l'ombre pour tous les instants de  $T$ ,
- d'autre part, le halo caractéristique du masque lointain pendant  $T$  est beaucoup plus important que celui du masque proche, ce qui est conforme à l'intuition et à la théorie puisque la pyramide  $\prod(M_2, -T)$  est beaucoup plus évasée dans le plan de  $P$  que la pyramide  $\prod(M_1, -T)$ .

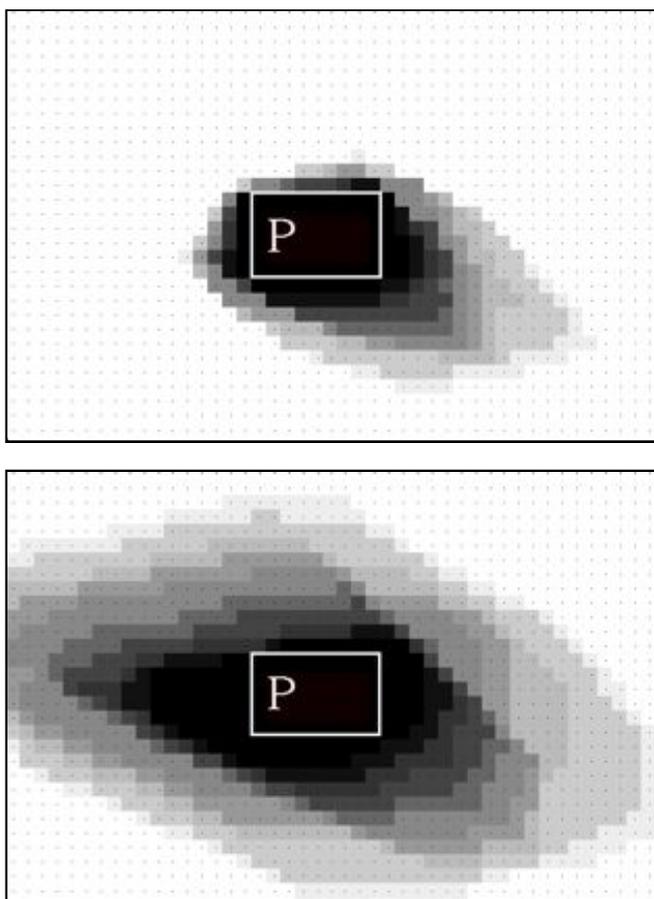


Figure 5.29. Halos caractéristiques des masques  $M_1$  (en haut) et  $M_2$

### 5.3.3 Solutions duales d'une proposition

Nous avons introduit au § 4.3.2.4 la notion de solutions duales d'une proposition. Si la solution « normale » de la proposition  $(P, S, T)$  est telle que tous les points de  $P$  vérifient  $S$  pour tous les instants de  $T$ , la solution duale de cette proposition est telle qu'il existe au moins un point de  $P$  qui vérifie  $S$

**Interprétation géométrique, frontière d'une pyramide d'enseillement**

pendant  $T$  en même temps qu'aucun point extérieur à  $P$  ne vérifie  $S$  pendant  $T$  du fait de la solution de  $(P, S, T)$ . Plus simplement, une solution duale de la proposition est telle que son halo caractéristique (i.e. son ombre généralisée pendant  $T$ ) est incluse dans  $P$ .

La construction de l'ensemble des solutions duales d'une proposition élémentaire peut être explicitée comme suit. Considérons une proposition élémentaire  $(P, \text{à l'ombre}, T)$  — notre raisonnement peut être appliqué identiquement pour une proposition *au soleil*. Nous savons que la pyramide  $\Pi(P, T)$  permet de construire toutes les solutions de cette proposition, chacune de ces solutions ayant son propre halo caractéristique. Soit  $M$  une solution plane de cette proposition.  $M$  réalise la proposition avec un halo caractéristique qui déborde nécessairement le contour de  $P$ . Pour que ce halo ne déborde pas le contour de  $P$ , il faut diminuer la solution  $M$  d'une partie de sa surface. Cette partie est telle qu'*au moins tous les points du contour de  $P$  vérifient l'état d'ensoleillement complémentaire de  $S$ , c'est-à-dire, dans notre exemple, l'état *au soleil**. Or, pour que les points du contour de  $P$  vérifient l'état *au soleil*, il faut évider  $M$  de l'ensemble de ses points appartenant aux pyramides simples  $\pi(p, T)$  définies pour chaque point  $p$  du contour de  $P$ .

Ce raisonnement est applicable quel que soit  $M$ . En conséquence, l'ensemble des solutions duales de la proposition élémentaire  $(P, S, T)$  est défini par la pyramide  $\Pi(P, T)$  diminuée de l'ensemble des pyramides simples  $\pi(p, T)$  lorsque  $p$  décrit le contour de  $P$  (figure 5.30 ci-dessous). Autrement dit, l'ensemble des solutions duales de  $(P, S, T)$  est le volume résultant de la différence booléenne entre  $\Pi(P, T)$  et  $\Pi(C, T)$ , si  $C$  est le contour de  $P$  (la pyramide  $\Pi(C, T)$  est une pyramide « creuse »).

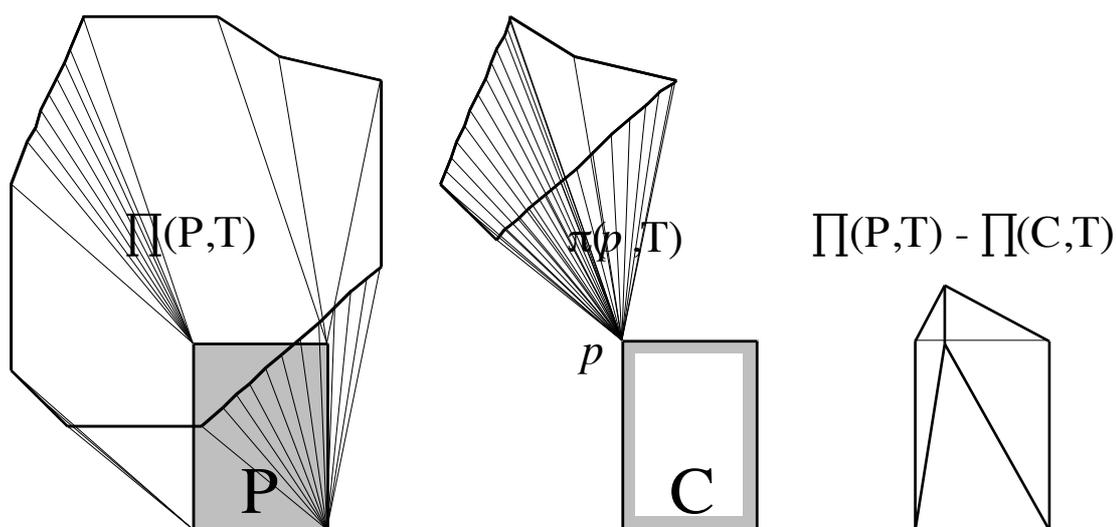


Figure 5.30. Ensemble des solutions duales d'une proposition

Le volume résultant de cette opération est analogue à celui produit par la méthode des enveloppes solaires (cf. § 3.1.2.1). Notons que les arêtes extérieures de ce volume ne sont pas des rayons solaires mais correspondent à l'intersection de deux plans définis par le balayage des rayons de  $\pi(p, T)$  sur les arêtes de  $P$ .

Nous avons construit ce volume pour la proposition  $(P, \text{à l'ombre}, T)$  de l'exemple précédent et nous avons défini dans ce volume une solution duale plane  $M$  de la proposition (figure 5.31 ci-dessous). Nous observons que le halo caractéristique du masque  $M$ , c'est-à-dire l'ensemble des ombres de  $M$  pendant  $T$ , ne déborde pas le contour de  $P$  (les ombres sont construites par une méthode de simulation directe par projection parallèle). Par contre, ce halo ne recouvre pas tous les points de  $P$ .

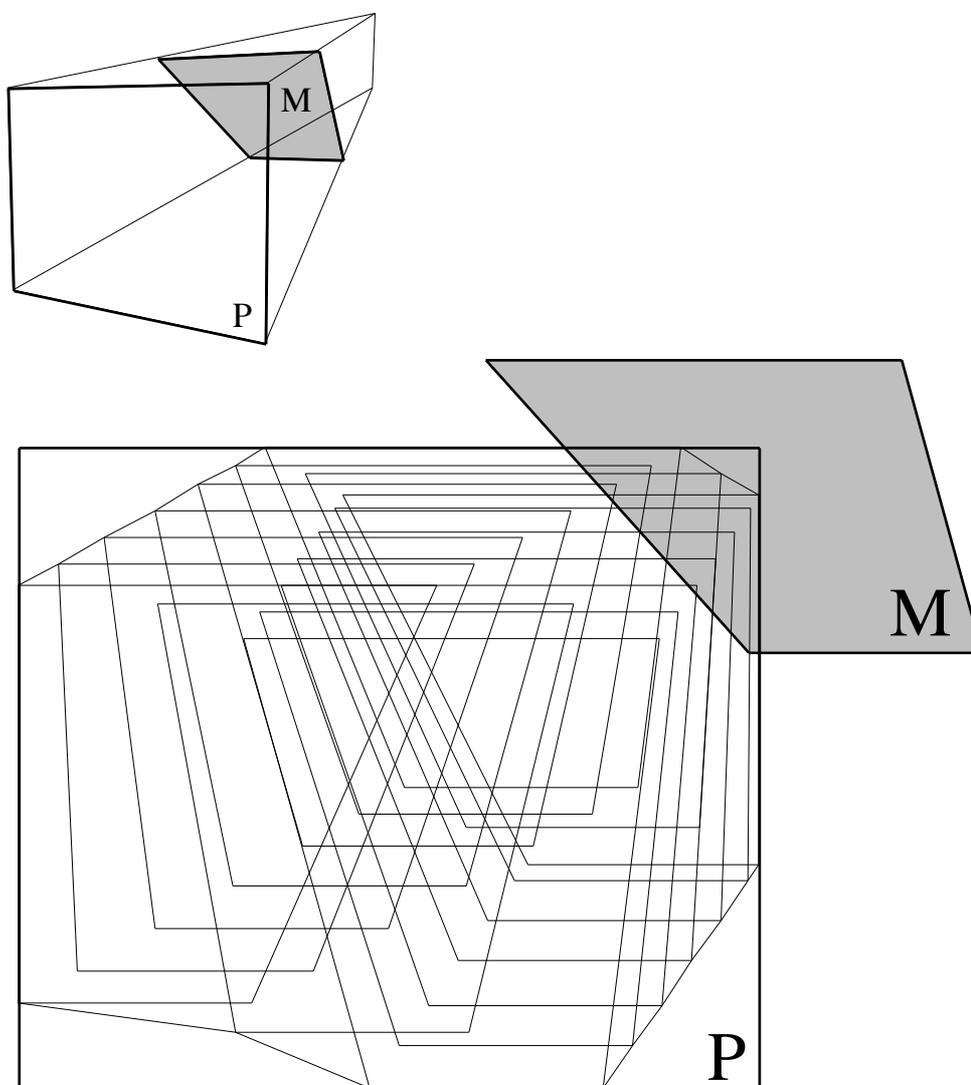


Figure 5.31. Une solution duale et son halo caractéristique

Remarquons enfin qu'il n'existe pas de solution duale telle que son halo caractéristique soit exactement égal à  $P$ . Pour ce faire, il faudrait que cette solution coupe à la fois tous les rayons de  $\prod(P, T)$  — pour que son ombre généralisée pendant  $T$  touche tous les points de  $P$  — et tous les rayons du volume des solutions duales. Le seul ensemble à vérifier ces deux conditions est  $P$  lui-même, qui ne peut pas être solution de la proposition  $(P, S, T)$ .

### 5.3.4 Solutions de la composition de deux propositions

Une dernière vérification de notre méthode peut être effectuée dans le cas de la composition de propositions élémentaires. La figure 5.32 ci-dessous représente une scène simplifiée où deux propositions ont été composées pour la même tâche  $P$ . L'une de ces propositions est du type  $(P, \textit{au soleil}, T)$  et l'autre du type  $(P, \textit{à l'ombre}, T')$ . Les plages  $T$  et  $T'$  sont disjointes : les propositions ne peuvent donc pas être incompatibles (cf. § 4.3.3.1).

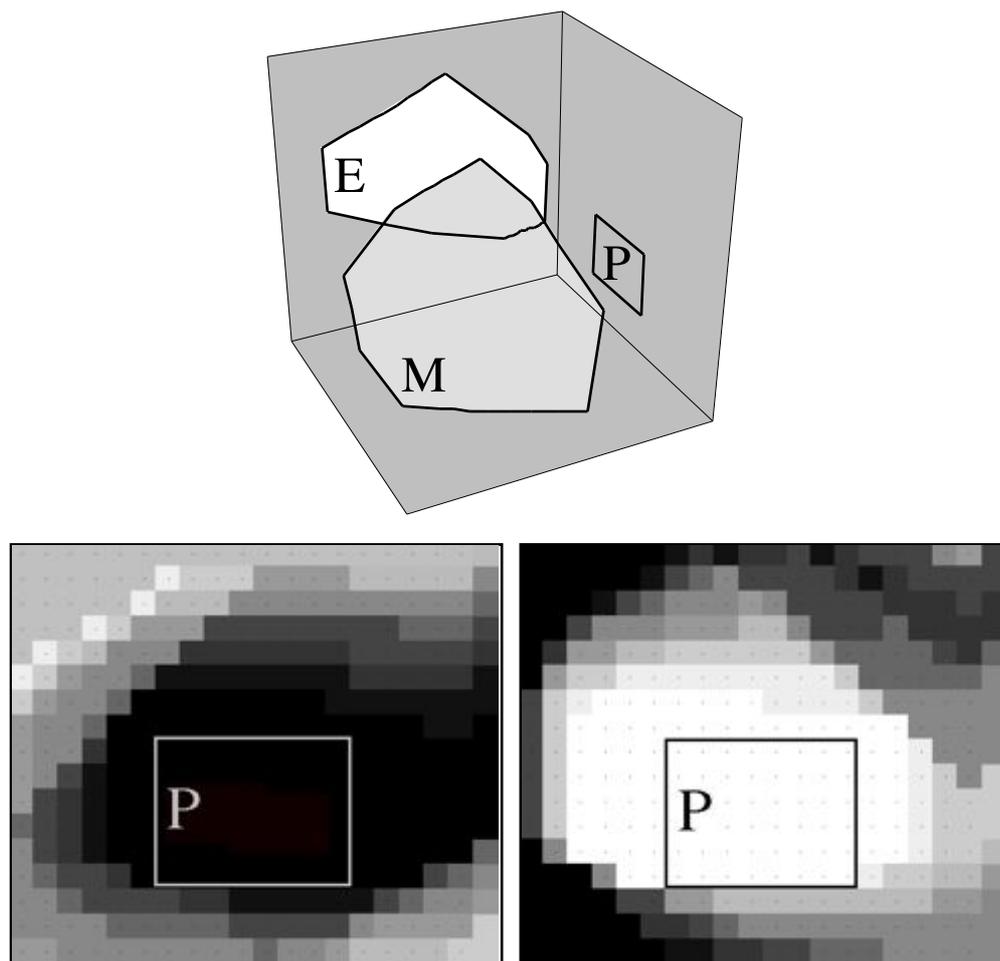


Figure 5.32. Composition de deux propositions

Nous savons que les deux propositions sont réalisées ensemble si l'obstruction réalisant la proposition *à l'ombre* ne coupe pas la pyramide associée à la proposition *au soleil* (cf. § 4.3.3.2). Le masque M de la figure 5.32 vérifie cette condition et réalise la proposition  $(P, \text{à l'ombre}, T')$ . L'évidement E réalise la proposition  $(P, \text{au soleil}, T)$ . Nous observons sur la figure les états d'ensoleillement du plan de P pour les deux plages temporelles T (à droite) et T'. Les deux propositions définies sur P sont bien réalisées ensemble, i.e. : le même ensemble P vérifie exactement les deux états d'ensoleillement *au soleil* et *à l'ombre* pour chacune des plages temporelles T et T'.

## Conclusion

En nous appuyant sur la formalisation définie au chapitre précédent et sur quelques notions de morphologie mathématique, nous avons donné dans ce chapitre une méthode géométrique de détermination de la frontière d'une pyramide complexe d'ensoleillement à base plane. Nous avons montré en premier lieu qu'une section quelconque d'une pyramide à base convexe par un plan parallèle à cette base :

- peut être construite par une somme de Minkowski faisant intervenir des projections de la tache d'ensoleillement  $P$  et de la plage temporelle  $T$ ,
- possède la propriété de conserver les arêtes de la tache  $P$ .

En utilisant cette dernière propriété, nous avons montré qu'il est possible de reconstituer la frontière d'une pyramide d'ensoleillement par la seule connaissance d'une section de cette pyramide. Nous avons élargi ce résultat à toutes les pyramides en considérant qu'une tache concave peut être réduite à un pavage de taches convexes.

Nous avons décrit étape par étape les opérations nécessaires à la construction d'une pyramide à base convexe. Enfin, nous avons vérifié l'exactitude de notre méthode en utilisant différentes techniques de simulation directe de l'ensoleillement. Par ce biais, nous avons illustré les notions de halo caractéristique d'une solution et de solution duale d'une proposition.

Il existe sans doute d'autres méthodes géométriques susceptibles de résoudre le problème non trivial de la détermination de la frontière d'une pyramide d'ensoleillement. La méthode que nous avons présentée a l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre puisqu'elle ne fait intervenir que des opérations booléennes. En outre, elle nous a permis d'exposer les propriétés singulières de ce volume parfois étrange qu'est la pyramide d'ensoleillement, liant l'espace et le temps dans un même artefact géométrique.

Une fois résolue géométriquement, notre méthode de simulation inverse de l'ensoleillement pose peu de problèmes d'implémentation, dès lors que l'on possède les procédures nécessaires à la résolution des opérations booléennes en deux et en trois dimensions. Elle soulève par contre plusieurs questions sur son utilisation dans un contexte de conception architecturale : comment représenter une tache d'ensoleillement, une plage temporelle ? Quelle pertinence architecturale ont les solutions d'une proposition ? Comment explorer l'infinité potentielle des solutions masquées ? Peut-on intégrer cette méthode dans un outil plus général de modélisation dédié à l'architecture ?

Nous discutons ces questions et nous apportons quelques éléments de réponse dans le prochain chapitre.

## Références bibliographiques du chapitre

**Adam B., Kauffmann P., Schmitt D., Spehner J-C.** 1996 — Construction de l'enveloppe convexe dans le plan par balayage selon un rectangle, in Actes des 4<sup>èmes</sup> Journées AFIG 96, Dijon (France), pp. 196-202

**Coster M., Chermant J-L.** 1989 — Précis d'analyse d'images, Presse du CNRS, Paris (France), 550 p.

**Galin E. Akkouche S.** 1996 — Métamorphose d'objets tridimensionnels : quelques méthodes d'accélération, Revue Techniques et Sciences Informatiques, Vol. 15, n°3, pp. 329-350

**Hégron G.** 1985 — Synthèse d'image : algorithmes élémentaires, Bordas, Paris (France), 199 p.

**Kaul A., Rossignac J.** 1992 — Solid-Interpolating Deformations : Construction and Animation of PIPs, Computers & Graphics, Vol.16, n°1, pp. 107-115

**Preparata F. P., Shamos M. I.,** 1985 — Computational geometry, an introduction, Springer-Verlag, New York (USA), 398 p.

**Serra J.** 1982 — Image analysis and mathematical morphology, Academic Press, London (UK), 610 p.

## Chapitre 6

### Discussion de la méthode dans le cadre du projet d'architecture Développement du logiciel *Solimac*



L.I. Kahn, Hôpital National Ayub, Dacca (Bangladesh), 1963

Extrait de P. Portoghesi, *Au-delà de l'architecture moderne*,  
L'Équerre (Paris), 1981

## Introduction

La simulation inverse de l'ensoleillement est avant tout un problème géométrique. Nous avons résolu ce problème d'une part en faisant appel à une géométrie de l'ensoleillement, d'autre part en appliquant quelques outils de morphologie mathématique. Ce faisant, nous avons apporté une solution générale au problème, indépendamment de toute spécification de mise en oeuvre. Notre méthode permet ainsi de réaliser des propositions d'ensoleillement, sans préjuger du contexte de formulation de ces propositions, ni de leur pertinence dans ce contexte.

Cependant, notre objectif est bien de permettre l'application de notre méthode dans un cadre de conception architecturale, urbaine ou même paysagère. Nous avons justifié l'intérêt d'une approche inverse dans ce cadre et nous avons montré que cette approche est réalisable par notre méthode. Il nous reste donc à préciser la mise en oeuvre de cette méthode relativement aux spécificités du projet dans les domaines qui nous intéressent.

C'est ce que propose ce chapitre dans lequel nous discutons différents aspects de notre méthode et leur mise en oeuvre dans le logiciel *Solimac* que nous avons développé. Nous présenterons ce logiciel dans la troisième section de ce chapitre. Nous montrerons alors comment *Solimac* permet de formuler, de manipuler et de réaliser des propositions d'ensoleillement dans un contexte de conception architecturale.

Avant cela, nous proposons deux solutions aux deux principaux problèmes que pose notre méthode dans son application au projet architectural : comment représenter les éléments d'une proposition d'ensoleillement d'une part ; comment générer et explorer l'infinité potentielle des solutions de cette proposition d'autre part. Ces problèmes peuvent paraître circonstanciels et peu dignes d'un intérêt scientifique. Nous pensons au contraire qu'ils adressent d'intéressantes questions relatives au processus de conception en architecture et aux outils les mieux adaptés pour servir le projet dans un cadre de conception assistée par ordinateur. Ces questions sont parfois éludées, au détriment de l'intérêt des systèmes de CAO proposés.

Dans la première section, nous discutons des outils de formulation d'une proposition d'ensoleillement (P, S, T) dans le projet en examinant tour à tour la représentation de la tache P et celle de la plage temporelle T. Nous étudions les propriétés de forme, d'échelle et de position d'une tache d'ensoleillement et nous montrons les distorsions existant entre la tache projetée et la tache réalisée. Nous concluons sur l'hypothèse qu'un rectangle permet de représenter convenablement, dans toutes les situations de conception, la tache d'ensoleillement intentionnelle d'une proposition.

Dans un deuxième point, nous adressons la question de la représentation de la plage temporelle d'une proposition. Cette question nous amène à considérer le délicat problème du repérage temporel des activités humaines. Nous proposons une approche intuitive et pratique de ce problème en définissant un modèle du « temps vécu ». Celui-ci constitue un maillage particulier des trajectoires solaires en heures « élastiques » ; nous verrons que, loin d'être original, ce modèle correspond en réalité à une représentation ancestrale du développement des activités humaines au cours du temps.

Dans la seconde section, nous discutons les questions relatives à la génération et à l'exploration des solutions d'une proposition d'ensoleillement, éléments essentiels des approches déclaratives en général. Nous montrons qu'il est possible dans notre cas de mettre en oeuvre une exploration graphique intuitive de l'infinité potentielle des solutions masquées d'une proposition. Nous mettons également en avant la notion d'interprétation des solutions brutes ainsi produites. Cependant, nous étudions l'éventualité d'une exploration exhaustive automatique, plus classique des approches déclaratives, dans certaines situations que nous précisons.

C'est finalement comme illustration de ces éléments de discussion que nous présentons le logiciel *Solimac* dans la troisième section.

## 6.1 Représentation d'une intention d'enselement

Nous faisons l'hypothèse qu'une part du processus de conception en architecture est accaparée par la formulation et la réalisation d'intentions. C'est ce que nous avons désigné comme la démarcation du discours du projet, parallèle à la démarcation des formes. L'imbrication de ces deux actions représente selon nous la complexité de la conception comme processus dynamique de formulation / résolution concomitante d'un problème implicite.

Nous avons montré qu'une intention d'enselement peut être représentée par une proposition de type  $(P, S, T)$  et réalisée par la pyramide d'enselement associée  $\Pi(P, T)$ . Ce modèle est applicable à la condition que les propositions ainsi constituées puissent être formulées et manipulées aisément, au fil de l'élaboration du projet. Pour ce faire, les éléments qui composent une proposition donnée doivent pouvoir être représentés de manière intuitive et quasi « naturelle » par un concepteur au travail.

Les deux éléments principaux d'une proposition d'enselement — ceux déterminant la pyramide associée — sont la tache géométrique  $P$  et la plage temporelle  $T$ . Nous discutons dans cette section des modalités les mieux appropriées pour la représentation de ces éléments dans le projet. Les réponses que nous apportons ont une valeur relative et restent potentiellement soumises à un nouvel examen en situation de conception.

### 6.1.1 La tache d'enselement : intention et réalisation

Soit une proposition d'enselement  $(P, S, T)$  dans laquelle  $P$  est une tache polygonale plane. Une telle tache peut être définie à tout moment de l'élaboration du projet. L'intention du concepteur est alors de rendre tous les points de  $P$  à l'état  $S$  pour tous les instants de  $T$ . Le problème qui se pose est le suivant : comment représenter correctement  $P$  ?

Ce problème peut être formulé plus explicitement si l'on considère que  $P$  porte trois informations fondamentales : sa forme, son échelle et sa position dans le projet. Il s'agit donc de savoir lesquelles de ces informations peuvent être considérées comme pertinentes au regard de l'objectif de la réalisation d'une intention d'enselement. Examinons chacune d'elles.

#### 6.1.1.1 La forme de la tache

Dans la proposition d'enselement  $(P, S, T)$ , nous associons la tache d'enselement  $P$  à une plage temporelle  $T$  représentant un ensemble continu

d'instant de l'année solaire. La tache P doit vérifier la qualification S pour l'ensemble des instants de T. Ceci ne signifie pas que P représente la tache d'ensoleillement exacte en chaque instant de T. Au contraire, P n'est réalisée géométriquement à aucun instant de T : elle n'est *jamais* visible en tant que telle, comme nous l'avons montré au § 4.3.2.3. La réalisation de la proposition conduit à la réalisation d'une moyenne d'ensoleillement sur les points de P. Géométriquement, seule la dynamique des taches d'ensoleillement au cours du temps, c'est-à-dire le halo caractéristique de la solution réalisant la proposition, demeure tangible et accessible aux sens.

Il est généralement difficile de se figurer, a priori, la forme que peut prendre l'intersection d'un ensemble de taches d'ensoleillement au cours du temps. C'est ce qu'illustre la figure 6.1 ci-dessous dans laquelle nous avons représenté les ombres portées au sol par un simple cube en trois instants discrets représentant une plage temporelle T. La tache P définissant l'ensemble des points du sol à l'ombre pour l'ensemble des instants de T possède une forme sur laquelle il semble difficile d'anticiper sans construction géométrique.

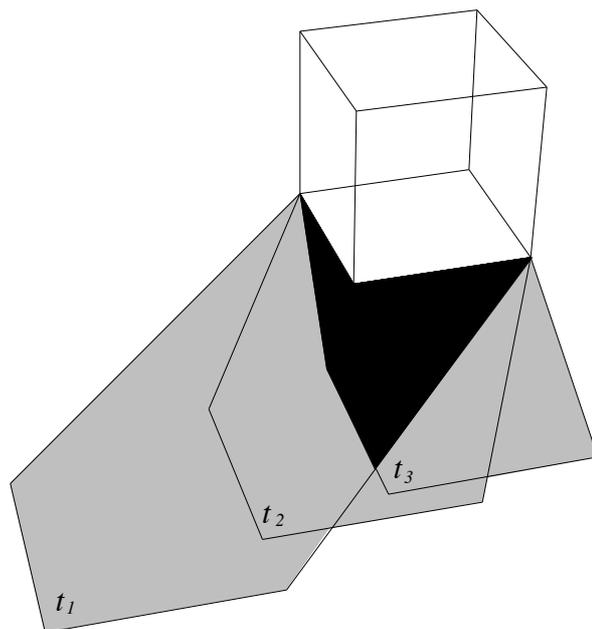


Figure 6.1. Tache d'ombre P pour une plage temporelle T

A fortiori, il semble présomptueux de supposer qu'un concepteur puisse anticiper sur la forme d'une tache d'ensoleillement lorsqu'il formule une intention d'ensoleillement dans un projet en cours d'élaboration — c'est-à-dire dont les formes ne sont pas arrêtées. Nous devons supposer qu'un concepteur manifestant une intention d'ensoleillement décrit une telle tache par un contour flou plutôt que par une frontière exacte. Son intention se

manifeste sur des zones de l'espace, aux frontières incertaines et mouvantes, plutôt que sur des formes précises et figées. A ceci s'ajoute le fait que le halo caractéristique de la solution réalisant cette intention déborde nécessairement le contour de la tache et constitue, seul, la réalité tangible du phénomène telle qu'elle pourra être perçue dans le projet construit.

Ainsi, il semble que la forme de la tache d'ensoleillement soit sans réelle pertinence dans la formulation d'une proposition (P, S, T). Cependant, si la forme de la tache est sans pertinence pour la réalisation de l'intention, elle n'en reste pas moins déterminante pour la construction des solutions puisqu'elle contraint la forme même du volume de la pyramide  $\Pi(P, T)$ . Pour la même plage temporelle, deux taches de formes différentes produiront des solutions évidemment ou masques différentes. Ceci est d'autant plus vrai que la solution retenue est proche de la tache elle-même, compte tenu des limites géométriques de la pyramide complexe (cf. § 5.1.3.3).

La forme de la tache serait donc sans pertinence pour la réalisation de l'intention mais déterminante pour la construction des solutions réalisant cette intention. Il y a là une contradiction qu'il est possible de lever si l'on considère que les solutions définies par la pyramide sont des objets de forme « brute », qui devront nécessairement être interprétés pour revêtir une forme architecturale ou urbaine pertinente dans le contexte du projet : un évidement deviendra une baie architecturale par exemple, tandis qu'un masque sera transformé en objet constructible (nous discutons ce point dans la seconde section de ce chapitre). En outre, la transformation des solutions n'est pas commandée par la seule nécessité de l'ensoleillement ; interviennent des contraintes constructives, réglementaires, plastiques... qui modifient nécessairement la forme générée par l'intention initiale.

Ces transformations impliquent que la tache réalisée dans le projet construit n'a pas la même forme que la tache dessinée a priori ; ceci est vrai quelle que soit la forme donnée initialement à la tache. C'est ce que nous pouvons résumer comme le « cycle des transformations » d'une tache d'ensoleillement dans le projet (figure 6.2 page suivante) : la tache dessinée engendre une pyramide d'ensoleillement qui permet de construire une solution brute réalisant l'intention. Cette solution est interprétée dans le contexte du projet. La forme interprétée modifie finalement le contour de la tache initialement projetée — sans changer la nature de l'intention. Suivant ce schéma, nous concluons que la forme de la tache est sans pertinence réelle pour la réalisation d'une intention d'ensoleillement.

#### 6.1.1.2 L'échelle de la tache

Au contraire de sa forme qui n'apparaît pas réellement pertinente, il semble a priori que l'échelle de la tache soit discriminante pour la réalisation d'une intention d'ensoleillement. De fait, une première analyse veut que lorsque la

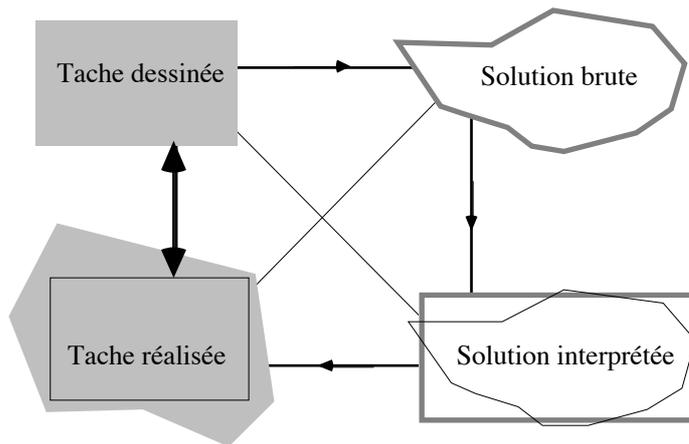


Figure 6.2. Cycle des transformations d'une tâche d'enseiement

taille de la tâche croît, celle des solutions d'évidement ou d'obstruction qui la réalisent croît de manière proportionnelle.

Cette analyse est approximative. En réalité, l'échelle des solutions réalisant une proposition  $(P, S, T)$  donnée ne dépend que de l'échelle de la pyramide  $\prod(P, T)$ . Or, celle-ci est fonction *à la fois* de  $P$  et de  $T$ . Nous savons que la pyramide d'enseiement est un volume singulier qui combine les propriétés de  $P$  et de  $T$  et assure la transition géométrique de l'un à l'autre. Nous savons également que des sections parallèles d'une pyramide ne sont pas homothétiques entre elles, et qu'elles définissent, suivant leur éloignement à  $P$ , les deux limites géométriques de la pyramide (cf. § 5.1.3.3).

Ces propriétés géométriques font que la pyramide  $\prod(P, T)$  réalise en quelque sorte une transition d'échelle entre  $P$  et  $T$ . Puisque des sections parallèles de la pyramide ne sont pas homothétiques, l'échelle d'une solution produite par cette pyramide dépend de la proximité relative de cette solution par rapport à  $P$ . Ainsi, plus la solution est proche de  $P$ , plus l'échelle de  $P$  devient déterminante pour qualifier l'échelle de la solution. Au contraire, plus la solution s'éloigne de  $P$  (et se rapproche virtuellement de  $T$ ), plus l'échelle de la plage temporelle devient déterminante pour qualifier l'échelle de la solution.

La figure 6.3 page suivante illustre ce phénomène. Nous considérons deux tâches  $P$  et  $P'$  telles que  $P'$  est de taille double de  $P$ . A ces deux tâches, nous associons deux plages temporelles  $T$  et  $T'$  telles que  $T'$  possède, dans les deux dimensions du schéma, une ouverture double de  $T$ . Pour chacune des quatre pyramides résultantes, nous construisons deux solutions. L'une d'elles est proche de  $P$  (respectivement de  $P'$ ) et l'autre proche de  $T$  (respectivement de  $T'$ ). On observe sur le schéma l'influence grandissante de l'échelle de  $T$  sur la taille des solutions dès lors que l'on s'éloigne de  $P$  : les solutions éloignées de  $P$  sont mieux différenciées par les échelles relatives de  $T$  et  $T'$  que par celles de  $P$  et de  $P'$ .

L'échelle de la tache P apparaît donc d'autant plus pertinente que les solutions qui la réalisent sont proches de P. Inversement, il est possible d'affirmer qu'à l'infini, l'échelle de la tache n'a aucune influence sur celle des solutions qui la réalisent : deux sections à l'infini de deux pyramides de même plage temporelle apparaissent ainsi quasiment identiques, quelle que soit l'échelle des bases de ces pyramides — l'une pouvant être dans l'absolu *infiniment* plus grande que l'autre.

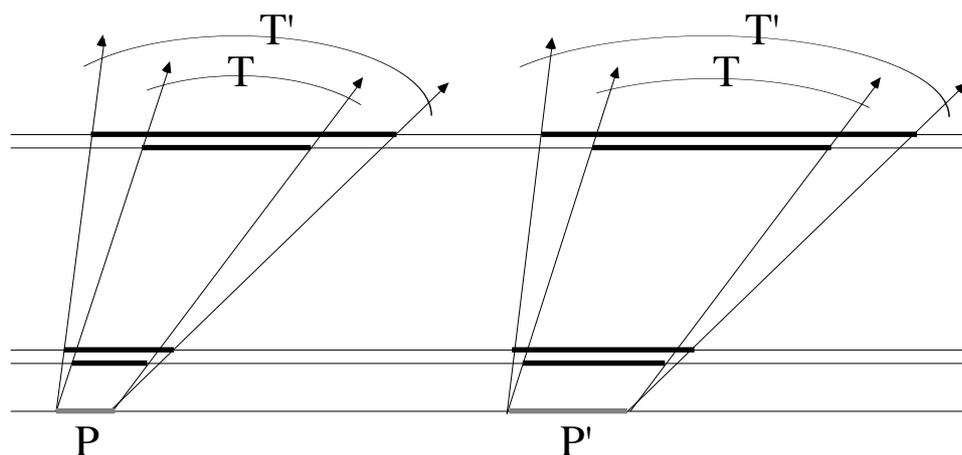


Figure 6.3 Influence des échelles de P et de T sur l'échelle de la solution

### 6.1.1.3 La position de la tache

La position de la tache P d'une proposition (P, S, T) détermine la zone de l'espace du projet sur laquelle est appliquée l'intention d'ensoleillement. Elle peut être définie par le centre géométrique du polygone P. Cette position n'a pas la même influence suivant qu'il s'agit d'une proposition de type *au soleil* ou une proposition de type *à l'ombre*.

