



HAL
open science

**APPROCHE INVERSE POUR LA RESOLUTION DES
CONTRAINTES SOLAIRES ET VISUELLES DANS
LE PROJET ARCHITECTURAL ET URBAIN,
DEVELOPPEMENT ET APPLICATION DU
LOGICIEL SVR**

Sylvain Houpert

► **To cite this version:**

Sylvain Houpert. APPROCHE INVERSE POUR LA RESOLUTION DES CONTRAINTES SOLAIRES ET VISUELLES DANS LE PROJET ARCHITECTURAL ET URBAIN, DEVELOPPEMENT ET APPLICATION DU LOGICIEL SVR. Autre [cs.OH]. Université de Nantes, 2003. Français. NNT: . tel-00004176

HAL Id: tel-00004176

<https://theses.hal.science/tel-00004176>

Submitted on 15 Jan 2004

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.

Université de Nantes

**ÉCOLE DOCTORALE
MÉCANIQUE, THERMIQUE ET GÉNIE CIVIL**

Année 2003

THÈSE DE DOCTORAT

*Diplôme délivré par
l'Université de Nantes*

Spécialité : Architecture
Présentée et soutenue publiquement par :

Sylvain HOUPERT

le 6 novembre 2003
à l'École d'Architecture de Nantes

**APPROCHE INVERSE POUR LA RÉOLUTION DE
CONTRAINTE SOLAIRES ET VISUELLES
DANS LE PROJET ARCHITECTURAL ET URBAIN**
DÉVELOPPEMENT ET APPLICATION DU LOGICIEL SVR

Jury

Rapporteurs : Michel LÉGLISE, Professeur à l'École d'Architecture de Toulouse
François GUÉNA, Maître Assistant à l'École d'Architecture de Paris La Villette

Examineurs : Jean-Claude BIGNON, Professeur à l'École d'Architecture de Nancy
Pierre-Yves NIZOU, Professeur à l'Université de Nantes
Jean-Pierre PÉNEAU, Professeur Associé Émérite de l'Université de Nantes
Daniel SIRET, Ingénieur de recherche au Cerma

Directeur de thèse : Jean-Pierre PÉNEAU, Professeur Associé Émérite de l'Université de Nantes

Co-encadrant : Daniel SIRET, Ingénieur de recherche au Cerma

Laboratoire : Cerma – UMR CNRS 1563, École d'Architecture de Nantes

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

au Soleil, il ne demande qu'à être vu...

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Remerciements

Ce mémoire est l'occasion pour moi d'exprimer de larges remerciements aux personnes qui ont suivi cette recherche durant près de quatre années.

Je remercie les organismes d'accueil et de financement de cette recherche : l'École d'Architecture de Nantes (EAN) et son Centre de recherche méthodologique d'architecture (Laboratoire Cerma), ainsi que le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et la Région Pays de la Loire. Merci à la Délégation Bretagne du CNRS d'avoir accepté mes cumuls d'emplois.

Je remercie particulièrement Messieurs Michel Léglise et François Guéna qui sont les rapporteurs de ce mémoire, ainsi que Jean-Claude Bignon, Pierre-Yves Nizou, Jean-Pierre Péneau et Daniel Siret qui en sont les examinateurs.

Merci encore à toute l'équipe du Laboratoire Cerma pour son aide méthodologique et bibliographique.

Merci enfin aux personnes qui ont relu ce mémoire ; elles se reconnaîtront.

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Résumé

Dans cette recherche, nous tentons d'évaluer la pertinence d'une approche de simulation inverse des facteurs physiques d'ambiances dans le processus de conception en architecture et en aménagement urbain. Dans cette perspective, un outil de simulation inverse est développé et interfacé en sur-couche du logiciel de CAO *AutoCAD* largement utilisé dans les agences d'architectures. Il agrège les méthodes développées au Cerma ces dernières années sur la simulation inverse, de l'ensoleillement d'une part, et de la visibilité d'autre part.

Dans le projet architectural ou urbain, la simulation directe solaire ou visuelle permet l'analyse d'une situation à un instant donné ou pour un point de vue donné *a posteriori* (après la conception d'un projet), tandis que notre démarche inverse consiste à cadrer la génération de solutions architecturales à partir des intentions d'ambiances du concepteur, et ce pour des périodes solaires et des zones de contraintes définies au début d'un projet. Les modélisations inverses de volumes de contraintes solaires et visuelles – ensembles de solutions à une contrainte donnée – ou d'unique solutions d'ouvertures ou d'écrans sont des réponses optimales aux problèmes spatio-temporels de l'ensoleillement et de la visibilité. Ces volumes englobent l'ensemble des rayons solaires ou visuels joignant une base de contrainte (une zone à ensoleiller ou à protéger du soleil, ou un ensemble de positions potentielles d'un observateur) à une cible de contrainte (période solaire sur la "voûte solaire" ou cible visuelle du type monument, repère...). Ces volumes de contraintes sont aisément manipulables dans le modèleur géométrique. Comme les autres entités qui composent une scène numérique, il est possible de leur faire subir des opérations booléennes, des sections, des translations...

Dans un premier temps, nous présentons un état de l'art de cette recherche sur les différents outils et méthodes de simulation inverse 2D puis 3D de l'ensoleillement et de la visibilité. Dans un second temps, nous développons et présentons l'outil SVR ainsi que ses applications. Enfin, nous livrons un état de l'art de quelques observations et méthodes d'observation des concepteurs à l'œuvre et nous évaluons notre logiciel par l'observation des raisonnements et comportements de onze architectes et étudiants en architecture concevant avec notre outil durant des phases d'esquisses et d'avant-projet. Pour cette évaluation, nous mettons en œuvre un protocole d'observation simultané ("*think aloud protocol*").

Abstract

The architectural and urban design project is a complex work (artistic and legislative, aesthetic and cultural, technical and sensible, etc.). In this research, we present a numerical tool and its applications that enable to take into account the ambient environment factors during the architectural and urban design process.

Generally, solar or visual "*direct*" simulation allows analysing a situation at a given instant or for a given point of view. In architectural and urban spaces, our "*inverse*" approach solves problems of sunlighting, visibility and solar reflection in built environment. By applying the principles of inverse simulation, our numerical model enables to mix these parameters and proposes to consider the relation between *a base* (given observer positions or a solar area) and *a target* (solar period – part of the sky vault – or visual element like, monument, landmark, etc.). This relation represents a volumetric constraint. The CAD tool that is developed (*SVR* software) helps the designers to display architectural and urban constraints and also better to take into account solar and visual impact of urban projects. Our model enables to find solutions in order to satisfy these solar and visual constraints and to generate and manipulate geometrical volumes (3D solids) such as other architectural objects or urban blocks, with *AutoCAD*® software. These solutions of the calculations are "volumes of solar or visual constraints". They represent the whole of the sunbeams or visual rays between *the base* and *the target*. Such a representation enables architects and urban planners to find the exact solutions of a given constraint, and to conceive more sustainable devices in the long-term.

We observed eleven architects or students in architecture, which used our software prototype during sketches and draught phases of architectural design process. For analyse these designers, we have used the "*think aloud*" protocol.

Resumo

La arkitektura kaj urba projekto estas kompleksa laboro (artista kaj laŭregula, estetika kaj kultura, teknika kaj sentebla...). En tio esplorado, ni prezentas nombra ilo kay ĝiaj uzoj kiuj permesas koncepti per mediaj fizikfaktoroj.

Generale, sunaj kaj vidaj "rektaj" simuloj permesas analizi unu situacio dum unu elekta momento. En arkitekturaj kaj urbaj spacoj, nia "inversa" metodo solvas problemoj de

sunlumigo, videblo kaj suna reflektado. Nia nombra ilo uzas "inversa" metodo kaj permesas kombini tiuj tri faktoroj. Li estimas la rilato inter unu bazo (multoblaj pozicio de okuloj aŭ unu suna surfaco) kaj unu celtabulo (suna periodo – porcio de la "suna" volbo aŭ vida elemento kiel monumento, pejzaĝo...). Tio rilato reprezentas volumena trudo. La nombra ilo kiu ni produktis (*SVR-AutoCAD*) helpas arkitektoj por pli bone integri mediaj fizikfaktoroj en arkitektura kaj urba projekto. La solvoj de kalkuloj estas "volumenoj de trudoj". Ili reprezentas la tuto de sunaj aŭ vidaj radioj inter la bazo kaj la celtabulo. Tiel, la arkitektoj trovas la ekzakta solvo de una preciza trudo kaj ili konstruas efikaj kaj defendablaj sunekranoj.

Dum skizofasoj, vi observis dekunu arkitektoj kiuj konfirmis nia "inversa" metodo kaj nia ilo *SVR*. Por analizi la arkitektoj, vi uzas "samtempa" ceremoniaro.

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Sommaire

Introduction générale	11
Première partie	31
Deuxième partie	83
Troisième partie	155
Conclusion générale	289
Annexes	299
Bibliographie	315
Table des matières	327
Tables des illustrations	335

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Introduction générale

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Contexte de la modélisation des contraintes

L'élaboration d'un projet architectural ou urbain est un travail complexe, à la fois technique et sensible. Parallèlement au déploiement de procédures intuitives, elle nécessite le recours à des instruments rigoureux, permettant le traitement des dimensions objectives. C'est dans le développement de ces derniers que s'inscrit la présente recherche sur la modélisation géométrique et l'intégration des contraintes solaires et visuelles dans le projet. Avant de préciser la teneur de notre recherche, nos objectifs et notre problématique, nous rappelons quelques généralités sur la question de la simulation des facteurs physiques d'ambiances et plus précisément sur le contexte du traitement des phénomènes solaires et visuels.

La prise en compte des facteurs physiques d'ambiances dans le projet d'architecte n'est possible que si l'on considère les formes des édifices et des villes comme des scènes constituées par l'interaction d'objets et de phénomènes. Ces objets, architecturaux ou urbains sont constitués de matières, le plus souvent minérales qui délimitent des pleins et des vides. Cependant, les scènes sont parfois composées, dans une moindre mesure, d'éléments végétaux (arbres, pelouses, etc.) et animaux ou humains. Dans ce dernier cas, nous considérons les individus comme potentiellement susceptibles de se mouvoir, et *in fine*, de se situer dans un ensemble de points (volume englobant les modélisations d'individus, ou polygone regroupant les positions moyennes des yeux d'observateurs sur une zone donnée, par exemple).

Ces objets, nous les appréhendons avec nos sens, principalement de manière visuelle grâce à la lumière naturelle ou artificielle, mais aussi tactile, acoustique, olfactive et kinesthésique. Notre corps est capable, pour chacun de nos sens, de percevoir les phénomènes physiques y correspondant, car ces derniers agissent sur nos récepteurs sensoriels. Les objets architecturaux, urbains ou paysagers subissent aussi ces manifestations physiques qui se traduisent sur eux, par des modifications de leur couleur (lumière solaire ou artificielle, humidité, etc.), de leur température (convection, conduction et rayonnement), de leur stabilité (vent, vibrations, etc.)...

Pour ce qui concerne les rayons solaires, on sait qu'ils interagissent avec le milieu environnant et en particulier avec l'environnement architectural. Ils sont inobservables en tant que tel. Nous considérons donc, comme pour les rayons visuels, qu'ils sont invisibles dans une scène reconstituée à l'aide des procédures numériques. C'est pourtant la modélisation des faisceaux de ces rayons, correspondant à un ensemble de

positions du soleil ou d'objets observés, que les méthodes ou outils, dits de *simulation inverse* ou de *modélisation déclarative* de l'ensoleillement et de la visibilité tentent de proposer aux architectes. Ces approches de modélisation en trois dimensions (3D) dans des scènes numériques, à partir de l'énoncé d'intentions d'ambiances, seront développées plus tard, avec notre problématique cadrée sur les contraintes d'ensoleillement, de visibilité et de réflexion solaire et visuelle. Nous nous situons, pour l'instant, dans le cadre plus général de la prise en compte, en modélisation géométrique, des paramètres physiques des ambiances et des contraintes qu'elles génèrent.

Deux remarques importantes peuvent d'ores et déjà être formulées : premièrement, les facteurs physiques d'ambiances évoluent dans l'espace et le temps à travers les vides et/ou les pleins créés par l'architecture ou l'urbanisme. Les vecteurs d'ambiances que sont les rayons lumineux (solaires ou visuels) seront modélisés en quasi 4D (trois dimensions de l'espace plus celle du temps – cf. Figure I-0-1), puisque les faisceaux des rayons (solaires ou visuels) qui intéressent notre recherche, intègrent le temps dans l'espace (l'évolution de l'inclinaison des rayons solaires ou visuels selon la position du soleil ou de l'observateur, notamment).



Figure I-0-1 : Perception du temps dans l'espace – "soleil de minuit" sur le cercle polaire, le 20 juin 1998 – Volø (Norvège)

Deuxièmement, les ambiances d'un lieu dépendent directement de notre perception. Chaque individu étant différent (physiquement, physiologiquement, culturellement, etc.), les ambiances sont donc subjectives¹.

Dans le projet d'architecture et d'urbanisme, la modélisation numérique consiste à réaliser les volumétries 3D de modèles d'objets matériels qui s'affichent sur un écran d'ordinateur. A partir de ces modèles, il est possible, grâce à des logiciels spécifiques, de réaliser des simulations de phénomènes comme l'ensoleillement, mais aussi la visibilité, la propagation sonore, l'écoulement du vent, etc. Pour simplifier, disons que les objets matériels sont modélisables sous forme de maquettes numériques (les modèles), tandis que les phénomènes sont simulables sur ces maquettes. La "modélisation" appliquée à l'ensoleillement et à la visibilité peut paraître difficile. Or, contrairement aux phénomènes acoustiques ou d'écoulements aérauliques par exemple, la géométrie des rayons solaires ou visuels est simple car rectiligne. Elle permet à ces derniers d'être modélisés sous forme de volumes 3D aux enveloppes non gauches manipulables dans une scène numérique.

En terme de confort, les apports solaires ou "visuels" sont considérés comme bénéfiques ou préjudiciables selon le contexte dans lequel ils interviennent. Ainsi, les apports solaires hivernaux sont habituellement perçus comme des compléments de chauffage et contribuent au bien-être des usagers, tandis que ces mêmes apports solaires, sont généralement perçus comme une nuisance thermique en été, lorsqu'ils s'additionnent à l'air ambiant déjà chaud. De même, les échappées visuelles contribuent, dans certains cas, au bien-être des usagers, tandis qu'elles sont parfois jugées comme une "*pollution visuelle*". Ces jugements sont précisément les données de base, nécessaires à la formalisation des contraintes solaires ou visuelles.

Après avoir rappelé ces quelques éléments généraux sur la modélisation, il convient – toujours pour situer le contexte – de préciser la manière dont les questions liées à l'ensoleillement et à la visibilité sont traitées dans la pratique opérationnelle des architectes.

¹ A propos des ambiances thermiques, qui n'a jamais observé dans un même lieu, quelle que soit la saison, au moins deux individus portant, l'un des habits d'hiver, l'autre des habits d'été ? Ce type de scène courante, tend à montrer que la perception thermique est un domaine sensible, au sens propre comme au sens figuré. Pour compléter cette remarque, nous renvoyons au numéro des *Cahiers de la Recherche Architecturale* intitulé *Ambiances architecturales et urbaines* [Adolphe et al. 1998].

Prise en compte de l'environnement solaire et visuel

En terme d'énergétique, les apports solaires "gratuits" ont été "redécouverts" à l'échelle nationale avec la crise pétrolière du début des années 1970. Actuellement, à en croire les revues d'architecture, les préoccupations des concepteurs sont de plus en plus tournées vers ce qu'il est convenu d'appeler la *qualité environnementale* de l'architecture. La démarche française, initiée par des architectes, des enseignants et des chercheurs a récemment été reprise par les pouvoirs publics, principalement l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe), les Conseils d'Architecture, d'Urbanisme et d'Environnement (CAUE), le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et le Ministère de l'Équipement. Mais en regard de cette démarche nouvelle, on est fondé à s'interroger : actuellement, les architectes qui décident de s'y investir, ont-ils les moyens techniques pour concevoir des édifices satisfaisant aux contraintes solaires ?

C'est un constat : la prise en compte des problématiques environnementales tend à se développer dans la pratique architecturale. La démarche de *haute qualité environnementale* (HQE) émerge aujourd'hui car les mentalités ont évolué. Elle touche un public plus large que les rares architectes ou maîtres d'ouvrages qui étaient convaincus, trente ans plus tôt, du bien-fondé de *l'architecture bioclimatique*. Aujourd'hui, les architectes, en quête de nouvelles dynamiques de projet, semblent s'inscrire plus volontiers dans ce type d'approche attentive à la qualité de l'environnement.

Demain, la démarche HQE sera labellisée. Pourtant, elle n'apportera pas, de manière certaine, les solutions les plus adaptées à la conception solaire ou visuelle. Puisque certaines cibles de la HQE restent contradictoires, la future réglementation permettra inévitablement aux maîtres d'ouvrages et aux architectes de justifier certains choix aberrants, en jouant avec ces contradictions. L'approche est louable, mais il y aura certainement une dérive de la réglementation si elle se contente de simplement retranscrire le travail avancé par l'Association HQE et l'Ademe (l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). Ces deux organismes voulaient dans un premier temps seulement inciter les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrages à intégrer, dès le début du projet architectural, les préoccupations écologiques, en proposant de suivre un cahier des charges en 14 points (les cibles HQE). Nos préoccupations solaires et visuelles recoupent deux de ces cibles. Il s'agit, premièrement, de la cible n° 4 intitulée "*gestion de l'énergie*" pour laquelle les publications de l'Association HQE [Olive 1997], reprises par l'Ademe, stipulent : "*pour la réalisation du confort thermique*

d'hiver, il s'agit [...] de récupérer au mieux les chaleurs gratuites d'ensoleillement" et "pour la réalisation du confort thermique d'été, il s'agit de tenter de recourir [...] à un traitement judicieux de l'enveloppe du bâtiment". Deuxièmement, la cible n° 10 intitulée *"confort visuel"* stipule : *"on souhaite, particulièrement dans l'habitat, d'un côté bien voir l'extérieur depuis l'intérieur (vues dégagées et agréables), et de l'autre côté ne pas être vu depuis l'extérieur (protection de la vie privée). Pour cela, on positionne et dimensionne les parois vitrées afin de satisfaire cet objectif relativement contradictoire"* [Olive 1997]. L'objectif de ces "cibles" est évident ; il est d'inviter les architectes à produire ou privilégier uniquement des dispositifs astucieux en matière d'économie d'énergie. Cependant, pour des raisons compréhensibles d'indépendance vis-à-vis des établissements de recherche et développement, les promoteurs de la HQE française ne proposent pas d'outil pour régler les problèmes spécifiques de l'ensoleillement et de la visibilité.

Pour ces raisons, peut-être, certains exemples d'architecture se réclamant de la HQE, se trouvent déjà incriminés alors qu'ils prédisaient de bonnes performances². Ces exemples ne sont pas isolés. Alors, comment se fait-il que les architectes et les bureaux d'études³ se trompent de la sorte ? Ont-ils les bons outils d'analyse des situations solaires qu'ils avancent comme étant critiques ou favorables ? Pour tenter de répondre à ces questions, évoquons une étude dont l'objectif était d'estimer la proportion d'agences d'architecture ou de bureaux d'études qui utilisent des logiciels de prise en compte des contraintes énergétiques. Pour les besoins d'un article scientifique publié en 2000 [Hien, Poh et Feriadi 2000], des ingénieurs et des architectes ont été interrogés pour analyser quels

² C'est le cas du lycée Jean Monnet situé aux Herbiers (France) conçu par l'agence d'architecture Logerais. En avril 2000, le *Courrier du Conseil Régional* des Pays de la Loire titrait un article consacré à ce bâtiment public : "Lycée Jean Monnet aux Herbiers : des bâtiments « intelligents »" et expliquait que "des brise-soleil installés devant les fenêtres permettront d'éviter la surchauffe" et qu'élaboré "en partenariat avec des techniciens néerlandais, grecs et espagnols, ce projet privilégie la notion de « durabilité ». Il utilise des solutions passives (orientation des bâtiments, éclairage naturel, protection solaire)...". Les économies d'énergie annoncées à hauteur de 30 % à 50 % en 2000, tablaient sur une protection solaire du bâtiment suffisante en été pour éviter le recours à la climatisation artificielle. Or, en 2003, les concepteurs du lycée Jean Monnet étaient bien obligés de constater que les dispositifs solaires qu'ils avaient réalisés n'étaient pas optimaux. L'Ademe et le Conseil Régional des Pays de la Loire, coauteurs du *Manuel du savoir construire pour mieux savoir vivre* déclaraient en 2003, à propos de ce lycée: "les pare-soleil se sont révélés insuffisants en plein été : l'installation de stores supplémentaires est prévue dans quelques locaux..."

³ Ces erreurs d'expertises ne datent pas d'aujourd'hui puisque le célèbre architecte Le Corbusier, éayant son discours sur la ville "radieuse" avec des croquis solaires, expliquait que les *Unités d'Habitation* qu'il concevait, seraient protégées du soleil en été sur leurs façades ouest et est, alors que cette affirmation est plutôt valable pour la façade sud ou les façades ouest et est mais en hiver, ce qui était, de surcroît, l'inverse de ce qu'il annonçait sur ces croquis (cf. [Houpert 1999]).

logiciels ils utilisaient et à quel niveau de dessin ces outils intervenaient. Même si cette étude portait sur une enquête réalisée à Singapour, elle est riche d'enseignements et est, à notre connaissance, la seule enquête de ce type. Nous déplorons, d'ailleurs, ce manque de données précieuses sur les agences d'architecture et d'urbanisme françaises.

Dans l'article en question, les observateurs ont recherché les raisons de l'utilisation des logiciels d'expertise énergétique utilisés par les concepteurs, les problèmes rencontrés et les suggestions d'amélioration. Les auteurs de l'article concluent que 11 % des agences d'architecture utilisent des logiciels d'éclairage ou d'éclairement, et la plupart des agences concernées utilise ces logiciels pour faire des rendus réalistes et pour "*mettre en valeur l'idée du projet*". 25 % des ingénieurs consultés utilisent des logiciels d'éclairage, même si ces derniers sont utilisés pour régler des problèmes d'ensoleillement. La principale conclusion de l'article est que 80 % des concepteurs (parmi les 11 % d'architectes et 25 % d'ingénieurs cités plus haut) utilisent ces logiciels principalement au début de la conception schématique du projet. Concernant les agences d'architecture françaises, voire européennes, ce résultat ne permet pas d'en déduire qu'environ $\frac{1}{10}$ d'entre elles se préoccupent des aspects lumineux.

Le contexte climatique local, à Singapour, a probablement une part d'influence sur les résultats énoncés dans cet article. Cependant, cette enquête nous intéresse à plusieurs titres. D'une part, elle montre que la proportion des ingénieurs utilisant des logiciels d'éclairement est considérable (un quart), au regard de la part généralement très importante des études de structures de nombre de bureaux d'ingénierie. Quant aux architectes, plus généralistes, il n'est pas certain que l'on atteigne, en France, 11 % des agences utilisant des logiciels de prise en compte de l'éclairement. Toutefois, si ce pourcentage était confirmé en Europe, il pourrait être considéré comme conséquent et encourageant, car vu l'étendue de la problématique des ambiances, ce critère n'est qu'un élément de l'ensemble des facteurs physiques qui interviennent dans le projet architectural et urbain. Gardons néanmoins à l'esprit, que notre critère d'ensoleillement ne représente probablement qu'une partie des problèmes lumineux traités par les logiciels d'éclairage, même naturel. Les auteurs de l'article concluent que les motivations des architectes semblent plutôt de l'ordre de la stratégie et de la communication du projet, que de la recherche de la performance énergétique. Ceci signifierait-il que les premiers résultats encourageants de cette enquête sont en demi-teinte ? Evidemment, il nous faut relativiser ces conclusions.

Nous pensons que si les outils actuels ne sont pas encore assez utilisés en modélisation, mais plus en simulation de *conséquences lumineuses*, à des fins de communication, même durant la phase d'APS (avant-projet sommaire), cela est probablement dû au fait

qu'ils sont inadaptés à la recherche d'*intentions lumineuses* voulues par les maîtres d'ouvrages ou les maîtres d'œuvres. A ceux qui pensent que cette quête de communication et de valorisation du projet amène les fabricants de logiciels de DAO/CAO à développer des outils de plus en plus tournés vers la représentation hyper-réaliste des scènes architecturales, nous pourrions leur opposer le fait que ce constat est peut-être la conséquence d'une mauvaise réponse aux attentes des concepteurs. Et si ces derniers ne revendiquent pas la nécessité de concevoir avec des outils de *modélisation inverse*, cela est probablement dû "au jeune âge" de la démarche inverse qui n'a pas encore abouti à la commercialisation de logiciels revendiquant cette démarche. Les architectes interrogés sur leur pratique du projet, ne citeront pas de tels prototypes d'outils car ils n'ont pas connaissance de leur existence. Remarquons enfin que parmi les $\frac{9}{10}$ des architectes qui ne semblent pas utiliser les logiciels d'éclairage, un pourcentage inconnu et peut-être non négligeable utilise probablement des outils graphiques de tracés solaires (du type diagrammes solaires) pour tester des situations d'ensoleillement.

Dans *Les Cahiers de la Profession* n° 9 de 2001 (bulletin d'information de l'Ordre des Architectes) [Genet 2001], lors d'une campagne de communication, un sondage fut réalisé auprès des architectes français. Avec près de 35 % des opinions récoltées en retour du questionnaire proposé, le sondage peut-être considéré comme représentatif. On y apprend que pour les architectes, l'environnement est l'enjeu le plus important auquel la profession doit faire face. Cette conscience environnementaliste a parfois évolué vers des obligations. Signalons notamment le *Code des Devoirs Professionnels des Architectes* (décret du 20 mars 1980 qui stipule que "*le projet architectural [...] comporte au moins des documents graphiques et écrits définissant : l'insertion au site, au relief et l'adaptation au climat*"), le *Volet Paysager* du permis de construire (qui permet depuis 1994 "*d'apprécier la manière dont les constructions s'intègrent dans leur environnement*" et leur "*impact visuel*") ou encore les coefficients environnementaux introduits dans le calcul des *Surfaces Corrigées* des logements ("*coefficient d'éclairage, d'ensoleillement et des vues*" depuis 1948).

Problématique et champ d'application de notre approche

Les recherches entreprises sur les ambiances depuis près de trois décennies dans certains laboratoires des Ecoles d'Architecture, mettent toutes l'accent sur la forte relation qui s'établit entre les objets architecturaux et les phénomènes physiques mais, également, entre les formes géométriques et les effets architecturaux (d'ambiances). L'étude des ambiances est complexe et appelle des approches interdisciplinaires. Pour apprécier les principales voies de recherche sur le sujet, citons [Péneau 1991] et rappelons le numéro spécialement consacré aux *Ambiances architecturales et urbaines* des *Cahiers de la Recherche Architecturale* [Adolphe et al. 1998].

Les frontières qui délimitent une ambiance architecturale ou urbaine sont, par essence, floues même lorsqu'il s'agit d'une ambiance lumineuse faisant interagir une scène, un usager et le facteur solaire, sous la forme d'une "tache de soleil" bien délimitée par exemple. Où commence l'espace au soleil ? Lorsqu'une partie du corps d'un individu est au soleil, ou bien lorsqu'il l'est entièrement, ou encore lorsque sa tête est ensoleillée ? Nous ne parlerons donc pas, dans la suite de ce mémoire, de volumes d'ambiances car aucun volume ne peut englober la notion sensible de l'ambiance faisant intervenir les sens de l'usager. Nous parlerons de *volumes de contraintes solaires, visuelles*, ou de *réflexions solaires* ou *visuelles* pour désigner les entités que les architectes modéliseront et manipuleront. Il ne faudra donc pas chercher dans ces représentations géométriques, des données qualitatives susceptibles de prendre en compte la sensibilité solaire ou visuelle, propre à chaque individu. Le terme *volumes de contraintes* ne signifie pas, pour autant, que les architectes seront contraints dans leur conception plastique, par de tels volumes. D'ailleurs, les contraintes architecturales sont souvent à la base du projet et participent à sa dynamique générale. Un projet sans contrainte est, par exemple, un projet sans limite de propriété, sans relief et sans programme, autant dire, très rare.

Dans des travaux de recherche récents, la "maîtrise" des ambiances solaires et visuelles est soumise à l'utilisation de méthodes ou d'outils de *simulation inverse* ou de *modélisation déclarative*. A propos de la *simulation inverse*, D. Siret [Siret 1997] déclare : "*nous souhaitons produire des formes qui réalisent des intentions d'ambiance*". Nous pourrions alors aller jusqu'à dire qu'il s'agit de *modélisation inverse*, s'il était montré que les architectes utilisent la démarche inverse pour produire des formes architecturales. Quant à la *modélisation déclarative*, elle apparaît être aussi une démarche de résolution de problèmes géométriques, pour répondre à des intentions d'ambiances [Siret 1999 et Lucas 1995]. A ce propos, [Faucher 2001] développe, dans sa thèse, une approche qui aboutit à un prototype de logiciel de *modélisation*

déclarative. Ce dernier modélise des volumétries en 3D à partir de données ou d'intentions réglementaires, émanant de plans locaux d'urbanisme (PLU) par exemple. Pour notre recherche, nous retiendrons une approche de "modélisation inverse", puisque nous tenterons de montrer qu'effectivement les architectes peuvent s'approprier un outil d'aide à la conception qui propose d'inverser le raisonnement de conception.

Afin de comparer la démarche *directe* avec la démarche *inverse*, prenons un exemple simple d'intention intervenant pendant la conception d'un projet : le positionnement d'un massif végétal dans un hall, de manière à ce que les plantes qui le composent soient ensoleillées durant toute l'année. Imaginons que la position et les dimensions du massif sont fixes dans le hall dont le percement des baies vitrées est modifiable à ce stade du projet. Dans une démarche directe, l'architecte a trois solutions pour satisfaire son intention (l'ensoleillement annuel du massif) : soit il modélise plusieurs solutions de percements des baies vitrées, soit il fait tourner la modélisation du hall pour modifier, du même coup, l'orientation du massif par rapport au soleil, soit il modifie l'inclinaison des rayons solaires... en changeant la latitude du lieu. Exception faite de ce dernier cas théorique et paradoxal, ces modifications de la modélisation du hall sont réalistes. A chaque variante de percement ou d'orientation, l'architecte doit simuler l'ensoleillement du massif pour toutes les dates de l'année. Il n'a pas d'autre moyen que de procéder par "tâtonnement" en plusieurs essais de simulations successives pour s'approcher de l'effet voulu (cf. Figure I-0-2). Si l'effet n'est pas l'intention escomptée, l'architecte doit recommencer la simulation directe sur une autre variante de la simulation. Nous le voyons sur cet exemple, la modélisation "solaire" (voire "visuelle") directe est souvent fastidieuse. Remarquons que si l'architecte décide de ne pas changer la modélisation du hall, du massif et des premières variantes de percements, mais de ne modifier que les paramètres du phénomène simulé (date et heure solaires, latitude, ou angle de vue...), il peut, par une démarche directe d'essais successifs, arriver à identifier dans quelles conditions se réalise son intention. Dans ce cas, il faudra parler de simulation directe puisque aucune nouvelle forme ne sera modélisée pour satisfaire l'intention. Il s'agira alors d'une analyse experte, classique dans le domaine du diagnostic solaire ou visuel d'un projet. Il se peut aussi que l'architecte ne puisse pas répondre à son intention, même en essayant toutes les dates solaires de l'année ou tous les angles de vues.

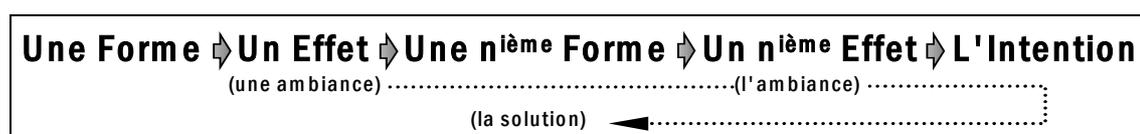


Figure I-0-2 : Approche de modélisation directe répondant à une intention d'ambiance précise

La modélisation inverse, quant à elle (cf. Figure I-0-3), propose de permettre aux architectes de réaliser des formes répondant aux contraintes qu'ils posent dès la phase d'esquisse du projet. L'approche de conception est inversée et permet de répondre à des contraintes de maîtrise des ambiances (solaire et visuelle, dans notre cas d'étude), sans procéder par "tâtonnement". La démarche consiste, pour l'architecte, à sélectionner l'objet ou la surface qui sera le théâtre de l'intention d'ambiance souhaitée. L'effet sera réalisé uniquement si la forme finale respecte le résultat de la modélisation inverse. Cette dernière peut prendre la forme d'une ouverture ou d'un écran (brise-soleil ou visuel) par exemple, si la contrainte est de permettre ou d'empêcher de voir le soleil ou des objets d'une scène, depuis une zone de cette même scène.



Figure I-0-3 : Approche de modélisation inverse ou déclarative répondant à une contrainte

Dans le champ d'application qui nous intéresse, la démarche de modélisation inverse a un intérêt particulier si la contrainte posée en amont est de permettre de voir plus d'une position du soleil (ou plus d'un point "ciblé"), depuis plus d'un point de la scène. Il peut s'agir de voir : soit un ensemble de points dans une scène ou un ensemble de positions solaires sur la voûte céleste depuis un unique point, soit un unique point de la scène ou de la voûte céleste depuis un ensemble de points, ou encore un ensemble de points dans une scène ou un ensemble de positions solaires sur la voûte céleste depuis un ensemble de points de la scène. Dans ces trois cas, la modélisation directe ne pourrait pas satisfaire à la contrainte de manière optimale, car l'architecte doit, premièrement, simuler toutes les positions solaires ou tous les points de vues pour vérifier si la variante de modélisation intermédiaire est valable à chaque simulation, deuxièmement, modifier la modélisation si la variante intermédiaire n'est pas une solution, et troisièmement, recommencer les simulations avec une nouvelle variante. Le cas où seule la position du soleil ou d'un point de la scène est "visée" par la contrainte, depuis un seul point de la scène, sera un cas particulier dans notre approche inverse.

Avant d'expliquer l'enchaînement de notre problématique, nous précisons que dans ce mémoire, nous parlerons aussi bien de conception architecturale que de conception urbaine, pour désigner tout raisonnement de concepteur qui a pour objectif de mettre en

forme (et en ambiance) des espaces intérieurs ou extérieurs. Par conception urbaine, il ne faudra donc pas entendre, la mise en œuvre de règlements d'urbanisme.

Pour organiser notre recherche, nous proposons de procéder en trois étapes (cf. Figure I-0-4). Premièrement, il nous faut *poser* le problème ; autrement dit, situer la nature du questionnement qui est en cause. Deuxièmement, il nous faut *proposer* des hypothèses. Troisièmement, il nous faudra *disposer* d'un outil numérique d'aide à la conception par une approche de modélisation inverse, afin d'évaluer la pertinence de cette démarche.

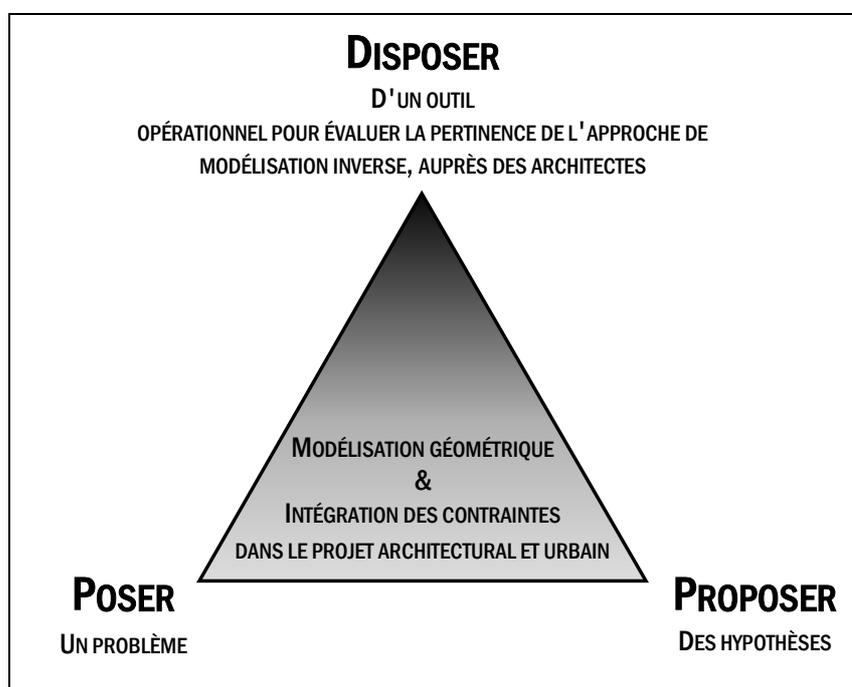


Figure I-0-4 : Organisation de notre recherche en trois points : *poser* un problème, *proposer* des hypothèses et *disposer* d'un outil

Formulation du problème

Des travaux méthodologiques et instrumentaux sur le contrôle des paramètres physiques d'ambiances ont été réalisés, ces dernières années, au laboratoire Cerma de l'École d'Architecture de Nantes (France). Parmi ces recherches, des méthodes et des outils de simulation inverse de l'ensoleillement et de la visibilité ont été développés [Siret 1997 et Nivet 1999]. Ils ont comme caractéristique commune de pouvoir être mis en œuvre dès

le début du projet architectural ou urbain, sans que les volumétries de ces projets soient précisément connues. Dans les deux recherches cités plus haut, les hypothèses de représentation des contraintes solaires et visuelles sous forme volumétrique 3D, ont été vérifiées. Ce que D. Siret appelle "*modéliser des formes architecturales sous « contraintes » d'effets d'ambiances*" n'a cependant jamais été validé auprès des concepteurs, architectes, urbanistes ou étudiants en architecture.

Afin de capitaliser ces travaux, nous proposons donc de répondre aux questions suivantes :

- ✓ *Ces outils ont-ils un cadre d'applicabilité ?*
- ✓ *Si oui, peuvent-ils être transposés tels quels ou bien doivent-ils être adaptés à la culture des agences d'architecture (analyse des architectes face au projet) ?*
- ✓ *Peuvent-ils être agrégés en un seul outil informatique ?*

Définition des hypothèses

L'outil informatique que nous avons l'intention de proposer aux concepteurs sera envisagé dans le cadre d'une approche "intéressée" de ces derniers, car ils devront être acteurs durant les phases de simulation des contraintes. Les architectes devront faire un effort de compréhension des phénomènes qu'ils manipulent (visualisation dans l'espace des trajectoires solaires, positionnement des vues, angles de réflexion, etc.) sous peine de commettre des erreurs sans en diagnostiquer les causes (confusion nord / sud, azimuts est / ouest, heures solaires / légales, non compréhension de la superposition des courbes solaires d'automne sur celles d'hiver d'une part et de celles de printemps sur celles d'été d'autre part, etc.). Sans volonté de la part du concepteur de s'impliquer un minimum dans la compréhension des phénomènes solaires et visuels, il ne pourra pas y avoir de résultats exploitables. Notre outil devra permettre la modélisation inverse, mais aussi être "débrayable" pour ne pas bloquer la simulation directe ponctuelle de vues ou de l'ensoleillement pour un point ou un instant donné. A la manière d'un ensemble de documents posés sur la table à dessin d'un architecte, l'outil numérique devra permettre à l'architecte d'avoir constamment à sa disposition le maximum de renseignements sur les paramètres physiques qu'il manipule afin d'obtenir une vision d'ensemble du modèle de scène architecturale sur laquelle il intervient (diagramme numérique des courbes solaires en 2D ou 3D, du relief environnant, des hauteurs et azimuts du soleil, etc.).

La pertinence de la méthode de simulation inverse ne semble pas devoir être mise en cause. En effet, les hypothèses de prise en compte des phénomènes solaires et visuels par simulation inverse ont déjà été vérifiées par plusieurs travaux de recherche [Siret 1997 et Nivet 1999], il nous reste à montrer comment les concepteurs, en général, et les architectes, en particulier, s'approprient cette démarche de modélisation inverse durant la conception d'un projet ; ce qui sera précisément l'objet de notre troisième partie. Mais avant de présenter tour à tour : les travaux de recherche antérieurs à notre étude ; de développer la démarche propre à notre prototype de logiciel et, enfin, d'évaluer notre outil auprès des architectes, nous posons les cinq hypothèses suivantes :

- *Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire et visuelle sera adapté à la culture des agences d'architecture pour la résolution de contraintes, s'il est utilisé dès les premières phases du projet architectural ou urbain.*
- *Les architectes préféreront concevoir et manipuler les maquettes virtuelles représentant des "volumes de contraintes", en 3D plutôt que de raisonner en 2D, en plan et en coupe, comme il est possible de le faire avec des tracés solaires ou visuels sur papier.*
- *Grâce aux "volumes de contraintes", l'intégration du temps dans l'espace (angles multiples d'observation et positions solaires évolutives) révélera aux architectes des dispositifs solaires ou visuels "intelligents", précis, optimaux et libérés de toute interprétation inhérente (résultats non prévisibles, formes d'ouvertures non standard, etc.).*
- *En complément d'une aide à la conception, notre outil de modélisation inverse aura une portée didactique et permettra une représentation des phénomènes solaires et visuels plus aisée grâce à la 3D (compréhension de la symétrie annuelle des trajectoires solaires, du rapport entre les heures solaires et les heures civiles, visualisation des masques solaires dus à l'environnement, représentation de l'accessibilité visuelle d'un point, etc.).*
- *Oui, un outil informatique pouvant être simultanément utilisé pour régler les trois types de contraintes que sont l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle, sera bienvenu en conception architecturale et*

urbaine, pour combiner des intentions d'ambiances parfois étroitement liées⁴.

Mise au point d'un outil

L'outil que nous présentons dans ce mémoire devra être opérationnel afin d'être validé par des architectes, des urbanistes ou des paysagistes dans des situations de conception en phases d'avant-projet ou d'esquisses.

Notre application portant sur l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle, elle permettra de confirmer le bien-fondé de notre démarche, ou au contraire, de l'amender grâce à l'observation des praticiens qui auront à utiliser cet appareillage pour concevoir leur projet. Pour cela, nous réaliserons un bref examen des travaux existants actuellement en matière d'observation des architectes en situation de conception sur papier et sur ordinateur et nous mettrons en œuvre un protocole d'observation de ces concepteurs.

Au delà des seules questions d'ensoleillement et de visibilité, le développement d'un tel outil de modélisation inverse devrait permettre d'évaluer la pertinence de l'approche de simulation inverse des paramètres physiques d'ambiances dans le processus de conception.

Plan du mémoire

Le présent mémoire s'articule autour de trois parties, à la fin desquelles figurent les conclusions intermédiaires reprises dans la conclusion générale.

Première partie

La partie qui suit cette introduction générale est consacrée à l'état de l'art sur les outils graphiques ou numériques qui proposent de résoudre des problèmes liés aux facteurs

⁴ A ce propos, K. Lynch [Lynch 1976] nous rappelle que le soleil et les silhouettes urbaines peuvent avoir la même fonctionnalité de repère : "*le soleil, dont le mouvement est suffisamment lent et régulier, peut servir de point de repère*" et les silhouettes urbaines asymétriques, du type de celle de la Cathédrale de Florence (Italie), crée un repère qui "*permet de jauger de loin la direction sous laquelle on le voit*" écrit-il.

physiques qui intéressent notre propos : l'ensoleillement et la visibilité. Il s'agit d'instruments, de méthodes et de logiciels résolvant des contraintes solaires ou visuelles, en 2D ou en 3D. Nous pouvons déjà affirmer, qu'à notre connaissance, il n'existe aucun logiciel de simulation inverse ou de modélisation inverse de l'ensoleillement ou de la visibilité, commercialisé dans le monde. Il s'agit d'un constat important qui montre que nous ne sommes qu'au début de l'exploration de la démarche inverse en modélisation architecturale et urbaine. Concernant les outils cités dans l'état de l'art, il est question uniquement de maquettes d'outils ou de prototypes de laboratoires de recherche en architecture ou en génie civil. Certains sont disponibles par téléchargement sur Internet, mais la majorité d'entre eux fait uniquement l'objet de publications dans des revues scientifiques ou dans les actes de congrès internationaux. Les résultats qu'ils fournissent, répondent quasiment toujours à des contraintes solaires ou visuelles destinées aux usagers. Autrement dit, l'usage fonctionnel des lieux est majoritairement pris comme base de contrainte, même pour les contraintes solaires (protection solaire d'une baie vitrée en été, apports solaires hivernaux dans des lieux de vie, etc.). Nous n'avons pas trouvé, dans nos recherches bibliographiques, d'intention plastique à la base de démarches purement inverse⁵ comme, par exemple, la recherche d'effets de contraste ou de mise en valeur par la lumière, par exemple.

Deuxième partie

Dans la deuxième partie, nous présentons la méthode de modélisation inverse propre à l'outil informatique développé durant cette thèse de Doctorat. Nous présentons les apports de l'outil et l'exploitation des ensembles de solutions qu'il permet de modéliser. Nous rappelons que notre prototype de logiciel s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche du Laboratoire Cerma de l'Ecole d'Architecture de Nantes et reprend les travaux de deux thèses sur la simulation inverse de l'ensoleillement [Siret 97] et de la visibilité architecturale et urbaine [Nivet 99]. Il utilise une nouvelle méthode de calcul des volumétries induites par les contraintes, développée durant cette thèse, pour "croiser" les ambiances solaires et visuelles. Il est donc capable de répondre indifféremment à des problèmes d'ensoleillement, de visibilité ou de réflexion solaire ou visuelle avec une même interface informatique.

⁵ A notre connaissance, seul M. Twarowski [Twarowski 1962], dans son ouvrage *Soleil et Architecture* aborde en parallèle la recherche d'effets plastiques et la notion de contraintes solaires (cf. première partie). Néanmoins, il ne propose pas de démarche inverse pour obtenir des effets plastiques et solaires souhaités, mais des méthodes de calcul direct d'ensoleillement.

Pour son module spécifique à l'ensoleillement, notre prototype de logiciel fait appel à un modèle de "voûte solaire" qui positionne les trajectoires apparentes du soleil sur la voûte céleste. Cette représentation détaillée des courses solaires dans l'espace relève d'une approche basée sur une forte intuition d'architecte voulant maîtriser l'ensemble des paramètres solaires que sont l'épaisseur apparente du soleil, les heures solaires, les heures légales, la visualisation en trois dimensions des trajectoires solaires, la possibilité d'y superposer les masques de l'environnement, etc.).

Troisième partie

La troisième et dernière partie de ce mémoire de thèse est consacrée à l'analyse des observations de onze concepteurs utilisant notre outil. Le premier chapitre de cette partie relate l'état de l'art des observations d'architectes concevant. D'ores et déjà, nous pouvons dire que la littérature internationale sur ce sujet n'en est qu'à ses débuts. Elle porte principalement sur l'analyse des croquis d'architectes sur papier et l'élaboration de protocoles d'observation. Cette étude bibliographique nous a permis d'extraire, des quelques rares méthodes d'analyse de concepteurs réalisées à l'heure actuelle, un protocole d'observation par enregistrement audio. Grâce à ce protocole, l'analyse des observations des concepteurs nous permettra de valider ou d'amender nos choix instrumentaux et de conclure sur la pertinence des hypothèses de recherche du Laboratoire Cerma sur une approche inverse des facteurs physiques d'ambiances architecturales ou urbaines. La retranscription des enregistrements audio des concepteurs fera l'objet d'une annexe (cf. Annexe 2).

A notre connaissance, c'est la première fois que des architectes sont observés en phase de conception, utilisant un outil de modélisation inverse. En revanche, d'après certains travaux de recherche sur la démarche de conception "classique" de l'architecte, et à ce stade de l'introduction, nous pouvons affirmer que notre approche inverse ou déclarative semble se positionner à mi-chemin entre "*considérations objectives*"⁶ et "*affirmations subjectives*" ; entre contraintes et expression artistique. La liberté de concevoir un dispositif solaire ou visuel à partir de l'exploitation de volumes de contraintes est infinie

⁶ Dans sa thèse de Doctorat, O. Tric [Tric 1997] a analysé l'articulation du "*système d'acteurs*" (maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et usagers) mis en place durant la conception architecturale non-assistée par un ordinateur. Il a interrogé et observé plusieurs architectes français dans leur agence, lors de phases graphiques d'esquisses et d'APS. "*La démarche de conception nous apparaît comme l'expression d'un processus complexe à caractère téléologique, conclut-il, dans lequel se mêlent des considérations objectives déduites de l'analyse du programme, du contexte, des contraintes techniques et des affirmations subjectives nées d'intentions de nature esthétique (hypothético-déductif), technique (s'appuyant sur un savoir) et artistique (faisant appel à l'imagination), seul ce dernier manifestant la liberté de celui qui conçoit.*"

puisque, comme nous le verrons dans la deuxième partie, ces volumes englobent une infinité de solutions. La conception par une approche inverse ne devrait donc pas être imposée par la forme globale de ces volumes de contraintes. L'appel à l'imagination de chaque architecte pour concevoir des formes incluses dans ces volumes ne devrait être en rien perturbé ou influencé par ces derniers, du point de vue de leurs proportions, envergures, directions, etc. Les concepteurs devront rester libres d'imaginer les éléments qui composeront les solutions aux contraintes. Les formes, les positions, les épaisseurs, les inclinaisons et les orientations de ces solutions seront des paramètres libres, même dans le cas du calcul d'écran ou d'ouverture, automatisé par notre outil.

En révélant l'ensemble des solutions à un problème donné, exploitables par l'architecte, les volumes de contraintes permettront probablement aux concepteurs d'explorer un univers difficilement imaginable en représentation mentale 3D. Même si les formes, solutions aux contraintes posées, sont toujours "cadrées" latéralement par les enveloppes des volumes de contraintes, leurs faces à l'intérieur de ces volumes resteront totalement libres. De cette manière, l'innovation née de l'imagination des architectes ne devra pas être freinée par notre approche inverse, mais au contraire, aidée par la représentation 3D des contraintes sur lesquelles elle porte.

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Première partie

- 1 L'état de l'art de la simulation inverse de l'ensoleillement et de la visibilité**
- 2 Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle
- 3 L'utilisation d'un outil de modélisation inverse par des concepteurs

"The sun is fundamental to all life. It is the source of our vision, our warmth, our energy, and the rhythm of our lives. Its movements inform our perceptions of time and space and our scale in the universe."

R. L. Knowles, *The Solar Envelope*, 1984

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Introduction

Les méthodes de simulation directe de l'ensoleillement tendent, actuellement, vers la simulation réaliste de la lumière naturelle grâce à des images en 3D générées, notamment par la technique du lancer de rayons à laquelle peuvent s'ajouter des méthodes d'analyse des niveaux lumineux d'une scène dus à la composante diffuse de la lumière naturelle (la radiosité)⁷. La simulation directe solaire et, dans une moindre mesure, visuelle, a fait l'objet de très nombreuses recherches et publications depuis que les bâtisseurs s'intéressent aux tracés solaires (temples égyptiens, Parthénon d'Athènes, Panthéon de Rome, tracés d'ombres de Léonard de Vinci – cf. Figure 1-1, etc.) et aux vues possibles depuis ou à travers leurs édifices (meurtrières des châteaux médiévaux, tours de guet, ébrasement de certaines baies, etc.).

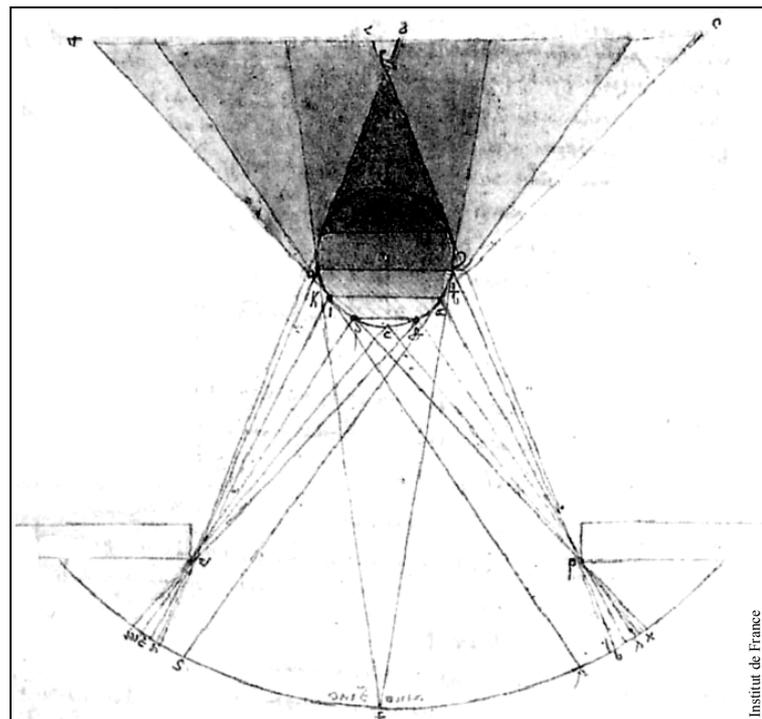


Figure 1-1 : Etude des ombres propres et portées d'une sphère éclairée par une baie – Léonard de Vinci

⁷ Voir à ce propos la Thèse de Doctorat de F. Miguet, *Paramètres physiques d'ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*, [Miguet 2000].

Dans la littérature du siècle dernier, nous remarquons principalement la revue *Techniques et Architecture* qui consacra entièrement son double numéro 7-8 de juillet-août 1943 [Massé *et al.* 1943] aux tracés solaires. Cette synthèse des méthodes de tracés solaires connues au milieu du XX^{ème} siècle est particulièrement riche. Elle rend compte de l'état de l'art sur le sujet, déjà très abondant à cette époque.

Concernant le couplage des deux contraintes en simulation inverse, nous n'avons trouvé aucun document relatant une telle recherche dans la littérature scientifique internationale. Les seules recherches entreprises sur ce couplage, concernent l'éclairage et le confort visuel [Yener 1999] mais elles ne revendiquent jamais la notion de simulation inverse. En 1997, D. Siret [Siret 97] appelait de ses vœux, dans son mémoire de thèse, "*un système « intelligent » [...] pour réaliser en même temps des propriétés de différentes natures (ensoleillement, visibilité, règles de construction...)*". Peut-être sommes-nous proches de réaliser cet objectif avec le développement de notre outil numérique qui devrait être le premier du genre, car à notre connaissance, il n'existe aucun logiciel commercialisé ou prototype issu de la recherche, disponible pour régler en même temps, des problèmes de visibilité et d'ensoleillement.

Dans cet état de l'art, n'est mentionnée aucune étude sur la simulation inverse de la réflexion spéculaire car elle semble inexistante à l'heure actuelle. Pourtant, nous le verrons dans la deuxième et la troisième partie de ce mémoire, les contraintes de réflexions solaires ou visuelles ont de nombreuses applications dans le projet architectural ou urbain. Nous développerons donc cet état de l'art sous la forme de deux chapitres uniquement. L'un sera consacré aux outils (méthodes, instruments, logiciels, etc.) de simulation inverse de l'ensoleillement. L'autre chapitre, moins conséquent, sera consacré aux outils de simulation inverse de la visibilité. Afin de montrer la filiation qui existe entre notre démarche et celles entreprises depuis près d'un demi-siècle, dans le domaine de la résolution de contraintes solaires ou visuelles, nous proposons d'organiser ces chapitres en différenciant les outils de simulations inverses en 2D de ceux de simulations inverses en 3D (sans ordre chronologique).

Mais avant d'approfondir cette analyse globale, nous souhaitons présenter deux approches similaires à notre recherche de construction de volumes de contraintes et de simulation inverse de l'éclairage. Premièrement, le calcul des *volumes d'ombre et de pénombre* que propose T. Nishita, dès 1985, pourrait être considéré comme très proche de nos préoccupations, voire comme étant une recherche en amont de la nôtre (même intérêt pour la représentation volumétrique des rayons lumineux, notion de zone constamment ou temporairement à l'ombre ou à la lumière, etc.). Ainsi, l'équipe sud-coréenne [Yoo *et al.* 1998] reprenant les travaux de T. Nishita [Nishita et Nakamae

1985 ; Nishita, Okamura et Nakamae 1985] et partant d'une source lumineuse non pas ponctuelle mais surfacique, trouvent un algorithme capable de calculer les *volumes d'ombre* et de *pénombre* que produisent des objets d'une scène. Ce travail est très proche de notre recherche sur le calcul d'enveloppe maximale entre une base de contrainte et une surface (surface de la voûte céleste dans le cas de la simulation solaire inverse et cible architecturale dans le cas de la simulation inverse de la visibilité). Dans le cas du calcul de *volumes d'ombre*, la base de la contrainte lumineuse est une source lumineuse non ponctuelle (surface lumineuse rectangulaire, Figure 1-2) et la surface visée est un polygone d'une scène (surface triangulaire, Figure 1-2). Ce que T. Nishita appellent *volumes d'ombre* et *volumes de pénombre* sont à l'éclairage ce que sont à l'ensoleillement inverse, respectivement, les volumes de contraintes solaires et les *enveloppes solaires*, à la différence près que ces derniers se trouvent derrière la surface éclairée et non entre la source et la surface éclairée.

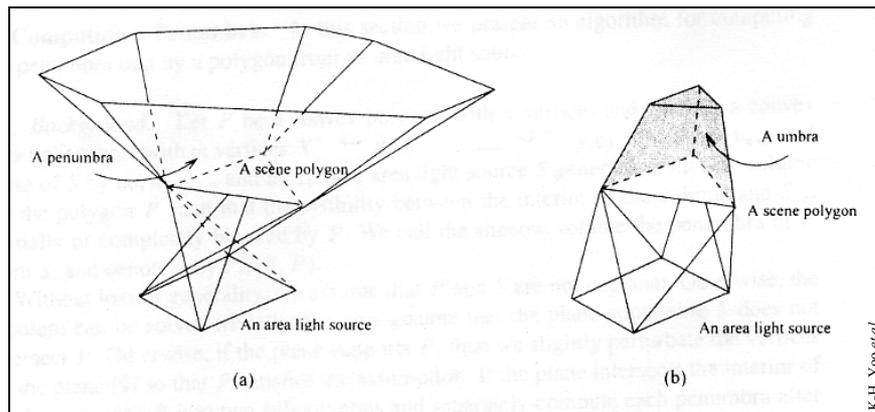
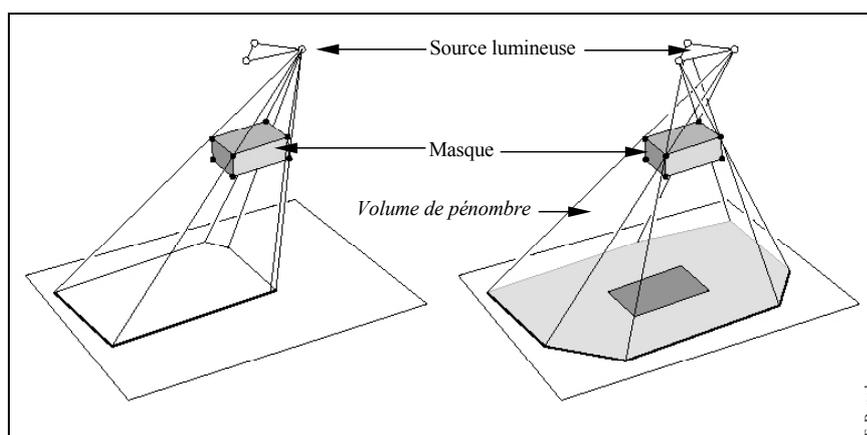


Figure 1-2 : Calcul du *volume d'ombre* (b) inclus dans le volume de *pénombre* (a), tous deux délimités par les plans joignant les sommets du polygone triangulaire éclairé et les arêtes de la source lumineuse carrée et inversement.

En France, F. Durand [Durand 1999] reprend aussi les travaux de T. Nishita. Il aboutit aux mêmes conclusions : il est possible de délimiter dans l'espace 3D les *volumes d'ombre* et les *volumes de pénombre* d'une surface polygonale d'une scène éclairée par une source lumineuse non ponctuelle (cf. Figure 1-3). Imaginons cette source lumineuse triangulaire projetée à l'infini. Elle pourrait être considérée comme une portion de la voûte céleste ou plus exactement comme la période solaire comprise entre trois instants de l'année solaire. La filiation entre la démarche de T. Nishita et notre démarche inverse prend alors sens. Mathématiquement, les *volumes de pénombre* sont l'ensemble des

points d'une scène qui sont *au moins* à l'ombre d'un point de la source lumineuse polygonale tandis que les *volumes d'ombre* sont les points de cette scène qui sont à l'ombre de la *totalité* des points de cette même source lumineuse⁸.



La deuxième approche similaire à notre recherche est la simulation inverse de l'éclairage naturel ou artificiel. Ainsi, L. Khemlani du Martin Center for Architectural and Urban Studies à Cambridge (USA) analyse dans un article [Khemlani 1995] le logiciel *GENWIN* capable de produire l'ensemble des solutions d'ouvertures sur une façade pour une contrainte d'éclairage réglementaire à l'intérieur d'une pièce rectangulaire. Les ouvertures ne doivent pas être plus de trois et suivent une trame de cinquante centimètres sur cinquante centimètres. Pour chaque solution, l'utilisateur peut en cliquant sur la représentation graphique de l'ouverture obtenir des informations sur les dimensions des fenêtres préconisées, et le niveau d'éclairage des zones de la pièce en plan. A. D. Radford et J. S. Gero [Radford 1979] proposent, quant à eux, d'optimiser l'éclairage d'une pièce par sa fenêtre. Pour des cas simples, les auteurs affirment trouver la réponse formelle optimale à une contrainte d'éclairage donnée, tout en permettant de minimiser le coût et la consommation d'énergie d'une telle solution.

⁸ Dans le domaine de l'ensoleillement, D. Siret fait une proposition similaire [D. Siret 2002]. Il appelle "volume de soleil" ou "volume d'ombre" les volumes opposés aux "pyramides complexes d'ensoleillement" (cf. § 1.1.2.2.2), et "noyau d'ombre" ou "noyau de soleil" les volumes opposés aux "noyaux de pyramides d'ensoleillement". Notons qu'il peut y avoir ambiguïté entre ce que les différents auteurs appellent "volume d'ombre" (*volume de pénombre* dans le cas de D. Siret).

Signalons aussi dans cette introduction, les travaux de A. C. Costa [Costa 1999 et 2000] et sa méthode de simulation inverse de l'éclairage intérieur basée sur l'hypothèse d'une réflexion diffuse idéale des matériaux. La réflexion sphérique de la surface qui doit être éclairée est discrétisée en des angles solides élémentaires. Pour une direction choisie, le faisceau d'angles solides lui correspondant est prolongé jusqu'au plan support de l'éclairage. Les caractéristiques de l'éclairage sont données par l'analyse de l'intersection entre ce faisceau et le plan support. Il affirme pouvoir répondre à des requêtes du type : "*éclairer suffisamment une zone à l'intérieur d'un volume cylindrique, à partir d'un premier spot dirigé vers le plafond et d'un deuxième éloigné du premier et moins puissant*".

