



**HAL**  
open science

## Ensoleillement et CAO

Daniel Siret

► **To cite this version:**

Daniel Siret. Ensoleillement et CAO. IBPSA France, Oct 2002, Saint-Denis-la-Plaine (93), France. 8p. halshs-00576703

**HAL Id: halshs-00576703**

**<https://shs.hal.science/halshs-00576703v1>**

Submitted on 15 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.

# ENSOLEILLEMENT ET CAO

Daniel SIRET (\*)

(\*) CERMA UMR CNRS 1563, Ecole d'Architecture, rue Massenet 44300 Nantes  
(tél : 02 40 59 43 24 ; fax : 02 40 59 11 77 ; email : daniel.siret@cerma.archi.fr)

## **RESUME**

Nous proposons une méthode de résolution des problèmes d'enseillement au moyen de constructions géométriques représentant des volumes de rayons solaires. Cette représentation des phénomènes solaires peut être facilement intégrée dans un système de CAO. Elle offre alors un outil simple et puissant pour résoudre la plupart des problèmes d'enseillement qui se présentent en situation de conception. L'article donne la définition des volumes utilisés, en expose les propriétés solaires et illustre leur mise en oeuvre en CAO à travers plusieurs exemples concrets.

## **INTRODUCTION**

De nombreux outils ont été proposés dans le domaine de la simulation solaire pour l'architecture et l'aménagement urbain. Outils de recherche et d'expérimentation, en partie appropriés par les bureaux d'étude, peu arrivent finalement entre les mains des concepteurs et lorsqu'ils sont utilisés, c'est souvent à des fins de communication plus que de conception.

Ce constat n'est pas nouveau, il est même régulièrement répété dans la littérature depuis la fin des années 70. Plusieurs raisons sont en général invoquées : certaines d'ordre social (formation des architectes, organisation des procédures de conception) et d'autres plus pragmatiques, considérant à raison que les outils de simulation obéissent à une logique d'évaluation a posteriori qui suppose que les objets soumis au diagnostic soient parfaitement déterminés, ce qui n'est manifestement pas le cas des objets architecturaux en cours de conception dont la plupart des paramètres sont encore imprécis.

Fondée dans une perspective d'évaluation technique, la simulation fournit le plus souvent des résultats chiffrés, éventuellement transformés dans une expression graphique, mais finalement peu en rapport avec la pensée architecturale à l'oeuvre en cours de conception, qui s'applique avant tout sur des entités spatiales et sur les agencements de ces

entités, leurs rapports, relations, superpositions, imbrications, etc.

Nous proposons ici un nouvel outil qui s'appuie sur une représentation tridimensionnelle de l'enseillement et établit une correspondance systématique entre ces volumes et les propriétés d'enseillement des espaces qu'ils rencontrent. Cette approche donne une représentation tangible des phénomènes, plus simplement manipulable par l'architecte en situation de conception, notamment parce qu'elle peut être facilement interfacée avec un outil de conception assistée par ordinateur (CAO). Elle répond aussi bien aux problèmes de simulation directe, pour l'évaluation de l'enseillement des éléments d'une scène donnés a priori, qu'aux problèmes inverses visant à déterminer les formes permettant d'atteindre dans une scène donnée, un état d'enseillement fixé a priori. Ce faisant, l'outil proposé donne une dimension créative à un phénomène généralement perçu comme une contrainte.

Nous développons cet argumentaire en trois sections. Nous définissons d'abord les volumes d'enseillement que nous utilisons (section 1) et nous présentons leurs propriétés remarquables (section 2). Nous montrons ensuite comment ces volumes peuvent être utilisés en CAO, en organisant notre exposé autour de quelques questions typiques rencontrées dans les projets architecturaux ou urbains.

## **DEFINITIONS**

### **Volume d'enseillement**

Soit  $R(p, t)$  le rayon solaire atteignant un point  $p$  quelconque pour la direction apparente du soleil à un instant  $t$  quelconque. Soit  $P$  un ensemble de points connexes (surface ou volume de l'espace). Soit  $\varpi(P, t)$  l'ensemble des rayons solaires atteignant tous les points de  $P$  pour la direction apparente du soleil à l'instant  $t$ , c'est-à-dire le prisme solaire de  $P$  selon  $t$ . Soit  $T$  une plage temporelle définie comme un ensemble quelconque d'instant connexes (variations horaires et journalières simultanées) c'est-à-dire comme un carreau de surface quelconque de la voûte solaire.

Nous appelons volume d'ensoleillement et nous notons  $\Pi(P,T)$  l'union des prismes solaires  $\varpi(P,t)$  définis par P lorsque  $t$  décrit T. Autrement dit,  $\Pi(P,T)$  représente l'ensemble des rayons solaires joignant tous les points de P pour tous les instants de T (figure 1).