Pour un contour et une échelle identiques, la taille d'un évidement réalisant une proposition de type (P, *au soleil*, T) est fonction du recul de la tache par rapport à l'objet évidé (figure 6.4 ci-dessous). Cependant, la relation entre le recul et la taille de l'évidement n'est pas linéaire, comme nous l'avons montré plus haut, puisque les évidements réalisés à différentes positions ne sont pas homothétiques entre eux.

Pour les propositions de type (P, *à l'ombre*, T), la position de la tache P semble moins déterminante puisqu'il existe une infinité de masques solutions réalisant cette proposition et qu'il est toujours possible de définir un masque à n'importe quelle distance de P. En ce sens, la position de la solution est géométriquement indépendante de la position de la tache dans le projet où elle est définie.

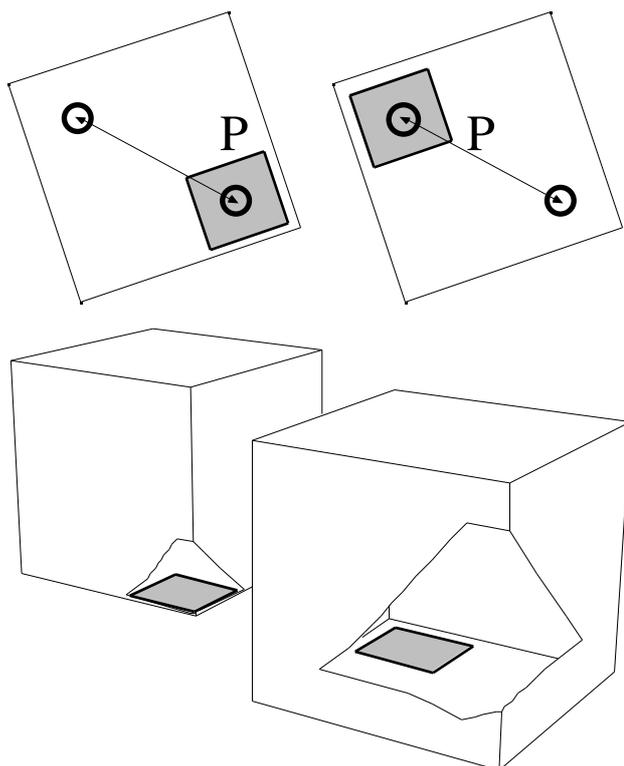


Figure 6.4. Influence de la position d'une tache d'ensoleillement sur l'évidement qu'elle détermine

Cependant, le plus souvent, une solution pertinente sera définie relativement aux objets existants du projet, et donc relativement à la position de la tache par rapport à ces objets. La figure 6.5 ci-dessous illustre ce fait. La même tache P est réalisée avec la même solution masque M en deux positions différentes. Dans le premier cas (à gauche), la position de P conduit à considérer M comme un élément nouveau, dissocié du projet ; dans le second cas (à droite), pour une position légèrement modifiée de P, le masque M devient

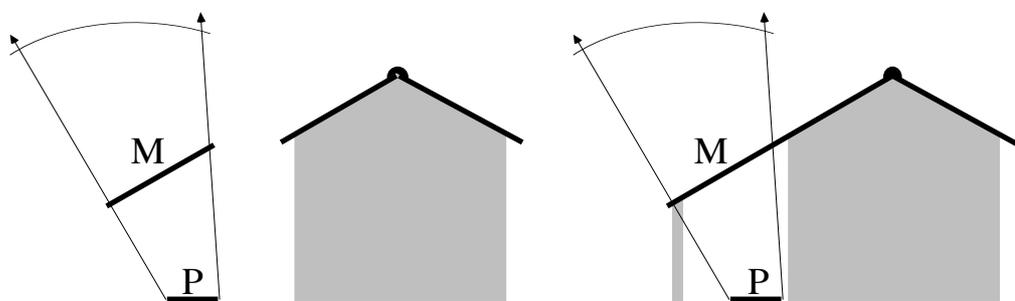


Figure 6.5 Positions relatives d'une tache d'ensoleillement et d'une solution masque associée

partie intégrante du projet. Il est probable que dans ce contexte, l'intention initiale du concepteur sera affinée et modifiée par le résultat qu'elle produit dans l'ensemble du projet.

Nous retrouvons à travers cet exemple simple une illustration du jeu, caractéristique du processus de conception, de la manipulation concomitante des formes et des intentions, jusqu'à un équilibre pertinent des unes et des autres (cf. chapitre premier).

#### 6.1.1.4 Spécifications d'une tâche en situation de conception

Notre problème est de déterminer une modalité pratique de représentation de la tâche P d'une proposition d'enseillement (P, S, T) en situation de conception. Nous avons noté :

- que la forme de la tâche n'est pas pertinente dans le cas général,
- que son échelle est d'autant plus pertinente que les solutions de la proposition sont proches de P,
- que sa position est pertinente, de manière absolue pour les propositions de type *au soleil* et de manière relative pour les propositions de type *à l'ombre*.

Comment représenter P ? Si la forme de la tâche n'a pas de signification réelle dans le projet, il faut bien cependant lui en donner une pour calculer la pyramide d'enseillement  $\Pi(P, T)$ . Cette forme peut être a priori quelconque à condition de pouvoir :

- être facilement déformée pour contrôler l'échelle de la tâche,
- être facilement localisée (i.e. posséder un centre géométrique clairement défini) pour permettre le contrôle de sa position dans le projet et la manipulation des intentions parallèlement à celle des formes solutions.

Deux entités géométriques planes satisfont ces exigences, indépendamment d'une géométrie de contour : l'ellipse et le rectangle. L'option que nous avons prise pour le développement de *Solimac* consiste à utiliser systématiquement un rectangle pour représenter une tâche d'enseillement. Ce choix est justifié par au moins deux raisons : d'une part, il est facile de calculer une pyramide à base rectangulaire (cf. section 5.2 du chapitre précédent) ; d'autre part, le rectangle est déformable, il possède un centre géométrique identifié et il peut être mesuré et maillé facilement.

Ce sont donc des tâches d'enseillement rectangulaires que nous manipulons avec le logiciel *Solimac*. Nous considérons alors que l'intention du concepteur représentée par ce rectangle est localisée (« sur cet objet plutôt que sur un autre ») et dimensionnée (« plutôt grand que petit »), mais pas délimitée. La tâche représente une *zone* d'enseillement dont la position et les dimensions dans le projet sont les deux seuls paramètres discriminants.

### 6.1.2 La plage temporelle, repérage du « temps vécu »

Notre méthode permet de réaliser une tache d'ensoleillement P pour l'ensemble des instants d'une plage temporelle T. En posant une hypothèse de continuité sur les trajectoires solaires apparentes dans notre géométrie de l'ensoleillement (cf. § 4.1.1.2), nous avons considéré qu'une plage temporelle est un ensemble continu quelconque d'instant de l'espace d'ensoleillement  $E_\lambda$ , c'est-à-dire un ensemble continu de directions apparentes du soleil à la latitude  $\lambda$ .

Du point de vue géométrique, une plage temporelle T peut donc être considérée comme un carreau de surface quelconque sur les trajectoires solaires de la voûte céleste. La figure 6.6 ci-dessous montre ainsi deux plages temporelles à la latitude  $47^\circ$  Nord.

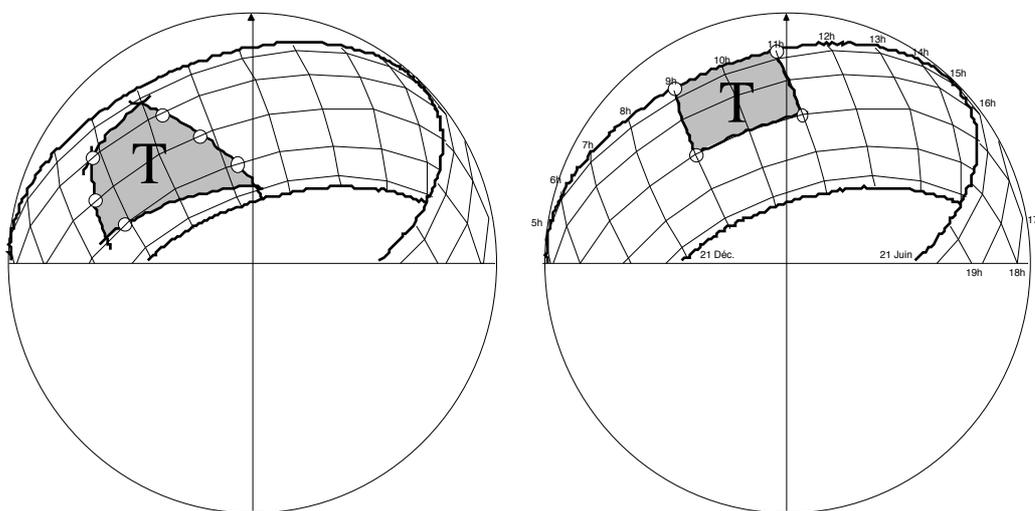


Figure 6.6. Deux plages temporelles à la latitude  $47^\circ$  Nord

Cependant, tout comme les taches d'ensoleillement, les plages temporelles n'ont de signification que dans le contexte du projet. Elles représentent implicitement les activités humaines qui s'établissent dans les lieux projetés, aux rythmes des saisons de l'année solaire et des séquences de la journée solaire. Les plages temporelles sont donc des représentations tacites des usages contenus par les lieux en cours de conception.

Dès lors, une intention d'ensoleillement est nécessairement liée à un usage des formes qui la portent. Un concepteur qui formule une telle intention sous la forme d'une proposition (P, S, T) doit donc pouvoir représenter la plage T dans un système de repérage temporel qui puisse rendre compte, en partie au moins, des activités implicites sous-entendues par la proposition. Se pose donc la question : Comment représenter T ?

Cette nouvelle question nous amène à considérer le problème délicat de la représentation du temps relativement aux activités humaines. La complexité de ce problème est très bien décrite par E.T Hall (1984) qui nous montre l'influence de notre culture et de nos activités passagères sur la représentation que nous avons de l'écoulement du temps. Suivant Hall, il deviendrait même impossible d'établir un système de repérage universel conforme à tous puisque chacun de nous construit ses propres temporalités et sa mémoire du temps.

L'approche que nous proposons ici n'a pas la prétention de résoudre ce problème. Plus simplement, nous avons souhaité pouvoir échapper aux représentations conventionnelles du temps absolu. Nous désignons par là toutes les représentations des plages temporelles du type : de 8 heures 15 à 12 heures 30, du 13 mars au 21 juin. Elles nous semblent non seulement lourdes mais surtout peu signifiantes pour la dénotation des activités humaines. Quelles images intuitives provoquent de telles plages temporelles ? Qu'imaginons-nous pouvoir faire de 13 heures à 15 heures du 21 décembre au 21 mars ? Ne sommes nous pas plus enclins à considérer la plage équivalente exprimée intuitivement comme *le début d'après-midi en hiver* ?

C'est précisément ce repérage sémantique intuitif, par les mots ordinaires, qui nous a semblé le mieux convenir à une représentation adéquate des plages temporelles en situation de conception. C'est ce que nous désignons comme le repérage du *temps vécu* (l'expression apparaissant par ailleurs évocatrice puisqu'elle est utilisée par de nombreux auteurs avec des acceptions différentes).

Nous avons donc cherché à modéliser ces expressions temporelles du temps vécu en construisant un système de repérage pratique des plages temporelles ainsi produites. C'est ce que nous exposons ici. Dans un premier point, nous inventorions les principales manifestations sémantiques relatives au repérage temporel en français. Nous montrons ensuite que ces expressions sont bien représentées par un maillage des trajectoires solaires apparentes que nous décrivons. Nous discutons enfin les propriétés de ce modèle.

#### 6.1.2.1 Repérage sémantique du temps vécu

Les phénomènes d'ensoleillement s'inscrivent dans une temporalité rythmée par les deux cycles du jour solaire et de l'année solaire. Par opposition au temps absolu, linéaire, nous définissons le temps vécu comme l'ensemble des situations temporelles issues de la composition des cycles circadien et annuel. Ces situations sont décrites en français par un ensemble d'expressions, représentant chacune des deux dimensions du mouvement solaire : le jour (matin, midi, après-midi, etc.) et l'année (saisons et mois). Ces expressions peuvent être considérées comme des compositions d'entités sémantiques simples, comme l'illustre le tableau de la figure 6.7 page suivante.

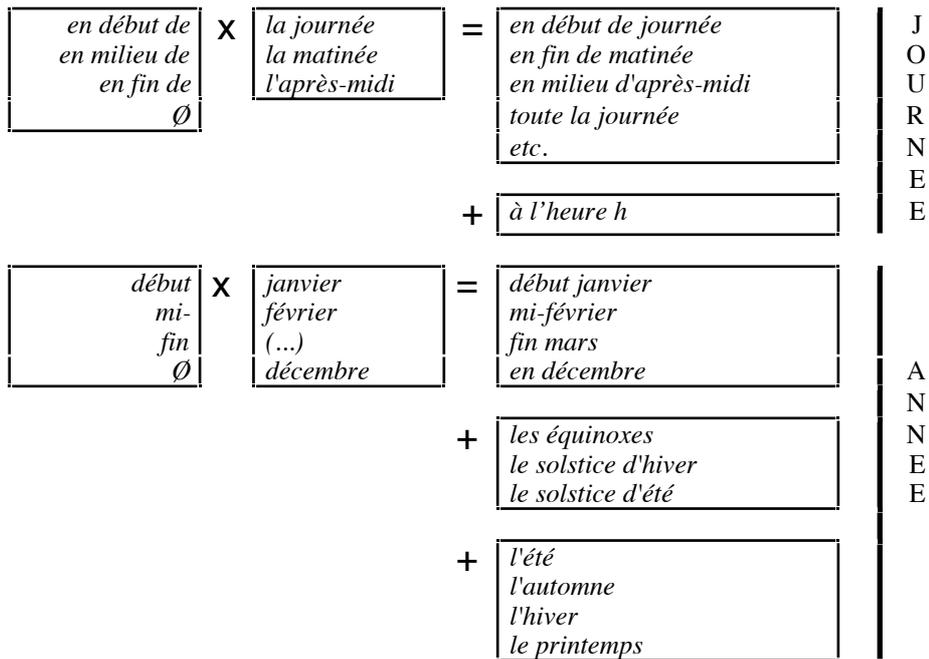


Figure 6.7. Composition des expressions du temps vécu

Sur la dimension journalière du mouvement solaire, les expressions que nous retenons sont des séquences de la journée ou des demi-journées (matin, après-midi) définies par les opérateurs *en début de...*, *au milieu de...*, *en fin de...*. A ces plages temporelles peuvent s'ajouter toutes les heures définies dans le système de repérage absolu.

Sur la dimension annuelle, nous considérons les mois, les saisons et certaines journées caractéristiques du mouvement solaire (équinoxes et solstices). Les mois sont composés en trois séquences, de la même façon que les demi-journées.

En suivant ces expressions simples, nous pouvons repérer 580 plages temporelles de l'année solaire (en ne considérant ni les solstices, ni les équinoxes, ni les heures fixes). Ces plages s'expriment par des formules du type : *en milieu de journée début avril*, *à midi en automne*, *toute la journée en décembre*, etc.

Il existe d'autres expressions ordinaires susceptibles d'être ajoutées à celles-ci : certaines représentations des périodes (*la semaine*, *la fin de semaine*, *le trimestre*, etc.), les expressions de localisation relative (*aujourd'hui*, *demain*, *avant*, *après*, *pendant*, *à partir de*, etc.), les expressions de fréquence (*toujours*, *jamais*, *souvent*, *parfois*, etc.) ainsi que toutes les représentations temporelles implicites (*les vacances d'été*, *l'heure du déjeuner*, *la sieste*, *à la rentrée des classes*, etc.). Nous ne les avons pas envisagées bien qu'elles pourraient trouver des équivalences dans notre modèle.

### 6.1.2.2 Repérage du temps vécu sur les trajectoires solaires

Ce système de repérage temporel n'est utile que si nous savons lui faire correspondre des plages temporelles explicites, c'est-à-dire des carreaux de surface sur les trajectoires solaires de la voûte céleste.

Pour ce faire, nous avons mis au point un maillage des trajectoires solaires qui établit ces correspondances. Ce maillage est défini par deux ensembles de courbes représentées par la figure 6.8 ci-dessous :

- les courbes associées aux trajectoires solaires de certaines journées de l'année solaire que nous appelons *jours tests* (courbes pseudo-horizontales de la figure 6.8),
- les courbes associées à certaines heures fictives, que nous appelons heures élastiques (nous verrons pourquoi), et auxquelles nous associons des *instants tests* (centre des heures élastiques, courbes pseudo-verticales de la figure 6.8).

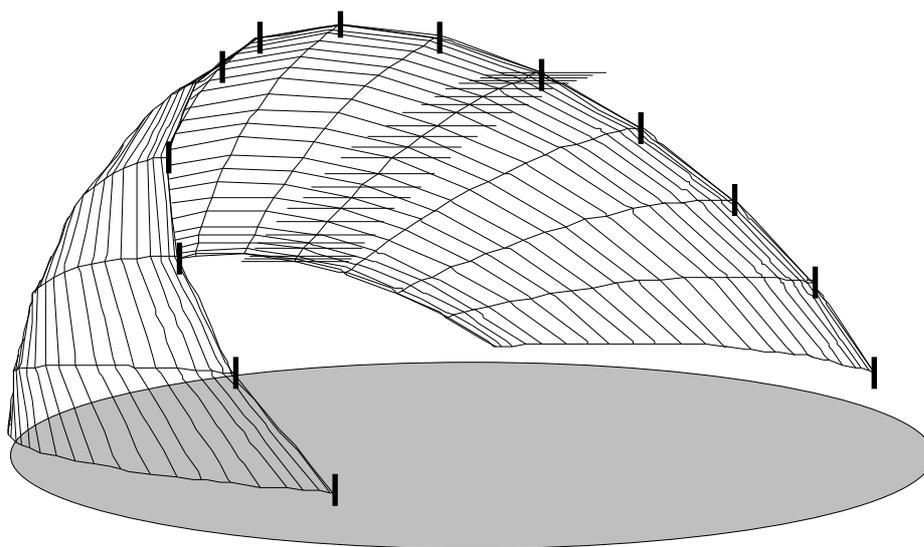


Figure 6.8. Le maillage du temps vécu sur les trajectoires solaires

Les jours tests sont en nombre arbitraire (au maximum 183, nombre de jours de l'année solaire). Dans notre modèle, la précision des expressions temporelles ne dépasse pas le tiers du mois, soit 10 jours (*début, milieu, fin du mois*). En utilisant 4 jours tests par mois, nous pouvons échantillonner l'année solaire en 24 jours tests comme le montre le tableau de la figure 6.9 page suivante. Chaque décade est alors représentée par 3 jours tests.

Les instants tests correspondent aux centres temporels de ce que nous appelons les « heures élastiques » du temps vécu. Les heures absolues ont une durée fixe, de sorte que les jours de l'année solaire ont un nombre d'heures

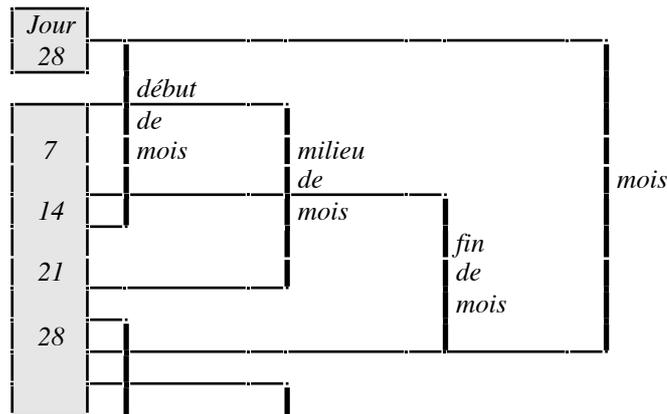


Figure 6.9. Échantillonnage des jours tests par mois

variable, suivant la latitude. Or, la caractéristique du temps vécu est de représenter de manière identique, c'est-à-dire par une même expression sémantique, des périodes temporelles de durées différentes : quel que soit le jour de l'année, nous désignons comme *le matin* la période qui va du lever du soleil à midi. De même, nous ne faisons pas de différence sémantique entre le milieu d'après-midi en été et la même période en hiver, bien que nous sachions que, du point de vue solaire au moins, ces deux périodes ont des durées et des localisations temporelles très différentes (en temps absolu, elles sont disjointes comme le montre le tableau 6.14).

Pour représenter les expressions sémantiques du temps vécu, il nous faut donc un nombre constant d'heures, quel que soit le jour de l'année. En contrepartie, ces heures possèdent une durée variable suivant les jours : elles deviennent en quelque sorte « élastiques », augmentant continûment du solstice d'hiver au solstice d'été et diminuant symétriquement suivant la déclinaison du soleil du solstice d'été au solstice d'hiver.

Le nombre d'heures élastiques par jour est a priori indifférent — si ce n'est qu'il doit être impair si l'on veut faire correspondre midi à un instant test. Dans le modèle que nous proposons, nous l'avons fixé à 13. Ces 13 heures ont une durée relative qui varie de 38 minutes le 21 décembre à 72 minutes le 21 juin. Les instants tests définis plus haut (figure 6.8) correspondent au centre temporel de chacune de ces heures. Quelle que soit le jour de l'année solaire, le  $n$ -ième instant représente donc toujours la même position relative dans la journée, égale à l'heure de lever plus  $n / 13$ .

L'équivalence que nous faisons entre les expressions du temps vécu et les instants tests est donnée dans le tableau de la figure 6.10 page suivante. Au total, 24 jours tests avec, pour chacun, 13 instants tests, soit 312 valeurs, suffisent à représenter toutes les plages temporelles utiles à la description de l'ensoleillement avec la précision relative du temps vécu.

journée												
début de journée			milieu de journée				fin de journée					
matinée						midi	après-midi					
début de matinée	milieu de matinée		fin de matinée		début d'après-midi		milieu d'après-midi		fin d'après-midi			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Figure 6.10. Équivalence entre instants tests et temps vécu

Autrement dit, dans notre modèle, les 580 expressions temporelles du temps vécu s'expriment suivant 312 positions solaires. Une plage temporelle est alors représentée par la composition de deux intervalles d'instant tests et de jours tests, correspondant à une maille ou à un groupe de mailles sur les trajectoires solaires apparentes. Ainsi, la plage temporelle correspondant au début de l'après-midi l'été peut-elle s'écrire par la composition des intervalles [instant 8, instant 9] \* [jour 172, jour 264] et correspond au carreau de surface représenté sur la figure 6.11 ci-dessous.

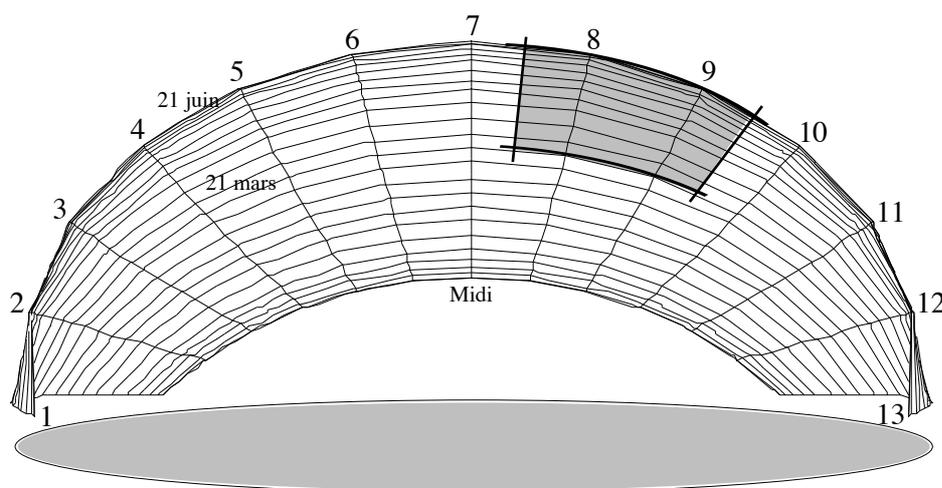


Figure 6.11. Plage temporelle du début d'après-midi l'été

Le repérage des jours est ici effectué suivant le calendrier de l'année civile (le 172<sup>e</sup> jour est le 21 juin et le 264<sup>e</sup>, le 21 septembre). Pour simplifier ce repérage sur l'année solaire, il est possible d'utiliser le calendrier de conversion de la figure 6.12 page suivante. Sur ce calendrier, les jours sont numérotés suivant l'année civile (chiffre de gauche de chaque colonne) et suivant l'année solaire (chiffre de droite). Celle-ci commence au solstice d'été (21 juin, numéroté zéro), et se termine au jour précédent le solstice d'hiver (20 décembre, numéroté 182). Les jours possédant le même numéro dans l'année solaire sont équivalents du point de vue de l'ensoleillement.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1	171	32 140	60 112	91 81	121 51	152 20	182 10	213 41	244 72	274 102	305 133	335 163
2	170	33 139	61 111	92 80	122 50	153 19	183 11	214 42	245 73	275 103	306 134	336 164
3	169	34 138	62 110	93 79	123 49	154 18	184 12	215 43	246 74	276 104	307 135	337 165
4	168	35 137	63 109	94 78	124 48	155 17	185 13	216 44	247 75	277 105	308 136	338 166
5	167	36 136	64 108	95 77	125 47	156 16	186 14	217 45	248 76	278 106	309 137	339 167
6	166	37 135	65 107	96 76	126 46	157 15	187 15	218 46	249 77	279 107	310 138	340 168
7	165	38 134	66 106	97 75	127 45	158 14	188 16	219 47	250 78	280 108	311 139	341 169
8	164	39 133	67 105	98 74	128 44	159 13	189 17	220 48	251 79	281 109	312 140	342 170
9	163	40 132	68 104	99 73	129 43	160 12	190 18	221 49	252 80	282 110	313 141	343 171
10	162	41 131	69 103	100 72	130 42	161 11	191 19	222 50	253 81	283 111	314 142	344 172
11	161	42 130	70 102	101 71	131 41	162 10	192 20	223 51	254 82	284 112	315 143	345 173
12	160	43 129	71 101	102 70	132 40	163 9	193 21	224 52	255 83	285 113	316 144	346 174
13	159	44 128	72 100	103 69	133 39	164 8	194 22	225 53	256 84	286 114	317 145	347 175
14	158	45 127	73 99	104 68	134 38	165 7	195 23	226 54	257 85	287 115	318 146	348 176
15	157	46 126	74 98	105 67	135 37	166 6	196 24	227 55	258 86	288 116	319 147	349 177
16	156	47 125	75 97	106 66	136 36	167 5	197 25	228 56	259 87	289 117	320 148	350 178
17	155	48 124	76 96	107 65	137 35	168 4	198 26	229 57	260 88	290 118	321 149	351 179
18	154	49 123	77 95	108 64	138 34	169 3	199 27	230 58	261 89	291 119	322 150	352 180
19	153	50 122	78 94	109 63	139 33	170 2	200 28	231 59	262 90	292 120	323 151	353 181
20	152	51 121	79 93	110 62	140 32	171 1	201 29	232 60	263 91	293 121	324 152	354 182
21	151	52 120	80 92	111 61	141 31	172 0	202 30	233 61	264 92	294 122	325 153	355 182
22	150	53 119	81 91	112 60	142 30	173 1	203 31	234 62	265 93	295 123	326 154	356 181
23	149	54 118	82 90	113 59	143 29	174 2	204 32	235 63	266 94	296 124	327 155	357 180
24	148	55 117	83 89	114 58	144 28	175 3	205 33	236 64	267 95	297 125	328 156	358 179
25	147	56 116	84 88	115 57	145 27	176 4	206 34	237 65	268 96	298 126	329 157	359 178
26	146	57 115	85 87	116 56	146 26	177 5	207 35	238 66	269 97	299 127	330 158	360 177
27	145	58 114	86 86	117 55	147 25	178 6	208 36	239 67	270 98	300 128	331 159	361 176
28	144	59 113	87 85	118 54	148 24	179 7	209 37	240 68	271 99	301 129	332 160	362 175
29	143		88 84	119 53	149 23	180 8	210 38	241 69	272 100	302 130	333 161	363 174
30	142		89 83	120 52	150 22	181 9	211 39	242 70	273 101	303 131	334 162	364 173
31	141		90 82		151 21		212 40	243 71		304 132		365 172

Figure 6.12. Calendrier de conversion année civile / année solaire

Enfin, signalons pour l'anecdote que notre modèle du temps vécu, faisant correspondre les représentations temporelles ordinaires des activités humaines à un maillage des trajectoires solaires en heures élastiques est loin d'être original. Il constitue en réalité un modèle ancestral de représentation du temps lié aux cadrans solaires. Suivant G. Oudenot (1983), il était utilisé

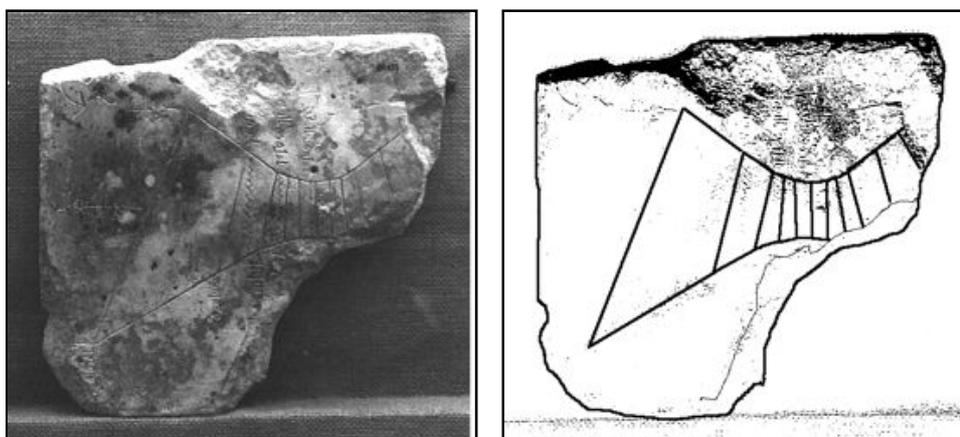


Figure 6.13. Repérage horaire en temps vécu

Pierre gravée arabe (Musée archéo. de Cordoue, Esp., Photo Ch. Marenne)

par les Babyloniens et les premiers Italiens. On le trouve également chez les certains peuples arabes de la période du moyen âge occidental. La figure 6.13 page précédente montre ainsi une pierre gravée d'origine arabe sur laquelle le mouvement du soleil est représenté par un gnomon divisé en heures élastiques. Le nombre d'heures par jour est apparemment de 12 dans cette représentation (le midi semble être au centre de l'heure médiane). De même, ce système est actualisé de nos jours : les démonstrations pédagogiques du planétarium de Nantes l'utilisent en complément de la représentation classique en heures absolues.

### 6.1.2.3 Équivalences horaires du temps vécu

Le système du temps vécu s'utilise de manière intuitive — c'est la principale raison qui nous l'a fait choisir pour le repérage temporel en situation de conception. Cependant, il n'est pas inutile de connaître les équivalences horaires des plages qu'il détermine. En particulier, ces équivalences permettent de situer dans notre modèle un événement particulier dont on connaît l'heure et la date.

Le tableau de la figure 6.14 ci-dessous donne ces résultats pour le 21 de chaque mois de l'année solaire à la latitude 47° Nord (heure solaire à dix minutes près, sans correction de longitude). Nous observons que l'heure élastique du temps vécu varie de 38 minutes en décembre à 72 minutes en juin. Ainsi, la période du début d'après-midi (instants 8 et 9) varie-t-elle proportionnellement de 1 heure et 20 minutes en décembre à 2 heures et 25 minutes en juin. La sieste n'est-elle pas plus longue en été qu'en hiver ?

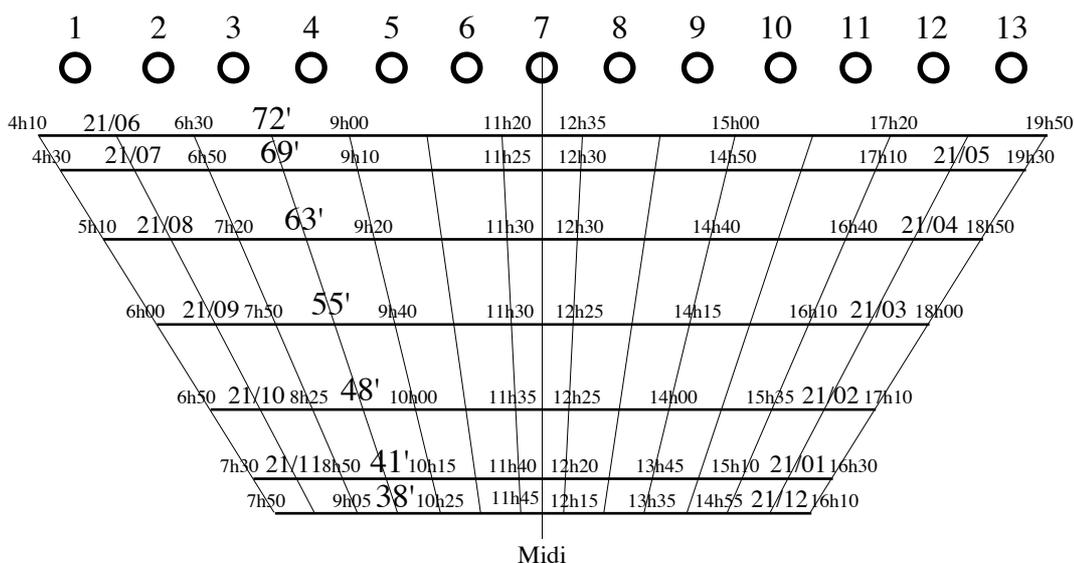


Figure 6.14. Équivalences horaires du temps vécu, latitude 47° Nord  
Heures solaires à +/- 10 minutes

Sans doute les rythmes sociaux imposés et les corrections horaires d'été et d'hiver appliquées en Europe rendent-ils ce modèle en partie erroné. Ainsi, suivant le tableau, nous quittons le travail en été (+ 2 heures) en plein milieu du milieu d'après-midi... Attitude laxiste au demeurant qui met en évidence la distorsion entre le temps solaire et le temps social dans l'organisation de nos vies contemporaines. Nous supposons cependant que notre modèle du temps vécu reste un outil utile, même approximatif pour la représentation des plages temporelles en situation de conception.

#### 6.1.2.4 Notre sensibilité temporelle à l'ensoleillement

Pour justifier le modèle du temps vécu d'un autre point de vue, nous pouvons tenter d'interroger notre propre sensibilité temporelle aux phénomènes d'ensoleillement. Tout système de repérage temporel d'un phénomène physique dépend du rythme propre de ce phénomène d'une part, mais aussi de la sensibilité de notre perception de ce phénomène d'autre part. Les phénomènes sonores ne sont pas perçus avec la même sensibilité que les phénomènes thermiques par exemple. Combien de temps a-t-il fait chaud hier ? Munis de notre seule perception, pouvons-nous répondre plus précisément que : une bonne partie de l'après-midi ? Combien de temps a duré cette alarme ? Au moins 2 minutes 30, c'était insupportable !