C. Schoeneman, J. Dorsey, B. Smits, J. Arvo et D. Greenberg, auteurs de l'article intitulé *Painting with light* [Schoeneman *et al.* 1993] proposent une autre méthode. Ils semblent pouvoir procurer aux concepteurs les moyens de représenter approximativement un effet lumineux en dessinant des taches lumineuses sur les objets d'une scène. Plusieurs lampes sont placées à l'intérieur de cette scène. Leur nombre et leur position sont donnés. L'outil de simulation inverse de l'éclairage permet de quantifier le nombre de lampes utiles et de qualifier les meilleures intensités lumineuses des lampes pour obtenir la meilleure réponse à l'effet lumineux recherché. Les auteurs de l'article parlent, dès 1993, de résolution d'un "*problème lumineux inverse*" même s'ils affirment que l'approche est restrictive puisque le nombre de lampes est fixé.

1.1 Simulation inverse de l'ensoleillement

A la différence des méthodes et instruments de simulation directe, les outils de simulation inverse (de l'ensoleillement ou de la visibilité entre autres exemples) permettent de garantir une ou plusieurs solutions aux contraintes physiques des architectes pour lesquelles une démarche classique (directe) aurait du mal à aboutir. Mais les architectes et les chercheurs n'ont pas attendu l'essor de la modélisation dite déclarative (ou inverse) dans les années 1990 pour inventer des dispositifs architecturaux ou des dispositions urbaines capables de répondre à des exigences particulières des maîtres d'ouvrages, des collectivités, des usagers ou même des maîtres d'œuvres eux-mêmes. Ils ont à leur manière détourné l'utilisation de certains outils de simulation directe pour parvenir à répondre à des questions de l'ordre de l'optimisation de dimensionnements (de protections solaires principalement) ou de la recherche de durées annuelles d'ensoleillement en un point permettant d'ajuster un dispositif par rapport à des périodes de surchauffes solaires potentielles par exemple. Nous abordons dans ce chapitre un état de l'art des méthodes ou instruments permettant la simulation inverse de l'ensoleillement en 2D, dans un premier temps, puis son évolution en 3D depuis ce que M. Twarowski appelait "*courbes de niveau solaires*" [Twarowski 1962] et qui correspondent à l'empreinte de volumes de contraintes solaires appelés "*pyramides complexes d'ensoleillement*" par D. Siret [Siret 1997].

Avant tout, analysons les deux schémas suivants (Figure 1-4 et Figure 1-5). Ils illustrent ce que sont la simulation directe et inverse 3D. Une analyse experte pour la première ; une méthode de résolution de contraintes pour la deuxième.

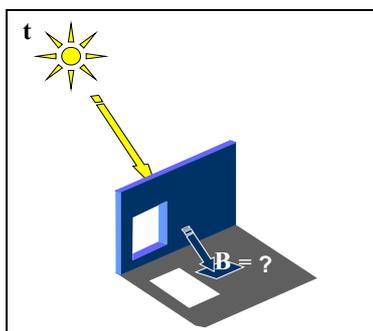


Figure 1-4 : Simulation directe de l'ensoleillement.
Quelles sont les zones ensoleillées à l'instant t ?
Donc, la surface B est-elle ou non au soleil ?

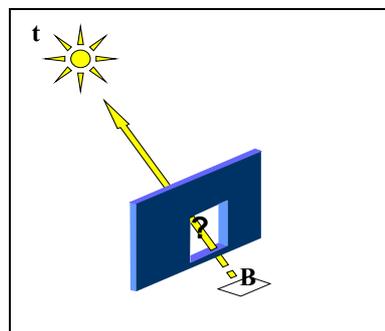


Figure 1-5 : Simulation inverse de l'ensoleillement.
Comment dimensionner l'ouverture pour ensoleiller la surface B à l'instant t ?

Sur ces schémas il est question uniquement d'instantanés et non de périodes d'ensoleillement. Nous verrons plus loin que l'intérêt de la simulation inverse est réel lorsqu'elle s'attache à simuler des contraintes temporelles (journée, mois, saisons, etc.) afin de mieux coller aux exigences des usagers, concepteurs, ou commanditaires de projets architecturaux. Nous pourrions presque parler de simulation 4D dans ce cas précis (intégration d'un phénomène physique dans le temps). Cependant, il est parfois très utile à l'architecte de simuler de manière inverse l'ensoleillement souhaité en un point ou une surface, même sur une coupe en 2D et pour un instant donné, juste "*pour se donner une idée*". L'intérêt de la simulation inverse 2D n'est donc pas négligeable. Bien au contraire, puisqu'elle est facilement abordable et parfois pratiquée sans être répertoriée comme telle.

C'est précisément un état de l'art des méthodes et outils de simulation inverse 2D de l'ensoleillement que nous proposons dans la section suivante.

1.1.1 Simulation inverse 2D de l'ensoleillement

La littérature française et internationale semble peu traiter du détournement des fonctionnalités d'outils de simulation directe 2D de l'ensoleillement. Nous n'avons pas trouvé d'ouvrage relatant l'observation de telles pratiques dans les agences d'architecture ou d'urbanisme, ou même dans les écoles d'architecture. Pourtant ces pratiques existent. Nous en avons retrouvé la trace dans des cours d'enseignants en architecture et dans des publications de travaux de quelques laboratoires de recherche internationaux.

Par simulation inverse 2D de l'ensoleillement nous entendons, toute méthode ou outil de simulation de l'ensoleillement utilisés en plan, coupe ou élévation, et proposant de répondre à un questionnement solaire du type : "comment dimensionner telle ouverture ou telle protection solaire pour qu'elle soit efficace et optimale à telle date ou durant telle période de l'année ?" Il s'agit souvent d'outils matériels simples (diagrammes papier, abaques...), de petits programmes informatiques donnant des indications sommaires pour chaque date étudiée (azimut et hauteur du soleil – permettant de dimensionner la profondeur d'un brise-soleil par exemple), ou encore des programmes plus sophistiqués capable d'optimiser généralement une protection solaire en coupe puis en plan mais jamais en 3D.

Afin de fixer les esprits sur la méthode sous-jacente à tous les outils intéressant notre propos, nous exposons dans les deux schémas suivants (Figure 1-6 et Figure 1-7), une illustration de la démarche de simulation de l'ensoleillement 2D, directe puis inverse.

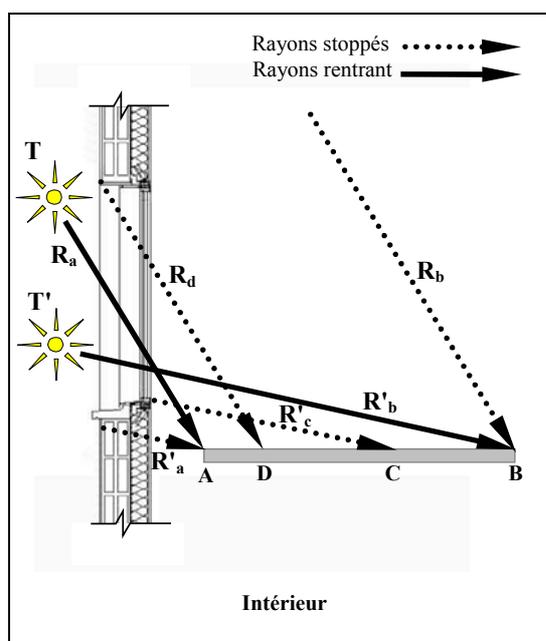


Figure 1-6 : Simulation directe de l'ensoleillement d'un plan de travail (AB) à travers une fenêtre par tracé de rayons solaires en coupe (sud-nord). L'architecte dessine en vraie grandeur l'inclinaison des rayons pour les deux solstices de l'année (T et T') à 12 h et pour les deux points extrêmes du plan de travail (A et B) puis pour deux rayons intermédiaires (R_c tangent à l'huissierie basse le 21 décembre – T' – et R_d tangent au linteau le 21 juin – T –). L'architecte en conclut que le plan de travail n'est pas ensoleillé le 21 décembre entre A et C (plutôt navrant) et entre D et B le 21 juin (plutôt confortable), tandis qu'il l'est entre A et D le 21 juin (préjudiciable) et entre C et B le 21 décembre (bénéfique).

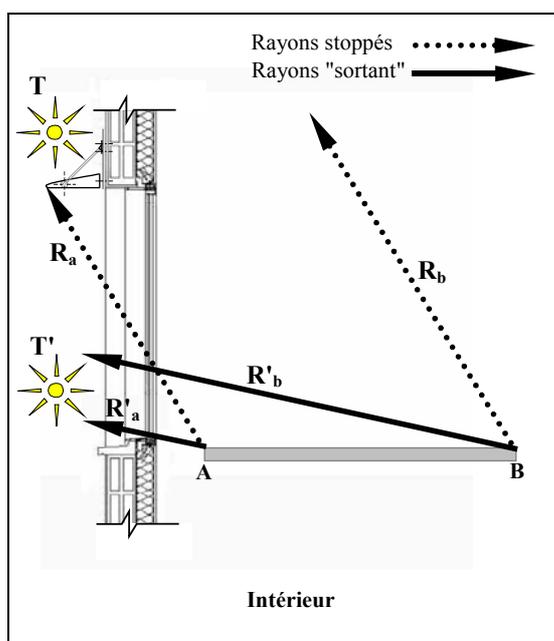


Figure 1-7 : Simulation inverse de l'ensoleillement du plan de travail (AB) afin de redimensionner la fenêtre (coupe sud-nord). Dans un premier temps l'architecte dessine en vraie grandeur l'inclinaison des rayons pour les deux solstices de l'année (T et T') à 12 h et pour les deux points extrêmes du plan de travail uniquement. Dans un second temps, il redimensionne la fenêtre de manière idéale (optimisation du coût, des déperditions thermiques l'hiver, etc.) et dimensionne un brise-soleil (optimisé en taille ici). Pour cela, l'architecte s'applique à ce que les rayons solaires "partant" de A (R_a et R'_a) soient tangents à l'extrémité du brise-soleil et à l'huissierie basse de la fenêtre. La fenêtre ainsi redimensionnée répond donc à la contrainte suivante : "ensoleiller le plan de travail au solstice d'hiver et le protéger du soleil au solstice d'été".

Les deux figures s'intéressent à deux dates clés de l'année solaire : le solstice d'été (21 juin) et le solstice d'hiver (21 décembre). Malgré le peu de réalisme qu'inspirent de telles périodes solaires limitées uniquement à ces deux journées dans l'année, l'intérêt d'une telle démarche est bien réel. En effet, durant deux semaines avant et après ces

deux solstices, la hauteur du soleil ne diffère de celle des solstices respectifs, que de moins d'un degré, alors qu'elle s'accélère de jour en jour après, pour atteindre une variation maximale d'un degré tous les trois jours, autour des équinoxes (21 septembre et 21 mars). A un degré près, la hauteur du soleil étant la même entre le 7 juin et le 6 juillet, nous pouvons donc affirmer que le brise-soleil de la Figure 1-7 dimensionné pour le 21 juin est aussi valable toute cette période (un mois !). L'intérêt de la démarche réside aussi dans le fait que les dates des deux solstices représentent les deux cas solaires extrêmes annuels, l'un en début d'été avec une symbolique forte de surchauffes solaires (d'où le dimensionnement de protections solaires), l'autre en début d'hiver avec un sentiment de manque d'apport solaire (d'où le dimensionnement d'ouvertures adaptées à la recherche de ces apports).

Les cas d'architectes réalisant des tracés d'ensoleillement de manière inverse (Figure 1-7) ne sont probablement pas isolés, puisque cette méthode est la seule qui permette de véritablement concevoir une scène architecturale, et non plus de simplement l'analyser (simulation directe). Cette méthode est fortement intuitive. Pourtant, les préoccupations solaires ne sont pas les premières préoccupations des concepteurs à en juger les publications de revues hebdomadaires d'architecture généralistes comme *Le Moniteur* ou même de revues bimestrielles spécialisées comme *Techniques et Architecture*. De ce fait, la pratique de l'approche inverse même en croquis 2D (plus lisible qu'en 3D dans une revue) est *in fine* inexistante. En effet, les revues d'architecture rapportent uniquement des croquis de simulation directe (cf. Figure 1-8 et Figure 1-9)⁹ qui ne correspondent qu'à une vérification en aval de la conception ou à une démonstration graphique des intentions.

De tels croquis tiennent plus de la communication experte (idéalement) que de la conception sous contraintes. Il s'agit plus pour le concepteur de justifier un dispositif par une expertise (parfois trompeuse ou fausse) que de concevoir à partir d'une contrainte solaire.

Tout étudiant en architecture devrait avoir à l'esprit ce fameux croquis de Le Corbusier (cf. Figure 1-10), représentant en coupe l'ensoleillement des logements d'une *Unité d'Habitation*, en été et en hiver (sous-entendu aux solstices).

⁹ Revue *Techniques et Architecture* n° 434, *Contrôle de l'environnement dans le projet*, 1997.

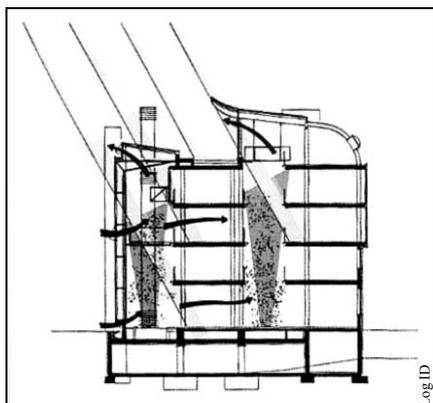


Figure 1-8 : Tracé d'ensevelissement de bureaux à Dresde (Allemagne) au solstice d'été – Log ID Architectes. La simulation directe semble avoir été utilisée pour prouver que le dispositif solaire (débord de toit et atrium) du bâtiment est efficace et non comme moyen de calculer au plus juste les dimensions de ce dispositif.

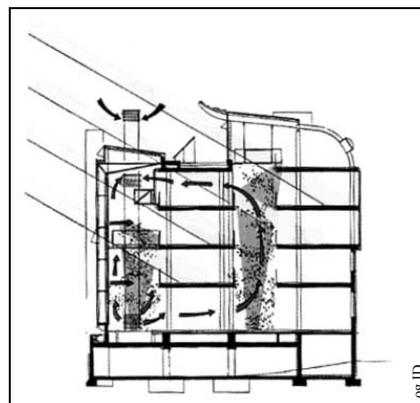


Figure 1-9 : La simulation solaire n'a probablement pas servi à concevoir le dispositif solaire. Aux équinoxes (ici) ou au solstice d'été (à gauche), les bureaux ne sont pas éclairés (ici) ou protégés (à gauche) de façon homogène, signe qu'une contrainte solaire n'a pas été clairement posée à la manière d'une simulation inverse.

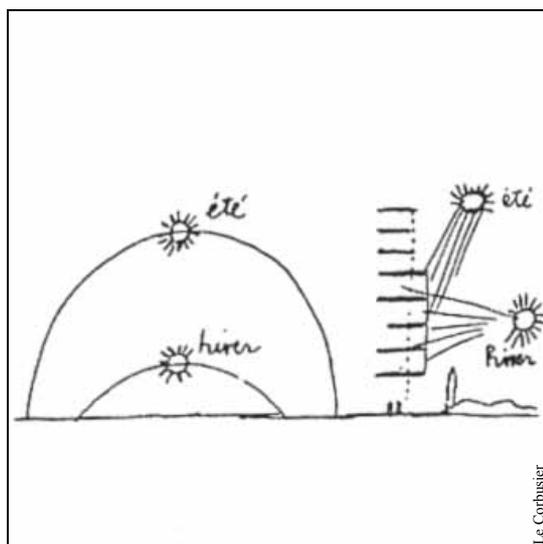


Figure 1-10 : Célèbre croquis de Le Corbusier justifiant le dimensionnement des brise-soleil ouest d'une *Unité d'Habitation*, aux deux solstices annuels. S'agirait-il d'une supercherie ? Evidemment aucun soleil quelle que soit la latitude du lieu ne peut éclairer les plafonds des logements comme semblent l'indiquer les rayons d'hiver. Outre ce détail lié à la symbolique du croquis, ce dernier est trompeur car il inverse les conclusions sur l'ensevelissement des loggias. En effet, les rayons solaires du solstice d'hiver n'arrivent pas à la perpendiculaire de la façade ouest sous les latitudes françaises, les rayons projetés sur cette coupe est-ouest (en fausse grandeur), se rapprochent de ceux que Le Corbusier indiquent en été (vers 13 h par exemple), tandis que les rayons solaires du solstice d'été arrivant à la perpendiculaire de la façade vers 16 h 30 ont une inclinaison d'environ 30° au-dessus de l'horizon et sont donc proches des rayons que l'architecte attribue au solstice d'hiver.

Or, derrière le charme indéniable de ce croquis, se cache une erreur d'appréciation qui n'est probablement pas fortuite puisque le célèbre architecte justifiait son prototype de "*loggia-brise-soleil*" par ce croquis de simulation directe 2D en aval de la conception de cette loggia. D'ailleurs, celle-ci semble davantage prendre appui sur un tracé régulateur harmonieux que sur une véritable résolution de contrainte solaire¹⁰.

Parmi les instruments de simulation inverse 2D de l'ensoleillement certains ne revendiquent pas cette approche. Ils sont utilisés de manière directe pour calculer l'ensoleillement d'une pièce ou d'une rue, en plan ou en coupe, mais peuvent être utilisés de manière inverse pour dimensionner des dispositifs solaires ou pour adapter l'ensoleillement en un point à partir de ses périodes solaires et de son environnement. Il s'agit de diagrammes solaires. Nous avons retenu ceux qui nous semblent les plus adaptés à une approche inverse 2D : le *Girasol*, le *Gnomon* et le *Diagramme Solaire Horizontal*. D'autres outils 2D peuvent être mis en œuvre selon l'approche inverse, même si leur usage se limite souvent à la simple optimisation de pare-soleil pour des fenêtres sur des façades verticales. Il s'agit essentiellement de maquettes d'outils numériques développés dans des laboratoires de recherche.

1.1.1.1 Le *Girasol*, le *Gnomon* et le *Diagramme Solaire Horizontal*

Ces trois diagrammes ont été implémentés ensemble dans un outil numérique complet appelé *Outils Solaires* (cf. Figure 1-11, Figure 1-12 et Figure 1-13), développé au Laboratoire Cerma dans le cadre du projet européen *Audience*. *Audience* est un projet du programme *Léonardo* d'auto-formation à distance intéressant les domaines de l'architecture et de l'environnement (solaire, sonore, thermique et aérodynamique). Le site Internet porteur du projet est hébergé sur le serveur du Laboratoire Cerma¹¹ qui est, entre autres partenaires, le réalisateur de ce projet.

Les trois diagrammes sont la version interactive des instruments existants. Le *Girasol* par exemple, est constitué, dans sa version matérielle, d'un disque transparent porteur de trajectoires solaires génériques vues de l'est vers l'ouest, et pivotant sur un axe passant par son centre et superposé à un diagramme générique stéréographique (depuis l'est) imprimé sur un support solide. La combinaison des deux diagrammes en fait un outil

¹⁰ Voir notamment l'article [Houpert 1999] consacré à l'analyse des propositions de dispositifs solaires de l'architecte Le Corbusier pour son Unité d'Habitation de Rezé près de Nantes

¹¹ Site *Audience* à l'adresse Internet <http://audience.cerma.archi.fr/index.html>

valable pour n'importe quelle latitude. Il suffit pour obtenir le diagramme d'une latitude donnée, d'aligner le curseur sur une des latitudes situées dans la partie inférieure du disque. Le *Girasol* indique pour tous les 21 des mois de l'année, et toutes les heures solaires de la journée, l'azimut et la hauteur du soleil. La version matérielle de l'outil fut développée en 1979 par le Laboratoire Cerma de l'Ecole d'Architecture de Nantes (France) [CRMAA 1979]. Sa version numérique (le *Girasol des Outils Solaires*) donne les mêmes résultats de manière interactive et plus précise¹². Un petit soleil apparaît sur le diagramme à l'intersection de l'heure et de la date sélectionnée dans un menu déroulant. Cette version autorise la sélection de n'importe quel jour de l'année (pas uniquement le 21 du mois) et donne une réponse à la minute de degré près (cf. Figure 1-11).

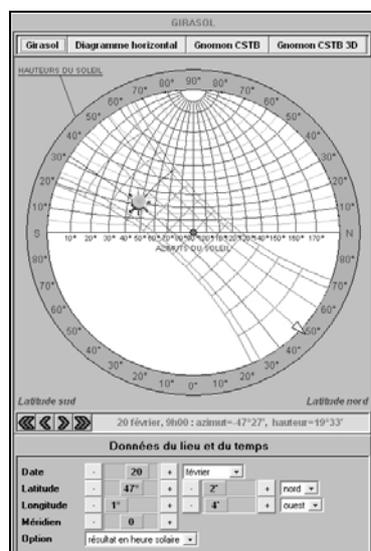


Figure 1-11 : Le *Girasol*. A 9 h (heure solaire) le 20 février, le soleil est orienté au sud-ouest (47°27' précisément) et sa hauteur est de 19°33'. Les flèches (et doubles flèches) de la partie commune aux trois outils permettent de modifier les minutes (ou l'heure choisie).

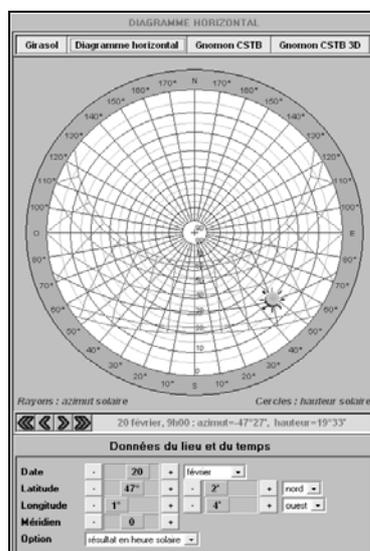


Figure 1-12 : Le *Diagramme Solaire Horizontal*. Autre type de projection pour un même résultat. Les trajectoires solaires sont vues en plan. L'azimut et la hauteur du soleil peuvent donc être lus directement sur le diagramme.

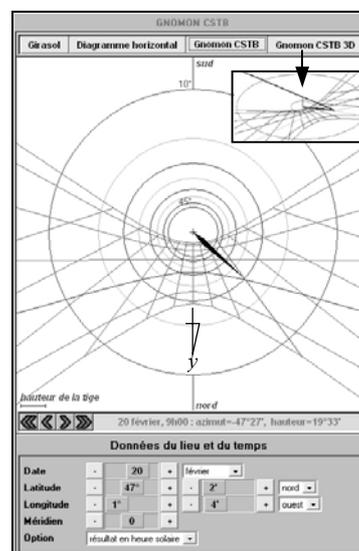


Figure 1-13 : Le *Gnomon*. La projection de l'extrémité du style (la tige du *Gnomon*) indique la date et l'heure de l'ombre. Le résultat numérique est donné à la seconde de degré près. L'encart représente le rayon solaire arrivant au sommet du style et se projetant sur le diagramme.

¹² L'enseignant-chercheur F. Miguet estime la précision du *Girasol* manuel (version matérielle de l'outil) à plus ou moins un degré [Miguet 2000].

Le *Diagramme Solaire Horizontal* (cf. Figure 1-12) est quant à lui une projection stéréographique des trajectoires solaires en plan, calculée pour la latitude sélectionnée et superposée à une projection en plan des azimuts et hauteurs génériques du soleil. Sa version interactive autorise la sélection de n'importe quel jour de l'année et donne en réponse l'azimut et la hauteur du soleil à la minute de degré près comme pour le *Girasol* numérique.

Enfin, le *Gnomon* ou *diagramme gnomonique* est une projection conique au sol des trajectoires solaires pour la latitude et la hauteur du style (tige verticale aussi appelée *Gnomon* – cf. encart de la Figure 1-13) choisies. Il correspond aux trajectoires de l'extrémité des ombres portées du style pour les 21 de chaque mois sur lesquelles sont portées les heures de la journée. Il peut donc aussi être utilisé comme cadran solaire pour lire l'heure solaire sur un plan parfaitement horizontal¹³.

Le *diagramme gnomonique* est généralement utilisé soit pour déterminer l'heure et la date de l'ombre d'un bâtiment en reportant en plan sur le diagramme une ombre proportionnelle à la hauteur du style, soit pour dessiner des ombres. Il est alors orienté de telle façon que l'axe y corresponde au nord du plan. Mais il peut aussi être utilisé de manière réversible en coupe, en partant d'un point donné que l'architecte veut ensoleiller (ou protéger du soleil), et en remontant dans la direction du sommet du style afin de vérifier qu'aucun obstacle ne vient intersecter ce rayon solaire "inverse" (ou qu'il est bien intersecté dans le cas d'une protection solaire). Evidemment si ces conditions ne sont pas satisfaites, l'architecte est amené à supprimer, redimensionner ou éloigner certains éléments du projet afin de conserver l'ensoleillement du point choisi. Il s'agit donc bien d'un travail de conception. Mais ce type de tracé solaire reste un travail en coupe 2D qui n'est parfois pas assez précis ou qui reste fastidieux pour satisfaire une contrainte sur une large période de l'année ou pour un ensemble de points à ensoleiller ou à protéger.

L'état de l'art actuel en la matière semble montrer que l'usage de ces outils est très minoritaire dans le milieu de l'enseignement de l'architecture à l'exception de quelques initiatives. Notons celle des enseignants-chercheurs C. Marenne et F. Miguet de l'Ecole d'Architecture de Nantes qui permet de former les étudiants à la simulation inverse 2D de l'ensoleillement à partir de la deuxième année d'études. Ils utilisent pour cela, un *diagramme gnomonique* dont ils inversent l'orientation (l'axe y correspond alors au sud

¹³ Voir à ce propos, le site Internet <http://www.cadrans-solaires.org> et le logiciel *Shadows* développé par F. Blateyron permettant de tracer des cadrans solaires horizontaux pour toutes les latitudes du globe [Blateyron 2000].

et non plus au nord du plan – cf. Figure 1-14). Un tel tracé solaire inverse permet de lire rapidement en plan, quelles sont les périodes d'ensoleillement du point choisi. Ces périodes sont représentées par les zones non grisées du diagramme. Les périodes grisées représentent donc les masques solaires des bâtiments environnants pour le point choisi. La simulation peut donc servir à redimensionner un des "bâtiments masques" par simple report des limites du masque en plan, sur l'élévation.

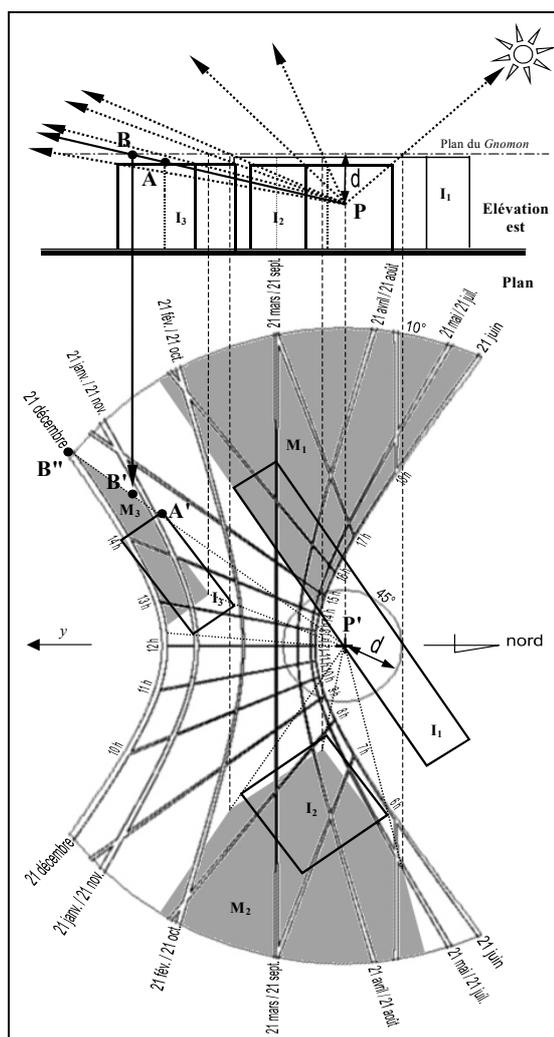


Figure 1-14 : Utilisation inverse de *Gnomon* pour tracer les périodes d'ensoleillement en plan d'un point P situé sur la façade d'une barre d'immeuble (I_1). Deux autres immeubles (I_2 et I_3) lui font face et masquent une partie de la voûte céleste (masques solaires M_2 et M_3 grisés sur le diagramme). Pour calculer ces masques, les étudiants en architecture tracent à partir du point P (sommet du style) en élévation (P' en plan) les rayons solaires passant par les sommets de I_2 et de I_3 , par exemple le point A (A' en plan). Ils prolongent [PA] jusqu'au plan du *Gnomon* pour trouver le point B puis le point B' en plan. Cette même méthode est répétée pour trouver les limites des autres masques solaires.

Sur la figure précédente, cela revient à définir un nouveau point B' en plan (B'' rejeté à la limite du diagramme) qui satisfera une contrainte solaire du type : "ensoleiller le point P en hiver" puis de reporter le nouveau point B en élévation, et enfin, de dessiner la hauteur de l'immeuble I₃ grâce au nouveau point A à la verticale de A' qui reste fixe.

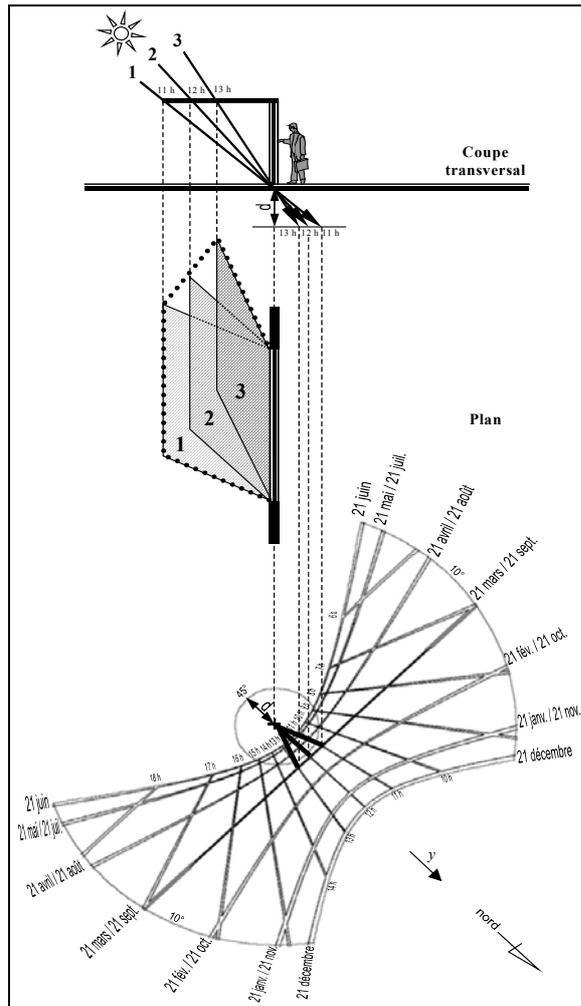


Figure 1-15 : Simulation inverse 2D d'un brise-soleil sud-est efficace du 21 mars au 21 septembre entre 11 h et 13 h. La hauteur d du style du *Gnomon* et l'inclinaison apparente des rayons solaires des équinoxes à 11 h, 12 h et 13 h sont reportées en élévation nord-est. Suivant la direction des ombres en plan, trois brise-soleil correspondant aux trois heures de contrainte sont dessinés en plan. *In fine*, la solution à la contrainte est le polygone englobant les trois brise-soleil (en pointillés gras).

L'utilisation du *Gnomon* dans sa direction habituelle (axe y indiquant le nord) permet de résoudre d'autres types de problèmes solaires inverses, tels que le dimensionnement d'un

brise-soleil par exemple. La méthode développée par C. Marenne [Marenne 2000] dans son cours d'ensevelissement aux étudiants de deuxième année à l'École d'Architecture de Nantes montre combien la simulation inverse 2D peut être simple et efficace (cf. Figure 1-15).

Il est dit aux étudiants de procéder à un tracé d'ensevelissement d'un brise-soleil minimum, efficace la moitié de l'année, du 21 mars au 21 septembre pour trois heures consécutives (11 h, 12 h et 13 h). Les étudiants n'ont pas de méthode pour tracer immédiatement la forme optimale d'un tel brise-soleil. Par contre, ils savent comment procéder pour dessiner un brise-soleil efficace à une heure précise. Alors ils en dessinent un pour chaque heure de contrainte. Si au final, cela ne leur permet pas de délimiter en plan le polygone du brise-soleil total, ils peuvent en dessiner un pour chaque demi-heure, etc. Finalement, la réalisation du tracé ne demande que cinq minutes. La précision de la solution est proportionnelle à l'échelle du dessin et dépend du soin de l'étudiant, mais le résultat est toujours exploitable et parlant. Il s'agit donc bien d'un travail de conception à partir d'une contrainte solaire et non plus d'une simple analyse de l'ensevelissement d'un lieu.

Dans l'exemple d'exercice suivant (cf. Figure 1-16) proposé par C. Marenne aux étudiants en architecture, l'intention inverse est aussi présente. Il s'agit de définir les périodes d'ensevelissement d'une façade d'une rue "canyon". Le simple fait de tracer des périodes d'ensevelissement sur une projection de la voûte solaire ne peut pas être assimilé à de la simulation inverse de l'ensevelissement. Mais sur un *diagramme gnomonique*, il est très facile de délimiter une période solaire de contrainte et de trouver en élévation, la hauteur idéale que devra respecter le bâtiment opposé à la façade étudiée pour satisfaire la contrainte.

Ainsi, comme nous le voyons sur la Figure 1-16, le tracé des périodes d'ensevelissement d'un point de la façade (ici l'appui de fenêtre du premier étage) est extrêmement simple à réaliser et sa lecture en est tout aussi simple. Les périodes grisées correspondent à deux masques. Le masque M_1 est le propre masque de la façade. Cela signifie qu'en élévation, lorsque le soleil passe à droite de la verticale de la façade, en plan, toutes les périodes correspondant à cette partie de droite sont grisées (la façade et donc le point choisi, ne sont plus ensevelis). Le masque M_2 , quant à lui, dépend de l'inclinaison du rayon oblique (sur l'élévation) qui pivote autour du point P. La partie non grisée du diagramme correspond donc aux périodes d'ensevelissement du point. En fait, la "largeur" de cette bande dépend de l'inclinaison du rayon solaire passant par le faîtage du bâtiment d'en face et inversement.

En définissant une contrainte d'ensoleillement plus grande (bande de la période d'ensoleillement plus "large"), il est donc possible de dimensionner la hauteur des bâtiments voisins ou la largeur de la rue pour que la façade étudiée soit ensoleillée comme souhaité.

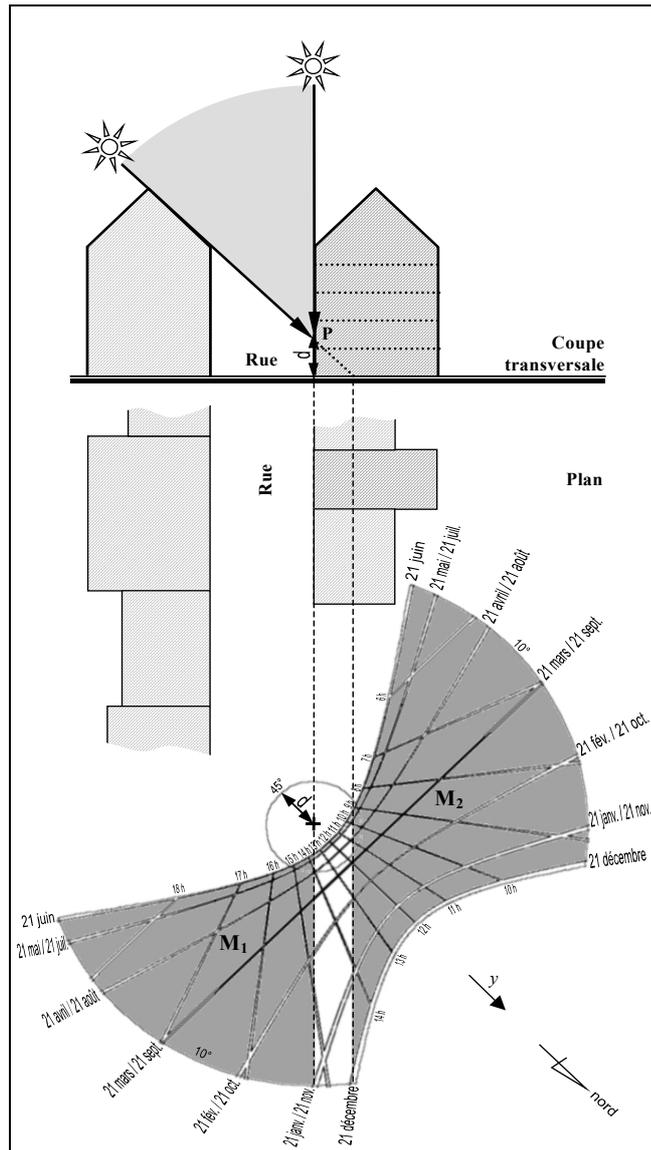


Figure 1-16 : Etude des périodes d'ensoleillement d'un point d'une façade (ici la fenêtre du 1^{er} étage) à partir d'un tracé solaire en coupe, rapporté en plan sur un *Gnomon*. Les zones grisées correspondent aux périodes où le point P (sommet du style de hauteur d) n'est pas ensoleillé. M_1 et M_2 correspondent respectivement aux masques solaires de la façade elle-même et de la façade qui lui fait face.

Nous le voyons grâce aux trois figures précédemment présentées, les tracés solaires réalisés avec le *Gnomon*, permettent aux étudiants en architecture d'avoir une véritable maîtrise des éléments physiques dans le temps pour des points d'une scène architecturale ou urbaine. Comme ce type de projection conique du *diagramme gnomonique* permet de respecter la linéarité des lignes verticales et horizontales (pas de déformation courbe), il est indéniable que le *Gnomon* est le diagramme solaire le plus adapté à la simulation inverse en 2D.

Si nous extrapolons les trois méthodes précédentes à l'utilisation du *Diagramme Solaire Horizontal* et au *Girasol*, il est possible d'utiliser ces outils de simulation 2D dans une approche de simulation inverse, puisqu'il est aussi possible de tracer des périodes d'ensoleillement et de relever des azimuts et hauteurs des rayons solaires à partir d'un plan puis d'une élévation. Même si en projection les droites horizontales des bâtiments sont transformées en courbes sur ces deux diagrammes, il est relativement aisé de définir des masques solaires sur ces derniers en suivant les courbes tous les 10°. Comme les autres diagrammes, le *Diagramme Solaire Horizontal* et le *Girasol* même dans leur version numérique, ne dessinent pas directement les ombres d'une volumétrie. Ils peuvent donc facilement être utilisés dans une démarche inverse de conception. Si un concepteur cherche à ensoleiller un point donné d'une scène à la date T (ou plusieurs dates T₁, T₂, T₃...), il peut, utilisant un de ces outils, relever la hauteur et l'azimut du soleil à la date T (ou aux dates T₁, T₂, T₃...) afin de supprimer les parties de la scène ou de l'environnement qui gênent l'ensoleillement du point.

L'enseignante-chercheuse P. Miller-Chagas [Miller-Chagas 1985] enseigne aux étudiants de l'Ecole d'Architecture de Strasbourg (France) le tracé de périodes d'ensoleillement d'un point à partir d'un diagramme solaire horizontal et cette approche mène les étudiants à concevoir des éléments architecturaux ou urbains à partir de ces périodes. La limite entre simulation directe et inverse est à ce stade de la démarche, facile à franchir. P. Miller-Chagas utilise l'*Horizontoscope*¹⁴ pour définir les périodes d'ensoleillement sur un site existant. Le prototype de l'Ecole d'Architecture de Strasbourg est appelé *Vidélios*¹⁵ (cf. Figure 1-17) et est équipé d'un appareil photographique *Polaroid* qui permet des prises de vues rapidement exploitables. Les deux instruments permettent d'obtenir pour une latitude donnée, une image des reflets des masques environnants sur une portion d'hémisphère transparent placé horizontalement. Sous cet hémisphère est placé le *diagramme solaire horizontal* correspondant à la latitude du lieu. Pour être lisibles, les masques doivent être vus

¹⁴ Voir à ce propos la description que fait F. Miguet [Miguet 2000] de l'*Horizontoscope* de F. Tonne.

¹⁵ Voir l'utilisation du *Vidélios* par l'auteur sur le site d'Euralille à Lille (France) en 1997 [Houper 1997].

depuis le zénith de l'hémisphère. Il est alors possible de noter les masques solaires existants *in situ* pour autant de points de vue que nécessaire. A ce propos, le Nord-Américain V. Olgyay présente dans son ouvrage *Design with climate* [Olgyay 1963] le *Globoscope* qui est aussi un *Horizontoscope*. Ces appareils simples d'utilisation permettent de qualifier l'ensoleillement d'un lieu sur l'ensemble de l'année puisque les masques solaires obtenus sont superposés au diagramme solaire de la latitude du lieu. Ainsi l'architecte peut y lire les périodes d'ensoleillement ou d'ombrage du lieu et repérer de manière assez précise les azimuts et les hauteurs d'ouvertures ou de masques solaires existants ou à réaliser. Comme pour l'utilisation inverse du *Gnomon*, il est possible de dimensionner des édifices ou dispositifs à partir d'une contrainte solaire correspondant à une période délimitée en 2D sur les diagrammes.

F. Miguet nous apprend à ce sujet, dans sa thèse de Doctorat [Miguet 2000], que l'*Horizontoscope* est peu utilisé en architecture mais qu'il l'est en sylviculture *in situ* pour "estimer simplement et avec une bonne précision [la période d'ensoleillement des jeunes plants de mai et juin], mais aussi pour programmer et positionner l'ouverture de trouées de régénération". Notons que d'un point de vue rigoureusement physique, il s'agit d'un outil de simulation directe. Cette dernière peut-être réversible. Ainsi, au lieu d'illustrer ce que "voit" le soleil sous forme d'une image d'ensoleillement d'une scène (avec en noir ce qui n'est pas vu depuis un point qui est le soleil), le diagramme représente ce que l'on voit de la voûte céleste depuis un point de vue choisi (avec en noir les périodes de l'année où le soleil n'est pas vu depuis le point d'observation – cf. Figure 1-18 et Figure 1-19). Ce type d'image n'est pourtant jamais utilisé comme une illustration compréhensible par tout un chacun. L'outil nécessite un travail d'aller-retour entre analyse directe et exploitation inverse des masques et périodes solaires.

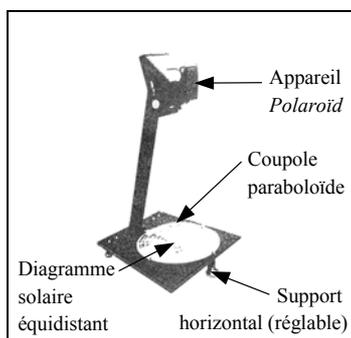


Figure 1-17 : Le *Vidélios* permet le repérage immédiat des périodes solaires d'un site.

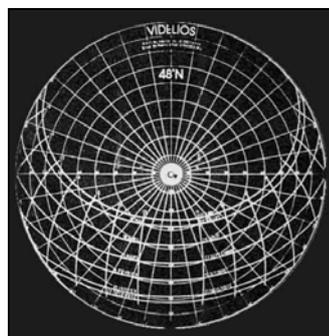


Figure 1-18 : *Diagramme solaire horizontal* équidistant utilisé avec le *Vidélios*

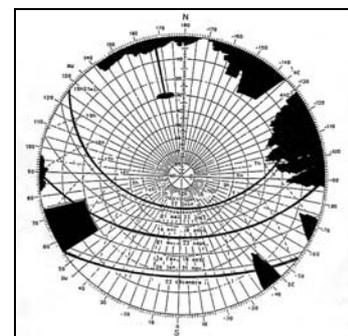


Figure 1-19 : Exemple de masques solaires réalisé par le *Vidélios* sur le site d'Euralille

On pourrait aussi imaginer apporter une maquette solide d'un projet à une échelle de $1/n$ et de la placer *in situ* à la distance d/n du *Vidélios*, si la distance réelle du projet devait être d . Ainsi, de manière interactive (en bougeant la maquette), le concepteur pourrait voir en direct *in situ*, l'influence du projet sur le site.

1.1.1.2 Les logiciels de simulation 2D de l'ensoleillement, issus de la recherche scientifique

Parmi les logiciels issus de la recherche scientifique, certains sont très aboutis puisqu'ils sont disponibles depuis quelques années déjà et téléchargeables depuis le site Internet des laboratoires qui les ont développés. C'est le cas du logiciel *Shading Analyser* développé à l'Université de Californie du Sud (MBS Laboratory – Los Angeles, USA) [Schiler et Tripathi 2001 ; USC 2000]. Le logiciel comporte une partie didactique très bien conçue qui explique les bases de l'ensoleillement dans un milieu architectural ou urbain, sous forme de petites séquences vidéo. Les notions d'azimut, de hauteur du soleil, de masques solaires, de trajectoires solaires, etc. sont abordées dans cette partie. Une seconde partie permet de localiser le site, tandis que dans la dernière partie, grâce à quatre fenêtres de rendu, le modelleur intégré à *Shading Analyser* permet de concevoir une scène de volumétries simples en 3D à partir de cinq primitives informatiques ou d'importer des volumétries au format .dxf. Dans la dernière fenêtre de rendu se trouve un diagramme solaire horizontal équidistant (cf. Figure 1-20, Figure 1-21 et Figure 1-22). Ce diagramme est calculé pour une latitude ou une ville choisie.

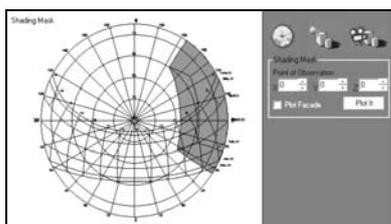


Figure 1-20 : Diagramme solaire horizontal de l'interface *Shading Analyser*. Les volumes dessinés dans les autres fenêtres du logiciel sont projetés sous forme de masques sur le diagramme, autour du point central d'observation.

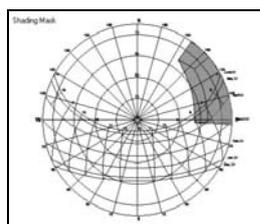


Figure 1-21 : Les masques réagissent en direct aux déplacements des éléments de la scène. Interactivement, le concepteur peut "éloigner" le masque d'un élément gênant.

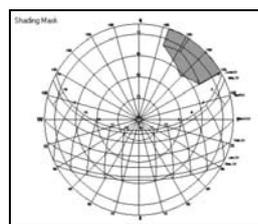


Figure 1-22 : *In fine*, l'élément gênant n'a plus d'incidence sur les périodes d'ensoleillement du point d'observation¹⁶.

¹⁶ Les périodes d'ensoleillement pour un point d'une scène peuvent aussi être calculées par le logiciel *Solène* développé par le Laboratoire Cerma de l'Ecole d'Architecture de Nantes même si la démarche n'est pas interactive [Groleau et Marenne 1991].

L'intérêt du logiciel est de calculer les masques solaires sur ce diagramme 2D de manière interactive. Ainsi lorsque le concepteur bouge les volumétries de la scène en élévation ou en plan, les masques évoluent en direct pour un point de vue choisi. Il est donc possible de choisir une période solaire et de concevoir une scène répondant à une contrainte solaire en observant l'incidence des volumes sur le diagramme en 2D à la manière d'une simulation inverse interactive de l'ensoleillement.

Les outils présentés dans les paragraphes suivants restent des maquettes informatiques dont les résultats scientifiques ont fait l'objet de publications internationales dans des congrès ou revues de recherche sur les paramètres physiques dans les constructions.

Ainsi, dans leur article intitulé *A practical tool for sizing optimal shading devices*, [Jorge, Puigdomènech et Cusido 1993] de l'Université Polytechnique de Catalogne (UPC – Espagne) présentent un outil informatique capable de calculer les dimensions adéquates d'un brise-soleil accolé à une façade pour des latitudes méditerranéennes (35° à 50° nord). L'outil se base sur le rayonnement incident transmis à travers une ouverture ainsi que sur une base de données climatiques. Les limites d'un tel outil sont de n'offrir qu'un dimensionnement en coupe mais aussi de ne pas proposer de dimensionnement d'ouvertures. Les résultats sont uniquement des protections solaires accolées à la façade.

Un autre outil numérique permet de calculer des masques solaires à partir d'une contrainte énoncée. Il s'agit du logiciel *Shading Mask* développé à Los Angeles par l'Université de Californie du Sud (USC – USA) [Setiadarma 2002]. Le logiciel est notamment présenté dans l'article suivant : *Shading Mask : a teaching tool for sun shading devices*¹⁷ [Kensek *et al.* 1996]. L'outil est didactique, génère des diagrammes solaires permettant aux concepteurs d'auvents de calculer leur masque solaire, et fournit des exemples de bâtiments contemporains. Le logiciel se veut accessible aux étudiants, architectes et designers.

Dans leur article *New Educational Software for Teaching the Sunpath Diagram and Shading Mask Protractor* [Oh *et al.* 1997], les deux auteurs J. K. W. Oh et J. S. Haberl de l'Université A&M du Texas (USA) présentent un outil de dimensionnement de brise-soleil à partir de diagrammes solaires équidistants et des protections solaires développées par Olgyay dans les années 1950.

¹⁷ Voir aussi le site Internet de l'USC et la présentation de *Schading Mask* à l'adresse http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/papers/ecs/96_aseamask/ases96mask.html.

L'utilisation du logiciel se fait dans le cadre de cours avec les étudiants de l'Université A&M. Selon les auteurs, l'outil semble simple d'emploi puisqu'il n'autorise que des périodes solaires présélectionnées : du 21 du mois au 21 du mois suivant.

Plusieurs de ces périodes peuvent être sélectionnées pour entrer une saison entière par exemple. La symétrie des périodes solaires est rappelée sur l'interface puisque pour un mois sélectionné, son symétrique par rapport aux solstices est d'office co-sélectionné (par exemple, période d'ombre : 21 avril – 21 mai, 21 juillet – 21 août). L'intérêt de ce rappel est didactiquement très efficace.

Pour finir sur l'état de l'art de la simulation inverse 2D de l'ensoleillement, nous présentons la recherche de [Izard 1987] du Groupe ABC de l'Ecole d'Architecture de Marseille (France). J-L Izard propose de calculer l'affaiblissement énergétique d'une fenêtre dû à un masque. Pour ce faire, il utilise trois abaques types pour chacun des quatre masques architecturaux simples ("*casquette*", "*flanc*", "*loggia*" et "*vis-à-vis*") de profondeur unitaire (1 unité). L'ouverture étudiée doit être, soit carrée (1 unité x 1 unité), soit rectangulaire verticale ($\frac{1}{2}$ unité x 1 unité), soit rectangulaire horizontale (1 unité x $\frac{1}{2}$ unité). L'ouverture doit être orientée au sud. A chaque type d'ouverture correspond un abaque. Mais il est aussi possible de corriger les abaques afin de les adapter aux orientations ouest, sud-ouest, est et sud-est ainsi qu'à des profondeurs de masques de 1,5 unité ou $\frac{1}{2}$ unité. La lecture des abaques est réalisée en 2D. Elle est très simple puisqu'il suffit à l'utilisateur de dessiner la position des écrans simulés et de relever les "courbes iso-transmission" sur lesquelles s'arrêtent les extrémités de ces écrans. Comme le propose J-L Izard en conclusion de son article [Izard 1987], il semble possible d'utiliser de tels diagrammes de manière inverse afin de concevoir un masque d'après une contrainte solaire (ici, l'affaiblissement énergétique dû au masque). "*L'outil n'est plus alors seulement un outil de vérification de performance ou de calcul « après projet », mais un véritable « outil d'aide à la conception » en phase de « dimensionnement du projet »*" conclut-il.

1.1.2 Simulation inverse 3D de l'ensoleillement

Nous pouvons d'ores et déjà affirmer que la simulation inverse 3D de l'ensoleillement existe au moins depuis 1962, date à laquelle fut publié l'ouvrage de M. Twarowski, *Soleil et Architecture* [Twarowski 1962]. Les trois dimensions de l'espace sont prises en compte ainsi que la dimension temporelle. La troisième dimension de l'espace ne figure que grâce à des courbes de niveau. Il s'agirait donc plutôt de simulation inverse en 2D ½ (plan de la Figure 1-23). Cependant l'axonométrie de la Figure 1-24 montre bien le souci de M. Twarowski de visualiser en 3D l'empreinte des contraintes qu'il avait prises pour exemple.

1.1.2.1 Les méthodes graphiques

1.1.2.1.1 Les courbes de niveau solaires de M. Twarowski

Se basant sur la *Charte d'Athènes*¹⁸ qui préconise au moins deux heures de soleil par jour, le Polonais M. Twarowski démontre en dix lignes dans son ouvrage, que le temps d'ensoleillement de la façade, préconisé par ce texte fondateur de l'architecture moderne, n'a que peu de sens pour une fenêtre orientée à l'est dont l'angle d'ombrage (azimut des rayons solaires bloqués par les tableaux de fenêtres) est de 10° (exemple courant). L'auteur calcule qu'un enfant reçoit le soleil si la largeur de la zone intérieure ensoleillée est au moins de 50 cm, soit un déplacement apparent de l'azimut du soleil de 17° supplémentaires (ajouté au 10° de l'angle d'ombrage). Ainsi, l'auteur démontre qu'en hiver, l'angle d'ombrage de 10° équivaut à 43 minutes d'ensoleillement en moins et l'angle de 17° à 75 minutes d'ensoleillement en moins. Sur un total de deux heures d'ensoleillement (de 10 h à midi par exemple) cela représente seulement 120 mn - 43 mn - 75 mn, soit seulement 2 minutes d'ensoleillement !

Mais M. Twarowski ne s'est pas limité à travailler en 2D. Nous pouvons dire qu'il fut l'un des pionniers de la résolution de contraintes solaires en 3D. Il a même, dès 1962, intégré le temps dans ces contraintes puisqu'il propose de résoudre des problèmes solaires sur plusieurs heures de la journée. Les figures suivantes (Figure 1-23 et Figure 1-24) illustrent bien son propos.

¹⁸ [Le Corbusier 1957]

M. Twarowski appelle "*courbes de niveau solaires*" les courbes de niveau d'un relief fictif délimitant le volume restant libre de toute intervention de la part du concepteur. Le reste de la scène non inclus dans ce relief, doit être vierge de toute conception pour laisser passer les rayons solaires et satisfaire ainsi la contrainte solaire temporelle.

M. Twarowski propose aussi d'appliquer sa méthode à la recherche de l'éloignement d'un bâtiment de hauteur connue pour que celui-ci ne crée pas d'ombre portée sur une parcelle durant un laps de temps défini (cf. Figure 1-25). La méthode est aussi valable pour la recherche de la hauteur d'un bâtiment d'éloignement connu afin qu'il satisfasse la contrainte énoncée.

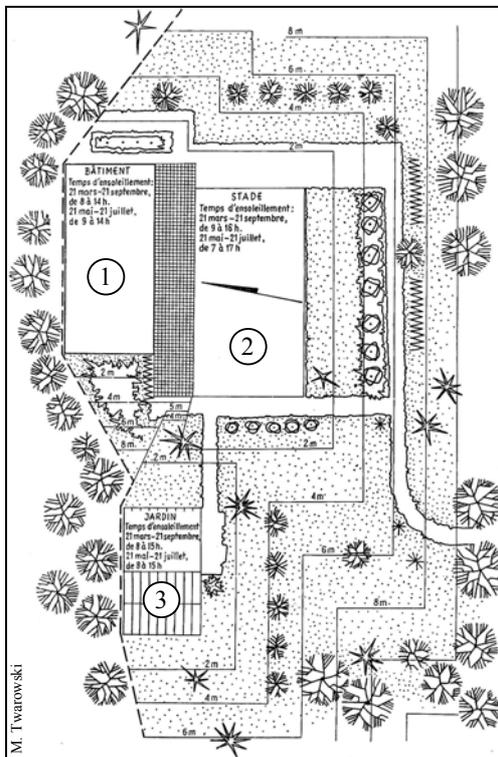


Figure 1-23 : Les "*courbes de niveau solaires*" de M. Twarowski. Simulation 2D ½ (plan + altitudes) correspondant aux contraintes solaires suivantes. "*Temps d'insolation*" du bâtiment (1) : 21 mars – 21 septembre : 8 h à 14 h, 21 mai – 21 juillet : 9 h à 14 h. "*Temps d'insolation*" du stade (2) : 21 mars – 21 septembre : 9 h à 16 h, 21 mai – 21 juillet : 7 h à 17 h. "*Temps d'insolation*" du jardin (3) : du 21 mars au 21 septembre : 8 h à 15 h.

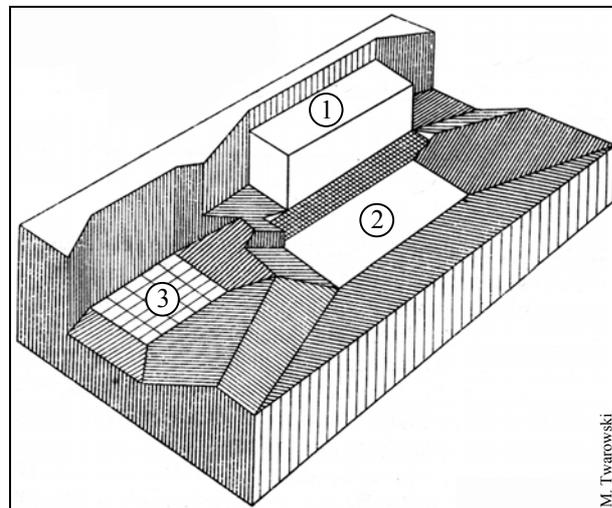


Figure 1-24 : Vue 3D du relief délimité par les "*courbes de niveau solaires*" des trois éléments de la scène : un bâtiment (1), un stade (2) et un jardin (3). Pour satisfaire les contraintes solaires, les éléments nouveaux à construire sur cette scène ne devront pas dépasser les altitudes données par les "*courbes de niveau solaires*".
M. Twarowski, 1962.

Cette méthode permet pour deux heures "symétriques" (par rapport au midi solaire – 10 h et 14 h par exemple), de définir le retrait d'un bâtiment à construire. Evidemment ce retrait dépend de la date de l'année à laquelle s'applique la contrainte (aux équinoxes pour la Figure 1-25). Il s'agit bien de modélisation sous contrainte solaire.

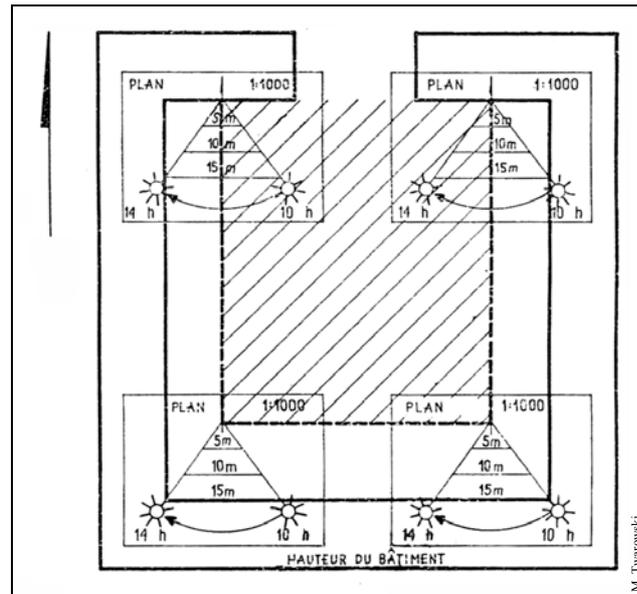


Figure 1-25 : Simulation inverse de l'ensoleillement d'une parcelle (zone hachurée) le 21 mars et le 21 septembre de 10 h à 14 h. Les altitudes des bâtiments pouvant être construits sont indiquées tous les cinq mètres aux équinoxes. L'éloignement du bâtiment est calculé pour une hauteur de bâtiment choisie (ici, cinq étages) grâce au *Diagramme Solaire MT* mis au point par M. Twarowski en 1962, dont on aperçoit une portion à chaque angle de la parcelle

Un an avant la traduction en français de l'ouvrage précédemment évoqué et devenu depuis une référence historique, les auteurs J. Dourgnon, P. Chauvel et L. Kokka [Dourgnon, Chauvel, et Kokka 1961] développaient des méthodes de tracé solaire développées par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) afin notamment de vulgariser les calculs de protections solaires dans le bâtiment.

1.1.2.1.2 Les tracés solaires de J. Dourgnon *et al.*

Ces tracés utilisent le *diagramme gnomonique* pour dimensionner des brise-soleil optimaux, autrement dit, qui répondent exactement à une contrainte solaire. Le *Gnomon*

est retourné et la volumétrie étudiée est placée de manière à ce que la hauteur du style corresponde avec l'arête de la fenêtre devant être protégée du soleil (arête [AB] sur la Figure 1-26). Ainsi, dans une approche inverse du rayonnement solaire, est calculée sur un plan horizontal (celui du *Gnomon*) la zone de protection. Elle est délimitée par un rayon qui partirait de A et qui balayerait la période solaire choisie sur le diagramme (ici, du 21 mai au 21 juillet). Sur la figure, la protection solaire apparaît noire et grisée. La méthode est appliquée une seconde fois pour le point D ([AD] étant la hauteur du style) ou par translation du premier brise-soleil de A vers C.