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

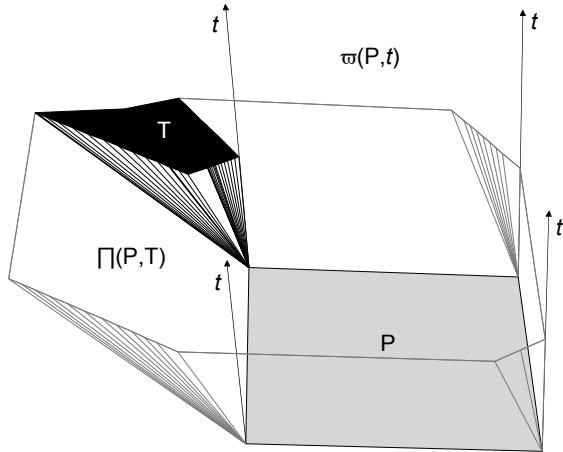


Figure 1 : le volume d'ensoleillement  $\Pi(P,T)$  est l'union des prismes  $\varpi(P,t)$  lorsque  $t$  décrit la plage temporelle T

Du point de vue géométrique,  $\Pi(P,T)$  peut également être défini comme la somme de Minkowski [1] des ensembles P et T. Cette propriété permet de calculer les enveloppes des volumes d'ensoleillement comme il est montré dans [2]. Suivant l'orientation de la base P et suivant la plage temporelle T considérée, ces enveloppes peuvent prendre des formes très diverses, comme l'illustre la figure 2 ci-dessous.

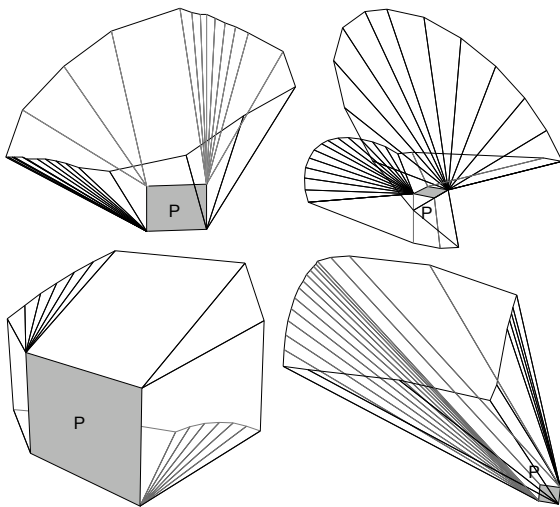


Figure 2 : différents types de volumes d'ensoleillement

### Noyau d'un volume d'ensoleillement

On appelle ainsi et on note  $\Delta\Pi(P,T)$  l'intersection des prismes  $\varpi(P,t)$  lorsque  $t$  décrit T. Le noyau  $\Delta\Pi(P,T)$  représente l'ensemble des points qui appartiennent en même temps à tous les prismes  $\varpi(P,t)$ , c'est-à-dire à tous les rayons solaires définis par tous les points de P pour tous les instants de T (figure 3).

$$\Delta\Pi(P,T) = \bigcap_{t \in T} \varpi(P,t)$$

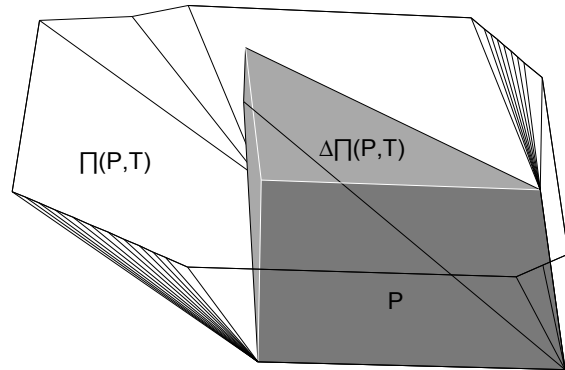


Figure 3 : noyau d'ensoleillement

La forme du noyau est liée à celle du volume associé. En particulier, plus le volume est ouvert, c'est-à-dire plus la plage temporelle est ample, et moins le noyau est haut. Les deux cas extrêmes sont l'année solaire où le noyau  $\Delta\Pi(P,T)$  est réduit à P, et chaque instant  $t$ , où le noyau  $\Delta\Pi(P,T)$  est égal à  $\Pi(P,T)$ , c'est-à-dire au prisme  $\varpi(P,t)$ .

### Volume d'ombre et noyau d'ombre

Considérant le rayon  $R(p,t)$  issu de  $p$  et pointant dans la direction solaire apparente à l'instant  $t$ , nous notons  $R(p,-t)$  le rayon issu de  $p$  et pointant dans la direction opposée à  $t$ .  $R(p,-t)$  est donc le « rayon d'ombre » porté par  $p$  à l'instant  $t$ . Soit  $\varpi(P,-t)$  le prisme d'ombre décrit par P à l'instant  $t$ . Nous pouvons définir :

- le volume d'ombre :  $\Pi(P,-T) = \bigcup_{t \in T} \varpi(P,-t)$
- le noyau d'ombre :  $\Delta\Pi(P,-T) = \bigcap_{t \in T} \varpi(P,-t)$

Le prisme d'ombre est une entité naturelle tangible, dont le volume d'ombre est l'extension dans le temps. Ce dernier représente l'ombre généralisée de P pendant T, c'est-à-dire l'union de toutes les ombres portées par P pour tous les instants de T (figure 4 ci-après). Le noyau d'ombre est l'intersection de tous les prismes d'ombre ; il représente donc l'ensemble des points à l'ombre de P pour tous les instants de T (figure 4).