Nous ne possédons pas de données expérimentales sur notre sensibilité temporelle aux phénomènes d'ensoleillement. Notre perception nous laisse cependant croire que cette sensibilité s'exerce sur une échelle qui comporte le quart d'heure comme unité. Nous pouvons aisément dire que le soleil pénètre dans cette pièce en été de 14 heures 30 à 17 heures environ ; qu'il baisse d'environ un quart d'heure les mois qui suivent ; ou encore qu'il y a un quart d'heure, nous avons de l'ombre sur la terrasse... Pouvons-nous être plus précis en situation ordinaire ? Hors des phases de transition brutale des états d'ensoleillement que nous percevons instantanément, il nous semble que nous ne savons pas repérer plus précisément les phénomènes d'ensoleillement qui peuplent notre environnement quotidien.

Qu'en est-il de cette sensibilité dans notre modèle du temps vécu ? Nous constatons que la précision des périodes journalières de ce modèle varie comme les heures élastiques. Autrement dit, pour localiser un événement d'ensoleillement dans ce modèle, nous avons une marge d'erreur qui varie de 36 minutes en juin ( $72 / 2$ ) à 19 minutes en décembre ( $38 / 2$ ), c'est-à-dire au maximum le double de notre sensibilité temporelle à l'ensoleillement si nous l'estimons au quart d'heure. Le modèle peut même être considéré comme précis, du point de vue de la description de l'ensoleillement, si nous estimons notre sensibilité temporelle ordinaire à la demi-heure.

Ces éléments nous confortent dans l'idée que le modèle du temps vécu à 13 heures élastiques est suffisant pour le repérage temporel en situation de

conception. En deçà de 13 heures, sa précision devient médiocre et il n'est plus possible de segmenter correctement les séquences des principales activités humaines au cours de la journée. Au delà de 13 heures, la précision du modèle devient supérieure à notre propre sensibilité au phénomène, c'est-à-dire inutile.

#### 6.1.2.5 Cartes spatio-temporelles d'ensoleillement en temps vécu

C'est donc ce modèle du temps vécu que nous avons choisi de développer dans le logiciel *Solimac*. Nous l'utilisons pour la spécification d'une plage temporelle et donc pour la réalisation d'une proposition d'ensoleillement suivant notre méthode de simulation inverse. Les propositions réalisées s'expriment alors par des formules du type : *cette zone doit être au soleil en début d'après-midi l'hiver, celle-ci à l'ombre le matin l'été, etc.*

Si le temps vécu donne une échelle convenable pour le repérage temporel des phénomènes d'ensoleillement, il peut être utilisé pour l'exposition des états d'ensoleillement d'une scène dans un processus de simulation directe. Nous pouvons alors envisager d'exposer des propriétés d'ensoleillement par des formules du type : *cette zone est bien ensoleillée le matin l'été, protégée en début d'après-midi en juin, sombre en décembre, etc.*

C'est à cette fin d'exposition de propriétés dans un modèle de repérage temporel intuitif que nous avons introduit dans *Solimac* la notion de carte spatio-temporelle d'ensoleillement d'une zone de l'espace. Cette notion apporte une solution au problème de l'organisation des données spatio-temporelles résultant des simulations directes de l'ensoleillement.

Une carte spatio-temporelle d'ensoleillement est un tableau à quatre dimensions associé à une zone plane de la scène étudiée (une face d'un objet de la scène par exemple). Deux des quatre dimensions de la carte décrivent un maillage quadrangulaire plan de la zone considérée. Chacun des centres des mailles est appelé point test (figure 6.15 page suivante). Les deux autres dimensions du tableau décrivent l'ensoleillement de chaque point test de ce maillage dans le modèle du temps vécu (13 instants tests par jour et 24 jours tests sur l'année solaire).

Une carte d'ensoleillement est donc établie en deux étapes. La première consiste à construire le maillage de la zone étudiée en points tests, avec un pas de discrétisation donné. La seconde étape consiste à effectuer la simulation d'ensoleillement en chaque point test pour les 312 instants tests (13 fois 24) de l'année solaire dans le modèle du temps vécu. Cette simulation est faite suivant la technique du lancer de rayons solaires décrite au § 2.2.3.3.

Une telle carte possède plusieurs avantages pratiques pour l'analyse des états d'ensoleillement d'une scène. En particulier, il est possible d'afficher

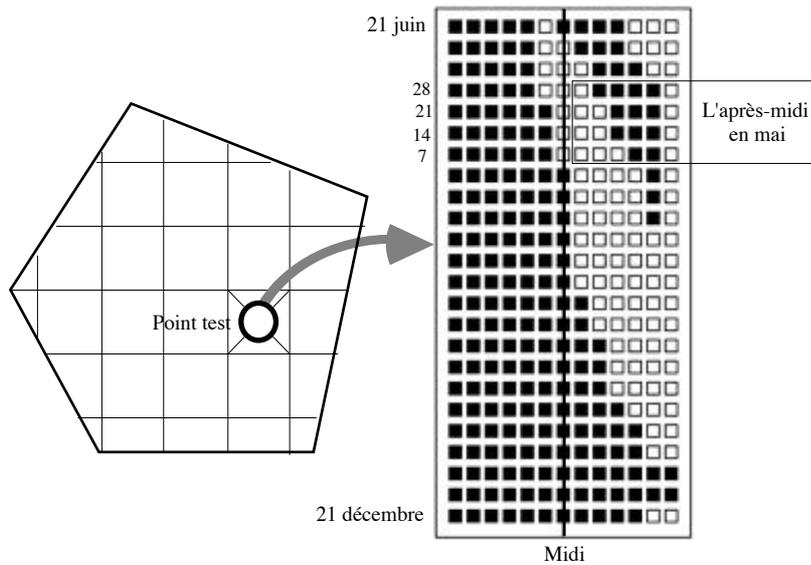


Figure 6.15. Principe d'une carte spatio-temporelle d'enseillement

ces états en chaque point du maillage de la zone considérée pour n'importe quelle plage temporelle du temps vécu. On utilise pour ce faire la moyenne des états d'enseillement binaires des instants tests représentant cette plage. La figure 6.15 montre par exemple un état d'enseillement moyen de 0.5 pour le point test considéré durant la période de l'après-midi en mai (12 instants *au soleil* sur 24).

En répétant ce calcul simple pour chacun des points du maillage et en utilisant un code de couleurs adapté, on construit facilement une représentation graphique intuitive de l'état d'enseillement de la zone pour n'importe quelle plage temporelle du temps vécu. Les figures 5.27, 5.29 et 5.32 du chapitre précédent ont été construites suivant ce type de représentation. La figure 6.32 de ce chapitre montre la représentation d'une carte d'enseillement dans *Solimac*.

La précision des simulations ainsi effectuées ne rivalise pas avec celle des méthodes plus classiques établies dans le repérage du temps absolu. Cependant, si l'on considère à la fois l'intérêt d'une représentation concise et pratique des résultats des simulations et la pertinence de l'échelle du temps vécu relativement à notre sensibilité temporelle aux phénomènes d'enseillement, nous pouvons supposer que ce modèle est suffisant pour l'exposition des propriétés d'enseillement dans la cadre du projet architectural.

## 6.2 Génération et exploration des solutions

Nous avons exposé deux modalités pratiques de représentation des éléments d'une proposition d'ensoleillement  $(P, S, T)$  en situation de conception : nous pouvons dessiner un rectangle dans un plan pour représenter la tâche  $P$  à réaliser et nous pouvons utiliser le modèle du temps vécu pour définir la plage temporelle  $T$  associée.

Nous savons calculer une pyramide d'ensoleillement à base rectangulaire, quelle que soit sa plage temporelle (cf. section 5.2). Connaissant cette pyramide, nous pouvons déterminer les solutions de la proposition. En particulier, nous savons déterminer les solutions minimales des propositions de type  $(P, \text{au soleil}, T)$  quelle que soit leur valeur de vérité, et les solutions minimales des propositions de type  $(P, \text{à l'ombre}, T)$  fausses, c'est-à-dire telles que la proposition complémentaire est vraie (cf. § 4.3.2.2).

C'est un fait général que les problèmes inverses possèdent plusieurs, voire une infinité de solutions. De même, notre méthode de simulation inverse de l'ensoleillement produit potentiellement l'infinité des solutions réalisant une proposition. En particulier, notre méthode produit potentiellement l'infinité des solutions masques minimales d'une proposition de type *à l'ombre*. Ces solutions représentent une infinie diversité de formes comme nous le montrons ci-dessous. Se pose donc le problème de leur génération et de l'exploration de leurs formes dans un cadre de conception architecturale.

Pour répondre à ce problème, nous proposons la notion d'exploration graphique interactive de l'ensemble des solutions d'une proposition d'ensoleillement. En premier lieu, nous décrivons la diversité des formes masques engendrées par les pyramides d'ensoleillement associées aux propositions de type *à l'ombre*. Nous réduisons ces solutions aux masques plans et nous montrons qu'il est possible d'explorer l'ensemble de ces masques plans de manière interactive et graphique. Nous exposons les modalités pratiques de cette exploration telle que nous l'avons mise en oeuvre dans *Solimac*. Nous discutons la notion d'interprétation architecturale des formes brutes ainsi produites. Enfin, nous envisageons la possibilité d'une exploration automatique dans certaines situations que nous précisons.

### 6.2.1 Diversité des formes solutions d'une proposition

Nous savons formaliser l'ensemble des solutions d'une proposition  $(P, S, T)$  en utilisant la pyramide  $\Pi(P, T)$  associée. Les solutions minimales des propositions élémentaires sont les intersections exactes entre la pyramide d'ensoleillement et les objets de la scène étudiée. Pour les propositions de type

( $P$ , *au soleil*,  $T$ ), la solution minimale est unique et définie par l'évidement de la scène par la pyramide  $\Pi(P, T)$  (cf. § 4.3.2.1). Il n'y a donc pas lieu d'envisager une exploration des solutions de ce type de proposition.

A contrario, les propositions de type ( $P$ , *à l'ombre*,  $T$ ) admettent une infinité de solutions masques minimales qui correspondent à l'intersection de la pyramide  $\Pi(P, T)$  avec une surface quelconque partageant l'espace (cf. § 4.3.2.2). Il est impossible en pratique d'explorer cette infinité de solutions. A défaut, il est possible d'explorer une classe particulière de solutions, définie par exemple par une propriété géométrique comme la planéité. L'exploration des solutions minimales planes de la proposition ( $P$ , *à l'ombre*,  $T$ ) revient alors à définir l'ensemble des intersections possibles entre un plan et la pyramide  $\Pi(P, T)$ , pourvu que ce plan coupe au moins un rayon de la pyramide  $\Pi(P, T)$  et ne coupe pas la tache  $P$  (cf. § 5.3.2.1).

En réduisant l'ensemble des solutions masques aux seuls masques plans, nous continuons d'observer une infinie diversité des formes de ces solutions. Cette diversité résulte des propriétés géométriques de la pyramide complexe d'ensevelissement : deux sections parallèles d'une même pyramide ne peuvent pas être obtenues l'une par l'autre par une transformation élémentaire. En particulier, ces deux sections ne sont pas homothétiques entre elles, comme nous l'avons montré au § 5.1.3.1. Il en résulte que chacune des sections planes de la pyramide d'ensevelissement présente une forme unique, qu'il n'est pas possible d'obtenir par une transformation simple d'une autre section. C'est en considérant ces propriétés de la pyramide d'ensevelissement que nous qualifions d'infinie la diversité des formes des masques plans solutions d'une proposition de type *à l'ombre*.

La figure 6.16 page suivante donne un aperçu de cette diversité en présentant six masques plans issus d'une même pyramide d'ensevelissement. Aucun de ces six masques ne peut être obtenu par une transformation simple de l'un des cinq autres. L'univers des formes solutions masques que représente la pyramide d'ensevelissement est donc infiniment riche.

## 6.2.2 Exploration interactive des solutions masques planes

Comment explorer cet univers de formes masques infiniment diversifiées ? La modélisation déclarative apporte différentes solutions aux problèmes d'exploration d'un univers de formes. Aucune d'elles cependant ne nous semble adaptée au projet d'architecture. En effet, elles supposent toutes une intervention minimale du concepteur et, en particulier, elles ne tirent pas parti de sa compétence graphique. A trop vouloir libérer le concepteur des difficultés de la modélisation, l'approche déclarative le prive finalement de l'exercice de ses compétences et de son plaisir à concevoir.

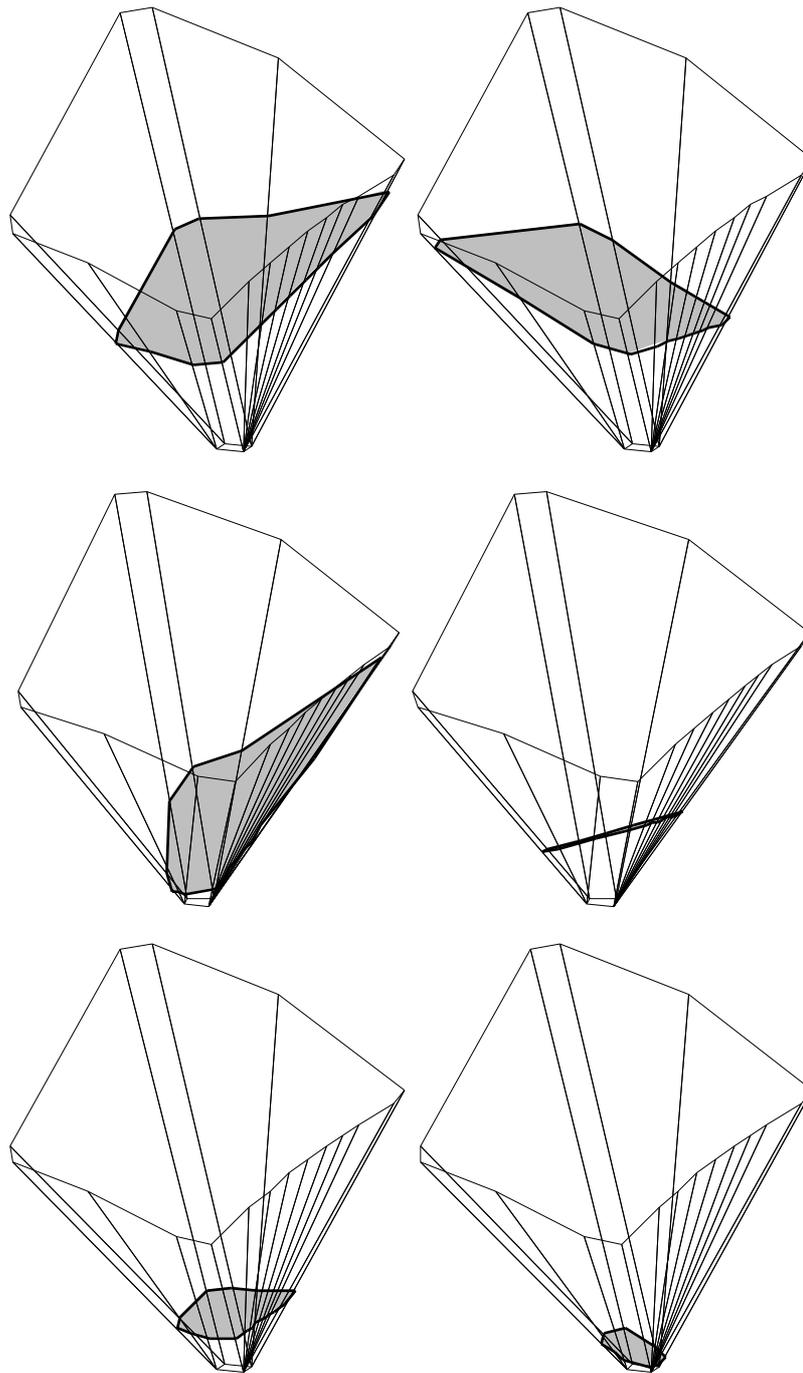


Figure 6.16. Diversité des solutions planes d'une proposition à l'ombre

La conception architecturale et la culture des architectes sont marquées par une forte autorité du dessin et de l'expression graphique en général. Le dessin n'est pas seulement un support d'expression mais aussi un outil de simulation graphique (Lebahar 1983). C'est par la médiation du dessin que sont créées et précisées les formes du projet réalisant les intentions du concepteur (cf. chapitre premier).

Suivant ce constat, nous avançons que l'exploration d'un univers de formes, lorsque ces formes présentent une richesse plastique infinie, est mieux réalisée par une approche graphique que par toute autre approche dans le cadre du projet d'architecture. C'est sur cette hypothèse que se fondent nos propositions pour l'exploration graphique interactive des masques solutions d'une proposition de type (P, à l'ombre, T).

Pour réaliser cette exploration, nous réduisons l'ensemble des solutions minimales aux seules solutions planes. L'ensemble de ces solutions peut être engendré par l'ensemble des transformations en translation et en rotation d'un plan dans l'espace. Nous appelons plan d'exploration ce plan. A chaque transformation du plan d'exploration telle que le plan transformé vérifie les conditions d'intersection avec la pyramide — i.e. le plan coupe au moins un rayon de  $\Pi(P, T)$  et ne coupe pas P — est associée une solution minimale plane de la proposition. Lorsque le plan d'exploration décrit l'espace par composition de translations et de rotations, l'intersection de ce plan avec la pyramide  $\Pi(P, T)$  décrit l'ensemble des solutions masques planes de la proposition (figure 6.17 ci-dessous).

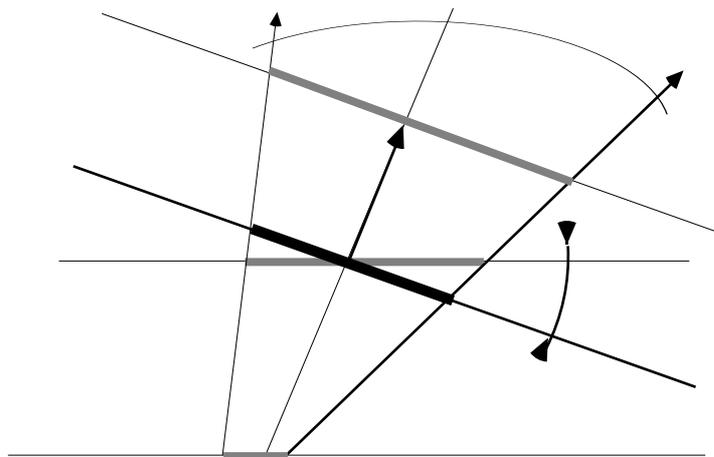


Figure 6.17. Principe d'exploration graphique des solutions masques

C'est cette méthode d'exploration que nous avons mise en oeuvre dans *Solimac*. En pratique, nous offrons au concepteur un plan d'exploration arbitrairement défini et des outils de transformation de ce plan par rotation et par translation dans l'espace. En appliquant ces outils, l'intersection du plan transformé avec la pyramide d'ensoleillement produit une nouvelle forme solution de la proposition (figure 6.18 page suivante). Le calcul de cette intersection s'avère suffisamment rapide pour rendre le processus d'exploration dynamique et intuitif : les formes apparaissent instantanément au fur et à mesure des transformations du plan d'exploration.

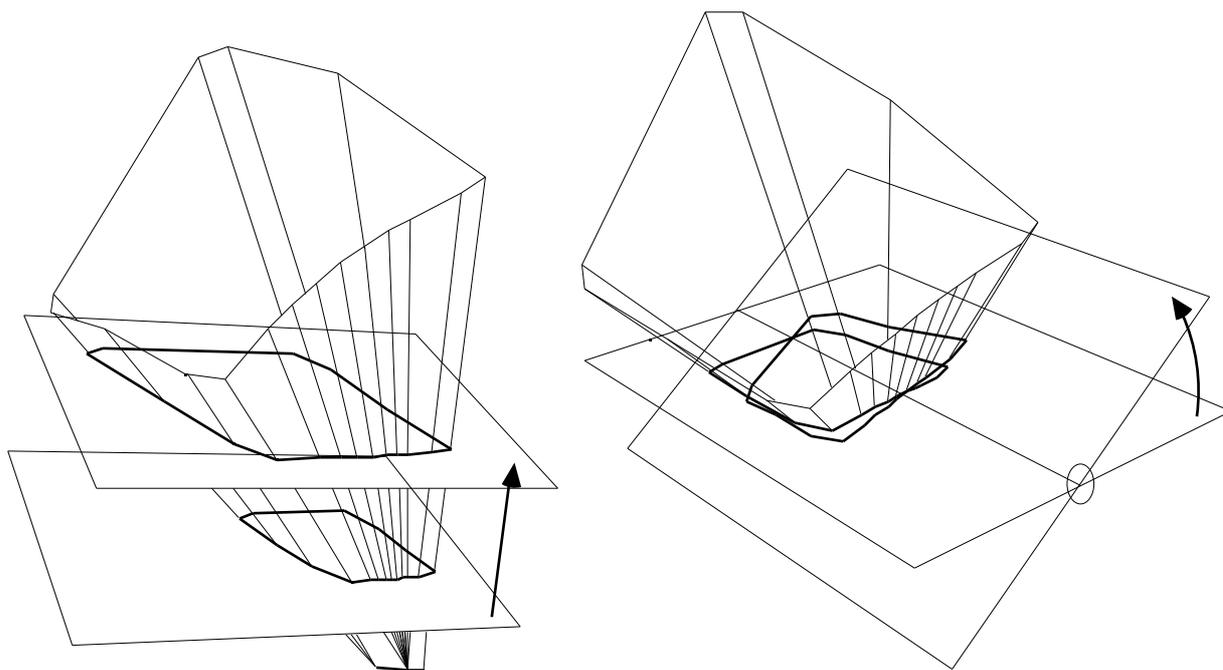


Figure 6.18. Exploration graphique interactive des solutions masques par translation et rotation d'un plan

Ce processus limite l'exploration des solutions aux seules formes planes. Ces formes présentent l'avantage d'être faciles à construire et sont compatibles avec la majorité des objets architecturaux. Des méthodes similaires peuvent être imaginées pour d'autres classes de formes, en particulier pour les surfaces paramétriques. Il est possible de calculer les solutions produites par de telles surfaces en utilisant le modelleur *Zoom* interfacé avec *Solimac* ; cependant, il n'est pas possible de cette manière d'explorer l'univers de ces formes lorsqu'elles sont solutions d'une proposition d'ensevelissement.

### 6.2.3 Interprétation architecturale des solutions brutes

Les solutions produites par l'exploration graphique interactive sont de forme brute puisqu'elles correspondent à l'intersection exacte entre la pyramide d'ensevelissement et le plan d'exploration. Le mode d'exploration graphique que nous proposons produit donc des formes dépourvues a priori d'une signification particulière dans le contexte du projet. Les solutions générées sont des objets « insensés » dans la mesure où la signification qu'ils portent dans le projet ne dépend que de l'interprétation du concepteur.

Cette approche présente à la fois un avantage et un inconvénient. Son avantage est de mettre en évidence des formes d'une grande richesse plastique ; ainsi, parmi toutes les formes qui apparaissent au cours du processus d'ex-

ploration graphique, certaines peuvent prétendre éveiller l'attention du concepteur, lui inspirant une solution originale au problème qu'il pose. Les formes brutes agissent alors comme un catalyseur de la créativité du concepteur. Elles suggèrent de multiples possibilités d'interprétation et sont donc porteuses de ce que nous pouvons définir comme un « potentiel plastique ». Cette analyse est plus particulièrement plausible si l'on considère la réalisation de propositions d'ensoleillement lors des premières phases de la conception, lorsque le projet n'est qu'un ensemble d'intentions informes (au sens propre) susceptibles de multiples interprétations. A ce stade du projet, la richesse plastique des formes prime sur leur pertinence constructive.

L'inconvénient de cette approche réside dans le fait que les solutions brutes ainsi produites ne correspondent que rarement à des objets constructibles dans le contexte du projet. Ces formes sont des maquettes, des esquisses, ébauches, prototypes ou modèles... qui devront recevoir une interprétation architecturale dans le projet finalisé. De ce point de vue, notre méthode d'exploration n'apporte pas de solutions réalistes aux propositions d'ensoleillement. C'est au concepteur qu'incombe le travail de rendre crédibles les formes brutes qu'il choisit pour réaliser une intention d'ensoleillement.

La figure 6.19 ci-dessous présente ainsi une interprétation architecturale d'un masque brut (en haut) produit par notre méthode pour réaliser une propriété d'ombrage sur la façade du bâtiment.

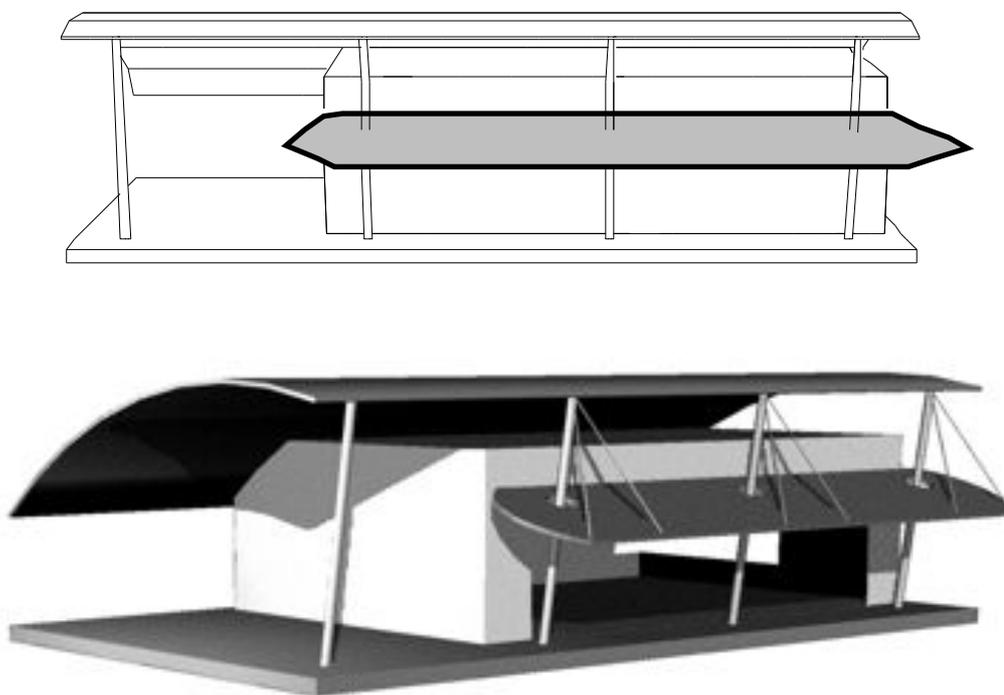


Figure 6.19. Interprétation architecturale d'un masque brut

Si nous voulions trancher sur l'intérêt de notre méthode d'exploration graphique, nous devrions mettre en balance ses avantages et ses inconvénients. Il nous faudrait alors comparer la richesse plastique des solutions d'une part et leur crédibilité constructive d'autre part. Cette opposition apparaît stérile du point de vue de la conception architecturale : les deux plateaux de la balance sont également essentiels au développement du projet et c'est bien le métier de l'architecte que de concilier la plastique et la pertinence (constructive, d'usage, économique, etc.) des formes qu'il conçoit.

### **6.2.4 Exploration automatique de formes réalistes**

Pour poursuivre cette idée, notons que notre méthode d'exploration graphique de solutions d'une proposition d'ensoleillement n'est pas antinomique d'autres méthodes d'exploration de formes architecturales réalistes. Ainsi, il est possible d'imaginer qu'un outil d'exploration automatique, utilisant les connaissances du domaine architectural, puisse produire des solutions évidements ou masques correspondant à des objets architecturaux, urbains ou paysagers de forme connue.

Il existe une très grande variété de formes architecturales réalistes appartenant aux catégories générales des évidements et des obstructions réalisant une intention d'ensoleillement. Un évidement peut être un trou, une brèche, un passage, une faille, une embrasure, une découpe... ou encore une baie construite, une ouverture, une fenêtre, une porte-fenêtre, un jour, une lucarne, un oculus, etc. De manière symétrique, une obstruction peut être un masque quelconque, un pare-soleil, une persienne, un volet, une marquise, un voile, un rideau, un store, un écran, etc.

Ces objets peuvent faire l'objet de typologies et de modèles dont un système d'exploration automatique des solutions d'une proposition d'ensoleillement peut tirer parti. Ce type d'exploration automatique correspond alors à une interprétation « intelligente » des formes brutes issues d'une pyramide d'ensoleillement en objets réalistes. La comparaison entre les formes brutes et les modèles d'objets connus s'établit suivant des critères de forme, d'échelle et de position de la solution brute relativement à la tâche à réaliser et aux objets de la scène. Nous avons nous-mêmes proposé une typologie simplifiée des masques potentiels d'une proposition d'ensoleillement suivant ces critères (Siret 1995).

Un autre intérêt de l'exploration automatique des solutions d'une proposition apparaît lorsque les solutions attendues ne peuvent pas être modélisées facilement. C'est le cas par exemple des masques végétaux utilisés en aménagement urbain (cf. Guyot 1988). De tels masques possèdent des propriétés morphologiques et botaniques qui sont difficiles à prendre en compte dans

une approche seulement graphique. Ils possèdent ainsi une échelle propre, un potentiel de croissance et d'adaptation à un site et à un climat, un rythme temporel (arbres caducs) qui n'apparaissent pas dans leur simple description formelle.

Pour explorer l'ensemble des masques végétaux solutions d'une proposition de type à *l'ombre*, nous pouvons envisager le développement d'un système capable de comparer les propriétés morphologiques et botaniques de différents végétaux avec les conditions de réalisation d'une proposition donnée : pyramide d'ensoleillement, saison, climat, implantation, etc. Un tel système intelligent pourrait produire des solutions végétales pertinentes, des deux points de vue de l'ensoleillement et de la botanique.

La figure 6.20 ci-dessous donne une image schématique de la réalisation d'une proposition d'ensoleillement par trois solutions végétales aux caractéristiques morphologiques et botaniques très différentes.



Figure 6.20. Trois masques végétaux solutions d'une proposition

## 6.3 Développement du logiciel *Solimac*

A ce stade de notre rapport, nous disposons de tous les éléments nécessaires pour présenter l'outil logiciel que nous avons développé afin de valider nos hypothèses. Cet outil s'appelle *Solimac* : parce qu'il traite d'ensoleillement d'une part et parce que nous l'avons développé sur un Macintosh d'autre part. Il met en oeuvre notre méthode de simulation inverse de l'ensoleillement au travers des modalités pratiques définies dans ce chapitre.

*Solimac* permet donc de dessiner des taches d'ensoleillement rectangulaires dans une scène architecturale ou urbaine quelconque créée par un modelleur géométrique du commerce. Il permet de leur associer une plage temporelle du temps vécu et de réaliser géométriquement les propositions d'ensoleillement ainsi composées en calculant la pyramide associée. Il utilise les modalités d'exploration graphique interactive des solutions masques décrites plus haut. En outre, il permet d'exposer des propriétés d'ensoleillement en utilisant la notion de carte spatio-temporelle introduite dans ce chapitre. Nous développons ces différents points dans les paragraphes qui suivent.

Il n'est pas facile de présenter les fonctionnalités d'un logiciel, objet dynamique, dans le cadre du support statique d'un rapport écrit. Dans la mesure où nous avons longuement discuté les différents choix que nous avons fait pour l'adaptation de notre méthode au contexte du projet d'architecture, nous nous en tiendrons ici à un mode seulement illustratif. Les exemples traités dans le prochain chapitre donneront une vision plus démonstrative de l'utilisation de notre logiciel.

### 6.3.1 Ergonomie générale

#### 6.3.1.1 Cadre d'utilisation

Le caractère multidisciplinaire de la conception architecturale impose l'utilisation de nombreux outils dédiés. Pour être efficaces, ces outils doivent s'inscrire dans un cadre général de partage de données. Suivant cet objectif, nous avons interfacé *Solimac* avec le modelleur géométrique du commerce *Zoom* de la société Abvent (version 4.6). *Zoom* produit des fichiers de description géométrique au format ASCII que *Solimac* importe et exporte. Ces fichiers décrivent des entités de types points, faces orientée (liste de points) éventuellement trouées, objets (liste de faces) et calque. Les calques constituent des entités indépendantes (deux calques ne partagent pas de point commun) et peuvent recevoir un label. *Solimac* permet de lire un fichier *Zoom* en triant les calques utiles (figure 6.21 page suivante).



Figure 6.21. Lecture d'un fichier *Zoom* organisé par calques

A l'ouverture d'un fichier *Zoom* qu'il ne connaît pas, *Solimac* demande de préciser les conditions générales de localisation et d'orientation de la scène qui spécifient en particulier la latitude et la direction du Nord (figure 6.22 ci-dessous). Les résultats des simulations produits par *Solimac* sont exportés suivant deux formats dépendant de leur nature : les résultats géométriques de la simulation inverse sont exportés au format *Zoom* ; les résultats des simulations directes d'ensoleillement sont sauvés dans un format propre à *Solimac* utilisant le modèle du temps vécu.

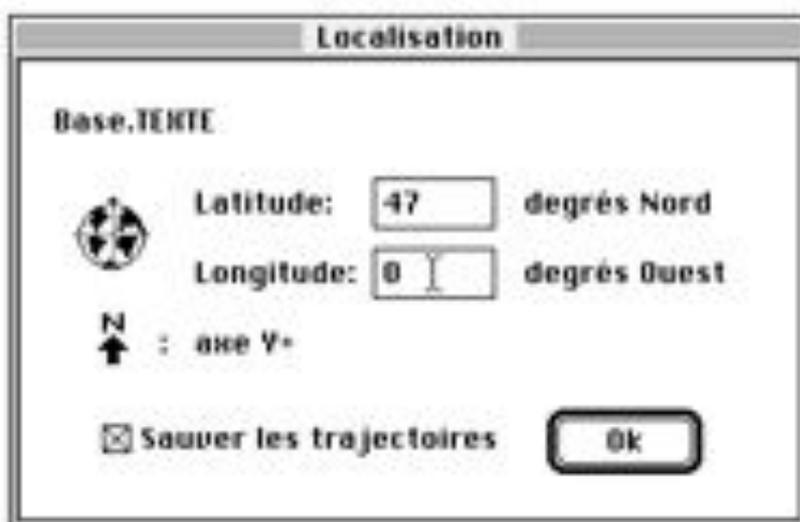


Figure 6.22. Localisation et orientation

### 6.3.1.2 Organisation des vues

Une scène géométrique lue par *Solimac* est affichée dans une ou plusieurs vues ; le nombre des vues affichées simultanément est seulement limité par la taille mémoire et celle de l'écran. Chaque vue *Solimac* est autonome et gère ses propres actions. Cependant, toutes les vues ouvertes partagent les mêmes données géométriques et d'ensoleillement.

Une vue *Solimac* est présentée dans la figure 6.23 ci-dessous. Il s'agit d'une fenêtre standard du Macintosh divisée en quatre zones : une zone d'affichage au centre, une zone de contrôle graphique intégrée à la barre de défilement horizontale, une zone d'actions d'ensoleillement intégrée à la barre de défilement verticale et une zone de sélection temporelle et spatiale sous la barre de titre de la fenêtre (menu « quand » et menu « quoi »).