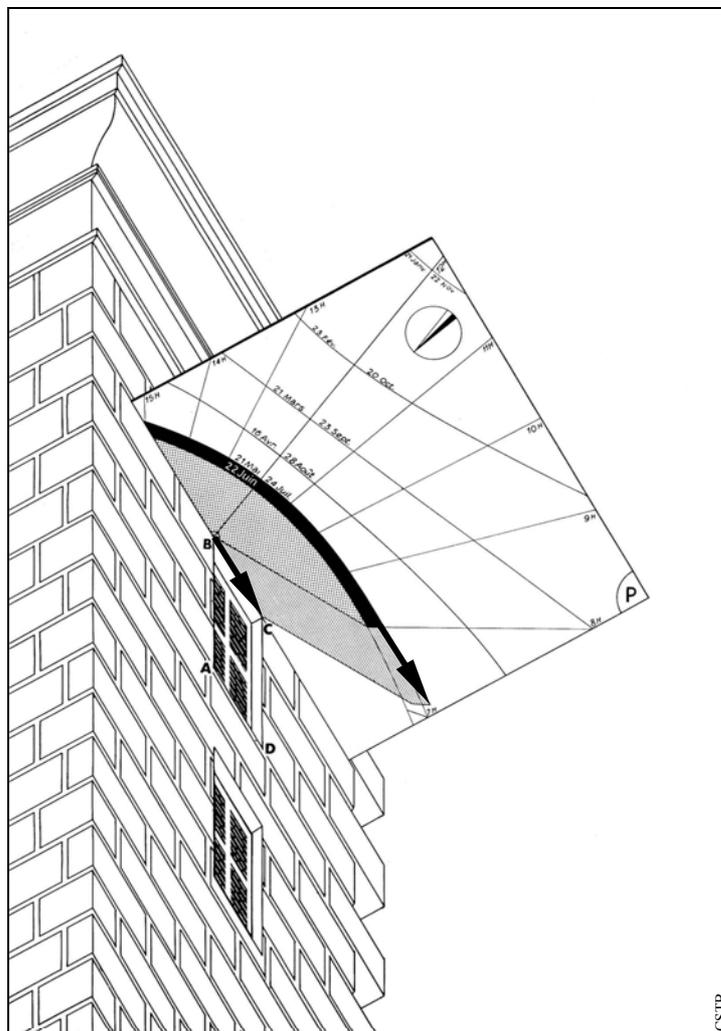


Figure 1-26 : Méthode du CSTB pour simuler en 3D la protection solaire (grisée) d'une fenêtre du 21 mai au 21 septembre de 8 h à 15 h. Application du *Gnomon* inversé, à l'échelle de la fenêtre et centré en B. [AB] est la hauteur du style du *Gnomon*. La forme du brise-soleil total est définie par translation du premier brise-soleil calculé pour A et centré en B, vers D et centré en C.

Les auteurs J. Dourgnon *et al.* proposent aussi une méthode pour calculer des brise-soleil en 3D composés de joues latérales verticales et d'un complément horizontal. L'illustration du résultat de cette méthode est la Figure 1-27.

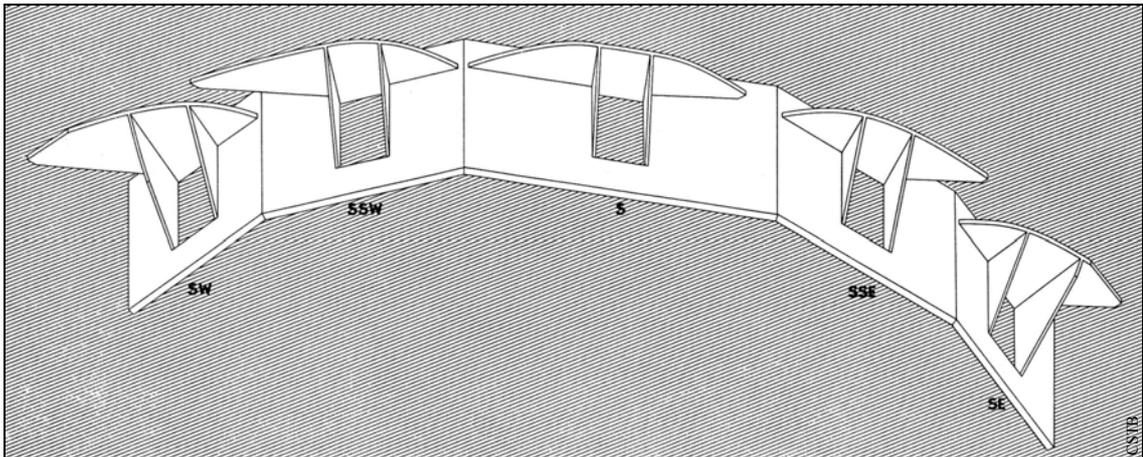


Figure 1-27 : Brise-soleil composés soit d'un unique élément horizontal, soit de l'addition des deux joues verticales à la partie horizontale comprise entre ces deux joues. Exemples réalisés pour cinq orientations : sud-est, sud-sud-est (Figure 1-26), sud, sud-sud-ouest et sud-ouest.

1.1.2.1.3 Les *enveloppes solaires* de R. L. Knowles

Cela fait maintenant plus de trente ans que R. L. Knowles [Knowles 1984 et 2003] a défini l'*enveloppe solaire* comme le volume de construction maximal d'un site tel qu'il n'empêche pas l'ensoleillement de l'environnement voisin pour une période donnée.

L'*enveloppe solaire* est "*conditionnée dans l'espace et le temps*" nous dit R. L. Knowles. Elle assure un accès solaire aux parcelles voisines du site qui la porte. Elle limite la taille de la construction sur un site de manière à ce que l'ombre de cette dernière se borne aux "*shadow fences*" (enclos d'ombre) ce qui revient à ne pas provoquer d'ombre au-delà des limites de propriété de la parcelle pour une période solaire définie. L'*enveloppe solaire* correspond donc à l'enveloppe maximum potentiellement constructible ne causant pas d'ombre au voisinage pour une période T. Augmenter la période T revient à diminuer l'enveloppe solaire. La contrainte solaire a alors plus d'incidence sur la constructibilité potentielle du site (cf. figures suivantes).

Mathématiquement, la contrainte de l'*enveloppe solaire* de la surface S se traduit durant la période solaire T, par des ombres potentielles (ou taches solaires potentielles dans le cas d'un accès au soleil recherché sur S) appartenant *totalem*ent à S. L'*enveloppe solaire* représente donc une contrainte solaire spécifique. Elle s'adapte très bien aux recherches des urbanistes sur des îlots urbains capables de ne pas provoquer d'ombre portée sur les parcelles voisines. De telles enveloppes sont interprétées par R. L. Knowles de manière très différente (cf. Figure 1-30 et Figure 1-32).

On pourrait aussi envisager son utilisation dans des aménagements de bâtiments devant recevoir le soleil sur une seule partie des lieux mais surtout pas sur une autre partie voisine (objets pouvant être détériorés par les rayons ultraviolets du soleil, risques d'éblouissement, etc.), ou encore en conception paysagère pour délimiter l'enveloppe maximale de certaines masses végétales pour que ces dernières ne provoquent pas d'ombre sur d'autres masses végétales ayant absolument besoin de soleil.

De telles enveloppes sont difficiles à concevoir "de tête", même pour un designer aguerri. Il est donc primordial de les visualiser en 3D.

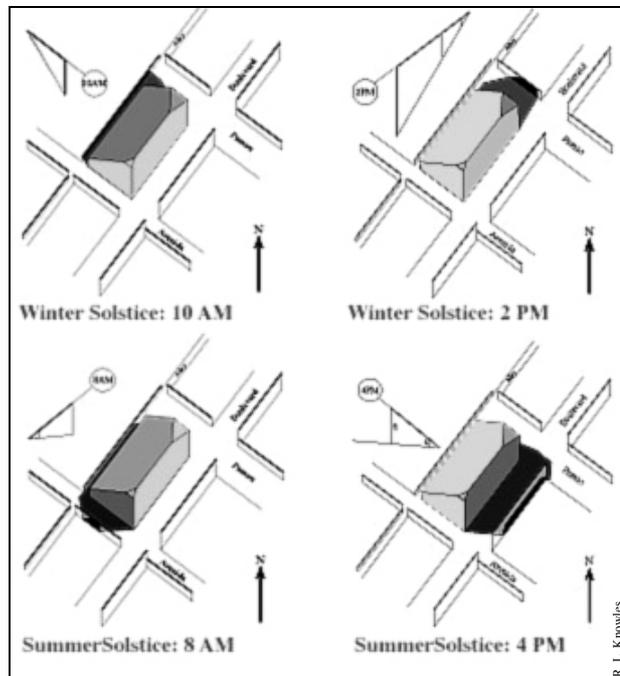


Figure 1-28 : Vues axonométriques de l'*enveloppe solaire* d'une parcelle urbaine. Ici, la simulation inverse de l'enveloppe est simulée pour les quatre dates qui délimitent la contrainte : le 21 décembre à 10 h, le 21 décembre à 14 h, le 21 juin à 8 h et le 21 juin à 16 h.

R. L Knowles illustre principalement l'utilisation des *enveloppes solaires* par des îlots urbains ou des lotissements stratifiés et ouverts sur le ciel (cf. de la Figure 1-29 à la Figure 1-32). Leurs formes sont réalistes et généreuses.

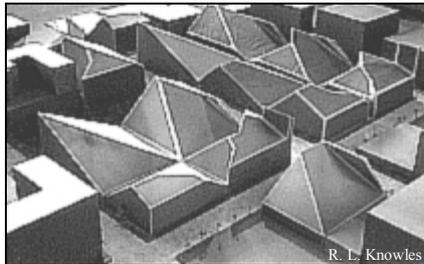


Figure 1-29 : *Enveloppes solaires* dans un environnement urbain

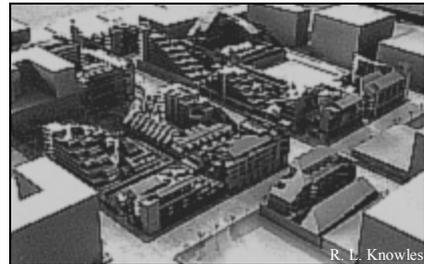


Figure 1-30 : Conception en milieu urbain, à partir d'*enveloppes solaires*

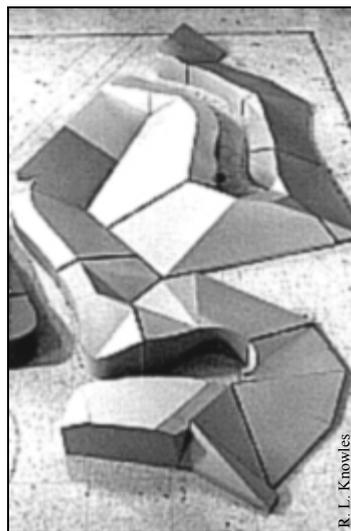


Figure 1-31 : *Enveloppes solaires* dans un environnement pavillonnaire



Figure 1-32 : Conception en milieu pavillonnaire, à partir d'*enveloppes solaires*

1.1.2.1.4 Les *pyramides solaires* de P. Achard et R. Gicquel

En 1986, P. Achard et R. Gicquel publient une méthode de calcul d'*enveloppes solaires* à partir d'un module qu'ils appellent *pyramide solaire* [Achard et Gicquel 1986].

Cet élément, qui peut être utilisé pour la construction 3D d'*enveloppes solaires*, est défini pour une hauteur de quatre niveaux d'habitations par exemple. Il a une base rectangulaire, une face sud verticale et trois faces inclinées selon la contrainte et la latitude du lieu (cf. Figure 1-33). Une telle pyramide, "balayant" une parcelle quelconque, décrit ce que R. L. Knowles appelle *enveloppe solaire* (cf. Figure 1-34).

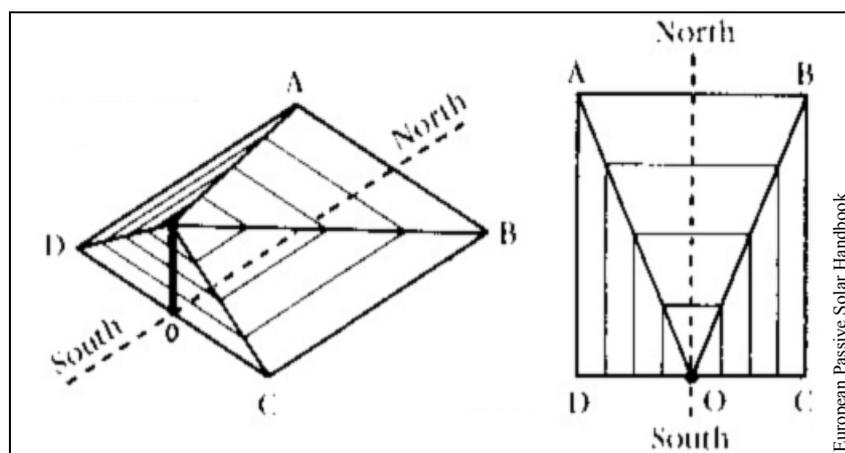


Figure 1-33 : *Pyramide solaire* en vue axonométrique (à gauche) et en plan (à droite)

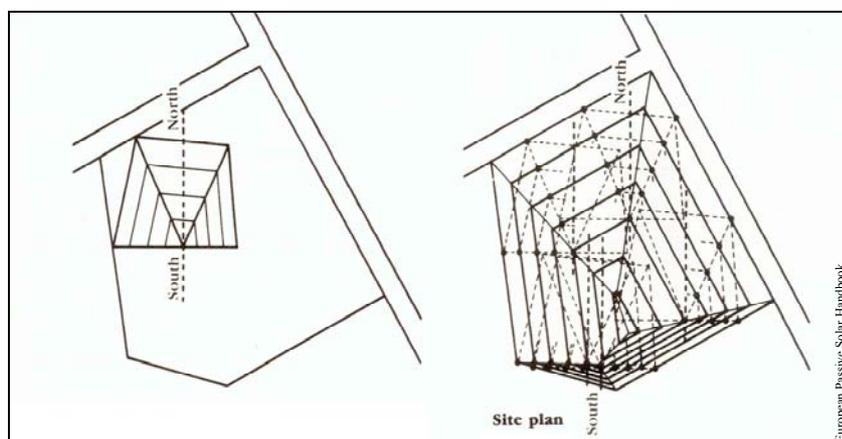


Figure 1-34 : A gauche : parcelle de la contrainte solaire et *pyramide solaire* lui correspondant. A droite : *enveloppe solaire* décrite par les translations successives d'une *pyramide solaire*.

Les auteurs proposent parallèlement à cette recherche une méthode de construction de "*perspectives solaires*" qui ne sont autres que des vues *Héliodon* d'une scène, autrement dit, des vues "depuis le soleil". La méthode permet d'obtenir rapidement une vue de la

scène depuis un point ayant l'azimut et la hauteur du soleil à la date et l'heure voulue, à partir d'un plan et d'une élévation ou encore plus rapidement à partir d'une axonométrie dont le point de vue correspond à l'azimut du soleil (cf. Figure 1-35). Cette méthode de tracé d'une vue solaire en 3D est facilement exploitable en conception puisqu'elle représente exactement ce que "voit" le soleil à un instant t . Cela signifie que pour cet instant t , le concepteur a sous les yeux exactement toutes les faces ensoleillées d'une scène. Les ombres ne sont pas visibles puisqu'elles sont dans l'alignement de la vue, derrière les faces ensoleillées. Ainsi, le concepteur peut identifier les faces d'une scène qui en cachent d'autres et qui doivent être ensoleillées à la date correspondant à la *perspective solaire* par exemple. C'est ce que nous montrons Figure 1-37. Il ne reste plus au concepteur qu'à éliminer les faces ou parties de faces gênant l'ensoleillement. Mais cette explication de l'utilisation des *perspectives solaires* en conception est notre interprétation. Revenons un instant sur la méthode de tracé proposée par P. Achard et R. Gicquel.

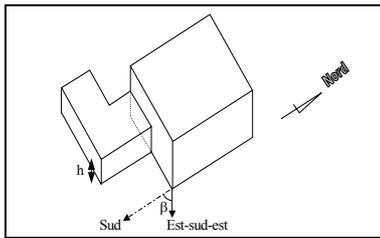


Figure 1-35 : Méthode de tracé d'une *perspective solaire* selon P. Achard et R. Gicquel à l'instant t . 1^{ère} étape : tracé axonométrique de la volumétrie étudiée, depuis l'azimut β correspondant à celui du soleil à l'instant t (21 février, 9 h, latitude 47° nord). h est la hauteur de la partie en L, en vraie grandeur.

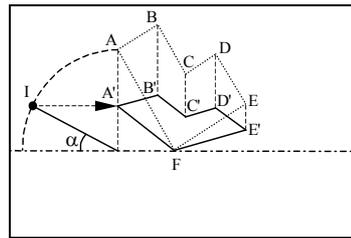


Figure 1-36 : Suite du tracé sur la volumétrie en L : les sommets sont rabattus un à un (ici A) à partir d'un quart de cercle où est portée la hauteur du soleil (α). A l'intersection de l'horizontale passant par le point intermédiaire I et la verticale passant par A, se trouve le nouveau sommet A'.

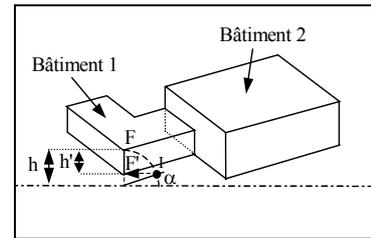


Figure 1-37 : Dernière étape : h en vraie grandeur est rapportée à sa grandeur apparente à l'instant t avec la méthode précédente. La hauteur du soleil α et le point intermédiaire I permettent d'obtenir F' et donc h' . Le bâtiment 1 puis le bâtiment 2 peuvent être dessinés dans leurs proportions "apparentes".

Nous abordions plus haut l'exploitation des *perspectives solaires* ou vues *Héliodon* permettant de délimiter des ouvertures ou des protections solaires. La Figure 1-37 représente exactement les faces d'une scène vues ou cachées "depuis le soleil" le 21 février à 9 h. Si la partie en pointillés de la façade sud du bâtiment 2 devait absolument être ensoleillée à cette date, l'architecte devrait concevoir une verrière sur la toiture du bâtiment 1 et une baie sur sa façade est, au minimum de la forme du parallélogramme en pointillés.

Sur un exemple plus simple, nous illustrons ici notre proposition de méthode que nous n'aurons plus l'occasion d'exposer par la suite. Elle trouve dans cette section toute sa place. C'est une méthode extrêmement rapide mais peu précise qui permet de concevoir en 3D et en croquis d'après l'impression papier d'une vue *Héliodon*, des ouvertures ou des protection solaires idéales pour une heure et une date précises. Pour cela nous avons utilisé le programme *Outils Solaires*¹⁹ déjà évoqué plus haut pour obtenir une vue *Héliodon* d'une volumétrie simple (parallélépipède dont seule la face sud est vitrée).

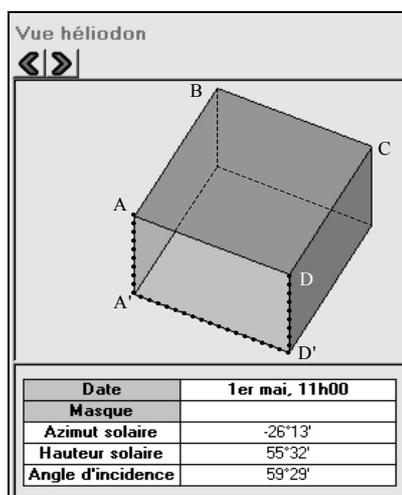


Figure 1-38 : Zone à protéger à 11 h le 1^{er} mai : AA'D'D' doit être un brise-soleil dans le prolongement de ABCD (appartenant à son plan et dans sa continuité). Ici, "vu du soleil" AA'D'D' semble superposée à la baie vitrée. Toujours "vu du soleil", quelque temps plus tard, ce brise-soleil ne protège plus que la moitié de la baie vitrée (cf. Figure 1-39).

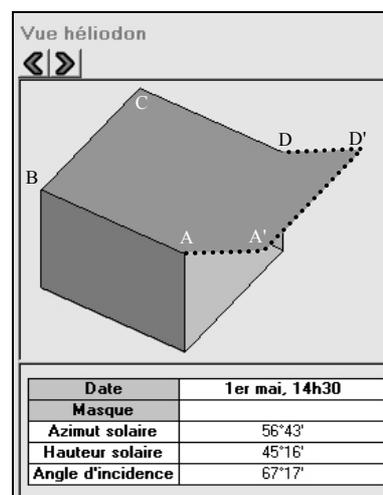


Figure 1-39 : La protection de l'ouverture à 11 h le 1^{er} mai grâce au brise-soleil ADD'A' (calculé avec la méthode précédente) ne permet pas une protection totale, ici, à 14 h 30 par exemple. En effet, "vu du soleil" à cette heure, la protection n'est plus efficace ; les rayons solaires éclairent toutes les faces visibles, donc une partie significative du sol de la volumétrie (en gris clair).

Cette méthode est abordable par tous les architectes puisqu'il n'y a même plus de notion d'azimut ou de hauteur solaire. L'outil choisi crée la vue *Héliodon* de l'instant simulé et l'architecte conçoit comme il l'entend des ouvertures et des écrans solaires à partir d'une impression sur papier ou calque. Les limites de cette méthode correspondent à son manque de précision et à l'impossibilité de simuler une période solaire autrement qu'en multipliant les vues et les croquis pour toutes les heures de cette période.

¹⁹ Nous aurions aussi pu utiliser le logiciel d'ensoleillement *Solène* cité plus avant [Groleau et Marenne 1991].

1.1.2.2 Les méthodes numériques

1.1.2.2.1 Les logiciels de dimensionnement de protection solaire

- Le logiciel *TRNSHD*

TRNSHD, développé par le Laboratoire d'Energie Solaire (SEL) de l'Université du Wisconsin à Madison (USA) [Hiller, Beckman et Mitchell 2000] permet de calculer l'ensoleillement intérieur d'un bâtiment mais aussi de dimensionner une protection solaire extérieure. Cette protection solaire se limite à trois types de brise-soleil horizontaux ou verticaux : les ailes latérales, l'auvent ou la loggia. Les éléments qui la composent sont des surfaces rectangulaires, ce qui laisse penser qu'ils ne sont pas complètement optimisés. La limite de l'outil est le fait que les protections solaires sont calculées uniquement pour des éléments accolés à la façade, ce qui représente des cas de figure courants mais pas généraux.

- Les brise-soleil de F. Arumi-Noé

F. Arumi-Noé de l'Ecole d'Architecture de Austin (Texas – USA) propose un algorithme [Arumi-Noé 1996] capable de générer des brise-soleil en forme d'entonnoir ("*funnel surface*"). La solution est séduisante car elle répond à une ou deux contraintes à la fois (fenêtre recevant le soleil en hiver et protégée l'été par exemple – cf. Figure 1-40) mais le reproche qu'on pourrait lui faire, tient de la forme en entonnoir elle-même.

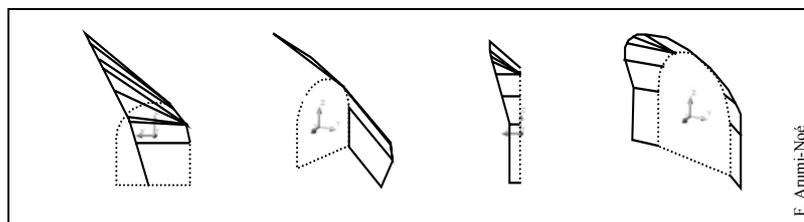


Figure 1-40 : Formes de brise-soleil en entonnoir conçus par F. Arumi-Noé (USA). La première et la troisième vue, et la deuxième et la dernière vue sont respectivement une élévation est et une axonométrie sud-est de deux fenêtres en arc plein cintre et de leur brise-soleil efficace l'été mais laissant rentrer le soleil l'hiver. Les deux vues de gauche correspondent à une fenêtre orientée à l'est tandis que les deux vues de droite représentent une fenêtre orientée au sud. Les solutions sont atypiques et difficilement imaginables de manière spontanée.

Cette forme est difficilement exploitable en architecture car elle représente des surfaces gauches qui interdisent l'emploi de certains matériaux tels que le bois brut par exemple. De plus, nous remarquons comme précédemment que les brise-soleil proposés sont toujours accolés à la façade, ce qui ne représente qu'une partie des brise-soleil conçus en architecture.

- Le logiciel *Winshade*

Winshade, développé par l'Université du Queensland (Australie) est présenté par l'australien C. Kabre en 1999 dans un article intitulé *Winshade : a computer design tool for solar control* [Kabre 1999]. Ce logiciel est organisé en trois modules (l'analyse climatique, la génération et l'optimisation de brise-soleil). Les informations dont a besoin le logiciel sont uniquement la latitude et la longitude du lieu, ainsi que l'orientation et les dimensions de la fenêtre à protéger. L'outil se base sur une analyse climatique du lieu pour générer et optimiser une protection solaire de la fenêtre (cf. notamment l'asymétrie des périodes de surchauffes solaires dans la journée et dans l'année, Figure 1-41). L'auteur précise que l'outil est interfacé avec le logiciel *AutoCAD*.

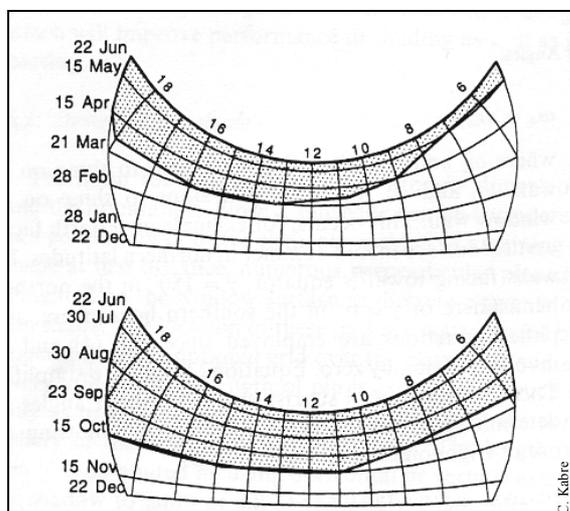


Figure 1-41 : Asymétrie des périodes de surchauffes solaires (en gris), calculées par le logiciel *Winshade*. Cas de New Delhi (Inde).

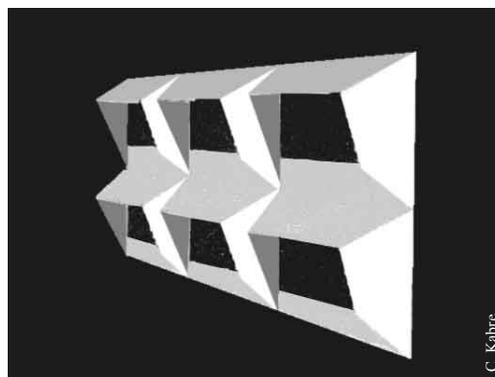


Figure 1-42 : Image *AutoCAD* des brise-soleil optimaux calculés pour six fenêtres grâce au logiciel *Winshade*.

L'illustration du résultat d'un calcul effectué sur six fenêtres (Figure 1-42) semble facilement exploitable avec le modeleur proposé puisque la volumétrie 3D est simple.

Elle est constituée pour chaque fenêtre d'une allège, de deux joues latérales verticales et d'un auvent oblique en partie haute. Il est toutefois regrettable que le logiciel exploite uniquement des fenêtres rectangulaires positionnées sur un plan vertical. Les ouvertures positionnées sur un plan oblique (toiture ou façade inclinée par exemple) ne semblent pas prises en charge par le logiciel. De plus, la base de données climatiques semble exister à ce jour uniquement pour l'Australie, l'Inde et Singapour.

1.1.2.2.2 Les logiciels simulant des volumes de contraintes solaires

Par volumes de contraintes solaires nous entendons les volumes calculés par les logiciels présentés ci-après, qui englobent des enveloppes maximales ne devant être dépassées pour respecter la contrainte solaire qui les caractérisent. Ils délimitent donc de manière optimale des solutions de constructions, d'ouvertures ou de protections solaires exactes et donc suffisantes pour répondre à la contrainte émise par un concepteur. Les volumes de contraintes étant de forme irrégulière, généralement pyramidale, l'envergure des solutions d'ouvertures ou de brise-soleil dépendent de la distance qui les séparent de la base.

- Le logiciel *SustArc*

Les Israéliens de la Faculté d'Architecture et d'Urbanisme de Haifa (Israël) utilisent les *enveloppes solaires* [Capeluto, Yezioro et Shaviv 2003] pour répondre à des contraintes climatiques d'une étude d'urbanisme à Tel Aviv (Israël). Les calculs qui en découlent sont réalisés durant la phase d'esquisses. Il s'agit de simulation inverse de l'ensoleillement couplée à une simulation de contraintes aérauliques par une méthode "essai-erreur" (simulation directe – logiciel *Fluent*). Les *enveloppes solaires* sont modélisées avec le logiciel *SustArc*. Malheureusement, les auteurs ne donnent pas beaucoup de détails sur ce modèle dans leur article scientifique [Capeluto, Yezioro et Shaviv 2003].

- Les logiciels *SolVelo* et *CalcSolar*

SolVelo, développé en 1992, par U-P. Yeh [Yeh 1993] à l'Université de Californie du Sud (USC) à Los Angeles (USA), est un petit programme informatique qui calcule des *enveloppes solaires* en 3D correspondant à deux heures d'une date choisie. Il est la

première étape d'un programme de recherche de l'USC qui a abouti dernièrement au logiciel *CalcSolar*. *SolVelo*²⁰ ne permet pas de prendre en compte une contrainte solaire sur une période de plusieurs jours ou plusieurs mois.

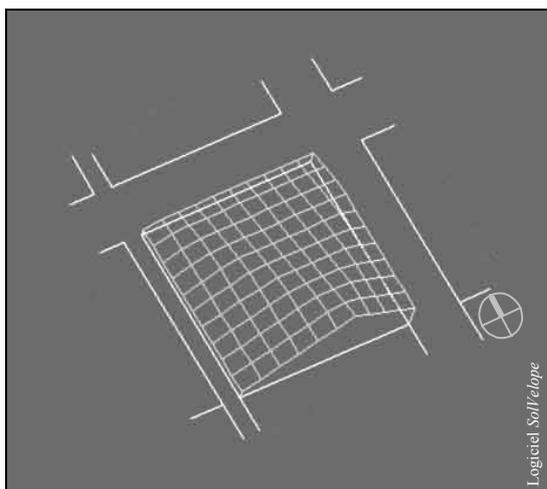


Figure 1-43 : *Enveloppe solaire* d'une parcelle urbaine, le 21 décembre de 10 h à 14 h

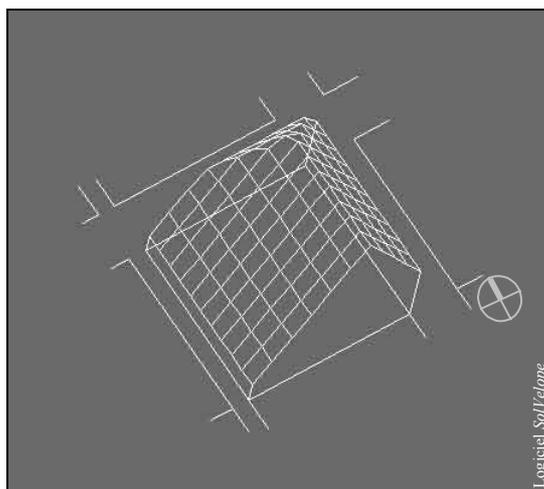


Figure 1-44 : *Enveloppe solaire* de la parcelle, 21 juin de 10 h à 14 h. La constructibilité potentielle de la parcelle est plus grande que précédemment.

La réponse volumétrique de l'outil est très facile à exploiter dans un modéleur informatique acceptant les fichiers .dxf puisqu'il permet l'export des *enveloppes solaires* sous ce type de fichier. Le récent développement de *CalcSolar* [Kensek et Knowles 1997] permet désormais de dessiner, directement dans le modéleur *AutoCAD*, les parties du site concernées par les contraintes d'ombre que représentent les *enveloppes solaires* calculées par l'outil²¹. La Figure 1-43 et la Figure 1-44 illustrent deux résultats obtenus avec le logiciel *SolVelo*. Il s'agit d'une parcelle urbaine carrée bordée par trois rues à l'ouest, au nord et à l'est, et par une parcelle au sud. Les *enveloppes solaires* sont calculées et dessinées en 3D par le logiciel *SolVelo*. Il s'agit d'un maillage qu'il est possible d'exploiter sous un modéleur comme *AutoCAD* par exemple. Ce maillage ne gêne pas le dessin de volumes constructibles à l'intérieur puisqu'il est directement importé sur un calque spécifique. La conception des volumes intérieurs à ce maillage sera alors vérifiée en élévation, afin de ne pas dépasser les altitudes des nœuds de celui-

²⁰ Téléchargeable à l'adresse Internet http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/papers/ecs/93_as_hoyt.html

²¹ En 1997, des étudiants de l'USC ont réalisé une étude d'ensoleillement avec le prototype *CalcSolar*, à Saintes (France). Le projet portait sur une parcelle du centre médiéval de la ville [Kensek et Knowles 1997].

ci. Evidemment, l'altitude irrégulière de l'*enveloppe solaire* n'est exacte qu'aux nœuds du maillage. La précision des résultats dépend donc de la taille des mailles. La Figure 1-45 et la Figure 1-46 illustrent des durées d'ensoleillement plus longues. Ces contraintes plus importantes se traduisent par un tassement des *enveloppes solaires*.

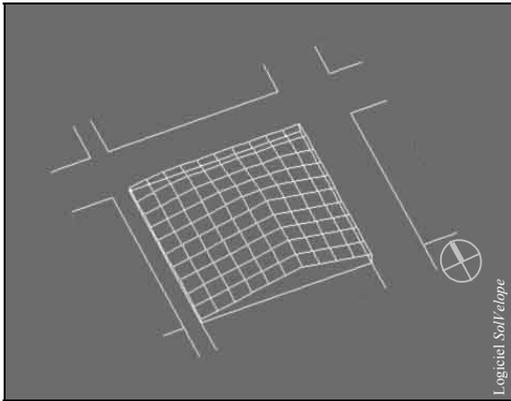


Figure 1-45 : *Enveloppe solaire* de la parcelle, le 21 décembre de 9 h à 15 h. La contrainte solaire étant plus importante (2 h de plus pour la période), l'*enveloppe solaire* est plus tassée. La constructibilité de la parcelle diminue.

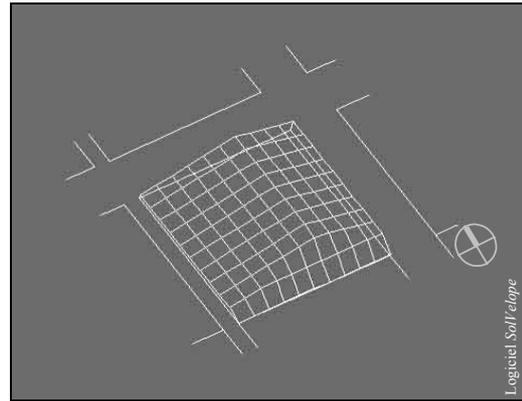


Figure 1-46 : *Enveloppe solaire* de la parcelle le 21 juin de 6 h à 18 h. La forme de l'*enveloppe* évolue. Le soleil se levant au nord-est et se couchant au nord-ouest à cette date, la face sud de l'*enveloppe* est biseautée. Les rayons solaires doivent pouvoir atteindre la limite sud de parcelle.

- Les *enveloppes solaires* de J. F. Cotton

J. F. Cotton [Cotton 1996] de l'Université Polytechnique de Californie (USA) décrit la méthode d'un autre outil, capable de modéliser l'*enveloppe solaire* d'une parcelle d'un relief accidenté à partir de calculs de sections successives de cette enveloppe, selon une trame orthogonale régulière. Le résultat s'apparente plus à de la modélisation 2D $\frac{1}{2}$ puisqu'il ne s'agit que de silhouettes accolées et non d'un véritable volume 3D solide (cf. Figure 1-47). Ce type de modélisation "en boîte à œufs" permet néanmoins de concevoir en 3D à l'intérieur des alvéoles afin de respecter la contrainte solaire énoncée, et a le mérite de traiter les cas de reliefs accidentés. L'auteur propose aux concepteurs d'utiliser les silhouettes successives comme autant de coupes longitudinales ou transversales de l'*enveloppe solaire* sur le relief (cf. Figure 1-47). Remarquons une fois de plus que les formes des *enveloppes solaires* sont très irrégulières.

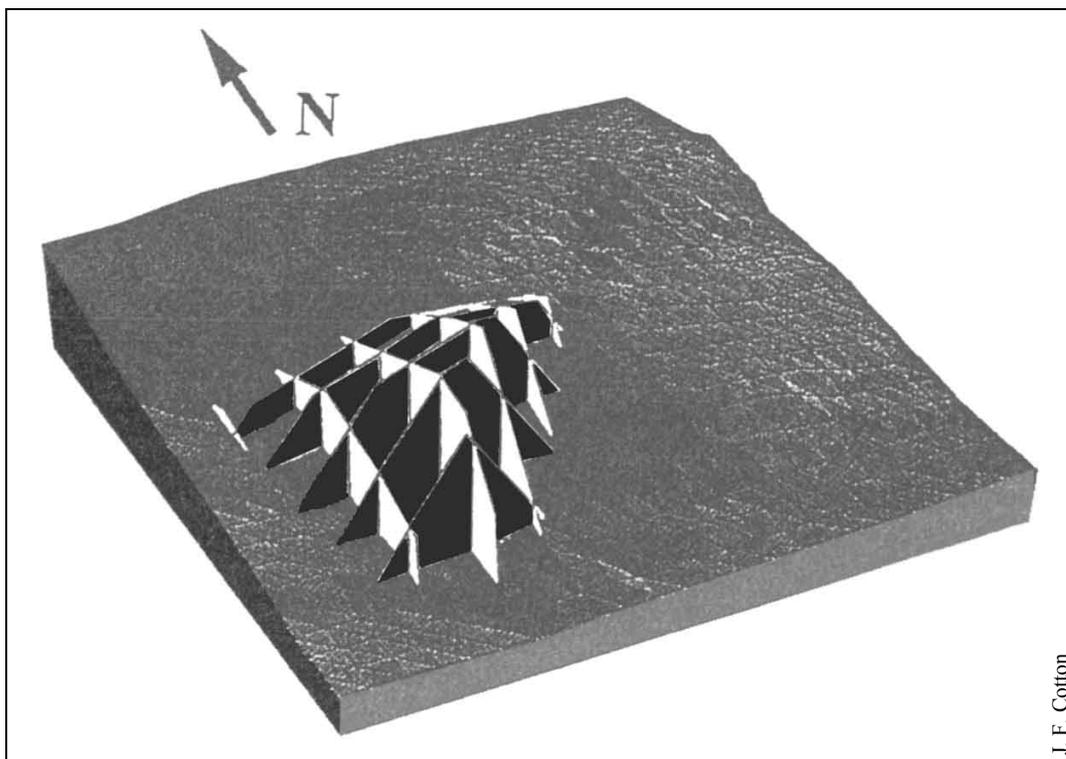


Figure 1-47 : Modélisation d'une *enveloppe solaire* sur un relief. Proposition de J. F. Cotton.

- Les *pyramides complexes d'ensoleillement* de D. Siret

Le présent mémoire de Doctorat s'inscrit dans la continuité des travaux de Thèse de M-L. Nivet sur la simulation inverse de la visibilité et de D. Siret sur la simulation inverse de l'ensoleillement. Nous présentons donc, à ce stade de l'état de l'art sur la simulation inverse en 3D de l'ensoleillement, le mémoire de Doctorat de D. Siret [Siret 1997].

D. Siret propose de calculer avec l'outil *Solimac* développé durant sa thèse, des volumes de contrainte solaire qu'il nomme "*pyramides complexes d'ensoleillement*", au moyen d'une *somme de Minkowski* entre une surface de contrainte S et une période d'ensoleillement T , projetées sur un plan. Si le point p appartient à S , alors on peut définir la *somme de Minkowski* comme étant l'ensemble des points décrits par S centré en p lorsque p décrit T . Plus récemment, par *différence de Minkowski*, D. Siret calcule de manière similaire, des *enveloppes solaires* qu'il appelle "*noyaux de pyramides d'ensoleillement*". Mathématiquement, la contrainte de la *pyramide complexe d'ensoleillement* de la surface S se traduit durant la période solaire T , par des ombres potentielles (ou taches solaires potentielles dans le cas d'un accès au soleil recherché sur

S) appartenant *au moins*²² à S. Les ombres ou les taches solaires peuvent déborder de la surface S mais elles appartiendront toujours *au moins* en partie à S pour tous les instants de T.

Contrairement aux *enveloppes solaires*, les *pyramides complexes d'ensoleillement* ont tendance à ressembler à des pyramides inversées (cf. Figure 1-48 et Figure 1-49) et s'élargissent lorsque la contrainte augmente (période plus longue dans l'année, dans la journée, etc.). Ces volumes de contrainte solaire sont toujours extrêmement complexes (de très nombreuses arrêtes sont calculées pour approcher des parties qui devraient être courbes). Il est donc impossible de calculer ou d'imaginer mentalement de tels volumes. La solution informatique prend donc ici tout son sens.

Comme nous le voyons sur la Figure 1-48, l'exploration des solutions potentielles d'un volume de contrainte est réalisée par intersection entre un plan ici (ou un mur par exemple pour une scène réaliste) et le volume de contrainte lui-même. Cette intersection est une solution exacte à la contrainte. Il peut s'agir d'un vide (une ouverture dans le cas d'une contrainte d'accès au soleil) ou d'un plein (un écran brise-soleil dans le cas d'une protection solaire). Ainsi, les solutions d'intersection entre un plan support d'une ouverture ou d'un écran de protection solaire et un volume de contrainte sont infinies (cf. Figure 1-49).

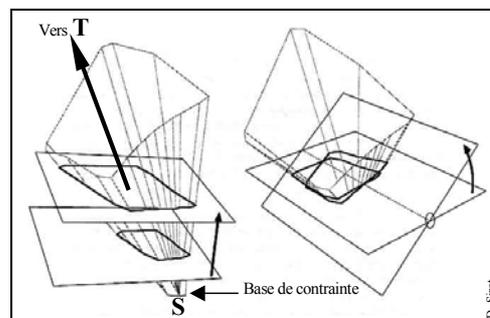


Figure 1-48 : Exploration des solutions *exactes* à une contrainte solaire modélisée par son volume de contrainte (*pyramides complexes d'ensoleillement*). Le concepteur peut choisir de calculer l'intersection du volume de contrainte avec un plan, de translater celui-ci (à gauche) pour obtenir une autre solution exacte plus éloignée de la surface de constraint S, ou bien de le faire pivoter (à droite) pour obtenir encore une autre variante.

²² Nota : à ce sujet, rappelons que les *enveloppes solaires* se traduisent mathématiquement et géométriquement par des ombres appartenant *totalem*ent à S (cf. § 1.1.2.3.).

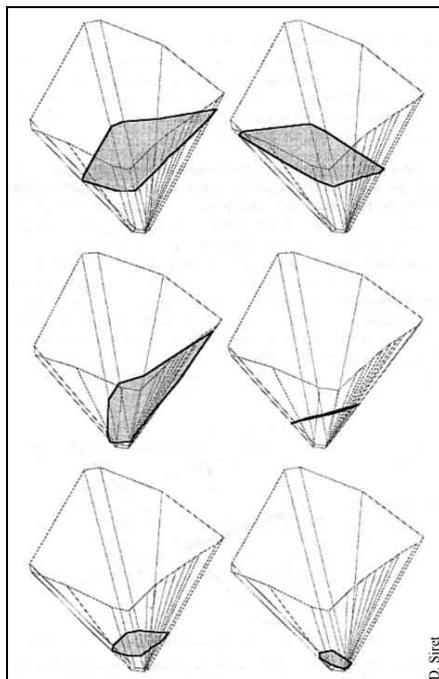


Figure 1-49 : Multiples solutions exactes pour une même contrainte de protection solaire

D. Siret illustre son mémoire avec quelques exemples concrets de contraintes solaires en situation urbaine ou architecturale. L'exemple qui suit (Figure 1-50) traite de l'accès au soleil pour deux fenêtres d'un corps de bâtiment relativement dense. La contrainte posée est : "enseleiller les deux fenêtres en milieu d'après-midi l'hiver". Cette contrainte est réaliste mais pourrait être bien plus lourde de conséquences si la période solaire choisie avait été l'après-midi entière ou plus encore, toute la journée en hiver.

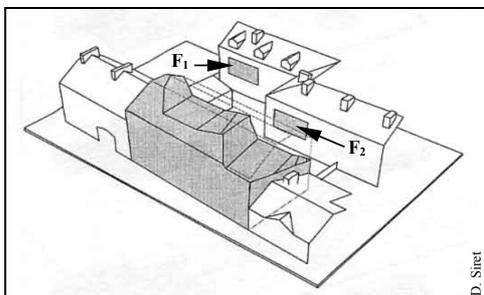


Figure 1-50 : Enveloppe maximum (unique, en gris) du bâtiment pour satisfaire l'enseleillage des deux fenêtres F₁ et F₂ en milieu d'après-midi l'hiver.

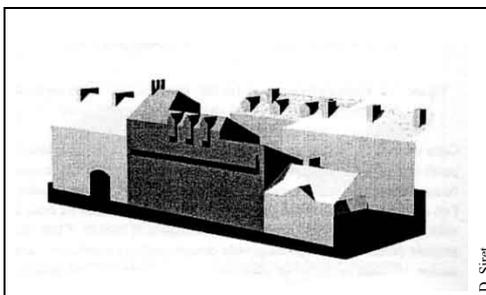


Figure 1-51 : Solution du concepteur, incluse dans l'enveloppe maximum de la figure de gauche. Ici, le concepteur semble avoir utilisé le maximum de la volumétrie autorisée.

Nous le voyons avec cet exemple, les solutions exactes aux contraintes solaires ne sont pas toujours multiples. En effet, dans le cas présent, le bâtiment qui fait face aux fenêtres étant déjà implanté au sol, l'intersection entre celui-ci et le volume de contrainte est unique. La partie à soustraire au bâtiment pour satisfaire la contrainte solaire est donc aussi unique. *In fine*, le bâtiment idéal est *au maximum* inclus dans l'enveloppe de la Figure 1-50.

- Les *enveloppes solaires* et les brise-soleil de T. N. Stasinopoulos

A l'Université Polytechnique Internationale d'Athènes, T. N. Stasinopoulos [Stasinopoulos 2001a et 2001b] a développé une application solaire directement accessible depuis *AutoCAD*, logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) largement utilisé dans les agences d'architecture du monde entier. Cette application procède à la construction d'*enveloppes solaires* et de brise-soleil de manière empirique, même si une partie des calculs est automatique. Ainsi, pour le calcul d'une *enveloppe solaire* d'une parcelle entre deux heures d'une même date (Figure 1-52 à Figure 1-54), l'auteur procède par soustraction des deux prismes de direction les rayons solaires des deux heures choisies, au prisme vertical. Pour des cas simples de ce type, la méthode est efficace mais il ne semble pas possible de l'appliquer à toutes les périodes solaires. L'auteur ne signale pas par exemple si la méthode est valable pour des périodes de plusieurs jours. Quatre directions solaires au lieu de deux conviendraient-elles ?

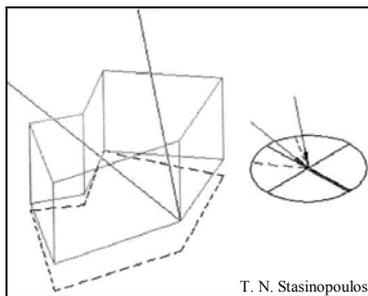


Figure 1-52 : Méthode de construction d'une *enveloppe solaire* simple (contrainte entre deux heures). 1^{ère} étape : calcul des azimuts et des hauteurs des rayons solaires de ces deux heures.

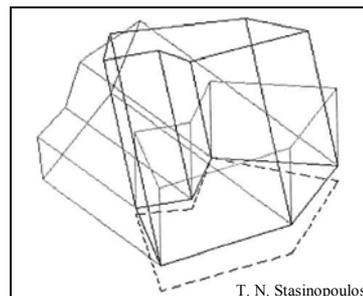


Figure 1-53 : Deuxième étape : construction des deux prismes de base la parcelle et de direction les rayons solaires.

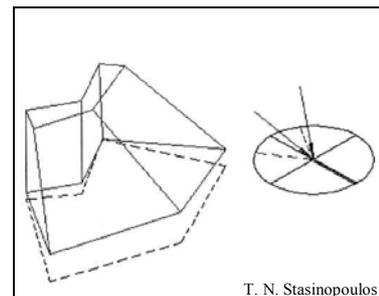


Figure 1-54 : Dernière étape : soustraction des deux prismes précédents au prisme vertical de base la parcelle.

T. N. Stasinopoulos propose aussi une méthode pour délimiter grossièrement un brise-soleil optimal, efficace pour plusieurs heures d'une même date (cf. Figure 1-55 à Figure 1-58). Malheureusement, là aussi, la méthode ne semble pas accepter des périodes de plusieurs jours ou plusieurs mois.

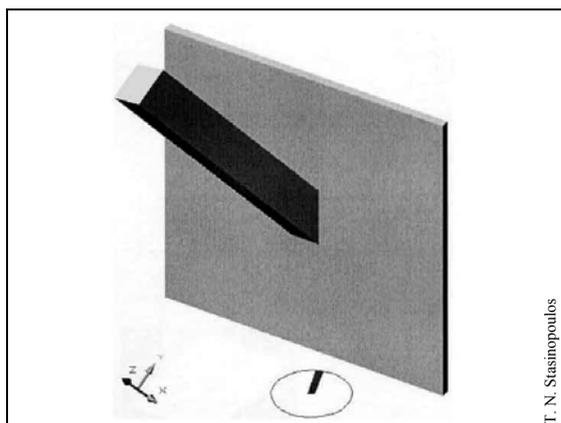


Figure 1-55 : Construction d'un brise-soleil sur une fenêtre verticale rectangulaire. 1^{ère} étape : le système de coordonnées est orienté dans la direction du premier rayon solaire. Un prisme est extrudé à partir de la base de contrainte (la fenêtre).

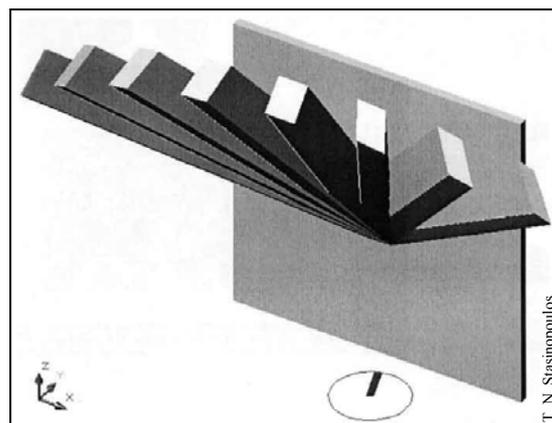


Figure 1-56 : 2^{ème} étape : une fois l'opération répétée pour chacune des heures de la contrainte, le système de coordonnées est replacé dans sa position générale.

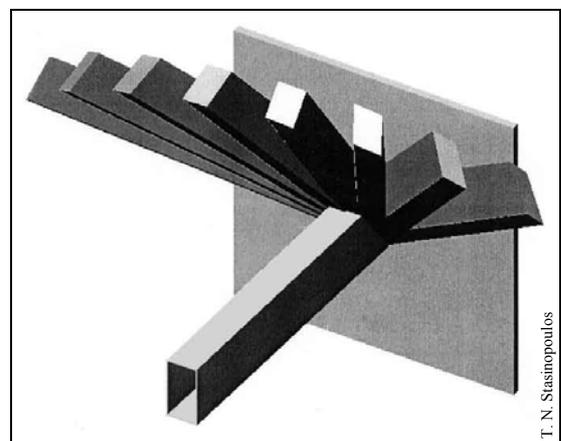


Figure 1-57 : 3^{ème} étape, un profil de brise-soleil (ici, de type loggia) est extrudé à l'horizontale (perpendiculairement à la fenêtre).

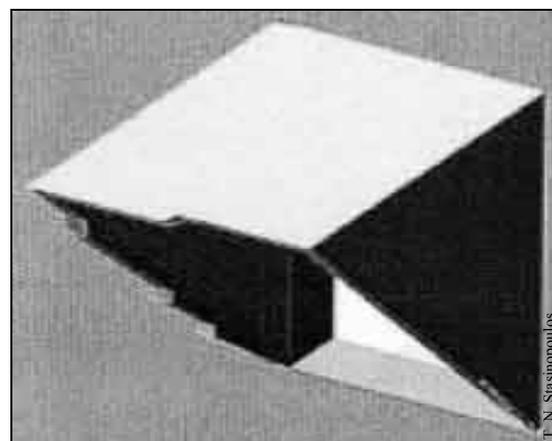


Figure 1-58 : Dernière étape : l'intersection du profil précédent avec l'ensemble des prismes solaires donne un brise-soleil grossier (présence de crénelures).

La méthode a toutefois l'avantage de modéliser les volumétries directement dans un modèleur 3D. Les objets ainsi obtenus sont des solides qu'il est possible de retravailler

sous *AutoCAD*. Le concepteur peut à sa guise redimensionner une épaisseur de brise-soleil ou renouveler une simulation sans perdre de temps. Les figures précédentes illustrent la méthode de T. N. Stasinopoulos, pour la construction d'un brise-soleil optimal à une date précise.

1.2 Simulation inverse de la visibilité

Contrairement à la simulation directe de la visibilité dont les méthodes sont maintenant assez bien connues (isovists 2D [Hanson 1994] ou 3D, cartes d'accessibilité visuelle [Morin 1995], [Lynch 1976], *EasySurf* [CADEasy 2000], etc.), la simulation inverse de l'accessibilité visuelle n'en est qu'à ses débuts.

Si l'on met en parallèle, d'une part, des schémas de comparaison entre simulation directe et inverse de la visibilité, avec, d'autre part, la comparaison de la Figure 1-4 et de la Figure 1-5 (simulation directe et inverse de l'ensoleillement), il est possible de généraliser la démarche inverse par une formule générique du type : *comment dimensionner une ouverture (ou un écran) pour voir (ou ne pas voir) le soleil ou un objet d'une scène, depuis une zone donnée de cette scène ?* D'emblée, nous pouvons indiquer qu'il existe très peu de publications sur la simulation inverse de la visibilité. L'étude la plus complète, dans ce domaine, est la thèse de Doctorat de M-L. Nivet sur la résolution de contraintes visuelles en 3D.

M-L. Nivet a développé durant son travail de thèse, un outil pour la prise en compte de l'accessibilité visuelle dans le projet architectural, urbain ou paysager : le prototype de logiciel *De Visu* [Nivet 1999]. Cet outil numérique permet de représenter en 3D des contraintes visuelles sous la forme de volumes de contraintes englobant la totalité des rayons visuels partant d'une zone d'observation et allant vers une cible (signal dans la ville, élément du paysage, monument historique, etc. – cf. Figure 1-61). M-L. Nivet définit le "*volume de vision probable*" comme étant l'union de tous les *cônes de vision* d'un observateur moyen sur une zone donnée (Figure 1-59). Le "*volume de vision utile d'un usager*" est, quant à lui, défini comme étant l'ensemble des rayons visuels appartenant au "*volume de vision probable*" (ou au cône de vision de l'observateur, dans le cas où sa position est un point unique – Figure 1-60) et passant par un objet de la scène (dans cet exemple, une église). Dans le cas où l'observateur est un usager lambda, M-L. Nivet considère que le "*volume de vision utile*" ne peut pas dépasser le "*volume de vision probable*". Ce dernier n'est pas représentatif d'une contrainte ; le premier

représente un volume potentiellement utile à l'observateur usager pour appréhender son environnement construit. Seul le "*volume de vision utile d'un visiteur*" figure réellement une contrainte visuelle puisque le visiteur cible ses vues selon les contraintes qu'il se fixe. Dans le cas de la Figure 1-61, le visiteur cherche à voir la totalité d'une des faces de l'église. La contrainte est donc : "*voir la totalité de cette face de l'église*".

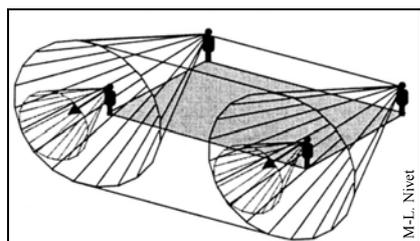


Figure 1-59 : "*Volume de vision probable d'un observateur de type usager*" dont la position peut évoluer sur l'ensemble d'une zone donnée (en gris)

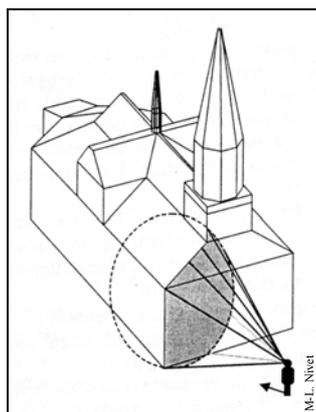


Figure 1-60 : "*Volume de vision utile d'un usager*" pour une zone d'observation limitée à un point

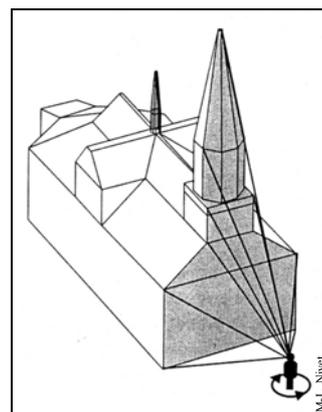


Figure 1-61 : "*Volume de vision utile d'un visiteur*" pour une zone d'observation limitée à un point et une cible concave (façade principale d'une église)

L'auteur du logiciel *De Visu*, déclare aussi que le *volume de vision utile d'un usager* est l'intersection du *volume de vision probable* et du *volume de vision utile d'un visiteur* (cf. Figure 1-62, Figure 1-63 et Figure 1-64).

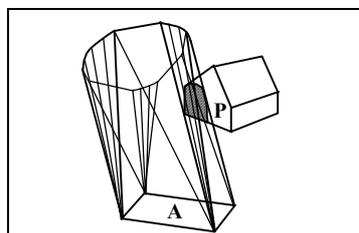


Figure 1-62 : *Volume de vision probable* pour une zone rectangulaire (A). Dans cet exemple, le pignon (P) de la maison est intersecté par le volume (partie grisée).

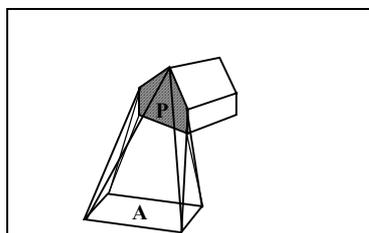


Figure 1-63 : *Volume utile d'un observateur visiteur* depuis la même zone A. Le volume englobe la totalité des rayons visuels qui relient A à P.

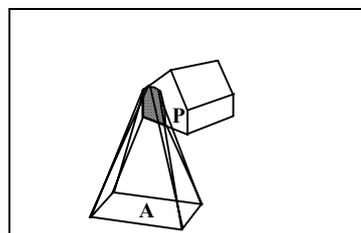


Figure 1-64 : *Volume utile de l'observateur usager* n'est autre que l'intersection du *volume de vision probable* et du *volume utile d'un observateur visiteur*.

Pour M-L. Nivet, la simulation inverse et la modélisation déclarative sont un moyen de concentrer l'approche architecturale sur l'énoncé de propriétés relevant de phénomènes physiques. L'auteur parle de *volumes utiles* pour désigner les volumes solutions à une contrainte visuelle. Ils correspondent aux volumes à évider ou à obstruer pour satisfaire respectivement, une contrainte de vue ou de non-vue. M-L. Nivet explique pourquoi elle ne peut utiliser la somme de Minkowski pour générer ces volumes utiles comme a pu le faire D. Siret [Siret 1997] pour des volumes de contrainte solaire (les "*pyramides complexes d'ensoleillement*"). Le plan de projection qu'elle utilise pour calculer les volumes de contraintes visuelles est perpendiculaire à la direction du regard. Il n'est donc pas automatiquement parallèle au plan de base (zone de l'observation ou positions des yeux de l'observateur) alors qu'il doit l'être pour effectuer une somme de Minkowski. M-L. Nivet utilise donc une autre méthode pour délimiter les volumes de contraintes visuelles : les algorithmes de F. Nielson, encore appelés "*algorithmes géométriques adaptatifs*". Ils permettent le calcul d'enveloppes convexes d'un ensemble de polygones convexes. Le prototype *De Visu* repose sur une notion particulière de plans supports et de plans séparateurs. Selon M-L. Nivet, ces deux types de plans délimitent trois types de zones : une zone hors contrainte, une zone où la contrainte est entièrement satisfaite, et une ou plusieurs zones intermédiaires (Figure 1-65).

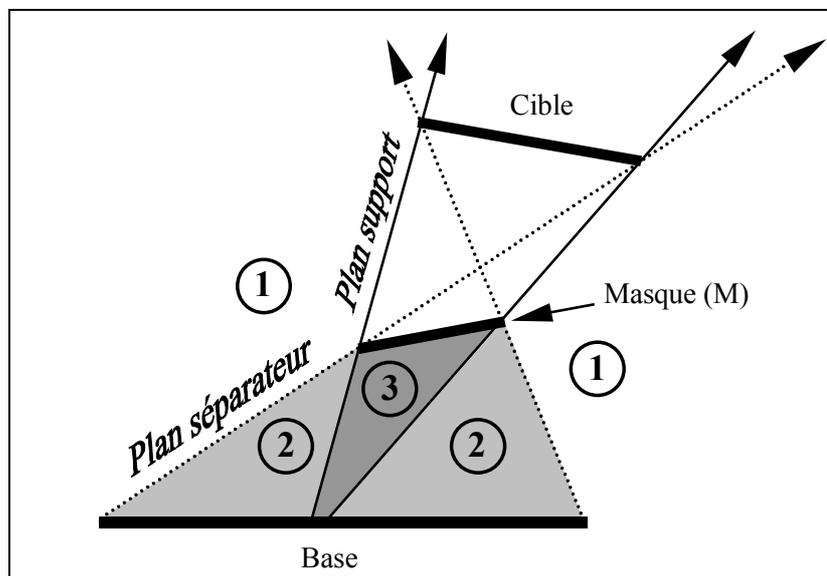


Figure 1-65 : Notion de plans supports et plans séparateurs d'une contrainte visuelle [Nivet 1999]. Dans la zone 1, le masque M est inactif. Dans la zone 2, la cible est en partie masquée par M. Dans la zone 3, la totalité de la cible est masquée par M.

M-L. Nivet aborde aussi d'autres notions propres à sa recherche dans quatre autres publications. Ainsi, dans *Voir et concevoir : simulation inverse de l'accessibilité visuelle pour le projet urbain* [Nivet et Siret 1998b], est définie la notion de prégnance visuelle qui aboutit à la conception d'échappées visuelles. Les deux auteurs de cet article affirment : "*plutôt que de « raser » un immeuble ou même un îlot entier pour voir complètement l'objet de la contrainte [visuelle] en tout point de l'espace d'observation, on préférera ménager des échappées visuelles qui assurent une vision intermittente de cet objet pour l'observateur*".