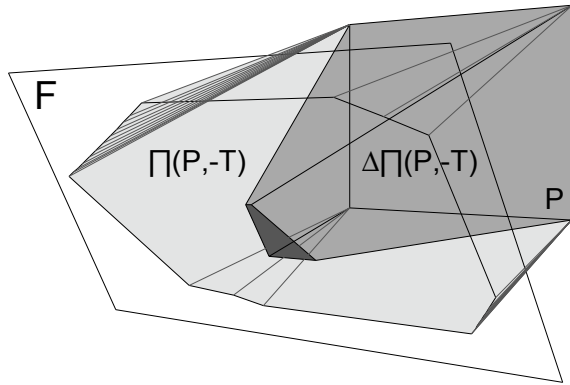


Figure 4 : volume d'ombre et noyau d'ombre de P pendant T, coupés par la surface F

### PROPRIETES

Les volumes d'ensoleillement et d'ombre, et leurs noyaux respectifs, constituent quatre lieux géométriques qui possèdent des propriétés solaires remarquables. Nous décrivons ici ces propriétés au travers de sections entières de ces volumes, c'est-à-dire de l'intersection entre une surface quelconque qui coupe toutes les faces du volume sans couper sa base. Nous appelons M une telle section et nous la considérons plane pour simplifier.

#### Section entière de $\Pi(P,T)$

M section entière du volume d'ensoleillement  $\Pi(P,T)$  coupe tous les rayons atteignant tous les points de P pour tous les instants de T. Autrement dit, tous les points de P sont à l'ombre de M pour tous les instants de T. On en déduit que P est l'intersection de toutes les ombres produites par M sur son plan pour tous les instants de T. M est donc un masque « total » sur P pendant T. Cette propriété se vérifie géométriquement sur la figure 5.

Le volume  $\Pi(P,T)$  est l'ensemble des masques « totaux » sur P pendant T, c'est-à-dire l'ensemble des masques capables de protéger tous les points de P pour tous les instants de T. Remarquons également que d'après les résultats précédents, P appartient au noyau d'ombre de M pendant T, c'est-à-dire suivant nos notations  $\Delta\Pi(M,-T)$ .

#### Section entière de $\Delta\Pi(P,T)$

Un point Q quelconque du noyau  $\Delta\Pi(P,T)$  est tel que pour tout instant t appartenant à T, l'ombre de Q à cet instant est incluse dans P. En généralisant, toute section entière M de  $\Delta\Pi(P,T)$  est telle que son ombre généralisée pendant T (union de toutes les ombres produites par M pendant T) est incluse dans P. Cette propriété se vérifie dans la figure 6.

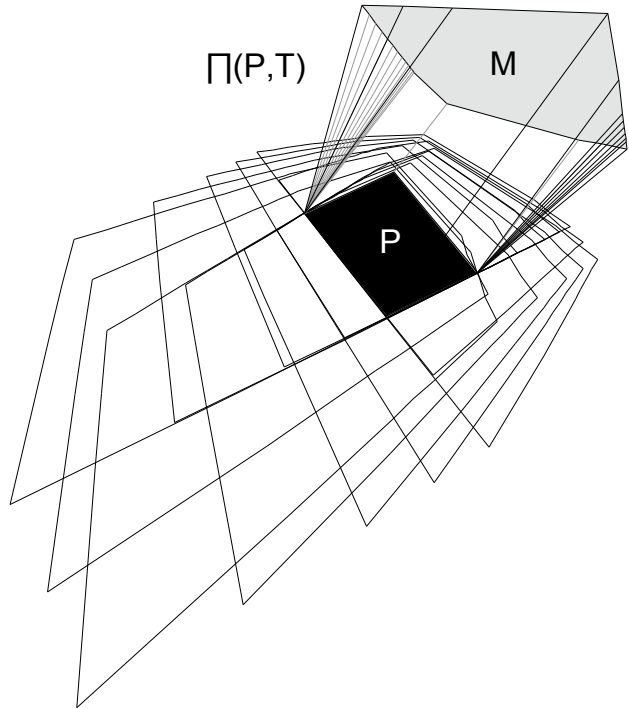


Figure 5 : Lorsque M est une section entière du volume d'ensoleillement  $\Pi(P,T)$ , l'intersection de l'ensemble des ombres portées par M pendant T est égale à P

On reconnaît ici la définition des enveloppes solaires proposées par R. Knowles à la fin des années 70 [3]. Notre formalisme donne une définition mathématique de ces enveloppes qui semblent n'avoir été appréhendées, avant cela, que de manière empirique.

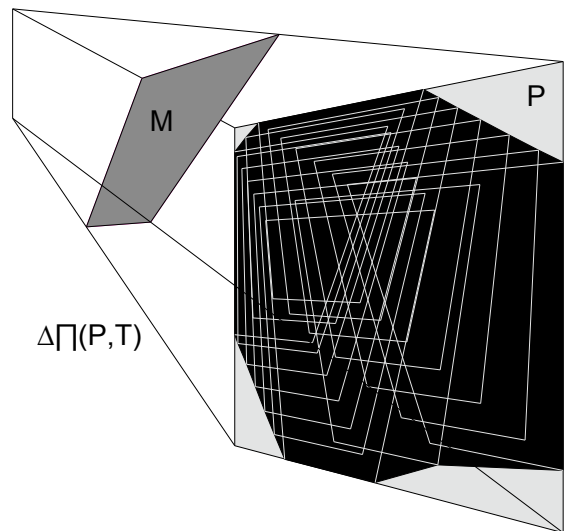


Figure 6 : lorsque M appartient au noyau  $\Delta\Pi(P,T)$ , l'ombre portée par M pendant T est contenue dans P. Le noyau d'ensoleillement est donc équivalent aux enveloppes solaires de R. Knowles