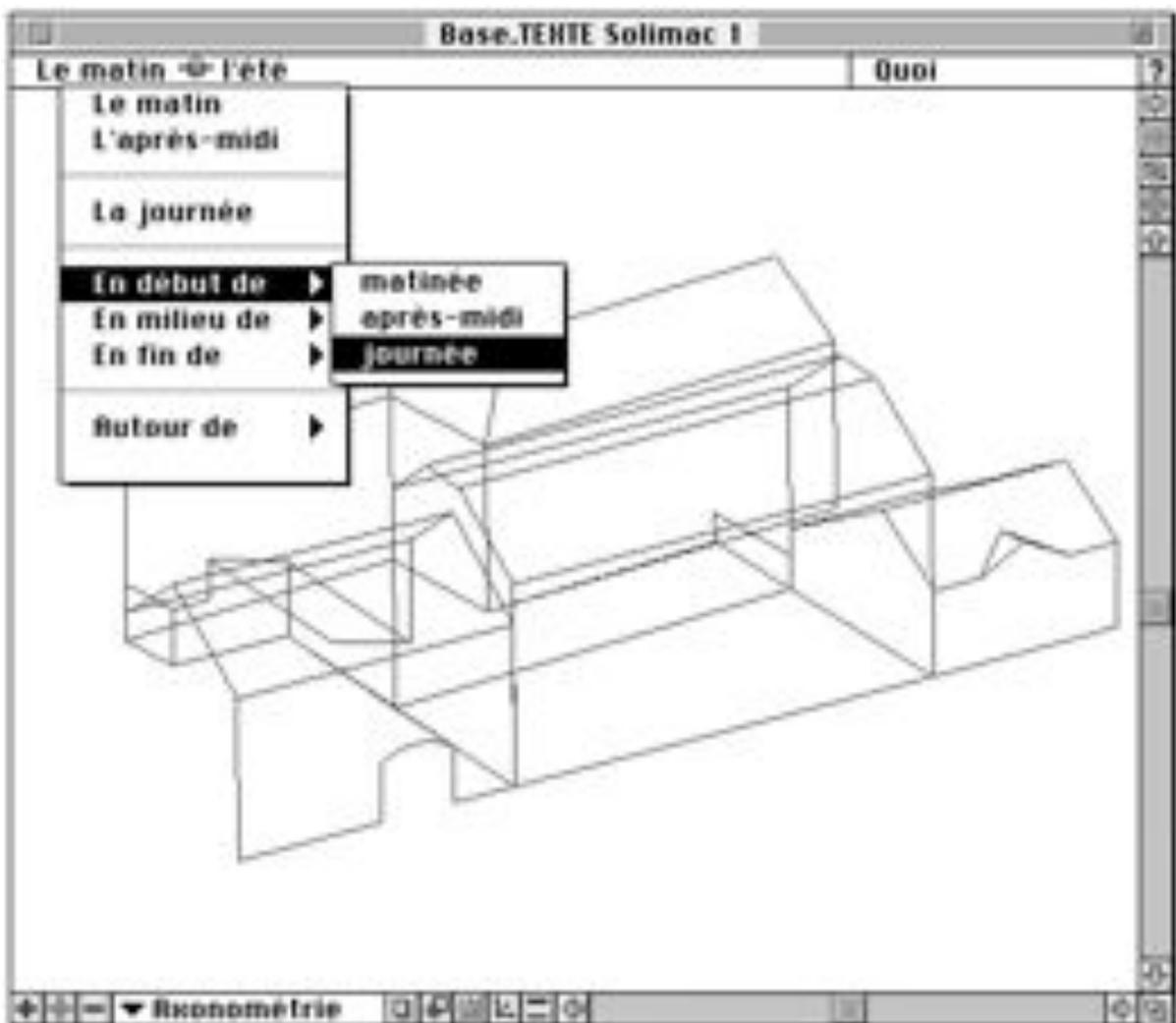


Figure 6.23. Vue *Solimac*

La zone centrale permet d'afficher la scène suivant les différents modes classiques des modeleurs géométriques : vue en plan, de face, de droite ou en axonométrie paramétrable. Le mode d'affichage peut être défini, entre autres, par le menu de la zone de contrôle graphique. Il existe par ailleurs deux modes spéciaux d'affichage que nous désignons comme le mode « sélection » et le mode « masque ». Ces deux modes permettent d'interagir graphiquement avec la scène (nous y reviendrons).

La barre de contrôle graphique contient plusieurs boutons permettant les zooms avant et arrière sur la scène, le recadrage ainsi que l'instanciation des paramètres d'affichage utiles en pratique. Dans la zone de contrôle verticale, les boutons permettent de lancer les actions relatives à l'ensoleillement : poser un point test ou mailler une face (carte spatio-temporelle d'ensoleillement en simulation directe), dessiner la base d'une pyramide d'ensoleillement (simulation inverse), actualiser les données.

Enfin, la zone de sélection haute, sous la barre de titre, contient deux menus que nous désignons comme le menu « quand » et le menu « quoi ». Chaque vue *Solimac* possède sa propre « image temporelle » de la scène ; le menu « quand » permet de sélectionner la plage temporelle de la vue dans le système de repérage du temps vécu. Le menu « quoi » est affecté à deux actions de sélection : la sélection directe des faces préalablement sélectionnées et la levée des ambiguïtés dans le processus de sélection d'une face.

### 6.3.1.3 Sélection d'une face

Les actions de simulation effectuées par *Solimac* sont dépendantes d'une face particulière. Plus exactement, elles dépendent de ce que nous désignons comme une demi-face, c'est-à-dire une face orientée. Chaque face du modèle *Zoom* définit donc deux demi-faces dans *Solimac*.

La sélection d'une demi-face s'effectue de manière graphique, en cliquant à l'intérieur de cette demi-face dans n'importe quelle vue affichée. Toutes les demi-faces contenant le point cliqué sont sélectionnées. En cas d'ambiguïté, le menu « quoi » permet de faire défiler l'ensemble des demifaces candidates à la sélection. Ce menu affiche alors le nom standard (numéro de face et de groupe) et l'orientation de chaque candidate (figure 6.24 page suivante). Lorsqu'une face a été sélectionnée, elle peut être à nouveau activée en déroulant le menu « quoi ». Son nom peut être modifié pour faciliter le repérage spatial des éléments de la scène.

Lorsqu'une demi-face est sélectionnée, la vue *Solimac* passe dans le mode d'affichage « sélection ». Ce mode correspond à une axonométrie de la scène suivant la normale de la demi-face. Celle-ci apparaît alors en vraie grandeur dans son plan, c'est-à-dire sans déformation géométrique. Il devient donc possible d'interagir graphiquement avec elle en 2D.



Figure 6.24. Sélection d'une face

### 6.3.2 Réalisation d'une proposition d'ensevelissement

*Solimac* ne permet pas de formuler une proposition d'ensevelissement (P, S, T) en langage naturel. Cette lacune est principalement imputable au fait que les scènes géométriques produites par *Zoom* ne sont pas suffisamment structurées, du point de vue sémantique, pour permettre la désignation des éléments qu'elles contiennent. Si cette structure était réalisée dans *Solimac*, elle ne pourrait pas être reproduite dans *Zoom* et nous perdriions l'intérêt de l'interface que nous avons créée entre ces deux outils.

Trois actions sont nécessaires pour réaliser une proposition d'ensevelissement (P, S, T) dans *Solimac* :

- dessiner la tache à réaliser dans le plan d'une demi-face sélectionnée ; à chaque tache est associé un bouton de contrôle qui permet d'activer les actions de simulation,
- sélectionner la plage temporelle de la proposition dans le menu temporel de la vue où elle est composée,
- lancer la simulation en appelant le bouton de contrôle de la tache.

### 6.3.2.1 Dessin de la tache

Nous avons discuté dans la première section de chapitre la question de la forme d'une tache d'ensoleillement à réaliser. Nous avons conclu que cette forme n'est pas pertinente en situation et de conception et qu'il est en conséquence possible de considérer que n'importe quelle tache d'ensoleillement peut être représentée par un rectangle. C'est ce résultat que nous mettons en oeuvre dans *Solimac*.

Pour représenter une tache, *Solimac* propose un outil de dessin d'un rectangle dans le plan de la demi-face sélectionnée. La tache est donc dessinée librement dans ce plan (figure 6.25 ci-dessous). Une option permet de contraindre les axes du rectangle suivant les axes du repère. Une échelle peut s'afficher pour contrôler les dimensions de la tache et un outil de translation est disponible pour la déplacer dans le plan de la demi-face.

Une tache d'ensoleillement possède un bouton de contrôle qui apparaît graphiquement lorsque la demi-face support de la tache est sélectionnée. Ce bouton permet de dérouler le menu des actions associées à la tache dont, en particulier, les actions de simulation inverse. C'est de cette manière que l'on demande dans *Solimac* la réalisation d'une proposition d'ensoleillement

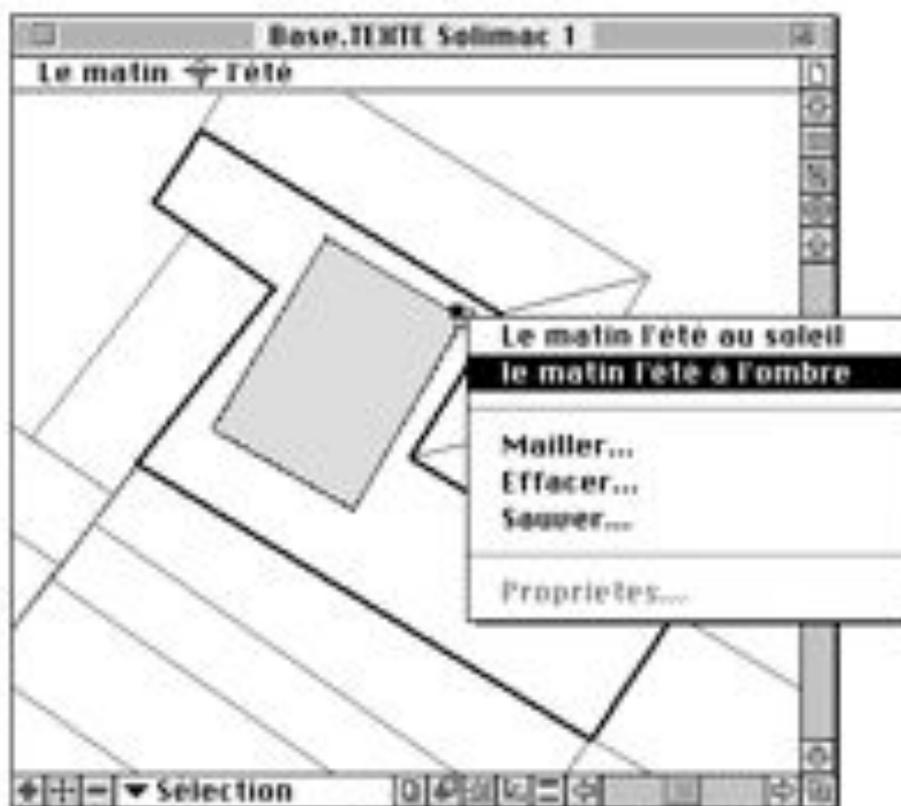


Figure 6.25. Tache d'ensoleillement et menu associé

### 6.3.2.2 Sélection de la plage temporelle et vérification de la proposition

La plage temporelle prise en compte pour la réalisation d'une proposition d'ensoleillement est la plage courante de la vue dans laquelle est définie cette proposition, à l'instant où la commande de réalisation est activée. Pour spécifier la plage temporelle d'une proposition, il suffit donc d'utiliser le menu « quand » de la vue où elle est composée.

En l'état actuel, *Solimac* calcule les pyramides d'ensoleillement  $\Pi(P, T)$  telles que la plage temporelle d'ombre propre de P est disjointe de la plage temporelle T (cf. § 5.1.4.2). *Solimac* ne détermine donc pas les pyramides à base linéaire, notamment parce que ces pyramides n'ont pas de réelle signification dans le processus de simulation inverse.

A chaque nouvelle sélection d'une plage temporelle dans le menu « quand » d'une vue, *Solimac* effectue dynamiquement la vérification de la disjonction entre cette plage et la plage d'ombre propre de la demi-face actuellement sélectionnée, s'il en existe une. Cette vérification est transparente pour l'utilisateur. Si la plage temporelle de la vue n'est pas disjointe de la plage d'ombre propre de la demi-face sélectionnée, *Solimac* l'affiche en italique (figure 6.26 ci-dessous). Dans ce cas, il n'est plus possible de déclencher le calcul d'une pyramide d'ensoleillement pour les taches éventuelles dessinées sur la demi-face sélectionnée.

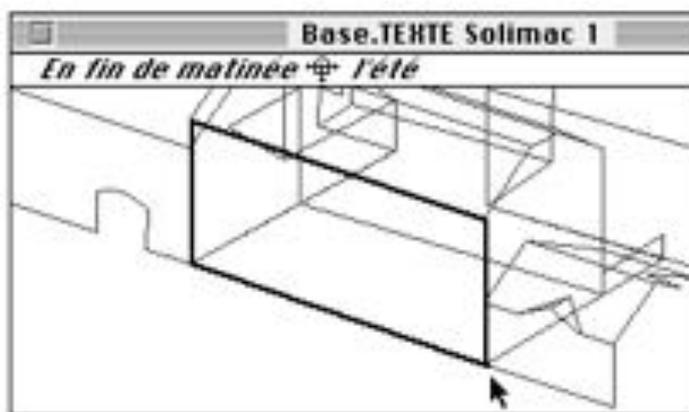


Figure 6.26. Proposition d'ensoleillement non valide

### 6.3.2.3 Réalisation de la proposition, exploration des solutions masques

La réalisation de la proposition (P, S, T) s'effectue par l'intermédiaire des commandes du menu associé au point de contrôle de la tâche. C'est à travers ces commandes que l'on spécifie le paramètre S de la proposition. En l'état, *Solimac* ne traite que les propositions élémentaires, *au soleil* ou *à l'ombre*.

Dans tous les cas, *Solimac* calcule la pyramide associée à la proposition suivant la méthode présentée dans la section 5.2. Lorsque la proposition est de type *au soleil*, *Solimac* effectue automatiquement les évidements minimaux nécessaires à sa réalisation. Il se peut que ces évidements ne soient pas réalisables en pratique, notamment parce qu'ils mettent en jeu des éléments urbains existants. En l'état actuel, *Solimac* crée les évidements sans demander de permis de démolir... Il est prévu d'introduire des restrictions par un mécanisme d'autorisation d'évidement.

Lorsque la proposition est de type *à l'ombre*, *Solimac* construit un masque standard plan, parallèle au plan de la tache et distant arbitrairement de 1 unité de ce plan. Le masque possède un point de contrôle graphique qui permet de le transformer par rotation et par translation (figure 6.27 ci-dessous). C'est par le jeu des déformations successives du plan du masque que le concepteur explore interactivement l'ensemble des solutions de la propo-



Figure 6.27. Masque et point de contrôle du masque

sition (cf. § 6.2.2). Tant que le masque n'est pas validé, ces transformations restent possibles, quelles que soient les actions intermédiaires entreprises. L'exploration des formes solutions de la proposition est donc un processus dynamique qu'il est possible d'interrompre et de reprendre à tout instant. *Solimac* permet en outre de manipuler dans une même scène autant de masques que l'on veut.

Pratiquement, les actions de transformation d'un masque sont lancées en cliquant sur son point de contrôle. La vue passe alors en mode d'affichage « masque ». Deux touches d'options associées au clic sont définies ; elles définissent chacune un mode d'affichage correspondant à une projection suivant un plan orthogonal au plan du masque. Dans ces projections, le plan du masque apparaît comme une ligne : il est donc possible de le transformer graphiquement, sans ambiguïté, par rotation et par translation.

Les transformations par translations sont effectuées intuitivement en déplaçant le point de contrôle du masque dans la scène (figure 6.28 ci-dessous). Le calcul du masque transformé est effectué dynamiquement, de manière transparente pour l'utilisateur : à chaque relâchement de la souris, le masque correspondant au plan translaté est construit et affiché. Remarquons une nouvelle fois que le masque ainsi transformé par translation ne peut pas s'obtenir pas une déformation homothétique du masque initial.

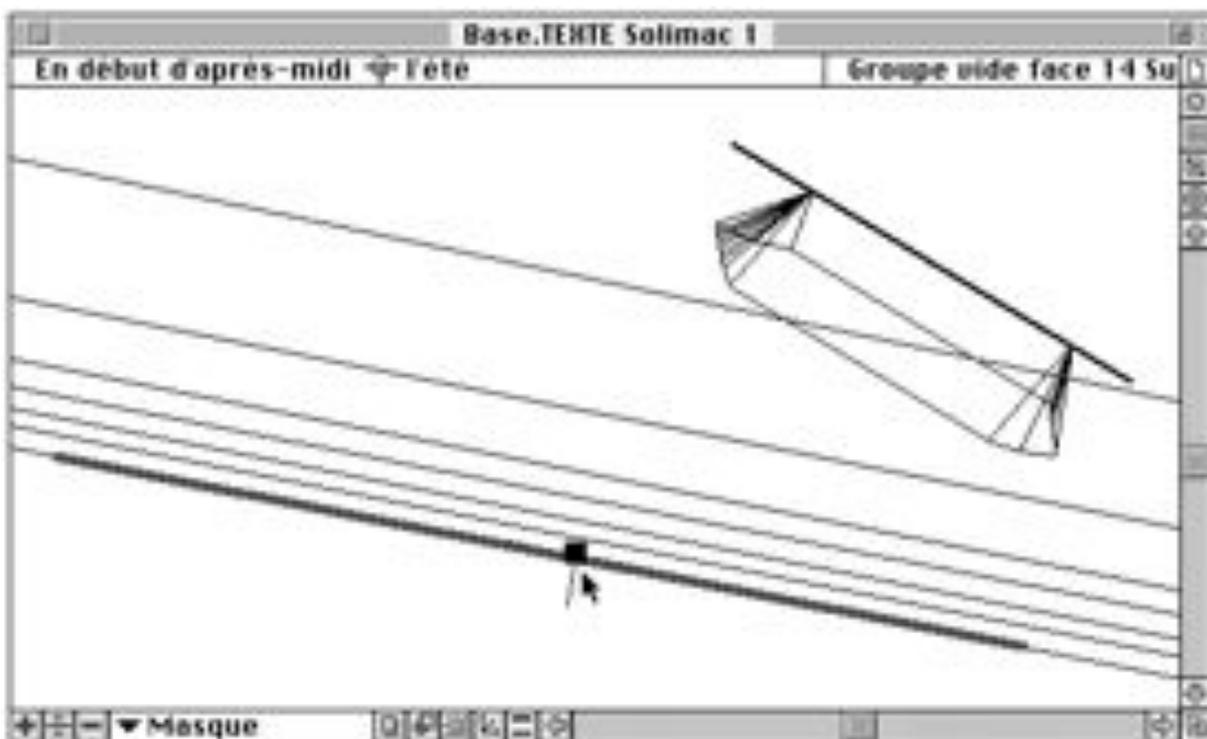


Figure 6.28. Translation interactive d'un masque

Les transformations par rotation suivent la même logique. Dans ce cas, c'est un point quelconque de la trace du masque, excepté le point de contrôle, qu'il faut saisir à la souris. Le plan du masque est alors transformé interactivement par rotation autour de l'axe orthogonal au plan de vue passant par le point de contrôle (figure 6.29 ci-dessous). Comme pour les translations, le masque transformé est calculé et affiché dynamiquement.

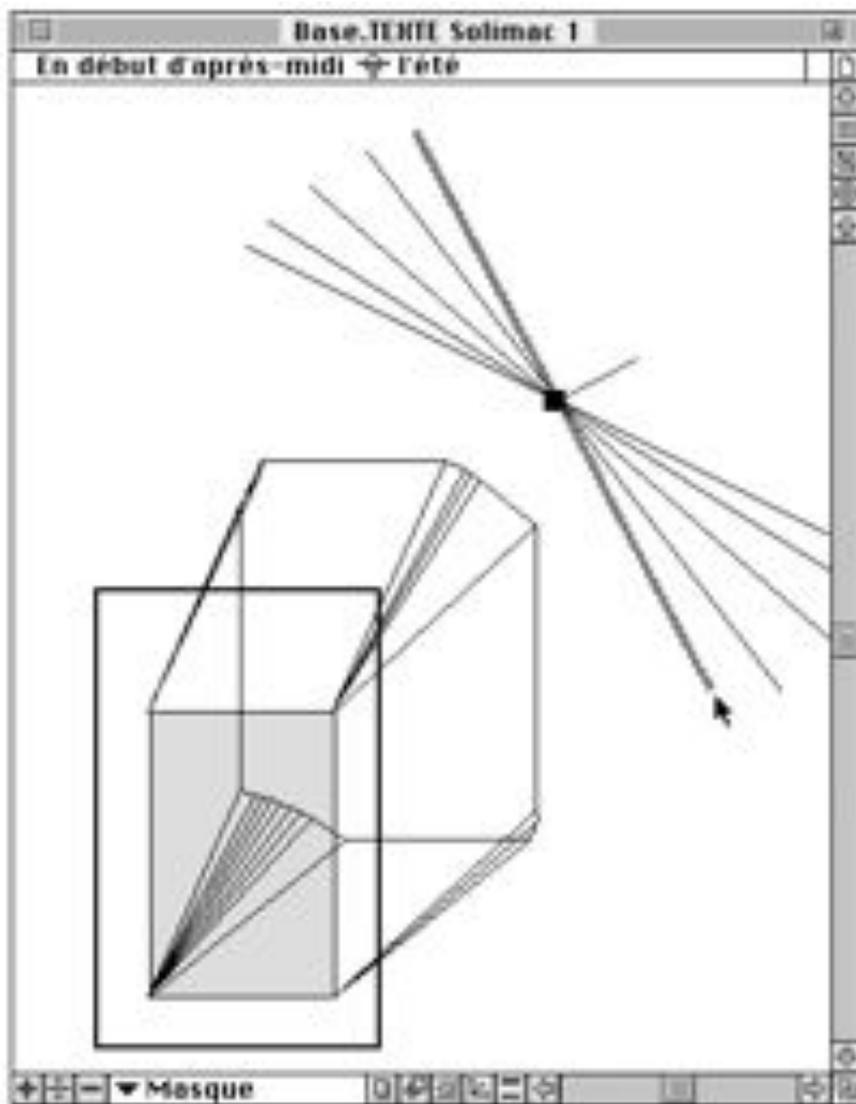


Figure 6.29. Rotation interactive d'un masque

Cette forme d'exploration graphique interactive semble adaptée au projet d'architecture. En particulier, elle permet d'ajuster graphiquement la position et les dimensions du masque par rapport aux objets de la scène. La figure 6.30 page suivante montre ainsi l'ajustement graphique de la pente d'un masque parallèlement à la pente des objets de la scène.

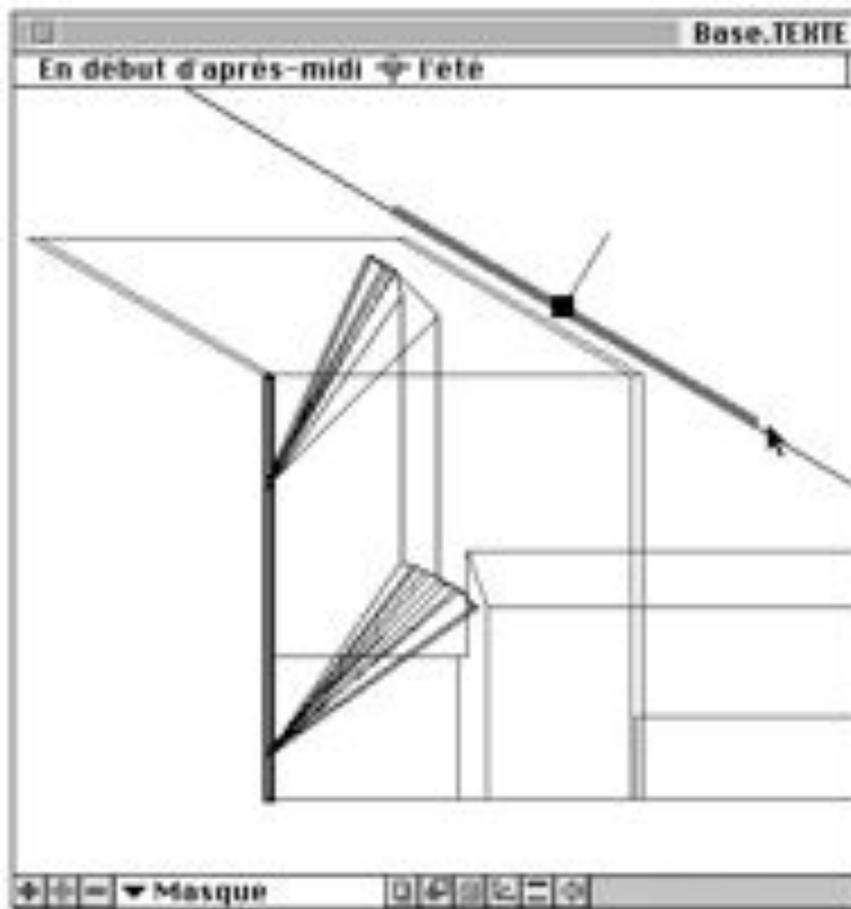


Figure 6.30. Ajustement graphique d'un masque dans une scène

### 6.3.3 Exposition des propriétés d'enseillement

Outre ses fonctions de simulation inverse, *Solimac* donne la possibilité de déterminer les états d'enseillement de la scène étudiée en utilisant la notion de carte spatio-temporelle d'enseillement introduite au § 6.1.2.5. Une telle carte peut être établie pour une demi-face sélectionnée ou pour une zone quelconque dessinée sur cette demi-face. Dans ce dernier cas, le périmètre de la carte est défini comme une tache d'enseillement.

Le maillage quadrangulaire de la carte d'enseillement est paramétré par le dialogue montré dans la figure 6.31 page suivante. La précision de discrétisation conditionne en particulier le temps de calcul nécessaire à la simulation. Une fois la carte calculée, elle peut être affichée dans n'importe quelle vue, selon la plage temporelle propre à cette vue. La figure 6.32 page suivante montre ainsi deux vues côte-à-côte affichant deux « visions » temporelles de la même face suivant leur propre plage temporelle.

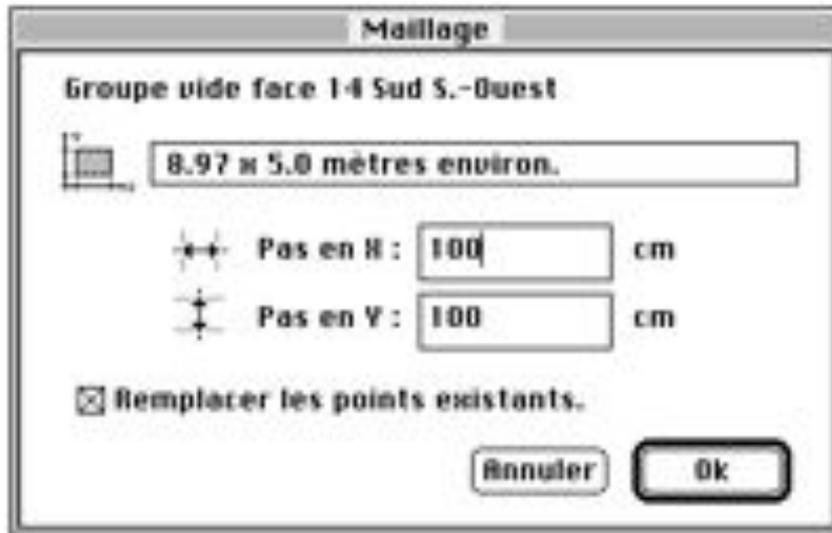


Figure 6.31. Dialogue de maillage d'une carte d'ensoleillement

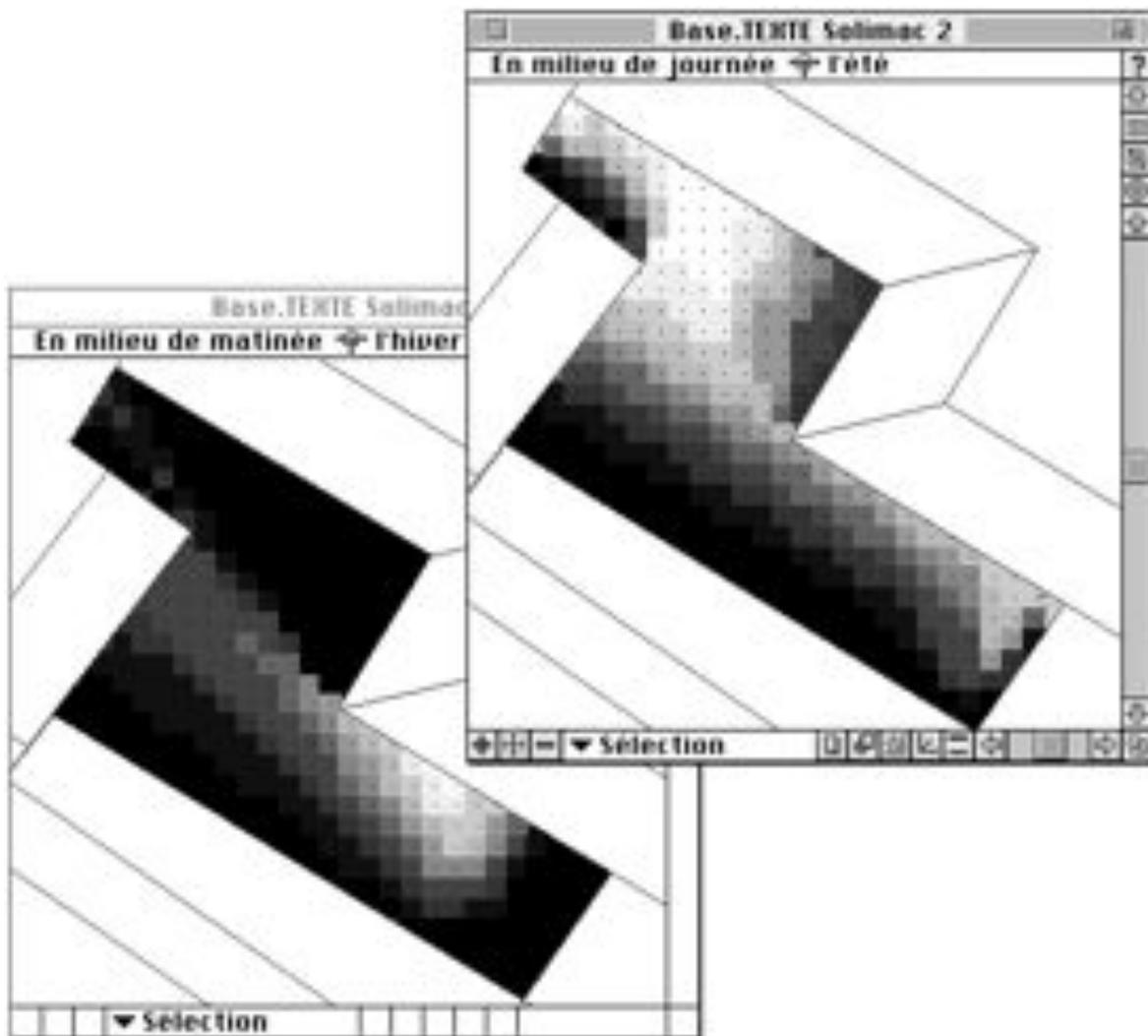


Figure 6.32. Deux vues de la carte d'ensoleillement d'une face

### 6.3.4 Limites de *Solimac*

*Solimac* n'implémente qu'une partie des résultats que nous avons établis dans notre géométrie de l'ensevelissement. Ses limites à l'heure où nous écrivons sont celles décrites dans les points qui suivent. Il se peut qu'elles soient dépassées rapidement ; comme toute maquette logicielle, *Solimac* est sujet à des modifications et à des perfectionnements réguliers.

- *Solimac* ne calcule que des pyramides d'ensevelissement à base plane. Dans cette catégorie, il ne calcule pas les pyramides dont la plage temporelle n'est pas disjointe de la plage d'ombre propre de la base (cf. § 5.1.4.2).
- *Solimac* calcule les solutions minimales planes des propositions d'ensevelissement élémentaires de type (P, *au soleil*, T) et (P, *à l'ombre*, T). Pour les propositions de type *à l'ombre*, *Solimac* garantit que la solution est minimale seulement si la proposition est fautive, c'est-à-dire si la proposition complémentaire est vraie (cf. § 4.3.2.2). *Solimac* n'effectue pas cette vérification a priori ; cependant il donne les outils de simulation directe permettant à l'utilisateur de le faire si nécessaire. Une solution calculée par *Solimac* pour une proposition de type *à l'ombre* qui n'est pas fautive (proposition indéterminée au sens donné au § 4.3.1.3) reste une solution de cette proposition mais n'est pas une solution minimale.
- *Solimac* ne calcule pas le halo caractéristique des solutions (cf. § 4.3.2.3 et 5.3.2.2), bien que cette fonctionnalité puisse être très utile. Il permet de déterminer le halo de manière indirecte en utilisant les outils de simulation... directe.
- *Solimac* ne calcule pas les solutions duales d'une proposition (cf. § 5.3.3) ni les solutions de la composition de plusieurs propositions (cf. § 5.3.4) — faute d'outils adaptés pour la résolution des opérations booléennes entre volumes complexes. Les solutions de plusieurs propositions peuvent être déterminées manuellement dans le modeleur *Zoom* en exportant les pyramides en jeu.
- Enfin, *Solimac* n'effectue pas l'interprétation architecturale des solutions pour laquelle nous supposons que le concepteur possède des outils adaptés.

## Conclusion

L'adaptation d'une méthode générale de résolution d'un problème à un domaine d'application particulier n'est pas toujours facile et fait parfois l'objet de considérations hâtives. Dans le cas de l'ensoleillement, cette question apparaît de manière déterminante : les méthodes de résolution des problèmes d'ensoleillement que nous avons proposées dans les chapitres précédents sont basées sur un modèle seulement géométrique qui ne réfère en rien au projet d'architecture ni au processus de conception architecturale. Il nous était difficile d'imaginer une mise en oeuvre de ces méthodes sans tenir compte des spécificités de leur contexte d'application.

Nous avons donc formulé et discuté dans ce chapitre les diverses questions que pose l'application de nos méthodes dans le cadre du projet d'architecture. Nous avons mis en évidence la possibilité de représenter une tache d'ensoleillement quelconque par un rectangle en questionnant la pertinence de la forme de cette tache dans le projet. En suivant une logique analogue, nous avons tenté de montrer que le repérage temporel des phénomènes d'ensoleillement suivant le modèle du temps vécu présente une précision suffisante dans un contexte de conception architecturale. Ces deux résultats nous ont permis de proposer des modalités simples et intuitives de représentation d'une proposition d'ensoleillement dans le prototype logiciel que nous avons développé.

Par ailleurs, nous avons discuté la question de l'exploration des solutions masquées d'une proposition de type *à l'ombre*. La question de l'exploration des solutions potentielles se pose de manière identique pour tous les problèmes inverses qui admettent plusieurs, voire une infinité de solutions. Les modeleurs déclaratifs vérifient également cette règle puisqu'ils peuvent être considérés selon nous comme des outils de résolution d'un problème géométrique inverse (cf. chapitre premier).

Les méthodes d'exploration et de prise de connaissance habituellement utilisées en modélisation déclarative ne nous ont pas semblé convenir à la démarche de conception en architecture. C'est pourquoi nous avons proposé une approche nouvelle pour l'exploration des solutions masquées d'une proposition d'ensoleillement. Cette approche est interactive et apparaît capable de mettre à profit les compétences graphiques du concepteur. La simplicité relative de notre problème permet sa mise en oeuvre. Il se peut également que d'autres problèmes de modélisation déclarative puissent être traités avec des méthodes d'exploration du même type. Nous pensons en particulier aux problèmes de placement et à tous les problèmes faisant intervenir des propriétés d'échelle des objets modélisés.

Nos propositions ne doivent pas être considérées comme définitives puisqu'elles ne résultent que de discussions, toujours ouvertes et soumises à l'épreuve des faits — en l'occurrence à l'épreuve du projet. Le logiciel *Solimac* que nous avons développé en donne une interprétation pratique et permet cette mise à l'épreuve. Les exemples d'application exposés dans le prochain chapitre donneront une première ébauche d'un processus de validation dont nous discuterons la nature et les difficultés.

Cependant, *Solimac* a ses limites. En particulier, il ne met pas en oeuvre l'ensemble des résultats que nous avons établis concernant l'ensoleillement. En ce sens, *Solimac* ne représente pas l'aboutissement de notre travail et il n'en constitue pas l'objectif principal. *Solimac* n'est qu'un outil de recherche et de validation potentielle de nos hypothèses concernant l'intégration des ambiances dans le processus de conception en architecture. C'est cette question de la validation que nous abordons dans le dernier chapitre de ce rapport.