Dans les articles intitulés *Le jeu des intentions : intégration de contraintes physiques et urbaines en CAO* [Faucher et Nivet 1998a] et *Playing with Design Intents : Intregrating Physical and Urban Constaints in CAD* [Faucher et Nivet 1998b], les coauteurs développent la notion de contraintes positives ou négatives (ajout ou absence de matière) qui peuvent être soient binaires ("*totalemt visible*" ou "*pas du tout visible*") ou non-binaires ("*en partie visible depuis*"...). Les deux auteurs, parlant du concepteur face à l'outil de simulation inverse, insistent sur le fait que l'objectif de leur recherche "*n'est pas de proposer une solution entièrement automatique au concepteur. Nous souhaitons, affirment-ils, mettre à sa disposition des outils qu'il utilisera à son grè au cours du travail de conception. Pour ces raisons, nous ne pouvons nous contenter d'une énumération exhaustive des solutions ou d'un tirage aléatoire parmi celles-ci. [...] A terme, nous souhaitons réunir au sein d'un même prototype logiciel les méthodes expérimentées dans le but de valider l'intérêt de la conception par l'intention auprès des étudiants et des praticiens*". Dans l'article intitulé *Simulation inverse de l'accessibilité visuelle en milieu urbain* [Nivet et Siret 1998a], les deux auteurs relatent le projet d'aménagement d'une place à Bergen op Zoom (Pays-Bas) pour lequel l'agence d'architecture MVRDV semble avoir réalisé des tracés de "*lignes de vues*" depuis le centre historique de la ville vers la silhouette de bâtiments formant des masques, devant le site du projet. Le résultat de cette méthode de projections géométriques fut la délimitation d'enveloppes maximales constructibles ne devant pas être dépassées pour satisfaire à la contrainte de la municipalité qui interdisait aux architectes de construire des bâtiments visibles depuis le centre historique. Les architectes utilisent les termes de "*« montagne » de potentialités à « l'ombre » du centre historique*" pour désigner l'ensemble des solutions potentielles répondant à la contrainte visuelle imposée.

Conclusion

A ce stade de l'état de l'art sur la simulation inverse solaire ou visuelle, nous affirmons que les architectes et les chercheurs ont d'abord détourné l'utilisation de certains outils de simulation directe en 2D pour répondre à des questions de l'ordre de l'optimisation de dimensionnement de protections solaires principalement ou de la recherche de durées annuelles d'ensoleillement en un point pour ajuster un dispositif essentiellement par rapport aux périodes de surchauffes solaires. Dans nos recherches bibliographiques, nous avons une proportion beaucoup plus importante de dimensionnement d'écrans que de dimensionnement d'ouvertures, à partir d'une contrainte 2D. Ceci montre combien la démarche inverse 2D n'est pas totalement explorée.

En revanche, en simulation inverse 3D, nous observons des exemples d'applications très variés comme : le calcul d'un relief virtuel ne devant pas être dépassé pour permettre l'ensoleillement d'une zone durant une période de l'année (M. Twarowski), la recherche de l'éloignement d'un bâtiment de hauteur connue pour que celui-ci ne crée pas d'ombre portée sur une parcelle durant un laps de temps défini (M. Twarowski), la recherche de la hauteur d'un bâtiment d'éloignement connu afin qu'il satisfasse une contrainte d'ensoleillement (R. L. Knowles ; P. Achard et R. Gicquel ; M. Twarowski), le dimensionnement d'écrans brise-soleil pour des dates et des heures précises (J. Dourgnon ; C. Kabre ; F. Arumi-Noé ; Hiller , Beckman et Mitchell ; D. Siret), la modélisation de volumes de contraintes englobant des ensembles de solutions solaires ou visuelles (U-P. Yeh ; K. Kensek et R. L. Knowles ; J. F. Cotton ; D. Siret ; M-L. Nivet ; T. N. Stasinopoulos), etc.

Nous remarquons que les méthodes et outils cités dans cet état de l'art s'appliquent très majoritairement aux contraintes solaires. La prise en compte de ces contraintes en 3D et sous la forme d'intentions clairement énoncées, fut certainement expérimentée pour la première fois par M. Twarowski avec sa méthode de calcul de *courbes de niveau solaires* [Twarowski 1962]. Avant lui, de célèbres architectes et ingénieurs ont conçu des immeubles d'habitation à partir de tracés solaires, mais il est difficile de dire si ces tracés, que l'on retrouve sur certaines épures de ces édifices, ont été réalisés avant la conception (intention et contrainte), ou lorsque le projet fut réalisé (analyse et justification du choix ou du discours des architectes). Citons quelques-uns de ces concepteurs de la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle et de la première moitié du XX^{ème} siècle : J-H. Borie, I. Cerda, H. Sauvage, Le Corbusier, etc. Dans son cours de Certificat d'Etudes Approfondies consacré à la climatologie et l'architecture urbaine (intitulé

"*Ajustement climatique des formes urbaines*"), J-P Péneau [Péneau s. d.] dit de J-H. Borie : "*il donne des épures montrant la manière dont les rayons solaires frappent les immeubles et les terrasses*" (1865). J-P. Péneau illustre son cours avec des épures des maisons d'habitations urbaines que J-H. Borie appelle "*aérodômes*" au milieu du XIX^{ème} siècle, et poursuit en affirmant que "*l'ensoleillement et la circulation d'air sont les deux arguments essentiels mis en avant pour justifier la disposition des aérodômes*". J-P. Péneau fait aussi référence, dans ce recueil de cours, à l'ingénieur I. Cerda. Ce dernier avait les mêmes préoccupations hygiénistes que J-H. Borie, et à la même époque, il réalisa le plan de l'extension de Barcelone (Espagne – concours de 1858) en réalisant une trame d'îlots urbains carrés. J-P. Péneau, dit de cette trame : "*les constructions ne [devaient] occuper que deux côtés de l'îlot, de manière à garantir un bon ensoleillement et une bonne ventilation*". Malheureusement, ces dispositions ne furent réalisées qu'en partie, puisque le projet définitif fut densifié sur les quatre côtés de l'îlot. L'intention solaire était pourtant fortement énoncée par I. Cerda. Cependant, nous n'avons pas les moyens de vérifier si les objectifs solaires de ces deux architectes furent atteints grâce à une procédure d'inversion des tracés solaires en faisant partir les rayons solaires "inverses" depuis les zones devant être ensoleillées et en délimitant ainsi les hauteurs des bâtiments selon l'inclinaison des rayons (simulation inverse 2D), ou grâce à une procédure d'essais successifs "par tâtonnement" (simulation directe). Quant à certains immeubles d'habitation conçus par l'architecte H. Sauvage, il semble que leur forme pyramidale fut obtenue de manière empirique, sans méthode du type de celle mise au point par R. L. Knowles [Knowles 1984] pour concevoir les "*enveloppes solaires*". Cependant, dans cet exemple aussi, nous n'avons pas les moyens de savoir si H. Sauvage procéda à des tracés solaires successifs jusqu'à ce qu'il obtienne le résultat qu'il escomptait ou s'il utilisa une méthode intermédiaire moins sophistiquée que celle de R. L. Knowles mais tout de même inverse. J-P. Péneau affirme, à ce sujet [Péneau s.d.] : "*la recherche d'un ensoleillement optimal conciliable avec la morphologie de l'îlot urbain conduit H. Sauvage à proposer ses fameux immeubles en gradins*". L'architecte Le Corbusier a aussi tenté de répondre, à sa manière, à des contraintes solaires et visuelles fortes pour les loggias des *Unités d'Habitations* qu'il conçut au milieu du XX^{ème} siècle. Mais il semble que les *loggias-brise-soleil*, comme il les appelait, n'ont pas été conçues par simulation inverse mais plutôt par des simulations solaires directes sur quatre types de loggias [Houpert, Siret et Marenne 1999], dont une seule fut sélectionnée et réalisée. Historiquement, M. Twarowski est donc le premier à avoir réellement proposé une méthode de résolution de contraintes solaires. Nous pouvons dire qu'il fut l'un des pionniers de la simulation solaire inverse, en intégrant le temps dans les contraintes solaires (plusieurs heures de la journée, plusieurs dates solaires, etc.).

Concernant le détournement des fonctionnalités d'outils de simulation solaire directe 2D (réversibilité à des fins de simulation inverse), nous n'avons pas trouvé, dans la littérature française et internationale, d'ouvrage relatant l'observation de telles pratiques, dans les agences d'architecture, d'urbanisme, ou dans les écoles d'architecture. Pourtant ces pratiques existent. Nous en avons retrouvé la trace dans des cours d'enseignants en architecture et dans des publications de travaux de quelques laboratoires de recherche internationaux. Il s'agit d'outils matériels simples (diagrammes papier, abaques...), de petits programmes informatiques qui donnent des indications sommaires pour chaque date étudiée (azimut et hauteur du soleil) et permettent de dimensionner la profondeur d'un brise-soleil en traçant des rayons "inverses", ou encore de programmes plus sophistiqués capables d'optimiser généralement une protection solaire en coupe puis en plan mais jamais en 3D.

Comparée à la simulation inverse 2D, la simulation inverse 3D permet de mieux révéler la complexité des contraintes solaires ou visuelles dans l'espace. Lorsque celles-ci intègrent le temps (protection solaire durant une période, visibilité d'un objet depuis plusieurs positions potentielles d'un observateur, etc.), les volumes de contraintes sont encore plus complexes. La manipulation de contraintes en 3D semble être quasi inévitable. C'est, du moins, ce qui ressort de cet état de l'art, et c'est aussi l'objectif des dernières recherches dans le champ de la simulation inverse. Pour ces raisons, dans les deux prochaines parties de ce mémoire, il sera uniquement question de simulation inverse 3D. Mais pour ne pas alourdir le propos, nous ferons l'économie de rappeler que nous nous situerons toujours en trois dimensions. Nous parlerons donc de *simulation inverse* pour parler de *simulation inverse 3D* (de l'ensoleillement, de la visibilité ou de la réflexion solaire ou visuelle).

La quasi-totalité des outils de simulation inverse 2D ou 3D utilise des modèles de géométrie non réels (représentation graphique ou informatique). Il est donc indispensable de réaliser des modèles numériques ou graphiques pour effectuer de telles simulations avec ces outils. Nous n'en concluons pas pour autant qu'aucun outil n'est adapté à la simulation inverse rapide à partir de l'environnement existant *in situ*. Ainsi, les instruments comme le *Vidélios*, l'*Horizontoscope* ou le *Globoscope* permettent de réaliser des relevés des périodes d'ensoleillement ou d'ombrage d'un lieu et repérer de manière assez précise les azimuts et les hauteurs d'ouvertures ou de masques solaires à réaliser sur ce lieu afin de satisfaire une contrainte ponctuelle (pour le point où est placé l'instrument). La réponse à une intention solaire ou visuelle est extrêmement rapide avec ce type d'outil, car la prise de vue avec un appareil photographique *Polaroid* par exemple (*Vidélios*), permet à l'architecte de se fixer une rapide idée de la faisabilité d'un

projet devant répondre à cette intention (selon les masques existants projetés sur le diagramme solaire). Evidemment, si le point étudié (la position du centre de l'instrument) est un point inaccessible (étage d'un futur bâtiment, site virtuel, etc.) il est impossible de réaliser une simulation avec les outils du type *Horizontoscope*. Dans ce cas, la modélisation ou le dessin du site et de son environnement est indispensable à la réalisation des simulations. De plus, ce type d'instrument ne permet pas la visualisation des masques en trois dimensions. Il semble donc moins performant, en simulation inverse, que les outils de simulation 3D cités dans cet état de l'art.

Pour refermer cet état de l'art, nous concluons que les logiciels de simulation inverse 3D sont plus adaptés à la prise en compte globale des contraintes d'ensoleillement ou de visibilité. Ils correspondent à la dernière génération d'outils de simulation solaire inverse et sont exclusivement développés dans des laboratoires de recherche. Aucun n'est commercialisé et aucun ne permet de régler en même temps, des problèmes inverses de visibilité et d'ensoleillement. Parmi ces logiciels, ceux qui calculent des volumes de contraintes et non pas seulement une unique solution de protection ou d'ouverture solaire ou visuelle, semblent être les plus appropriés pour répondre aux exigences des architectes, car ils délimitent des contraintes complexes dans les trois directions de l'espace et permettent la manipulation informatique des contraintes en plan, coupe, élévation et perspective.

Deuxième partie

- 1 L'état de l'art de la simulation inverse de l'ensoleillement et de la visibilité
- 2 Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle**
- 3 L'utilisation d'un outil de modélisation inverse par des concepteurs

"Les chercheurs en architecture durent se tourner vers des logiciels utilisés par les scientifiques pour la mécanique des fluides ou pour la transmission de la lumière. Ils se sont demandés comment ils pouvaient détourner ces logiciels. Il y a eu beaucoup de bricolage... mais ils étaient capables de reconnaître la capacité conceptuelle qu'ils pouvaient en tirer. J'aurais donc tendance à dire que l'ordinateur et l'informatique sont fondamentalement anti-conceptuels. Il y a un très grand risque – à cause de ces logiciels extrêmement faciles d'usage – de perdre le concept. [...] L'architecture est la matérialisation du concept et non pas sa formalisation."

B. Tschumi, *L'Enseignement*, 2000

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Introduction

Dans les paragraphes qui suivent cette introduction, nous emploierons le terme "Soleil" avec une majuscule pour désigner l'astre solaire et le terme "soleil" pour désigner le phénomène physique (ses rayons solaires, ses trajectoires et ses positions apparentes, les taches et les ombres solaires, etc.). De même, nous emploierons le terme "concepteurs" pour désigner de manière générale : architectes et urbanistes, mais aussi ponctuellement, paysagistes, designers, plasticiens, scénographes, etc. Nous l'indiquons dans le titre du présent mémoire de thèse, notre approche inverse traite des contraintes *Solaires Visuelles* mais aussi de *Réflexions solaires et visuelles* d'où le sigle *SVR* qui désigne l'outil informatique développé durant cette thèse²³. Il s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche du Laboratoire Cerma de l'Ecole d'Architecture de Nantes et reprend les apports des travaux de thèses sur la simulation inverse de l'ensoleillement [Siret 97] et de la visibilité architecturale et urbaine [Nivet 99], lesquels mettent en œuvre des algorithmes différents pour calculer les volumes de contraintes. Notre outil *SVR* utilise donc une nouvelle méthode de calcul des volumes de contraintes²⁴, capable de répondre indifféremment à des problèmes d'ensoleillement, de visibilité ou de réflexion solaire et visuelle avec une même interface et dans un outil de CAO. Nous avons ainsi ajouté le traitement de contraintes à la croisée des deux problématiques que sont l'ensoleillement inverse et la visibilité inverse : les contraintes de réflexions solaires et visuelles. Notre outil n'étant pas conçu pour qualifier le type de réflexion selon la surface réfléchissante étudiée, notre propos aura pour hypothèse la réflexion spéculaire des surfaces définies comme parfaitement réfléchissantes par le concepteur (eau d'un bassin, façade vitrée, etc.). Il ne s'agira donc pas pour nous d'analyser la réflexion solaire de manière qualitative selon le plan de réflexion ou "plan miroir" (selon son albédo, sa texture, etc.), mais de calculer l'enveloppe totale des rayons solaires ou visuels inverses, partant d'une base, arrivant sur le plan miroir considéré parfait et réfléchis vers une période de la "voûte solaire" ou une "cible visuelle". Ces volumes de réflexions auront très souvent comme base, l'ensemble des positions potentielles des yeux. Mais une surface de travail pourrait aussi être prise comme base pour calculer le dimensionnement d'une ouverture ou d'un écran conçu pour se protéger ou exploiter un gisement de réflexion solaire. Les contraintes d'éblouissement solaire, elles aussi à la croisée des problématiques de l'ensoleillement et de la visibilité, sont

²³ Trois articles traitant directement de l'outil *SVR* ont fait l'objet d'une présentation lors de congrès [Houpert 2001, 2002a, 2002b]

²⁴ Nous plaçons aussi en Annexe 2, une méthode de tracé graphique des volumes de contraintes solaires développée durant la thèse.

traitées avec des volumes de contraintes solaires – car il s'agit de contraintes du type "voir ou ne pas voir le soleil" – et éventuellement par l'intersection avec un volume de contrainte visuelle si l'architecte a un doute sur l'éblouissement potentiel (angle d'inclinaison des rayons solaires dans le champ visuel).

Pour décrire notre méthode de modélisation inverse et les éléments liés à cette approche nous emploierons un vocabulaire simple. En modélisation solaire inverse, nous parlerons de "voûte solaire" pour désigner notre modèle de trajectoires solaires apparentes limitées à la voûte céleste (partie de la voûte du ciel décrite par la course annuelle du soleil à une latitude donnée - Figure 2-1). Dans ce modèle de voûte solaire, nous identifierons six "périodes solaires" ("début de matinée", "milieu de matinée", "fin de matinée", "début d'après-midi", "milieu d'après-midi" et "fin d'après-midi"). Cette discrétisation large des jours solaires sera accompagnée d'une discrétisation plus fine en heures solaires. Les heures solaires étant identiques quelle que soit la longitude, le midi solaire sera toujours à l'intersection du plan vertical nord-sud et de la voûte solaire, et les heures suivantes, à l'intersection de ce plan ayant subi une rotation de 15° par heure ($360^\circ/24$ h). L'axe de rotation de ce plan sera alors la droite passant par le centre de l'hémisphère céleste et parallèle à l'axe nord-sud des pôles à la latitude considérée.

Par "volume de contrainte", nous entendons \mathcal{V} , un volume de contrainte solaire, visuelle, ou de réflexion solaire ou visuelle. Il s'agit du premier des cinq types de volumes définis dans la section 2.1.3.1 (\mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r), ayant comme base, une "base de contrainte" (poste de travail, aire de jeux, zones techniques, etc.) et comme direction, une "cible de contrainte" (périodes solaires sur une voûte solaire, silhouette d'un édifice, élément du paysage, etc.). D'une manière générale, lorsque nous avancerons les propriétés communes aux volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r , nous parlerons et ne citerons en exemple que les volumes de contraintes (\mathcal{V}) pour ne pas alourdir le propos. Il faudra donc comprendre que ces propriétés sont valables pour l'ensemble des volumes.

Les deux coordonnées solaires angulaires qui intéresseront notre sujet seront la *hauteur* et l'*azimut* du soleil. Rappelons que la *hauteur* du soleil correspond à l'inclinaison des rayons solaires par rapport à l'horizon. L'*azimut* est l'angle de la projection des rayons solaires au sol, par rapport à la direction du sud géographique. L'*azimut* est de signe négatif à l'ouest de l'axe nord-sud et de signe positif à l'est.

Quel que soit le type de contraintes (solaires, visuelles ou de réflexions solaires ou visuelles), nous parlerons de "taille de scène" architecturale ou urbaine pour désigner le rayon de la sphère englobant la scène virtuelle réalisée avec un modéleur informatique (cf. Figure 2-2). Les volumes de contraintes obtenus avec notre outil logiciel seront

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

ainsi limités par le choix de la taille de scène. Afin que l'exploitation des volumes de contraintes soit aisée, tel concepteur préférera des volumes de quelques unités (en mètres) afin de ne pas encombrer la scène 3D virtuelle, et tel autre concepteur préférera des volumes se prolongeant jusqu'à une cible de contrainte à plusieurs centaines de mètres d'une base de contrainte.

Nous parlerons de "masques environnants" pour désigner les silhouettes existantes des constructions, du relief ou de la végétation qui créent des masques solaires ou visuels même partiels, pour une base donnée. Nous appellerons "écrans" solaires ou visuels les polygones obtenus par des sections transversales des volumes de contraintes. Ils seront des solutions exactes aux contraintes posées.

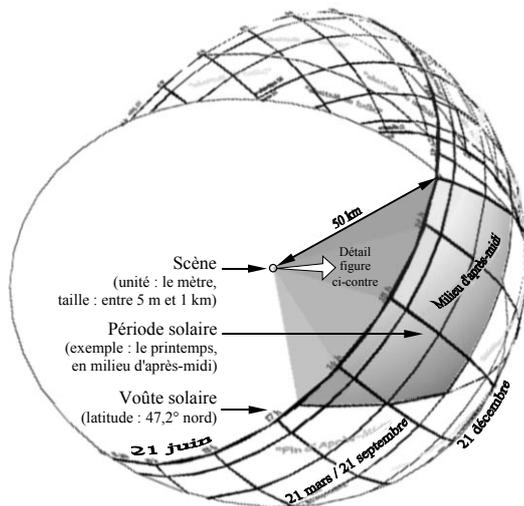


Figure 2-1 : Exemple d'un cas de simulation inverse de l'ensoleillement. Le modèle de voûte solaire est la partie de la voûte céleste décrite par les trajectoires apparentes du soleil de l'ensemble de l'année pour la latitude choisie (ici, 47° nord). La période solaire "milieu d'après-midi" est la cible de contrainte. La base de contrainte est une partie de la scène architecturale (figure de droite). Le volume grisé est le volume de contrainte solaire. Il englobe l'ensemble des rayons solaires reliant la base à la période solaire.

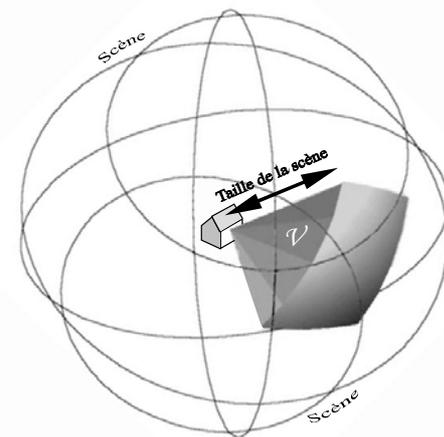


Figure 2-2 : Le volume de contrainte \mathcal{V} est limité à la taille de la sphère englobant la scène, que le concepteur a choisie (rayon de la scène).

Nous précisons que nous travaillerons toujours en heures solaires (i.e. heures indiquées par un cadran solaire), sauf si une note indique que les heures sont légales (heures

civiles). Nous précisons aussi que, dans tous nos exemples de simulations, le ciel et l'atmosphère seront toujours considérés comme sereins. Les cibles seront donc toujours potentiellement visibles (pas de nuage, de brouillard, de poussière, etc.).

Notre prototype de logiciel a donc été implémenté sous la forme d'une *macro* pour être utilisable dans l'environnement d'un logiciel de CAO/DAO *AutoCAD2000*® que nous appellerons aussi "logiciel mère" ou "modeleur". Notre choix s'est porté vers ce dernier car il est majoritairement utilisé par les architectes et parce qu'il permet le développement de macros. Nous n'avons pas trouvé de données officielles sur les proportions des agences d'architecture utilisant le logiciel *AutoCAD*, mais le nombre de licences vendues pour chacun des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), étant généralement disponibles sur les sites Internet des fabricants, il nous a été aisé de comparer ces données nationales. En France en 2003, ce nombre est, dans l'ordre décroissant des concurrents du logiciel *AutoCAD* : de 12000 pour *Arc+*, 7000 pour *ArchiCAD*, 4500 pour *VectorWorks*... tandis qu'est disponible, pour le logiciel *AutoCAD*, uniquement le nombre de licences vendues dans le monde, soit près de quatre millions. Il paraît donc certain que ce logiciel de CAO est, à l'heure actuelle, le plus utilisé par les architectes français. Même si aucun pourcentage officiel ne semble disponible, les agents commerciaux rencontrés sur les stands des fabricants ou joints par téléphone, avancent le même pourcentage officieux : 80 % des agences d'architecture utiliseraient le modeleur *AutoCAD*. Voici une des raisons qui nous a poussés à choisir de développer notre outil en sur-couche de ce modeleur. De plus, il permet d'exporter (ou importer) vers (ou depuis) d'autres logiciels, de nombreux types de fichiers (.dwg, .dxf, .3ds, .sat, .dxx, .eps, .wmf, .stl, etc.). Il s'avère aussi que cet environnement possède un éditeur de macros relativement simple d'utilisation. Notre nouvelle méthode de création des volumes de contraintes a ainsi été implémentée dans la macro *SVR* grâce au langage objet *Visual Basic Applications (VBA)* qu'utilise l'éditeur d'*AutoCAD2000*®.

Le modèle de voûte solaire que nous venons d'illustrer par les figures précédentes relève d'une approche basée sur une forte volonté de maîtriser l'ensemble des paramètres solaires que sont l'épaisseur apparente du soleil, les heures solaires, les heures légales, la visualisation en trois dimensions des trajectoires solaires, la possibilité d'y placer des caméras et des masques environnants, etc.

2.1 Présentation et caractéristiques de l'outil *SVR*

L'outil que nous avons développé pour répondre simultanément aux contraintes solaires et visuelles avec une même interface, présente des avancées dans le domaine de la modélisation inverse telle qu'elle fut exposée dans l'état de l'art de cette recherche. Il a comme premier apport, ce couplage de deux types de contraintes *a priori* assez éloignées (voir les approches différentes des deux thèses citées dans l'état de l'art – [Siret 97] et [Nivet 99]). Notre outil tente de pallier certaines erreurs des modèles actuels d'ensoleillement (direct ou inverse) dues à la négligence de certaines données physiques (§ 2.1.2.2). Il informe aussi les concepteurs de la précision des calculs de ce modèle par rapport à d'autres modèles d'ensoleillement.

Dans un premier temps nous évoquerons la précision des modèles d'ensoleillement actuels (§ 2.1.1), puis nous aborderons les notions propres à notre outil (§ 2.1.2) et enfin, la méthode de calcul des volumes de contraintes solaires et visuelles (§ 2.1.3).

2.1.1 La précision des modèles d'ensoleillement

La précision des modèles d'ensoleillement actuels est très convenable pour la majorité des calculs ou tracés d'ensoleillement dont un architecte a besoin dans sa pratique. Pour autant, des erreurs de précision peuvent en s'additionnant être, dans certains cas, dommageables pour le projet architectural. Lorsque la précision des modèles est primordiale pour la conception architecturale ou pour l'analyse *a posteriori* du projet d'architecte, mieux vaut en informer ce dernier. Les cas de mise en scène d'un lieu par des jeux d'ombre et de lumière à des instants précis de l'année (scénographie, muséographie, paysagisme, etc.) ou la recherche d'effets solaires sur des édifices historiques (archéologie, histoire de l'architecture, etc.) sont des situations de haute précision où la qualité des conclusions dépend entièrement du modèle d'ensoleillement.

La Terre tourne autour du Soleil en plus de 365 jours par an. La première erreur de calcul vient de là. Les années bissextiles rattrapent ce retard, mais ces années-là, la plupart des modèles d'ensoleillement ne tiennent pas compte de l'ajout d'un jour dans le calendrier de l'année civile et donc de la position apparente du soleil ce jour artificiel qu'est le 29 février. Ces années-là, la plupart des modèles d'ensoleillement donnent la même date d'équinoxe de printemps que pour l'année précédente ou suivante. Ce qui est

faux. Ce type d'erreur est symptomatique et assez compréhensible. Il n'est pas lié directement au mouvement de la Terre autour du Soleil, mais à notre calendrier grégorien (année civile). Il sera abordé dans la section 2.1.1.2. En revanche, les erreurs liées aux variations des mouvements terrestres par rapport au Soleil durant l'année tropique (année solaire) sont plus complexes et demandent plus d'attention. Ils sont abordés dans la section suivante.

2.1.1.1 Les variations des trajectoires apparentes du soleil à moyen terme

L'inclinaison des rayons solaires sur Terre est directement liée à la position de la Terre par rapport au Soleil et aux autres astres. Sans repère, notre planète paraît immobile. Ainsi, sur Terre, comme dans le système solaire, le Soleil est notre repère espace-temps. La Figure 2-3 montre combien la qualification des saisons et le caractère cyclique de ces dernières semblent plus évidents lorsque l'œil humain est "projeté" au-delà de la trajectoire terrestre annuelle. En faisant cet effort de représentation, notre cerveau appréhende mieux les positions relatives de la Terre face au Soleil. Une telle représentation nous permet de comprendre l'importance de l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à la normale du plan de l'écliptique (i.e. le plan de la trajectoire terrestre). Cette inclinaison de $23^{\circ} 26'$ est aussi, par conséquent, l'angle entre l'équateur terrestre et le plan de l'écliptique.

Nous considérons comme "mineure" l'influence, sur le calcul de l'ensoleillement, des phénomènes terrestres et astronomiques suivants : la polhodie (déplacement lent des pôles, relié aux repères terrestres et dû notamment à l'oscillation Chandlerienne et à la dérive lente des continents), le lent mouvement de rotation de l'orbite terrestre par rapport aux étoiles (période de 130 000 ans), le ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre (environ une seconde tous les 600 ans) et la nutation de la Terre (mouvement de l'axe des pôles terrestres d'une amplitude maximale de $9''$ de degré, provoqué par la précession de la lune). Dans ce dernier cas, la lune subit le même type de précession solaire que la Terre (voir explication ci-après de cette perturbation due à l'attraction du soleil). Cette précession de la lune se répercute sur celle de la Terre par ce phénomène de nutation. La période de la nutation étant en moyenne de 18,7 années, cela représente un basculement de l'axe des pôles d'un maximum de $0,0025^{\circ}$ ($9''$) dans un intervalle de temps de 18,7 ans, soit pour une ombre portée de 10 mètres et une inclinaison des rayons solaires de 60° , une différence de 1 mm. Autrement dit, l'erreur d'un tracé solaire (en coupe par exemple) est de l'ordre de 0,01 % au maximum (entre deux dates éloignées d'environ 18,7 ans).

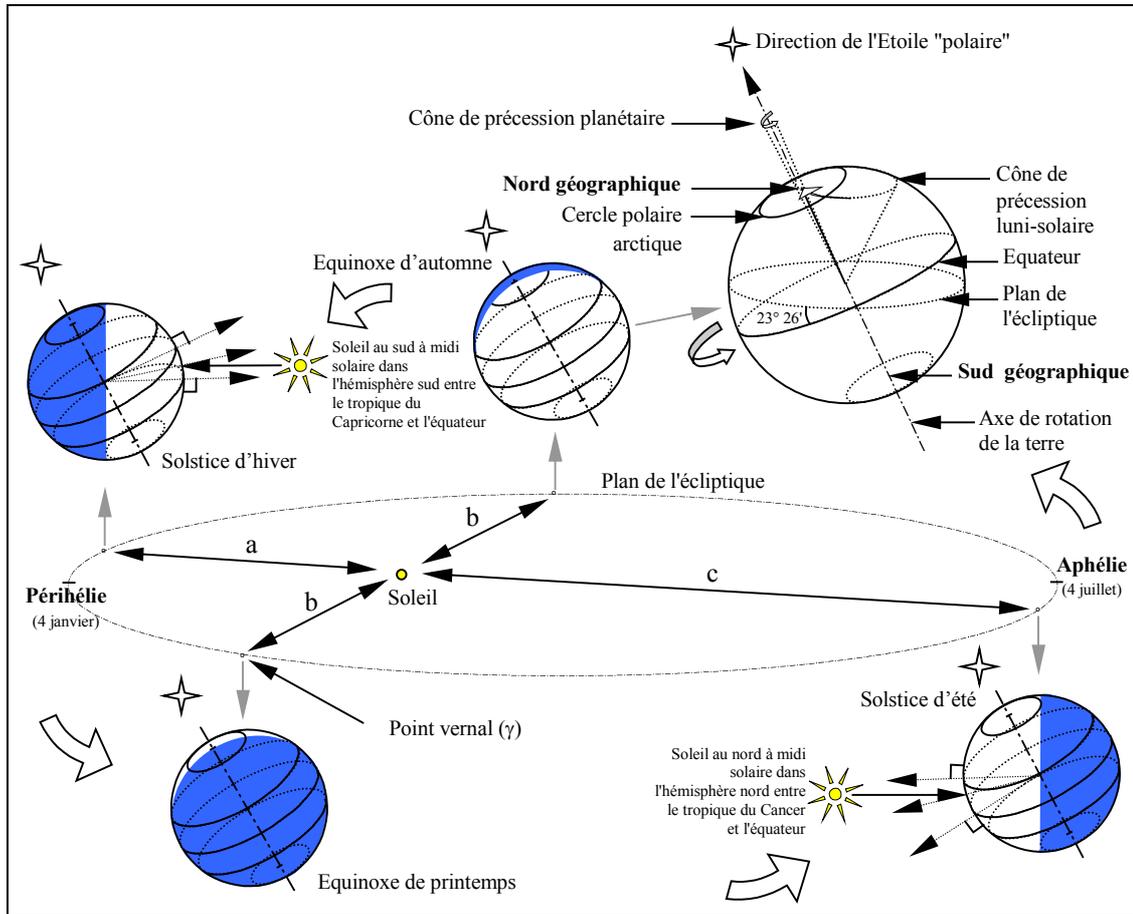


Figure 2-3 : Variation et influence des mouvements terrestres de périodes différentes et de la distance Terre-Soleil sur le calcul de l'inclinaison des rayons solaires durant le cycle annuel. Au périhélie, la distance a' entre la Terre et le Soleil est la plus courte de l'année : 147 103 311 km tandis que la distance la plus longue de l'année est à l'aphélie c' : 149 597 870 km ($a' < a < b < c < c'$). Dans l'hémisphère boréal, la puissance des rayons solaires arrivant sur une façade verticale sud, à midi (azimut = 0°), est plus importante en hiver (et en automne) qu'en été (et au printemps), car ces rayons sont plus proches de l'horizon terrestre (donc de la normale à la façade) en hiver qu'en été. Autre idée reçue, le soleil est au sud à midi solaire, dans l'hémisphère boréal (respectivement au nord dans l'hémisphère austral) quelles que soient la date de l'année et la latitude du lieu. Ceci est faux pour les latitudes comprises entre les deux tropiques, où le phénomène s'inverse durant une partie plus ou moins longue de l'année (moitié de l'année au nord, et l'autre moitié de l'année au sud pour l'équateur).

Contrairement aux phénomènes précédents, la précession planétaire et la précession luni-solaire sont des mouvements astronomiques pouvant être remarqués sur le moyen et long terme. Si nous voulions être très précis, nous dirions qu'ils sont potentiellement des sources d'erreurs de calculs solaires pour les modèles d'ensoleillement actuels. La Terre étant aplatie aux pôles et renflée à l'équateur, la précession luni-solaire est due à la différence des forces exercées sur cette déformation du volume terrestre, le "bourrelet"

équatorial. La lune et le soleil forment ainsi un couple de forces qui "pèsent" sur ce bourrelet, tendant à rapprocher l'équateur du plan de l'orbite terrestre, ce qui transforme la rotation régulière de notre planète en un pseudo mouvement de toupie (cf. Figure 2-3). L'extrémité nord de l'axe de rotation de la Terre ne pointe donc pas toujours dans la même direction. Au lieu de se tenir en position fixe en direction de l'Etoile "polaire" (position actuelle), il se meut d'une manière lente (période d'environ 26800 ans), décrivant un pseudo mouvement conique dont le sommet est le centre de la Terre, et le $\frac{1}{2}$ angle l'angle d'inclinaison de l'écliptique (entre $21^{\circ} 59'$ et $24^{\circ} 36'$ selon la précession planétaire décrite plus loin). Ce mouvement est appelé précession luni-solaire. Malgré sa périodicité très éloignée, il a pour conséquence de modifier progressivement la direction de l'axe des pôles terrestres mais aussi celle du point vernal (position de la Terre aux équinoxes, cf. Figure 2-3). Ainsi la date du printemps est tous les ans plus précoce (20 minutes plus tôt, hors de l'effet de changement du calendrier civil pour les années bissextiles).

Quant à la précession planétaire, il s'agit d'un effet de toupie de sens inverse à celui de la précession luni-solaire. C'est un mouvement conique dont le sommet est le centre de la Terre (cf. Figure 2-3). Elle est provoquée par les forces de gravitation des planètes du système solaire. L'axe de rotation de la Terre, tout en restant perpendiculaire au plan de l'équateur, décrit un cône. Ainsi, l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur terrestre (angle de $23^{\circ} 26'$ actuellement) n'est pas stable. Il ne s'agit que d'une valeur moyenne et temporaire, tandis qu'à long terme, l'écart oscille entre $21^{\circ} 59'$ et $24^{\circ} 36'$ avec une périodicité d'environ 41000 ans. De nos jours, il est descendant, mais ne dépassera jamais les $21^{\circ} 59'$. Actuellement, les rayons solaires diminuent de $0,47''$ de degré par an, mais de moins en moins tous les ans. Ils stagneront autour de $21^{\circ} 59'$ (dans quelques 9300 ans) puis augmenteront jusqu'à $24^{\circ} 36'$. La précession planétaire s'ajoute donc au phénomène de la précession luni-solaire, de sorte qu'elle gêne l'axe terrestre dans son mouvement régulier, transformant le cercle qu'il devrait décrire en une spirale s'élargissant ou diminuant au gré de l'obliquité. La combinaison de la précession planétaire, de la précession luni-solaire (et de la nutation) entraîne donc l'axe de rotation terrestre dans un mouvement de pseudo spirale autour du centre de la terre. Un calcul rapide montre que l'influence de la précession planétaire se traduit pour une ombre portée de 10 mètres et une inclinaison des rayons solaires de 60° , par une différence de 0.08 mm tous les ans. A l'échelle humaine cette variation peut donc être négligée mais pour des travaux de recherches d'historiens de l'architecture ou d'archéologues, cela peut représenter une erreur de l'ordre de 1 % entre un tracé solaire au Moyen Age et le même de nos jours.

Nous le verrons plus tard, notre modèle ne règle pas ce type de problèmes mais en informe les concepteurs, ce qui constitue une première étape pour pallier ces variations solaires. Il est alors possible, connaissant ce système de variations, de modifier manuellement ou par le calcul, l'inclinaison des rayons solaires. Ainsi, nous parlons à l'aube du XXI^{ème} siècle d'une inclinaison des pôles de 23° 26', alors que durant la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, les ouvrages traitant de l'ensoleillement parlaient encore d'une inclinaison de 23° 27'. Ceci est le signe qu'à moyen terme, ces variations sont identifiables.

2.1.1.2 D'autres erreurs potentielles de calcul de l'ensoleillement

D'autres phénomènes, hors des variations du système solaire, créent des erreurs de simulations solaires. Ils restent négligeables. Nous ne chercherons donc pas à les prendre en compte dans notre propre modèle d'ensoleillement, mais nous proposons de les aborder rapidement afin de les avoir à l'esprit et d'affiner nos calculs le cas échéant. Il s'agit de problèmes liés aux années bissextiles, aux dates d'équinoxes, au non-parallélisme des trajectoires apparentes du Soleil, etc. La longitude des lieux est prise en considération dans les modèles d'ensoleillement uniquement pour pouvoir comparer la hauteur du soleil, à une heure civile et une date données, pour deux lieux de même latitude mais de longitudes différentes. Or, en terme d'inclinaison des rayons solaires, pour une date et une heure solaire identiques, l'ensoleillement est très légèrement différent selon la longitude du lieu. Ainsi, entre deux lieux diamétralement opposés sur le cercle terrestre d'une même latitude (longitudes opposées), les rayons solaires pour une date identique et une heure solaire identique (le midi solaire par exemple) n'ont pas la même inclinaison. Pour le deuxième lieu, l'inclinaison des rayons a déjà diminué ou augmenté selon la date, de la moitié de la diminution (ou de l'augmentation) quotidienne du premier lieu, puisque la Terre n'a pas seulement tourné sur elle-même durant ces douze heures qui "séparent" ces deux points ; elle a aussi continué sa révolution autour du soleil. Elle a donc modifié sa position par rapport au soleil, d'où une inclinaison des rayons solaires différente. Cela représente une erreur potentielle maximale (durant les équinoxes) de 0,19° (0° 11' 30"). Mais cela reste négligeable comparé aux dates souvent approximatives des solstices et des équinoxes (donc à l'ensemble des dates solaires annuelles) que les modèles d'ensoleillement prennent en compte. Ainsi par exemple, la date de l'équinoxe du printemps est souvent prise arbitrairement le 21 mars même si cette année là, il tombe le 20 mars. D'où une erreur sur l'inclinaison solaire deux fois plus importante (0,38°) pour un même lieu. De plus, cette date ne tient pas compte, des

années bissextiles qui ajoutent un jour à l'année civile tous les quatre ans (en moyenne), décalant ces années là, les dates solaires des modèles informatiques ou analogiques (*Girasol*, *Gnomon*, *Diagramme Solaire Horizontal*, etc.) pour lesquels sont données uniquement des dates civiles. Autre phénomène non pris en considération dans les modèles informatiques, le non-parallélisme des trajectoires apparentes du Soleil implique une non-symétrie entre les azimuts de lever et de coucher du soleil (Figure 2-4, Figure 2-5 et Figure 2-6). Les trajectoires apparentes du Soleil ne sont donc pas une succession d'arcs de cercle parallèles mais une spirale sans fin.

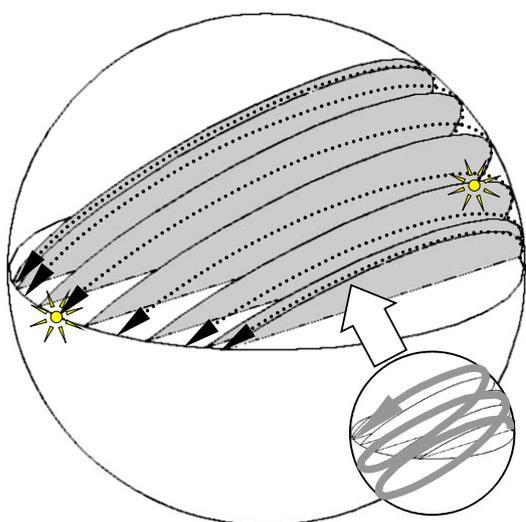


Figure 2-4 : Non-parallélisme des trajectoires solaires apparentes sur la voûte céleste. Elles se suivent sur une spirale en boucle évoluant entre les deux solstices. Pour l'exemple, à l'équinoxe de printemps, le 21 mars, si le soleil se lève à l'est, il ne se couche pas ce jour-là exactement à l'ouest, mais légèrement plus au nord, alors qu'aux solstices, l'axe lever-coucher du soleil est considéré comme parallèle à l'axe est-ouest.

Nota : Pour ces trois figures, le non-parallélisme des trajectoires solaires apparentes est largement exagéré pour rendre plus compréhensible cette notion.

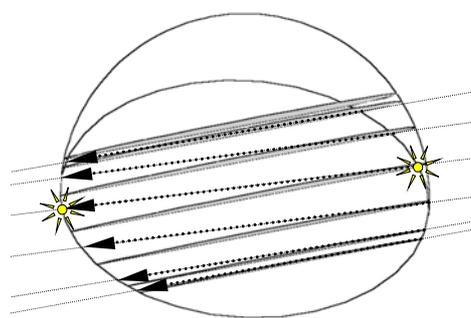


Figure 2-5 : Axonométrie de l'hémisphère céleste et trajectoires solaires apparentes à l'équinoxe de printemps. Comme à l'équinoxe d'automne, les trajectoires solaires sont considérées à tort comme parallèles (Figure 2-6).

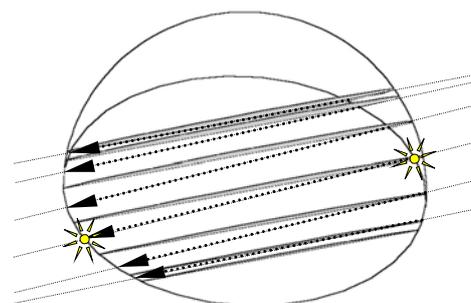


Figure 2-6 : Axonométrie de l'hémisphère céleste et trajectoire solaire apparentes à l'équinoxe d'automne.

Une autre erreur assez courante en simulation de l'ensoleillement est la non-prise en compte de la différence entre nord géographique et nord magnétique lors de l'implantation, à la boussole, de certains dispositifs solaires. Certes, de plus en plus souvent, les architectes travaillent d'après des plans numérisés, issus des collectivités

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

territoriales, qui ont pour repère le nord vrai (géographique). Mais nombre de dispositifs architecturaux sont conçus sans repères liés à l'environnement extérieur puis implantés *in situ* à la boussole, laquelle indique évidemment le nord magnétique. Les panneaux solaires ainsi implantés sont donc mal optimisés. Pour l'année 2000, à Nantes, la déclinaison magnétique était d'environ 3°. En Islande le sud magnétique (indiqué par la boussole) correspond au sud-est vrai (géographique, indiqué par les cartes), tandis qu'en Sibérie orientale il correspond au sud-ouest vrai. Ceci tient au fait qu'actuellement le nord magnétique se trouve à l'ouest vrai du Groenland, dans les îles arctiques du Canada. Il évolue toujours, selon le mouvement complexe du noyau externe de la Terre (la couche de matière en fusion située entre 2 800 et 5 000 km sous l'écorce terrestre).

2.1.2 Les notions propres à l'outil *SVR*

Notre outil calcule un modèle de voûte solaire faisant apparaître les trajectoires solaires apparentes les 21 de chaque mois, mais aussi les positions du soleil toutes les heures les 1^{er}, 10 et 21 de chaque mois afin de ne pas surcharger les trajectoires (cf. Figure 2-12). Pour les latitudes de l'hémisphère boréal, comprises entre 42° nord et 55° nord, la macro ajoute au modèle, des périodes solaires élastiques dont nous précisons la nature à la section suivante.

L'interface de notre macro (Figure 2-7) s'ouvre dans l'environnement *AutoCAD* à partir du menu de ce modeleur (*Outils/Macro_VBA/Charger_projet...*) ou directement à partir d'une barre d'une dizaine d'icônes *SVR* que le concepteur charge définitivement depuis les fichiers attachés à l'outil.

Les figures suivantes comparent les résultats des trois choix possibles de calcul de voûtes solaires : simple, limité par le masque propre à la base de contrainte, ou limité par les masques environnants. Pour les trois cas, la voûte solaire étant un objet solide, il est possible d'en exploiter toutes les propriétés comme tout solide 3D de l'environnement du modeleur *AutoCAD* (section, rendu filaire ou en lignes cachées ou *Gouraud*, etc.).

Dans le premier cas (Figure 2-8), la macro se charge de faire pivoter la voûte solaire selon la latitude du lieu étudié et de la limiter à ses trajectoires de jour (au-dessus de l'horizon).

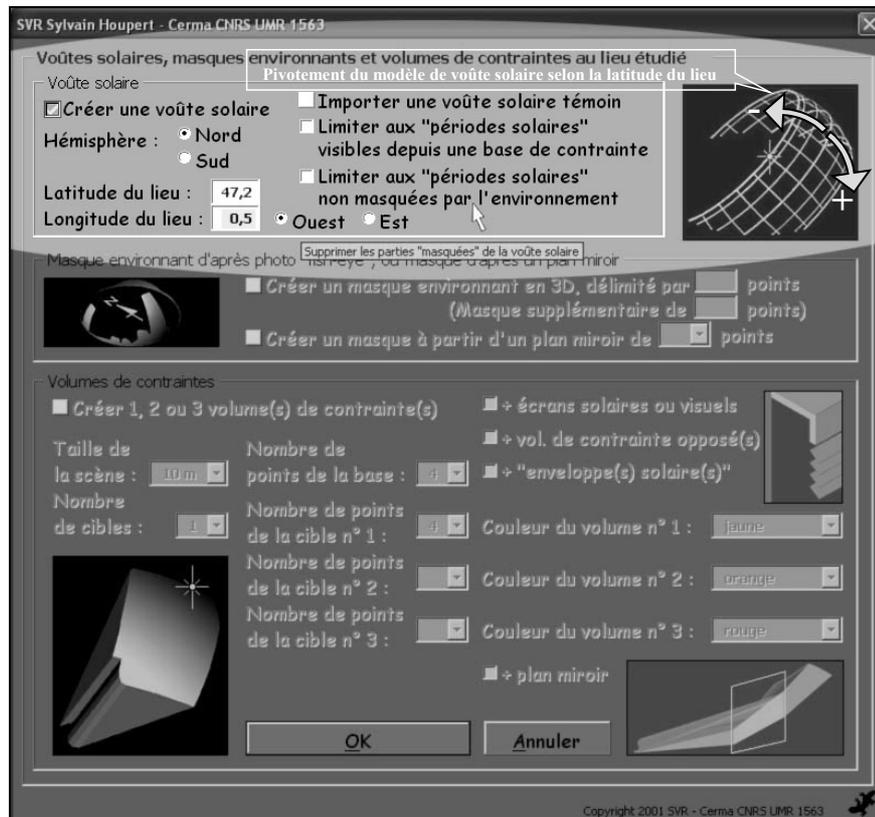


Figure 2-7 : Interface du prototype de logiciel *SVR*. Dans une première partie, il est demandé au concepteur de rentrer les données suivantes : choix de l'hémisphère (latitude nord ou sud), latitude et longitude de la scène (en degrés), choix de la direction de la longitude (ouest ou est), présence d'un plan de base découpant la voûte solaire (calcul des "périodes solaires visibles uniquement depuis une base de contrainte") et présence de masques dus à l'environnement. Il est aussi proposé au concepteur d'importer depuis une bibliothèque de fichiers, un modèle de voûte solaire supplémentaire, à la manière d'un calque témoin, lui permettant, le cas échéant, de vérifier certaines données effacées par la "limitation" du premier modèle.

Dans le second cas (Figure 2-9), en plus de cela, elle demande au concepteur de saisir trois points de la base afin de définir un plan de section de la voûte solaire et de garder uniquement le côté auquel appartient la normale de ce plan.

Dans le troisième cas (Figure 2-10), il est demandé au concepteur de saisir l'ensemble des points significatifs du masque solaire (contour de la silhouette masque) à partir d'une image *fish-eye* du lieu (lentille photographique dirigée vers le zénith). Nous développons une méthode similaire dans la section 2.1.2.3 où nous présentons la projection des masques sur la voûte céleste depuis une ou plusieurs images *fish-eye*. Elle permet d'obtenir un masque solide projeté sur le dôme céleste. La multiplication

des masques est alors possible afin de comparer certaines situations ou de lire les durées d'ensoleillement potentiel d'un point.

Evidemment, pour réaliser de telles images très grand angle, il faut que l'environnement et la base de contrainte ne soient pas virtuels. Il faut que le relief, la végétation et le bâti environnant existent. Il faut aussi que la base de contrainte soit à hauteur d'homme ou au niveau d'un étage existant et non pas à une altitude inaccessible (projet, difficulté d'accès...). Dans le cas présent (Figure 2-10), le résultat est la partie des trajectoires apparentes du soleil qui ne sont pas cachées par l'environnement, pour un point donné. La voûte solaire ainsi obtenue est unique puisque qu'elle est découpée par un masque environnant unique.

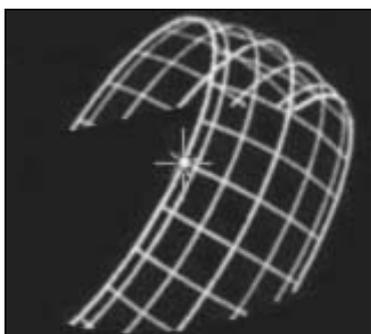


Figure 2-8 : Modèle de voûte solaire simple

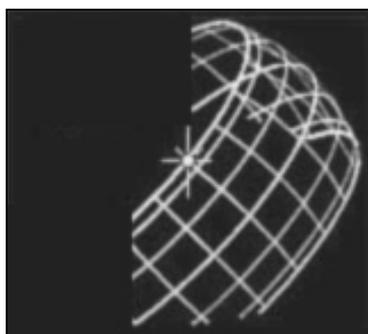


Figure 2-9 : Modèle de voûte solaire limité par le plan (vertical ici) de la base de contrainte (ombre propre de la base)



Figure 2-10 : Modèle de voûte solaire limité par les masques de l'environnement extérieur

2.1.2.1 Les périodes solaires élastiques

Afin de permettre une lecture en heures légales des voûtes solaires, nous avons employé dans notre modèle informatique, la notion de "périodes solaires élastiques" qui reprend l'idée de "temps élastique" que D Siret avait développé dans sa thèse en 1997 [Siret 97]. Ainsi, notre modèle prend en compte "l'élasticité" de la notion de début-milieu-fin de matinée et de début-milieu-fin d'après-midi. Les quatre saisons de l'année solaire se superposent deux à deux (printemps-été et automne-hiver), et les journées plus ou moins longues de ces saisons sont divisées en six périodes : trois de même durée le matin et trois de même durée l'après-midi. Or, pour éviter des erreurs de confusion entre heures

solaires et heures civiles (temps légal) les périodes solaires élastiques devaient prendre en compte le "décalage" entre le midi légal et le midi solaire. Le midi légal étant décalé à l'est par rapport au sud (midi solaire) de deux heures en été (heure d'été) et d'une heure en hiver (heure d'hiver), les périodes de l'après-midi "civile" sont toujours plus longues que les périodes de la matinée quelle que soit la saison. Pour la latitude 47° nord par exemple (cf. Figure 2-11), le modèle *SVR* divise la matinée en 3 x 2 heures le 21 juin, en 3 x 1 h ½ le 21 mars et le 21 septembre, et en 3 x 1 h le 21 décembre. De même, il divise l'après-midi en 3 x 3 h 20 le 21 juin, en 3 x 2 h ½ le 21 mars et le 21 septembre, et en 3 x 1 h 45 le 21 décembre. Ce sont ces périodes à géométrie variable que nous appelons "périodes solaires élastiques" (Tableau 2-1).

Elles sont "solaires" dans le sens où elles divisent le nombre d'heures de jour (et non de nuit) d'une journée donnée. Elles sont "élastiques" puisqu'elles représentent un nombre d'heures d'ensoleillement potentiel, plus ou moins dilaté.

Périodes solaires élastiques		Dates		Du 21 décembre au...	... 21 mars au...	... 21 juin au...	... 21 septembre au...	... 21 décembre au...
Matinée	Début de matinée	8 h – 9 h	6 h – 7 h 30	4 h – 6 h	6 h – 7 h 30	8 h – 9 h		
	Milieu de matinée	9 h – 10 h	7 h 30 – 9 h	6 h – 8 h	7 h 30 – 9 h	9 h – 10 h		
	Fin de matinée	10 h – 11 h	9 h – 10 h 30	8 h – 10 h	9 h – 10 h 30	10 h – 11 h		
Après-midi	Début d'après-midi	11 h – 12 h 40	10 h 30 – 13 h	10 h – 13 h 20	10 h 30 – 13 h	11 h – 12 h 40		
	Milieu d'après-midi	12 h 40 – 14 h 20	13 h – 15 h 30	13 h 20 – 16 h 40	13 h – 15 h 30	12 h 40 – 14 h 20		
	Fin d'après-midi	14 h 20 – 16 h	15 h 30 – 17 h	16 h 40 – 20 h	15 h 30 – 17 h	14 h 20 – 16 h		

Tableau 2-1 : Exemple de "périodes solaires élastiques" en heures solaires, à la latitude 47° nord et longitude 0°. Notre macro retire automatiquement 4 minutes par degré de longitude ouest (360°/24 h) ou en ajoute 4 par degré de longitude est. Ainsi, le concepteur saisit, sur notre modèle (Figure 2-11 et Figure 2-12), des heures solaires qui varient selon la latitude et la longitude du site, mais qui correspondent bien à des périodes civiles constantes, quel que soit le lieu (fin de matinée pour le troisième tiers de la matinée jusqu'à midi légal, début d'après-midi pour le premier tiers de l'après-midi à partir de midi légal, etc.).

Plus la latitude est grande, plus les périodes solaires élastiques seront dilatées entre le 21 décembre et le 21 juin. Pour les latitudes européennes comprises entre 42° nord (Corse) et 55° nord (Allemagne), notre modèle propose systématiquement la division des matinées et des après-midi en trois périodes de même durée. Pour les autres latitudes, l'outil *SVR* ne propose pas actuellement de périodes solaires. Il fut un temps envisagé d'ajouter, pour certaines latitudes, une période solaire élastique appelée "soirée" pour le printemps et l'été. Ce concept n'a actuellement pas abouti sur un choix définitif de programmation de l'outil. Notons l'intérêt d'un modèle de voûte solaire ayant la double représentation, des heures solaires d'une part et des périodes élastiques d'autre part. En effet, pour un même fuseau horaire, le concepteur doit, avec notre outil, pouvoir sélectionner en heures civiles une période du type, la "fin de matinée", sans pour autant traduire en heures solaires ce qui lui semble être la limite avec le début d'après-midi. Certes notre modèle est programmé pour donner arbitrairement, en heures solaires, le midi légal à 10 h en été et 11 h en hiver (cf. Figure 2-11) auquel sont ajoutées ou retirées les minutes dues à la longitude du lieu, mais le concepteur en est informé.

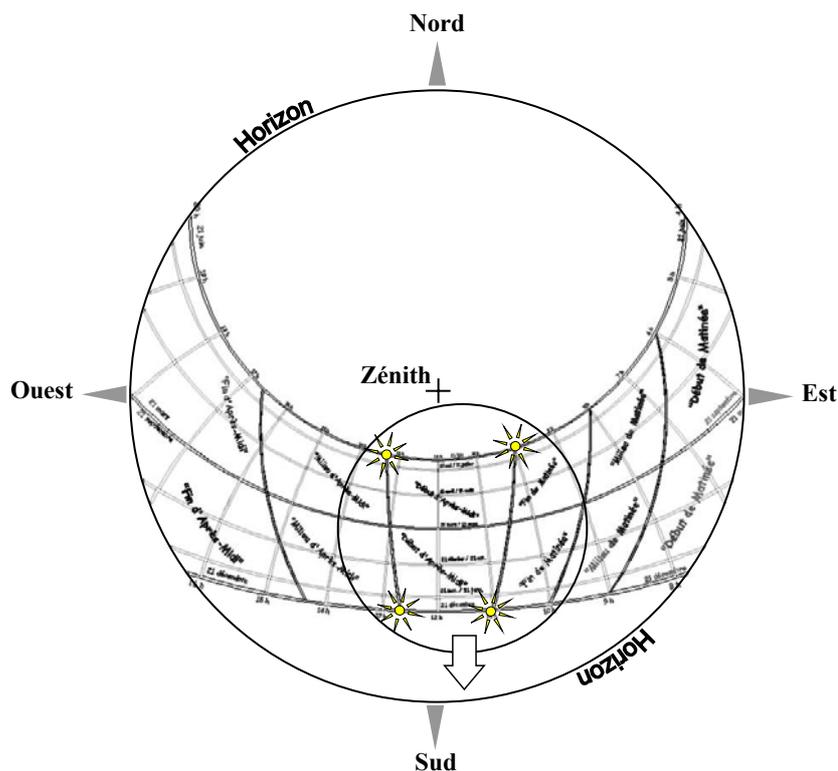


Figure 2-11 : Projection stéréographique du modèle de voûte solaire *SVR* (ici, latitude $47,2^\circ$, longitude 0°). Exemple de découpage des journées en six périodes solaires élastiques, par saison (superposition du printemps et de l'été, de l'automne et de l'hiver).

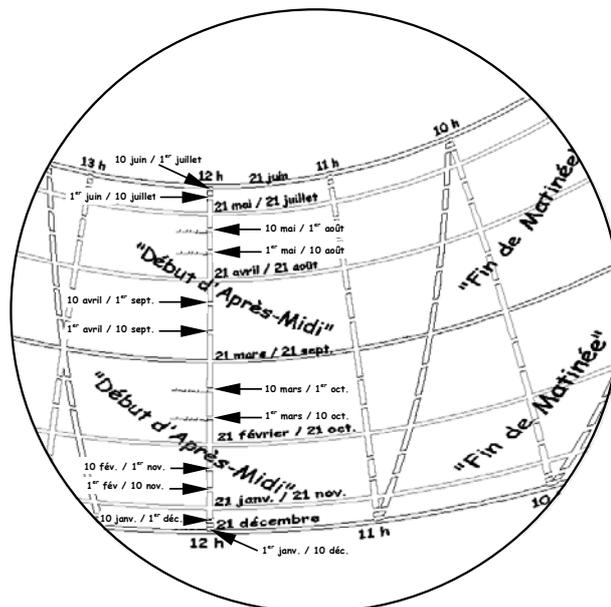


Figure 2-12 : Zoom sur la période de début d'après-midi et sur les positions solaires aux 1^{er}, 10 et 21 de chaque mois.

Le concepteur aura donc la possibilité de choisir une fin de matinée plus tardive s'il le souhaite. Nous ne prétendons pas coller à la réalité socio-culturelle européenne ni même française en posant arbitrairement la fin de la matinée à midi (heure civile), car nous sommes conscients qu'elle est vraisemblablement pour la plupart des français, située au-delà de midi. Une enquête mériterait d'être réalisée sur un panel large de personnes afin d'affiner les heures de nos périodes élastiques et ainsi pouvoir prétendre être représentative d'un découpage plus subjectif de la journée solaire.

Partant de l'hypothèse que le changement entre heure d'été et heure d'hiver n'est pas pris en compte par les usagers et les concepteurs lorsqu'ils s'interrogent sur l'ensoleillement, notre modèle de voûte solaire intègre une valeur moyenne pour les périodes solaires autour des dates des équinoxes. Ainsi, les périodes élastiques passent progressivement de deux heures de décalage en été à une heure en hiver par rapport aux heures solaires, et évitent une "cassure" des périodes solaires, difficilement compréhensible aux dates de "changement d'heure", lesquelles diffèrent d'ailleurs d'une année à l'autre. De ce fait, nous pouvons dire que la précision de nos périodes solaires est de l'ordre de la demi-heure autour de ces deux dates et dans le cas le plus défavorable. Ce niveau de précision est compatible avec les heures données lors du test évoqué plus haut, sur une trentaine de personnes (heures ou demi-heures uniquement – cf. Annexes). Or, nous rappelons qu'il s'agit de périodes civiles larges qui ne remplacent en aucune façon les heures

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

solaires extrêmement précises. Elles ont pour but d'aider le concepteur dans sa recherche de cibles de contraintes en positionnant le midi légal sur les trajectoires solaires et en lui proposant sur la journée solaire, deux fois trois périodes, de mêmes durées, quelle que soit la date de l'année. Il est ainsi conseillé aux concepteurs de commencer par simuler une contrainte, de manière large, à partir d'une période élastique du type "du 10 octobre au 1^{er} mars, en début d'après midi", puis d'affiner cette cible par pas de temps d'une demi-heure.

Pour être complet sur les heures civiles, il convient de tenir compte de la fluctuation de la durée du jour solaire durant l'année. Cette dernière est due au fait que la trajectoire de la Terre autour du Soleil n'est pas circulaire mais elliptique et décentrée par rapport au Soleil (cf. Figure 2-3), et que sa vitesse de révolution varie. Ainsi la durée d'une journée de 24 heures, n'est qu'une approximation qui ne prend pas en considération *l'équation du temps* (cf. Figure 2-13).