## Section entière d'un volume d'ombre et d'un noyau d'ombre

Soit  $M$  une section entière du volume d'ombre  $\Pi(P,-T)$  par la surface  $F$ . Par définition,  $M$  est l'ombre généralisée de  $P$  sur  $F$  pendant  $T$ , c'est-à-dire l'union de toutes les ombres portées par  $P$  sur  $F$  pendant au moins un instant de  $T$  (figure 7 ci-dessous). De même, la section entière  $M'$  du noyau d'ombre  $\Delta\Pi(P,-T)$  est le noyau d'ombre de  $P$  sur  $F$  pendant  $T$ , c'est-à-dire l'ensemble des points de  $F$ , s'ils existent, qui sont toujours à l'ombre de  $P$  pour tous les instants de  $T$  (figure 7).

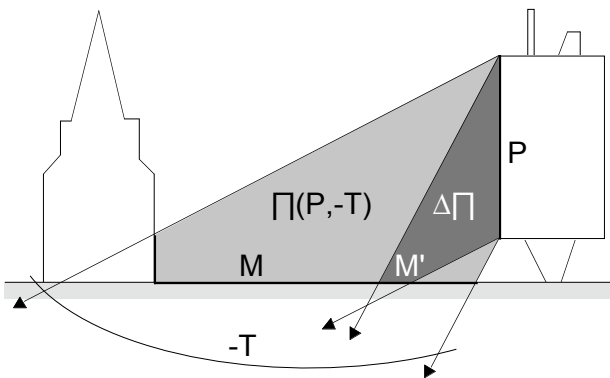


Figure 7 : ombre généralisée  $M$  et noyau d'ombre  $M'$  portés par  $P$  pendant  $T$

Ainsi, une surface  $F$  qui coupe en même temps le volume d'ombre  $\Pi(P,-T)$  et le noyau d'ombre  $\Delta\Pi(P,-T)$  se trouve séparée en trois zones : la zone des points de  $F$  toujours à l'ombre de  $P$  pour tous les instants de  $T$  (intersection de  $F$  et du noyau d'ombre) ; la zone des points de  $F$  à l'ombre de  $P$  pour au moins un instant de  $T$  (intersection de  $F$  et du volume d'ombre) ; la zone des points de  $F$  qui ne sont jamais à l'ombre de  $P$  pour aucun instant de  $T$ . Ce simple résultat pourrait être mis à profit dans les maillages des surfaces pour les simulations prenant en compte l'ensoleillement (figure 8).

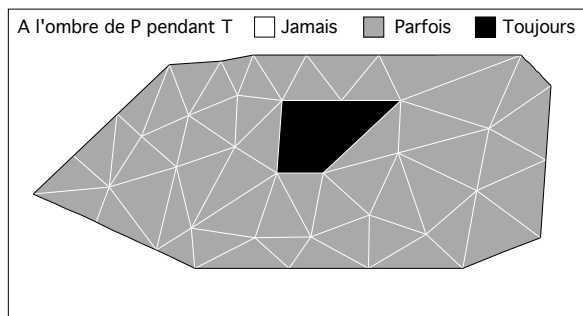


Figure 8 : maillage de discontinuité d'une face établi à partir du volume et du noyau d'ombre

## APPLICATIONS

Les volumes d'ensoleillement peuvent être mis en oeuvre dans un système de CAO architecturale ou urbaine. Ils permettent alors de résoudre facilement et efficacement la plupart des problèmes solaires qui se posent à toutes les phases de la conception, que ces problèmes soient directs (détermination de l'ensoleillement dans une scène donnée a priori) ou inverses (détermination des conditions que doit vérifier une scène pour réaliser une contrainte d'ensoleillement donnée a priori). La méthode s'avère particulièrement efficace pour la résolution des problèmes inverses. Elle constitue en effet une généralisation des travaux dans ce domaine de R. Knowles [3], E. Shaviv [4] ou encore A.D. Radford [5].

### Empreinte solaire

Dans un système de CAO ouvert, il est possible d'associer aux entités manipulées (blocs, parois et baies notamment) les volumes solaires calculés en différentes plages temporelles pertinentes. La plupart des systèmes de CAO actuels savent rendre en temps réel les scènes présentant des objets se coupant. Il est donc possible de visualiser interactivement l'intersection des volumes solaires et de la scène, c'est-à-dire l'empreinte solaire laissée par les entités architecturales manipulées, au cours de la conception.

Dans l'exemple de la figure 9 page suivante, on se met en situation d'ajuster la position d'une baie sur une façade orientée Sud Sud-Ouest, en tenant compte de l'ensoleillement de la pièce durant la période du milieu d'après-midi l'été. Le volume d'ombre (volume de soleil pour un trou) et le noyau d'ombre (noyau de soleil) sont calculés pour la période considérée et associés à la baie. De la sorte, il devient possible d'explorer graphiquement l'empreinte solaire laissée par la baie dans la pièce, suivant les différentes positions qu'elle occupe en façade. La figure 9 montre deux positions extrêmes aux angles de la façade. Pour chaque position, la méthode est capable de donner deux informations solaires importantes en situation de conception : le noyau de soleil (en blanc sur la figure), c'est-à-dire l'ensemble des points de la pièce toujours au soleil pendant la période, et la tache solaire généralisée (en gris), c'est-à-dire l'ensemble des points de la pièce au soleil au moins un instant de la période.