## Références bibliographiques du chapitre

**Guyot A.** 1988 — L'arbre élément vivant du confort, in Vivre dehors, Confort des espaces publics, Actes du colloque de Manosque (France), Éditions du STU, Ministère de l'Équipement, pp. 71-80

**Hall E.T.** 1984 — La danse de la vie, Temps culturel, temps vécu, Éditions du Seuil, Paris (France), 283 p.

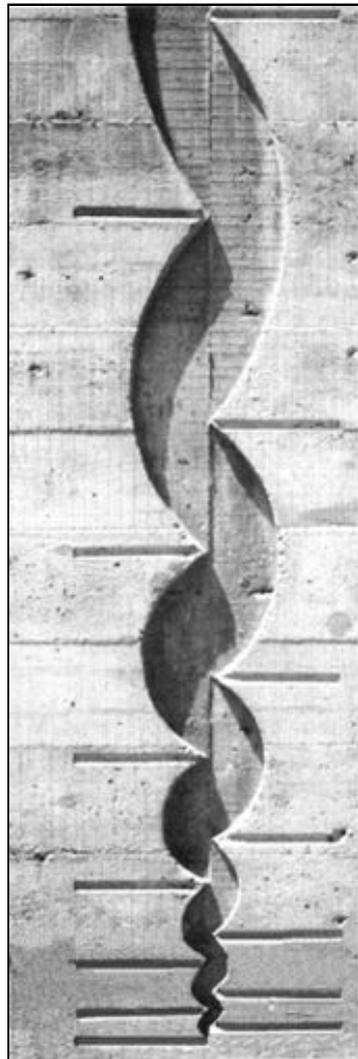
**Lebahar J-C.** 1983 — Le dessin d'architecte, Simulation graphique et réduction d'incertitude, Éditions Parenthèses, Roquevaire (France), 134 p.

**Oudenot G.** 1983 — Les cadrans solaires classiques, L'Astronomie, pp. 419-428

**Siret D.** 1995 — Modélisation déclarative des modulateurs d'ambiance dans le projet architectural et urbain, Revue internationale de CFAO et d'Informatique Graphique, Vol. 10, n° 5, pp. 523-537

# Chapitre 7

## Illustrations



Les ombres du *Modulor* (Le Corbusier)

## Introduction : la question de la validation

Nous avons fait l'hypothèse qu'en complément des méthodes de simulation directe qui ne permettent que l'exposition des propriétés d'ambiances, les méthodes de simulation inverse permettent la réalisation d'intentions et apparaissent donc adaptées à la prise en compte des ambiances dans le processus de conception architecturale. Nous avons réduit notre champ de recherche à l'ensoleillement et nous nous sommes appuyés sur une approche déclarative pour proposer une solution au problème de la simulation inverse de l'ensoleillement. Nous avons ainsi exposé dans ce rapport :

- un modèle déclaratif général des problèmes d'ensoleillement, par lequel nous pouvons résoudre formellement tous les problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses,
- une interprétation géométrique de ce modèle qui nous permet de définir le volume d'une pyramide d'ensoleillement à base plane et, en conséquence, de résoudre en pratique le problème de la simulation inverse d'ensoleillement,
- un prototype logiciel déclaratif dans lequel nous mettons en oeuvre nos résultats pour assister la réalisation, en situation de conception, des intentions d'ensoleillement d'un concepteur.

Nous disposons donc d'un ensemble suffisant d'éléments pour envisager la validation de nos hypothèses. Pour ce faire, il nous suffirait, en théorie, de proposer notre outil logiciel à différents concepteurs et d'observer l'utilisation qu'ils en font ; selon les résultats de cette observation, nous pourrions établir le degré de pertinence de nos propositions.

En pratique, la question de la validation de notre hypothèse s'avère plus complexe à mettre en oeuvre. C'est l'objet de cette introduction que de proposer quelques éléments de discussion à ce sujet. Trois questions générales peuvent être posées : que cherche-t-on à valider ? Comment réaliser cette validation ? Quelle pertinence possède une maquette logicielle dans un contexte de conception professionnel ?

Que cherche-t-on à valider ? La réponse à cette question est ambiguë. Un système d'aide à la conception comme celui que nous proposons prétend permettre à un concepteur de réaliser ses intentions d'ensoleillement. L'efficacité de notre système ne peut être établie que sur le critère de sa capacité de réalisation des intentions et non sur celui du résultat obtenu à travers cette réalisation. En ce sens, la pertinence de notre système est indépendante des résultats qu'il permet d'obtenir. Il se peut que des intentions mal positionnées n'aboutissent pas à des résultats satisfaisants, sans pour autant incriminer l'outil qui a permis de réaliser ces intentions.

Comment réaliser cette validation ? Les tentatives que nous avons faites en ce sens se sont engagées dans deux directions. En premier lieu, nous avons tenté une démarche auprès d'un architecte praticien, occupé à la définition d'un avant-projet pour un bâtiment public important. Ce praticien nous fournissait l'esquisse du projet, laquelle manifestait plusieurs intentions d'ensoleillement. Il semblait que ces intentions n'aient pas été menées à bout, faute d'outils adéquats. Nous propositions alors notre concours (celui de nos outils et non pas notre expertise personnelle) pour ajuster le projet.

Cette tentative s'est révélée infructueuse, pour deux raisons principales qui sont l'une la conséquence de l'autre. D'une part, l'architecte se trouvait engagé dans un processus décisionnel : l'esquisse du projet avait été approuvée par le commanditaire et le projet devait en garder les grandes lignes. D'autre part, conséquence de cette contrainte, le retour sur les formes du projet induit par les intentions d'ensoleillement paraissait difficile à réaliser. Il en résulta que notre ambition de validation de notre outil de simulation inverse ne se trouvait pas réalisable par cette voie.

La seconde tentative s'est faite en direction de plusieurs étudiants architectes en fin de cursus. Nous leur avons exposé notre démarche, sans être directif, ce qui aurait dénaturé notre ambition. Nous souhaitions au contraire que la « demande » d'usage de notre outil émane spontanément de leurs préoccupations de conception. Si cette demande se faisait jour, nous suggérions à ces étudiants que nous pouvions leur apporter notre concours.

Or, cette demande n'est pas venue. Les étudiants architectes ont finalement répondu aux exigences de leur projet sans chercher à intégrer l'ensoleillement qui n'était qu'une donnée facultative pour eux et pour leurs correcteurs. Nous n'avons pas insisté en ce sens en considérant que toute tentative coercitive d'utilisation de notre outil ne pouvait pas rendre compte de la spontanéité intentionnelle propre à la conception.

Comment interpréter ces deux échecs ? Nous sommes-nous égarés dans des considérations par trop théoriques qui ne rendraient pas compte d'une nécessité architecturale ? Ces questions remettent finalement en cause la pertinence de notre maquette logicielle dans un contexte de conception.

Nous croyons plutôt que nous nous sommes heurtés à plusieurs obstacles que nous pouvons tenter de décrire. S'agissant de notre seconde tentative, il apparaît que les étudiants ne sont ni préparés à manipuler des intentions d'ensoleillement dans le projet, ni préparés le cas échéant à réaliser ces intentions. Leur réaction est pourtant enthousiaste sur les possibilités de l'outil que nous proposons dans le projet. Cependant, cet enthousiasme tombe lorsque, par un réflexe qu'il pourrait leur appartenir de critiquer, ils se trouvent confrontés à une demande architecturale qui n'intègre pas les considérations d'ambiances, fussent-elles aussi simples que celles d'ensoleillement.

Un second élément entre en jeu : l'outil que nous proposons impose une instrumentation informatique du projet qui reste rare dans le cadre des études d'architecture. Les étudiants ont peut-être choisi de ne pas prendre le risque d'ajouter aux difficultés de leur projet celles liées à un nécessaire apprentissage de la modélisation géométrique. Les connaissances préalables à la mise en oeuvre de nos propositions sont sans doute apparues rédhibitoires et probablement disproportionnées par rapport à l'enjeu d'un projet d'école.

Pour ce qui est de notre première tentative, l'obstacle est d'ordre plus instrumental. Notre interlocuteur praticien, par ailleurs soumis à des contraintes de coût de conception, manifestait de réelles intentions d'ensembler. Cependant, pour lui, l'outillage adapté est un outillage de vérification a posteriori, par simulation directe, qui va au-delà de l'ensembler. Une modélisation thermique lui était nécessaire et nous ne pouvions pas répondre à cette demande. Il semblait à ce praticien suffisant de mettre en oeuvre une instrumentation rare et innovante dans le contexte actuel. Il ne lui a pas semblé nécessaire de franchir avec nous le cap de la simulation inverse, complémentaire des méthodes directes dans le processus de conception.

Une remarque s'impose à ce niveau : en définissant la simulation inverse de l'ensembler, nous proposons de compléter les outils de simulation directe que nous jugeons insuffisants. Or ces outils (dans leur version numérique moderne) n'ont que rarement franchi le seuil du laboratoire. Nous avançons peut-être une demande qui ne pourra voir le jour qu'une fois les outils de simulation directe appropriés par les concepteurs.

Ces obstacles d'ordre culturel et instrumental que nous désignons représentent sans doute une réponse facile pour nous puisqu'ils ne mettent en cause que nos interlocuteurs... Nous serions donc mieux informés de leurs besoins qu'eux-mêmes qui ne connaissent que partiellement les avancées de l'instrumentation numérique ? Cette position apparaît présomptueuse. Cependant, il ne nous est pas possible de statuer plus finement. Pour conclure à l'inadéquation de nos propositions, il faudrait d'abord lever ce que nous considérons être un obstacle avéré : la faible prise en compte des considérations d'ambiances dans le projet d'une part, et la faible migration des outils de laboratoire vers la pratique d'autre part.

Ces obstacles résultent de nombreux facteurs, de différents ordres, que nous ne discuterons pas ici. Il ne sera possible de proposer l'usage de notre outil qu'une fois ces obstacles levés, au moins partiellement. C'est alors seulement que nous pourrions conclure — avec plus de succès peut-être — à la pertinence de nos propositions.

A défaut d'interlocuteur, nous nous sommes choisis comme sujet pour établir quelques éléments de conclusion sur nos hypothèses. Nous proposons dans cette section ce qui ne constitue pas une validation mais une illustra-

tion des potentialités de notre outil. Ce sont trois projets architecturaux, réalisés à l'aide de *Solimac* et du modelleur *Zoom*, et qui présentent les caractéristiques communes suivantes :

- ils sont de commande fictive,
- ils sont mis en oeuvre par l'auteur qui coiffe pour la circonstance sa casquette d'architecte,
- ils sont articulés autour de contraintes d'ensoleillement fortes, mais cependant étrangères aux « idéologies solaires »,
- ils ne dépassent pas le stade de l'esquisse architecturale.

Nous avons justifié les deux premiers points plus haut en décrivant les difficultés de validation d'un outil d'aide à la conception comme le nôtre.

S'agissant du troisième point, nous avons souhaité ne pas focaliser notre attention sur « la question solaire » d'une manière telle qu'elle apparaisse réductrice, comme nous l'avons montré au premier chapitre. Les contraintes d'ensoleillement que nous réalisons sont réalistes et trouvent des équivalents dans de nombreux projets de l'architecture ordinaire. Les méthodes que nous décrivons pour les réaliser peuvent également être utiles ailleurs.

Quant au quatrième point, trois raisons l'expliquent : d'une part, nous ne pouvons matériellement développer un projet au delà de l'esquisse dans ce rapport ; d'autre part, la conduite complète d'un projet peut difficilement se faire sur une commande fictive et sans interlocuteur défini ; enfin, c'est bien notre objectif principal que de montrer la possibilité d'intégrer les intentions d'ensoleillement dès la phase d'esquisse du projet.

Il est difficile de décrire un processus dynamique de conception, particulièrement lorsque l'on en est soi-même l'acteur. Il est encore plus malaisé d'afficher les résultats de ce processus, les projets, lorsqu'on sait la véhémence ou l'ironie que peuvent générer de simples images d'architecture... Que les nôtres soient prises pour ce qu'elles sont : quelques arguments pour justifier la pertinence de nos hypothèses.

Le premier projet concerne l'ajustement d'un pare-soleil dans le cas d'un bâtiment très simple. Le second s'intéresse à l'enveloppe d'une piscine sur laquelle portent plusieurs contraintes d'ensoleillement. Le troisième projet propose l'épannelage du gabarit d'un immeuble urbain en fonction d'intentions d'ensoleillement concernant les immeubles voisins.

## 7.1 Ajustement d'un pare-soleil

Ce projet élémentaire se veut avant tout démonstratif. Il s'agit d'un petit bâtiment d'usage privé localisé à la latitude de Nantes. Par simplification, on suppose que l'enveloppe et la structure de cette construction sont données a priori, conformément au plan de la figure 7.1 ci-dessous. Il n'est pas tenu compte des masques environnants, sans influence sur le projet.

Une large baie doit être ouverte sur la façade Sud-Ouest. Pour des raisons pratiques qui tiennent au programme, cette baie doit rester perméable au passage le plus souvent possible. Cependant, il apparaît clairement que des effets de surchauffe sont à craindre en été à l'intérieur du bâtiment. Il faut donc protéger la baie du soleil pour assurer des conditions de confort thermique estival satisfaisantes.

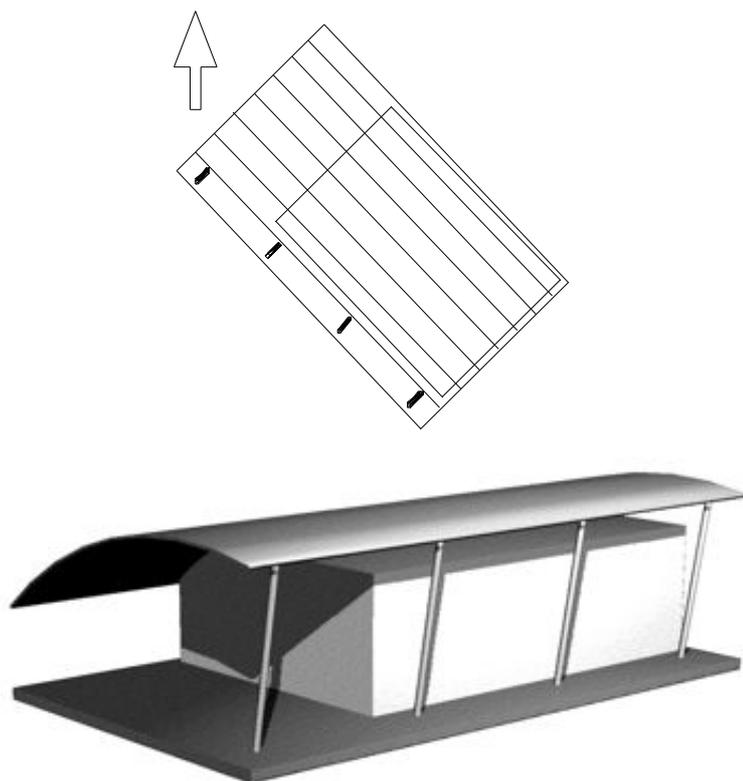


Figure 7.1. Enveloppe et structure du projet (plan et perspective)

Dans *Solimac*, la proposition suivante est composée : « la baie doit être à l'ombre en début d'après-midi l'été ». La pyramide d'ensevelissement associée est calculée (figure 7.2 page suivante). Il s'agit maintenant d'explorer les solutions masques issues de cette pyramide et adaptées au projet.

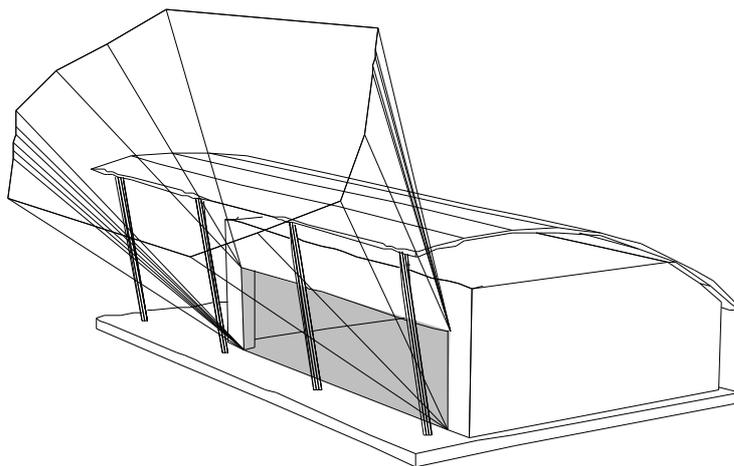


Figure 7.2. La baie doit être à l'ombre en début d'après-midi l'été

### 7.1.1 Exploration des solutions masques

La première intention de l'architecte est de prolonger la toiture pour réaliser le masque attendu. Cette solution est présentée dans la figure 7.3 ci-dessous. Cependant, le masque brut résultant s'avère difficile à interpréter. Plutôt que de souligner la plastique du bâtiment, ce masque s'impose lourdement.

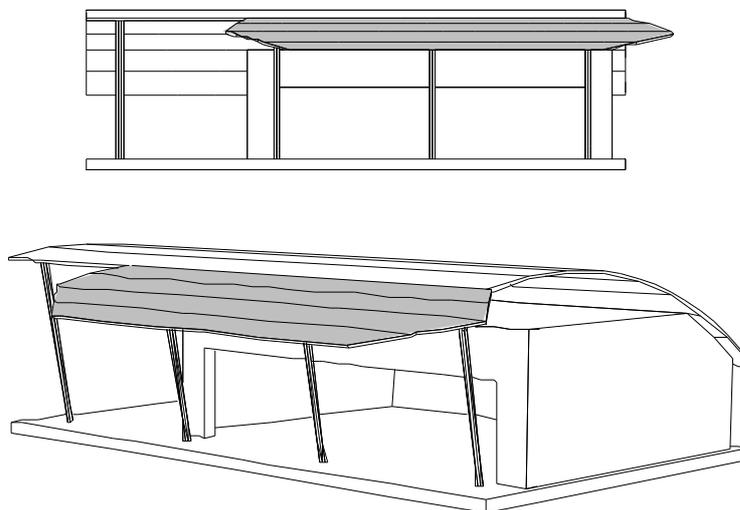


Figure 7.3. Première solution masque (élévation et perspective)

Une autre solution est testée. Elle consiste à établir un pare-soleil horizontal au droit de la baie. Cette solution est relativement classique. Le masque brut est calculé comme le montre la figure 7.4 page suivante.

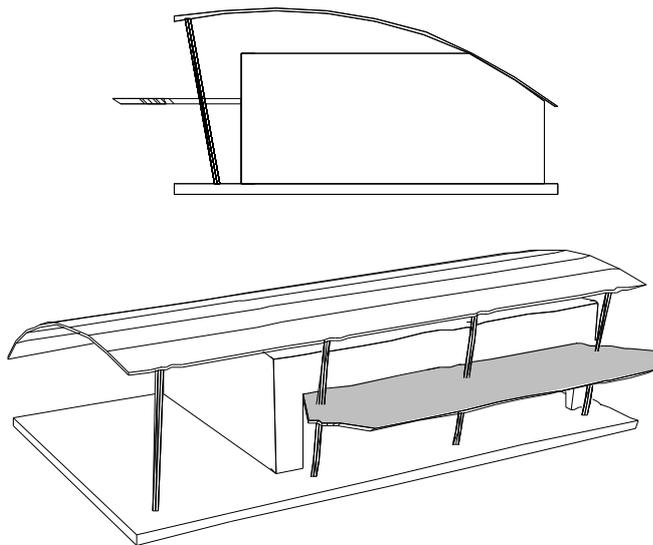


Figure 7.4. Seconde solution masque (élévation Sud-Est et perspective)

L'interprétation de cette solution semble plus facile. Elle conduit l'architecte à envisager deux visières jouant avec les potelets de structure (figure 7.5 ci-dessous). La protection qu'elles apportent est jugée suffisante, même si elles ne remplissent pas le gabarit du masque brut. En outre, le concepteur imagine les jeux d'ombre que cette structure peut produire à l'intérieur de la construction. Les intentions plastiques d'ensoleillement rejoignent ici les intentions énergétiques initiales.

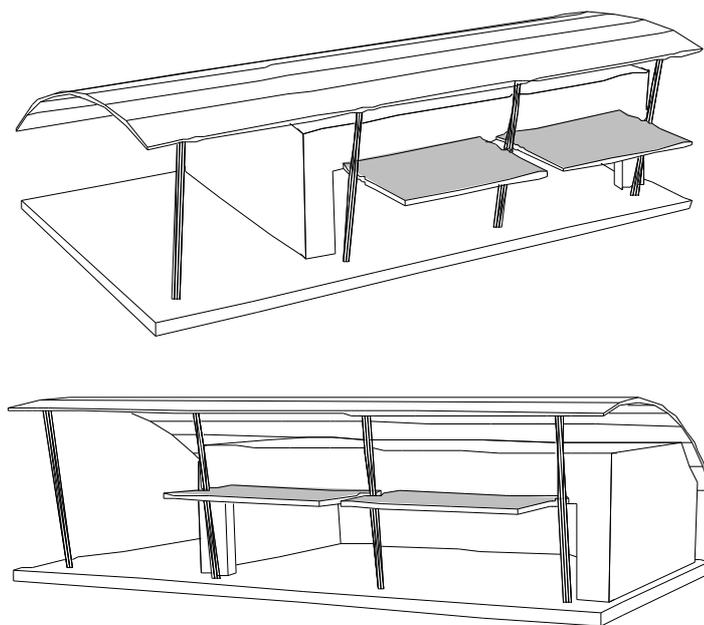


Figure 7.5. Interprétation de la seconde solution

Cependant, par explorations successives des masques bruts, une autre solution est également retenue. Sa forme brute est représentée sur la figure 7.6 ci-dessous (en haut). Il s'agit d'un pare-soleil oblique, dégagé de la structure du bâtiment (figure 7.6 au milieu). Le concepteur imagine une interprétation immédiate de cette solution : le pare-soleil devient un élément suspendu à la structure (figure 7.6 en bas), créant un effet plastique qui s'intègre à la volumétrie générale. En outre l'interprétation architecturale englobe la forme brute : l'ensemble de l'ombrage attendu sur la baie est donc réalisé. C'est finalement cette solution qui est retenue.

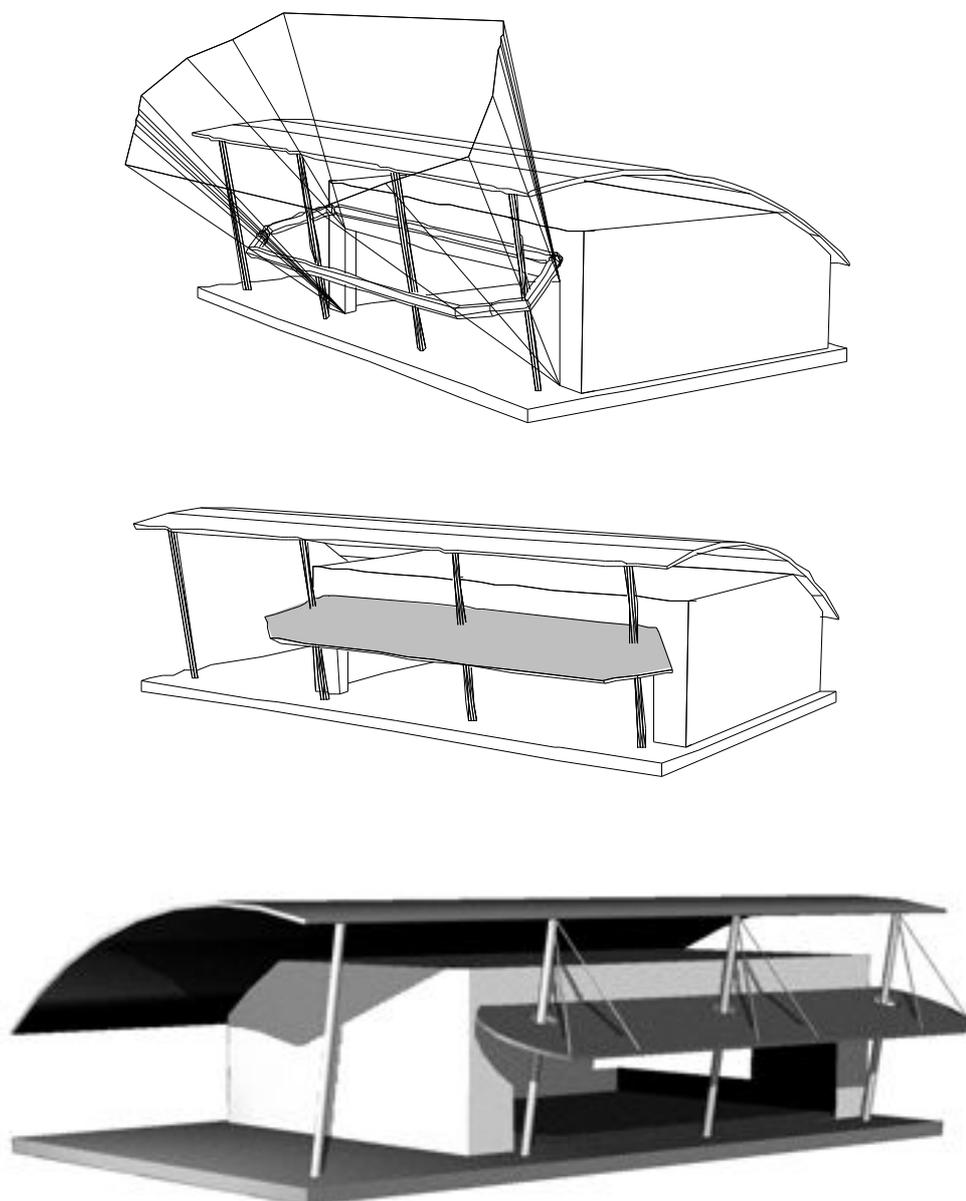


Figure 7.6. Troisième solution masque (forme brute et interprétation)

### 7.1.2 Bilan de l'expérience

Ce projet a avant tout une valeur démonstrative. La construction d'un pare-soleil avec les méthodes directes est possible, quoique laborieuse lorsqu'il s'agit de protéger une surface pour une plage temporelle discontinue. L'on peut supposer qu'en pratique, une solution standardisée aurait été choisie par extrapolation de cas similaires. La réalisation de la contrainte aurait sans doute été jugée plus fastidieuse que créative.

Avec *Solimac*, c'est l'aspect formel des masques potentiels qui a été déterminant. La première intention du concepteur s'est révélée infructueuse. Cependant, l'exploration graphique des masques a permis de définir au moins deux solutions satisfaisantes. La dernière solution, par sa forme brute, a conduit à la mise en oeuvre d'un objet qui n'aurait probablement pas été imaginé autrement. Ce masque est quasiment exact. Ses bords arrondis sont justifiés par la géométrie de l'ensevelissement elle-même plutôt que par toute autre considération gratuite.

Remarquons que le traitement des intentions d'ensevelissement est réalisé ici comme un jeu formel et créatif et non plus comme une contrainte fastidieuse impliquant des tracés géométriques complexes. Aucune simulation directe pour vérifier la validité des solutions n'a été nécessaire puisque les solutions créées satisfont toutes a priori l'intention initiale. L'exploration des masques potentiels aurait pu encore produire d'autres solutions convenables.

## 7.2 Projet d'enveloppe pour une piscine

Ce projet plus ambitieux que le précédent va nous permettre d'illustrer l'utilisation conjointe des outils de simulation directe et inverse de l'ensoleillement dans un processus de conception. Nous montrons également que la pyramide d'ensoleillement peut être utile à des fins de diagnostic du projet autant que de réalisation d'intentions. Cet aspect est une conséquence inattendue de la méthode ; nous l'avons découvert en manipulant et en détournant *Solimac*.

Le projet concerne l'enveloppe d'une piscine qui s'inscrit dans le gabarit montré dans la figure 7.7. Supposons que ce volume parallélépipédique à base carrée résulte d'une contrainte forte d'implantation, ou d'une intention particulière du concepteur ; dans tous les cas, il doit être respecté. Par ailleurs, le projet fait abstraction de l'environnement de ce gabarit, sans influence du point de vue qui nous intéresse.

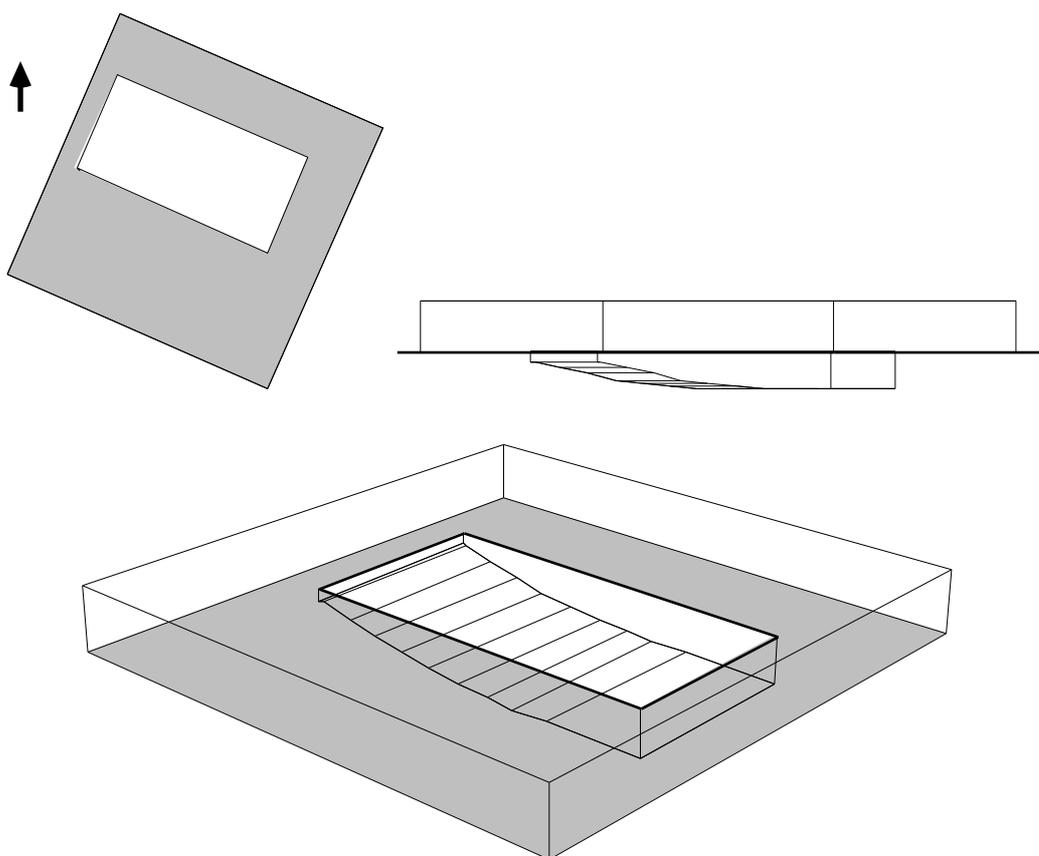


Figure 7.7. Enveloppe de la construction (plan, coupe, perspective)  
En grisé : la base de l'enveloppe, en blanc : le bassin

Dans cet exemple, aucun « parti » architectural n'est arrêté. Nous allons voir que les contraintes et les intentions d'ensoleillement vont déterminer ce parti et orienter les choix de réalisation.

### 7.2.1 Définition du parti, démarcation des intentions

Le traitement de l'enveloppe s'appuie sur deux intentions d'ensoleillement. L'une résulte d'une contrainte du programme et s'énonce de la façon suivante : la surface du bassin ne doit recevoir aucun rayon solaire direct à aucun moment de la journée tout au long de l'année. Cette contrainte résulte de règles de confort et de sécurité visant à éviter toute forme d'éblouissement, à la fois pour les nageurs et pour les surveillants de bassin.

La seconde intention, émise par l'architecte, consiste à organiser la plage Sud du bassin en un solarium, depuis lequel le bassin doit rester visible et accessible. Une partie de cette plage pourra par ailleurs être occupée par différents services qui restent à définir. En outre, le solarium est susceptible de subvenir en partie aux besoins énergétiques du bâtiment en saison froide (les problèmes de surchauffe d'été sont supposés réglés par la fonction même du bâtiment).

#### 7.2.1.1 Ombrage du bassin

Le bassin doit être à l'ombre, toute la journée toute l'année. Cette proposition définie dans *Solimac* conduit à la création d'une pyramide d'ensoleillement très ouverte (figure 7.8 ci-dessous : les rayons sont définis par l'intersection de la pyramide avec la sphère englobant la scène).

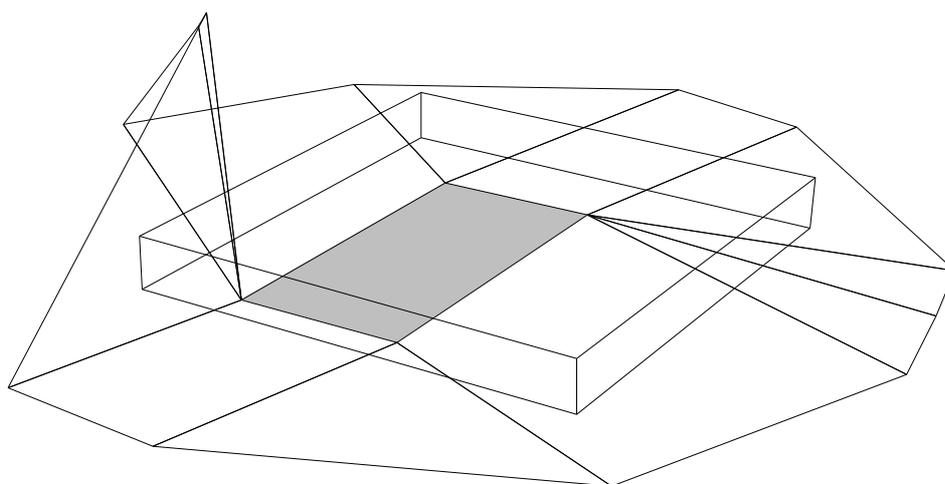


Figure 7.8. Pyramide d'ensoleillement  
« le bassin, à l'ombre, toute la journée toute l'année »

Pour mettre en oeuvre la contrainte, l'architecte effectue l'intersection booléenne entre la pyramide et l'enveloppe de la piscine. Il résulte de cette opération un volume dont les frontières doivent nécessairement être pleines et dont les vides révèlent les surfaces potentiellement vitrées (figure 7.9).

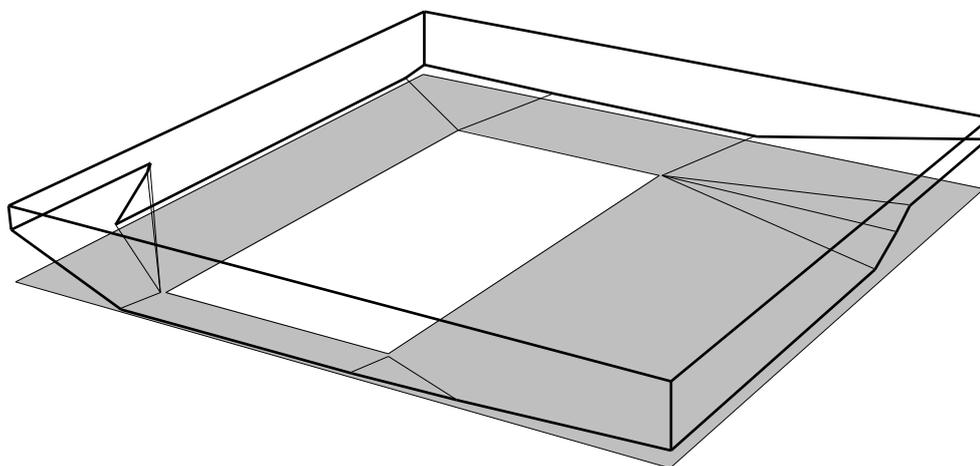


Figure 7.9. Volume résultant, surface pleine de l'enveloppe

C'est à cette étape de la conception que l'architecte fait le choix du parti du projet. Il observe le volume résultant de la contrainte d'ombrage et découvre en lui des qualités intéressantes. Ces considérations l'amènent à faire un choix plastique et à échafauder un discours autour du projet. Le choix plastique radical consiste à conserver la structure brute du volume telle qu'il a été « sculpté par le soleil ». Le discours repose sur cette même métaphore : puisque une contrainte forte d'ensoleillement pèse sur l'enveloppe, cette contrainte définit « l'âme » de cette enveloppe et le parti littéral de la construction.