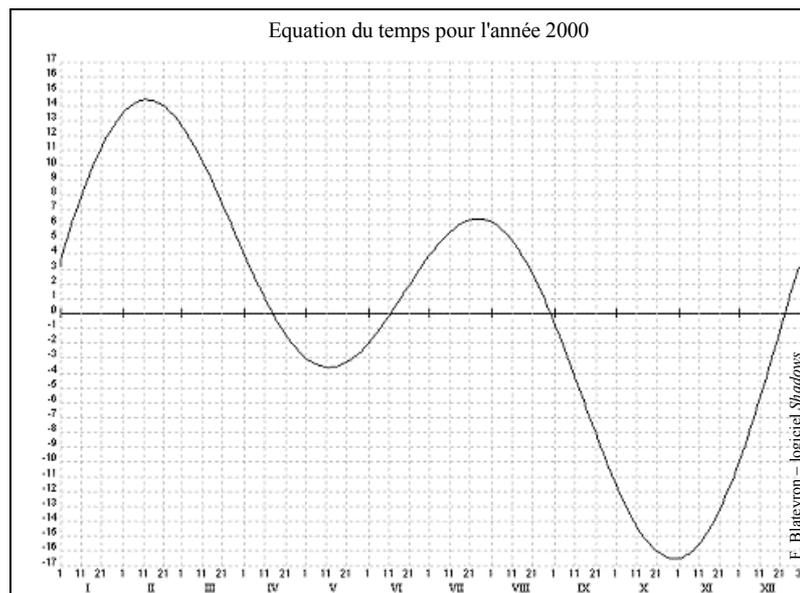


Figure 2-13 : Equation du temps (E_t) annuelle montrant la fluctuation des minutes (le 1^{er}, le 11 et le 21 de chaque mois) à ajouter ou à soustraire aux heures civiles (H_c) pour obtenir des heures solaires (H_s). Pour être complet, cette traduction H_c/H_s doit prendre en compte la correction due à la longitude ouest ($C_l > 0$) ou longitude est ($C_l < 0$) et le changement d'heure (C_h) dans certains pays (heure d'été ou d'hiver).

$$\boxed{H_s = H_c - E_t - C_l - C_h}$$

Nota : $C_l = (Longitude \times 24)/360$. $C_h = 2$ h en été et $C_h = 1$ h en hiver (en France).

Ajoutons que la non-prise en compte de *l'équation du temps* (Figure 2-13) pour traduire une heure légale en heure solaire à la minute près, n'est pas une source d'erreur supplémentaire pour notre modèle. Cette *équation du temps* n'augmente pas notre niveau de précision puisqu'elle varie actuellement de plus ou moins 16 minutes autour d'une heure solaire par exemple (cf. Figure 2-14), pour une erreur potentielle d'une demi-heure dans notre modèle.

Les heures solaires étant d'une précision géométrique, le concepteur aura toujours la possibilité, de les traduire en heures légales en y soustrayant successivement : les minutes dues à *l'équation du temps*, celles dues à la longitude du lieu, et une ou deux heures selon la saison (heure d'été ou heure d'hiver). Les résultats auront alors une précision à plus ou moins une minute. Par exemple, pour la ville de Nantes de longitude 1,5° ouest, la contrainte du type "ne pas voir le soleil du 21 juin au 21 juillet, de midi à 15 h" en heures légales se traduira par : "ne pas voir le soleil du 21 juin de 10 h 03 à 13 h 03, au 21 juillet de 9 h 48 à 12 h 48" en heures solaires. Remarquons que cette cible "du 21 juin au 21 juillet, de midi à 15 h (civiles)" est donc, dans l'absolu (*équation du temps*), différente du "21 mai au 21 juin, de midi à 15 h" qui devient en heures solaires : "du 21 mai de 9 h 57 à 12 h 57 au 21 juin de 10 h 03 à 13 h 03", alors qu'elles sont considérées comme identiques (symétriques par rapport au solstice d'été) dans notre modèle et dans la plupart des modèles de simulation solaire.

Nous proposons aussi, d'utiliser le module d'édition des coordonnées solaires du modèleur *AutoCAD* (fonctionnalité – *Vue/Rendu/Lumières/Source distante/Créer/Calcul_orientation_du_soleil/Situation_géographique/Vecteur_de_source_de_lumière/x:/y:/z:*) puis de rentrer directement sur la ligne de commande les coordonnées des points de la cible solaire.

Comme pour la plupart des outils décrits dans la première partie consacrée à l'état de l'art, l'utilisateur de notre outil peut aussi travailler en heures solaires.

Les cibles des volumes de contraintes du type de ceux ci-dessous (Figure 2-15) n'étant pas des polygones (parties sinusoïdales), notre outil ne peut calculer de tels volumes de contraintes dont les cibles sont des heures civiles extrêmement précises. Notre méthode de calcul des volumes de contraintes (développée § 2.1.3) est générique pour des contraintes solaires et visuelles. Or, ces dernières ne présentent que des cibles polygonales. Le traitement de surfaces sinusoïdales n'étant pas commun aux deux types de contraintes, notre choix fut donc de ne prendre que des valeurs moyennes pour les heures civiles, afin de n'avoir que des cibles polygonales.

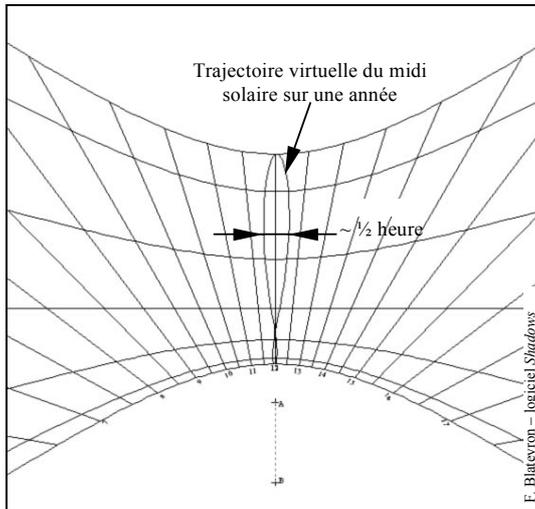


Figure 2-14 : *Equation du temps* appliquée aux heures des trajectoires solaires (voûte solaire, *Gnomon* ou cadran solaire, ici). Exemple du pseudo midi solaire (midi légal sans les composantes C_l et C_h – Figure 2-13). La fluctuation maximale est de plus ou moins 16 minutes vers le 10 février – 1^{er} novembre. Pour les autres heures du diagramme, seules les valeurs moyennes sont prises en compte pour ne pas surcharger la figure. Elles correspondent aux heures solaires.

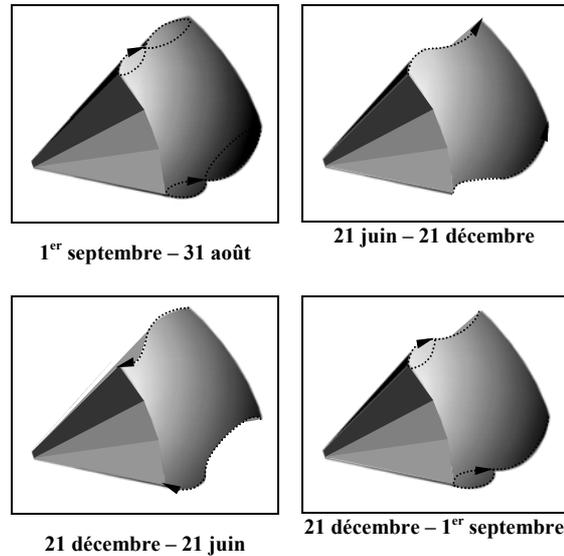


Figure 2-15 : Extrapolation de 4 volumes de contraintes solaires prenant en compte la variation des heures civiles durant l'année (*équation de temps*). Pour des cibles théoriquement identiques (périodes citées sous chaque figure, entre midi et 15 h), les volumes seraient différents. Les surfaces latérales des volumes de contraintes seraient de nature sinusoïdales.

Les seules heures civiles considérées dans notre modèle sont donc les périodes élastiques dont les heures tiennent compte de la longitude du lieu et du changement d'heure entre l'été et l'hiver (composantes C_l et C_h – Figure 2-13), mais pas de *l'équation du temps*.

2.1.2.2 L'épaisseur apparente du soleil

Abordons maintenant la notion de pénombre, largement exploitée dans le champ de l'imagerie de synthèse, de la réalité virtuelle et de l'éclairagisme. Les informaticiens soucieux d'obtenir des rendus de scènes virtuelles sous forme d'images numériques hyper-réalistes se sont intéressés depuis les années 80 [Nishita et Nakamae 85], [Nishita, Okamura et Nakamae 85] et [Péroche 1991] à ces ombres qui deviennent floues à mesure qu'elles s'éloignent d'un ensemble de sources lumineuses.

Il peut s'agir par exemple de traiter une ombre (ou une tache lumineuse) aux contours hétérogènes car composé de la superposition de plusieurs ombres provenant de plusieurs sources lumineuses (ensemble de spots, reflets, etc.). Or, si cette notion de pénombre est bien prise en compte dans certains modèles actuels d'éclairage artificiel, elle n'est pas considérée, à notre connaissance, dans les modèles numériques d'ensoleillement. C'est regrettable, car sa prise en compte rapprocherait ces outils informatiques de la réalité physique du phénomène solaire. En effet, qui n'a jamais remarqué que les taches et les ombres solaires n'étaient jamais nettes ? Plus elles sont éloignées de l'ouverture ou de l'écran qui les génère, plus leurs limites sont floues (cf. Figure 2-16). La pénombre solaire est proportionnelle à la distance de l'ombre à l'objet. Elle est d'environ le centième de la distance (cf. Figure 2-18). Cette proportion est le rapport diamètre du Soleil sur distance Terre-Soleil. Le diamètre du Soleil étant de 1,4 millions de km et la distance Terre-Soleil étant de 149,6 millions de km en moyenne (entre 147,1 au périhélie et 152,1 à l'aphélie - Figure 2-3), ce rapport fluctue entre 0,91 % et 0,94 %.

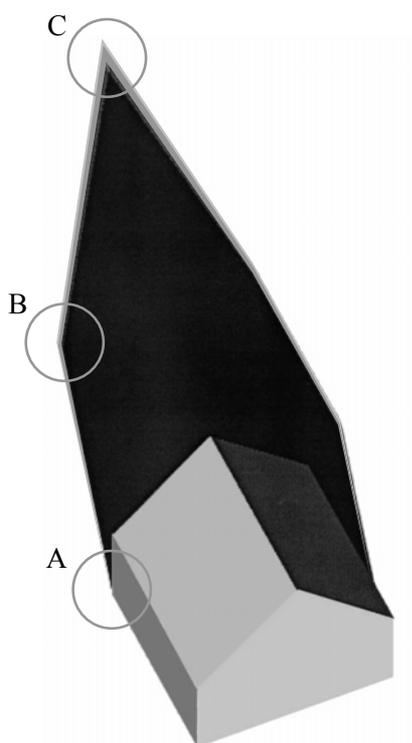


Figure 2-16 : Pénombre solaire d'un volume simple. Cette ombre floue est proportionnelle à la distance entre sa position et l'arête du volume à l'origine de l'ombre. Elle est nulle en A, maximale en C et intermédiaire en B.

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

Il ne suffit pas de masquer le centre du disque solaire pour répondre à une contrainte d'ombrage. L'ensemble du disque est source d'ensoleillement et l'assimilation du diamètre apparent du Soleil (angle solide moyen de $0,53^\circ$ depuis le centre de la scène) à un point, engendre une erreur conséquente sur la taille des dispositifs architecturaux ou des dispositions urbaines créés avec les logiciels d'ensoleillement actuels.

Mais l'erreur n'est pas uniquement quantitative. Si l'on considère par exemple un cas d'éblouissement depuis un poste de travail, la totalité du disque solaire est potentiellement gênante. Cela revient à négliger, au maximum, 20 jours consécutifs d'ensoleillement potentiel (10 jours avant et après les solstices - Figure 2-17). A titre de comparaison, pour ce cas d'éblouissement, notre assimilation des périodes élastiques à une valeur moyenne autour des deux dates des équinoxes (changement progressif entre heure d'été et heure d'hiver) génère une erreur qui provoquerait un éblouissement potentiel maximum de 30 minutes pour les journées proches de ces deux dates.

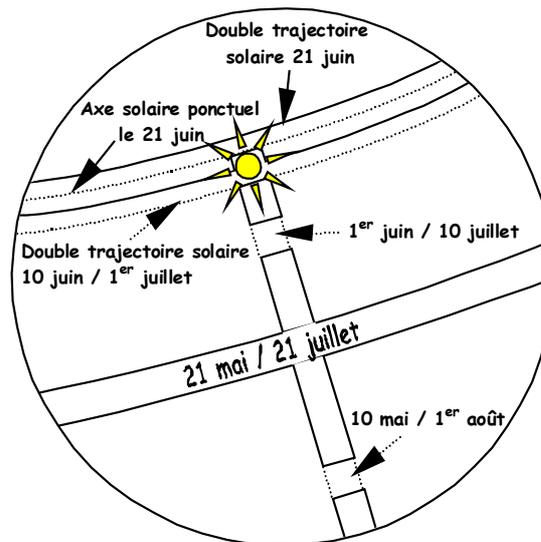


Figure 2-17 : Zoom de la Figure 2-12. L'assimilation du disque solaire apparent à un point ("axe solaire ponctuel") revient, pour une contrainte solaire incluant le 21 juin par exemple, à négliger l'ensoleillement potentiel entre le 10 juin et le 1^{er} juillet ; et ceci durant la totalité de la fourchette horaire de la contrainte.

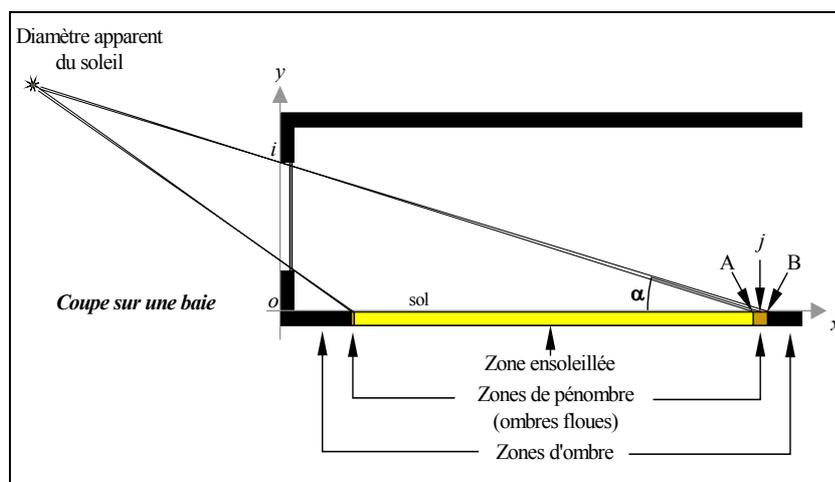


Figure 2-18 : Influence de l'épaisseur apparente du Soleil sur le calcul de l'inclinaison des rayons solaires. Les modèles actuels considèrent la hauteur du soleil en j comme égale à α – angle (oji) – alors qu'elle est égale à l'angle (oAi) ou à l'angle (oBi) selon si la contrainte solaire est, respectivement, d'avoir du soleil ou de s'en protéger. La zone de pénombre [AB] est proportionnelle à la distance [ij] et dépend de l'angle α (en degrés). En moyenne : $[AB] = 0,00936[ij]/\sin(\alpha+0,265)$, avec $0,00936 = (\varnothing_{\text{Soleil}}/\text{dist.}_{\text{Terre-Soleil}})$ et $0,265$ le $\frac{1}{2}$ angle solide du disque solaire en degrés. Pour un point i à une hauteur de 10 mètres et un angle $\alpha = 15^\circ$, [AB] est égal à 1,37 m, soit une erreur d'environ la moitié (69 cm) entre l'ombre en j et l'ombre en A ou B.

Dans le modèle que nous proposons, l'épaisseur apparente du soleil et de ses trajectoires est prise en compte, sous la forme de doubles trajectoires d'épaisseur $0,936 \%^{25}$ du rayon de notre modèle de voûte solaire. Le concepteur qui sélectionne les périodes d'ensoleillement (cf. Figure 2-19, Figure 2-20 et Figure 2-21) doit donc considérer cette épaisseur. Il doit toujours saisir les points extérieurs des cibles de contraintes solaires comme l'indique la Figure 2-22 afin d'englober l'ensemble des rayons solaires provenant de la totalité du disque solaire.

Comme nous le disons en introduction de cette deuxième partie, le diamètre de notre modèle de voûte solaire est de 100 km (100 000 unités de mesure étant la limite acceptée par la capacité des macros du modelleur). Pour des scènes architecturales, urbaines ou paysagères, d'unité le mètre, cela représente des trajectoires solaires à une distance moyenne de 50 km de la scène. Ce rapport est largement suffisant pour obtenir des rayons solaires quasi-parallèles. Par exemple, pour une scène urbaine, si la distance entre deux points opposés d'une parcelle, est de 100 m, l'erreur induite par rapport à un cas idéal de rayons parallèles, est d'un angle de 0.05° . Pour des scènes architecturales de quelques mètres (ce sont les dimensions des bases de contraintes qui nous importent),

²⁵ Ce pourcentage correspond à la moyenne du rapport entre le diamètre du Soleil et la distance de la Terre au Soleil, soit : $1,4/149,6$ millions de km.

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

l'angle d'erreur est donc infime. Pour des bases de contraintes au-delà de 100 m, si le concepteur estime que l'erreur est trop importante, il lui sera conseillé de discrétiser la zone étudiée en plusieurs bases.

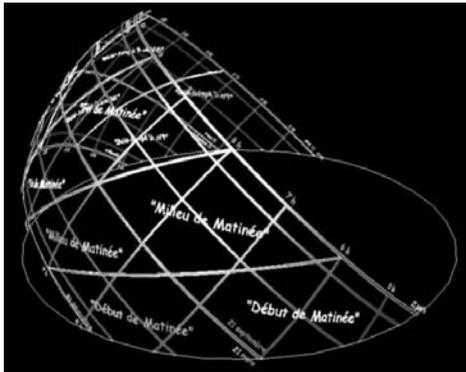


Figure 2-19 : Modèle de voûte solaire pour la latitude $47,2^\circ$ nord. Visualisation en 3D des heures solaires sur les trajectoires apparentes est-ouest du Soleil, et des périodes solaires saisonnières propres au modèle SVR (ici à l'est : "début de matinée" et "milieu de matinée").

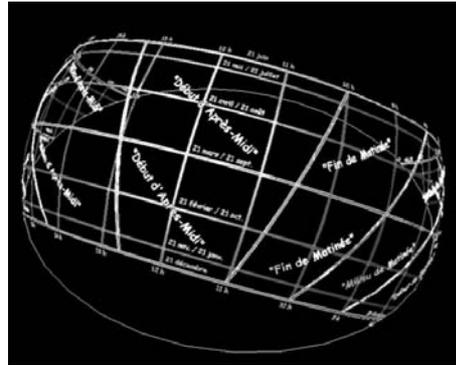


Figure 2-20 : Suite des périodes solaires saisonnières propres au modèle de voûte solaire SVR. Ici au sud-sud-est : "fin de matinée" et "début d'après-midi".

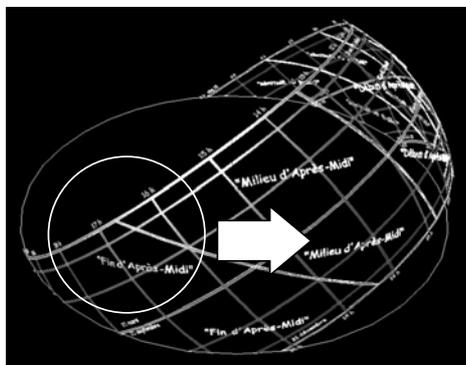


Figure 2-21 : Au sud-ouest, les dernières périodes solaires de notre modèle sont : "milieu d'après-midi" et "fin d'après-midi". L'épaisseur apparente du soleil est représentée par une double courbe.



Figure 2-22 : Zoom sur les intersections entre les trajectoires solaires apparentes et les heures solaires. Les périodes solaires du type "fin d'après-midi" sont dites "élastiques" ; elles divisent en six les journées d'ensoleillement plus ou moins longues entre le 21 décembre et le 21 juin. Pour cet exemple, le concepteur choisit la période solaire 16 h - 17 h du 10 mai au 1^{er} août, il doit saisir les points extérieurs des doubles trajectoires (les 4 curseurs), afin de prendre en compte l'épaisseur apparente du soleil.

2.1.2.3 Le masque solaire 3D d'une base, décrit par l'environnement ou un plan miroir

2.1.2.3.1 Le masque solaire d'une base, décrit par l'environnement

La notion de limitation des voûtes solaires par un masque environnant (cf. début § 2.1.2), permet dès le calcul de celles-ci, de ne laisser visibles que les parties des trajectoires apparentes du soleil qui ne sont pas cachées par l'environnement, depuis un point donné (centre de gravité de la base de contrainte). Le masque doit donc être suffisamment éloigné de la base (à plus de 100 m de celle-ci) pour être identique aux masques observés depuis l'ensemble des points contenus dans le polygone de la base. Dans ce cas, la voûte solaire peut être découpée et il ne reste alors plus que les positions du soleil, visibles depuis la base de contrainte (cf. Figure 2-10).

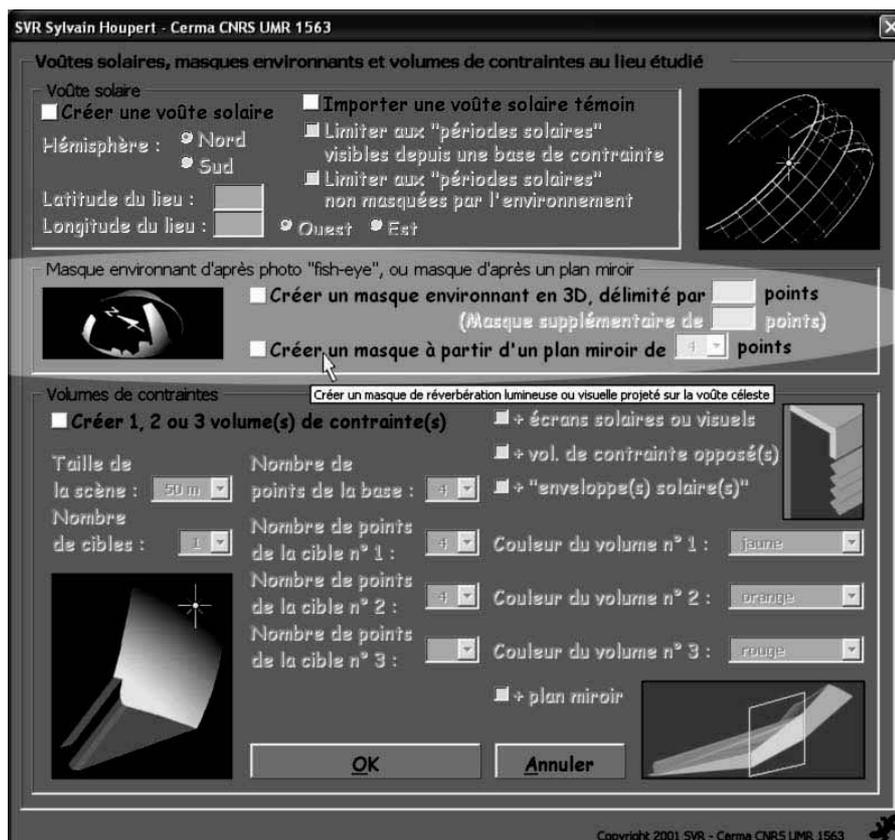


Figure 2-23 : Interface SVR – option "masque environnant" et "masque à partir d'un plan miroir"

Les masques sont identifiés grâce à des photographies *fish-eye* prises *in situ* (cf. Figure 2-24), avant la réalisation du projet architectural. Leur projection en 3D, sur l'hémisphère céleste et donc, sur le modèle de voûte solaire, est expliquée à la Figure 2-26. Si la distance entre les masques environnants et la base est trop faible, chaque photographie *fish-eye* prise à chaque angle de la base identifiera des masques différents. Le concepteur devra alors discrétiser la base en plusieurs zones ou compiler les différents masques en une seule image afin de ne garder que les cas les plus défavorables pour les cibles solaires (périodes où le soleil est masqué même depuis au moins un angle de la base, pour une contrainte d'ensoleillement, ou périodes où le soleil éclaire même partiellement la base, pour une contrainte d'ombrage). De façon générale, il est conseillé de n'utiliser que des masques éloignés.

Par ailleurs, la projection des masques sur la voûte céleste depuis plusieurs images *fish-eye* est possible indépendamment de la création de voûtes solaires (cf. Figure 2-23). Ce débrayage par rapport à la notion précédente de limitation de la voûte solaire, permet d'obtenir un ou plusieurs masques solides projetés sur l'hémisphère céleste et superposés aux trajectoires solaires (cf. Figure 2-25). La multiplication des masques 3D permet alors de comparer des bases ou des environnements différents, du point de vue des durées d'ensoleillement potentiel par exemple. Nous venons de le voir, la notion générale de masque 3D ne permet pas directement de calculer des volumes de contraintes, ni même de résoudre un problème d'ensoleillement inverse. Pourtant, nous émettons comme hypothèse que cette première étape en modélisation solaire inverse sera très utile pour réduire un problème lorsque le concepteur n'a pas, par manque de temps ou de moyens, modélisé le relief (dénivelé du terrain, montagnes à l'horizon, etc.) ou la végétation (altitude des masses végétales difficilement mesurable, croissance rapide des arbres et actualisation quasi-impossible, feuillage d'été et d'hiver, etc.). Ce type de délimitation des périodes solaires permet donc, à défaut de ne pas résoudre un problème, de visualiser uniquement les périodes solaires réellement exploitables comme cibles potentielles. Il s'agit en quelque sorte d'un pré-diagnostic de la situation avant le projet.

Il ne sert à rien de chercher à concevoir un bâtiment qui permette d'ensoleiller de manière optimale tel ou tel de ses bureaux durant une période T , si de toute manière l'environnement extérieur cache le soleil pour ces bureaux durant cette période T . Voilà le sens de ce pré-diagnostic : réduire au plus proche de la réalité le potentiel de cibles.



Figure 2-24 : Masques environnants 2D d'un point à la hauteur du sol. Image *fish-eye* depuis le parvis de l'hôtel *La Pérouse* à Nantes (France). Parmi les masques, sont repérables, les deux flèches de l'Eglise St-Nicolas à droite du lampadaire et la Tour de Bretagne, à gauche.

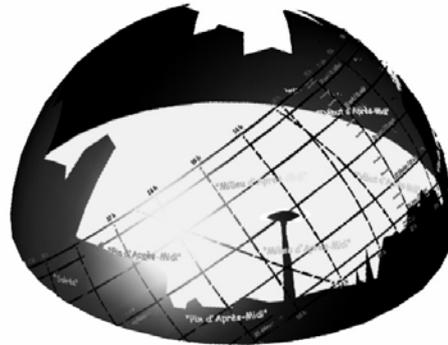


Figure 2-25 : Masques environnants 3D réalisés avec l'outil *SVR* à partir de l'image *fish-eye* ci-contre. Sont repérables comme sur l'image précédente, les deux flèches de l'Eglise St-Nicolas à droite du lampadaire et la Tour de Bretagne, à gauche.

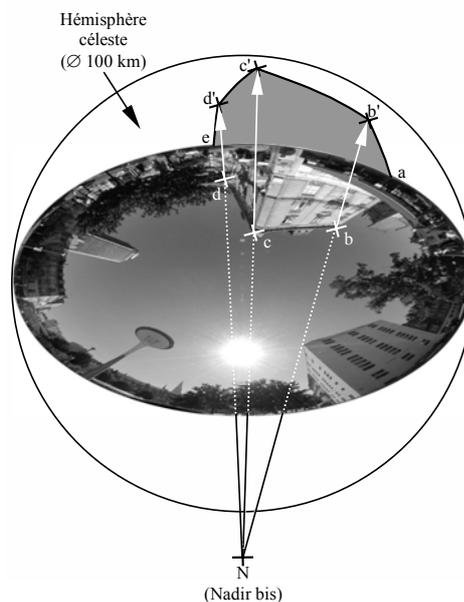


Figure 2-26 : Type de projection des masques environnants, en 3D, d'après une photographie *fish-eye*, sur le principe de la projection stéréographique (à partir d'un Nadir bis étalonné – de manière empirique – à une distance de 83,333 km du centre de la sphère céleste de Ø 100 km). La surface pleine du dôme céleste est découpée par les plans (Nab), (Nbc), (Ncd), (Nde)... pour ne garder que la silhouette de la projection du masque 2D abcde qui devient le masque 3D ab'c'd'e. Comparée à une projection équidistante (principe de l'image *fish-eye*), l'erreur est inférieure à 0,3° sur le dôme céleste.

Nota : Notre exemple se limite à un seul masque (immeuble d'angle) pour des questions de lisibilité du résultat. La méthode est, en réalité, généralisable à la totalité des masques de l'horizon.

2.1.2.3.2 Le masque solaire d'une base, décrit par un plan miroir

Le masque solaire 3D d'une base B décrit par un plan miroir (plan de réflexion parfaitement spéculaire – cf. § 2.1.3.1.5), est aussi projeté sur la surface pleine du dôme céleste mais pas à partir d'image grand-angle. Dans un premier temps, notre prototype calcule "l'enveloppe de contrainte opposée" (\mathcal{E}_{opp} , cf. Figure 2-44 – § 2.1.3.1) du plan miroir sélectionné, non limitée par la scène (mais par le dôme céleste), et ayant B' comme cible (i.e. le symétrique de B par rapport au plan miroir). Dans un second temps, il soustrait \mathcal{E}_{opp} au dôme céleste. Le résultat est alors un masque solaire du type de la figure qui suit (Figure 2-27). Sur le dôme céleste, seules restent les positions solaires susceptibles d'être les vecteurs de l'ensoleillement de la base B par réflexion spéculaire sur le plan miroir. Evidemment, les deux types de masques solaires 3D (d'après une photographie *fish-eye* et d'après un plan miroir) ne sont pas contradictoires. Les masques 3D environnants peuvent compléter les masques de plans miroirs en se superposant à eux pour être au plus proche de la réalité et délimiter au plus juste le potentiel de cibles solaires, à condition que les photographies *fish-eye* aient été prises depuis le plan miroir. Il convient donc de distinguer les masques liés aux contraintes d'ensoleillement et ceux liés aux contraintes de réflexion pour qu'il n'y ait pas confusion des masques environnants.

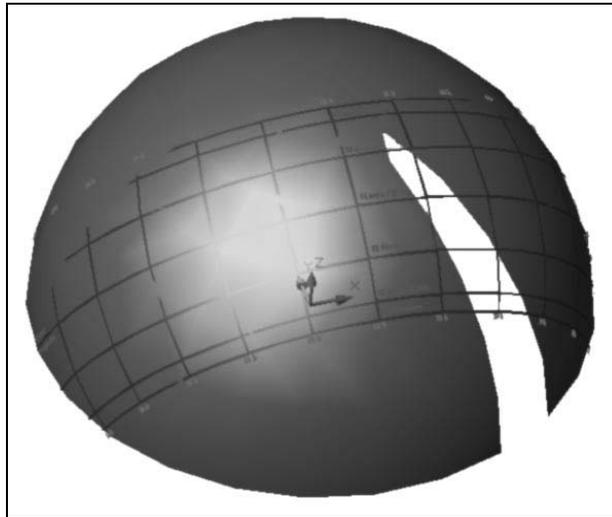


Figure 2-27 : Exemple de masque solaire décrit par un plan miroir. Seules les positions solaires non-grisées sont potentiellement la source d'un désagrément ou d'un gisement solaire supplémentaire.

2.1.2.4 Le positionnement des vues "depuis le soleil" ou depuis une cible visuelle

Parallèlement à ce que nous venons de développer à propos du modèle de voûte solaire, notre outil permet de positionner ponctuellement des vues sur ce modèle, grâce à la fonction *caméra* du modelleur. Ces vues permettent, en zoomant sur la base de contrainte, de voir la scène virtuelle sous un angle donné du soleil ou d'un point d'une cible visuelle. Ainsi, "depuis le soleil" à l'instant t par exemple, si la base de contrainte est cachée par tel polygone de la scène, c'est ce polygone que le concepteur devra extraire pour satisfaire à la contrainte de période solaire ponctuelle t (cf. Figure 2-28, Figure 2-29 et Figure 2-30).

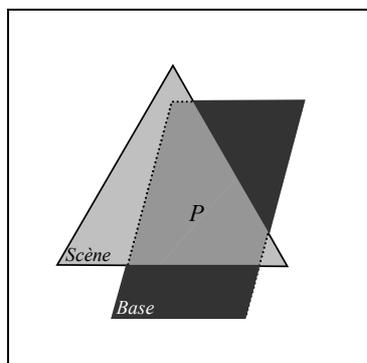


Figure 2-28 : Vue d'une base et d'un élément simple de la scène depuis la voûte solaire, à un instant t

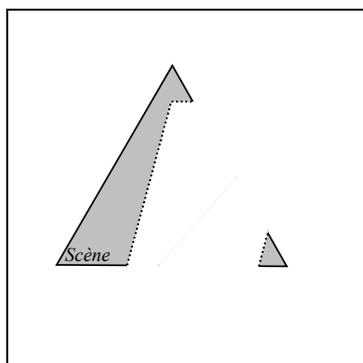


Figure 2-29 : L'élément triangulaire étant devant la base, on peut lui soustraire le polygone P superposé à la base.

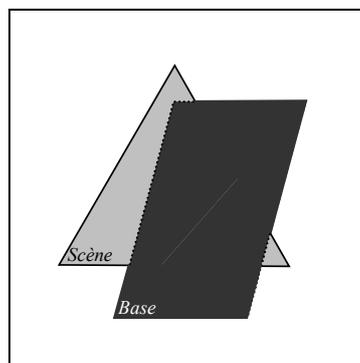


Figure 2-30 : Finalement, même placée derrière le triangle, la base sera entièrement ensoleillée (visible) à l'instant t .

De cette manière, il est donc possible de pré-diagnostiquer ou de régler une contrainte ponctuelle, pour un instant ou un point de vue unique.

De même, il peut être intéressant pour un architecte de réaliser ponctuellement une simulation directe de l'ensoleillement d'une scène. L'environnement du modelleur ayant un module d'éclairage par la méthode du *lancer de rayons*, il est relativement aisé de positionner une ou plusieurs *sources distantes* (soleils) sur le modèle de voûte solaire, puis de lancer une simulation. L'illustration de l'ombre floue (pénombre solaire) de la Figure 2-16 fut réalisée avec cette méthode. Nous avons ainsi placé quatre *sources distantes* aux quatre intersections des doubles trajectoires horaires et journalières d'un

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

instant t de notre voûte solaire pour approcher au mieux les rayons du disque solaire (cf. § 2.1.2.2).

2.1.3 La méthode de calcul des volumes de contraintes.

2.1.3.1 Les volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r

Avant de lancer un calcul d'un volume de contrainte, le concepteur doit avoir placé la modélisation de la scène architecturale ou urbaine (volumes connus, environnement bâti, relief, etc.) dans la direction du nord (l'axe y du repère 3D). De plus, pour une meilleure ergonomie de travail, il doit avoir ouvert deux fenêtres du modeleur (une fenêtre centrée sur la scène et une autre centrée sur la voûte solaire) et avoir choisi le mètre comme unité de dessin.

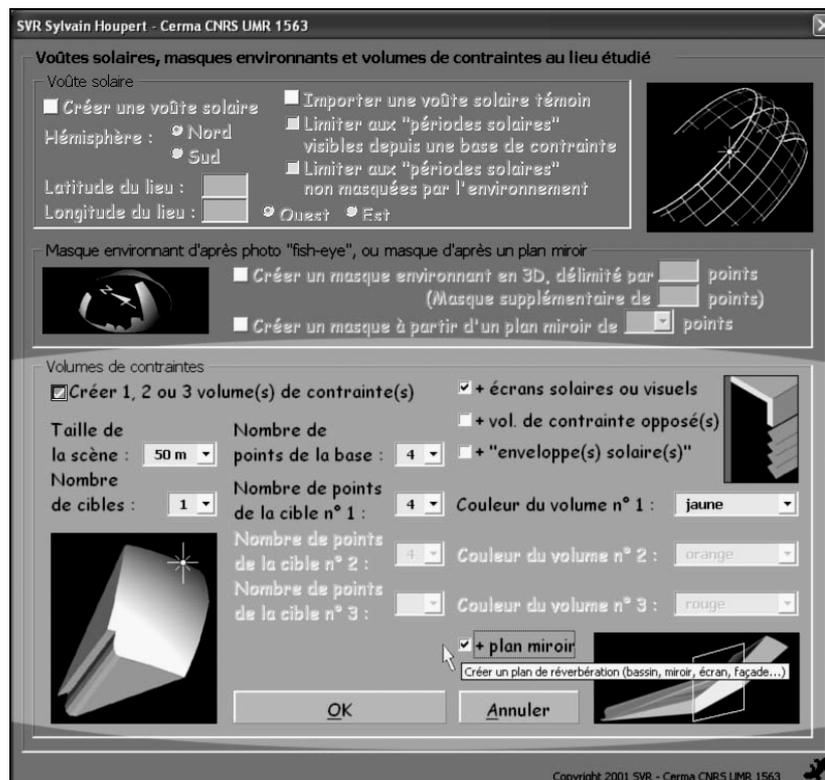


Figure 2-31 : Interface SVR – option "volumes de contrainte"

En modélisation inverse, à une contrainte correspond une volumétrie. Si les volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} ou \mathcal{V}_r sont uniques, ils englobent néanmoins une infinité de solutions géométriques. Toute section des volumes par un plan transversal donné est *la* solution minimale à la contrainte correspondant à ce plan.

Dans l'environnement *AutoCAD2000* ®, la méthode est implémentée de manière à ce que les pyramides élémentaires soient découpées dans des sphères de rayon identique à celui choisi pour la scène. Les algorithmes de calcul de ces pyramides remplacent l'utilisation directe des primitives informatiques de pyramides, que l'on trouve dans certains modeleurs 3D plus élaborés que l'environnement que nous avons choisi mais moins couramment utilisés en architecture.

Le vocabulaire que nous employons pour énoncer les types de contraintes est le suivant. Nous parlerons de "devant la base" ou "en aval", pour la position d'objets situés entre la base et la cible de contrainte, et de "derrière la base" ou "en amont" pour la position d'objets situés à l'opposé. Ainsi, les volumes \mathcal{V} et \mathcal{E} seront toujours "en aval" de la base et les volumes opposés \mathcal{V}_{opp} et \mathcal{E}_{opp} "en amont". Pour ces derniers volumes, la base correspond à un écran ou à une ouverture (cf. § 2.1.3.1.3 et § 2.1.3.1.4) sur lesquels ou à travers lesquels passent les rayons solaires ou visuels. Il est donc censé ne pas y avoir de contrainte en aval. Les rayons solaires ou visuels ne sont pas intersectés par des objets de la scène, situés devant la base. En terme d'énonciation d'une contrainte, nous parlerons de voir ou ne pas voir "la totalité d'une cible", pour désigner la totalité des points d'une cible vus ou non vus *en même temps* depuis un point. En modélisation solaire inverse, la cible étant une période solaire, cela signifie voir la globalité des positions potentielles du soleil durant cette période. Même s'il n'est évidemment pas possible de voir le soleil à plusieurs endroits *en même temps*, "la totalité d'une cible" sera comprise comme la totalité de la zone de la voûte solaire sélectionnée. Lorsque nous parlerons de voir ou ne pas voir "une cible", cela signifiera voir ou ne pas voir une cible dans son ensemble, *même en se déplaçant* (une partie vue depuis tel point, une autre depuis tel autre point...). Pour cela, la base ne doit donc pas être limitée à un seul point, ce qui sera toujours le cas dans nos simulations (intégration du changement de la position des yeux sur l'ensemble d'une base, ensemble de points devant "voir" le soleil, etc.).

Enfin, nous rappelons que les volumes décrits dans les sections suivantes, sont les enveloppes *minimales* englobant l'ensemble des points de la scène par lesquels il est possible de faire passer des rayons solaires ou visuels répondant aux contraintes. Il s'agit d'un *lieu de points*. Toute section transversale des volumes sera *une* solution à la

contrainte correspondante, puisque l'ensemble des points de cette section décrira la surface du plan de section, par laquelle passent les rayons.

2.1.3.1.1 Le volume de contrainte \mathcal{V}

Les figures suivantes illustrent les principales étapes de calcul des volumes de contraintes 3D \mathcal{V} . Pour simplifier les figures, la base et la cible de contrainte sont des rectangles (respectivement $B_1B_2B_3B_4$ et $C_1C_2C_3C_4$). Géométriquement, les volumes de contraintes sont l'union des pyramides de base la "base" et de sommets les sommets de la "cible", des pyramides de base la "cible" et de sommets les sommets de la "base" (Figure 2-32), et des pyramides intermédiaires (tétraèdres) joignant, deux à deux, les arêtes de la base aux arêtes de la cible (Figure 2-33).

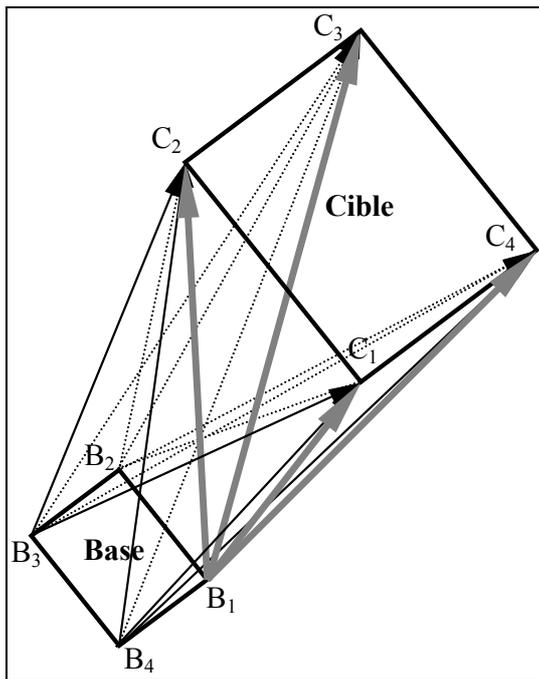


Figure 2-32 : Les volumes de contraintes sont composés d'une part, des pyramides de base la "base" et de sommets les sommets de la "cible", et d'autre part, des pyramides de base la "cible" et de sommets les sommets de la "base". A cette union, il convient d'ajouter les pyramides intermédiaires définies ci-contre.

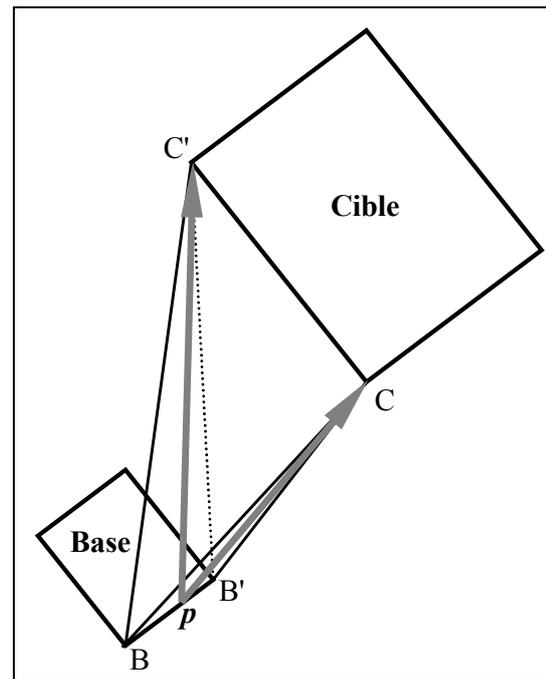


Figure 2-33 : Les pyramides intermédiaires. Le tétraèdre $BB'C'C'$ est l'ensemble des rayons (solaires ou visuels) reliant l'ensemble des points p décrivant le segment $[BB']$ à l'ensemble des points de $[CC']$. Lorsque p décrit $[BB']$, $[pC']$ décrit le triangle $BB'C'$ et $[pC]$ décrit $BB'C$. Donc, lorsque p décrit $[BB']$, pCC' décrit le tétraèdre $BB'C'C'$.

Soit $x > 2$ et $1 \leq i \leq x$

Soit $y > 2$ et $1 \leq j \leq y$

"Base" est un polygone de x côtés $B_1B_2B_3...B_x$

"Cible" est un polygone de y côtés $C_1C_2C_3...C_y$

La première étape du calcul de \mathcal{V} consiste donc à unir les pyramides $P1^i$ de base $C_1C_2C_3...C_y$ et de sommet B_i avec les pyramides $P2^j$ de base $B_1B_2B_3...B_x$ et de sommet C_j (cf. Figure 2-34).

La seconde étape consiste à ajouter à cette première union, celle des tétraèdres P^{ij} (pyramides intermédiaires) joignant $B_i, B_{(i+1)}, C_j$ et $C_{(j+1)}$ (cf. Figure 2-35).

Les pyramides élémentaires $P1^i, P2^j$ et P^{ij} sont des solides. La macro *SVR* les crée donc par découpes successives d'une sphère solide de rayon identique à la scène. Pour les pyramides $P1^i$ et $P2^j$, les plans de découpes sont ceux indiqués par le polygone cible (respectivement, le polygone base) ainsi que ceux indiqués par deux points consécutifs de ce polygone et un sommet du polygone base (respectivement, du polygone cible). Pour les pyramides P^{ij} , les plans de découpes sont ceux indiqués par deux points consécutifs du polygone cible et deux points consécutifs du polygone base. Dans ce dernier cas, il s'agit donc de tétraèdres (4 sommets).

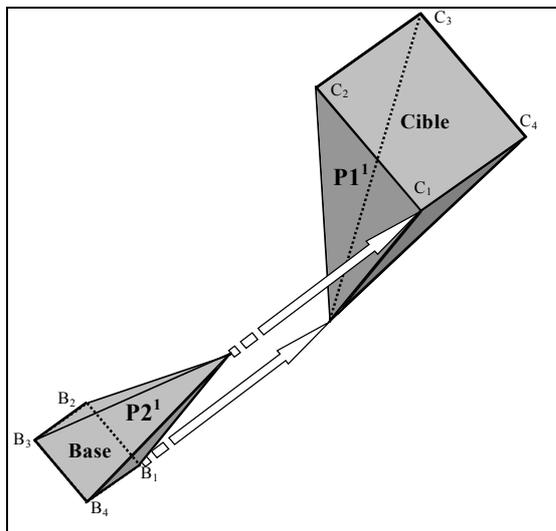


Figure 2-34 : 1^{ère} étape

$$P1^1 \cup P2^1$$

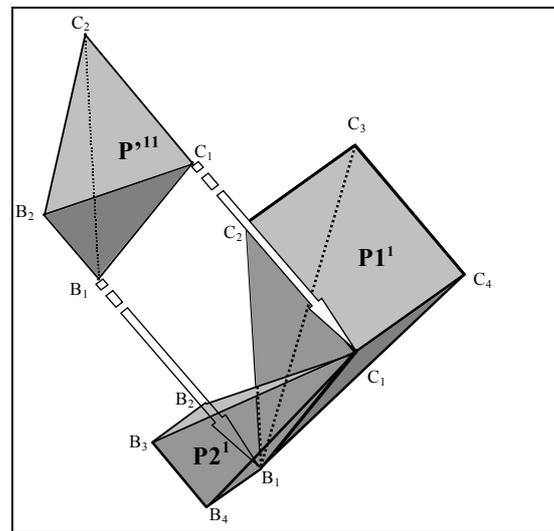


Figure 2-35 : 2^{ème} étape

$$P1^1 \cup P2^1 \cup P^{11}$$

Ces unions illustrées sur les figures ci-dessus sont répétées pour $i = j = 1$ jusqu'à $i = x$ et $j = y$ (cf. Figure 2-36).

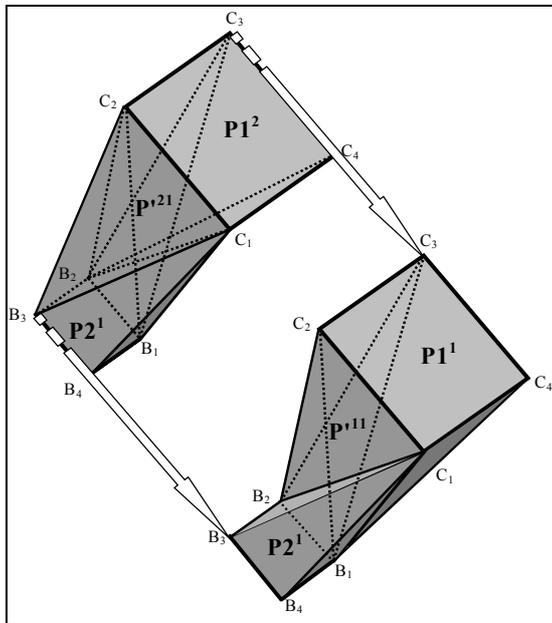


Figure 2-36 : 3^{ème} étape

$$(P1^1 \cup P2^1 \cup P1^{11}) \cup (P1^2 \cup P2^1 \cup P1^{21})$$

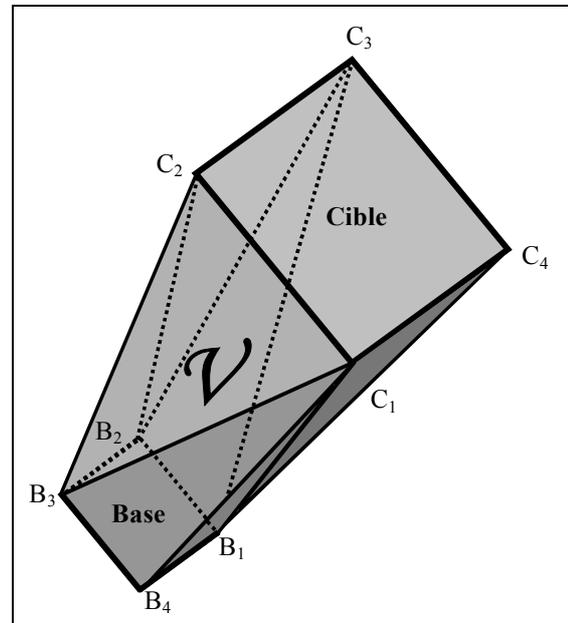


Figure 2-37 : Résultat

$$\mathcal{V} = \bigcup_{1 \leq i \leq x} P1^i \bigcup_{1 \leq j \leq y} P2^j \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq x \\ 1 \leq j \leq y}} P1^{ij}$$

In fine, \mathcal{V} est un solide 3D plein englobant la totalité des rayons linéaires (solaires ou visuels) reliant l'ensemble des points contenus dans le polygone base, à l'ensemble des points du polygone cible. En d'autres termes, l'union des faces des pyramides élémentaires $P1^i$, $P2^j$ et $P1^{ij}$ décrit l'enveloppe maximale englobant la totalité du faisceau de rayons solaires ou visuels. Cette méthode de calcul est donc générique et valable quel que soit le type de rayons linéaires (solaires, visuels...).

La contrainte du volume \mathcal{V} se formule donc ainsi :

"voir ou ne pas voir *la totalité* d'une cible *depuis* une base".

Rappelons que toute section de \mathcal{V} par un plan transversal donné est *une* solution minimale à la contrainte correspondant à ce plan.

Si la contrainte avait été "voir ou ne pas voir la cible, *depuis* la base" sans y préciser que les points de la base doivent voir *la totalité* des points de la cible, le volume aurait été plus fin (contrainte moins forte) en forme de sablier (cf. Figure 2-38). Ce type de contrainte est *a priori* relativement peu fréquent pour une application solaire. Elle correspondrait à ensoleiller au moins une fois tous les points de la base durant l'ensemble de la période solaire. Néanmoins, pour une contrainte de visibilité, le cas pourrait être plus fréquent. Il s'agirait par exemple de pouvoir voir l'ensemble des points de la cible, même individuellement (pas obligatoirement la totalité de la cible, en une fois), depuis l'ensemble des points de la base, même individuellement. Un exemple de cette contrainte pourrait avoir comme base, la position potentielle d'un surveillant et comme cible, une zone à surveillée (zone de baignade, cour de récréation, etc.). Le surveillant ne pouvant se déplacer qu'au niveau de la base de la contrainte, l'ouverture minimale (solution minimale à la contrainte) dans un mur séparant la base de la cible se trouvera à la hauteur du rétrécissement du volume intermédiaire \mathcal{V}' (cf. Figure 2-38). Le surveillant aura donc la possibilité en se déplaçant sur la base de voir localement la cible sans jamais avoir une vue globale (de la totalité) de la cible.

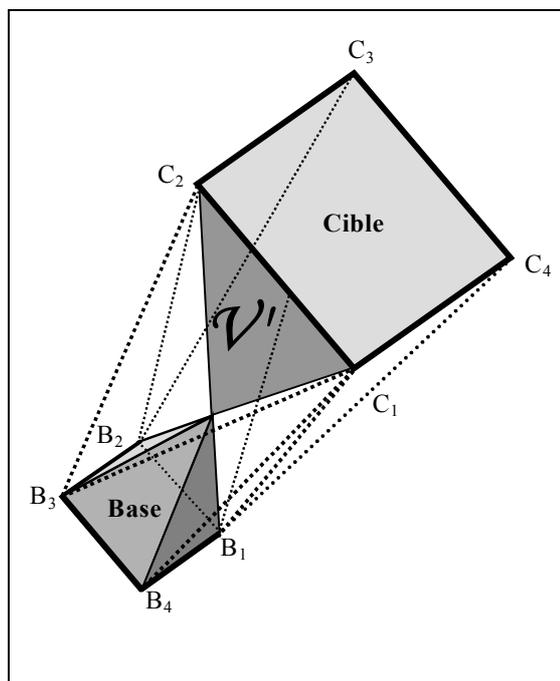


Figure 2-38 : Un volume intermédiaire \mathcal{V}' correspondant à la contrainte : "voir ou ne pas voir une cible, *depuis* une base".

2.1.3.1.2 L'enveloppe solaire ou visuelle \mathcal{E}

La macro *SVR* calcule aussi les volumes spécifiques que sont les *enveloppes solaires* (\mathcal{E}) telles que R. L. Knowles [Knowles 1984 et 2003] les définit. Ces *enveloppes solaires* sont les volumes maximaux potentiellement constructibles sur une parcelle (la base), tels qu'ils n'empêchent pas l'ensoleillement (ou la visibilité, dans le cas d'enveloppes visuelles) de l'environnement voisin pour une période donnée. Mais il est aussi possible de formuler la contrainte ainsi :

"voir ou ne pas voir une cible, *exclusivement depuis* une base".

Mathématiquement, la contrainte d'une *enveloppe solaire* ou visuelle est plus restrictive que celle d'un volume de contrainte \mathcal{V} . Géométriquement, le volume \mathcal{E} est inclus dans \mathcal{V} (cf. Figure 2-28).

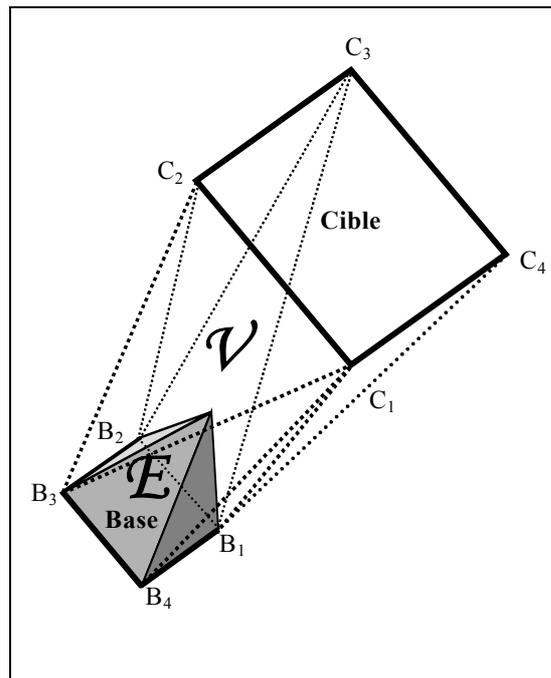


Figure 2-39 : Calcul de \mathcal{E}

$$\mathcal{E} = \mathcal{V} - \left(\bigcup_{1 \leq i \leq x} P1^i \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq x \\ 1 \leq j \leq y}} P^{ij} \right)$$

Pour obtenir \mathcal{E} , notre macro doit soustraire à \mathcal{V} l'ensemble de ses points qui empêchent de "voir" le soleil ou une cible visuelle depuis le voisinage de la base ; autrement dit, les points sur les trajectoires des rayons solaires ou visuels qui passent par la frontière de la base de contrainte (son périmètre). Ainsi, pour le calcul d'une *enveloppe solaire* (ou visuelle), la frontière entre la scène et la base (le périmètre du polygone base) doit toujours pouvoir "voir" la cible solaire (ou visuelle).

La Figure 2-40 illustre comment notre macro unit les pyramides P1 et P' avant de les soustraire à \mathcal{V} , dans le cas du calcul d'une *enveloppe solaire* ou visuelle.

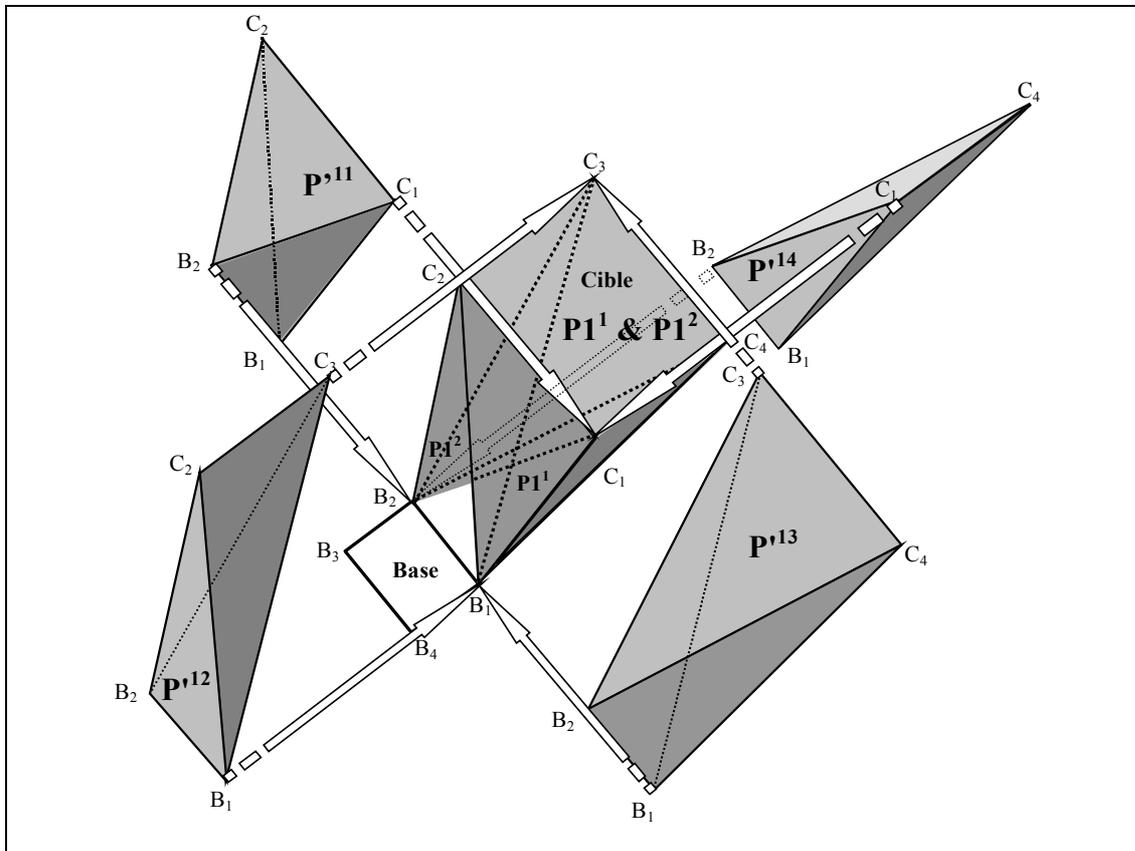


Figure 2-40 : Pyramides élémentaires à soustraire de \mathcal{V} pour chaque segment de la base, afin d'obtenir l'*enveloppe solaire* \mathcal{E} (cf. Figure 2-28). Ici, seuls sont représentés les volumes qui correspondent aux rayons joignant le segment $[B_1B_2]$ (base) à la totalité de la cible $[C_1C_2]$, $[C_2C_3]$, $[C_3C_4]$ et $[C_4C_1]$. L'opération doit être réitérée x fois pour les x côtés de la base.

2.1.3.1.3 L'enveloppe solaire ou visuelle opposée \mathcal{E}_{opp}

La macro *SVR* calcule aussi les "volumes opposés". Par "construction opposée" d'une pyramide élémentaire P_{opp} , nous entendons sa découpe par les mêmes plans que ceux utilisés pour découper la pyramide élémentaire P , mais en gardant à chaque découpe, le côté opposé à la scène.

Nous définissons ainsi les pyramides élémentaires opposées $P1_{opp}$ et P'_{opp} (cf. Figure 2-41 et Figure 2-43) comme étant respectivement les constructions opposées de $P1$ et P' . Quant à $P2_{opp}$ (Figure 2-42), sa construction est simplement la découpe de la pyramide $P2$, mais lors de la section par le plan de base, le côté opposé à la cible est gardé.

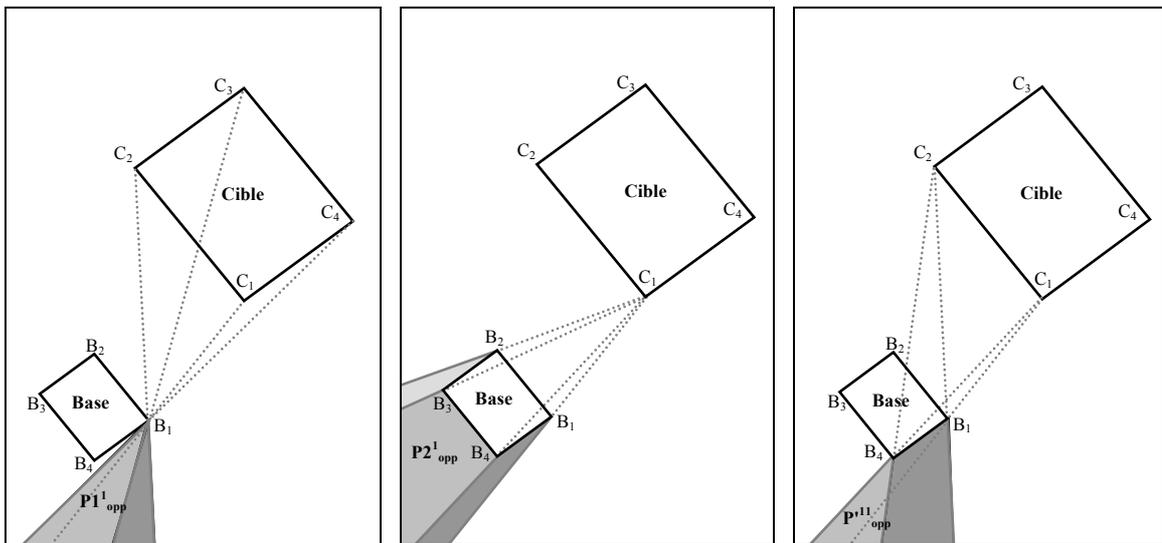


Figure 2-41 : Calcul de la pyramide élémentaire $P1^i_{opp}$ à partir des plans $(B_1C_1C_2)$, $(B_1C_2C_3)$, $(B_1C_3C_4)$... $(B_1C_3C_1)$

Figure 2-42 : Calcul de la pyramide élémentaire $P2^j_{opp}$ à partir des plans $(C_jB_1B_2)$, $(C_jB_2B_3)$, $(C_jB_3B_4)$... $(C_jB_xB_1)$ et du plan $(B_1B_2B_3)$

Figure 2-43 : Calcul de la pyramide élémentaire P'^{ij}_{opp} à partir des plans $(C_jB_iB_{(i+1)})$, $(C_jC_{(j+1)}B_i)$, $(C_{(j+1)}B_iB_{(i+1)})$ et $(C_jC_{(j+1)}B_{(i+1)})$

Dans la formule de calcul de \mathcal{E}_{opp} (Figure 2-44) les termes $P1^i$, $P2^j$ et P'^{ij} de la formule de \mathcal{E} sont remplacés par $P1^i_{opp}$, $P2^j_{opp}$ et P'^{ij}_{opp} .