Naturellement, le même dispositif peut permettre d'ajuster deux volumes l'un par rapport à l'autre, en évaluant leur ombre portée réci-

proque (ombre généralisée et noyau d'ombre). Une méthode de colorisation des plages temporelles peut même permettre d'examiner simultanément les différentes ombres portées le matin en hiver et l'après-midi l'été par exemple.

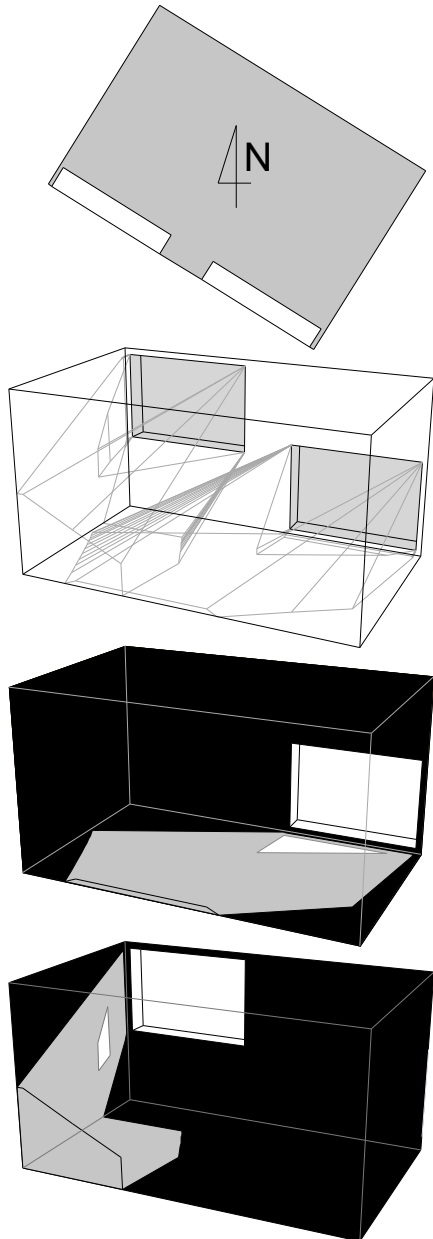


Figure 9 : empreinte solaire d'une ouverture dans une pièce, selon deux positions, pour le milieu d'après-midi l'été

### Masques étendus

En situation de CAO, il peut être intéressant d'évaluer rapidement quelles sont les parties de la scène responsables d'un état d'ensoleillement donné. Il devient alors possible de raisonner graphiquement afin d'ajuster ensemble les masques et leur empreinte solaire.

Notre méthode permet ce type d'approche puisqu'il est possible de visualiser à tout moment l'intersection entre un volume  $\Pi(P,T)$  donné et l'ensemble des objets d'une scène. Cette intersection représente l'ensemble des points de la scène portant ombre sur au moins un point de P pour au moins un instant de T.

Nous appelons masque étendu cet ensemble de points. La figure 10 montre par exemple le masque étendu d'une bande de façade, pour la période du matin l'été : tous les points de la zone grisée, et seuls ces points, portent ombre sur P pendant T. Dès lors, l'évidement de tout ou partie du masque étendu, accroît l'ensoleillement de P pendant T. Il peut être utile de constater également que la modification de toute autre partie de la scène ne modifie pas l'ensoleillement sur P pendant T.

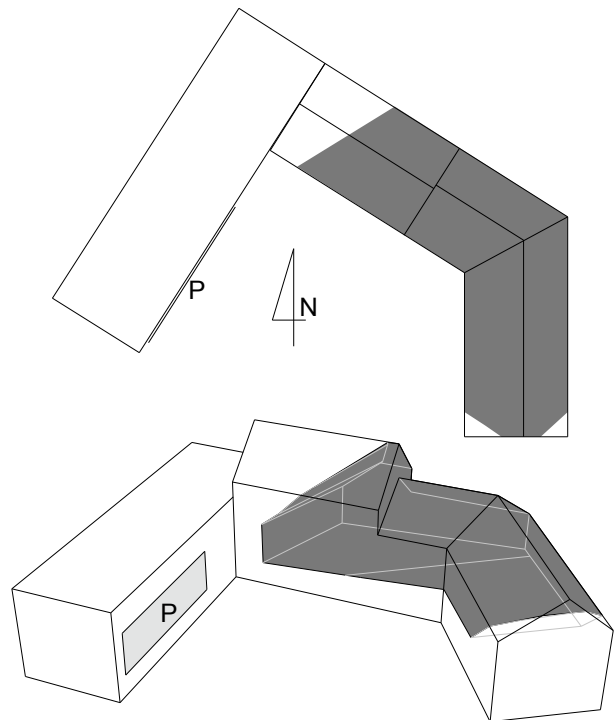


Figure 10 : identification du masque étendu de P pour la période du matin l'été

### Evidements optimaux

Les contraintes d'ensoleillement pesant sur un espace peuvent être telles que les techniques visuelles d'évaluation ne suffisent plus ; il faut alors trouver la solution optimale au problème posé. Ce peut être par exemple le cas pour éclairer naturellement une piscine en évitant toute situation d'éblouissement. On peut traiter cette contrainte en utilisant notre méthode. Ainsi, étant donné la position et l'orientation du bassin, on définit le volume d'ensoleillement ayant pour base la surface