#### 7.2.1.2 Réalisation du solarium

L'intention de créer un solarium n'est pas remise en cause par ce parti. L'architecte définit une zone importante de la plage Sud et lui affecte la propriété « au soleil, en milieu de journée l'hiver ». La pyramide calculée par *Solimac* est montrée dans la figure 7.10 page suivante. Le concepteur sait que cette proposition est incompatible avec la première contrainte, notamment parce qu'il observe l'intersection des deux pyramides d'ensoleillement. Il décide cependant que les nuisances créées sur le bassin par l'évidement du solarium pourront peut être corrigées par des masques adéquats.

L'évidement nécessaire pour le solarium est créé. Le résultat brut et son interprétation (ajustement rectangulaire de l'ouverture en toiture) sont représentés sur la figure 7.11 page suivante.

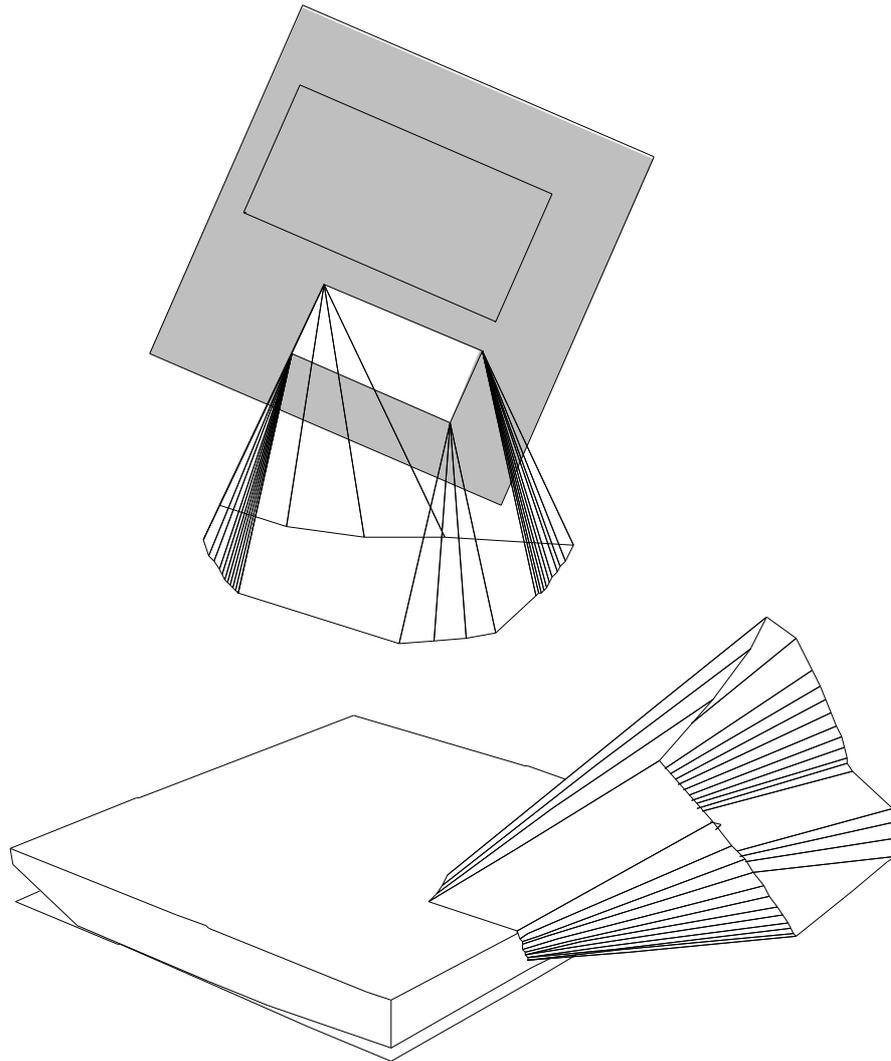


Figure 7.10. La plage Sud, au soleil, en milieu de journée l'hiver

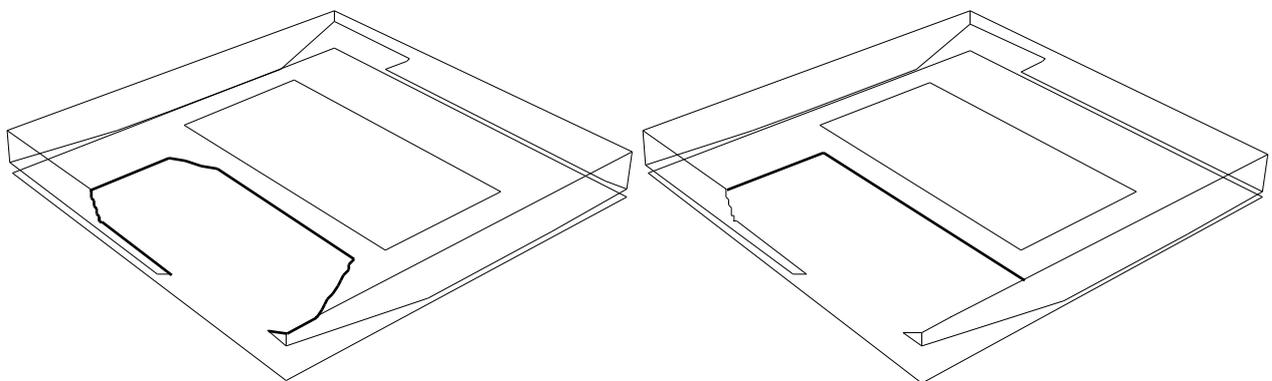


Figure 7.11. Évidement réalisant la seconde propriété  
Gauche : évidement brut, Droite : interprétation

## 7.2.2 Ajustement du projet

L'enveloppe de la piscine ainsi modélisée, il faut désormais vérifier l'influence des percements effectués pour le solarium sur la contrainte initiale appliquée au bassin. Pour ce faire, le concepteur construit avec *Solimac* la carte d'ensoleillement de l'ensemble de la surface de la construction.

En affichant cette carte pour différentes plages temporelles du temps vécu ou en déroulant les tableaux d'ensoleillement en différents points, le concepteur observe les interférences entre les deux intentions. Il constate que la surface du bassin présente sur sa frange Sud-Est une bande importante d'ensoleillement, variant de la fin de matinée à la fin de l'après-midi l'hiver (figure 7.12 ci dessous).

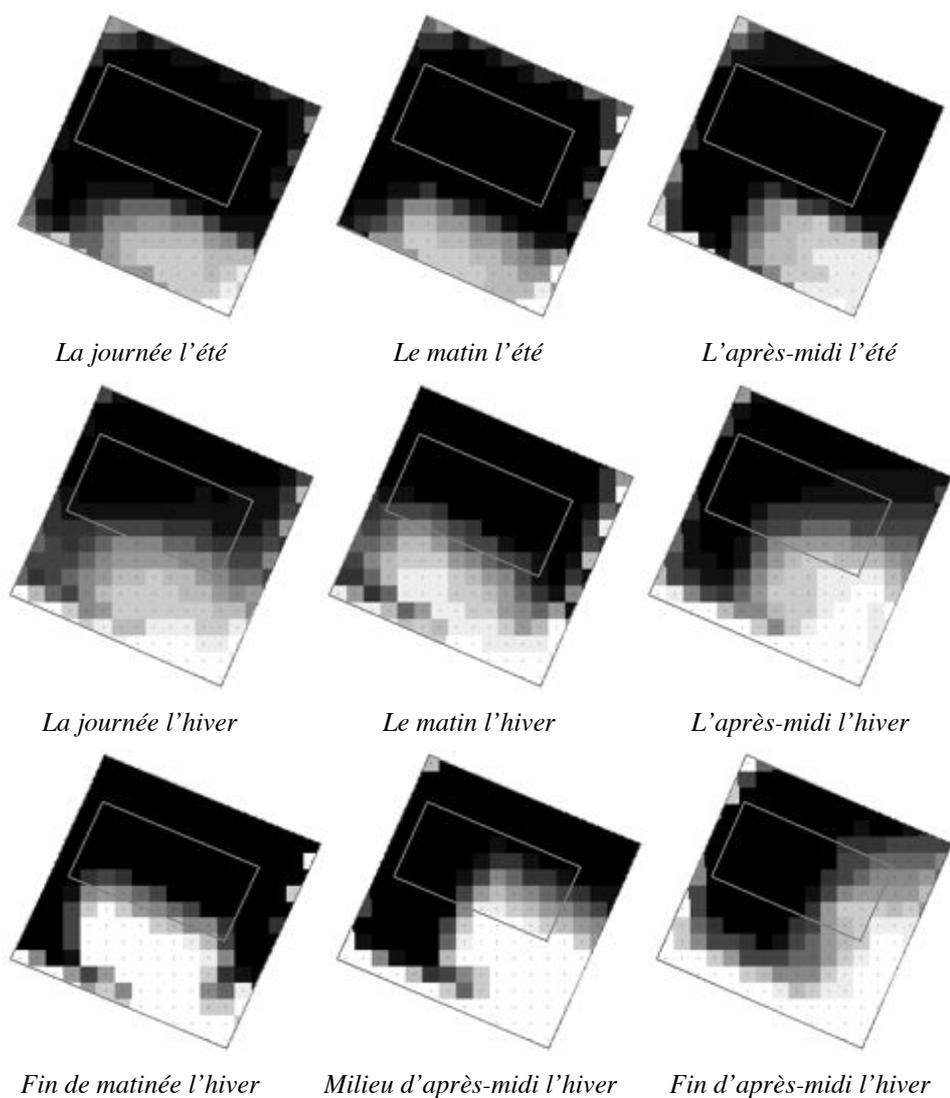


Figure 7.12. Cartes d'ensoleillement de la construction en différentes plages temporelles (états d'ensoleillement cumulés)

Le quart Sud-Est du bassin présente un ensoleillement potentiel maximal en milieu d'après-midi l'hiver. Une pyramide ayant pour base cette zone et pour plage temporelle cette période est calculée dans *Solimac*. Elle peut être utilisée de deux manières : elle permet de faire un diagnostic de l'enveloppe d'une part, et de créer les masques solutions d'autre part.

En termes de diagnostic, l'intersection de cette pyramide avec l'enveloppe actuelle du bâtiment révèle les zones évidées exactes qui génèrent les nuisances d'ensoleillement sur le quart Sud-Est du bassin en milieu d'après-midi l'hiver. Ces zones sont montrées sur la figure 7.13. Une grande partie de l'évidement créé pour le solarium est mis en cause. Les deux intentions initiales apparaissent donc très conflictuelles.

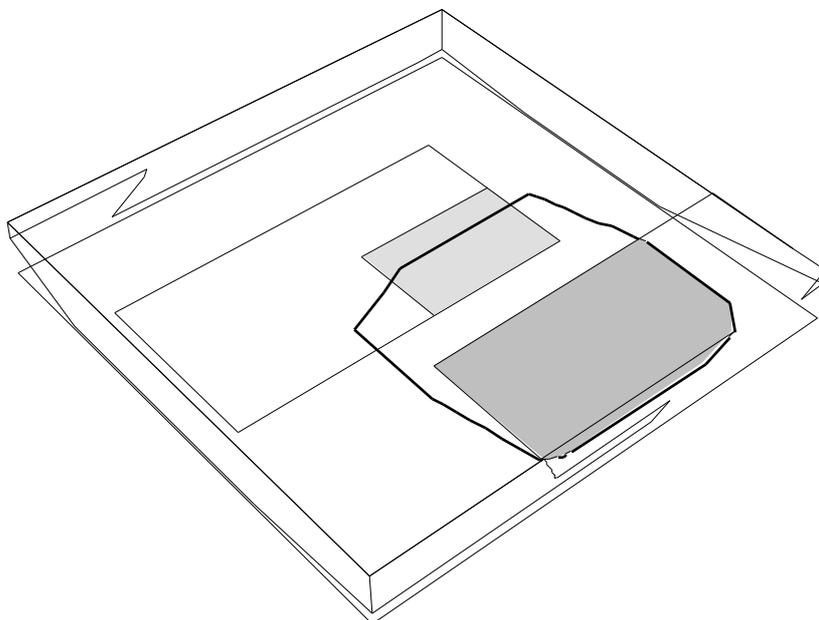


Figure 7.13. Diagnostic de la zone d'évidement (en grisé) responsable de l'ensoleillement du quart Sud-Est du bassin en milieu d'après-midi l'hiver

Pour résoudre ce problème, il reste à créer un masque au soleil capable de protéger le bassin sans diminuer l'ensoleillement du solarium. La même pyramide définie pour le quart Sud-Est du bassin en milieu d'après-midi l'hiver est utilisée. L'exploration des différentes solutions masques est faite dans *Solimac*. Cette exploration soulève d'importantes difficultés : aucun des masques plans simples explorés dans *Solimac* ne convient. Les masques verticaux définissent des parois opaques d'autant plus importantes qu'elles sont éloignées du bassin. L'intention de perméabilité visuelle entre le bassin et la plage est mise en cause par ces parois. Les masques horizontaux imposent de surbaisser de manière importante le plafond au dessus du bassin.

Cette solution est impossible du point de vue de la sécurité et de la surveillance. Par ailleurs, aucun masque plan oblique n'apporte de solution satisfaisante capable de s'intégrer au projet défini.

Que faire ? L'exploration des masques potentiels a permis au concepteur de juger de leur importance en fonction de leur position. En utilisant cette connaissance, l'architecte tente de composer les avantages des différents masques sans cumuler leurs inconvénients. Il définit un masque « mixte », composé d'une paroi verticale et d'une paroi horizontale. Ce masque constitue une sorte de plateau ou de passerelle surélevée, au dessus de la plage Sud du bassin. Il apparaît rapidement que l'on peut tirer parti de ce nouvel élément dans le projet.

Cette idée va devenir prépondérante. En utilisant le masque mixte calculé de manière exacte, le concepteur définit une passerelle qui longe le bassin au dessus de la plage (figure 7.14). Il envisage de créer deux accès à cette passerelle, l'un côté bassin et l'autre côté plage. La transparence visuelle du bassin vers la plage est donc non seulement réalisée mais complétée par un plateau intermédiaire capable de relier l'un à l'autre. La paroi verticale de ce plateau sera maintenue fermée, de telle sorte que sur la passerelle, le bassin devient invisible, à l'inverse de la situation proposée sur la plage.

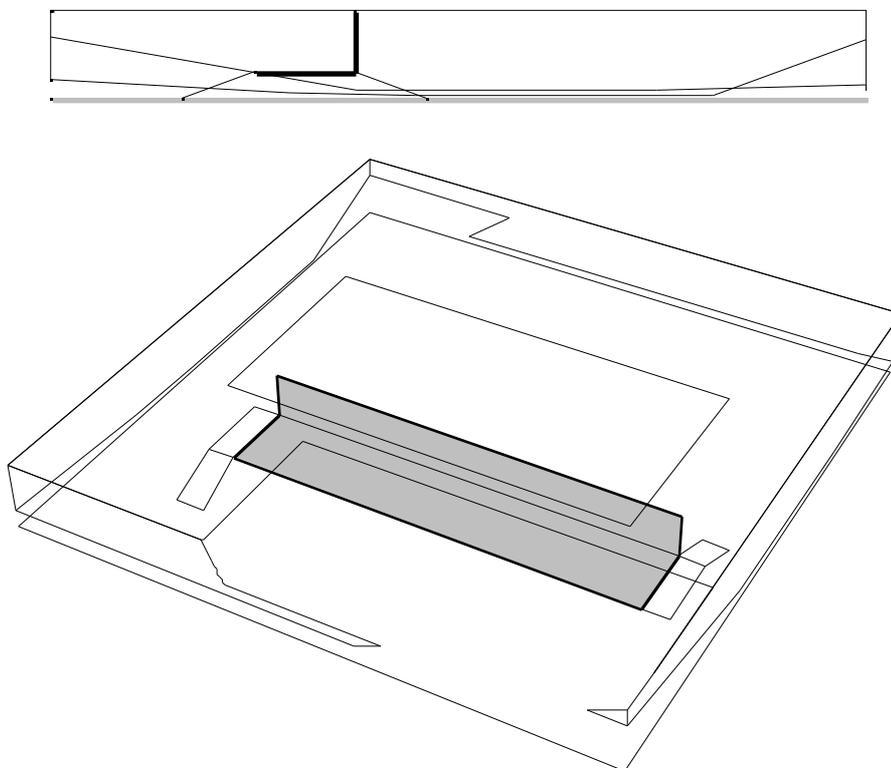


Figure 7.14. Masque passerelle (coupe et perspective)

Du point de vue de l'ensoleillement, la passerelle répond à toutes les intentions initiales. Elle protège complètement le bassin sans enfreindre la contrainte de transparence avec la plage. Elle ne nuit pas au solarium, ni en été ni en hiver. Elle possède en outre ses propres qualités d'ensoleillement : elle est plutôt protégée du soleil l'après-midi l'été et elle apparaît très bien exposée toute la journée l'hiver.

### 7.2.3 Bilan de l'expérience

Comme dans notre premier exemple, les intentions d'ensoleillement mises en oeuvre dans ce projet se sont révélées déterminantes dans le choix des formes architecturales. De manière radicale, la contrainte d'ombrage pesant sur la bassin a « modelé » l'enveloppe de la piscine et fourni un argument au concepteur pour justifier ce choix plastique. L'intention contradictoire visant à la création d'un solarium a été négociée de telle sorte qu'elle a fait émergé un objet imprévu du projet : une passerelle dont les qualités d'ensoleillement et d'usage sont apparues adaptées aux intentions. La figure 7.15 ci-dessous montre une image du projet finalement proposé.

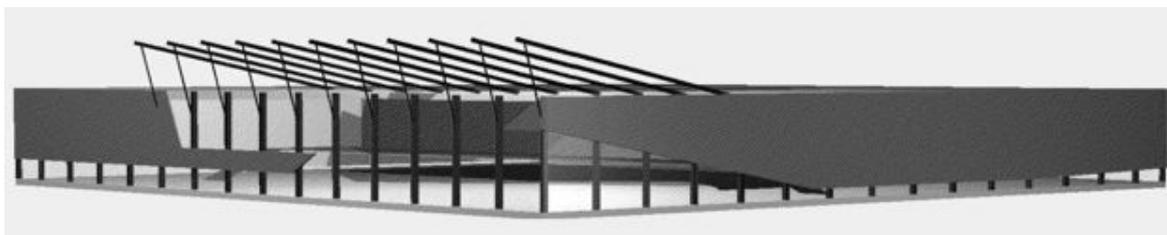


Figure 7.15. Résultat rendu

Remarquons que les méthodes de simulation directe et inverse ont été utilisées conjointement dans ce projet, pour mettre au jour les conséquences des actes de démarcation des formes d'une part, et pour réaliser les intentions d'autre part. En outre, nous avons remarqué que la pyramide d'ensoleillement constitue un outil de diagnostic inédit puisqu'elle permet d'obtenir des résultats qu'aucune méthode de simulation directe ne peut fournir : les parties d'une scène responsables de l'ensoleillement ou de l'ombrage d'une zone donnée pour une période donnée.

Nous avons obtenu ce résultat de manière indirecte en effectuant nous mêmes, à l'aide de notre modeleur, les opérations booléennes nécessaires. Ce type de résultat et tous ceux que nous avons établis au chapitre 4 s'obtiendront de manière automatique lorsque nous aurons développé toutes les possibilités de notre modèle de résolution des problèmes d'ensoleillement.

### 7.3 Projet d'épannelage d'un immeuble urbain

Dans ce dernier exemple, les intentions d'ensoleillement ne s'appliquent pas au projet lui-même mais à son environnement. En l'occurrence, il s'agit de modeler le gabarit d'un immeuble dans son contexte urbain en considérant les implications de cette nouvelle construction sur les bâtiments existants. On suppose que le gabarit est donné par les règles d'urbanisme en vigueur sur la parcelle. Ce gabarit et son contexte sont présentés en plan et en perspective dans les figures 7.16 et 7.17 (page suivante).

Ce projet est peu crédible si l'on imagine que les intentions d'ensoleillement viennent du commanditaire de l'immeuble : celui-ci sera plus pressé de rentabiliser le prix de la construction que de s'intéresser aux nuisances lumineuses induites sur le voisinage. Par contre, le projet devient plausible si l'on suppose que les intentions émanent de la puissance publique, soucieuse d'aménager un accès au soleil égal pour tous dès la définition du gabarit de l'immeuble.

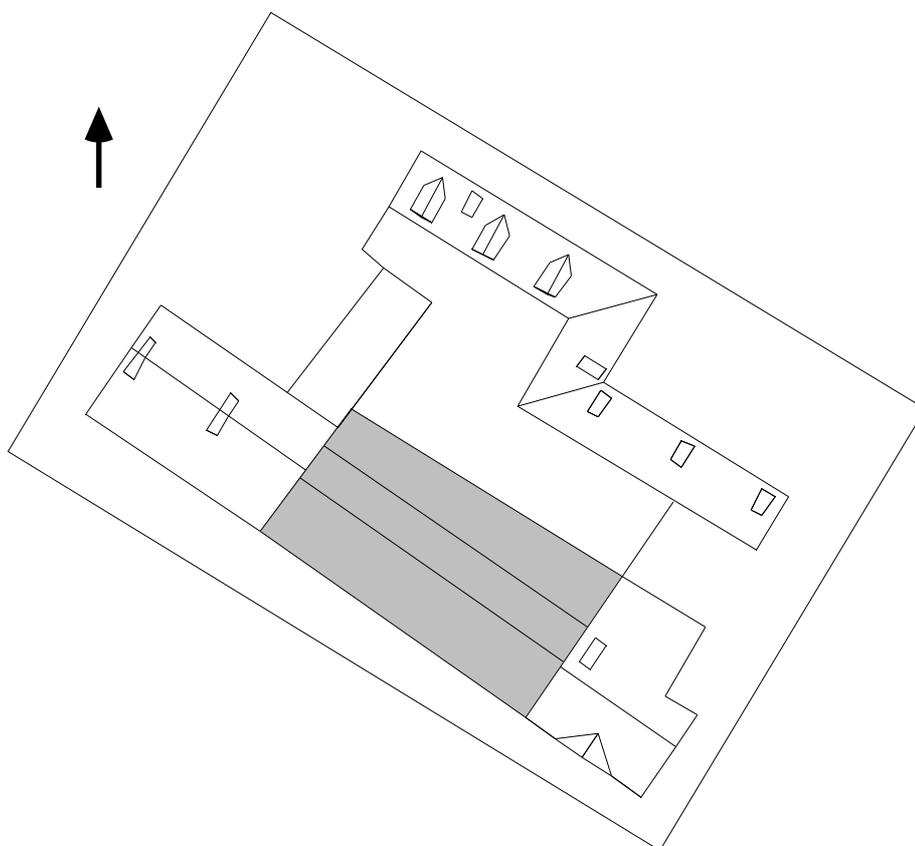


Figure 7.16. Situation du projet (plan)

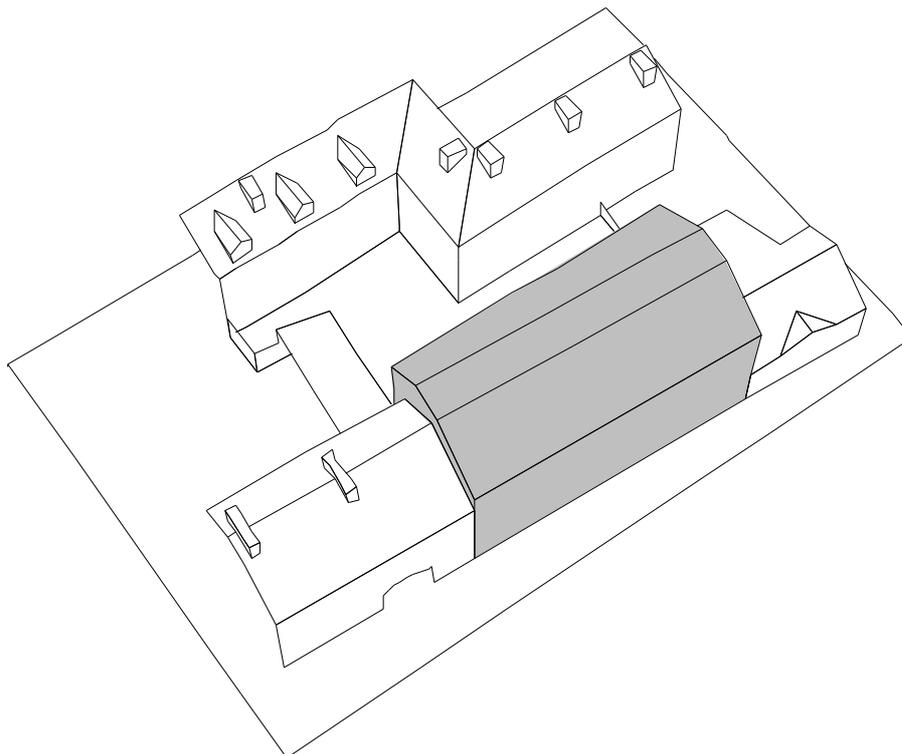


Figure 7.17. Situation du projet (perspective)

### 7.3.1 Diagnostic d'enseillement

Un diagnostic de l'enseillement résultant de la construction de ce gabarit est effectué dans *Solimac*. Les résultats pour différentes plages temporelles sont montrés dans le tableau de la figure 7.18 page suivante. Ces résultats constituent différentes vues des cartes d'enseillement de la cour et de trois façades du projet, telles qu'elles peuvent être affichées en axonométrie dans *Solimac*. Ce sont donc les cumuls d'enseillement en différentes plages temporelles d'hiver et d'été qui sont affichés.

Ce diagnostic fait apparaître une situation contradictoire :

- la construction nouvelle apporte une situation très défavorable sur les façades arrières en hiver, saison pendant laquelle on souhaite bénéficier de l'enseillement maximal ; en particulier, la surface de la cour intérieure et les premiers niveaux des immeubles arrières ne sont quasiment plus enseillés durant cette saison ;
- à l'opposé, les façades et la cour sont très bien exposées la journée l'été, alors que l'on souhaiterait plutôt qu'elles soient protégées.

Peut-on corriger cette situation ?

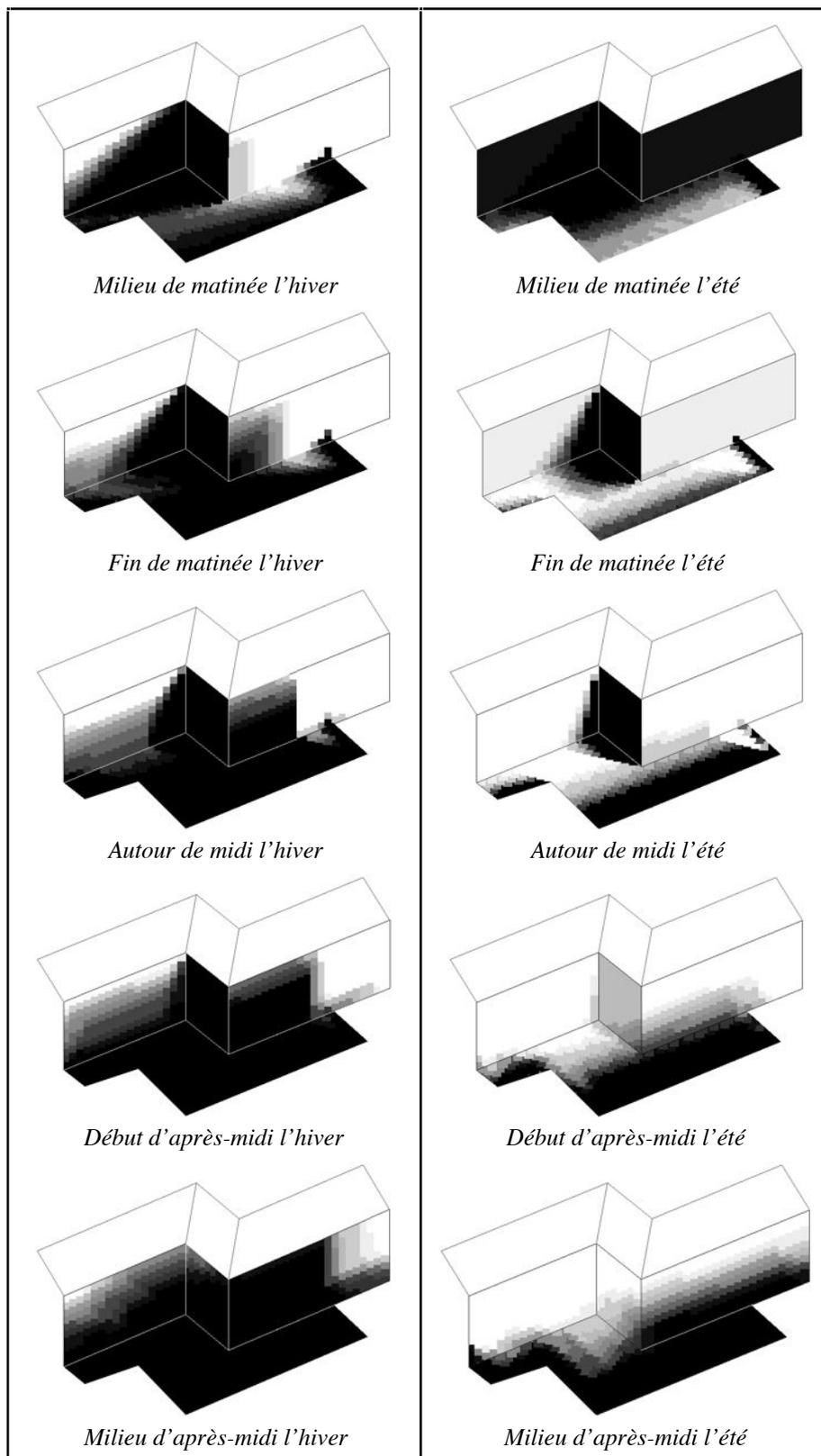


Figure 7.18. États d'ensoleillement des façades voisines  
(Hiver à gauche, été à droite)

### 7.3.2 Epannelage du gabarit

Pour améliorer l'enseillement d'hiver sur les façades arrières, le concepteur choisit d'abord de réaliser une tache de soleil continue sur les façades arrières en milieu de journée l'hiver. Deux pyramides d'enseillement sont calculées dans *Solimac* (figure 7.19 en haut). Le gabarit de l'immeuble est ensuite évidé de ces pyramides (figure 7.19 en bas).

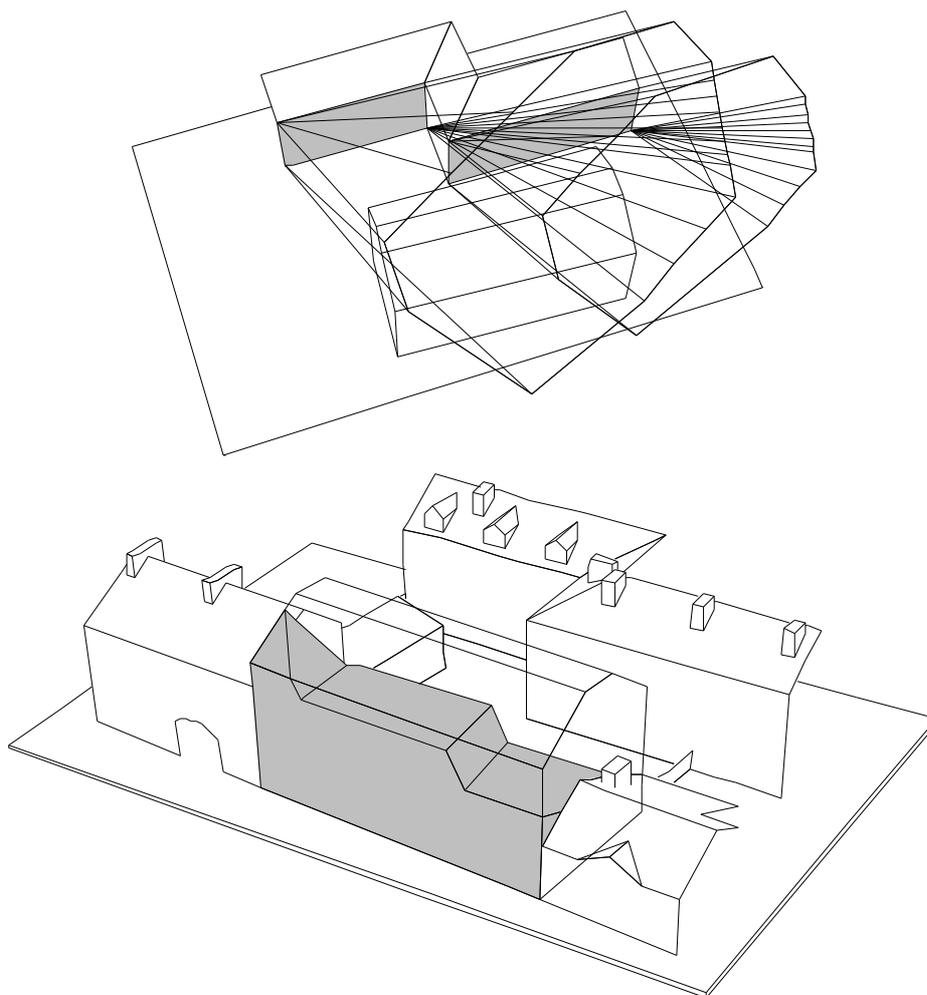


Figure 7.19. Évidement du gabarit (en bas) pour réaliser l'enseillement des façades arrières (en haut) en milieu de journée l'hiver

Cette solution est satisfaisante du point de vue de l'enseillement. Elle apparaît cependant irréaliste puisqu'elle diminue le gabarit projeté de la moitié de son volume. Un compromis doit donc être trouvé. Celui-ci est possible si l'on considère le halo caractéristique des taches de soleil réalisées. Nous savons que l'enseillement déborde nécessairement le contour d'une tache projetée pendant une plage temporelle donnée (celle-ci représente l'intersection de toutes les taches de soleil pendant cette période). Il est donc pos-

sible de diminuer notablement la surface des taches initiales « en comptant » sur le halo de chacune d'elles pour augmenter les conditions globales d'ensoleillement des façades.

Ce parti conduit le concepteur à dessiner deux taches n'occupant qu'une zone moindre de chacune des façades arrières (figure 7.20). Ces taches seront au soleil pour tous les instants du milieu de journée l'hiver. Les zones voisines bénéficieront du halo associé. L'évidement du gabarit résultant est nettement réduit (figure 7.20) : seule la partie Sud de la construction est surbaissée, le reste n'étant affecté qu'en toiture. Cette solution est jugée convenable. Elle donne lieu à une interprétation montrant un épannelage plausible du gabarit et non un réel projet architectural (figure 7.21).