\mathcal{E}_{opp} se trouve toujours du côté opposé de la base de contrainte par rapport à \mathcal{E} (derrière la base). L'enveloppe solaire ou visuelle opposée correspond à l'ensemble des solutions

maximales à construire ou minimales à déconstruire (écrans ou ouvertures) derrière l'ouverture ou l'écran que représente la base, telles qu'elles n'empêchent pas, les protections ou les apports solaires permis par cette base, durant la période donnée.

La contrainte du volume \mathcal{E}_{opp} se formule donc ainsi :

"voir ou ne pas voir une cible à travers une base".

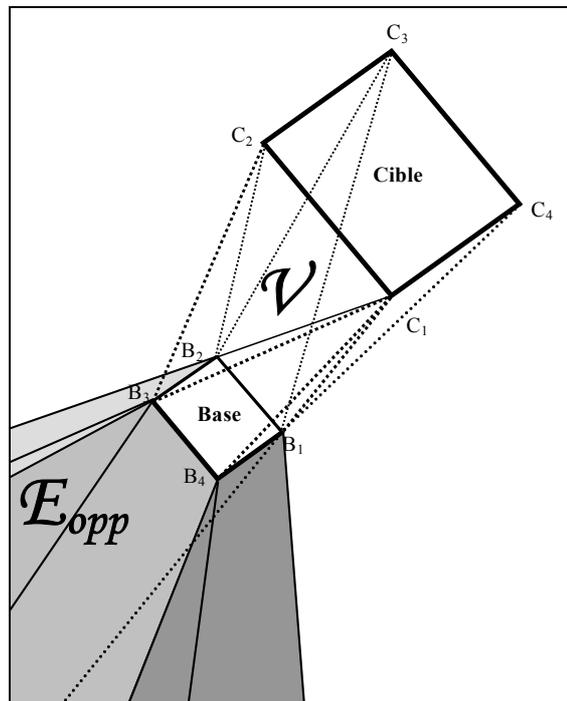


Figure 2-44 : Calcul de \mathcal{E}_{opp}

$$\mathcal{E}_{opp} = \bigcup_{1 \leq i \leq x} P1^i_{opp} \bigcup_{1 \leq j \leq y} P2^j_{opp} \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq x \\ 1 \leq j \leq y}} P^{ij}_{opp}$$

2.1.3.1.4 Le volume de contrainte opposé \mathcal{V}_{opp}

\mathcal{V}_{opp} se trouve toujours du côté opposé de la base par rapport à \mathcal{V} . Le volume de contrainte opposé correspond à l'ensemble des solutions maximales à construire ou minimales à déconstruire (écrans ou ouvertures) derrière l'ouverture ou l'écran que représente la base, telles qu'elles n'empêchent pas, les protections ou les apports solaires

permis par cette base, durant *la totalité* de la période donnée (cf. Figure 2-84 et Figure 2-85). La base est alors considérée comme un polygone laissant passer (ouverture) ou non (écran) les rayons solaires. Le volume \mathcal{V}_{opp} est le prolongement de \mathcal{V} derrière la base (cf. Figure 2-45). La contrainte du volume \mathcal{V}_{opp} se formule donc ainsi :

"voir ou ne pas voir *la totalité* d'une cible à travers une base".

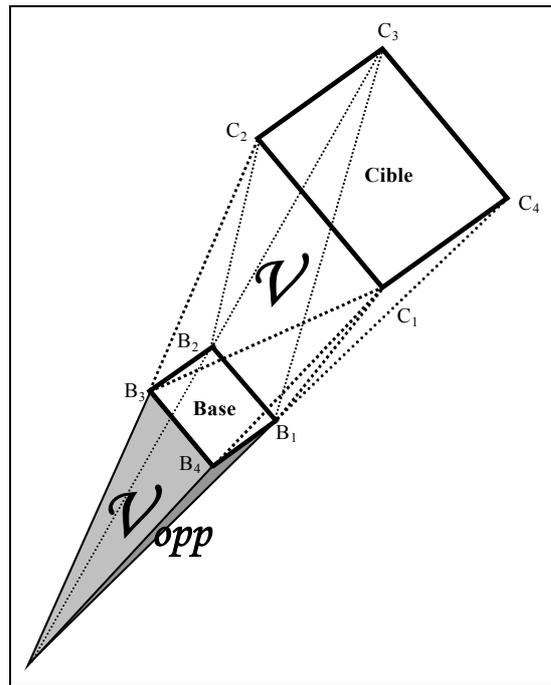


Figure 2-45 : Calcul de \mathcal{V}_{opp}

$$\mathcal{V}_{opp} = \mathcal{E}_{opp} - \left(\bigcup_{1 \leq i \leq x} P1^i_{opp} \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq x \\ 1 \leq j \leq y}} P^{ij}_{opp} \right)$$

En nommant \mathcal{V}_{opp} et \mathcal{E}_{opp} , respectivement, volume de contrainte opposé et *enveloppe solaire* ou visuelle opposée, nous avons donné un nom générique, valable pour une approche inverse, solaire ou visuelle. Mais ces termes désignent, ce que les Sud Coréens [Yoo *et al.* 1998], mais aussi T. Nishita [Nishita et Nakamae 1985 ; Nakamae, Okamura et Nakamae 1985] nomment, dans le domaine de l'éclairage, respectivement : "*volume d'ombre*" et "*volume de pénombre*".

Dans la première partie du présent mémoire, nous évoquions d'ailleurs cette analogie en remarquant tout de même qu'il ne s'agissait pas d'une approche solaire mais lumineuse (éclairage artificiel direct).

2.1.3.1.5 Le volume de contrainte de réflexion \mathcal{V}_r

Rappelons tout d'abord, que la réflexion visuelle ou solaire que nous tentons ici de traiter de manière inverse, est considérée comme étant spéculaire. Elle peut donc avoir lieu sur des surfaces définies comme parfaitement réfléchissantes par le concepteur (eau d'un bassin, façade vitrée, etc.) que nous appellerons plans miroirs.

Pour ces volumes de contraintes de réflexion, les rayons inverses partent de la base vers le plan miroir, dans la direction du polygone symétrique de la cible par rapport au miroir, puis à partir du plan miroir se dirigent vers la cible dans la direction opposée du polygone symétrique de la base (cf. Figure 2-47 et Figure 2-48). Evidemment, la base et la cible de \mathcal{V}_r ne peuvent pas se situer d'un côté et de l'autre du plan miroir, sous peine de rendre impossible le calcul.

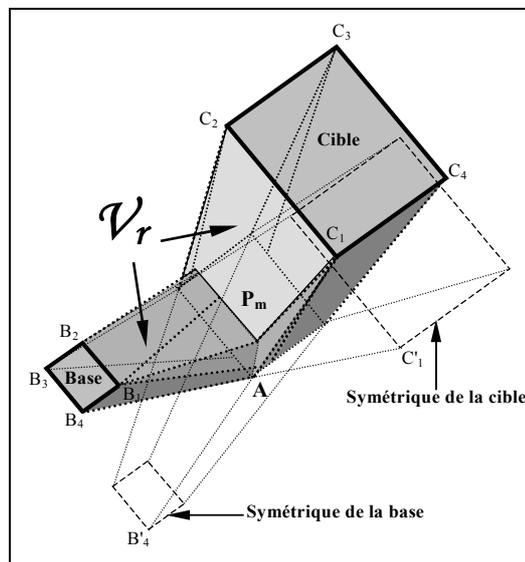


Figure 2-46 : Calcul d'un volume de réflexion \mathcal{V}_r . Le point B_4 de la base, par exemple, vise le symétrique de C_1 (C'_1) par rapport au plan miroir P_m . Le rayon est interrompu en A , puis il suit la direction de B'_4C_1 . L'arête correspondant à ce rayon réfléchi est donc "cassée" en A . Elle devient $[B_4AC_1]$.

La contrainte du volume \mathcal{V}_r est formulée ainsi :

"voir ou ne pas voir *la totalité* d'une cible depuis une base, par réflexion spéculaire sur un plan miroir".

Comme pour les volumes précédents, toute section de \mathcal{V}_r par un plan transversal donné est *la* solution minimale à la contrainte correspondant à ce plan, qu'il soit en amont ou en aval du plan miroir.

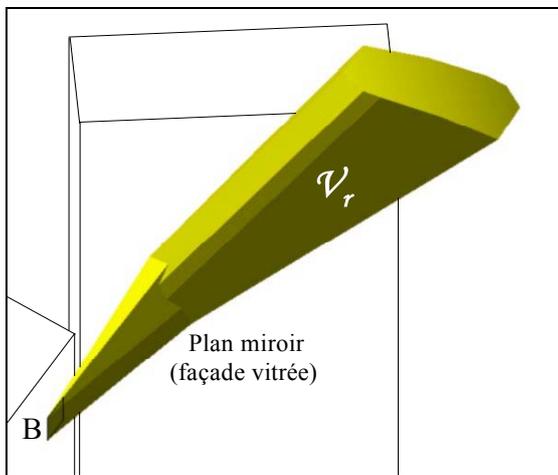


Figure 2-47 : Exemple de volume de contrainte de réflexion \mathcal{V}_r dont la base B est une fenêtre, la cible, une partie de la voûte solaire et le plan miroir, une façade vitrée d'un immeuble.

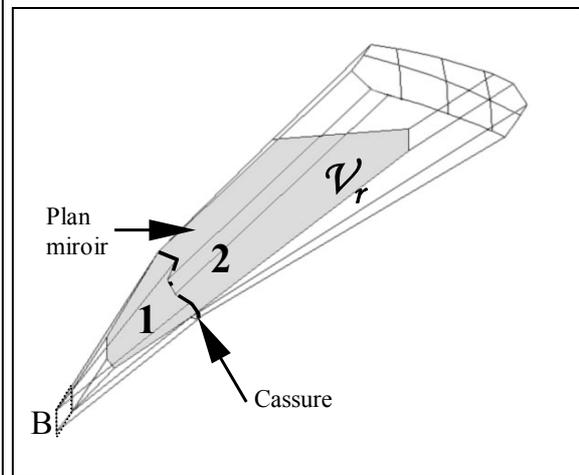


Figure 2-48 : Rendu filaire du volume de réflexion \mathcal{V}_r précédent. L'intersection de \mathcal{V}_r avec le plan miroir est le polygone grisé. Autour de la "cassure" s'articulent, de manière très complexe, les deux parties du volume. Le résultat est un solide 3D plein.

2.1.3.2 Les bases

Les bases prises en compte par notre outil peuvent être des polygones concaves et légèrement gauches sans que cela ne pose de véritables problèmes. Bien évidemment, les polygones convexes et plans peuvent servir de bases de contraintes pour l'ensemble des volumes précédemment évoqués.

Pour des bases courbes, le concepteur devra approximer ces courbes par des segments tangents.

Dans l'exemple qui suit, la base est un parcours paysager en forme de "S" (cf. Figure 2-49).

Dans ce type de scène paysagère ou urbaine, de tels polygones sont très courants. Ils sont généralement concaves et représentent le périmètre de la totalité des positions potentielles des yeux d'un individu de taille moyenne, entre deux sections d'un parcours non linéaire. Quelle que soit la cible visée, ce type de base produira un volume extrêmement complexe. Pourtant son exploitation, en terme de conception, ne semble pas insurmontable.

Dans le cas suivant, les masses végétales de part et d'autre d'une allée linéaire ne présentent pas de problème majeur, *a priori*. En effet, cette allée que l'on imagine bordée d'arbres taillés (cf. Figure 2-49 et Figure 2-51), est un exemple qui se prête bien à une sculpture supplémentaire répondant parfaitement à la contrainte demandée (cf. Figure 2-52). Cette contrainte peut être solaire (voir le soleil durant une période donnée *P* depuis la base) ou bien visuelle (ici, voir un objet sphérique du parc – cf. Figure 2-50).

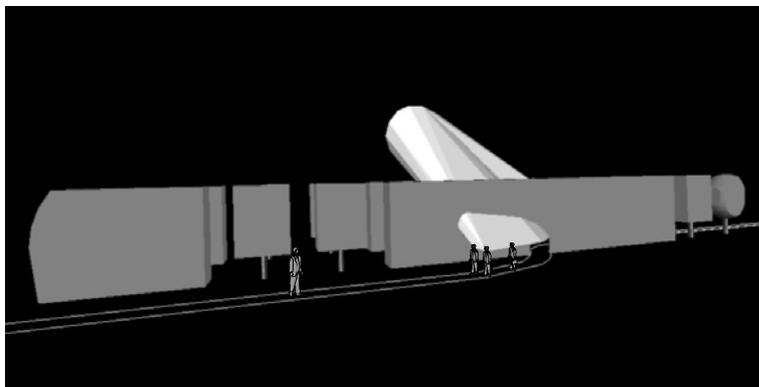


Figure 2-49 : Contrainte visuelle d'un parcours paysager à travers des masses végétales taillées. Le sentier en "S" longe une allée bordée de masses de végétation. Des percées visuelles existent mais ne sont pas suffisantes pour répondre à la contrainte qui est de voir un objet sphérique du parc. A la moitié de l'allée, le sentier qui la longeait, traverse le premier écran végétal pour poursuivre sur celle-ci. A cet endroit la base de contrainte, à hauteur des yeux des visiteurs, forme un polygone concave.

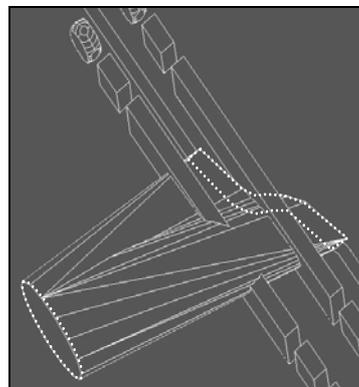


Figure 2-50 : Volume de contrainte concave répondant à la contrainte visuelle posée. La base (en pointillés) étant concave, le volume l'est aussi. Sa forme très complexe ne semble pourtant pas être, *a priori*, un handicap pour cet exemple de conception paysagère.

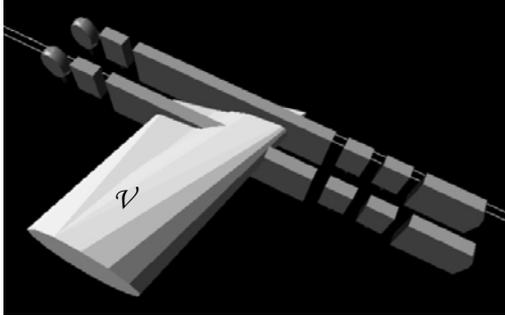


Figure 2-51 : Vue plongeante sur l'ensemble de solutions visuelles qu'est le volume de contrainte ψ

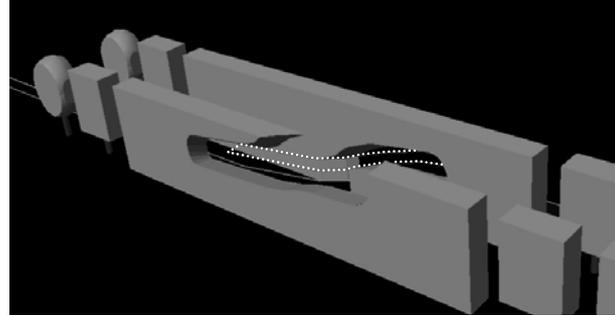


Figure 2-52 : La solution minimale à la contrainte visuelle. Après soustraction du volume de contrainte aux deux écrans végétaux, il est possible de voir la totalité de la cible depuis la base.

2.1.3.3 Les cibles

Comme les bases, les cibles prises en compte par notre outil peuvent être des polygones concaves et légèrement gauches, mais aussi convexes ou plans. Pour une base, il est possible de sélectionner plusieurs cibles (trois maximum – cf. Figure 2-31) afin de calculer, en une fois, plusieurs volumes de même base. Nous nous sommes arrêtés sur ce choix, car, plutôt que de privilégier une cible et une, deux ou trois bases, il est commun, pour une même base, de simuler des contraintes de cibles différentes (visuelle-solaire, visuelle-réflexion solaire, etc.). Cependant, base et cible désignant toutes deux des polygones, ces termes sont réversibles. Il est donc aussi possible de simuler trois contraintes de bases différentes et de cible commune en intervertissant bases et cibles.

Nous avons évoqué les périodes solaires qui sont des cibles gauches puisqu'elles appartiennent à la voûte céleste. Les cibles visuelles peuvent aussi être des cibles gauches. La silhouette d'un objet d'une scène peut évoluer radicalement selon l'endroit d'où on la regarde. Dans l'exemple atypique de la Tour du Crédit Lyonnais à Lille (France) conçue par l'architecte C. de Portzamparc, viser la silhouette de cet immeuble en marchant, revient à l'observer sous deux angles de vue, *a priori*, très différents (de face – Figure 2-54 – et de profil – Figure 2-55). La recherche d'une cible fixe est donc loin d'être évidente. Toutefois, dans les cas où cela est possible, nous avançons comme solution, la saisie d'une cible intermédiaire entre une vue de face et une vue de profil d'un volume parallélépipédique. En effet, si la position des yeux d'un observateur suit un parcours qui permet de voir deux faces consécutives d'un tel volume, et que ce

parcours est assez éloigné du volume, nous pouvons considérer que la face virtuelle visée est la face diagonale, intermédiaire entre vue de face *A* et vue de profil *C* (cf. Figure 2-53). Dans ce cas, le concepteur n'a pas besoin de remodeler le volume ciblé, car en rendu filaire, il est aussi aisé de saisir les sommets de la face diagonale que ceux des deux faces *A* et *C*.

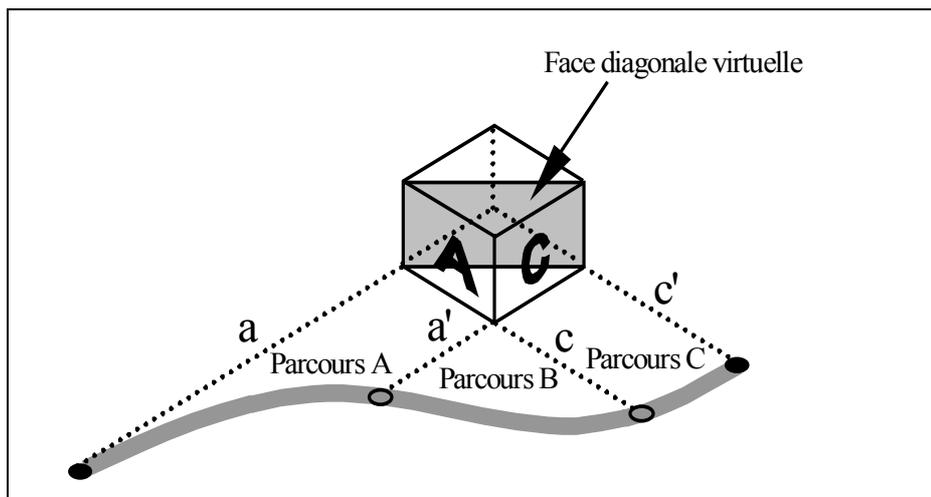


Figure 2-53 : Choix d'une cible visuelle intermédiaire. Durant le début du parcours (zone *A*) l'observateur voit la face *A* du bâtiment. Lorsqu'il est dans la zone *C*, il voit la face *C* mais ne peut plus voir *A*. Si *a*, *a'*, *c* et *c'* sont de taille supérieure à celle des faces *A* et *C* alors la silhouette de la face diagonale (grisée) peut-être considérée comme une cible moyenne.

Revenons un instant sur cette Tour du Crédit Lyonnais du quartier Euralille à Lille. Dans ce cas, la méthode précédente nous est d'aucune aide, exceptée si la silhouette est divisée en deux cibles. Mais bien que la volumétrie de cette tour semble difficilement saisissable, entre les deux points de vue (Figure 2-54 et Figure 2-55), il est tout de même possible d'y saisir les sommets qui définissent un polygone gauche mais invariant (même nombre de sommets, mêmes concavités, etc.).

Dans le cas de cibles solaires, nous tenons à rappeler que la saisie des sommets des périodes théoriquement courbes, transforme ces cibles en des polygones (gauches et concaves). Cette approximation crée une erreur qui est toutefois acceptable. Si le concepteur saisit toutes les "heures" d'une période (cf. Figure 2-56), l'erreur maximale se situe autour des deux solstices et est inférieure à $0,4^\circ$ pour la coordonnée hauteur du soleil (cf. Figure 2-57).

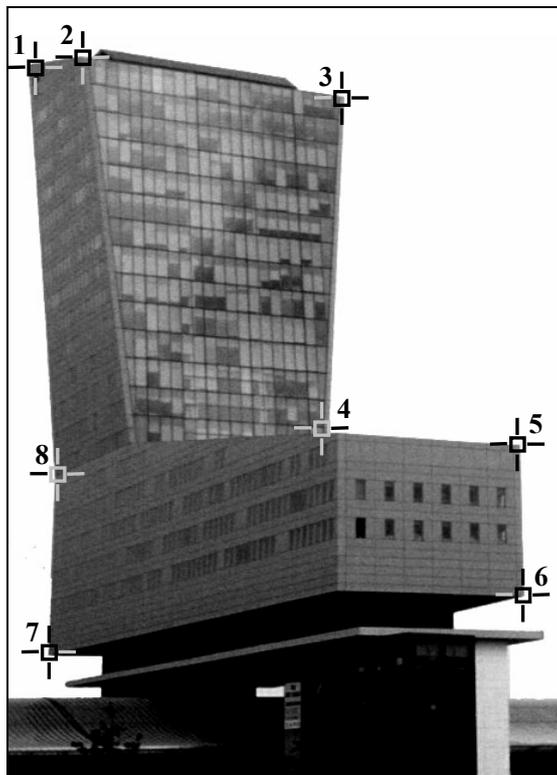


Figure 2-54 : Cible visuelle vue de "3/4". Même non coplanaires, les huit sommets de la silhouette de la Tour du Crédit Lyonnais (Euralille – France) peuvent être pris comme cible visuelle.

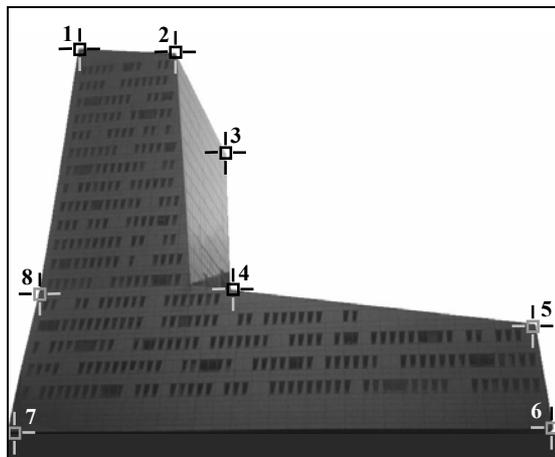


Figure 2-55 : Cible visuelle vue de profil. Sous cet angle, les huit sommets de la cible visuelle décrivent les mêmes invariants que le polygone de la figure précédente. En modélisation 3D, ce polygone peut donc être saisi sans difficulté.

Mais les concepteurs auront aussi la possibilité de doubler le nombre de points saisis sur le modèle de voûte solaire afin d'approcher au mieux les surfaces théoriquement courbes des volumes de contraintes solaires (cf. Figure 2-58). En effet, en saisissant les milieux des "heures", le pas de temps sera alors d'une demi-heure et le nombre d'arêtes des volumes sera doublé.

Remarquons que cette méthode reste dans la logique de notre approche qui propose de ne jamais détailler les heures de contraintes au-delà de la demi-heure (cf. 2.1.2.1). L'erreur d'approximation des courbes solaires passe alors de $0,4^\circ$ à $0,08^\circ$ pour la composante hauteur des rayons solaires. L'erreur minimale induite tendrait ainsi vers un surdimensionnement des solutions solaires. Du point de vue de la hauteur du soleil, les brise-soleil seront plus larges pour la période d'été et les ouvertures plus larges pour la période d'hiver. Du point de vue de la composante azimutale, cette méthode aura un effet neutre.

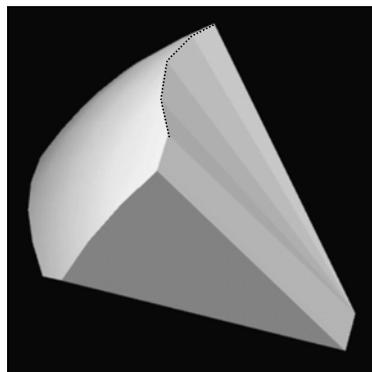


Figure 2-56 : Volume de contrainte solaire calculé avec les heures de la période choisie. A chaque arête du volume correspond donc une heure fixe de la période solaire.

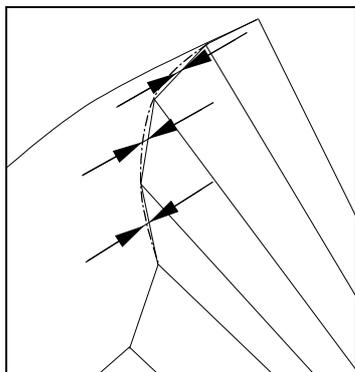


Figure 2-57 : Evaluation de l'erreur $e (< 0,4^\circ)$ due à l'approximation de la courbe de la trajectoire solaire par des segments tangents (pas de temps : une heure).

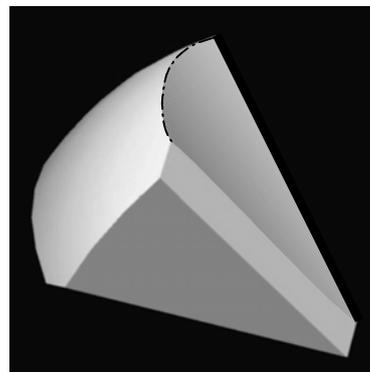


Figure 2-58 : Extrapolation du volume de contrainte solaire idéal (erreur nulle). Les facettes du volume précédent sont idéalement des surfaces courbes.

L'approximation des courbes des volumes de contraintes par des facettes planes semble avoir comme avantage majeur, celui de représenter en rendu filaire, l'ensemble des rayons solaires extrêmes pour une contrainte donnée et un pas de temps donné (Figure 2-57 et Figure 2-60). La lisibilité de ces rayons solaires en 3D par pas de temps d'une heure ou d'une demi-heure permet aussi de ne pas surcharger le rendu des volumes de contraintes.

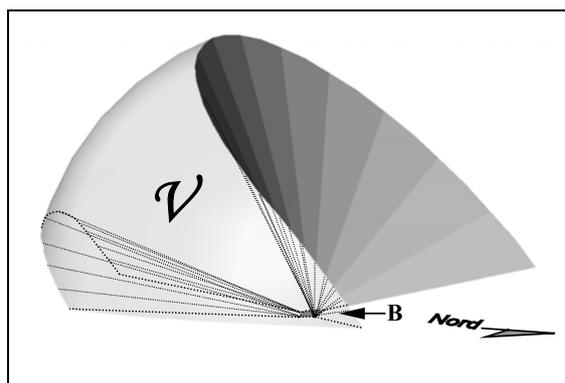


Figure 2-59 : Vue axonométrique d'un volume de contrainte solaire annuelle. L'ensemble des périodes solaires est pris comme cible et la base de contrainte est le polygone B .

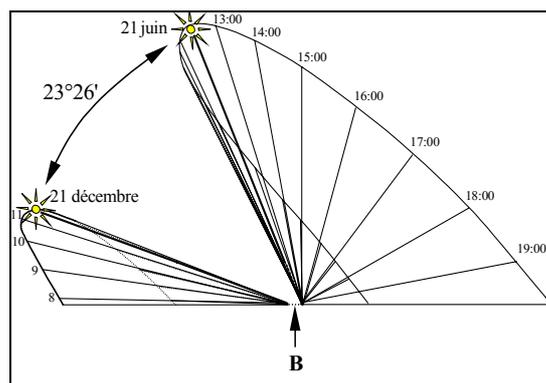


Figure 2-60 : Elévation est-nord-est du volume de contrainte \mathcal{V} précédent en rendu filaire. A chaque arête du volume correspond une heure fixe (ou demi-heure selon le choix du concepteur) de la période solaire.

2.1.3.4 La saisie des bases et des cibles

La saisie des points des bases et des cibles est une opération que le concepteur réalise dans l'environnement du modéleur, directement sur la modélisation de la scène et de la voûte solaire. L'architecte peut utiliser la fonction *vue orbitale* du modéleur pour visualiser au mieux la base et la cible. Il doit cliquer avec son curseur sur les sommets des deux polygones de la contrainte. L'opération est ainsi plus facilement "débrayable" que si l'architecte devait sélectionner deux faces, au risque que celles-ci ne soient pas planes. En effet, ce cas est très courant en modélisation architecturale et oblige tout de même le concepteur à créer ces faces à l'aide de sommets existants, dans les nombreux cas où la modélisation est réalisée avec des *polylignes* (chaîne de segments) 2D ou 3D.

Nous avons imaginé, un temps, proposer aux architectes uniquement des dates solaires dans notre menu *SVR* afin qu'ils choisissent les périodes d'ensoleillement de façon textuelle. Mais notre approche solaire étant couplée à la résolution de contraintes visuelles pour lesquelles les cibles sont toujours des polygones, nous avons décidé *in fine* de n'avoir qu'une seule méthode de saisie des bases et des cibles. Notre méthode est donc unique, quel que soit le type de contrainte. Elle permet, en simulation solaire, d'exploiter au mieux toutes les notions propres au modèle de voûte solaire. Elle devrait, notamment, permettre aux architectes de pré-visualiser rapidement l'emprise des volumes de contraintes en 3D, en visualisant la proportion des plages temporelles sélectionnées par rapport à l'ensemble des trajectoires annuelles, saisonnières, journalières, etc. ; ce qui semble impossible lors de la saisie de dates dans un menu.

Nous avons choisi de définir arbitrairement le sens de saisie des points des bases et des cibles comme étant le sens horaire (cf. Figure 2-61). Ce sens ayant une influence directe sur la normale des plans de découpe des volumes de contraintes (cf. 2.1.3.1.1), s'il n'est pas respecté, les volumes seront aberrants ou leur calcul échouera²⁶.

Il paraît évident que le plan de la base ne peut couper la cible (ou inversement), sous peine de faire échouer les calculs. Même si les cas sont rares en simulation solaire où la contrainte est d'ensoleiller les deux côtés d'une même surface, en simulation visuelle, le cas de figure est plus courant et il provoque donc une découpe virtuelle de la cible (de part et d'autre du plan de la base). Il peut s'agir, par exemple, de voir une cible par-dessus et par-dessous un plan virtuel de position potentielle des yeux. Le concepteur

²⁶ Nous aurions pu aussi implémenter une méthode d'inversion des normales.

doit donc tout simplement, dans ce cas, diviser la cible unique en deux cibles adjacentes de part et d'autre du plan de la base.

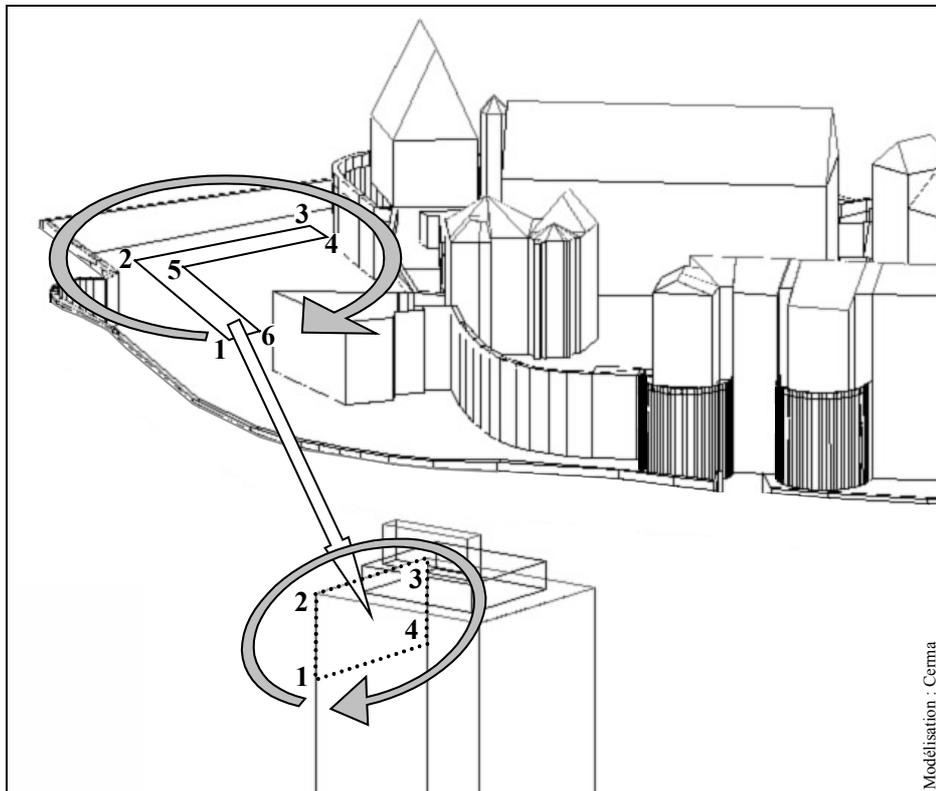


Figure 2-61 : Sens de saisie des points des bases et des cibles. Le sens retenu est le sens horaire (en regardant la base depuis la cible). Application à un exemple nantais de contrainte visuelle depuis un parcours des douves du Château des Ducs de Bretagne (base) vers les derniers étages de la Tour de Bretagne (cible, repère dans la ville).

2.1.3.5 Comparaison avec d'autres modèles

Il nous a semblé important de comparer les résultats obtenus avec notre méthode de calcul, aux résultats obtenus avec le seul outil de simulation inverse actuellement diffusé dans le monde à notre connaissance : *SolVelo* (cf. état de l'art – § 1.1.2.5.2) développé par U-P. Yeh [Yeh 1993] de l'Université de Californie du Sud à Los Angeles (USA). Cet outil est un petit programme informatique qui calcule des *enveloppes solaires* en 3D correspondant à deux heures d'une date choisie. Nous avons facilement

pu exploiter les résultats volumétriques de l'outil, dans le modelleur informatique qui accepte les fichiers .dxf qu'exporte *SolVelo*.

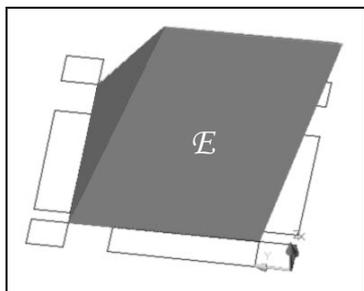


Figure 2-62 : Enveloppe solaire \mathcal{E} , le 21 juin de 10 h à 14 h et de base une parcelle et ses trois rues adjacentes. Calculs réalisés avec le logiciel *SVR*.

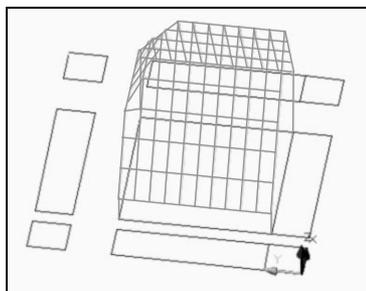


Figure 2-63 : Enveloppe solaire de la parcelle, le 21 juin de 10 h à 14 h, calculée avec le logiciel *SolVelo*. Fichier .dxf importé dans l'environnement *AutoCAD* pour être comparé à notre résultat.

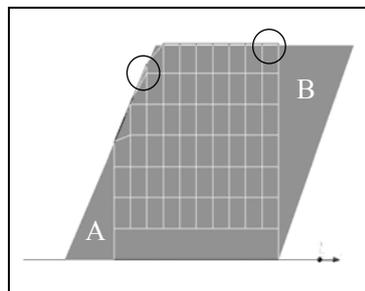


Figure 2-64 : Différence minimale entre les deux enveloppes solaires (de même contrainte, mais calculées avec deux prototypes différents : *SolVelo* et *SVR*) que nous attribuons à la prise en compte de l'épaisseur apparente du soleil dans notre outil (contrainte plus forte, d'où enveloppe \mathcal{E} potentiellement constructible plus petite). Les parties A et B n'étant pas à la verticale de la parcelle, il convient de les soustraire à \mathcal{E} .

Malgré la différence de type de volumétrie, entre le maillage obtenu avec *SolVelo* et le solide obtenu avec notre outil, nous concluons que la seule erreur remarquée est une taille légèrement plus petite pour notre enveloppe solaire \mathcal{E} . Il est alors impressionnant de remarquer que, du point de vue de la hauteur du soleil (inclinaison des rayons solaires qui limitent l'enveloppe solaire – Figure 2-64), la différence de taille entre les deux enveloppes (Figure 2-62 et Figure 2-63) implique une erreur de $0,25^\circ$ soit une erreur très proche ($0,265^\circ$) de celle que la macro *SVR* essaie de combler en intégrant dans ces calculs, l'épaisseur apparente du soleil. Une différence flagrante peut être remarquée entre la Figure 2-62 et la Figure 2-63 : la limitation ou non de l'enveloppe solaire à la verticale de la parcelle (résultat *SolVelo*). Mais il s'agit là d'un choix technique qui n'influence en rien le résultat volumétrique de la contrainte sur la parcelle. Dans notre cas, nous avons gardé la totalité de l'enveloppe dont la base est la parcelle plus les trois rues adjacentes tandis que *SolVelo* n'a gardé que la partie de son enveloppe située au-dessus de la parcelle. Dans les deux cas, la contrainte est la même ;

les parcelles voisines doivent pouvoir voir le soleil durant la période solaire ciblée quelle que soit la construction réalisée à l'intérieur de l'*enveloppe solaire*, sur la parcelle ou sur ses rues voisines. Du point de vue de la base, la contrainte peut donc être formulée ainsi : "ne pas voir le soleil le 21 juin de 10 h à 14 h, *exclusivement depuis* la parcelle et ses trois rues adjacentes". L'ensemble des solutions maximales à cette contrainte remplit l'intégralité de l'*enveloppe solaire*. Pour satisfaire à la contrainte, aucune construction ne pourra donc dépasser cette enveloppe.

2.2 Exploitation des volumes de contraintes et de leur ensemble de solutions

En terme de modélisation inverse, la solution la plus naturelle consiste à exploiter directement les volumes de contraintes comme d'autres volumes solides de la scène 3D modélisés auparavant. L'étape de modélisation inverse se trouve donc bien située à cet instant. Elle existe car les opérations booléennes entre les volumes de contraintes et la scène ne sont pas directement automatisées par l'outil informatique comme cela pourrait être envisagé. L'architecte intervient après les calculs de simulation inverse de l'ensoleillement ou de la visibilité qui aboutissent aux volumes que l'on connaît (\mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} ou \mathcal{V}'). Ainsi, par section, intersection ou soustraction de ces volumes de contraintes avec les ébauches de volumétries des phases d'avant-projet, il peut esquisser des enveloppes à ne pas dépasser, des volumes à chanfreiner, les écrans à réaliser... Comme les volumes de contraintes représentent des univers de solutions, toute section transversale (polygone de section) d'un volume est *une* solution à la contrainte portée par ce volume.

Il n'existe pas *la* solution à une contrainte ; il en existe un univers, une infinité. Evidemment, si les volumes à construire sont déjà très élaborés, la position d'un mur dans lequel doit être percée une ouverture par exemple, limitera le dimensionnement de cette ouverture à une unique solution, intersection du mur avec le volume de contrainte. La solution tiendra alors compte de l'épaisseur du mur.

Nos premiers tests semblent montrer que les solutions sont parfois complexes, au sens d'une difficile représentation mentale en 3D (cf. Figure 2-52). Toutefois, l'interprétation des solutions est le travail de l'architecte, et sur ce point, la visualisation 3D sera certainement une aide précieuse pour les concepteurs.

Avant de développer notre réflexion sur l'exploitation de l'infinité de solutions que représentent les volumes de contraintes, arrêtons-nous un instant sur un exemple personnel et simple qui n'a pas la prétention d'être extrêmement précis, mais qui propose quelques pistes d'exploitation d'un volume de contrainte solaire (Figure 2-65, Figure 2-66 et Figure 2-67).

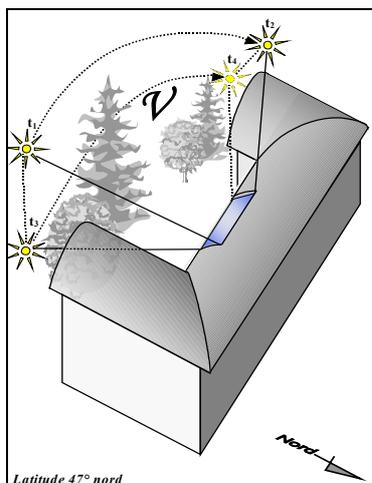


Figure 2-65 : Exemple simple d'une volumétrie en forme de "U" et d'un volume de contrainte hivernale \mathcal{V} ayant pour base une verrière sur une toiture bombée.

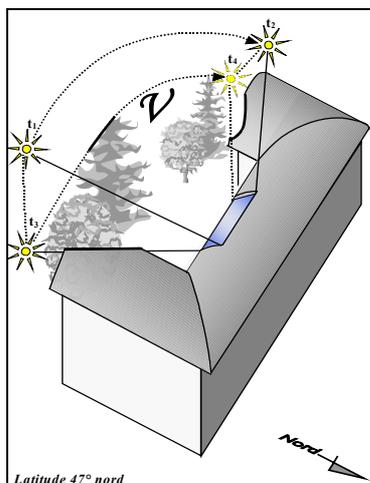


Figure 2-66 : Solution optimale à la contrainte d'ensoleillement : découpe de la toiture sur les 2 ailes du bâtiment, et élagage de l'arbre le plus haut dans le jardin.

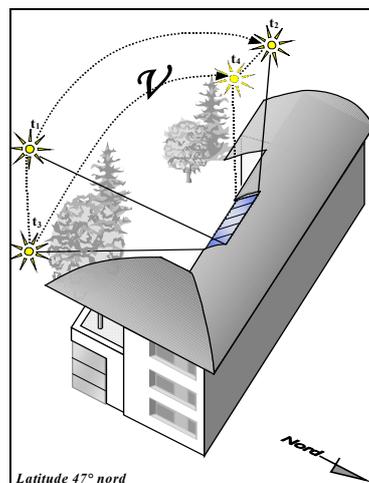


Figure 2-67 : Interprétation de l'architecte : une toiture biseautée à 45° à l'est et suivant la pente générale à l'ouest. L'arbre qui gênait l'ensoleillement hivernal de la verrière a été coupé.

Remarquons que si les arbres étaient remplacés par un bâtiment du type R+5 ou supérieur, il est fort possible que la contrainte n'aurait pas pu être satisfaite. La recherche des masques environnants existants prend donc toute son importance dans ce genre de situation.

2.2.1 Cinq types d'écrans pour une infinité de solution

Cinq types d'écrans solaires ou visuels sont proposés à l'architecte pour répondre à des contraintes de protection solaire ou visuelle. Pour les contraintes d'accès au soleil ou à des vues, les écrans peuvent de manière réversible devenir des ouvertures. Mais le concepteur aura aussi la possibilité de modéliser des ouvertures à partir des volumétries de la scène, comme nous l'avons présenté précédemment.

Pour les différents types d'écrans proposés, la réponse de notre macro dépendra de l'épaisseur et du point d'accrochage choisis par l'architecte. Par point d'accrochage, nous entendons le point saisi par le concepteur sur la modélisation, pour y faire passer les plans supports de l'écran. Il peut s'agir d'un point d'un élément existant sur lequel l'architecte compte se raccrocher (débord de toiture, structure extérieure, etc.) ou d'un

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

point de coordonnées connues mais non existant. Dans ce dernier cas, le point ne sera pas saisi à l'écran, sur l'interface du modeleur, mais plutôt entré sur la ligne de commande grâce à ses coordonnées 3D. Le point d'accrochage n'a pas besoin d'être inclus dans le volume de contrainte. Il peut être "cliqué" à l'extérieur du volume.

L'exploitation des volumes de contraintes par le calcul d'écrans, a fait l'objet d'un module spécifique dans notre macro. Ce module exclusivement réservé à la gestion des écrans solutions est présenté ci-dessous, via son interface graphique.

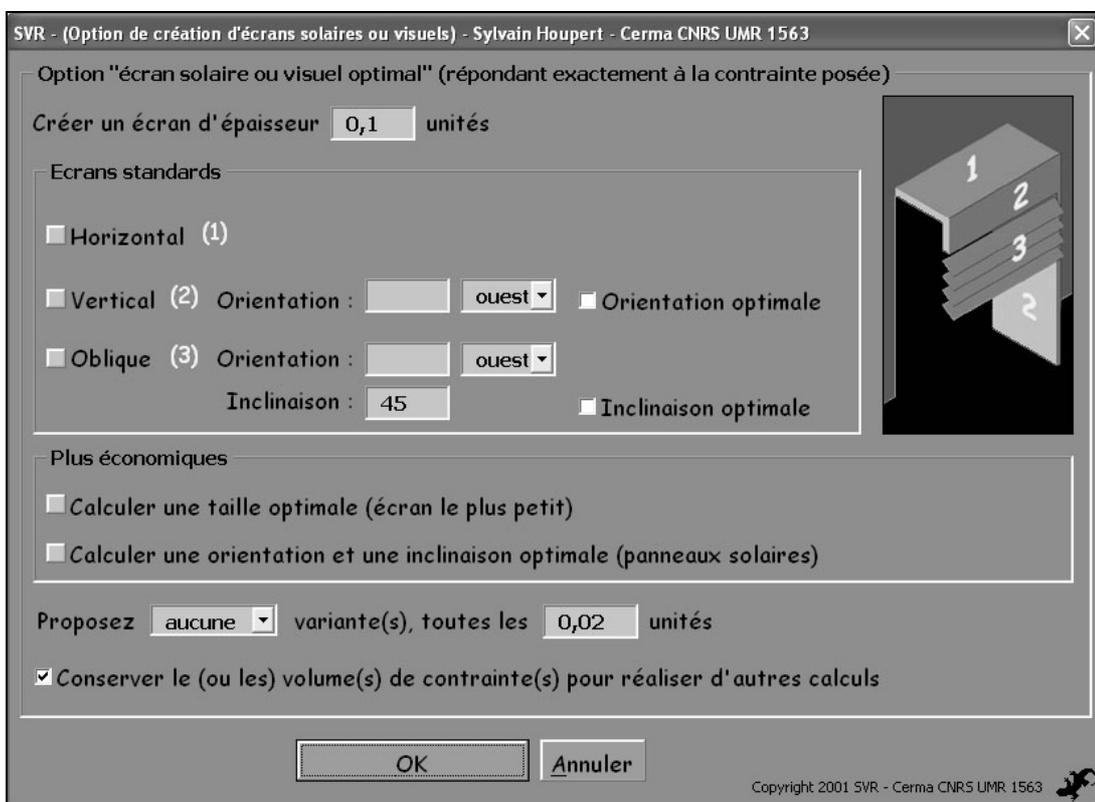


Figure 2-68 : Interface *SVR* – option "écrans solaires ou visuels". L'architecte entre les données suivantes : épaisseur de l'écran en mètre(s) (unité de mesure de la scène), type d'écran (horizontal, vertical ou oblique), orientation et inclinaison de l'écran, optimisation de la taille, de l'orientation ou de l'inclinaison de l'écran, nombre de variantes souhaité et espacement entre les variantes.

Les cinq types d'écrans sont présentés sur les illustrations ci-après.

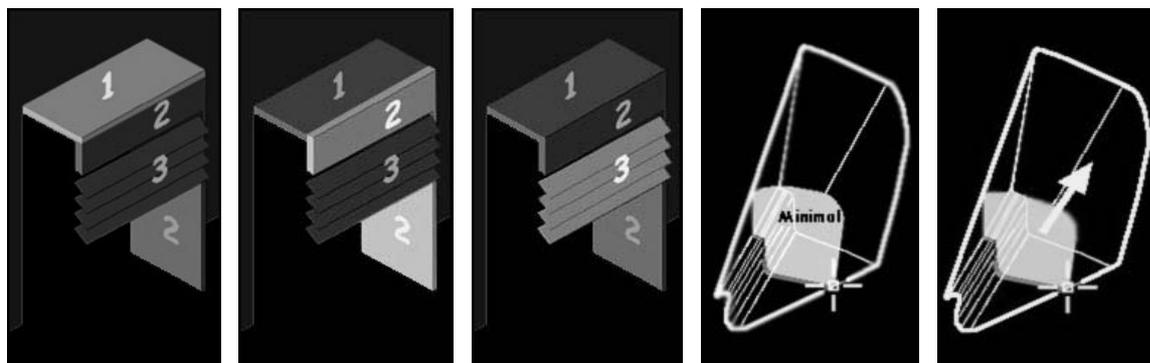


Figure 2-69 :
L'écran horizontal
(type 1)

Figure 2-70 :
L'écran vertical
(type 2)

Figure 2-71 :
L'écran oblique
(type 3)

Figure 2-72 :
L'écran de taille
minimale (type 4)

Figure 2-73 :
L'écran d'orientation
et d'inclinaison
optimales (type 5)

Si pour les types 1, 2 et 3, les solutions sont relativement simples à se représenter dans l'espace, pour les deux derniers types (Figure 2-72 et Figure 2-73), leur représentation mentale 3D est loin d'être triviale. Prenons comme exemple simple, de type 4, deux fenêtres F_1 et F_2 placées face à face de part et d'autre d'une rue. Les baies F_1 et F_2 ont la même hauteur, mais F_2 est plus large (cf. Figure 2-74 et Figure 2-75). \mathcal{V} , de base et de cible F_1 et F_2 , est un volume de contrainte visuelle simple légèrement plus large du côté de F_2 . Recherchons l'écran minimal situé à mi-distance des deux baies, solution de la contrainte visuelle "ne pas voir la totalité de F_2 depuis F_1 " et comparons ce résultat avec ce qu'il est possible d'imaginer comme solution 3D de cette contrainte.

Pour trouver l'écran de taille minimale (minimum de matière), le prototype *SVR* compare pour chaque demi-degré d'inclinaison et d'orientation, les volumes des écrans solutions d'épaisseur constante (choisie et entrée par le concepteur, via l'interface). Dans notre exemple, le volume minimal est trouvé pour un écran d'inclinaison légèrement inférieure à 90° . Or, en coupe et en plan, l'écran de section transversale (cf. Figure 2-74 – écran blanc) semblerait certainement une solution optimale pour nombre de concepteurs qui ne raisonnent qu'en 2D. En effet, à première vue, la distance minimale entre le point p et l'arête supérieure de \mathcal{V} semble être portée par la perpendiculaire à p . Donc, en coupe, la distance minimale peut sembler être à la verticale de p . Or, il n'en est rien, puisque \mathcal{V} est légèrement plus étroit du côté de F_1 que de F_2 . La solution est donc une rotation du plan de section de l'écran, à gauche en coupe, afin de profiter de la plus faible largeur de \mathcal{V} de ce côté.

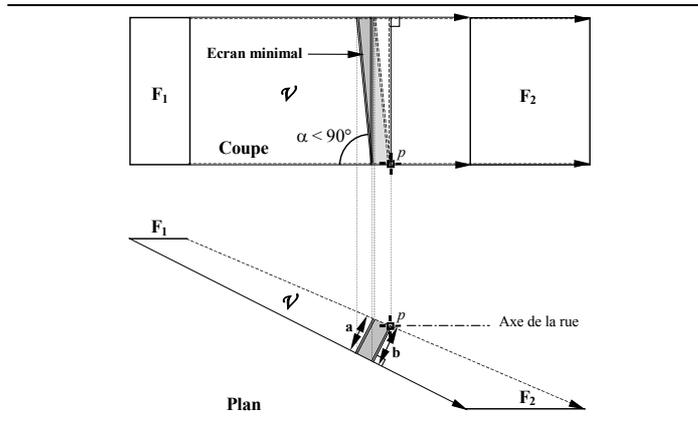


Figure 2-74 : Plan et coupe de deux écrans passant par p , solutions à la contrainte visuelle entre les fenêtres F_1 et F_2 . La distance a étant plus petite que b ($F_1 < F_2$), l'écran blanc, issu de la section latérale de \mathcal{V} , n'est pas la solution minimale.

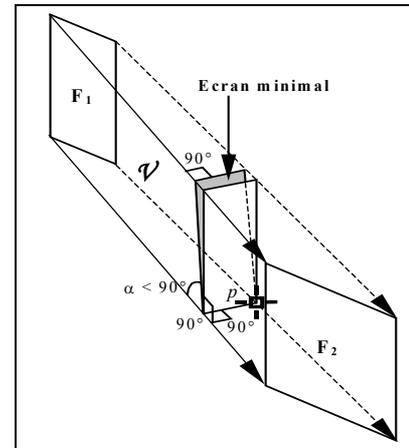


Figure 2-75 : Ecran minimal (grisé) passant par p . Il n'est pas vertical contrairement à l'écran blanc correspondant à la section perpendiculaire de \mathcal{V} .

Notre outil effectuant des comparaisons de $0,5^\circ$ en $0,5^\circ$ uniquement, nos résultats sont fiables à $\pm 0,5^\circ$. Cependant, cette erreur reste faible. La précision de la solution minimale (écran grisé) peut donc être considérée comme suffisante.

Dans un exemple plus complexe (cf. Figure 2-76 et Figure 2-77), l'écran optimal calculé avec la macro *SVR* est du 5^{ème} type (orientation et inclinaison optimales). Dans ce cas, l'objectif est de modéliser un panneau solaire. La macro dimensionne et oriente l'écran devenu panneau solaire photovoltaïque (PV) ou thermique selon le point d'accrochage choisi par l'architecte. La cible de la contrainte solaire est annuelle mais limitée en heures, par les masques environnants *in situ*, le matin et en fin d'après-midi.

La contrainte porte uniquement sur le linteau L (la base – cf. Figure 2-77 et Figure 2-78) qui peut être constamment à l'ombre toute l'année. Cette base n'englobe pas une partie de la fenêtre puisque celle-ci ne peut être à l'ombre toute l'année. Toutefois, la fenêtre n'étant pas la base d'une autre contrainte, elle sera partiellement à l'ombre de l'écran solution (PV) de \mathcal{V} au printemps et en été (cf. Figure 2-78 – schéma du rayon solaire du 21 juin à 12 h 30), et ponctuellement en automne et en hiver. Dans ce cas, la contrainte principale est donc de n'autoriser qu'une seule zone à l'ombre toute l'année qui est le linteau L . La cible de la contrainte est la partie de la voûte solaire non occultée par les masques environnants (Figure 2-76), soit la période T : du 21 décembre de 13 h 30 à 16 h, au 21 juin de 12 h 30 à 17 h, puis jusqu'au 21 décembre de 13 h 30 à 16 h.

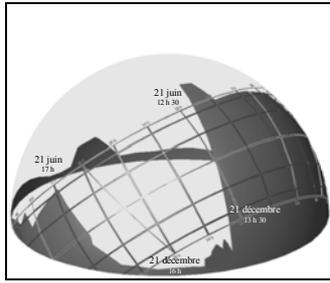


Figure 2-76 : Périodes solaires délimitées par des masques environnants du 21 décembre de 13 h 30 à 16 h, au 21 juin de 12 h 30 à 17 h, puis jusqu'au 21 décembre de 13 h 30 à 16 h (heures solaires)

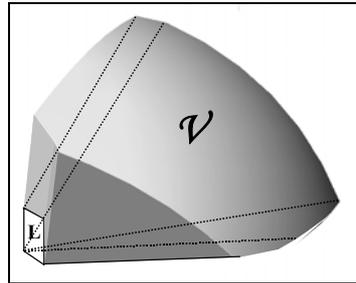


Figure 2-77 : Volume \mathcal{V} correspondant à la contrainte solaire de cible, la période précédente (figure de gauche) et de base, le linteau L (figure de droite). La solution recherchée est un panneau solaire (PV) qui n'est autre qu'un écran.

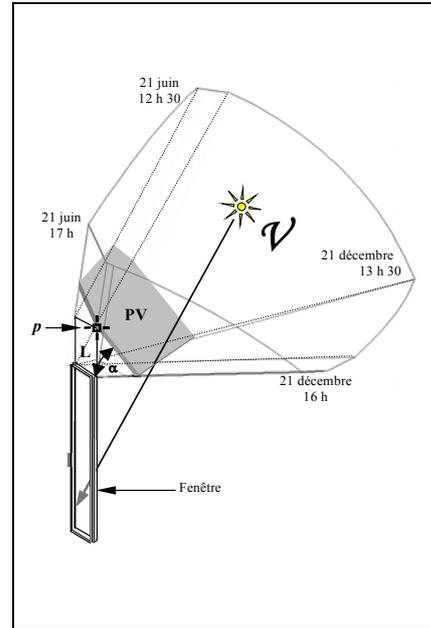


Figure 2-78 : L'outil SVR calcule le volume de contrainte \mathcal{V} puis, pour un point d'accroche donné (p), modélise le panneau solaire (PV) d'orientation et d'inclinaison optimale.

L'écran solution est de taille, d'orientation et d'inclinaison optimales. C'est-à-dire, que dans le cas d'un panneau solaire (PV), son orientation correspond à l'azimut du rayon solaire passant par le centre de gravité de T et son inclinaison est telle que la normale à l'écran passe aussi par le centre de gravité de T . Quant à la taille de l'écran, elle dépend du point d'accrochage p choisi par l'architecte.

Evidemment, la forme de la solution n'étant pas celle d'un panneau solaire standard, elle représente l'enveloppe maximale dans laquelle peut être placé un panneau solaire sans changer la contrainte de départ.

2.2.2 Une même exploitation pour cinq types de contraintes

Les cinq types de contrainte ont déjà été présentés via les cinq volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r correspondants. Leur exploitation par les cinq types d'écrans présentés dans la section précédente ne diffère que par l'ampleur des solutions. Plus le volume est large, plus la solution le sera. Mais l'exploitation reste la même, et l'interface présentée à la Figure 2-68 est utilisée quel que soit le type de contrainte. De même, les pistes d'interprétation des solutions que nous proposons sont les mêmes pour l'ensemble des contraintes : écrans d'épaisseurs choisies, ouvertures dans des éléments existants, panneaux solaires optimaux, etc.

De manière schématique, nous avons tenté d'illustrer sur les figures suivantes, l'exploitation possible des volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r pour une scène simple composée de un ou deux murs, percés ou non. Nous nous sommes limités à des contraintes solaires pour des raisons d'uniformité et de lisibilité (vérification directe de l'ensoleillement), mais l'exploitation des volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r est naturellement valable pour des contraintes de visibilité.

Quelle que soit la contrainte solaire, les solutions d'ouvertures (O) seront prioritairement des solutions hivernales et les solutions d'écrans (E) pare-soleil seront des solutions estivales. Les cibles solaires seront représentées par quatre positions du soleil (instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4) proches (en hiver) ou non (en été) de l'horizon. Les taches ou ombres solaires (simulation directe) ont uniquement une valeur de vérification de l'ensoleillement aux quatre instants (t_1 , t_2 , t_3 et t_4). Elles sont identifiées par un cercle sur les figures et permettent de vérifier rapidement, si pour ses instants extrêmes, les solutions satisfont aux contraintes posées. Une zone blanche (constamment ensoleillée, quel que soit l'instant t), devra être lue comme une zone d'où (ou à travers laquelle) il est possible de voir entièrement la cible (t_1 , t_2 , t_3 et t_4). Inversement, une zone noire (constamment à l'ombre, quel que soit l'instant t de la période choisie), devra être lue comme une zone d'où (ou à travers laquelle) il est impossible de voir entièrement la cible (t_1 , t_2 , t_3 et t_4). Enfin, une zone grise (partiellement ensoleillée durant la période ciblée), devra être lue comme une zone d'où (ou à travers laquelle) il est possible de voir partiellement la cible (t_1 , t_2 , t_3 et t_4).

Les trois figures ci-dessous illustrent un cas estival (Figure 2-79 et Figure 2-80) et un cas hivernal (Figure 2-81) pour un volume de contrainte \mathcal{V} simple.

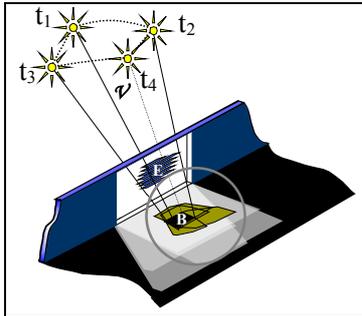


Figure 2-79 : Solution E à la contrainte "ne pas voir le soleil à tous les instants compris entre t_1 , t_2 , t_3 et t_4 depuis tous les points de B". Vérification : B est entièrement à l'ombre quel que soit l'instant t .

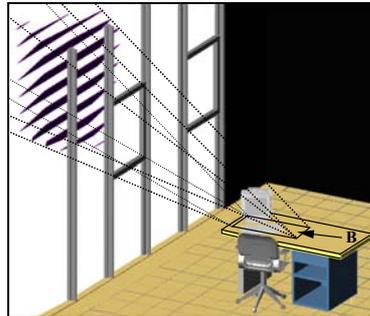


Figure 2-80 : Vue axonométrique d'une situation réaliste d'une base de contrainte solaire située à 1,20 m du sol, décrivant la position des yeux de l'utilisateur d'un bureau.

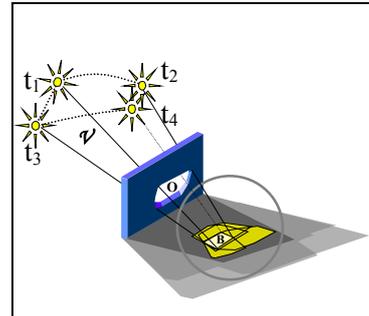


Figure 2-81 : Solution O à la contrainte "voir le soleil à tous les instants compris entre t_1 , t_2 , t_3 et t_4 depuis tous les points de B". Vérification : B est entièrement au soleil quel que soit l'instant t .