d'eau et pour plage temporelle la journée entière pour l'année solaire entière. Le volume représente alors l'ensemble des rayons solaires susceptibles d'atteindre la surface du bassin à quelque moment que ce soit (figure 11). L'intersection de ce volume avec le gabarit de l'enveloppe du bassin fournit les zones de cette enveloppe qui devront rester opaques. A contrario, on peut utiliser les autres zones pour éclairer le bassin avec l'assurance qu'aucun rayon solaire ne viendra atteindre la surface de l'eau.

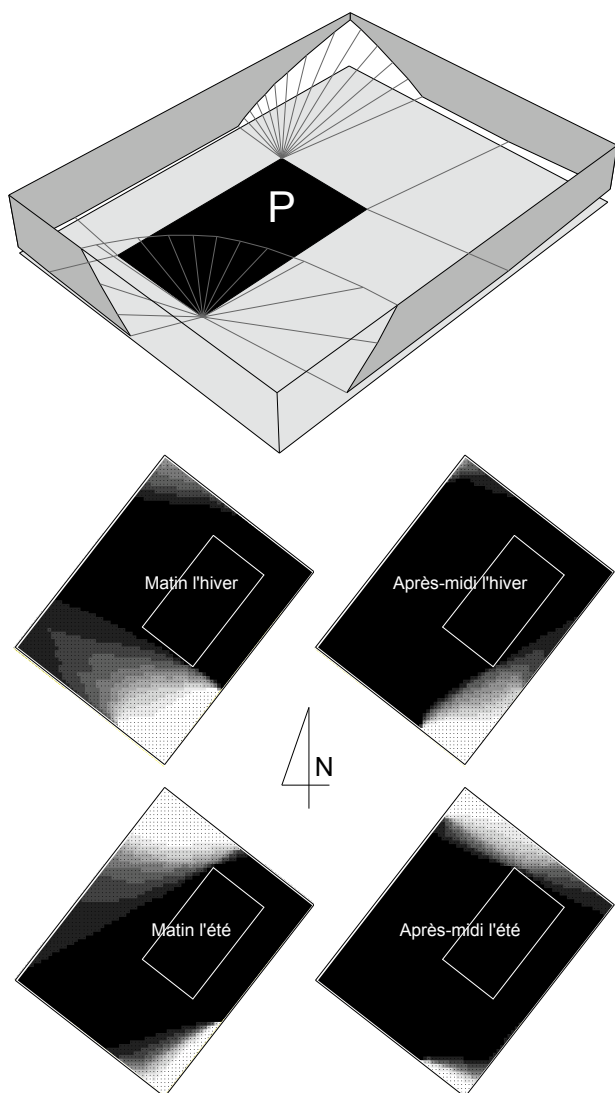


Figure 11 : en haut, les évidements de l'enveloppe assurent qu'aucun rayon solaire n'atteint P pour aucun instant de l'année. En bas, validation du résultat au sol (du noir vers le blanc : fraction du temps de la période à l'ombre, de 0% à 100%)

Une simulation de l'ensoleillement permet de vérifier que la contrainte est bien réalisée. Ainsi, la figure 11 montre les états moyens

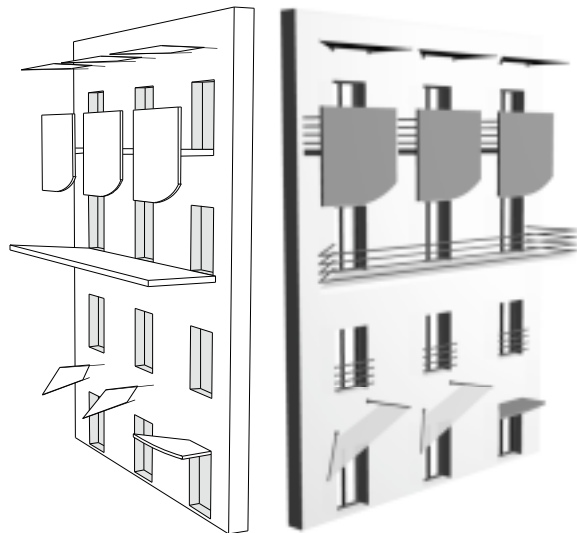
d'ensoleillement, au sol, pour quatre périodes de l'année solaire. La surface du bassin reste dans l'ombre toute l'année, tandis que les espaces alentours bénéficient d'un ensoleillement variant suivant leur orientation.