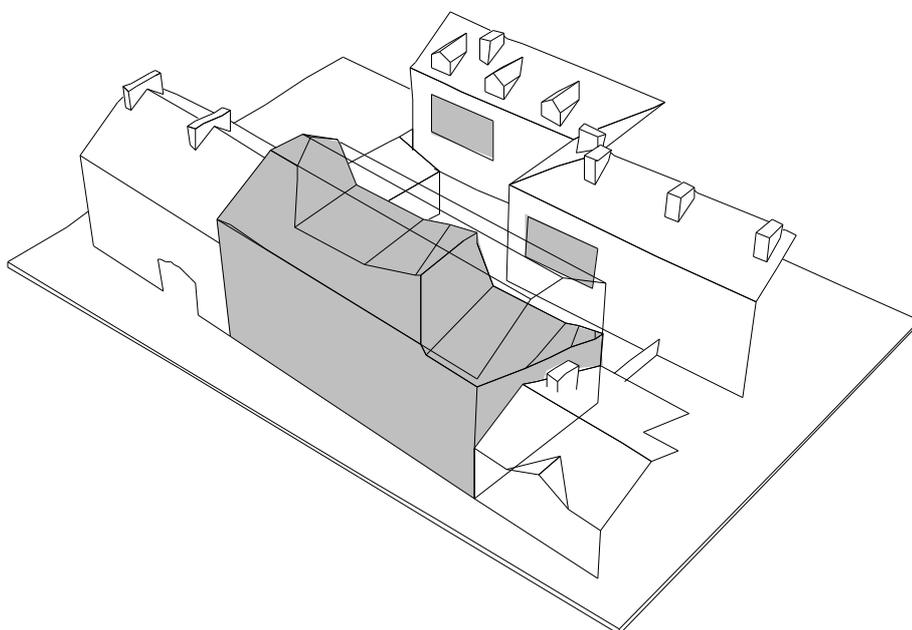


Figure 7.20. Évidement réduit du gabarit

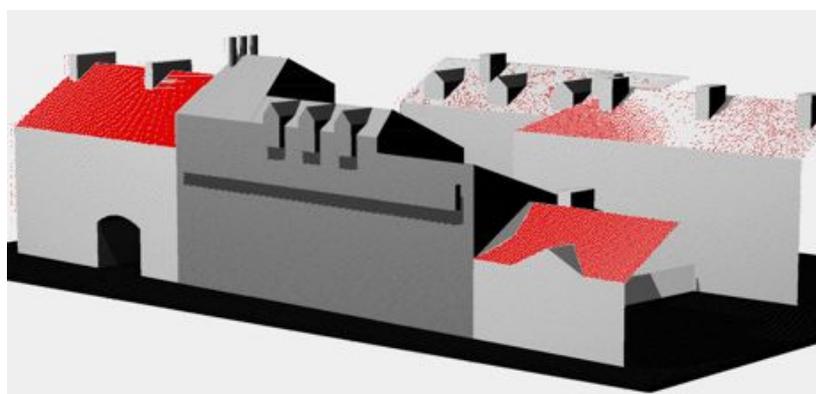


Figure 7.21. Interprétation de l'épannelage du gabarit

Une nouvelle évaluation de la situation d'enseillement sur les façades arrières et la cour et réalisée dans *Solimac*. Les résultats sont présentés dans la figure 7.22 ci-dessous. On constate une augmentation significative de l'enseillement des façades arrières en milieu de journée l'hiver. Tout au long de l'après-midi l'hiver, le gain d'enseillement potentiel est important.

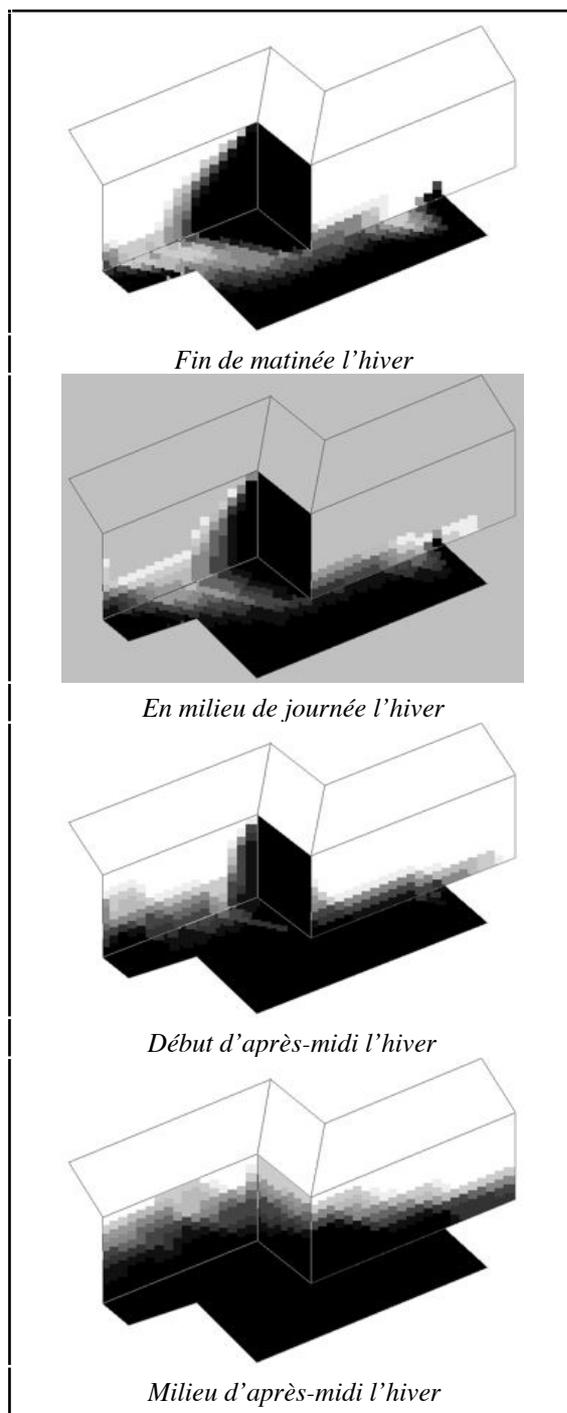


Figure 7.22. Nouveaux états d'enseillement

Les problèmes de surexposition d'été ne peuvent être réglés par le gabarit de la construction. Une solution plus naturelle peut être envisagée avec la plantation d'un arbre caduque dans la cour intérieure. Pour faire le choix de l'essence la mieux appropriée, il serait possible d'utiliser *Solimac* comme nous l'avons montré au chapitre 6.

### 7.3.3 Bilan de l'expérience

Sur le fond, ce projet tend à montrer qu'il est possible d'appréhender l'ensevelissement du tissu urbain autrement qu'avec les solutions radicales ou normatives généralement proposées (cf. chapitre 1). Ensevelissement et formes urbaines ne sont pas incompatibles si l'on dispose d'outils capables de réaliser des compromis entre les formes, d'assurer la continuité du tissu tout en ménageant un accès au soleil suffisant pour toutes les façades, sans être nécessairement absolu. Nos propositions pourraient trouver une application privilégiée pour ce type de problème. De ce point de vue, la simulation inverse de l'ensevelissement peut constituer une alternative aux règles d'urbanisme qui manquent généralement de souplesse et de subtilité en la matière.

Pour ce qui concerne la réalisation de ce projet, nous avons constaté que la démarcation des intentions d'ensevelissement, à l'instar de la démarcation des formes, est soumise à des raffinements successifs. La première intention assurait un ensevelissement quasi parfait des façades arrières mais supprimait la moitié du volume constructible sur rue. Un compromis a pu être trouvé en jouant avec le halo caractéristique des taches d'ensevelissement. En l'état actuel, *Solimac* n'est pas capable de calculer ce halo. À travers cet exemple nous imaginons plus clairement les avantages que cette fonctionnalité (qui ne dépend que de modalités pratiques de mise en œuvre) apporterait pour la maîtrise du projet.

Enfin, de manière analogue aux deux premiers exemples, les intentions ont fait naître dans ce projet des formes architecturales qui, sans aucun doute, n'aurait pas été créées sans prise en compte de l'ensevelissement. Nous ne jugeons pas de ces formes — là n'est pas notre propos. Nous constatons que les intentions d'ensevelissement sont potentiellement créatives en ce qu'elles mettent en évidence, par l'intermédiaire de la pyramide d'ensevelissement, des formes souvent surprenantes et capables d'inspirer la création.

## Conclusion

Ces trois projets ne prétendent pas réaliser une validation définitive de nos hypothèses. Nous avons montré en introduction de ce chapitre les difficultés que posent une telle validation ; c'est en considérant ces difficultés que nous nous sommes mis en situation de conception, comme premier utilisateur de notre outil.

A travers ces exemples, nous avons constaté que la simulation inverse de l'ensevelissement est, au minimum, compatible avec le processus de conception (le nôtre en l'occurrence). Autrement dit, la formulation, la manipulation et la réalisation d'intentions d'ensevelissement est « naturelle » à la conception et l'outil que nous proposons s'inscrit sans heurt dans l'ensemble des outils dévolus à l'élaboration du projet. Ce point est important si l'on considère que parmi les nombreux outils proposés pour l'aide à la conception, nombreux sont ceux qui sont « rejetés » par les concepteurs eux-mêmes, qui les perçoivent comme difficiles à s'intégrer dans le projet et peu créatifs.

Sans doute cette facilité d'intégration vient-elle de ce que *Solimac* est avant tout un « générateur de formes », souvent étranges et parfois fascinantes. Il est difficile de montrer cette richesse formelle dans le cadre d'un rapport écrit. On doit donc nous faire confiance lorsque nous avançons que les formes issues des pyramides d'ensevelissement sont une source intéressante d'invention dans le projet. Peut-être cette qualité doit-elle être imputée aux propriétés des formes créées par la somme de Minkowski, qui réalisent de subtils compromis entre deux objets primaires, produisant des images mystérieuses et fascinantes de ces objets.

D'autres constats généraux peuvent être faits de ces expériences. Nous retiendrons en particulier que les outils de simulation directe et inverse apparaissent, à l'usage, complémentaires et indissociables dans le projet. Ce constat est conforme à notre modèle théorique du processus de conception (cf. chapitre premier) : formes et intentions se rencontrent au niveau des effets ; il est tout aussi nécessaire d'exposer ces effets par simulation directe que de pouvoir les réaliser par simulation inverse.

Un outillage complet de mise en oeuvre de l'ensevelissement dans le projet devrait donc associer ces deux facilités. Notre formalisation générale des problèmes d'ensevelissement, exposée au chapitre 4, est susceptible de fournir la base d'un tel outil.

Éléments  
de conclusion  
Perspectives de recherche

## Éléments de conclusion

Au dernier siècle de l'antiquité, dans ses Dix livres de l'architecture (Gros 1992), Vitruve donnait déjà quelques bons préceptes pour la prise en compte de l'ensoleillement dans le projet. Il considérait conjointement les effets thermiques, lumineux et même esthétiques de la lumière naturelle (Livre sixième, Chapitres I et VI). Vitruve n'avait pas le choix : la construction ne pouvant pas s'isoler de son contexte climatique, il incombait à l'architecte de savoir maîtriser les interactions entre celui-ci et le bâtiment projeté, c'est-à-dire les ambiances au sens où nous l'entendons désormais. Remarquons que pour ce faire, l'architecte devait être savant des connaissances les plus avancées de son temps.

Pourtant, les connaissances astronomiques dont disposait Vitruve apparaissent aujourd'hui à la fois naïves et entachées de superstition. Vitruve considérait la voûte céleste comme une sphère amarrée à la Terre par un étrange essieu qui la faisait tourner continuellement (Livre neuvième, Chapitre I). Il disposait du gnomon comme cadran solaire, probablement divisé en heures de durées variables suivant les jours (Livre neuvième, chapitre III), selon un système de repérage temporel analogue à celui que nous appelons le temps vécu (cf. § 6.1.2). Vitruve croyait encore que la latitude était responsable de la qualité des voix humaines ; il développait ainsi une théorie solaire du ton de la voix particulièrement étonnante (Livre sixième, Chapitre I).

Par ses théories et ses propositions, Vitruve participait aux mouvements des connaissances de son époque. L'on sait que la compréhension de la mécanique céleste fut au centre des problèmes posés aux savants de l'antiquité ; on trouvera dans le livre de G. Lochack (1994) une vision synthétique des modèles astronomiques développés au cours des siècles. En réalité, pour reprendre la terminologie adoptée dans ce rapport, le problème posé aux premiers astronomes représente le problème inverse de celui que nous avons exposé au chapitre 2 : connaissant les trajectoires apparentes du soleil (et des autres astres) en un lieu donné, en déduire la structure géométrique de l'univers... Comme tous les problèmes inverses, celui-ci admet plusieurs « solutions » qui sont autant de modèles théoriques ou pratiques de notre univers. La recherche de ces solutions a fourni une part prépondérante des théories physiques et géométriques jusqu'à Kepler et Newton. La vérification de la conformité d'une solution particulière, celle de Kepler, à la structure réelle de l'univers n'a été rendue possible que par le développement même des connaissances scientifiques que ces théories ont stimulé.

Aujourd'hui, la mécanique céleste est connue de tous. Son application dans le champ du projet d'architecture concerne principalement l'ensoleillement. Elle est mise en oeuvre par des méthodes de projections géométriques déve-

loppées dès le dix-huitième siècle. Que réalisent ces méthodes ? Elles réduisent d'abord à trois les quatre dimensions de l'ensoleillement en imposant une discrétisation du temps ou de l'espace (cf. chapitre 2). L'espace 4D étant ramené à un espace 3D, elles donnent de cet espace une projection 2D utilisable sur la table à dessin. Les deux dimensions perdues ne peuvent être retrouvées que par itération de constructions géométriques. Ce sont ces méthodes qui sont encore utilisées aujourd'hui, qu'elles soient mises en oeuvre de manière graphique, analogique ou numérique.

En proposant la pyramide complexe d'ensoleillement, nous avons ajouté une nouvelle dimension, au sens propre, à la formalisation des problèmes d'ensoleillement. Ainsi, dans notre géométrie de l'ensoleillement (chapitre 4), il n'est plus question de discrétisation mais d'intégration géométrique. La pyramide d'ensoleillement est une abstraction géométrique qui ne correspond à aucune réalité perceptible. Elle peut être considérée comme une « projection » en trois dimensions d'un phénomène quadridimensionnel. Il n'est donc pas étonnant qu'elle se construise géométriquement par une somme de Minkowski, c'est-à-dire par une opération ensembliste définie originellement pour formaliser l'espace-temps en théorie de la relativité.

Notre problématique n'est pourtant pas fondamentalement géométrique. Nous avons obtenu ces résultats en nous interrogeant sur la prise en compte des ambiances et, en particulier, de l'ensoleillement dans le processus de conception en architecture. En réduisant les ambiances aux seules interactions entre les phénomènes physiques et l'environnement construit, nous avons constaté que les outils capables de simuler ces interactions ne sont pas adaptés à la démarche de conception. Ils interviennent a posteriori de la mise en forme du projet et n'ont donc de valeur que corrective. De ce point de vue, ils sont perçus comme des outils de diagnostic contraignants plutôt que comme des outils de conception créatifs.

Sur ce constat, nous avons fait l'hypothèse qu'une approche inverse de la simulation est nécessaire au projet architectural. La simulation inverse, telle que nous l'envisageons, doit permettre à la fois la formulation, la manipulation et la réalisation d'intentions d'ambiances pour satisfaire au processus de conception. L'approche déclarative en modélisation géométrique nous a paru capable de répondre, au moins partiellement, à ces exigences. C'est en utilisant le cadre méthodologique de ce domaine que nous avons abordé le problème inverse de l'ensoleillement. Et c'est pour résoudre ce problème que nous avons défini une nouvelle géométrie de l'ensoleillement au centre de laquelle apparaît la pyramide complexe.

Pour conclure cette recherche, il nous faudrait pouvoir valider scientifiquement nos hypothèses et nos résultats. Nous avons discuté les difficultés de cette validation ; à défaut, nous avons proposé plusieurs illustrations architecturales au travers desquelles nous nous sommes mis en situation de

conception, comme premier utilisateur de notre outil (chapitre 7). Ces illustrations nous ont permis de vérifier que l'approche inverse de la simulation d'ensoleillement est compatible avec la démarche de conception en architecture. Elles constituent donc ce que l'on peut définir comme une preuve de faisabilité de l'approche que nous préconisons. Cette base ouvre de nombreuses perspectives de recherche dont nous proposons, pour clore ce rapport, un rapide inventaire.

## Perspectives de recherche

Ces perspectives peuvent être classées dans trois catégories qui définissent un court terme, un moyen terme et un long terme à nos recherches. A court terme, il est possible d'envisager un développement appliqué de notre modèle déclaratif de l'ensoleillement. A moyen terme, une généralisation de ce modèle à l'ensemble des problèmes de visibilité est d'ores et déjà entamée. A plus long terme, une application de nos hypothèses à d'autres phénomènes d'ambiances peut être envisagée.

### Développement du modèle déclaratif de l'ensoleillement

Rappelons qu'à travers ce modèle (chapitre 4), tous les problèmes d'ensoleillement peuvent être représentés et résolus par des opérations booléennes entre les objets d'une scène et une pyramide d'ensoleillement. *Solimac* n'implémente qu'une partie de ces résultats, faute d'outils adéquats pour résoudre les opérations booléennes entre volumes complexes. Nous disposons aujourd'hui de ces outils sous la forme de noyaux ouverts de modélisation géométrique, non disponibles lors du développement de *Solimac*. Il est possible d'envisager à court terme l'intégration dans l'un de ces noyaux de notre géométrie de l'ensoleillement et, en particulier, des méthodes de détermination d'une pyramide complexe d'ensoleillement. Le modèle décrit au chapitre 4 fournit les spécifications nécessaires à cette implémentation.

Sur cette base, il est possible d'envisager le développement d'un système interactif dédié à l'ensoleillement, mêlant sans différenciation les méthodes de simulation directe et inverse, tout en fonctionnant sur un mode de communication naturelle. En outre, un tel système peut être intégré de manière quasi immédiate dans un modeleur dédié à l'architecture puisqu'il utilise principalement des opérateurs géométriques.

Enfin, d'autres problèmes posés par notre géométrie de l'ensoleillement pourraient recevoir une solution à court terme. En particulier, il n'est pas exclu que l'on puisse, sous certaines conditions, déterminer les états exacts d'ensoleillement d'une zone de l'espace pendant une plage temporelle donnée sans passer par un croisement des résultats de simulations directes. Des

modèles physiques connus pourraient nous permettre de résoudre ce problème que nous avons laissé en suspens. Nous disposerions alors d'une véritable physique intégrale (au sens géométrique) de l'ensoleillement.

### **Généralisation aux problèmes de visibilité**

Nous avons conclu le chapitre 2 sur les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement en mentionnant le détournement de ces méthodes à des fins de détermination de l'accessibilité visuelle d'un bâtiment dans son contexte urbain. Cette simulation de la visibilité est effectuée en considérant un soleil factice qui décrit le contour du bâtiment. Les états d'ensoleillement des points de l'espace avoisinant ce bâtiment nous donnent alors les degrés de visibilité du bâtiment depuis ces points.

En réalité, l'ensoleillement peut être considéré comme un cas particulier d'un problème plus général : celui de la visibilité d'un objet depuis une zone de l'espace. Le soleil décrit dans le temps des trajectoires qui définissent une surface à distance infinie. Dès lors, les problèmes d'ensoleillement, qu'ils soient directs ou inverses, se ramènent tous à des problèmes de visibilité partielle des trajectoires solaires depuis une zone quelconque de l'espace. Cette visibilité est bien sûr particularisée par le parallélisme des rayons solaires introduit en considérant les trajectoires à l'infini.

Notre formalisation des problèmes d'ensoleillement peut donc être considérée comme un cas particulier d'une formalisation plus générale : celle des problèmes de visibilité. Cette formalisation est en cours de définition au Laboratoire CERMA par M-L. Nivet (cf. Mounier et al. 1996), à la suite des travaux sur l'accessibilité visuelle réalisés en détournant le logiciel *Solène* (cf. chapitre 2). La simulation inverse de l'accessibilité visuelle est issue de nos propres travaux sur l'ensoleillement et permet d'envisager de manière analogue la résolution des problèmes directs et des problèmes inverses concernant la visibilité. Cependant, M-L. Nivet introduit une modulation de la visibilité en définissant un modèle d'intermittence spatiale ou temporelle. Dans le cas de l'ensoleillement, l'intermittence revient à considérer des états d'ensoleillement non entiers, c'est-à-dire compris dans l'intervalle  $]0, 1[$ . Si ce modèle aboutit pour la visibilité, il nous permettrait en retour de résoudre les problèmes de simulation inverse de l'ensoleillement par des propositions modulées du type  $(P, \textit{bien ensoleillé}, T)$  ou  $(P, \textit{très bien protégé}, T)$ . Ces propositions sont équivalentes à des propositions  $(P, S, T)$  élémentaires à valeur de vérité non entière. Elles apporteraient une souplesse intéressante à nos outils dans un cadre de conception architecturale.

Dans la même perspective à moyen terme, citons enfin les travaux récemment engagés par D. Faucher intéressant la modélisation sous contraintes d'enveloppes urbaines. Ces contraintes sont multi-critères et peuvent en

particulier concerner l'ensoleillement et la visibilité dans un contexte urbain réaliste. Dans le cas de l'ensoleillement, c'est notre modèle et ses possibilités d'exploration graphique interactive des solutions masques, qui devrait être mis en oeuvre.

### **Application à d'autres phénomènes d'ambiances**

Deux nouvelles perspectives peuvent être dégagées à plus long terme. L'une concerne l'intégration théorique de la notion de simulation inverse introduite dans cette recherche. L'autre découvre les possibilités d'application de cette notion pour la prise en compte d'autres phénomènes d'ambiances que l'ensoleillement dans le cadre du projet d'architecture.

Le balayage bibliographique rapide que nous avons réalisé pour introduire la notion de simulation inverse (chapitre 1) n'est pas exhaustif. Il reste à faire, de ce seul point de vue bibliographique, un intéressant travail de compilation des références existantes, à la fois sur les hypothèses qui justifient la notion de simulation inverse, et sur les méthodes et les outils qui la mettent en oeuvre pratiquement dans différents champs disciplinaires (physique, automatique, imagerie, modélisation...). Ce travail viserait à l'intégration théorique de la notion de simulation inverse dans les problèmes de conception en architecture. En particulier, un croisement systématique des modèles du processus de conception et des approches inverses en général reste à faire. La notion de simulation inverse recouvre-t-elle l'ensemble des problèmes posés par l'intégration des outils de simulation dans un contexte de conception ?

Si cette hypothèse s'avère féconde, il semble alors nécessaire d'envisager le recensement des méthodes et des outils de résolution des problèmes inverses dans les champs de recherche qui ont recours à cette notion. Il apparaît que les sciences physiques apportent des méthodes intéressantes dans ce domaine. Ces méthodes peuvent-elles être utiles pour la prise en compte des ambiances dans le processus de conception en architecture ?

Ce double travail d'intégration théorique et de compréhension des méthodes de résolution des problèmes inverses permettrait de mieux situer notre problématique dans le champ des connaissances actuelles. Sur cette base, il deviendrait possible d'envisager d'appliquer notre hypothèse à d'autres phénomènes d'ambiance. Nous avons montré au chapitre 3 que des tentatives intéressantes existent en ce sens dans les domaines de la thermique, de la lumière naturelle ou de l'éclairage artificiel. Ces recherches disparates peuvent-elles s'articuler dans une même problématique ? Peut-on étendre cette problématique à d'autres phénomènes plus complexes comme les phénomènes sonores et aérodynamiques ?

Si ces questions très larges apparaissent à la fin de ce rapport, c'est que le champ que nous avons tenté d'explorer est à bien des égards encore vierge. De nombreuses connaissances restent à construire, tant dans la problématique des ambiances architecturales que dans celle concernant le processus de conception en architecture. Le croisement de ces domaines de recherche s'avère fécond. Du point de vue de la conception, la prise en compte de ces objets sensibles, volatiles et dynamiques, que sont les ambiances apporte un renouvellement thématique dont l'architecture contemporaine, soumise à une crise d'identité et de légitimité, a sans doute besoin. De l'autre point de vue, gageons que l'intégration de la notion d'ambiance au processus de conception constitue l'une des plus plausibles manières de rendre ces ambiances véritablement architecturales — c'est-à-dire situées dans l'espace du projet.

## Bibliographie

**Nota** : Les chiffres entre parenthèses à la fin de chaque référence signalent les numéros des chapitres dans lesquels cette référence apparaît.  
Les références sans indication de chapitre sont citées en introduction générale ou en conclusion générale.  
Nous avons établi une liste de références bibliographiques à la fin de chaque chapitre.

### Ouvrages et cahiers scientifiques

**Achard P., Gicquel R.** (Edited by) 1986 — European Passive Solar Handbook (Preliminary Edition), Commission of the European Communities DG XII, Bruxelles (Belgique), 287 p. (3)

**AFEDES** (Association Française pour l'Étude et le Développement des applications de l'Énergie Solaire) 1980 — Mémento d'héliothermie, Éditions Européennes Thermique et Industrie, Paris (France), 238 p. (2)

**Augoyard J-F., Torgue H.** 1995 — A l'écoute de l'environnement : Répertoire des effets sonores, Éditions Parenthèses, Marseille (France), 174 p. (1)

**Bernard R., Menguy G., Schwartz M.** 1986 — Les rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Techniques et Documentation Lavoisier, Paris (France), 215 p. (1)

**Boudon P., Pousin F.** 1988 — Figures de la conception architecturale, manuel de figuration graphique, Éditions Dunod, Paris (France), 111 p. (1)

**Boudon P.** 1992 — Introduction à l'architecturologie, Éditions Dunod, Paris (France), 258 p. (1)

**Chemiller P.** 1986 — Sciences et bâtiment, CSTB, Presses Nationales de l'École des Ponts et Chaussées, Paris (France), Deuxième partie : L'hygrothermique et l'aéraulique, pp. 45-254 (1)

**Conan M.** 1990 — Concevoir un projet d'architecture, Éditions de l'Harmattan, Paris (France), 185 p. (1)

**Chauvel P.** 1961 — Diagrammes solaires et Mode d'emploi des diagrammes solaires CSTB, Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Vol. 414, n° 52, 8 p. (2)

**Coster M., Chermant J-L.** 1989 — Précis d'analyse d'images, Presse du CNRS, Paris (France), 550 p. (5)

**CSTB** 1991 — Éclairage naturel et artificiel dans le bâtiment, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Division Eclairage et Colorimétrie, Nantes (France), 68 p. (1) (3)

**Dard P.** 1986 — Quand l'énergie se domestique... Observations sur dix ans d'expériences et d'innovations thermiques dans l'habitat, Plan Construction, Paris (France), 175 p. (1)

**Dehausse R.** (Coordonnateur) 1988 — Énergétique des bâtiments, PYC Éditions, Paris (France), Vol. 1 (Situations, besoins) 275 p., Vol. 2 (Calcul des enveloppes) 353 p. (1)

**Dourgnon J., Chauvel P., Kokka L.** 1961 — Déterminations graphiques et mécaniques de l'ensoleillement, Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Vol. 407, n° 51, 33 p. (2)

**Gardan Y.** 1985 (sous la direction de) — Mathématique et CAO, méthodes de base, Hermès, Paris (France), 164 p. (2)

**Guibert D.** 1987 — Réalisme et architecture, Éditions Mardaga, Bruxelles (Belgique), 175 p. (Voir en particulier l'annexe 2 : *La critique opératoire et la méthodologie dans l'institution professionnelle, pédagogique et de recherche*, pp. 143-160) (1)

**Hégron G.** 1985 — Synthèse d'image : algorithmes élémentaires, Bordas, Paris (France), 199 p. (2) (5)

**Lam W. M.C.** 1982 — Éclairage et architecture, Éditions du Moniteur, Paris (France), 301 p. (1)

**Lam W. M.C.** 1986 — Sunlighting as Formgiver for Architecture, Van Nostrand Reinhold Company, New York (USA), 250 p. (1)

**Lebahar J.-C.** 1983 — Le dessin d'architecte, Simulation graphique et réduction d'incertitude, Éditions Parenthèses, Roquevaire (France), 134 p. (1) (6)

**Locquet J.-J., Perrot N.** 1988 — Perspectives cavalières et axonométriques, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris (France), 180 p. (2)

**Mazria E.** 1981 — Le guide de l'énergie solaire passive, Éditions Parenthèses, Roquevaire (France), 339 p. (2)

**Menke W.** 1989 — Geophysical Data Analysis : Discrete Inverse Theory, Academic Press Inc., San Diego, California (USA), 285 p. (1)

**Ninio J.** 1989 — L'empreinte des sens, Perception, mémoire, langage, Éditions Odile Jacob / Points Seuil, Paris (France), 310 p. (1)

**Olgay V.** 1963 — Design with Climate, Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (USA), 190 p. (1)

**Péroche B., Argence J., Ghazanfarpour D., Michelucci D.** 1988 — La synthèse d'images, Hermès, Paris (France), 295 p. (2)

**Preparata F. P., Shamos M. I.**, 1985 — Computational geometry, an introduction, Springer-Verlag, New York (USA), 398 p. (2) (5)

**Prost R.** 1992 — Conception architecturale, une investigation méthodologique, L'Harmattan, Paris (France), 190 p. (1)

**Ruegg A., Burmeister G.** 1993 — Méthodes constructives de la géométrie spatiale, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 134 p. (2)

**Sacadura J-F.** (Coordonnateur) 1982 — Initiation aux transferts thermiques, Technique et Documentation Lavoisier, Paris (France), 445 p. (1)

**Serra J.** 1982 — Image analysis and mathematical morphology, Academic Press, London (UK), 610 p. (5)

**Steadman P.** 1992 — Design, Principles and practice, The Open University, Milton Keynes (UK), Block 4 Chapter 5, *Heating, the forms of houses and the path of the Sun*, pp. 106-130 (2)

**Stevens G.** 1990 — The Reasoning Architect : Mathematics and Science in Design, McGraw-Hill International Editions, New-York (USA), 362 p. (1) (3)

**Twarowski M.** 1967 — Soleil et architecture, Dunod, Paris (France), 175 p. (1) (2) (3)

## Articles de revues scientifiques

**Atherton P., Weiler K.** 1977 — Hidden Surface Removal Using Polygon Area sorting, Computer Graphics, Vol. 11, n° 2, pp. 214-222 (2)

**Augoyard J.F.** 1991 — La vue est-elle souveraine dans l'esthétique paysagère ?, Le Débat, n° 65, pp. 51-59

**Augoyard J.F.** 1995 — L'environnement sensible et les ambiances architecturales, L'Espace Géographique, n° 4, pp. 302-318

**Baljon C.J** 1997 — Design justification as an instance of modal logic, or of rhetoric (Viewpoint), Design Studies, Vol. 18, n° 1, pp. 125-126 (1)

**Boudon P.** 1993 — Conceptions de la conception, Les cahiers de la recherche architecturale, n° 34 (« Concevoir »), pp. 71-82 (1)

**Dupagne A.** 1991 — A computer package to facilitate inhabitants' participation in urban renewal, Environment and Planning B : Planning and Design, Vol. 18, n° 1, pp. 119-134 (2)

**Etzion Y.** 1992 — An improved solar shading design tool, Building and Environment, Vol. 27, n° 3, pp. 297-303 (2)

**Galín E. Akkouche S.** 1996 — Métamorphose d'objets tridimensionnels : quelques méthodes d'accélération, Revue Techniques et Sciences Informatiques, Vol. 15, n° 3, pp. 329-350 (5)

**Gero J.S., D'Cruz N., Radford A.D.** 1983 — Energy in Context : a Multi-criteria Model for Building Design, Building and Environment, Vol. 18, n°3, pp. 99-107 (3)

**Grau K., Johnsen K.** 1995 — General shading model for solar building design, ASHRAE Transactions, Vol. 101, Pt. 2, 13 p. (2)

**Kaul A., Rossignac J.** 1992 — Solid-Interpolating Deformations : Construction and Animation of PIPs, Computers & Graphics, Vol.16, n° 1, pp. 107-115 (5)

**Khemlani L.** 1995 — GENWIN : A Generative Computer Tool for Window Design in Energy-Conscious Architecture, Building and Environment, Vol. 30, n° 1, pp. 73-81 (3)

**Lucas M., Martin D., Martin P., Plemenos D.** 1990 — Le projet Explo-Formes : Quelques pas vers la modélisation déclarative de formes, Bigre, n° 67, pp. 35-49 (1)

**Lucas M., Desmontils E.** 1995 — Les modeleurs déclaratifs, Revue internationale de CFAO et d'Informatique graphique, Vol. 10, n° 6, pp. 559-585 (1)

**Oudenot G.** 1983 — Les cadrans solaires classiques, L'Astronomie, pp. 419-428 (2)

**Péneau J.P.** 1991 — Some problems relating to the numerical simulation of urban ambient environments, Environment and Planning B : Planning and Design, Vol. 18, n° 1, pp. 107-117

**Radford A-D., Gero J-S.** 1979 — On the Design of Windows, Environment and Planning B, Vol. 6, pp. 41-45 (1) (3)

**Salazar J.H.** 1995 — Sunlighting evaluation in buildings, Building Research and Information, Vol. 23, n° 3, pp. 182-187 (2)

**Shaviv E., Yezioro A., Capeluto I-G., Kalay Y-E.** 1996 — Simulations and Knowledge Based CAAD Systems for Passive and Low Energy Architecture, Energy and Buildings, Vol. 23, n° 3, p. 257 (3)

**Schoeneman C., Dorsey J., Smits B., Arvo J., Greenberg D.** 1993 — Painting with Light, in Computer Graphics Proceedings (Annual Conference Series), Anaheim, California (USA), pp. 143-146 (1) (3)

## Rapports de recherche, thèses, DEA, cours

**Adolphe L.** 1991 — L'aide à la décision technique dans la conception architecturale, Thèse de Doctorat, École des Mines de Paris (France), 217 p. (3)

**Belchun B.** 1993 — Caractérisation polydisciplinaire d'une ambiance extérieure, Rapport de DEA, Université de Nantes, École d'architecture de Nantes (France), 98 p. (1)

**CRMAA** 1979 — Le Girasol : hauteur et azimut du soleil pour toutes les latitudes, construction et applications, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 55 p. (2) (3)

**CRMAA** 1977 — Projection stéréographique des trajectoires solaires diurnes et des lignes horaires et application à une latitude donnée, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 16 p. (2)

**Dabat M.-A., Izard J.-L.** 1982 — Système combiné de simulation des ambiances dues au rayonnement solaire, Groupe ABC, École d'Architecture de Marseille-Luminy (France), 52 p. (Rapport de recherche) (2)

**Deltheil R., Caire D.** 1946 — Cours de géométrie (transformations, coniques), J.-B. Baillièrre et Fils, Éditeurs, Paris (France), 303 p. (2)

**Dupagne A., Renson M.** 1985 — Étude des nuisances environnementales d'un projet de construction en site urbain, Laboratoire de physique du bâtiment, Université de Liège (Belgique), 35 p. (Rapport de recherche) (2)

**Fragnaud F.** 1985 — Développement de modules complémentaires au logiciel de simulation thermique Simula, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 95 p. (Rapport de recherche) (2)

**Groleau D., Marenne C.** 1991 — Solène et la simulation solaire, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 250 p. (Rapport de recherche) (2)

**Guenadez Z.** 1993 — Esthétique urbaine et ambiances micro-climatiques chez Camillo Sitte, Rapport de DEA, Université de Nantes, École d'Architecture de Nantes (France), 80 p. (1)

**Hierry P.** 1987 — Utilisation des techniques de synthèse d'image pour la visualisation des phénomènes solaires et énergétiques, Rapport de CEEA, École d'architecture de Nantes (France), 48 p. (2)

**Lavigne P.** 1981 — Énergie, climat, confort, soleil et architecture, Volume 1 (Cours), École d'Architecture de Grenoble (France), 189 p. (1)

**Lespinard V., Pernet R., Gauzit J.** 1957 — Cours d'algèbre et de cosmographie, Classe de philosophie, Librairie A. Desvignes, Lyon (France), 8<sup>ème</sup> édition refondue (2)

**Lestrat G.** 1990 — Modélisation du champ radiatif, Application à la simulation des ambiances lumineuses naturelles intérieures sur écran graphique couleur, Thèse de Doctorat, Université de Nantes (France), 203 p. (1)

**Miguet F.** 1996 — Eclaircissements énergétiques et lumineux en milieu urbain, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 67 p. (Rapport de recherche) (2)

**Morin M.** 1995 — Lecture de la tour Bretagne, développement d'un outil de lecture de la ville, École d'Architecture de Nantes (France), 68 p. (Travail personnel de fin d'études) (2)

**Péneau J.-P.** 1985 — L'ajustement climatique dans les théories architecturales et urbaine, École d'Architecture de Nantes (France), 2 tomes, 142 p. (Cours) (1)