La Figure 2-82 et la Figure 2-83 illustrent un cas d'enseillement exclusif d'une baie B servant de base de contrainte. La baie B' voisine ne peut être enseillée. L'ouverture O réalisée entre les lames brise-soleil horizontales répond exactement à la contrainte d'une *enveloppe solaire* de base B et de cible $t_1t_2t_3t_4$.

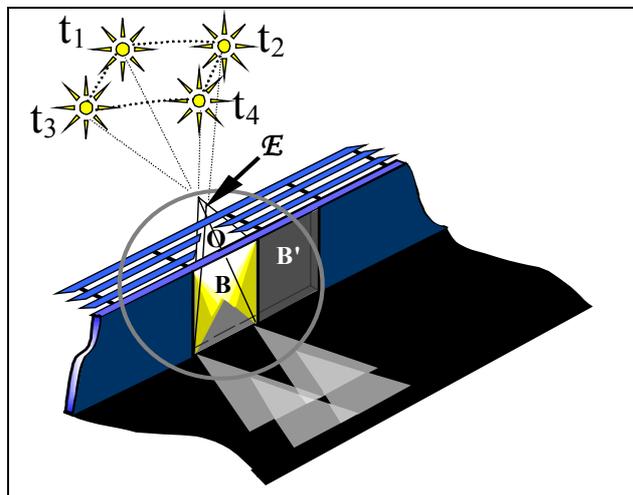


Figure 2-82 : Solution O à la contrainte "voir $t_1t_2t_3t_4$ exclusivement depuis B". Vérification : seule la baie vitrée B est au soleil quel que soit l'instant t . La baie vitrée, B' voisine de B est bien protégée du soleil.

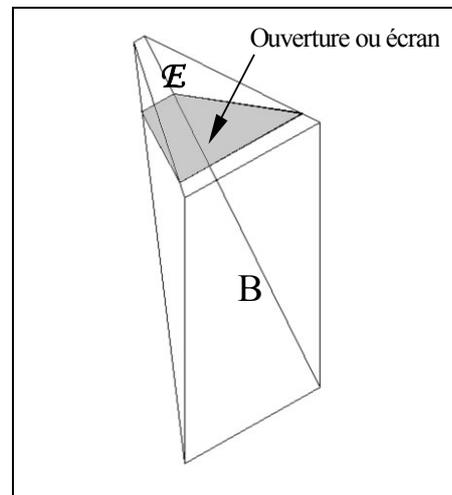


Figure 2-83 : Enveloppe solaire \mathcal{E} correspondant à une contrainte similaire à celle de la figure ci-contre. La solution horizontale est unique à cette hauteur donnée.

Les cas des volumes de contraintes opposés sont plus complexes à illustrer. Pour une baie B servant de base sur un premier mur, et une période $t_1t_2t_3t_4$ pour cible, une solution à la contrainte "voir la totalité de $t_1t_2t_3t_4$ à travers B" est un percement dans le second mur (soustraction du volume de contrainte solaire opposé \mathcal{V}_{opp} – cf. Figure 2-84 et Figure 2-85). La position du mur étant fixe, cette ouverture O est l'unique solution à la contrainte. Il faut alors remarquer que seuls des points de la scène appartenant à \mathcal{V}_{opp} peuvent voir la totalité de la cible $t_1t_2t_3t_4$ à travers la base. \mathcal{V}_{opp} est le volume minimal englobant tous les points de la scène d'où il est possible de voir la totalité de la cible à travers la base. Le volume de contrainte opposé \mathcal{V}_{opp} peut aussi être considéré comme le volume de la scène, derrière la baie B, constamment à l'ombre ou au soleil durant la période $t_1t_2t_3t_4$ [D. Siret 2002]. Du point de vue de l'analyse de l'ensoleillement d'un lieu derrière une ouverture ou un écran, un tel volume peut permettre à l'architecte de visualiser en 3D le volume d'ensoleillement potentiel constant sur une période de l'année. Dans certains lieux intérieurs, cela peut permettre de placer derrière ces volumes d'ombre ou de soleil permanent, des œuvres fragiles (ombre permanente) ou des plantes (soleil permanent). Ce qui est probablement pratiqué de manière empirique, dans des salles d'exposition, des serres, des jardins d'hiver, des vitrines... semble pouvoir être modélisé de manière précise avec notre outil informatique, grâce aux volumes de contraintes opposés.

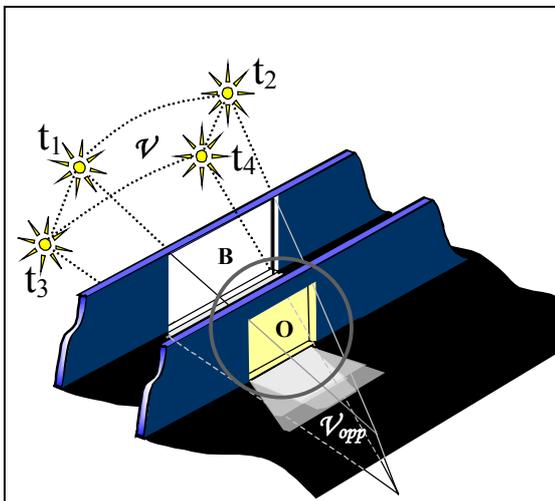


Figure 2-84 : Solution O à la contrainte "voir la totalité de $t_1t_2t_3t_4$ à travers B". Vérification : O est au soleil quel que soit l'instant t (pas de zone grisée sur la baie vitrée O). Autrement dit, tout rayon passant par O et visant $t_1t_2t_3t_4$, passe par B.

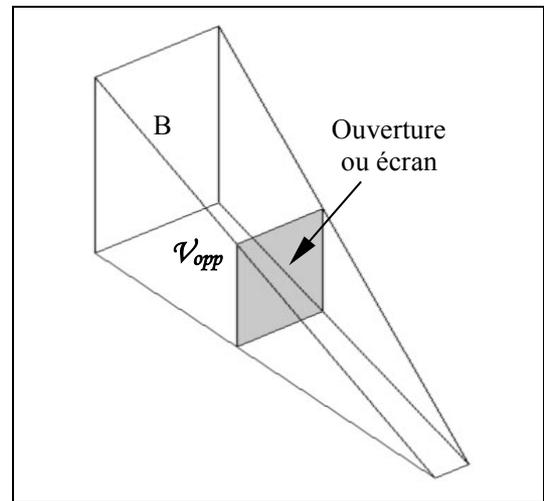


Figure 2-85 : Volume de contrainte opposé \mathcal{V}_{opp} similaire à la contrainte de la figure ci-contre. La solution verticale est unique à cette distance donnée.

En ce qui concerne les *enveloppes solaires* opposées \mathcal{E}_{opp} , pour une baie B servant de base sur un premier mur, et une période $t_1t_2t_3t_4$ pour cible, la solution à la contrainte "voir $t_1t_2t_3t_4$ à travers B" est un percement dans le second mur, plus large que celui réalisé par soustraction de \mathcal{V}_{opp} (ici, soustraction de \mathcal{E}_{opp} – cf. Figure 2-86 et Figure 2-87). Cette solution de percement O est l'unique solution à la contrainte, pour une position du mur fixée par l'architecte. Nous pouvons alors remarquer que \mathcal{E}_{opp} représente l'ensemble des points de la scène d'où il est possible de voir la cible $t_1t_2t_3t_4$ à travers la base. L'*enveloppe solaire* opposée \mathcal{E}_{opp} peut donc être considérée comme l'enveloppe minimale englobant tous les points de la scène, d'où il est possible de voir le soleil durant au moins un instant de la période $t_1t_2t_3t_4$ et à travers B. D'un point de vue analytique, \mathcal{E}_{opp} devrait permettre à l'architecte de visualiser en 3D l'envergure potentielle d'ombre ou d'enseillement (simulation directe) sur une période de l'année, à l'intérieur d'un lieu, derrière un masque ou une baie. Il semble alors relativement simple de placer, à l'échelle du lieu, la modélisation d'un personnage en position debout ou assise selon l'intention recherchée par l'architecte et de visualiser l'*enveloppe solaire* opposée en rendu légèrement transparent. Le personnage apparaîtrait alors baigné de lumière ou non selon la position ou la période solaire ciblée.

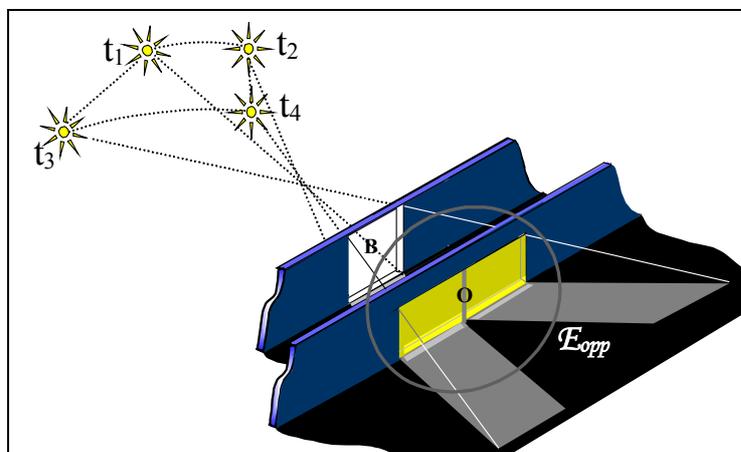


Figure 2-86 : Solution O à la contrainte "voir $t_1t_2t_3t_4$ à travers B". Au-delà de O le mur n'est plus éclairé.

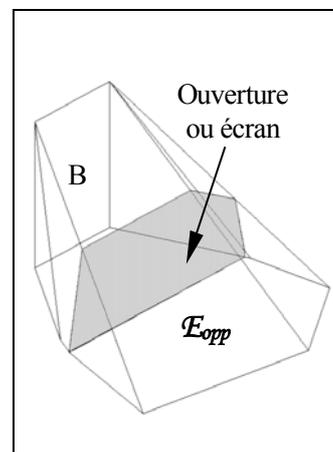


Figure 2-87 : *Enveloppe solaire* opposée \mathcal{E}_{opp} proche de la figure ci-contre. La solution verticale est unique à cette distance donnée.

Nota : Pour ces exemples, \mathcal{E}_{opp} est limitée par le plan horizontal du sol.

Enfin, concernant les volumes de contraintes de réflexion solaire ou visuelle \mathcal{V}_r , pour une base B et une cible $t_1t_2t_3t_4$ (période solaire dans l'exemple ci-après – Figure 2-88 et

Figure 2-89) une solution à la contrainte "ne pas voir la totalité de $t_1t_2t_3t_4$ depuis B par réflexion spéculaire sur le plan miroir P_m " est l'intersection de \mathcal{V}_r avec un plan support de la scène (ici, le plan du mur). Cette solution d'écran pare-soleil E est l'unique solution à la contrainte, dans le plan de la baie (au nu du mur). Si P_m était une façade vitrée parfaitement spéculaire, la base B ne serait jamais ensoleillée durant $t_1t_2t_3t_4$ par réflexion sur P_m puisque E est une solution optimale. Cependant, elle pourrait l'être directement par le reste de la baie sans qu'il y ait réflexion solaire sur ce plan miroir. Les volumes \mathcal{V} et \mathcal{V}_r peuvent donc être complémentaires pour résoudre des problèmes (dédoublés) d'éblouissement par exemple.

Signalons aussi que les concepteurs pourront chercher à modéliser des solutions de brise-soleil (ou d'écrans de manière générale), en amont ou en aval du plan miroir.

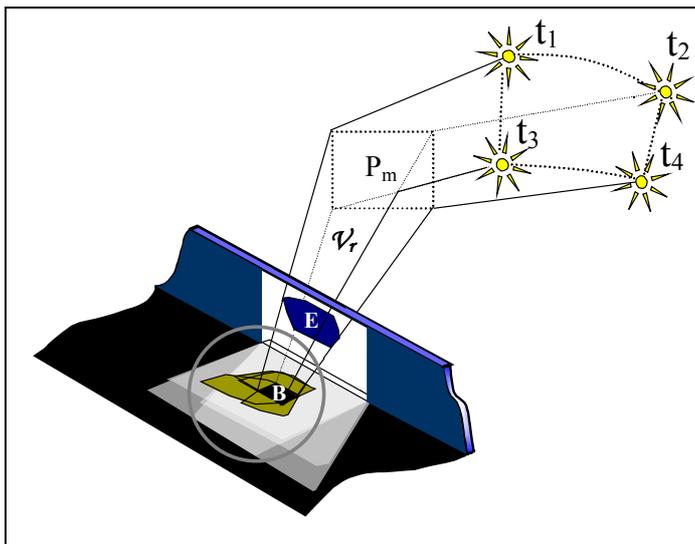


Figure 2-88 : Solution E à la contrainte "ne pas voir la totalité de $t_1t_2t_3t_4$ depuis B, par réflexion spéculaire sur le plan miroir P_m ".
Vérification (simulation directe de l'ensoleillement dû à la réflexion uniquement) : B est entièrement à l'ombre quel que soit l'instant t .

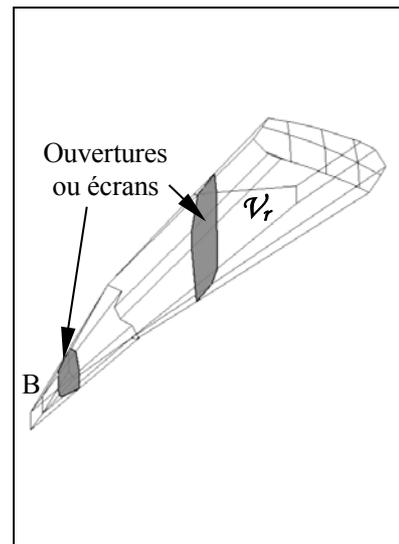


Figure 2-89 : Volume de contrainte de réflexion \mathcal{V}_r similaire à la figure ci-contre. Les deux solutions verticales sont uniques. Elles font partie de l'infinité de solutions englobées par \mathcal{V}_r .

Nota : Pour un volume de réflexion \mathcal{V}_r les solutions existent en amont ou en aval du plan miroir P_m .

En scénographie, les concepteurs pourraient tirer profit de ce type de volumes de contraintes. En effet, ces derniers peuvent servir à identifier, dans un premier temps, le parcours de rayons visuels réfléchis sur des miroirs, dans une mise en scène subtile. Un

jeu de miroir et de découvertes indirectes de cibles (objets, sculptures, tableaux, articles, etc.) serait alors possible. Dans un second temps, le concepteur pourrait modéliser autant d'ouvertures ou d'écrans visuels que nécessaires à la mise en scène de l'espace situé entre la base et la cible de contrainte.

2.2.3 La combinaison de contraintes

Pour pallier les contradictions du type de celles évoquées plus haut (§ 2.2.1, Figure 2-78) qui, rappelons-le, ne permettent pas toujours de concilier deux contraintes paradoxales (panneau solaire optimal bloquant partiellement les apports solaires en hiver par exemple), nous proposons d'y réfléchir à partir de volumes de contraintes solaires représentés en coupe (Figure 2-90). A l'intérieur de l'espace situé à l'intersection d'un volume de contrainte solaire estivale et un volume de contrainte solaire hivernale de même base ou non, il n'est pas possible de trouver une solution qui satisfasse aux deux contraintes. Evidemment, si les deux contraintes sont du même type (protection solaire ou apports solaires uniquement) la question ne se pose plus. Ainsi, dans les exemples suivants, la contrainte solaire estivale sera toujours de protéger une base du soleil (recherche d'un écran) et la contrainte solaire hivernale de permettre des apports solaires sur une base. Toutefois, ce choix n'est pas une règle générale, car en terme de confort visuel, la protection solaire contre l'éblouissement est légitime toute l'année.

La base utilisée pour la Figure 2-90 est une fenêtre standard exposée au sud et placée au-dessus d'une allège de 1 m de haut. Trois cas de deux contraintes *a priori* contradictoires sont illustrés par cette figure, à trois étages différents pour rendre plus lisibles les tracés solaires.

La fenêtre est prise comme base car la scène est considérée comme existante. Même si aucune autre ouverture n'est possible dans le mur (pas de base de contrainte derrière la fenêtre), la démarche de modélisation inverse ne perd pas pour autant son sens. En effet, si le concepteur cherche à protéger la fenêtre, avec un dispositif placé devant celle-ci et calculé grâce à un volume de contrainte, il est certain que l'espace à l'intérieur du bâtiment ne sera jamais ensoleillé durant la période ciblée. C'est précisément cet effet de protection solaire totale que l'on recherche derrière une fenêtre lorsque l'on protège celle-ci du soleil par l'extérieur, et c'est exactement ce type de contrainte que règlent les volumes \mathcal{V} .

Evidemment, l'outil *SVR* donnant des résultats en trois dimensions, les solutions que nous obtenons sont des écrans 3D de formes plus complexes que celles de la Figure 2-90 suivante. Les bords latéraux des écrans ont notamment de multiples faces.

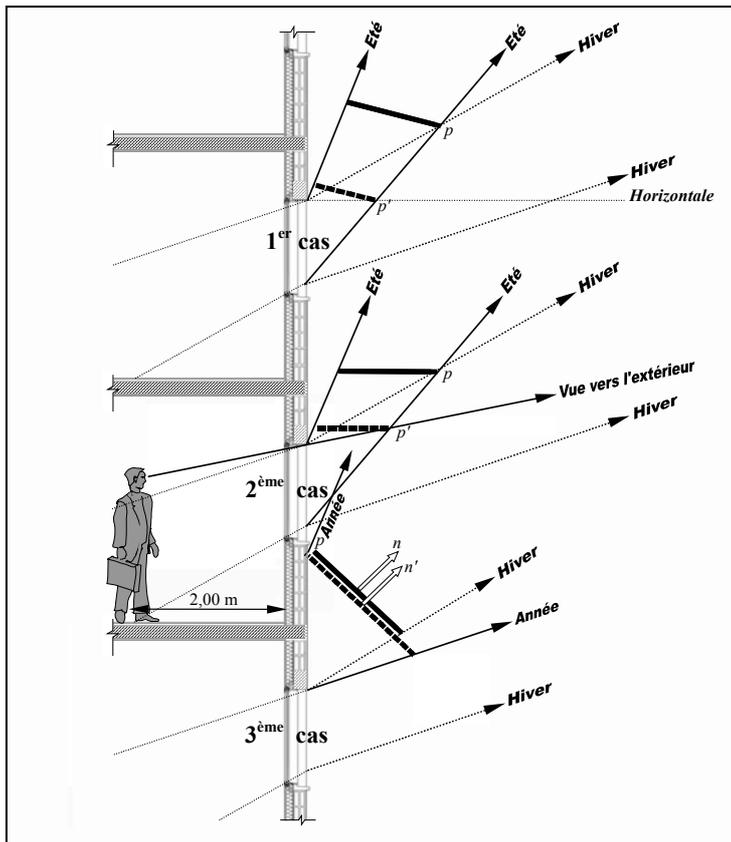


Figure 2-90 : Trois cas de doubles contraintes *a priori* contradictoires. Les écrans en pointillés sont des solutions qui ne tiennent pas compte de la contrainte solaire hivernale. Les écrans en traits gras sont les solutions à la double contrainte solaire été-hiver ou annuelle sans l'hiver pour le dernier cas. La latitude du lieu est celle de Nantes (47° nord).

Nota 1 : Par hiver, nous entendons dans cet exemple, les mois de décembre, janvier et février, et par été, les mois de juin, juillet et août.

Nota 2 : Dans le dernier cas, les bases des deux contraintes sont différentes. La base du panneau solaire se situe entre le linteau et l'appui de fenêtre de l'étage supérieur, car seule cette partie de la façade peut être à l'ombre durant toute l'année sans modifier les contraintes.

1^{er} cas : La solution optimale à la double contrainte solaire été-hiver est l'écran de taille minimale passant par p (intersection entre les rayons d'hiver les plus hauts et les rayons d'été les plus bas). L'écran passant par p' est valable uniquement en été si le concepteur décide de placer le pare-soleil à l'horizontale de la face inférieure du linteau.

2^{ème} cas : La solution horizontale à la double contrainte solaire été-hiver est l'écran horizontal passant par p . L'écran passant par p' est valable uniquement en été si le concepteur décide de placer le pare-soleil de manière à ne pas gêner les vues obliques vers l'extérieur, pour un individu en position debout à 2 m de la baie.

3^{ème} cas : La solution d'inclinaison d'un panneau solaire est l'écran dont la normale n est dirigée vers le centre de gravité de la période solaire annuelle visible depuis la base, et dont le point d'accrochage est p . L'écran en pointillé de même normale (n') est valable uniquement s'il n'y a pas de contrainte solaire hivernale. Le panneau solaire est alors plus large mais il crée une ombre conséquente sur la fenêtre et donc à l'intérieur du bâtiment en hiver.

Concrètement, dans l'environnement du modeler, le 2^{ème} cas de la Figure 2-90 se traduit comme suit :

Dans un premier temps, l'architecte simule la contrainte hivernale (\mathcal{V}_1 – Figure 2-91 et Figure 2-92). Ce premier volume de contrainte a pour but de renseigner l'architecte sur l'emprise de cette contrainte 3D.

Dans un second temps, l'architecte simule la contrainte solaire estivale (\mathcal{V}_2 – Figure 2-91 et Figure 2-92) et, grâce à une élévation du premier volume de contrainte (vue de face par exemple), il trouve l'altitude minimale du point d'accrochage (p sur la Figure 2-90) de l'écran horizontal. Avant de fermer la macro *SVR*, l'architecte entre les coordonnées du point p sur la ligne de commande du modeler ou saisit ce point directement à l'écran. La macro calcule alors l'unique solution horizontale à cette double contrainte, en tenant compte de l'épaisseur de l'écran demandée par l'architecte.

La Figure 2-93 illustre cette unique solution horizontale.

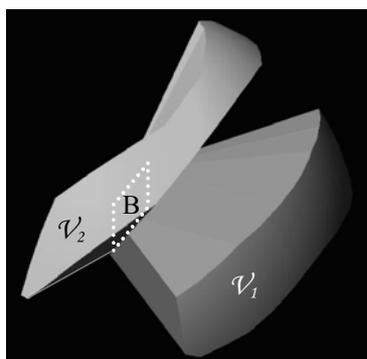


Figure 2-91 : Volumes de double contrainte \mathcal{V}_1 (fin de matinée, début et milieu d'après-midi, en décembre, janvier et février) et \mathcal{V}_2 (toute la journée, en juin, juillet et août), et de même base B (la fenêtre sud du cas n°2 – Figure 2-90)

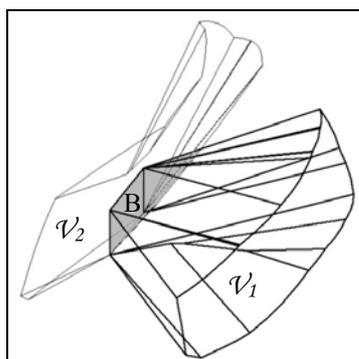


Figure 2-92 : Volumes de double contrainte \mathcal{V}_1 et \mathcal{V}_2 , et de même base B. Rendu filaire. L'intersection des deux volumes est grisée.

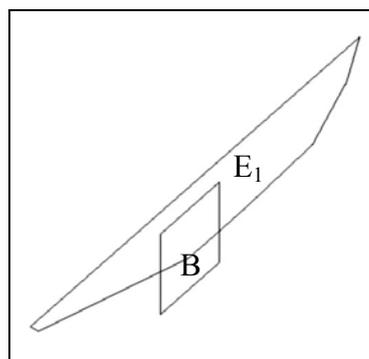


Figure 2-93 : Envergure très large de la solution horizontale pourtant optimale pour la double contrainte du cas n°2 (Figure 2-90). Pour une protection solaire durant toute la journée de juin à août, et des apports solaires théoriques en fin de matinée, début et milieu d'après-midi de décembre à février, l'écran E_1 est près de 6 fois plus large que la fenêtre. E_1 est une section horizontale de \mathcal{V}_2 .

Mais, s'apercevant que cette solution a une envergure difficilement exploitable dans son projet, l'architecte peut aussi obtenir très rapidement la solution minimale à la double

contrainte, en calculant l'intersection des deux volumes de la double contrainte ($\mathcal{V}1$ et $\mathcal{V}2$). Pour réaliser cela, il peut utiliser la fonction *Modifier/Édition_des_solides/Soustraction* du modèleur, puis la fonction *décomposer* afin de pouvoir soustraire la face transversale de cette intersection (Figure 2-95). La solution optimale est ainsi constituée uniquement des faces latérales de cette intersection (Figure 2-96).

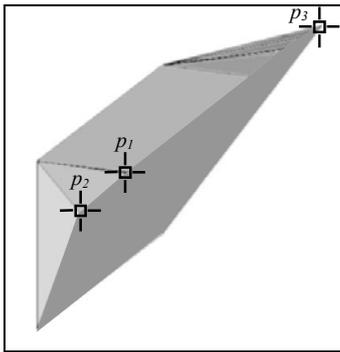


Figure 2-94 : Intersection des deux volumes de contraintes $\mathcal{V}1$ et $\mathcal{V}2$ (cf. Figure 2-92). P_1 , P_2 et P_3 serviront à "accrocher" respectivement les écrans E_1 , E_2 et E_3 (Figure 2-93 et Figure 2-97).

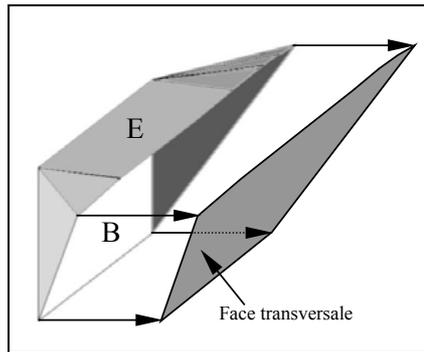


Figure 2-95 : Retrait de la face transversale du volume d'intersection (figure de gauche) pour obtenir le pare-soleil E tel que l'ensemble des rayons solaires hivernaux (inverses) soient canalisés par E depuis B.

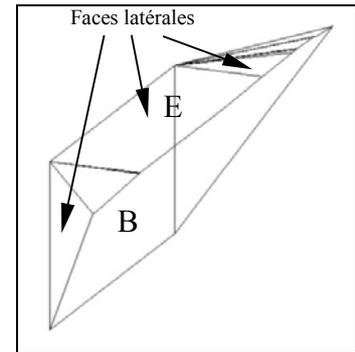


Figure 2-96 : Solution E plus compacte que la solution horizontale ci-dessus (Figure 2-93) : optimisation du pare-soleil par l'intersection des deux volumes $\mathcal{V}1$ et $\mathcal{V}2$ (l'architecte ne garde que les faces latérales)

Remarquons que la face transversale extraite est à elle seule, la solution optimale à la double contrainte inversée et illogique : "depuis la fenêtre, voir le soleil en été *et* ne pas le voir en hiver". De tels brise-soleil compacts (Figure 2-96), optimisés du point de vue de la quantité de matière mais pas du point de vue des découpes et des assemblages à réaliser, sont similaires à ceux obtenus par F. Arumi-Noé [Arumi-Noé 1996] de l'Ecole d'Architecture de Austin (Texas – USA). Dans la première partie de ce mémoire (état de l'art – § 1.1.2.5.1) nous parlons de ces brise-soleil en forme d'entonnoir, difficilement réalisables en architecture. Nous proposons donc aux architectes, soit de garder ces brise-soleil de forme innovante et très compacte, soit de s'en approcher en se limitant à des faces latérales uniquement horizontales et verticales (Figure 2-97).

Dans ce dernier cas, l'architecte doit indiquer à la macro *SVR* de garder le volume de contrainte estivale ($\mathcal{V}2$) afin d'y modéliser l'écran horizontal E_1 passant par p_1 (Figure

2-94 et Figure 2-97) puis les deux écrans verticaux E_2 et E_3 passant par p_2 et p_3 (Figure 2-94 et Figure 2-97).

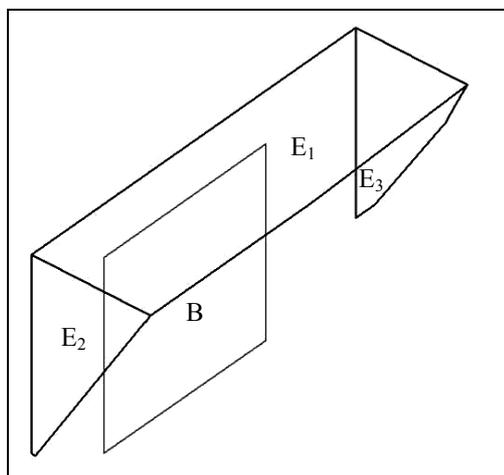


Figure 2-97 : Solution composée (un brise-soleil horizontal et deux verticaux – double contrainte précédente). Modélisation réalisée avec la macro, par section du volume \mathcal{V}_2 (contrainte estivale) et en tenant compte de la contrainte hivernale du volume \mathcal{V}_1 (Figure 2-91 et Figure 2-92). La solution est plus compacte que lorsque l'écran E_1 était filant (Figure 2-93) et semble plus constructible que lorsque l'écran E était en forme d'entonnoir (Figure 2-96). Les trois cas sont les solutions exactes et minimales à la double contrainte solaire posée, pour les points d'accrochage et les types d'écrans demandés.

Conclusion

Ce travail de thèse a donné lieu au développement d'un outil de modélisation inverse opérationnel et suffisamment complet pour être testé sur des projets variés, allant de la modélisation de protections solaires, à l'optimisation d'échappées visuelles, en passant par les contraintes de réflexions solaires, la recherche de périodes d'ensoleillement et de masques environnants, la modélisation d'*enveloppes solaires*, d'ouvertures optimales, d'écrans minimaux, de panneaux solaires idéalement inclinés, etc.

Notre prototype de logiciel est désormais un moyen de valider ou d'amender les hypothèses de notre démarche inverse. Notre choix instrumental peut maintenant être testé par des architectes. L'objet de la troisième et dernière partie de cette thèse sera précisément l'analyse des observations réalisées sur onze concepteurs utilisant l'approche inverse via notre prototype de logiciel.

L'outil *SVR* répond simultanément aux contraintes solaires, visuelles et de réflexion solaire ou visuelle avec une même interface et un même vocabulaire (cible, base, écran, ouverture, etc.). Nous pensons que le fait que l'interface de notre prototype s'ouvre dans le modèleur *AutoCAD* (courant dans les agences d'architecture) devrait permettre aux utilisateurs de garder des repères en matière d'ergonomie (possibilité de réaliser des sections de volumes de contraintes, des rendus filaires ou *Gouraud*, des rotations dynamiques des volumes, des mesures, des copies, etc.). Nous pensons aussi que les masques solaires 3D décrits par l'environnement ou un plan miroir permettront d'identifier la pré-sélection des cibles de contraintes, par réduction des périodes solaires potentielles.

Dans les premières sections, nous avons développé les erreurs des modèles actuels d'ensoleillement. Ces dernières découlent généralement d'approximations de données astronomiques ou calendaires. Certaines d'entre elles ont une influence mineure sur le calcul de l'ensoleillement (la polhodie, la nutation, le lent mouvement de rotation de l'orbite terrestre par rapport aux étoiles, le ralentissement de la vitesse de rotation de la Terre, la non-prise en compte des années bissextiles et de l'évolution des dates d'équinoxes, le non-parallélisme des trajectoires apparentes du Soleil, etc.), mais d'autres ont une influence non négligeable (la précession luni-solaire et la précession planétaire). Si nous voulions être très précis nous remarquerions que l'effet combiné de ces deux derniers mouvements astronomiques peut influencer les conclusions d'analyse de l'ensoleillement d'un édifice entre deux dates historiques (de près d'un centimètre par

siècle pour une ombre de 10 m). A l'échelle humaine, ces erreurs sont négligeables. Notre modèle, ne règle donc pas ce type de problèmes mais en informe les concepteurs. En revanche, il est possible, connaissant ce système de variations, de modifier manuellement ou par le calcul l'inclinaison des rayons solaires, pour des analyses de situations historiques²⁷ par exemple. La non-prise en compte de l'épaisseur apparente du disque solaire par les logiciels actuels d'ensoleillement est aussi une source d'erreur. En assimilant le diamètre apparent du Soleil à un point, l'erreur engendrée est de $0,265^\circ$ pour la composante hauteur du soleil. Nous avons averti que cette réduction était conséquente, principalement pour les dates des deux solstices. Nous avons montré que les ouvertures ou les protections solaires, calculées avec les logiciels actuels qui assimilent le soleil à un point, sont légèrement sous-dimensionnées pour les dix jours précédant et suivant le 21 juin et le 21 décembre. Considérant, qu'en terme d'éblouissement, ces quelques journées peuvent être source de pénibilité pour les usagers, nous avons intégré l'épaisseur apparente du soleil dans notre modèle de voûte solaire (doublement des trajectoires apparentes du soleil).

Concernant les propres erreurs de notre outil, nous avons calculé le décalage dû à l'assimilation des trajectoires solaires infinies à leur projection sur une voûte céleste de diamètre 100 000 unités de dessin (100 km). Pour une scène de 100 unités (100 m), l'erreur par rapport à des rayons solaires idéalement parallèles est de 0.05° pour la hauteur du soleil et nulle pour l'azimut. Dans le cas de la saisie de cibles solaires uniquement, notre outil assimile les périodes solaires théoriquement courbes (portions de la voûte céleste) à des polygones (gauches et concaves). Lorsque le concepteur choisit de saisir les sommets des cibles correspondant aux positions du soleil toutes les demi-heures, l'erreur d'approximation des courbes des trajectoires solaires est de $0,08^\circ$ pour la composante hauteur du soleil au maximum (autour des deux solstices) et nulle pour la composante azimutale. Pour les périodes voisines des équinoxes, l'erreur est nulle pour les deux composantes. Cette erreur acceptable de $0,08^\circ$ de l'angle d'inclinaison des rayons solaires tendrait vers un léger surdimensionnement des solutions solaires. Les brise-soleil seront légèrement plus larges pour la période d'été. De même, les ouvertures seront légèrement plus larges pour la période d'hiver. En revanche, l'approximation des courbes des volumes de contraintes par des facettes planes a l'avantage de représenter, en rendu filaire, les rayons solaires pour une contrainte donnée et un pas de temps donné (l'heure ou la demi-heure). Quant à notre souhait de permettre une lecture en heures légales des voûtes solaires, nous avons employé la notion de "périodes solaires élastiques" pour identifier les début-milieu-fin

²⁷ Pour l'analyse de l'ensoleillement du temple d'Hathor à Dendara (Egypte), Aubourg E. et Zignani P. [Aubourg et Zignani 2000] ont ainsi dû recalibrer les données astronomiques actuelles pour approcher au mieux les conditions d'ensoleillement de l'Egypte antique.

Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle

de matinée et les début-milieu-fin d'après midi plus ou moins "dilatés" selon les saisons (plus courtes en hiver et en automne qu'en été et au printemps). Les périodes élastiques passant progressivement de deux heures de décalage en été à une heure en hiver par rapport aux heures solaires, l'absence de "cassure" aux dates de "changement d'heure" annuel, abaisse la précision de nos périodes solaires élastiques à la demi-heure près autour de ces deux dates, uniquement. Ces périodes civiles larges ne doivent donc pas remplacer les heures solaires extrêmement précises. Elles ont pour but d'aider le concepteur dans sa recherche de cibles de contraintes. D'une manière générale, la "barrière" de la demi-heure près semble difficilement surmontable puisque notre modèle, comme les logiciels de simulation de l'ensoleillement en heures solaires, n'intègre pas l'*équation du temps* (heure civile fluctuant autour de l'heure solaire avec plus ou moins 16 minutes).

En comparant la modélisation des *enveloppes solaires* réalisées, d'une part, avec le prototype *SolVelo* développé à l'Université de Californie du Sud (USA) et d'autre part, avec notre outil, nous remarquons une superposition quasiment parfaite des deux volumétries. La légère différence est due, selon nous, au fait que nous intégrons dans nos calculs, l'épaisseur apparente du soleil.

Pour clore cette partie, nous avons rappelé comment les volumes de contraintes pouvaient être exploités par les concepteurs manuellement par opérations booléennes avec les autres objets solides de la scène, puis nous avons montré comment notre outil procédait pour modéliser des solutions optimales, par section transversale des volumes de contraintes, selon l'orientation, l'inclinaison, l'épaisseur et le nombre de variantes des ouvertures ou écrans souhaités. Nous concluons que les solutions sont parfois complexes et difficiles à imaginer mentalement. La visualisation 3D devrait donc être une aide précieuse pour les concepteurs. Nous avons mis en œuvre cinq options d'écrans (ou d'ouvertures) dans notre outil afin de permettre aux concepteurs d'optimiser au maximum leur modélisation de solutions solaires ou visuelles.

Enfin, nous avons proposé quelques pistes d'exploitation des contraintes combinées, ce qui devrait permettre de répondre efficacement à des doubles contraintes de protection solaire estivale et d'apports solaires hivernaux.

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Troisième partie

- 1 L'état de l'art de la simulation inverse de l'ensoleillement et de la visibilité
- 2 Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle
- 3 L'utilisation d'un outil de modélisation inverse par des concepteurs**

"Je dirai que l'informatique a été juste un outil, mais un outil extraordinairement performant. A plusieurs reprises, nous nous sommes dit qu'avec des outils traditionnels, nous n'aurions probablement pas pu produire aussi rapidement les plans et surtout nous n'aurions pas pu calculer aussi précisément, et à de nombreuses reprises, les courbes de visibilité du Stade [de France]. Je suis catégorique là-dessus. Nous avons mis au point un logiciel spécialisé uniquement pour déterminer les angles de visibilité de chaque spectateur. Comme la moindre évolution du nombre de places, d'entre-axe ou de pente se répercutait sur la configuration générale du stade, recommencer chaque fois le tracé de ces angles de vues à la main aurait été pratiquement impossible, en tout cas très difficile. Pour cet usage, l'ordinateur a été véritablement indispensable."

A. Zublena, *Le Carré Bleu*, 2000

Introduction

Cette troisième et dernière partie est consacrée à l'analyse des observations des concepteurs qui ont utilisé notre prototype de logiciel dans le cadre d'un protocole d'observation précis. Le premier chapitre relate l'état de l'art des observations d'architectes concevant. Nous y développons nos choix en matière d'observation des concepteurs, d'après une littérature internationale du sujet, portant principalement sur l'analyse des croquis d'architectes sur papier et l'élaboration de protocoles d'observation. Cette étude bibliographique nous a permis d'extraire, des quelques rares méthodes d'analyse de concepteurs réalisées à l'heure actuelle, un protocole d'observation par enregistrement audio. En premier lieu, nous présenterons les principales observations d'architectes concevant : les différents types de croquis et de visualisation reconnus, l'intérêt du flou dans le croquis d'architecte, l'idée de manipulation d'un nombre limité de concepts, la notion de réduction des incertitudes et de la résolution de contraintes, l'inadaptation des outils d'aide à la conception, et le constat que l'ensoleillement et la lumière sont deux facteurs constants de la conception architecturale. Nous finirons par présenter les auteurs qui ont contribué à la recherche sur la démarche de simulation inverse ou qui l'ont fortement souhaitée. En second lieu, nous exposerons les deux principaux protocoles d'observation des concepteurs utilisés actuellement : le protocole simultané et le protocole rétrospectif.

Dans le deuxième chapitre, grâce à l'analyse des observations des concepteurs, nous validerons ou amenderons nos choix instrumentaux et conclurons sur la pertinence de nos hypothèses de recherche sur une approche inverse des facteurs physiques d'ambiances dans le projet architectural et urbain. Nous organiserons ce deuxième chapitre en présentant, dans un premier temps, le cadre de l'observation des concepteurs, le matériel utilisé et le protocole d'observation que nous avons mis en œuvre. Dans un deuxième temps, nous présenterons l'analyse des observations applicatives : les réponses ou non du logiciel de modélisation inverse aux attentes des concepteurs, le besoin ou non d'assistance, la terminologie employée par les concepteurs, la vitesse de compréhension et le temps de prise en main de la démarche de modélisation inverse, les révélateurs d'intentions, l'adaptation aux situations imprévues et un complément personnel d'utilisation de notre prototype.

A notre connaissance, cette analyse portant sur un outil de modélisation inverse est la première du genre.

3.1 L'état de l'art de l'observation des architectes concevant

L'objectif de ce chapitre étant de préciser nos choix en matière d'observation des concepteurs, nous nous devons préalablement de conduire un bref examen des travaux existants actuellement en matière d'observation des architectes concevant, soit sur papier, soit sur ordinateur. Volontairement, nous ne limitons pas notre recherche aux seules observations d'architectes utilisant la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), car nous pensons trouver, en simulation graphique sur papier, des éléments qui étayeront nos hypothèses sur la démarche inverse de conception architecturale. Nous estimons également qu'à la manière de la figuration d'intentions projectuelles exprimée par des croquis, la démarche de modélisation numérique inverse devrait intervenir très tôt dans la chronologie du projet.

Pour rendre compte d'une session d'observation de concepteurs face à leur projet, il est souhaitable de situer notre démarche d'observation dans un cadre méthodologique étayé par les recherches internationales en la matière. De nombreux travaux d'analyse de la conception architecturale ou de design ont fait l'objet de publications internationales durant les deux dernières décennies. Principalement anglo-saxonnes, ces recherches ne sont pas spécifiques à la conception architecturale. Pour moitié, elles traitent de ce champ disciplinaire. Pour l'autre moitié, il s'agit du domaine du design ou de l'ingénierie.

Sans avoir la prétention d'être exhaustif, ni de développer longuement le sujet comme il pourrait l'être dans un mémoire de thèse en sciences humaines et sociales, nous proposons les pistes suivantes, sur l'observation des concepteurs en général, puis sur les protocoles d'observation les plus utilisés en recherche.

3.1.1 L'observation de l'architecte concevant

Cette section traite, de manière générale, du croquis d'architecte, et en particulier des raisonnements cognitifs qui sont liés à la conception sur papier ou sur ordinateur (l'utilisation du flou dans le croquis, le raisonnement local et la manipulation d'un nombre limité de concepts, la réduction des incertitudes, etc.). Elle a pour objectif d'analyser les travaux de recherches sur le sujet, qui seront autant d'arguments en faveur de la modélisation inverse.

Dans les paragraphes qui suivent, nous parlerons de simulation ou de modélisation *graphique* pour désigner les opérations de conception que les architectes effectuent sur une feuille de papier ou de calque avec un simple crayon, et *numérique* pour désigner les opérations de conception réalisées sur un écran d'ordinateur grâce à un logiciel de CAO.

3.1.1.1 Les différents types de croquis et de visualisation

Dans le domaine de l'analyse des croquis de concepteurs, plusieurs recherches sont à signaler. A. McGown et G. Green ont ainsi publié un article sur le sujet, *Visible ideas : information patterns of conceptual sketch activity* dans la revue internationale *Design Studies* [McGown et Green 1998]. Les deux auteurs y distinguent principalement trois types de croquis chez les concepteurs : les croquis pensés, les croquis de prescription et les croquis parlés. A. McGown et G. Green définissent les croquis pensés comme ceux utilisés par le designer pour focaliser et guider des pensées non verbales. Le croquis de prescription serait utilisé par l'architecte ou l'ingénieur pour diriger le dessinateur vers le dessin abouti. Quant au croquis parlé, il serait produit durant des échanges avec les techniciens dans le but de clarifier certaines ambiguïtés du dessin.

Une autre étude, organisée autour des fonctions fondamentales de l'usage du dessin dans le travail de conception de l'architecte prend forme dans l'ouvrage intitulé *Dessin d'Architecture et Infographie, l'évolution contemporaine des pratiques graphiques* [Estevez 2001]. La fonction descriptive du dessin qui correspond à la manière dont le dessin s'inscrit dans une visée de construction matérielle des édifices a évolué depuis la Renaissance, écrit D. Estevez. L'auteur rappelle que cette période fut une rupture dans le système "*autorégulant d'adaptation et de diffusion des techniques graphiques*". Il pose la question suivante : "*le danger existe-t-il aujourd'hui que se produise ce type de rupture d'autorégulation à travers le phénomène de virtualisation numérique de la construction liée à l'informatisation des techniques de figuration ?*". Le principe graphique depuis la Renaissance étant la représentation en perspective, l'auteur poursuit sa réflexion sur l'évolution historique de cette représentation perspective. Elle débouche sur "*les problématiques contemporaines de la figuration architecturale, en particulier sur son versant informatisé (modeleurs tridimensionnels, images de synthèse, etc.)*" affirme D. Estevez. Selon R. Arnheim, cité par l'auteur, "*les opérations cognitives désignées par le mot « pensée » [...] constituent les ingrédients fondamentaux de la perception elle-même*". Mais selon l'auteur, la perception a ses propres limites. Les

aberrations d'un trompe-l'œil de Eicher par exemple, incitent à une observation plus analytique que la vision d'ensemble, tandis que la verbalisation rendrait mal aisée la reconnaissance de l'aberration. Selon D. Estevez [Estevez 2001], un croquis, c'est "*une figuration qualitative*" et le croquis d'architecte peut être défini de manière générale comme un dessin figurant un objet architectural, exécuté à main levée et en dehors de toute considération de quantification précise (mesures, cotations, échelles...). L'auteur fait alors émerger deux grandes catégories de croquis. Premièrement, le croquis d'analyse (croquis d'observation qui a pour objectif d'élucider l'œuvre relativement à un thème choisi, de montrer comment un concept architectural – plastique, constructif, fonctionnel, etc. – se concrétise dans le bâtiment observé ou projeté) est une réflexion en aval "*pour ne pas oublier*". Nous pourrions donc l'appeler aussi : croquis d'essai. Deuxièmement, le croquis d'étude (croquis de recherche qui vise à examiner et esquisser des réponses architecturales à un programme) a une fonction de "*simulation graphique*". Il s'agit de conception architecturale, dans une "*démarche générale d'anticipation du projet architectural*". Nous pourrions donc l'appeler aussi : croquis de solution technique. Ces deux catégories de croquis peuvent se rejoindre par "*prééminence*" dans les deux cas, du caractère conceptuel (énonciation figurée d'idées et de principes architecturaux). Le dessin même hyperréaliste est naïf, écrit D. Estevez. C'est la notion de liberté figurative de l'architecte qui particularise le rapport entre objet et croquis architectural. "*Le dessin d'architecte est le dessin géométral qui est le seul dessin exact*", poursuit l'auteur. La CAO, "*soucieuse de produire des outils performants selon ses propres critères, [...] a considéré que ces techniques et ces méthodes traditionnelles de conception [géométral, etc.] n'atteignaient pas une efficacité suffisante*" écrit D. Estevez. Il semblerait par exemple, que la 3D soit préférée à la 2D par les développeurs d'outils de CAO. "*Cette hypothèse, cependant, n'est pas vérifiée par l'examen attentif des dessins produits par les architectes lors de la conception ou de l'analyse d'un projet*", écrit D. Estevez. "*Ces derniers ne semblent pas, en effet, préoccupés en premier lieu par une maîtrise volumétrique constante ou totale des objets qu'ils conçoivent. Et aussi paradoxalement que cela puisse paraître, un projet abouti n'est pas nécessairement à leurs yeux un projet dont l'ensemble des caractéristiques tridimensionnelles sont fixées avec exactitude*". Et de poursuivre : "*le dessin infographique possède le caractère particulier d'être facilement modifiable, ce qui est d'ailleurs l'une des raisons de son intérêt en architecture : le déroulement de l'édification d'un bâtiment, depuis l'esquisse initiale jusqu'au chantier, est toujours jalonné d'imprévus, de décisions modificatives ou d'incidents divers qui en font une source de rectifications constantes des documents graphiques*". D. Estevez conclut alors que "*le dessin infographique est en général présenté comme l'outil bien adapté aux aléas de l'évolution d'un projet*" et parle de transgression de l'outil informatique. "*Le*

contournement" des outils numériques serait, selon lui, la preuve que le concepteur est capable d'un certain recul lucide et pragmatique et qu'il est capable de s'adapter.

En terme de visualisation mentale du projet architectural, les auteurs de l'article *The importance of visualisation in concept design*, D.W. Dahl, A. Chattopadhyay et G.S. Gorn [Dahl, Chattopadhyay et Gorn 2001] cherchent à faire avancer la connaissance sur l'importance de la visualisation dans la facilitation de la conception. A partir d'entretiens avec cent quarante étudiants-concepteurs, ils ont identifié la force de l'utilisation de la visualisation dans le processus de conception. Les réponses des concepteurs suggèrent qu'ils utilisent des images visuelles basées sur la mémoire comme principales sources d'idées au commencement du processus de conception. Les auteurs font une distinction entre la visualisation basée sur la mémoire, et la visualisation basée sur l'imagination. Les auteurs de l'article affirment que la visualisation basée sur la mémoire fait référence à des événements que les concepteurs ont personnellement déjà expérimentés ou observés, tandis que la visualisation basée sur l'imagination met en images des événements jamais personnellement expérimentés auparavant, donc inventifs.

3.1.1.2 Le flou du croquis d'architecte

Le flou du dessin d'architecte fait à main levée a pour but, entre autres, de permettre à son auteur de tester certaines hypothèses de projet, jusqu'à obtenir une variante optimale ou consensuelle d'un élément ou de la totalité de ce projet. Les intentions solaires ou visuelles font partie des hypothèses que l'architecte peut tester durant les premières phases du projet. Les traces laissées par le concepteur sur sa feuille de papier ou de calque peuvent prendre la forme de flèches symbolisant les rayons solaires ou visuels rectilignes. Dans ce cas, les flèches des croquis ne sont généralement pas plus fixes et définitives que le reste des croquis (superpositions de formes retravaillées plusieurs fois, effacement, etc.).

Dans son rapport de recherche intitulé *Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage dans l'enseignement du projet*, L. Mudri [Mudri 1994] a analysé l'apparition et le traitement de contraintes architecturales liées à quelques facteurs physiques d'ambiances (principalement l'ensoleillement) chez plusieurs groupes d'étudiants en phase de conception. L'auteur, cherchant à "*établir le pont nécessaire entre approche quantitative et approche qualitative pour l'éclairage naturel durant la phase de conception*", identifie l'image architecturale (esquisse ou dessin élaboré) non pas

seulement comme une représentation d'une solution trouvée, mais aussi comme "*un élément de construction mentale de l'architecte*". Ses conclusions sont les suivantes : en phase d'esquisses (phase ESQ), les données du site, l'exposition au soleil et l'inclinaison des parois extérieures par rapport au sol intérieur sont connues, très tôt, de manière précise ; l'exposition aux prospects, les ombres lointaines venant d'obstacles éloignés et les dimensions des parois sont connues de manière assez précise ; les ombres proches et le rapport de vitrage par rapport à la totalité de la façade, de manière imprécise. Ces conclusions appuient donc notre hypothèse de prise en compte de l'ensoleillement, dès la phase ESQ du projet d'architecte, puisque les données solaires semblent être naturellement appréhendées très tôt dans le projet et de manière précise. "*Nous avons porté notre attention sur le traitement de l'imprécision des objets architecturaux, déclare l'auteur. Nous avons posé comme hypothèse et cela a été confirmé au fil des interviews que certains objets sont en général, d'abord définis de manière imprécise, ce qui empêche les méthodes actuelles et la quasi-totalité des systèmes informatiques existants de fonctionner en phase d'esquisse.*" La méthode de qualification et de conception d'ambiances proposée par l'auteur est alors un outil basé sur la perception subjective de chaque concepteur et l'utilisation d'une structure arborescente d'indices allant de l'indice d'exposition à l'indice de salissement d'une baie vitrée par exemple.

Dans son ouvrage *Pratiques d'architectes utilisant l'informatique pour la conception*, M. Légliše [Légliše et al. 1989] affirme que "*l'architecte concepteur, procède par itérations successives, par un incessant va-et-vient entre le travail plastique, la recherche d'optimisation des espaces, et le travail de conceptualisation qui tient en quelques traits de crayons rapides, dans lesquels se jouent les principaux choix*". M. Légliše regrette que les outils de CAO ne permettent pas le flou du croquis : "*dans la CAO, le flou est évacué, écrit-il. A l'écran, le trait est précis. L'imagination se laisse enfermer dans la prégnance d'images trop achevées et nécessairement précises dès leur éclosion. Contrairement à la main le logiciel ne permet pas de représenter une totalité sans connaître son niveau de détail. Il ne représente pas l'idée mais le bâtiment lui-même*". L'architecte se trouve "*pris au piège de la rigidité de l'outil, de son dessin normé. A partir de là, une architecture répétitive et fortement tramée peut-être privilégiée [...] ce phénomène n'est pas sans conséquences dangereuses. Nous avons été surpris pour notre part, de constater de si rapides retombées sur ce que l'on peut appeler « la qualité architecturale ».* Dans un avenir proche, on peut penser que des outils plus souples, permettant le flou, et aussi les palettes graphiques, et parfois l'image de synthèse conviendraient mieux pour la conception que le dessin normé de la CAO. On peut aussi supposer que ce problème du flou et de l'imprécis, soulevé par de nombreux architectes et laboratoires, pourra générer la réalisation d'outils adaptés."

Les premières phases de la conception nécessitent donc du flou et de l'impression. "*La conception ne consiste pas à mettre en avant une idée globale, puis une idée formelle, puis une idée fonctionnelle, puis à régler des détails. On sait que l'idée est imprécise et floue mais incisive, fluctuante mais forte, globale mais polarisée sur certains points précis. La conception embrasse le projet dans sa totalité en permanence quel que soit le stade d'avancement, et il est parfois possible que certains détails soient fixés très tôt. [...] D'ailleurs du point de vue de l'enseignement, cette immersion prématurée dans le précis peut entraîner de véritables blocages dans l'apprentissage de la conception*" déclare M. Légière dans une autre publication [Légière 1998]. Les outils de modélisation déclarative développés depuis le début des années 1990 permettent d'exploiter des "univers de solutions possibles" pour une contrainte donnée. Le flou dont parle M. Légière peut alors être cet univers-ci, puisque les volumes de contraintes laissent par définition la possibilité au concepteur d'exploiter à sa guise ou selon d'autres contraintes, une des solutions de cet ensemble qui deviendra *la* solution d'un projet. Il faudrait donc visualiser et interpréter ce que R. L. Knowles, D. Siret et M-L. Nivet appellent respectivement "*enveloppes solaires*", "*pyramides complexes d'ensoleillement*" et "*volumes de vision utiles*", et que nous appelons de manière générique *volumes de contraintes solaires ou visuelles*, comme des volumes provisoires, légèrement transparents, éphémères et donc flous au moins dans le temps, sinon dans l'espace. Rappelons, en ce qui concerne l'impact de la technique numérique sur "*la qualité architecturale*" qu'une "*architecture répétitive et fortement tramée*" peut avoir comme origine, non seulement, la fonction "copier-coller" des outils informatiques, mais aussi, l'utilisation du photocopieur ou même du calque. En effet, au temps de l'utilisation généralisée du calque dans les agences d'architecture, le dessin étant facilement reproductible (par "décalquage"), il fut aussi accusé de multiplier les linéaires de barres d'immeubles par simple répétitivité de quelques cellules types d'habitation. La technique semble servir, avant tout, à faire gagner du temps aux agences d'architecture et d'urbanisme.

D'après ces travaux de recherches, le flou du croquis d'architecte semble être une étape obligée dans la conception architecturale. Notre approche numérique de modélisation inverse n'apporte pas ce flou des traits, mais la notion de variantes à une solution, qui devrait remplacer, à l'écran, la multiplication ou la superposition des traits, que l'on observe sur le papier et qui sert à représenter des dispositifs d'ouvertures ou de masques imprécis. De plus, les enveloppes que représentent les volumes de contraintes solaires ou visuelles sont, volontairement, des volumes provisoires. De manière transitoire, ils devraient permettre à l'architecte d'exploiter les solutions incluses à l'intérieur de leur enveloppe, par opérations booléennes successives manuellement, ou par calculs

automatisés de plusieurs solutions sur un même volume. Ces hypothèses sont nées d'une volonté de prise en compte du caractère volontairement imprécis du projet architectural en phase ESQ. Puisque le flou semble difficilement modélisable en informatique (d'ailleurs, est-ce techniquement possible ?), nous proposons donc aux architectes de modéliser leur projet en plusieurs étapes : la simulation inverse de l'ensoleillement ou de la visibilité par le calcul automatisé (avec notre prototype de logiciel) d'enveloppes optimales appelées volumes de contraintes, de garder ces volumes présents jusqu'à la phase d'avant-projet définitif (APD), et d'en exploiter plusieurs solutions ou variantes de solutions afin de comparer leur impact. Dans cette dernière étape, l'orientation, l'épaisseur, l'inclinaison ou le point d'ancrage d'une solution (ouverture ou écran) sont quatre paramètres libres qui permettent à l'architecte de tester des modélisations de solutions différentes. Si toutefois, ces paramètres étaient connus de manière définitive, la solution à la contrainte serait unique. Dans ce cas uniquement, le "flou" des différentes variantes de solutions n'existerait pas.

3.1.1.3 La manipulation d'un nombre limité de concepts

Plusieurs chercheurs s'accordent à dire que les concepteurs ne peuvent manipuler, à un instant donné, qu'un nombre limité d'idées. Ainsi, L. Mudri conclut son rapport cité plus haut [Mudri 1994] par la remarque suivante : les étudiants en architecture ne semblent pas conserver à l'esprit en permanence l'ensemble des besoins et critères à satisfaire. Ils ont une "*capacité à manipuler simultanément un nombre limité de concepts*". Partant du constat que les étudiants architectes ont tendance à voir l'enseignement du *Projet* et l'enseignement de la *Physique du Bâtiment* comme deux didactiques indépendantes, l'auteur souhaite aider les étudiants à créer leurs propres critères d'analyse qualitative et quantitative de l'éclairage naturel et à réaliser la synthèse indispensable entre architecture et technique. Les observations des étudiants et les entretiens avec des architectes ont notamment permis à L. Mudri de "*détecter certaines caractéristiques communes dans l'évolution de l'objet architectural (relative surtout à l'ambiance lumineuse) en dépit de la grande variété des processus de conception*". Ainsi, l'auteur semble pouvoir affirmer que contrairement à ce qui est souvent pensé, l'architecte, dans sa démarche de synthèse, ne prend pas en compte simultanément l'ensemble des aspects du projet ; "*il effectue un certain nombre de choix en fonction de critères personnels, affirme l'auteur. Ces critères sont liés à la fois à sa personnalité et aux caractéristiques du projet*".

3.1.1.4 La réduction des incertitudes et la résolution de contraintes

La littérature scientifique française sur la conception architecturale et l'observation des praticiens à l'œuvre, inclut un ouvrage majeur : le livre de J-C. Lebahar intitulé *"le dessin d'architecte, simulation graphique et réduction d'incertitude"* [Lebahar 1983]. Selon l'auteur, *"le dessin d'architecte ne doit pas se contempler comme un fossile de projet, mais plutôt comme un regard, c'est-à-dire comme l'expression visible d'une intelligence au moment où elle se confronte à des problèmes"*. Et dès l'introduction, J-C. Lebahar déclare que *"l'étude du dessin dans le processus de conception architecturale, conduit concrètement à la définition d'un espace de problèmes et d'observation particulier. Il est donc nécessaire d'en fixer les limites et d'en préciser le contenu"*. La situation de projet met l'architecte qui y est confronté en demeure de produire une solution, écrit-il. Au sein du triptyque, un architecte, un problème, une solution, J-C. Lebahar ajoute un utilisateur et/ou un client. Nous pouvons dire que la conception de l'architecte est un va-et-vient entre raisonnement *subjectif* et *objectif* qui tend vers un raisonnement *projectif*. L'architecte s'assimile à son client et aux utilisateurs de son projet, afin de mieux appréhender leurs attentes. L'objet du projet fait appel aux références de l'architecte dans le domaine qui l'intéresse (similitudes des formes, éléments historiques, effets connus, etc.) et aux usages futurs de l'ouvrage par le client ou les utilisateurs. Au centre du raisonnement de la conception architecturale, se trouvent les questionnements sur les contraintes projectuelles. *In fine*, Le raisonnement de l'architecte, ses idées et ses concepts convergent vers l'aboutissement du projet : *une* solution personnelle qui résout un système de contraintes. Le résultat du projet est donc un objet unique. L'architecte en est le maître d'œuvre. J-C. Lebahar parle de la dialectique sujet / objet. Il définit trois grandes phases du processus de conception : le diagnostic architectural, la recherche de l'objet par simulation graphique et l'établissement du modèle de construction. Le diagnostic architectural est défini par J-C. Lebahar comme l'étude des conditions objectives qui limitent la réalisation des édifices (c'est la représentation d'un problème ; *"l'architecte sait ou ne sait pas"*). Il peut s'agir par exemple du volet financier du client, la surface du terrain, les conditions topographiques, écologiques, géologiques, juridiques, etc. La recherche de l'objet par simulation graphique est l'étape suivante. Le dessin *"apparaît [alors] comme un puissant moyen de simulation et en même temps de coordination des solutions"*. La conception architecturale *"part d'un modèle de simulation graphique pour arriver à un modèle d'objet. Elle permet en fait de produire une connaissance et non pas un objet"* écrit l'auteur.