### Exploration interactive de masques

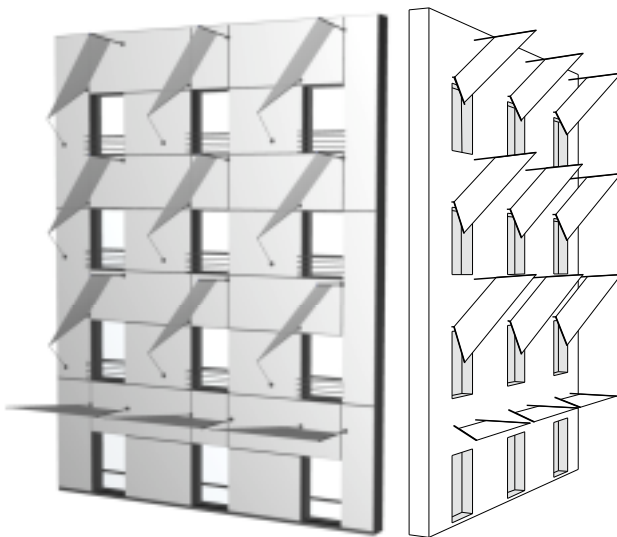
La satisfaction du confort d'été avec un système passif conduit à dessiner des masques capables de protéger les baies les plus exposées pendant les heures les plus chaudes. Un concepteur qui souhaite dessiner un masque adapté à une situation particulière se trouve assez démuné avec les outils conventionnels. Les abaque solaires sont trop grossiers ou d'usage trop fastidieux pour permettre un dessin en détail des éléments. Quant aux outils de simulation directe, ils ne permettent que de vérifier la pertinence de masques dessinés a priori : comment s'assurer que ces masques sont bien optimaux dans un contexte particulier ? Comment explorer l'ensemble des masques potentiels pour une situation donnée ?

Nous avons montré que le volume  $\Pi(P,T)$  est tel que toute section entière M de ce volume est un masque total de P pendant T (autrement dit, P est l'intersection de toutes les ombres portées par M sur son plan pendant tous les instants de T, cf. supra). Il suffit donc d'explorer interactivement les sections entières de  $\Pi(P,T)$  pour prendre connaissance de toutes les solutions possibles et constituer une bibliothèque de masques répondant à une contrainte donnée. Il existe non seulement une infinité de masques satisfaisant la contrainte, mais de plus ces masques présentent une variété de formes souvent insoupçonnée.

La figure 12 montre l'exemple d'une façade urbaine ordinaire, composée de 12 baies identiques, orientées légèrement Sud-Ouest, supposées sans vis-à-vis, et qu'il s'agit de protéger l'après-midi l'été. On peut limiter la contrainte à la période du début d'après-midi pendant tout le mois de juin, en supposant que l'ombre généralisée des masques ainsi créés sera suffisante pour étendre la protection à toute la période estivale sans empêcher l'accès au soleil pendant la période hivernale. Une fois le volume solaire correspondant calculé, plusieurs masques différents sont créés en évaluant la forme et la pertinence architecturale de sections variées du volume. Cette approche laisse une grande liberté formelle au concepteur. Ainsi, la figure montre deux traitements différents de la même façade, tous les deux proposant des pare-soleil optimaux réalisant la protection exacte des baies suivant la contrainte fixée.



Composition 1



Composition 2

Figure 12 : deux compositions de pare-soleil sur une même façade. Les 12 baies sont protégées en début d'après-midi en juin

On observe en effet sur la figure 13 que les baies de la composition 1 sont parfaitement protégées en début d'après-midi en juin. Conformément à notre intuition, elles se trouvent également bien protégées en début d'après-midi l'été (de mars à septembre) et assez bien protégées tout l'après-midi l'été. Par ailleurs, les masques ont une influence très faible en hiver, les baies étant alors en mesure de capter l'ensoleillement potentiel.

### Contraintes multiples

La compatibilité entre ensoleillement hivernal et estival donne un bon exemple de contraintes multiples. Comment s'assurer qu'un masque défini pour l'été n'empêche pas l'accès au soleil l'hiver ?

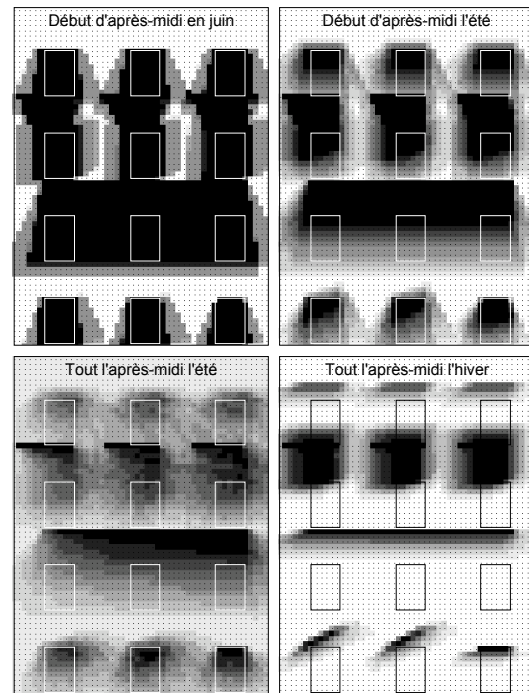


Figure 13 : ensoleillement de la façade de la composition 1 en différentes périodes (du noir vers le blanc : fraction du temps de la période à l'ombre, de 0% à 100%)