**Sacré C.** 1983 — Le confort dans les espaces extérieurs, analyse micro-climatique, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Etablissement de Nantes (France), 138 p. (Rapport de recherche) (1)

## Communications

**Adam B., Kauffmann P., Schmitt D., Spehner J-C.** 1996 — Construction de l'enveloppe convexe dans le plan par balayage selon un rectangle, in Actes des 4<sup>èmes</sup> Journées AFIG 96, Dijon (France), pp. 196-202 (5)

**Adolphe L.** 1994 — A Computer Aided Learning Integration System for Architectural Engineering Education : the CALIN Project, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1222-1227 (3)

**Alifanov O.M. D.** 1996 — Inverse Problem Methodology in Mathematical Modeling and Experimental Simulation, in Proceedings of Second International Conf. on Inverse Problems in Engineering : Theory and Practice, Le Croisic (France), 16 p. (1)

**Augenbroe G., Winkelmann F.** 1991 — Integration of Simulation into the Building Design Process, in Proceedings of the International Conference on Building Simulation, Sophia-Antipolis (France), pp. 367-374 (1)

**Augenbroe G., Nederlof L., Rombouts W., Voorden (Van der) M., Vries (de) P.** 1993 — An integrated Urban Solar Design Tool, in Proceedings of the Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy), pp. 295-298 (3)

**Augoyard J-F.** 1991 — Un outil interdisciplinaire : l'effet sonore, in Actes du Colloque international sur la Qualité sonore des espaces habités, CRESSON, Grenoble (France), pp. 249-260 (1)

**CERMA** 1986 — Actes du colloque Conception des formes urbaines et contrôle énergétique, CERMA, École d'Architecture de Nantes (France), 274 p. (1)

**Demers C-M-H., Hawkes D-U.** 1994 — The Image as a Tool for Composition, Light as Generator of Space, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1155-1160 (3)

**Demers C-M-H., Hawkes D-U.** 1996 — Images of Light, an Approach to Space Generation from Lights, in Proceedings of the Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany), pp. 382-385 (3)

**Groleau D., Marenne C.** 1995 — Environmental specificities of the urban built forms, in Proceedings of European conference on Integration of Renewable Energies in established Urban Structures, Corfou (Grèce), 8 p. (1) (2)

**Groleau D., Marenne C., Gadilhe A.** 1993 — Climatic simulation tools : an application for a building project in an urban space, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 3th European conference on architecture, Florence (Italy), pp. 346-349 (2)

**Groleau D., Marenne C.** 1992 — Simulation numérique de l'ensoleillement dans les projets urbains, in Actes des séminaires interchercheurs,

Réseau Recherche Informatique Architecture, GIP Acacia, Paris (France), pp. 159-171 (2)

**Groleau D.** 1987 — Modélisation des interactions entre les formes urbaines et les facteurs physiques de l'environnement, in Proceedings of 1st European Conference on Architecture, Munich (Germany), pp. 547-552 (2)

**Guyot A.** 1988 — L'arbre élément vivant du confort, in Vivre dehors, Confort des espaces publics, Actes du colloque de Manosque (France), Éditions du STU, Ministère de l'Équipement, pp. 71-80 (1) (6)

**Lassance G.** 1996 — Drawing Out Daylighting Intentions, Forms and Devices from Architectural Precedents, in Proceedings of the Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany), pp. 262-265 (3)

**Mahdavi A., Berberidou-Kallivoka L.** 1995 — A Generative Simulation Tool for Architectural Lighting, in Proceedings of the Fourth International Conference on Building Simulation, Madison, Wisconsin (USA), pp. 395-402 (3)

**Malkawi A-M.** 1995 — Simulation and Reasoning : Intelligent Building Thermal Problem Detection, in Proceedings of the Fourth International Conference on Building Simulation, Madison, Wisconsin (USA), pp. 176-182 (3)

**Marenne C., Lefevre M., Groleau D.** 1995 — 3D Air flow simulation with solar constraints in a large covered street, in Proceedings of 2nd International Conference on Indoor Air Quality-Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Montréal (Canada), pp. 937-945 (2)

**Miguet F., Groleau D., Marenne C.** 1996 — A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 4th European conference on architecture, Berlin (Germany), pp. 338-341 (1) (2)

**Miller-Chagas P.** 1982 — Apports énergétiques solaires, microclimats et configurations urbaines dans trois cités à Strasbourg, in Problèmes énergétiques de la ville (Actes du séminaire ARDEPA, AFME / Direction de l'Architecture / Plan Construction), École d'Architecture de Nantes (France), pp. 97-133 (1)

**Morel N., Citherlet S., Faist A., Forte E., Marchand B.** 1994 — BatMan, A Computer Aided Learning Module for Architecture Students, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1241-1246 (3)

**Mudri L.** 1994 — Structure dynamique de critères pour l'éclairage naturel et son impact sur l'énergétique pour un outil d'enseignement du projet en architecture, in Proceedings of the European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon (France), pp. 1143-1148 (1) (3)

**Nicolas F., Remon M.** 1985 — Architecture urbaine bioclimatique, in Actes du séminaire Architecture, urbanisme et énergie, Bilan et perspectives, École d'Architecture de Paris-la-Villette (France), pp. 95-113 (1)

**Palomo E., Marco J.** 1993 — The Pertinence and Limitations of Different Statistical Tools for Empirical Model Validation Purposes, in Proceedings of the Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy), pp. 330-333 (3)

**Péneau J.-P.** 1982 — Exemples de prises en compte de l'aménagement bioclimatique, in Problèmes énergétiques de la ville (Actes du séminaire ARDEPA, AFME / Direction de l'Architecture / Plan Construction), École d'Architecture de Nantes (France), pp. 135-146 (1)

**Péneau J.-P.** 1989 — Imagerie numérique de l'ensoleillement en milieu urbain, in MICAD'89, Actes de la 8<sup>ème</sup> conférence internationale sur la CFAO, l'infographie et les technologies assistées par ordinateur, Paris (France), pp. 417-429 (2)

**Peuportier B., Blanc Sommereux I.** 1991 — COMFIE : A Software for Passive Solar Design, in Proceedings of the International Conference on Building Simulation, Sophia-Antipolis (France), pp. 521-527 (3)

**Rogora A., Scudo G.** 1996 — Proposal for a Light Language in Architectural Planning, in Proceedings of the Fourth European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Berlin (Germany), pp. 294-296 (3)

**Silvestrini G., Cacopardi S.** 1993 — Use of an Expert System for Passive Cooling Building Design, in Proceedings of the Third European Conference on Architecture (Solar Energy in Architecture and Urban Planning), Florence (Italy), pp. 358-360 (3)

**Stemmers K.A.** 1993 — Low Energy Urban Design, in Solar Energy in architecture and urban planning, Proceedings of 3th European conference on architecture, Florence (Italy), pp. 501-504 (1)

## Autres références

**Gros P.** (Établi, traduit et commenté par) 1992 — Vitruve, de l'architecture, Les Belles Lettres, Paris (France), 10 volumes

**Jungmann J.-P.** 1995 — Ombres et lumières, Éditions de la Villette, Paris (France), 151 p. (1) (2)

**Hall E.T.** 1984 — La danse de la vie, Temps culturel, temps vécu, Éditions du Seuil, Paris (France), 283 p. (6)

**Hermant A.** 1943 — Les mouvements du soleil, Technique et Architecture, n° 7-8 (Numéro spécial Le Soleil), pp. 173-176 (2)

**Lochak G.** 1994 — La géométrisation de la physique, Flammarion, Paris (France), 272 p.

**Oudenot G.** 1995 — 17 cadrans solaires à découper et à plier, Éditions du lézard, St Jean-Pied-de-Port (France), 29 p. (2) (6)

## Contributions personnelles

**Siret D.** 1995 — Modélisation déclarative des modulateurs d'ambiance dans le projet architectural et urbain, *Revue internationale de CFAO et d'Informatique Graphique*, Vol. 10, n° 5, pp. 523-537 (6)

**Siret D.** 1996.a — Une approche déclarative pour la réalisation de propriétés d'ensoleillement dans le projet architectural et urbain, *Actes des Journées 3IA'96 (Infographie Interactive et Intelligence Artificielle)*, Limoges (France), pp. 55-69

**Siret D.** 1996.b — Sunlighting Design : an Inverse Approach of Simulation for CAD Tools, in : Santo H.P. (Ed.), *Advances in Computer-Aided-Design (Proceedings of CADEX'96, Hagenberg, Autriche)*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos California (USA), pp. 32-40 (1) (3)

**Siret D.** 1996.c — A generative computer tool to model shadings and openings that achieve sunlighting properties in architectural design, in *Development and Applications of Computer Techniques to Environmental Studies VI (Proceedings of ENVIROSOFT'96, Como, Italie)*, Computational Mechanics Publications, pp. 695-704

**Mounier J-P., Nivet M-L., Siret D.** 1996 — Modélisation déclarative, principes et applications au projet architectural et urbain, in *Actes des Rencontres des Doctorants en Architecture, Ecole d'Architecture de Toulouse (France)*, pp. 76-95

# Table des matières

## Introduction générale

## Chapitre 1 Éléments de la problématique, hypothèses et champ d'application

1.1	Problématique et hypothèses .....	19
1.1.1	Caractérisation de la conception architecturale .....	20
1.1.1.1	Les éléments du projets : formes et intentions .....	20
1.1.1.2	Les actions du projet : exposition / réalisation d'effets .....	22
1.1.1.3	Les problèmes du projet : problèmes directs et inverses .....	24
1.1.1.4	L'aide à la conception architecturale .....	26
1.1.2	Ambiances et projet d'architecture .....	26
1.1.2.1	Les effets d'ambiance .....	27
1.1.2.2	Exposition des effets d'ambiances par simulation directe .....	28
1.1.2.3	Réalisation des effets d'ambiances par simulation inverse .....	30
1.1.2.4	L'aide à la conception des ambiances .....	32
1.1.3	Mise en oeuvre d'une approche déclarative .....	33
1.1.3.1	Caractérisation de la modélisation géométrique déclarative ..	34
1.1.3.2	Structure d'un modelleur géométrique déclaratif .....	36
1.1.3.3	Notre problème du point de vue de la MD .....	38
1.2	Champ d'application : l'ensoleillement .....	40
1.2.1	Ensoleillement et ambiances .....	41
1.2.1.1	Implications énergétiques .....	41
1.2.1.2	Implications lumineuses .....	43
1.2.1.3	Implications esthétiques .....	45
1.2.2	Ensoleillement et processus de conception .....	47
1.2.2.1	L'ensoleillement et la manipulation des formes .....	47
1.2.2.2	L'ensoleillement et les intentions du projet .....	50
1.2.2.3	La figuration d'ensoleillement, entre simulation et simulacre	52

1.2.3 Formulation des objectifs et plan du rapport .....	56
1.2.3.1 Objectifs de recherche .....	56
1.2.3.2 Plan du rapport .....	57
Références bibliographiques du chapitre .....	59

## Chapitre 2

### Méthodes de simulation directe de l'ensoleillement

Introduction .....	65
2.1 Les trajectoires solaires .....	67
2.1.1 Coordonnées angulaires du soleil .....	67
2.1.1.1 Le mouvement de la Terre autour du soleil .....	67
2.1.1.2 Le mouvement apparent du soleil autour de la Terre .....	70
2.1.1.3 Les coordonnées angulaires du soleil .....	73
2.1.1.4 La correction temporelle .....	74
2.1.2 Abaques et diagrammes solaires .....	77
2.1.2.1 Le panorama solaire .....	77
2.1.2.2 Le Gnomon .....	78
2.1.2.3 La projection stéréographique des trajectoires solaires .....	79
2.1.2.4 Le Girasol .....	82
2.2 Méthodes de simulation graphiques, analogiques, numériques .....	84
2.2.1 Les méthodes graphiques .....	84
2.2.1.1 Le tracé des ombres .....	85
2.2.1.2 Le tracé des masques .....	87
2.2.2 Les méthodes analogiques .....	89
2.2.2.1 L'héliodon .....	89
2.2.2.2 L'horizontoscope .....	91
2.2.3 Les méthodes numériques .....	92
2.2.3.1 Détermination des polygones d'ombre dans <i>Solène</i> .....	93
2.2.3.2 Détermination des périodes d'ensoleillement dans <i>Solène</i> ....	95
2.2.3.3 Une méthode directe par lancer de rayons .....	97
2.2.4 Les méthodes mixtes .....	98
2.3 Traitement des résultats .....	101
2.3.1 Reconstitution des états d'ensoleillement .....	101
2.3.1.1 Les images d'ensoleillement .....	101
2.3.1.2 Les bases de données d'ensoleillement .....	102
2.3.2 Analyses d'ensoleillement .....	104
2.3.2.1 Les indices d'ensoleillement .....	104

2.3.2.2 L'appréciation de l'ensoleillement effectif .....	106
Conclusion .....	108
Références bibliographiques du chapitre .....	110

## **Chapitre 3**

### **Limites des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement, Position du problème inverse**

Introduction .....	115
3.1 Méthodes géométriques .....	118
3.1.1 Réversibilité des méthodes directes .....	118
3.1.1.1 Réalisation d'une tache d'ensoleillement en un instant .....	118
3.1.1.2 Réalisation d'une plage temporelle d'ensoleillement .....	119
3.1.1.3 Reproduction des conditions d'existence d'une propriété ...	121
3.1.2 Méthodes géométriques inverses partielles .....	122
3.1.2.1 Enveloppe solaire d'une parcelle .....	122
3.1.2.2 Courbes de niveau solaire .....	124
3.1.2.3 Recul et hauteur d'une construction réalisant une tache .....	125
3.2 Autres approches inverses .....	127
3.2.1 Méthodes génératives .....	127
3.2.1.1 Illustration .....	128
3.2.1.2 Extension à l'ensoleillement .....	129
3.2.2 Aide experte .....	130
3.2.2.1 Applications à la maîtrise énergétique et lumineuse .....	131
3.2.2.2 Applications didactiques .....	132
3.2.2.3 Extension à l'ensoleillement .....	133
3.2.3 Techniques d'optimisation .....	133
3.2.3.1 Illustrations .....	134
3.2.3.2 Extension à l'ensoleillement .....	135
3.3 Représentation des intentions d'ambiances .....	137
3.3.1 Une approche symbolique .....	137
3.3.2 Une approche analogique .....	139
Conclusion .....	142
Références bibliographiques du chapitre .....	144

## **Chapitre 4**

## Formalisation des problèmes d'enseillement, solution du problème inverse

Introduction .....	149
4.1 Géométrie de l'enseillement .....	151
4.1.1 Espace d'enseillement .....	151
4.1.1.1 Instants et directions solaires apparentes .....	151
4.1.1.2 Plage temporelle, hypothèse de continuité .....	152
4.1.1.3 Espace d'enseillement .....	152
4.1.1.4 Point matériel, volume matériel, scène et englobant .....	152
4.1.1.5 Transformations élémentaires .....	153
4.1.2 Entités géométriques élémentaires .....	153
4.1.2.2 Rayon solaire .....	153
4.1.2.3 Pyramide complexe d'enseillement .....	153
4.1.2.4 Pyramide simple et prisme d'enseillement .....	154
4.1.3 États d'enseillement .....	155
4.1.3.1 Définition .....	155
4.1.3.2 États d'enseillement d'un point $p$ en un instant $t$ .....	155
4.1.3.3 États d'enseillement d'un point $p$ pour une plage $T$ .....	155
4.1.3.4 États d'enseillement d'un ensemble de points $P$ .....	156
4.1.3.5 États d'enseillement d'un ensemble de points $P$ .....	156
4.2 Formalisation des problèmes de simulation directe de l'enseillement ....	157
4.2.1 Volumes d'ombre et surfaces d'ombre .....	157
4.2.1.1 Ombre d'un point $p$ à un instant $t$ .....	157
4.2.1.2 Ombre d'un ensemble de points $P$ à un instant $t$ .....	157
4.2.1.3 Ombre généralisée d'un point $p$ pour la plage temporelle $T$ .....	158
4.2.1.4 Ombre généralisée d'un ensemble de points $P$ .....	158
4.2.2 Périodes d'enseillement .....	159
4.2.2.1 Périodes d'enseillement d'un point $p$ pour une plage $T$ ....	159
4.2.2.2 Périodes d'enseillement d'un ensemble $P$ .....	160
4.3 Formalisation du problème inverse .....	162
4.3.1 Notion de proposition d'enseillement .....	162
4.3.1.1 Définition .....	163
4.3.1.2 Pyramide complexe d'enseillement associée .....	163
4.3.1.3 Valeur de vérité d'une proposition d'enseillement .....	163
4.3.2 Solutions d'une proposition d'enseillement .....	163
4.3.2.1 Ensemble des solutions d'une proposition .....	164
4.3.2.2 Ensemble des solutions d'une proposition .....	165
4.3.2.3 Halo caractéristique d'une solution d'une proposition .....	167

4.3.2.4 Solutions duales d'une proposition élémentaire .....	168
4.3.3 Composition de propositions élémentaires .....	169
4.3.3.1 Conditions d'incompatibilité de deux propositions .....	170
4.3.3.2 Solutions de la composée de deux propositions .....	170
4.3.3.3 Partition de l'espace des solutions de $n$ propositions .....	172
Conclusion .....	174

## Chapitre 5

### Interprétation géométrique, Détermination de la frontière d'une pyramide d'enseillement

Introduction .....	179
5.1 Frontière géométrique de $\prod(P, T)$ .....	180
5.1.1 Somme et différence de Minkowski .....	180
5.1.1.1 Somme de Minkowski .....	180
5.1.1.2 Différence de Minkowski .....	183
5.1.2 Détermination d'une section de $\prod(P, T)$ par $Q // P$ .....	183
5.1.3 Frontière de $\prod(P, T)$ lorsque $P$ est convexe .....	187
5.1.3.1 Structure d'une section $S(Q)$ lorsque $P$ est convexe .....	187
5.1.3.2 Construction de la frontière de $\prod(P, T)$ .....	189
5.1.3.3 Limites de $\prod(P, T)$ .....	189
5.1.3.4 Singularités du polygone $S(Q)$ .....	191
5.1.3.5 Transformations élémentaires de $P$ .....	192
5.1.3.6 Pyramides à base concave .....	192
5.1.4 Cas particuliers et extension de la méthode .....	194
5.1.4.1 Plage temporelle d'ombre propre du plan de $P$ .....	194
5.1.4.2 Frontière de $\prod(P, T)$ lorsque $T$ et $T_p^-$ ne sont pas disjointes .....	195
5.1.4.3 Extension de la méthode aux volumes polyédriques .....	197
5.2 Mise en oeuvre pas à pas .....	198
5.2.1 Construction de la pyramide simple .....	198
5.2.1.1 Représentation polyédrique .....	198
5.2.1.2 Détermination de $T'$ .....	198
5.2.2 Somme $P' \oplus T'$ .....	200
5.2.2.1 Somme d'un polygone et d'un segment dans un plan .....	201
5.2.2.2 Détermination de $S(Q)$ .....	202
5.2.3 Construction des rayons de $\prod(P, T)$ .....	204
5.3 Vérifications .....	205
5.3.1 Évidemment solution d'une proposition ( $P$ , <i>au soleil</i> , $T$ ) .....	205

5.3.1.1 Construction de la solution évidemment .....	205
5.3.1.2 Halo caractéristique de l'évidement .....	205
5.3.2 Masques solutions d'une proposition (P, à l'ombre, T) .....	208
5.3.2.1 Construction des solutions masques .....	208
5.3.2.2 Halos caractéristiques des solutions masques .....	209
5.3.3 Solutions duales d'une proposition .....	210
5.3.4 Solutions de la composition de deux propositions .....	213
Conclusion .....	215
Références bibliographiques du chapitre .....	216

## Chapitre 6

### Discussion de la méthode dans le cadre du projet d'architecture, Développement du logiciel *Solimac*

Introduction .....	219
6.1 Représentation d'une intention d'ensoleillement .....	221
6.1.1 La tâche d'ensoleillement : intention et réalisation .....	221
6.1.1.1 La forme de la tâche .....	221
6.1.1.2 L'échelle de la tâche .....	223
6.1.1.3 La position de la tâche .....	225
6.1.1.4 Spécifications d'une tâche en situation de conception .....	227
6.1.2 La plage temporelle, repérage du « temps vécu » .....	228
6.1.2.1 Repérage sémantique du temps vécu .....	229
6.1.2.2 Repérage du temps vécu sur les trajectoires solaires .....	231
6.1.2.3 Équivalences horaires du temps vécu .....	235
6.1.2.4 Notre sensibilité temporelle à l'ensoleillement .....	236
6.1.2.5 Cartes spatio-temporelles d'ensoleillement .....	237
6.2 Génération et exploration des solutions .....	239
6.2.1 Diversité des formes solutions d'une proposition .....	239
6.2.2 Exploration interactive des solutions masques planes .....	240
6.2.3 Interprétation architecturale des solutions brutes .....	243
6.2.4 Exploration automatique de formes réalistes .....	245
6.3 Développement du logiciel <i>Solimac</i> .....	247
6.3.1 Ergonomie générale .....	247
6.3.1.1 Cadre d'utilisation .....	247
6.3.1.2 Organisation des vues .....	249
6.3.1.3 Sélection d'une face .....	250
6.3.2 Réalisation d'une proposition d'ensoleillement .....	251

6.3.2.1 Dessin de la tache .....	252
6.3.2.2 Sélection de la plage temporelle et vérification .....	253
6.3.2.3 Réalisation de la proposition, exploration des solutions .....	253
6.3.3 Exposition des propriétés d'ensoleillement .....	257
6.3.4 Limites de <i>Solimac</i> .....	259
Conclusion .....	260
Références bibliographiques du chapitre .....	262

## **Chapitre 7**

### **Illustrations**

Introduction : la question de la validation .....	265
7.1 Ajustement d'un pare-soleil .....	269
7.1.1 Exploration des solutions masques .....	270
7.1.2 Bilan de l'expérience .....	273
7.2 Projet d'enveloppe pour une piscine .....	274
7.2.1 Définition du parti, démarcation des intentions .....	275
7.2.1.1 Ombrage du bassin .....	275
7.2.1.2 Réalisation du solarium .....	276
7.2.2 Ajustement du projet .....	278
7.2.3 Bilan de l'expérience .....	281
7.3 Projet d'épannelage d'un immeuble urbain .....	282
7.3.1 Diagnostic d'ensoleillement .....	283
7.3.2 Epannelage du gabarit .....	285
7.3.3 Bilan de l'expérience .....	288
Conclusion .....	289

## **Éléments de conclusion, Perspectives de recherche**

## **Bibliographie**

# Table des figures

## Chapitre 1 Éléments de la problématique, hypothèses et champ d'application

Fig. 1.1. Le projet architectural comme objet et discours .....	22
Fig. 1.2. La notion intermédiaire d'effet .....	24
Fig. 1.3. Problèmes directs en inverses du processus de conception .....	24
Fig. 1.4. Simulation directe des effets d'ambiance .....	29
Fig. 1.5. La simulation inverse des ambiances .....	30
Fig. 1.6. Notre problème sous l'angle de la modélisation géométrique .....	33
Fig. 1.7. Principe d'utilisation d'un modèleur géométrique déclaratif .....	36
Fig. 1.8. Prototype de la « maison capteur » .....	43
Fig. 1.9. Dynamique des formes d'ensoleillement .....	45
Fig. 1.10. La vie des formes .....	46
Fig. 1.11. Ilot urbain et immeubles en gradin de H. Sauvage (1928).....	48
Fig. 1.12. Quelques dispositifs de contrôle de l'ensoleillement .....	50
Fig. 1.13. Les ambiguïtés du rendu d'architecture .....	52
Fig. 1.14. Les ombres à 45° .....	53
Fig. 1.15. Figuration ambiguë de l'ensoleillement .....	54
Fig. 1.16. Des ombres improbables .....	55

## Chapitre 2 Méthodes de simulation directe de l'ensoleillement

Fig. 2.1. Mouvement de la Terre autour du soleil .....	68
Fig. 2.2. Positions de la Terre en géométral aux solstices et aux équinoxes .....	69
Fig. 2.3. Variation de la déclinaison terrestre au cours de l'année .....	70
Fig. 2.4. Mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste .....	71
Fig. 2.5. Trajectoires solaires apparentes en un point P sur la Terre .....	72
Fig. 2.6. Correspondance des trajectoires solaires sur l'année .....	73
Fig. 2.7. Azimut A et hauteur H du soleil .....	74

Fig. 2.8. Valeur moyenne de l'équation du temps .....	75
Fig. 2.9. Calcul des coordonnées angulaires du soleil .....	76
Fig. 2.10. Panorama solaire 49° N .....	77
Fig. 2.11. Principe de détermination du gnomon .....	78
Fig. 2.12. Lecture des coordonnées angulaires A, H sur le gnomon .....	79
Fig. 2.13. Construction du diagramme solaire MT .....	80
Fig. 2.14. Principe de la projection stéréographique des trajectoires solaires .....	81
Fig. 2.15. Projection stéréographique des trajectoires solaires 47° N .....	81
Fig. 2.16. Le Girasol .....	82
Fig. 2.17. Trajectoires solaires apparentes en différentes latitudes .....	83
Fig. 2.18. Tracé des ombres portées en dessin géométral .....	85
Fig. 2.19. Tracé des ombres à l'aide du gnomon .....	86
Fig. 2.20. Tracé des ombres à l'aide du diagramme solaire MT .....	87
Fig. 2.21. Périodes d'ensoleillement d'un point à travers une fenêtre .....	88
Fig. 2.22. Construction d'un masque sur le diagramme angulaire .....	89
Fig. 2.23. Report du masque et lecture des périodes d'ensoleillement .....	90
Fig. 2.24. Schéma de principe de l'héliodon .....	91
Fig. 2.25. Schéma de principe de l'horizontoscope .....	92
Fig. 2.26. Détermination des polygones d'ombre dans <i>Solène</i> .....	94
Fig. 2.27. Principe de résolution des opérations booléennes .....	95
Fig. 2.28. Détermination des périodes d'ensoleillement dans <i>Solène</i> .....	96
Fig. 2.29. Calcul de l'ombre d'un point sur un plan .....	97
Fig. 2.30. Visualisation des parties ensoleillées .....	99
Fig. 2.31. Superposition des ombres pour différents instants .....	102
Fig. 2.32. Durées d'ensoleillement associées au maillage .....	103
Fig. 2.33. En clair : zones au soleil à 10 heures et ensoleillées .....	104
Fig. 2.34. Indice de performance d'un masque .....	106
Fig. 2.35. Simulation de l'accessibilité visuelle de la cathédrale .....	109

## Chapitre 3

### Limites des méthodes de simulation directe de l'ensoleillement, Position du problème inverse

Fig. 3.1. Processus direct et inverse de simulation de l'ensoleillement .....	116
Fig. 3.2. Ajustement de deux volumes pour réaliser .....	119
Fig. 3.3. Ajustement de percements pour réaliser différentes .....	120
Fig. 3.4. Relevé d'une composition solaire .....	121
Fig. 3.5. Enveloppe solaire d'une parcelle .....	123

Fig. 3.6. Courbes de niveau solaire .....	124
Fig. 3.7. Limite de recul et de hauteur d'une construction .....	125
Fig. 3.8. Principe d'une approche générative pour la simulation .....	129
Fig. 3.9. Le problème du logement de W. Gropius .....	136
Fig. 3.10. Description symbolique de trois champs lumineux .....	139
Fig. 3.11. Représentation analogique des intentions lumineuses .....	140
Fig. 3.12. Composition d'effets lumineux .....	140

## Chapitre 4

### Formalisation des problèmes d'enseillement, solution du problème inverse

Fig. 4.1. Entités géométriques de l'espace d'enseillement .....	154
Fig. 4.2. Ombre d'un ensemble de points $P$ à un instant $t$ .....	157
Fig. 4.3. Ombre généralisée d'un point $p$ pour une plage $T$ .....	158
Fig. 4.4. Ombre généralisée d'un ensemble $P$ pour une plage $T$ .....	159
Fig. 4.5. Périodes d'enseillement d'un point .....	160
Fig. 4.6. Périodes d'enseillement d'un ensemble de points .....	160
Fig. 4.7. L'évidement de $S$ par $V$ est solution de la proposition .....	164
Fig. 4.8. L'obstruction de $S$ par $V$ est solution de la proposition .....	165
Fig. 4.9. Trois solutions minimales d'une proposition .....	166
Fig. 4.10. Nature géométrique de $P$ .....	167
Fig. 4.11. Halos caractéristiques de deux solutions d'une même proposition ....	168
Fig. 4.12. Trois solutions duales d'une proposition .....	169
Fig. 4.13. Propositions compatibles et incompatibles .....	170
Fig. 4.14. Solution de $(\ )_1 \wedge (\ )_2$ de type <i>au soleil</i> .....	171
Fig. 4.15. Solutions minimales de $(\ )_1 \wedge (\ )_2$ de type <i>à l'ombre</i> .....	171
Fig. 4.16. $V_1$ n'est pas solution de $(\text{à l'ombre})_1 \wedge (\text{au soleil})_2 - V_2$ oui .....	172
Fig. 4.17. Pavage de l'espace et solution minimale de trois propositions .....	173

## Chapitre 5

### Interprétation géométrique, Détermination de la frontière d'une pyramide d'enseillement

Fig. 5.1. Somme de Minkowski des ensembles $X$ et $Y$ .....	181
Fig. 5.2. Représentation géométrique de $X \oplus Y$ .....	182

Fig. 5.3. Notation symbolique de la somme de Minkowski .....	183
Fig. 5.4. Différence de Minkowski de X et Y .....	184
Fig. 5.5. $T'$ centré en $p'$ décrit $P'$ lorsque $p$ décrit $P$ .....	185
Fig. 5.6. Le polygone $S(Q)$ est la somme de $P$ et de $T'$ .....	185
Fig. 5.7. $P'$ centré en $p'$ décrit $T'$ lorsque $t$ décrit $T$ .....	186
Fig. 5.8. Déplacement de $T'_{p'}$ sur l'arête $a$ .....	188
Fig. 5.9. Deux sections parallèles d'une même pyramide .....	188
Fig. 5.10. Relations entre les sommets de $P$ et ceux de $S(Q)$ .....	189
Fig. 5.11. Notion de limites d'une pyramide d'enseillement .....	190
Fig. 5.12. Singularité de $S(Q)$ .....	191
Fig. 5.13. Étirement de $P$ et étirement de $S(Q)$ .....	192
Fig. 5.14. Non conservation de la structure de $S(Q)$ lorsque $P$ est concave .....	193
Fig. 5.15. Une pyramide d'enseillement à base concave .....	193
Fig. 5.16. Plage temporelle d'ombre propre d'un plan $P$ .....	194
Fig. 5.17. $T$ et $T_p$ - ne sont pas disjointes .....	195
Fig. 5.18. $P$ est inclus dans $\prod(P, T)$ .....	196
Fig. 5.19. Représentation polyédrique de la pyramide simple $\pi(p, T)$ .....	199
Fig. 5.20. Section de $\pi(p, T)$ par $Q$ .....	200
Fig. 5.21. Principe du calcul de la somme de $P'$ et d'une arête de $T'$ .....	202
Fig. 5.22. Quatre étapes du calcul de la somme $P' \oplus T'$ .....	203
Fig. 5.23. Reconnaissance des arêtes de $P$ dans $S(Q)$ .....	204
Fig. 5.24. Construction des rayons de $\prod(P, T)$ .....	204
Fig. 5.25. Évidement de la scène par la pyramide .....	206
Fig. 5.26. Vérification de la réalisation de $P$ par l'évidement $E$ .....	207
Fig. 5.27. États d'enseillement et halo caractéristique sur le plan de $P$ .....	208
Fig. 5.28. Deux solutions masques réalisant la proposition .....	209
Fig. 5.29. Halos caractéristiques des masques $M_1$ (en haut) et $M_2$ .....	210
Fig. 5.30. Ensemble des solutions duales d'une proposition .....	211
Fig. 5.31. Une solution duale et son halo caractéristique .....	212
Fig. 5.32. Composition de deux propositions .....	213

## Chapitre 6

### Discussion de la méthode dans le cadre du projet d'architecture, Développement du logiciel *Solimac*

Fig. 6.1. Tache d'ombre $P$ pour une plage temporelle $T$ .....	222
Fig. 6.2. Cycle des transformations d'une tache d'enseillement .....	224
Fig. 6.3 Influence des échelles de $P$ et de $T$ sur l'échelle de la solution .....	225

Fig. 6.4. Influence de la position d'une tache d'ensoleillement .....	226
Fig. 6.5 Positions relatives d'une tache d'ensoleillement .....	226
Fig. 6.6. Deux plages temporelles à la latitude 47° Nord .....	228
Fig. 6.7. Composition des expressions du temps vécu .....	230
Fig. 6.8. Le maillage du temps vécu sur les trajectoires solaires .....	231
Fig. 6.9. Échantillonnage des jours tests par mois .....	232
Fig. 6.10. Équivalence entre instants tests et temps vécu .....	233
Fig. 6.11. Plage temporelle du début d'après-midi l'été .....	233
Fig. 6.12. Calendrier de conversion année civile / année solaire .....	234
Fig. 6.13. Repérage horaire en temps vécu .....	234
Fig. 6.14. Équivalences horaires du temps vécu, latitude 47° Nord .....	235
Fig. 6.15. Principe d'une carte spatio-temporelle d'ensoleillement .....	238
Fig. 6.16. Diversité des solutions planes d'une proposition à l'ombre .....	241
Fig. 6.17. Principe d'exploration graphique des solutions masques .....	242
Fig. 6.18. Exploration graphique interactive des solutions masques .....	243
Fig. 6.19. Interprétation architecturale d'un masque brut .....	244
Fig. 6.20. Trois masques végétaux solutions d'une proposition .....	246
Fig. 6.21. Lecture d'un fichier <i>Zoom</i> organisé par calques .....	248
Fig. 6.22. Localisation et orientation .....	248
Fig. 6.23. Vue <i>Solimac</i> .....	249
Fig. 6.24. Sélection d'une face .....	251
Fig. 6.25. Tache d'ensoleillement et menu associé .....	252
Fig. 6.26. Proposition d'ensoleillement non valide .....	253
Fig. 6.27. Masque et point de contrôle du masque .....	254
Fig. 6.28. Translation interactive d'un masque .....	255
Fig. 6.29. Rotation interactive d'un masque .....	256
Fig. 6.30. Ajustement graphique d'un masque dans une scène .....	257
Fig. 6.31. Dialogue de maillage d'une carte d'ensoleillement .....	258
Fig. 6.32. Deux vues de la carte d'ensoleillement d'une face .....	258

## Chapitre 7

### Illustrations

Fig. 7.1. Enveloppe et structure du projet .....	269
Fig. 7.2. La baie doit être à l'ombre en début d'après-midi l'été .....	270
Fig. 7.3. Première solution masque .....	270
Fig. 7.4. Seconde solution masque .....	271
Fig. 7.5. Interprétation de la seconde solution .....	271

Fig. 7.6. Troisième solution masque .....	272
Fig. 7.7. Enveloppe de la construction .....	274
Fig. 7.8. Pyramide d'enseillement .....	275
Fig. 7.9. Volume résultant, surface pleine de l'enveloppe .....	276
Fig. 7.10. La plage Sud, au soleil, en milieu de journée l'hiver .....	277
Fig. 7.11. Évidement réalisant la seconde propriété .....	277
Fig. 7.12. Cartes d'enseillement de la construction .....	278
Fig. 7.13. Diagnostic de la zone d'évidement .....	279
Fig. 7.14. Masque passerelle .....	280
Fig. 7.15. Résultat rendu .....	281
Fig. 7.16. Situation du projet .....	282
Fig. 7.17. Situation du projet .....	283
Fig. 7.18. États d'enseillement des façades voisines .....	284
Fig. 7.19. Évidement du gabarit pour réaliser l'enseillement .....	285
Fig. 7.20. Évidement réduit du gabarit .....	286
Fig. 7.21. Interprétation de l'épannelage du gabarit .....	286
Fig. 7.22. Nouveaux états d'enseillement .....	287