Cette question peut être résolue avec les volumes d'ensoleillement. Considérons à nouveau une baie de la façade précédente et décidons qu'elle soit parfaitement protégée en début d'après-midi l'été et parfaitement exposée en milieu d'après-midi l'hiver (figure 14). La solution du problème, si elle existe, s'obtient en considérant la différence booléenne entre les volumes d'ensoleillement associés aux contraintes : il suffit que le masque défini dans le volume d'été ne coupe pas le volume d'hiver pour avoir l'assurance que les deux contraintes sont satisfaites simultanément.

la figure 14 montre qu'aucune solution exacte n'existe dans notre exemple puisque les volumes d'hiver et d'été se coupent. L'été est défini de mars à septembre, et l'hiver de septembre à mars. C'est donc l'ensoleillement potentiel de P aux mi-saisons qui est en jeu dans cet exemple. En privilégiant un masquage de la baie pour l'été, on impose de fait une réduction importante de l'ensoleillement potentiel à la mi-saison. A l'inverse, privilégier l'ensoleillement d'hiver permet également l'accès au soleil en mi-saison mais empêche de protéger totalement la baie en été. Ces arguments sont simplement déduits de l'agencement réciproque des volumes qui fournissent en même temps une représentation du problème et les solutions permettant de le résoudre.



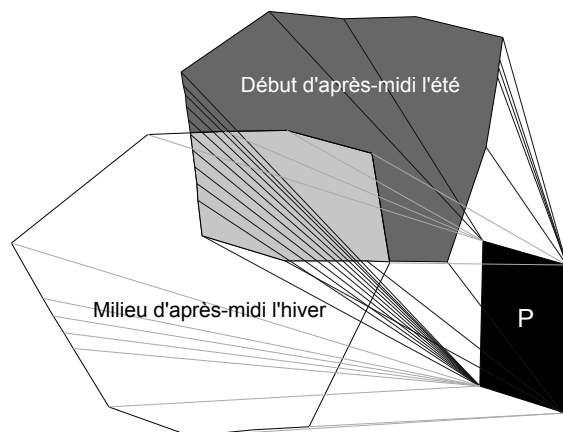


Figure 14 : *contrainte double*

## **CONCLUSION**

Nous proposons une méthode de résolution des problèmes d'enseillement au moyen de constructions géométriques représentant des volumes de rayons solaires. Nous obtenons de la sorte une représentation spatio-temporelle des phénomènes solaires qui peut être facilement intégrée dans un système de CAO. La méthode se résume à la construction de deux types de volumes (volume d'enseillement et noyau) et de leurs symétriques, suivant que l'on considère les rayons solaires ou les rayons d'ombre.

Nous avons voulu montrer dans cet article que ces simples entités, correctement manipulées, offrent un support puissant pour résoudre les problèmes d'enseillement qui se posent en situation de conception. Ainsi, la visualisation interactive des empreintes solaires ou des masques étendus semblent bien plus difficiles à mettre en œuvre avec un système conventionnel de simulation solaire. La mise au point d'une ouverture optimale ou l'exploration interactive de masques, sont des opérations quasi impossibles à réaliser avec les outils existants. Notre approche rend ces opérations presque naturelles et leur enlève toute difficulté pratique. Il suffit pour ce faire de posséder un générateur de volumes d'enseillement s'interfaçant (ou mieux intégré) à un modéleur géométrique. Actuellement, nous disposons d'un tel générateur [2] interfacé avec le modéleur géométrique Zoom de la société Abvent, ainsi qu'un générateur intégré sous forme de macros au modéleur Autocad (système en cours d'étude, cf. [6]).

Certes, la méthode proposée ne permet pas d'apporter de réponse quantitative aux problèmes solaires. Ainsi, nous ne savons pas

actuellement calculer la « charge thermique » d'un volume d'enseillement (énergie potentiellement reçue ou transmise par la base d'un volume d'enseillement, sur l'ensemble de la période considérée). Par contre, la méthode apparaît adaptée à une démarche de conception architecturale ou urbaine, pour laquelle l'essentiel n'est pas tant la précision des résultats que l'absence de rupture de charge entre les différents outils et la possibilité d'explorer différentes solutions formelles dans de multiples directions divergentes. Un concepteur utilisant notre méthode n'a pas de calcul complexe ni de visualisation savante à interpréter en marge de son projet ; il a le moyen d'ajuster son projet, voire de le définir en partie, en fonction des propriétés d'enseillement, faisant ainsi du soleil un véritable générateur de formes [7].

## **REFERENCES**

- [1] J. SERRA, « Image analysis and mathematical morphology », Academic Press, London, 1982
- [2] D. SIRET, « Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural et urbain », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 1997
- [3] R. KNOWLES, M. VILLECCO, « Solar Access and Urban Form », AIA Journal, Feb 1980
- [4] E. SHAVIV, « A Design Tool for Determining the Form of Fixed and Movable Sun-Shades », ASHRAE Trans., Vol. 90, n° 4, 1984
- [5] A.D. RADFORD, « Computer Programs for the Design of the Physical Environment in Buildings », in Solar Energy Applications in the Design of Buildings, Applied Science Publishers. LTD, London, 1980
- [6] S. HOUVERT, « Un outil de simulation inverse de l'enseillement accessible depuis un logiciel de CAO utilisé en architecture », in actes de CISBAT' 2001, Lausanne, Octobre 2001
- [7] M.C LAM, « Sunlighting as Formgiver for Architecture », Van Nostrand, New York, 1986