Enfin, l'établissement d'un modèle final de construction a pour objectif de représenter sous différentes vues l'œuvre définitive de l'architecte, débarrassée de ses principales incertitudes. Ainsi, selon J-C. Lebahar, l'architecte procède d'abord aux simulations puis aux modélisations. Si l'on suit son raisonnement, la simulation inverse trouverait logiquement sa place dans la deuxième étape du processus de conception (entre diagnostic et modélisation) et non après la modélisation, comme cela est réalisé en simulation directe sur des modèles numériques. En effet, la simulation numérique directe d'un phénomène physique est toujours réalisée sur un modèle. Ce dernier, le plus proche possible de la réalité, est en quelque sorte le support de la simulation directe numérique. Dans le cas d'une approche inverse, le modèle peut être inexistant. Seules une base, une cible de contrainte et une ou plusieurs intentions sont nécessaires. Les affirmations de J-C. Lebahar voudraient-elles dire, qu'en simulation graphique sur papier, l'architecte procède à des simulations d'intentions, sans modèle ? Non, le modèle est, certes réduit à sa plus simple expression (parfois seulement quatre traits pour représenter une pièce), mais il existe. Il n'est pas définitif. Il est volontairement imprécis (pas d'épaisseur de mur, sans alignement avec les autres pièces, etc.), mais il permet déjà des simulations directes (solaires, visuelles, etc.). Notre approche de simulation inverse devrait pouvoir s'insérer, dans l'environnement informatique, entre les phases de diagnostic et de modélisation, aussi naturellement que cela est pratiqué par les concepteurs, lorsqu'ils raisonnent sur une feuille de papier. J-C. Lebahar affirme, de manière synthétique, que le dessin graphique a pour premier objectif de simuler un problème. "*A chaque problème son dessin*" écrit-il. Le dessin s'enrichit à chaque esquisse. Les esquisses s'affirment ou sont mises de côté et remplacées par d'autres pour aboutir à un modèle quasi-définitif : l'avant-projet. "*Le signifié*", c'est le concept, écrit J-C. Lebahar. C'est ce que l'architecte veut exprimer. Il désigne "*les unités de pensée*" dont l'homme se sert quand il catalogue son environnement. Les signifiés ou concepts sont rangés par classes : les classes d'activité (séjour, chambre, circulations verticales ou horizontales, espaces tampons...), les classes d'éléments bâtis (murs, cloisons, baies, percements, niveaux, tuiles, portiques...), et les classes de problèmes (positionner le plancher, trouver la surface suffisante, isoler le coin enfants, capter le soleil l'hiver...). Toutes les classes ont leurs signifiants, c'est-à-dire leurs moyens d'expression, à la fois phonétiques, les mots qui les désignent à haute voix, et graphiques, ces tracés sur du papier ou du calque, plus ou moins conventionnels ou plus ou moins analogiques. "*Les signifiants évoquent plus ou moins des objets ou des parties d'objets réels [...] – silhouettes, icônes, symboles – [...] ils ont une fonction signalétique*" affirme J-C. Lebahar. En sémiologie, les rapports signifiants / signifiés sont largement explorés. Dans ce domaine, l'auteur conclut que la conception c'est, "*cette recherche bricoleuse et exploratoire*". J-C. Lebahar avance aussi l'idée, avec L. Prieto, qu'entre deux interprétations possibles, l'architecte choisit toujours celle qui lui permet de réduire

davantage son incertitude. Il différencie la fonction du diagramme de celle du dessin. Le diagramme est opératoire, car il permet d'organiser un problème ; le dessin est opératif, car il permet d'enchaîner de façon pragmatique une suite d'actions imaginées en pensées. *"Le dessin de l'architecte est [...] (comme tout dessin d'ailleurs) en même temps l'image de l'objet et celle de la pratique de l'architecte. Cette interaction trouve la maturité de sa formation en psychologie du travail sous le terme d'image opérative. [...] La topologie, la géométrie projective et le système euclidien, structurent ces manipulations graphiques dans le but de déterminer un objet. Le dessin apparaît constamment comme quelque chose qui représente autre chose, comme le signifiant d'un signifié. En d'autres termes, dire que l'architecte dessine ou dire qu'il traite une information complexe, revient au même"*. J-C. Lebahar définit alors deux notions importantes qui éclairent notre propos : *"les déclencheurs"* et *"la réduction d'incertitude"*. Les déclencheurs sont des formes graphiques accidentelles qui correspondent à des solutions contenues dans la mémoire de l'architecte et qui provoquent du fait de leur simple perception, l'extériorisation de celles-ci.

Quant à la réduction d'incertitude, elle semble être la condition *sine qua non* pour faire avancer le projet d'architecte. *"Les architectes que nous avons vu travailler, poussent la recherche du plan « le plus loin possible » avant d'aborder un autre point de vue sur l'objet"* affirme J-C. Lebahar, montrant ainsi, que le dessin d'architecture est une suite de réduction d'incertitude et que le projet aboutit lorsque l'ensemble des incertitudes est levé. L'auteur conclut que le processus de conception architecturale n'est rien d'autre qu'une *"suite de résolution de problèmes"*.

Récemment, les deux auteurs P. Béguin et A. Weill-Fassina [Béguin et Weill-Fassina 2001] ont rejoint les propos de J-C. Lebahar, sur la réduction d'incertitude. Dans leur publication, *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*, ils affirment ainsi que *"la simulation [...] participe au processus de réduction d'incertitude"*.

Quant à P. Boudon, P. Deshayes, F. Pousin et F. Schatz, leurs avis, en la matière, sont opposés à la thèse de J-C. Lebahar. Ces quatre auteurs, s'intéressent à la *Conception Architecturale Architecturologiquement Assistée par Ordinateur* [Boudon et al. 1993]. Ils s'attachent, grâce à l'*architecturologie*, à *"modéliser l'activité cognitive de la conception"*. Selon eux, *"l'aide informatique ne consiste pas [...] en une effectuation de la totalité ou d'une partie des opérations de conception ; elle apporte une aide ponctuelle qui ne prétend pas être méthodologique, ni être une simulation d'opérations de conception proprement dites"*.

De plus, de manière générale (en conception graphique, sur papier, et en conception numérique), les quatre auteurs déclarent avec certitude que "*la conception architecturale se distingue fondamentalement de la résolution de problèmes*".

3.1.1.5 Des outils d'aide à la conception inadaptés

Dans la publication intitulée *Art under constraint – preserving the creative dimension in computer-aided architectural design, languages of design*, M. Léglise [Léglise 1995] fait le bilan des pistes de recherche sur les aides à la conception architecturale (systèmes experts, langage objet, bases de connaissances, réseaux neuronaux, etc.). Parmi les logiciels commercialisés à l'époque de l'enquête, et encore très utilisés aujourd'hui, *ArchiCAD* et *AutoCAD* ne lui semblent pas appropriés au dessin durant les premières phases de la conception (phases ESQ et APS). Pour l'auteur, le projet architectural est en même temps l'acte du dessin et ses résultats. Dans une autre publication [Léglise 1998] intitulée *Ordinateurs dans l'apprentissage de la conception : mental et instrumental*, M. Léglise écrit qu'à sa connaissance aucun éditeur de logiciels d'architecture ne revendique que son produit puisse "*aider à comprendre à concevoir*". "*L'ordinateur est avant tout un média*" affirme l'auteur. Les produits d'aide à la conception en architecture (CAO ou Dessin Assisté par Ordinateur – DAO) ne sont pas, selon lui, des produits d'aide à la conception proprement dite. Ils sont destinés à instrumenter le projet, c'est-à-dire à faciliter la formation des pièces écrites une fois que la conception est terminée, que le projet est pratiquement définitif. Les outils de CAO utilisés avant la phase de production pour des questions de gain de production ont des effets pervers sur la conception. Avec R. Hamel, M. Léglise nous fait remarquer que certains développeurs d'outils de CAO en architecture n'ont pour autre but que de fabriquer des systèmes dont l'ambition est simplement de fonctionner. De ce fait, l'auteur constate que la profession, confrontée aux dures exigences du marché et aux problèmes de productivité, utilise majoritairement "*ce qui fonctionne et donc pas nécessairement ce qui conviendrait*".

Une autre publication, *The reasoning architect, mathematics and science in design* [Stevens 1990], annonce dès 1990, les faiblesses des outils de conception architecturale. Son auteur, G. Stevens, y écrit qu'il souhaite voir apparaître des outils de simulations basés sur des "*méthodes prédictives*", sinon l'architecte ou le designer sont voués à une démarche par opérations "*essai-erreur*". Dimensionner une fenêtre, une protection solaire ou régler l'éclairage intérieur d'un bâtiment sont des opérations de simulations, et trouver la bonne orientation d'une fenêtre dans un souci de consommation

énergétique minimale, oblige le designer à procéder à de nombreuses simulations et évaluations, écrit-il en substance.

3.1.1.6 L'ensoleillement et la lumière, des facteurs constants de la conception architecturale

L'article *How an individual style is generated* de C-S. Chan [Chan 1993] développe une méthode pour étudier comment un style personnel est généré en conception architecturale. Il explore et explique les possibles mécanismes qui influencent la formation du style d'un architecte observé dans des conditions expérimentales de laboratoire. Les résultats montrent que les variables du processus de conception architecturale sont à chercher du côté des contraintes, des objectifs, des méthodes de recherche et des modèles de pré-solutions. Parmi les facteurs qui créent un style personnel à l'architecte, le facteur lumineux (lumière, zones ensoleillées, orientation des pièces...) semble être un des plus déterminant, au même titre par exemple que la "*primitive shape*". Cette forme primitive est omniprésente dans les observations. Dans tous ses schémas, l'architecte semble s'y attacher, et ce, jusqu'à la fin du projet. Même non matériel, l'ensoleillement semble donc être un facteur constant dans le raisonnement de l'architecte en situation de conception et non pas une contrainte ponctuelle liée à la situation du projet. C-S. Chan conclut en affirmant que trois facteurs principaux règlent le style personnel d'un concepteur. L'ensoleillement est un de ces facteurs récurrents ("*the consistent design method*" et "*the primitive shape*" en sont les deux autres facteurs). Par ensoleillement, C-S. Chan entend les contraintes liées à la lumière solaire, aux orientations des pièces, aux tailles des ouvertures, etc. La contrainte solaire est donc, selon C-S. Chan une des trois constantes qui apparaissent toujours dans les observations des concepteurs. Il est donc fort probable que la modélisation inverse de l'ensoleillement donne aux architectes des possibilités d'exploitation d'un thème qui leur est cher si l'on en croit l'auteur de l'article.

B. Tschumi cite [Tschumi 2001] aussi la lumière solaire comme un événement constant dans la conception architecturale. Pour l'auteur, l'objet architectural, en soi, n'existe pas. L'architecture surgit comme la résultante d'une multiplicité d'événements contradictoires (usage, mouvement, espace, lumière, structure, matière) écrit-il, en substance.

3.1.1.7 Vers la démarche inverse

Parmi les auteurs cités dans ce présent état de l'art, G. Augenbroe et F. Winkelmann [Augenbroe et Winkelmann 1991] sont probablement ceux qui avancent le plus loin dans le domaine qui intéresse notre propos, à savoir, la modélisation déclarative ou simulation inverse. Dans leur article *Integration of simulation into building design process*, ils proposent, aux futurs développeurs de logiciels d'aide à la conception architecturale, de se pencher sur des requêtes qu'ils appellent, dès 1991, "*inverses*" (du type "*que dois-je faire pour avoir cette réponse-ci ?*") ou "*interrogatives*" (du type "*pourquoi ceci n'est pas comme je le prévoyais ?*") ou encore "*incrémentales*" (du type "*faire cela comme précédemment mais légèrement différemment*"). Les deux auteurs regrettent que le langage de simulation actuel ne soit pas plus expressif. Les outils couramment utilisés restent, selon eux, totalement en vase clos (à une question numérique correspond une réponse numérique). G. Augenbroe et F. Winkelmann souhaitent plus de dialogue entre l'homme (le concepteur, l'architecte) et la machine (l'outil informatique). Nous partageons leurs hypothèses sur des outils numériques prenant en considération des requêtes "*inverses*".

Les deux auteurs P. Béguin et A. Weill-Fassina [Béguin et Weill-Fassina 2001] tiennent des propos similaires, sur la simulation inverse, sans toutefois en donner le nom. Ils parlent de représentation volumétrique des "*univers de possibilités*" liés aux contraintes projectuelles. Dans leur publication intitulée *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*, ils affirment que "*la simulation permet [...] une exploration du champ des possibles*". La simulation est, selon eux, un instrument de représentation et de régulation dans la conception. La conformité du projet architectural à certaines contraintes de CAO "*est parfois introduite très prématurément, dès les toutes premières simulations*, affirment-ils, *par le biais d'enveloppes de construction géométriques rigides dont les limites sont des frontières incontournables qui contraignent et déterminent les univers de possibilités ouvertes aux recherches exploratoires des concepteurs et à leurs gestes graphiques*." Nous partageons ce propos, mais pas les conclusions suivantes : "*toutes les contraintes peuvent se mesurer et se géométriser avant même que ne soit imaginée une quelconque forme de produit. Cette géométrie et son intervention précoce dans la simulation, peut brider la marge de liberté de plus en plus résiduelle des concepteurs*." A ce stade du mémoire, nous ne pouvons conclure, sur l'impact de la modélisation géométrique des contraintes architecturales. De plus, nous rappelons que notre hypothèse en la matière, est précisément que la modélisation de volumes de contraintes n'influence pas le choix des architectes et ne les dirige pas vers des formes préexistantes et prérégulées.

Ainsi, la forme polygonale complexe mais exacte d'une ouverture répondant à une contrainte solaire ou visuelle à travers un mur d'épaisseur et de position données, ne devrait pas, selon nous, brider la conception de l'architecte en charge du projet. La libre et personnelle interprétation de l'architecte devrait lui permettre d'adapter l'ouverture aux autres contraintes du projet (portée du linteau, rapport entre le coût du dimensionnement non-standard de l'ouverture et l'efficacité de celle-ci, etc.). L'ouverture se devra naturellement de répondre à la contrainte qu'elle porte. Pour autant, aucune forme ne devrait, d'emblée, s'imposer au concepteur, puisque les solutions obtenues par notre approche sont des solutions *minimales* qu'il est possible d'élargir pour tendre vers des solutions toujours aussi efficaces, moins compactes mais plus normalisées (fenêtre standard par exemple). Nous pourrions même avancer que les logiciels de CAO possédant actuellement des "bibliothèques d'objets" standards (murs, fenêtres, portes, etc.), imposent implicitement une sélection (industrielle et normalisée) des univers de possibilités, tandis que notre approche devrait tendre vers la neutralité industrielle et technique.

J-P. Péneau et P. Joanne déclaraient dans *Les Cahiers de la Recherche Architecturale* n° 42-43 intitulés *Ambiances architecturales et urbaines* [Adolphe et al. 1998] : "*les instruments généralement proposés se trouvent fortement marqués par la logique de l'ingénierie. Ces derniers opèrent le plus souvent, sous le mode du diagnostic, sur des objets déjà constitués. Ils ne peuvent alors être considérés comme de véritables outils projectuels, utilisés de manière interactive au cours du processus de mise en forme. Un nouvel appareillage, prenant appui sur les méthodes explorées dans d'autres secteurs scientifiques et relevant de la modélisation inverse ou modélisation déclarative, est en cours d'élaboration et d'expérimentation.*" Les deux auteurs annonçaient, à l'époque, les derniers travaux de recherche en simulation inverse architecturale et urbaine [Siret 1997] et [Nivet 1998a et 1998b].

Pour sa part, L. Mudri conclut son rapport [Mudri 1994] en affirmant qu'il y a dans le processus de conception une alternance entre deux phases : la création et la validation. Ainsi l'auteur émet l'idée d'un outil de validation facilitant un "*temps d'arrêt dans la conception*". Cet outil ne viendrait pas bloquer l'élan de l'architecte concepteur, affirme l'auteur. Un tel outil, s'il était bien inséré entre deux phases de création, s'intégrerait "*naturellement dans la démarche de conception*" déclare L. Mudri. La démarche de simulation inverse que nous avançons devrait suivre cette hypothèse de recherche.

3.1.2 Les protocoles d'observation

Avant d'approfondir les deux principales méthodes d'observation des concepteurs utilisées en sciences de l'architecture et de l'ingénierie, nous présentons la méthode d'observation des architectes, développée par J-C. Lebahar dans son ouvrage précédemment cité, *Le dessin de l'architecte, simulation graphique et réduction d'incertitude* [Lebahar 1983].

3.1.2.1 La méthode d'observation des architectes, développée par J-C. Lebahar

En France, J-C. Lebahar est probablement celui qui a le plus développé les méthodes d'analyse des architectes concevant [Lebahar 1983]. Rappelons tout de même les travaux de P. Boudon et ses coauteurs [Boudon *et al.* 1993], R. Prost [Prost 2001] et M. Conan [Conan 1990]. La méthodologie de J-C. Lebahar prend appui sur trois modes de collecte d'informations sur la conception architecturale : l'observation de "*la pratique graphique stricto sensu*", l'application d'un "*guide d'entretien*" pendant, avant et après l'activité graphique, et l'analyse des documents graphiques dans le respect de leur ordre de production, de leur quantité réelle et de leur "*contextualisation*". Ces observations se sont situées, selon l'auteur, à deux échelles différentes : "*l'échelle temporelle*" et "*l'échelle de résolution de problèmes*". Par "*échelle temporelle*", J-C. Lebahar entend une échelle "*liée au découpage du processus en séquences. Ce sont des étapes dans la chronologie du processus qui correspondent à un changement qualitatif dans l'avancée que fait l'architecte vers la représentation définitive de l'objet*". Quant à "*l'échelle de résolution de problèmes*", l'auteur entend la mesure de "*la nécessité [pour] un sujet de transformer l'état d'une situation donnée*". Cette transformation s'opère grâce aux deux dimensions que sont l'état (l'aspect statique des représentations) et le traitement (les opérations qui permettent de passer d'un dessin à un autre). Les architectes observés ont commenté à haute voix leur conduite et ont répondu à un "*guide d'entretien*". C'est à partir de ce guide que le maximum d'informations a été relevé. Le "*guide d'entretien*" s'organisait comme suit : avant de dessiner, les architectes devaient résumer les volontés du client et l'état des différents éléments de la commande ; pendant le dessin, ils devaient décrire leurs croquis et expliquer à quels questionnements ils répondaient. Il fut demandé aux architectes s'ils avaient déjà traité un problème semblable, si les solutions présentes reconduisaient des règles intervenant comme des solutions toutes prêtes, s'ils avaient, à un moment donné, une image du projet final en tête, à quel moment et de quelle nature était cette image, etc.

Les architectes furent aussi priés d'expliquer si tout se passait sur la table à dessin ou si des informations n'y apparaissaient pas, s'ils envisageaient explicitement une méthode avant de commencer à travailler, s'ils pensaient changer quelque chose de leur dessin et dans quelles limites, etc.

Nous n'avons pas opté pour l'application de la totalité de cette méthodologie à nos propres observations (cf. § 3.2.3). Nous avons préféré approfondir la partie "commentaires à haute voix" de cette méthodologie qui n'est autre que le "protocole simultané" ou "*think aloud method*" décrit dans la section qui suit.

3.1.2.2 Le protocole simultané et le protocole rétrospectif

En matière de méthodologie d'observation des concepteurs, les travaux de recherche de l'École d'Architecture de Delft (Pays-Bas) font référence. Signalons aussi les ouvrages traitant de techniques d'observation, comme [Ericsson et Simon 1993], [Jones et Thornley 1963] et [Akin 1986]. K. Dorst a largement développé le sujet dans plusieurs publications. *Describing design, a comparison of paradigms* [Dorst 1997] relate les différentes étapes du protocole d'analyse testé chez les étudiants de l'Université de Delft. Le protocole utilisé fut la méthode "*think aloud*" (penser à voix haute) ou "protocole simultané". Il consiste à faire dire aux concepteurs à quoi ils pensent, de "verbaliser" ce qu'ils ont dans leur tête. Les concepteurs sont priés de parler à voix haute. Un petit entraînement est prévu avant la séance. La scène est observée par un expérimentateur et est filmée. Dans cette publication, K. Dorst présente les inconvénients du protocole "*think aloud*". Il s'agit des changements possibles des habitudes du concepteur dus au fait que ce dernier fait un effort non naturel de verbalisation, des ralentissements ou des "blancs" qui ne peuvent être exploités (excepté, qu'ils tendraient à montrer que la représentation graphique l'emporte sur la volonté de verbaliser ses pensées), de l'isolement de l'environnement de travail qui peut déstabiliser le concepteur, et enfin, de l'interruption du protocole par le concepteur pour s'exprimer sur l'artificialité de la situation.

K. Dorst et N. Cross ont aussi publié une étude, dans la revue *Design Studies : Creativity in the design process : co-evolution of problem-solution* [Dorst et Cross 2001]. Dans cet article, ils relatent l'observation de neuf designers, suivant la mise en œuvre du "protocole simultané". Selon toujours la même méthode, les designers sont priés de raisonner à voix haute. Ils doivent exprimer les problèmes qu'ils cherchent à

résoudre, et verbaliser leurs idées de conception. Chaque designer est observé et enregistré durant 2 h 30. Si des intervalles de silence de plus de 30 secondes sont remarqués, l'observateur rappelle au concepteur qu'il doit exprimer à voix haute son raisonnement. La scène d'observation est filmée par deux caméras : l'une cadrée sur le designer pour capturer ses habitudes de dessin et d'esquisses, et l'autre, cadrée sur l'image générale.

Dans la même revue *Design Studies*, M. Suwa et B. Tversky publiaient, en 1997, un article intitulé *What do architects and students perceive in their design sketches ? A protocol analysis* [Suwa et Tversky 1999]. M. Suwa et B. Tversky déclarent que le dessin à main levée comme représentation externe est essentiel à la "*crystallisation*" de la conception d'idée dans les premières phases du processus. Selon eux, l'architecte pose des idées sur le papier sous forme de croquis et les inspecte. Il observe les relations et les caractéristiques que lui suggèrent un nouveau croquis et révisé son intention. Ce cycle croquis-analyse-révision est comparable à une conversation avec soi-même, affirment M. Suwa et B. Tversky. Ces derniers ont observé un groupe d'étudiants en architecture en suivant le "protocole rétrospectif". Ils ont pu identifier des catégories de raisonnement des étudiants architectes, telles que l'analyse des propriétés émergentes, l'identification des caractéristiques spatiales et/ou fonctionnelles, etc., et des sous-catégories, telles que, la relation espaces/formes/angles/dimensions (pour la catégorie des propriétés émergentes), la relation locales/globales (pour la catégorie des caractéristiques spatiales), la relation usages/vues/lumière (pour la catégorie des caractéristiques fonctionnelles), etc. Les auteurs de l'article en concluent que le processus de conception consiste en de petits cycles de changements de focalisation et de pensées continues.

Le "protocole simultané" a fait l'objet d'une comparaison avec le "protocole rétrospectif". Cette recherche a été publiée par J. S. Gero et H-H. Tang, sous le titre suivant : *Concurrent and Retrospective Protocol and Computer-Aided Architectural Design* [Gero et Tang 1999]. L'article présente l'observation de concepteurs en phase d'esquisses selon les deux modes. Les auteurs rappellent qu'avec le "protocole simultané", les concepteurs doivent s'obliger à verbaliser leur conception en s'exprimant simultanément de manière graphique (feuille de papier, crayon, etc.) et verbale (idées, raisonnements, impressions, surprises, etc.). Le "protocole rétrospectif" est présenté comme une démarche *a posteriori* du processus cognitif des concepteurs à l'œuvre. Pour cela, les concepteurs sont filmés puis placés devant la séquence d'enregistrement vidéo afin qu'ils s'expriment sur les gestes conceptuels ou leur temps d'attente et de réflexion. Selon les auteurs, cette méthode fait appel à la mémoire à court et long terme. Elle a l'avantage de ne pas perturber les concepteurs en interférant avec leur processus de

réflexion. Cependant, l'observateur prend le risque que les concepteurs ne puissent pas retrouver le cheminement de leurs pensées telles qu'elles étaient lors de la phase d'esquisses. La comparaison des deux protocoles, pour des observations identiques, "*par segmentation d'évènements de conception*", aboutit à des conclusions similaires. Les auteurs de l'article sont les premiers étonnés : "*le spectre d'évènements*" correspondant au "protocole simultané" est très proche du spectre correspondant au "protocole rétrospectif". Lorsque le "protocole simultané" est utilisé, les concepteurs semblent développer en priorité les problèmes rencontrés durant la conception, alors qu'ils mettent plutôt en avant les informations liées au recentrage sur un élément du dessin lorsque le "protocole rétrospectif" est employé.

3.2 Le cadre des observations

Dans cette troisième et dernière partie, nous présentons *qui nous avons observés et pourquoi nous les avons choisis* puis *où et avec quel matériel nous avons testé l'outil SVR* et enfin *comment nous avons observé ces concepteurs*.

3.2.1 Les concepteurs observés

Les concepteurs observés sont de trois types. Nous présentons dans la section qui suit les étudiants en architecture et les architectes de métier observés. Dans la deuxième section, nous présentons pourquoi nous avons décidé de relater nos observations personnelles (complément personnel d'applications).

Les onze concepteurs observés sont âgés de vingt et un ans à trente-huit ans. Ils font partie d'une nouvelle génération d'architectes. Ils savent manipuler plus ou moins bien le logiciel *AutoCAD*, mais connaissent tous les fonctionnalités de ce logiciel même utiles à la manipulation de *SVR*.

3.2.1.1 Les étudiants en architecture et les architectes de métier

Les observations concernent onze concepteurs. Il s'agit de cinq architectes travaillant à leur compte ou pour des organismes publics et six étudiants de l'Ecole d'Architecture de Nantes. Nous utilisons la lettre A suivie d'un chiffre pour désigner les architectes par ordre d'observations (A1 correspond à juillet 2001 et A5 correspond à mai 2002). De même nous utilisons la lettre E suivie d'un ou deux chiffres pour désigner les étudiants en architecture observés entre février 2002 et juin 2002.

Les étudiants en troisième année d'architecture N. P., G. P. et H. P. (respectivement E11, E12 et E13) composent le groupe de travail E1 et les étudiants en cinquième année d'architecture Y. J., E. L. et S. M. (respectivement E21, E22 et E23) composent le groupe de travail E2.

Le groupe E1 a été choisi pour l'analyse thermique qu'il effectuait sur une maison primée lors d'un concours d'architecture (Maison Equerre des architectes Henriksen et Levring). L'analyse des problèmes thermiques de cette maison devait être complétée par

la proposition de solutions solaires à ces problèmes. Notre proposition d'observation des étudiants concevant avec l'outil *SVR* fut bien accueillie par le groupe puisqu'elle répondait à un besoin réel.

Le groupe E2 a été choisi pour l'analyse visuelle qu'il devait effectuer sur le projet du nouveau musée Dobrée à Nantes. Le projet de ces trois concepteurs se définit comme une tour de soixante-dix mètres de haut composée d'une structure de poteaux et de poutres en acier et de "*boîtes*" d'exposition plus ou moins en porte-à-faux et insérées dans cette structure, à la façon d'un "*im-meuble à tiroirs*". Les contraintes visuelles des concepteurs étaient nombreuses. Il s'agissait de répondre au mieux à la création de vues depuis les coursives du troisième et du cinquième étage, vers trois édifices emblématiques de Nantes. Ces cibles choisies par les concepteurs étaient la Tour de Bretagne, la Cathédrale et le Château des Ducs de Bretagne.

L'architecte Y. T. (A1) est associé à d'autres architectes dans une agence espagnole (Puerto de la Cruz – Ile de Ténérife) d'une douzaine de personnes. Il est sensible aux facteurs d'ambiances et plus particulièrement aux apports solaires dans les espaces architecturaux. Il fut choisi pour sa disponibilité, son intérêt pour la résolution de problèmes solaires et l'opportunité qui se présentait pour tester notre prototype dans un environnement informatique à l'étranger et sur des bâtiments de latitude quasi tropicale (28,4° nord).

L'architecte S. L. (A2) travaille pour le Ministère des Affaires Etrangères Français à Prague (République Tchèque) dans une petite agence d'architecture. Elle porte un regard d'urbaniste sur notre outil.

L'architecte V. M. (A3) travaille au sein du Laboratoire Cerma pour l'Ademe et un industriel. Elle est doctorante et fut choisie pour l'optimisation solaire et visuelle d'éléments brise-soleil qu'elle cherchait à réaliser. L'objet de sa recherche devait s'inscrire dans un dispositif double peau d'une façade de bureaux exposée à l'ouest dans un site dégagé de tout autre bâtiment, végétation ou relief. C'est elle qui fit le premier pas pour que nous l'aidions dans la modélisation de son dispositif.

L'architecte F. P. (A4) est architecte à la Mairie de Niort. Très intéressé par la mise en scène des lieux, il nous a proposé dès notre premier rendez-vous de travail de prendre comme objet d'étude, une salle de réunion de l'aile contemporaine de la Mairie de Niort (de l'architecte Milou) et d'appliquer une contrainte visuelle à cette volumétrie. Cette contrainte avait pour base une zone rectangulaire située à cinquante centimètres au-

dessus d'un ensemble de quatre tables, et pour cible les deux flèches de l'église Saint-André. Malgré l'existence d'un percement vertical semblant accompagner le regard depuis les tables de réunion vers l'église et paraissant bien répondre à la contrainte, l'architecte A4 décida de modéliser la salle et de simuler l'ouverture exacte pour que chaque participant à la réunion puisse voir entièrement les flèches de l'église depuis sa place.

L'architecte indonésien E. P. (A5) fut observé après qu'il eut réalisé des simulations d'ensoleillement (direct) sur une modélisation de maison indonésienne traditionnelle dans le cadre de sa thèse de Doctorat. Il utilisa *SVR* comme un outil de conception afin de répondre à des contraintes solaires et thermiques fortes.

3.2.1.2 L'auteur testeur

Nous avons nous-même réalisé une série de tests durant la phase de développement du logiciel *SVR* afin de valider ou d'amender certains choix de programmation. Nos observations étant non négligeables d'un point de vue quantitatif et qualitatif, nous avons trouvé intéressant de les faire figurer en fin de chapitre. En tant qu'auteur de l'outil testé, je me suis efforcé d'exploiter systématiquement toutes les options du logiciel et de corriger ce qui n'allait pas dans le sens intuitif que nous voulions lui donner. Nous relaterons ainsi les conclusions de nos propres utilisations applicatives dans la section 3.4.

Nos observations portent sur cinq objets d'études. Premièrement, nous avons utilisé l'îlot Boucherie à Nantes comme objet de tests de contraintes visuelles comme M. L. Nivet [Nivet 1999] l'avait fait pour sa thèse de Doctorat. Le choix de cet îlot urbain en reconstruction est judicieux par sa position centrale dans la ville de Nantes. Sa forte hauteur (plus de trente mètres de haut) et son voisinage composé de terrasses, de parvis, de lieux de passages et de cibles visuelles potentielles, en font un élément hypothétiquement gênant pour des vues existantes entre autre sur l'église Saint-Nicolas. Nous avons ajouté à ces contraintes visuelles potentielles une contrainte solaire pour la vitrine d'un salon de coiffure qui semblait être le plus gêné par l'envergure du projet.

Nous avons aussi répondu à une commande d'un bureau d'études portant sur une maison nantaise dont le propriétaire voulait absolument "*ne pas être vu dans [son] jardin depuis les fenêtres de l'immeuble voisin*".

Puis nous avons testé notre outil sur une modélisation de l'église de Noirlac pour une contrainte intérieure sur un pupitre devant être éclairé directement. La contrainte fut posée par un enseignant de l'Ecole d'Architecture de Nantes.

Nous avons aussi testé notre outil sur deux objets de gêne visuelle provoquée par des éblouissements. Nous aurions pu trouver un carrefour routier dangereux à certaines périodes de l'année par éblouissement solaire des conducteurs à l'arrêt qui doivent s'engager sur la route principale par exemple, mais nous avons pris un exemple plus personnel qui est le poste de travail que nous occupions à l'époque du développement du logiciel et qui présentait de sérieux problèmes d'éblouissement (écran d'ordinateur en contre-jour pour éviter les reflets, mais trop forte luminosité dans le champ de vision).

Enfin, nous avons choisi de tester notre outil en simulant des volumes de contraintes de réflexions solaires sur les écrans de billetteries SNCF dans le hall de la gare nord de Nantes.

3.2.2 Les moyens techniques et les lieux d'observation

A trois exceptions près, l'ensemble des observations a été réalisé dans les mêmes conditions matérielles au sein du Laboratoire Cerma. Nous disposions toujours d'ordinateurs du même type (même puissance, même configuration, etc.). Les concepteurs observés avaient la possibilité d'utiliser des feuilles de papier et le matériel qu'ils désiraient. La feuille de papier et le crayon étaient rarement utilisés si ce n'est pour communiquer (groupe E1) ou noter une remarque (A1 et A3).

Pour les architectes A1, A2 et A4 nous nous sommes déplacés soit, avec une copie de notre prototype, gravé sur un CD-Rom (A1 et A2), soit avec un ordinateur portable contenant le logiciel mère *AutoCAD2000*® et notre outil. A1 possède une version espagnole du logiciel mère.

Les versions du logiciel *SVR* ont évolué entre la première séance d'observation (juillet 2001) et la dernière (juin 2002). Pourtant, mis à part quelques remarques développées plus loin, traitant des difficultés rencontrées avec la première version de notre outil, nous pouvons considérer que tous les concepteurs observés ont eu entre leurs mains une version semblable du logiciel.

3.2.3 Le protocole d'observation

Le protocole d'observation auquel nous avons décidé de soumettre l'ensemble des architectes ou étudiants en architecture que nous avons observé, s'appuie sur la *think aloud method* [Dorst 1997] que nous pouvons traduire par *méthode de raisonnement à voix haute* (cf. § 3.1.2.2). Nous n'avons pas enregistré en vidéo les séances d'observation, ni procédé à un entraînement de raisonnement à voix haute des concepteurs avant les séances comme l'ont pratiqué certains pionniers de ce protocole comme K. Dorst [Dorst 1997]. Nous avons réalisé des enregistrements audio des discours des architectes pour la quasi-totalité des observations. Seules les observations des architectes A1 et A2 n'ont pu être réalisées avec un dictaphone. Dans ces deux cas, la prise de note fut notre outil de sauvegarde des données d'observation collectées.

Comme nous l'avons vu plus haut, les feuilles de papier n'ont été que très rarement utilisées. Le média que constituent ces feuilles n'a donc pas pu être exploité pour cause de quasi-absence de croquis.

Le protocole d'observation utilisé procède donc en quatre étapes : la description (par l'observateur) du vocabulaire et de la méthode dite inverse utilisée par le logiciel, la présentation des instructions du protocole *think aloud*, l'enregistrement audio, et pour finir, un retour sur certains points mal compris par l'observateur. Notons que ces explications complémentaires *a posteriori* figurent généralement entre crochets dans les retranscriptions des sections suivantes et ont parfois été demandées aux concepteurs durant la phase d'enregistrement lorsqu'il y avait un risque que les concepteurs oublient la signification d'une de leurs phrases à la fin de l'enregistrement.

3.2.3.1 Première étape : la description du vocabulaire et de la méthode inverse utilisée avec l'outil SVR

La présentation a été la même pour tous les architectes. Le vocabulaire utilisé par notre prototype est présenté (et expliqué) dans l'ordre suivant : le sigle *SVR*, les notions de contraintes solaires, visuelles et de réflexions solaires, les termes "volume de contrainte", "base de contrainte", "cible de contrainte", "voûte solaire", "voûte solaire témoin", "masque environnant" et "masque d'après plan miroir", la notion d'importation, de création ou de limitation d'un modèle de voûte solaire, les termes "volume de contrainte opposé", "enveloppe solaire" et "scène", et enfin, les notions de plan miroir et d'écran solaires ou visuels.

Les termes utilisés dans les options du logiciel ne sont pas expliqués. Il s'agit des termes "écran optimal", "orientation et inclinaison optimale" de l'écran, "taille optimale" de l'écran ou encore "variantes" de l'écran. Nous le verrons plus tard, les utilisateurs du logiciel peuvent utiliser le pointeur de leur souris pour avoir plus d'informations sur une notion rencontrée sur l'interface *SVR*. De plus l'outil a été conçu par un architecte et pour des architectes. Il se veut donc intuitif et utilise le vocabulaire des architectes comme la variante ou l'inclinaison par exemple. Il nous a donc semblé utile d'observer si l'outil était aussi intuitif que ce que nous pensions. C'est pour cette raison que toutes les notions n'ont pas été abordées au début du protocole.

La méthode de simulation inverse des contraintes solaires ou visuelles a été expliquée grâce aux quatre figures suivantes (Figure 3-1, Figure 3-2, Figure 3-3 et Figure 3-4). Nous avons toujours utilisé ces mêmes schémas et uniquement ceux-là.

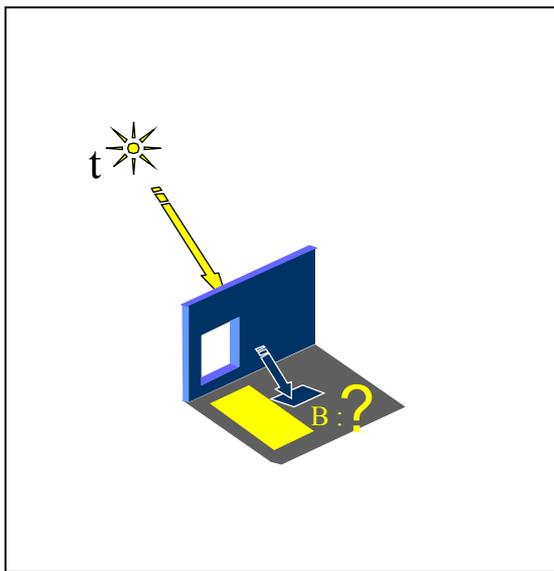


Figure 3-1 : Simulation directe de l'ensevelissement de la base B à l'instant t

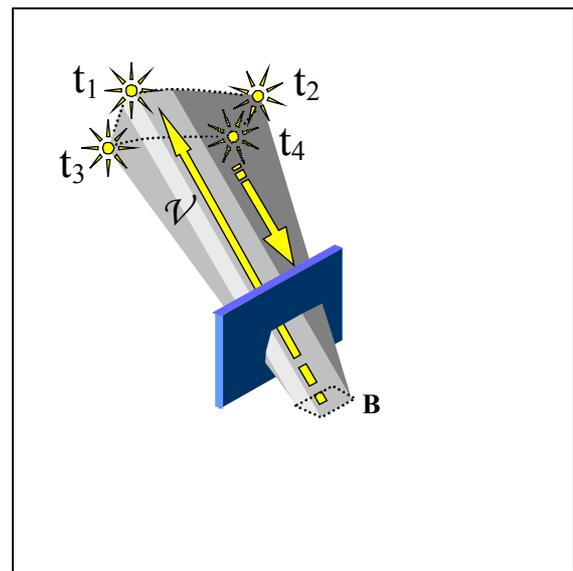


Figure 3-2 : Simulation inverse pour la période $t_1 t_2 t_3 t_4$. B est la base de la contrainte solaire. V est le volume de contrainte.

Outre la description du vocabulaire propre à notre interface, nous avons rappelé quelques éléments déterminants pour le bon déroulement des simulations. Ainsi, nous avons attiré l'attention des concepteurs sur l'importance de l'unité de mesure utilisée pour les modélisations, à savoir le mètre et sur l'intérêt d'avoir sans cesse à l'esprit la

différence non linéaire qu'il existe entre les heures solaires et les heures légales (cf. *équation du temps* – Figure 2.13, § 2.1.2.1).

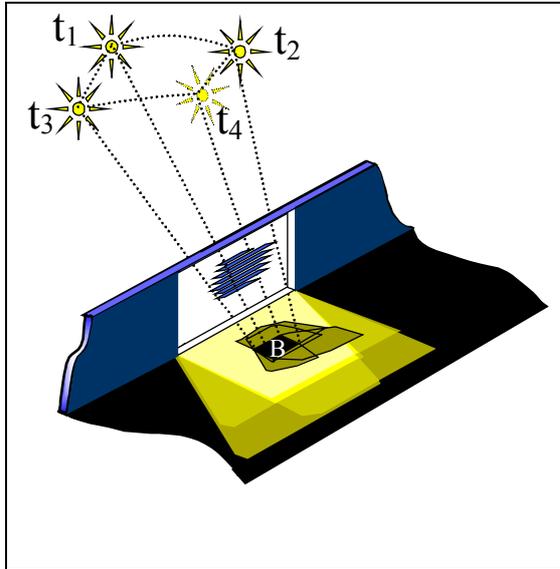


Figure 3-3 : Modélisation inverse d'une solution à une protection solaire d'été. Vérification pour les instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4

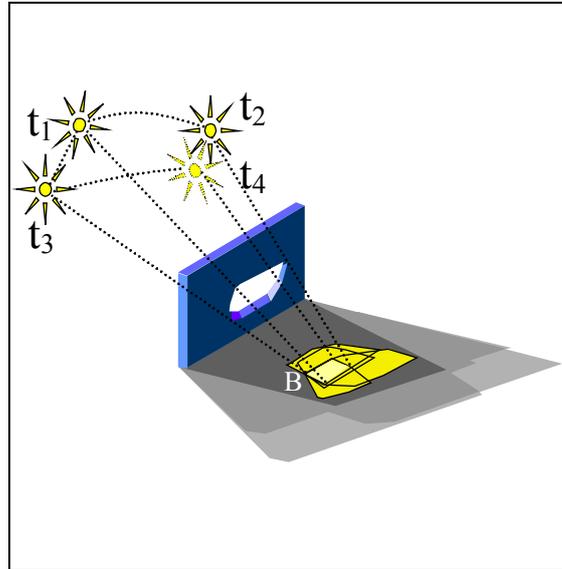


Figure 3-4 : Modélisation inverse d'une solution l'ouverture exacte pour ensoleiller la zone B. Vérification pour les instants t_1 , t_2 , t_3 et t_4

Nous avons aussi rappelé qu'avec *SVR* comme avec le modèleur *AutoCAD*, le nord était représenté par l'axe y du repère x,y,z . Enfin, nous avons expliqué aux concepteurs pourquoi il était important de toujours respecter le sens de saisie des points des bases ou cibles de contraintes et qu'ils avaient la possibilité lors d'une simulation solaire de zoomer sur le centre du modèle de voûte solaire afin de visualiser leur scène.

3.2.3.2 Deuxième étape : la présentation des instructions du protocole *think aloud*

Les instructions de la méthode de raisonnement à voix haute sont relativement simples. Il s'agit pour les concepteurs de dire les actions qu'ils effectuent et les raisonnements qu'ils suivent durant la séance de conception. Ils doivent se forcer à parler comme s'ils se parlaient à eux-mêmes. Tout doit être dit. Les concepteurs sont informés que s'ils ont besoin d'aide durant la phase d'enregistrement, nous pouvons temporairement interrompre le protocole pour répondre à leurs questions.

3.2.3.3 Troisième étape : l'enregistrement audio

La prise de notes ne pouvant pas restituer en totalité et de façon fidèle les phrases, les intonations, les blancs et les expressions des concepteurs, nous avons opté pour un enregistrement audio des séances d'observation. L'enregistrement est réalisé avec un dictaphone de petite taille placé entre l'écran et le clavier de l'ordinateur. Les concepteurs oublient vite la présence de cet enregistreur et parlent avec leur langage propre. Les retranscriptions des sections suivantes laissent apparaître ainsi des formules typiques de l'expression orale.

Nous n'avons pas pu suivre un architecte sur le long terme. Aucun projet de conception n'a donc été observé au-delà de la phase d'avant-projet. Généralement, les enregistrements n'ont pas duré plus de deux heures sauf dans le cas de l'architecte A3 pour qui nous totalisons 7 h 30 d'enregistrement sur six séances d'observation allant de la phase d'esquisses à la phase d'avant-projet.

Les citations des concepteurs ont été retranscrites le plus fidèlement possible. Les blancs figurent parmi les citations sous la forme de points de suspension et les expressions familières ont été gardées telles quelles. Les phrases des concepteurs sont écrites en italique dans le texte.

3.2.3.4 Quatrième étape : retour sur certains points mal compris par l'observateur

Les précisions apportées par les concepteurs sur certains passages flous de leur discours ont été rapportées à la fin de la séquence enregistrée ou ponctuellement durant cette séquence s'il y avait un risque qu'ils oublient la signification des quelques phrases portant à confusion ou dont le sens échappait à l'observateur. Ces détails figurent entre crochets parmi les citations retranscrites des sections suivantes. Ils ont pour but d'éclaircir des sous-entendus, des omissions ou des ambiguïtés dans le texte des concepteurs. Parfois ils explicitent une action d'un concepteur qui positionne son doigt sur l'écran d'ordinateur pour désigner ce qu'il compte faire ou pour simplement montrer l'objet qu'il désigne dans le texte par un pronom personnel.

3.3 L'analyse des observations applicatives

L'analyse des observations fut effectuée après retranscription de la totalité des enregistrements audio. Nous nous sommes efforcés de dégager les six critères d'analyse que nous présentions dans l'introduction de cette partie : les réponses ou non du logiciel aux attentes des concepteurs, le besoin ou non d'assistance, la terminologie employée par les concepteurs, la vitesse de compréhension et le temps de prise en main de l'outil, les révélateurs d'intentions, et l'adaptation aux situations imprévues. Cette typification essaie d'analyser l'échange d'informations et d'idées qui s'opère entre un architecte et notre outil, via notre interface graphique. Nous ne prétendons pas analyser les fondements des principes cognitifs qui sont mis en action lors de la conception assistée par ordinateur. Nous essayons juste de dégager quelques tendances sur un panel d'enregistrements restreint mais non négligeable. Rappelons-le, ces quelques onze concepteurs ont effectué leurs simulations-conceptions dans les mêmes conditions matérielles, savent tous utiliser le logiciel mère *AutoCAD* et font partie de la même génération d'architectes.

3.3.1 Les réponses ou non du logiciel aux attentes des concepteurs

3.3.1.1 Le modèle de "voûte solaire" : un diagramme solaire 3D

Le modèle de "voûte solaire" utilisé dans notre outil semble avoir en dehors de sa fonction première qu'est la saisie des périodes solaires, une double utilité. Premièrement, il permet de rappeler en permanence au concepteur qui manipule ce modèle 3D durant ses simulations solaires, qu'il existe bien une différence entre heures solaires et heures légales. En effet le concepteur a sous les yeux les positions successives du soleil, heure solaire par heure solaire durant toute l'année, et "en parallèle" le découpage en trois de la matinée et de l'après-midi, saison par saison (cf. Figure 3-5). Ces six périodes élastiques permettant d'identifier en heures solaires le début, le milieu et la fin de la matinée ou de l'après-midi, les concepteurs n'ont eu aucun mal à repérer où se trouvait le midi légal à la demi-heure près (moyenne du changement d'heure légale autour des équinoxes).

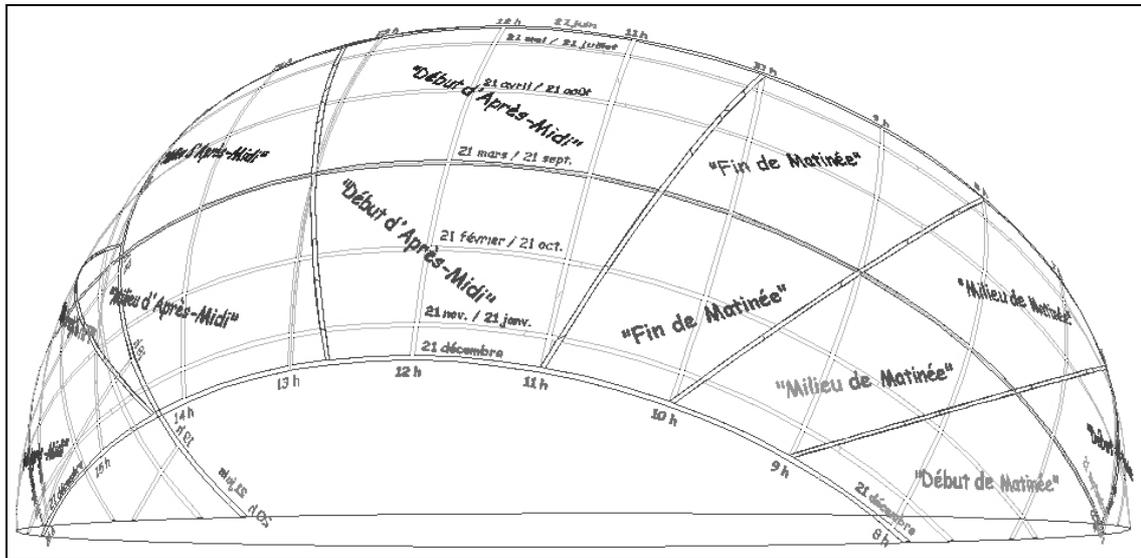


Figure 3-5 : Voûte solaire à la latitude 47° nord – présence complémentaire des heures solaires et des périodes élastiques en heures légales

Deuxièmement, ce modèle permet ce que peu de logiciels de simulation solaire proposent, c'est à dire de visualiser en 3D les trajectoires solaires autour de la scène sur laquelle s'opère la simulation. Ainsi certains concepteurs utilisent la molette de la souris pour – en trois ou quatre zooms – voir ce que "voit" le soleil depuis une période de l'année, et d'autres utilisent plus précisément la fonction *caméra* du modelleur. En ce sens, notre outil semble répondre pleinement aux attentes des architectes d'un bureau d'étude à Lausanne (hors de notre panel d'observation). Lesquels nous ont affirmé : *"nous, dans notre bureau d'étude, nous avons l'habitude de modéliser une scène. Ensuite si l'on veut calculer les périodes d'ensoleillement de cette scène, on se met à la place du soleil [en positionnant une caméra au bon azimut et à la bonne orientation] et on regarde la scène pour différents instants"*. Au lieu de rechercher et devoir rentrer les coordonnées du soleil avec des outils différents (logiciel de simulation lumineuse ou abaqués ou encore diagrammes et modelleur 3D), notre approche permet donc de gagner du temps pour ce type de pré-analyse tout en gardant en main le même outil pour la simulation inverse de l'ensoleillement. Notre outil semble aussi répondre à une demande de visualisation des trajectoires solaires depuis la scène puisque la *vue orbitale* du modelleur, en projection perspective permet de visualiser depuis la scène, où se positionnent les trajectoires solaires annuelles d'un lieu (voûte solaire pour une latitude donnée). Les étudiants en 3^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes ont ainsi d'eux-mêmes, utilisé cette astuce pour visualiser les périodes d'ensoleillement d'un point

particulier de la salle à manger de la maison dont ils avaient choisi d'analyser les apports solaires (cf. Figure 3-6). Les trajectoires solaires apparaissaient ainsi derrière la baie vitrée de la salle à manger et les étudiants pouvaient facilement lire les périodes visibles depuis leur point de vue (cf. Figure 3-7).

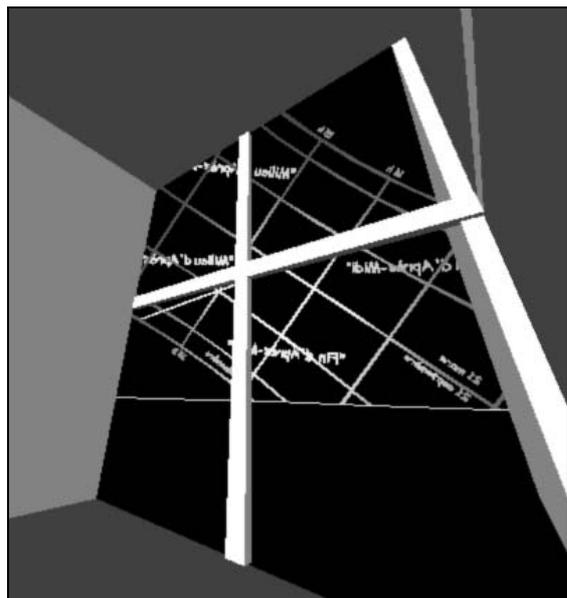


Figure 3-6 : Trajectoires solaires annuelles depuis l'angle nord-est de la salle à manger de la maison Équerre (double hauteur) à 1,6 m au dessus du sol

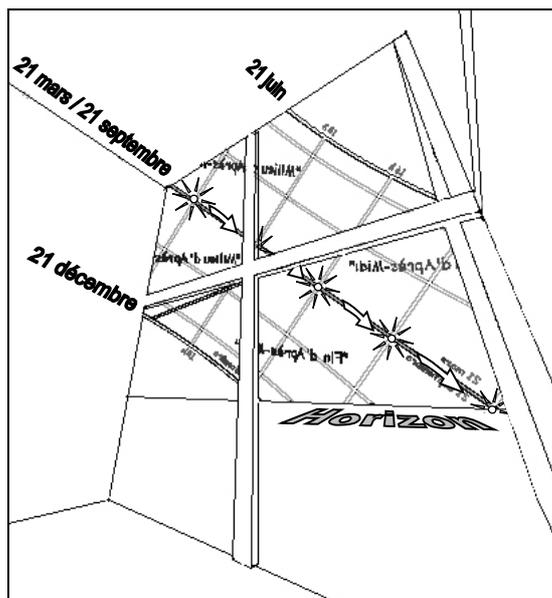


Figure 3-7 : Positions et épaisseur apparente du soleil. Remarque des étudiants : la superposition des trajectoires solaires du printemps avec celles d'été et celles d'automne avec celles d'hiver

De plus le diagramme solaire 3D que représente le modèle de voûte solaire a visiblement permis à ces mêmes étudiants de clarifier et d'imager la superposition des trajectoires solaires du printemps et de l'été par exemple (cf. Figure 3-7), ce qui n'est pas forcément facile à appréhender. En effet nombreux sont les maîtres d'ouvrages ou même les maîtres d'œuvres qui confondent "année thermique" et "année solaire", assimilant ainsi "les mois d'été" (juillet et août) qui sont aussi "les mois les plus chauds" de l'année, aux mois où le soleil rayonne le plus. Or rappelons-le, il n'y a aucune différence d'azimut et de hauteur entre les rayons solaires du 21 avril et ceux du 21 août par exemple. D'ailleurs, l'observation qui suit est très révélatrice. E12, étudiant en troisième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes propose à ses collègues de simuler une contrainte solaire sur la façade ouest de la maison étudiée. Le concepteur a de bonnes connaissances dans le domaine de l'ensoleillement (cours d'ensoleillement en deuxième et troisième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes). Sa première intention est de

s'intéresser aux rayons solaires dès le mois de mars. "*On va prendre de mars à juin...*" affirme le premier concepteur. Puis le temps de la manipulation du diagramme 3D plus tard : "*... et aller-retour*" affirme-t-il en montrant alors la période d'été. Le modèle de voûte solaire semble donc avoir clairement permis au concepteur de visualiser la superposition effective des trajectoires solaires des mois de mars, avril et mai avec celles, respectivement de juillet, août et septembre.

3.3.1.2 Les périodes solaires élastiques et identification des heures légales

Durant toutes les séances d'observation, les périodes solaires élastiques du modèle de voûte solaire ont bien répondu aux attentes des concepteurs qui n'ont jamais émis le souhait de simuler des contraintes solaires plus précises qu'à la demi-heure près. Ceci confirme l'hypothèse de départ sur la précision des contraintes solaires émises par les concepteurs, les maîtres d'ouvrages ou encore par les cahiers des charges des opérations architecturales ou urbaines. Ainsi lorsque les concepteurs ont converti les heures légales en heures solaires, ils ont toujours retiré une ou deux heures selon les saisons. Or pour être précis, ils auraient dû tenir compte de l'*équation du temps* qui ajoute ou retire jusqu'à 16 minutes à ce décalage entre heures légales et heures solaires. Mais rares sont ceux qui ont connaissance de cette *équation du temps* (cf. Figure 2.13). Ainsi il nous a semblé inutile que les heures de contraintes soient plus précises que ce maximum de plus ou moins 16 minutes, remarquant de plus que les concepteurs eux-mêmes hésitaient dans leurs choix oraux à être très précis. Ils n'indiquaient jamais les minutes et ne s'en tenaient qu'aux heures ou aux demi-heures.

Dans un seul cas, l'architecte a confondu heures légales et heures solaires. En effet A1 travaillant sur une contrainte solaire matinale "*entre 9 h et 11 h*" et estivale "*entre juillet et août*" et ayant pourtant de bonnes connaissances dans le domaine de l'ensoleillement, ne s'est pas aperçu de son erreur. Il faut préciser que sur le modèle de voûte solaire sur lequel A1 a travaillé (latitude 28,4° nord), n'étaient pas indiquées les heures légales sous forme de périodes solaires élastiques. Ce choix de ne faire apparaître les périodes élastiques que sur les voûtes solaires de latitudes françaises est dû au fait que nous n'avions pas au moment de l'observation, de résultats d'enquêtes pour positionner au plus juste les heures élastiques selon la latitude du lieu. Après avoir montré au concepteur les modèles de voûtes solaires des latitudes françaises, il est certain que l'indication des heures légales sous forme de périodes élastiques lui aurait permis de mieux positionner ses heures de contrainte solaire.

Ceci ne peut que nous encourager à ajouter des périodes élastiques aux modèles de voûtes solaires qui n'en ont pas. Pour cela, il faudrait réaliser un panel d'enquêtes sous différentes latitudes pour identifier ces périodes en tenant compte des contextes socio-économico-culturels.

3.3.1.3 L'environnement du modelleur *AutoCAD* rassure les concepteurs

Il ressort des séances d'observation, que notre démarche est bien adaptée aux exigences des concepteurs concernant la compatibilité entre les documents qu'ils utilisent et ceux fournis par notre prototype qui sont simplement des fichiers .dwg du modelleur *AutoCAD*. En effet, tous les concepteurs observés à l'exception de l'architecte A4 de la Mairie de Niort utilisent le logiciel *AutoCAD* pour concevoir leurs projets. Il leur a donc été très facile de récupérer les résultats des simulations sous forme de fichiers .dwg pour les exploiter après nos séances d'observation. Pour tous ces concepteurs, cela répondait pleinement à leurs attentes.

L'agence A1 par exemple a pu réutiliser les simulations sur une fenêtre traditionnelle espagnole après nos observations. Les étudiants en troisième et cinquième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes ont retravaillé leurs volumétries à partir des simulations. Ils ont utilisé les volumes de contraintes ou les écrans solaires simulés comme des éléments du projet à part entière, tandis que l'architecte A3 continue à l'heure où nous rédigeons, à utiliser dans l'environnement du logiciel mère, les résultats des simulations réalisées avec notre outil pour affiner ses recherches d'optimisation de lattes brise-soleil. Dans ce dernier cas, l'architecte devant dans le cadre de sa recherche aboutir à une maquette de démonstration pour un industriel du BTP, il est aisé pour elle d'avoir des résultats sur *AutoCAD* afin de calculer des volumes de matière économisée ou des surfaces de vitrage à protéger (fonctions *volumes* et *aires* de la barre d'outil *propriétés mécaniques*).

Pour ce qui est de A4, architecte à la Mairie de Niort, les fichiers *DesignCAD* sur lesquels il travaille, ont dû être convertis en .dwg pour les rendre compatibles avec une utilisation sous *AutoCAD*, ce qui n'a duré que le temps d'un enregistrement. L'utilisation du logiciel *AutoCAD* étant très répandue en France dans les agences d'architecture, les bureaux d'études, les collectivités et les services départementaux d'urbanisme et d'architecture, il est logique de trouver dans ces institutions des logiciels de DAO ou de CAO qui importent ou exportent des fichiers .dwg. Ainsi notre outil suit la tendance actuelle et répond bien aux attentes de ces concepteurs sur le gain de temps ainsi réalisé.

Toutefois les simulations *SVR* étant toujours en 3D, il faut parfois extruder les plans en 2D et prendre quelques altitudes sur un plan cadastral avant de pouvoir lancer les calculs. Ce fut le cas pour les simulations visuelles réalisées avec l'architecte A4, sur la salle de réunion où se déroulait la séance d'observation (cf. Figure 3-8, Figure 3-9 et Figure 3-10).

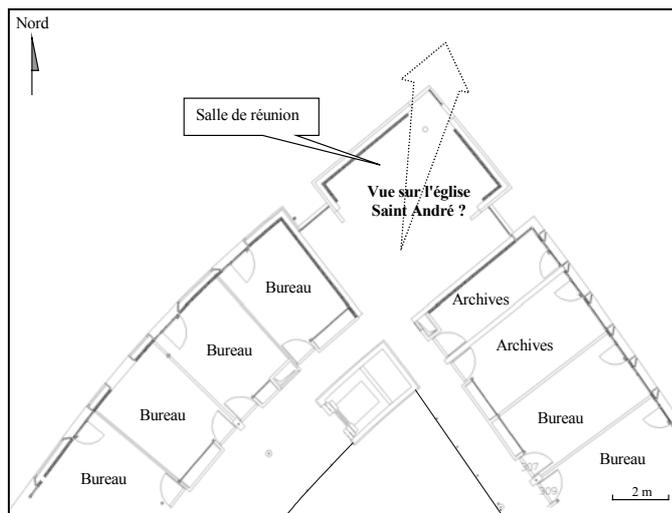


Figure 3-8 : Plan de l'angle nord du bâtiment de la Communauté Urbaine de Niort (Mairie – 3^{ème} étage) au format .dwg d'après le logiciel *DesignCAD* – plan utilisé par l'architecte pour modéliser en 3D la salle de réunion et simuler les contraintes visuelles avec *SVR*

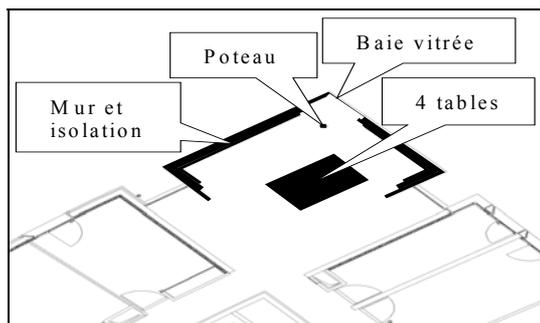


Figure 3-9 : Éléments de la pièce sélectionnés par l'architecte et extrudés avant de réaliser les simulations

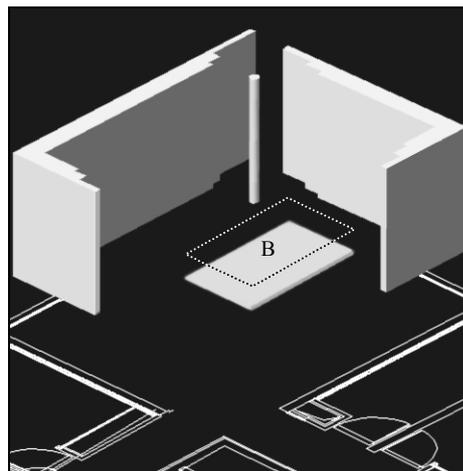


Figure 3-10 : Extrusion des éléments de la pièce et sélection d'une base de contrainte visuelle (B) à 50 cm au-dessus des tables (1,3 m au-dessus du sol)

3.3.1.4 Les résultats des modélisations inverses semblent être adaptés aux besoins des concepteurs

Parmi les commentaires spontanés des concepteurs, nous avons relevé quelques phrases qui montrent leur satisfaction vis-à-vis de l'exploitation des résultats *a posteriori* telles que : "*ce qui est vraiment bien aussi c'est que... on peut revenir dessus, les données sont acquises et donc là par exemple j'ai un petit doute sur le dimensionnement... il suffirait que je réouvre le fichier donc pour vraiment vérifier la valeur*" ou "*oh c'est super parce que du coup on peut mesurer la taille [du brise-soleil avec la fonction distance]*" ou encore "*en fait le coucher du soleil il est là, c'est ça ? Le 21 décembre, il est là, oh, c'est magique, vraiment c'est super !*" et "*je trouve que c'est à la portée de tout le monde d'utilisation...*"

La satisfaction des concepteurs vient aussi pour certains, du fait qu'il est possible d'exploiter les résultats des simulations inverses à partir de simples impressions sur papier de certaines vues des volumes de contraintes et de retravailler dessus sous forme de croquis. Certains concepteurs utilisent une méthode encore plus rapide pour retravailler des vues en croquis ; ils utilisent une "impression écran" qui leur permet en une opération de transférer une vue à l'écran sur un logiciel de retouche d'images, ce qui permet de ne pas se soucier de l'échelle et du type d'impression puisque l'image est saisie telle qu'elle est à l'écran. Ainsi les étudiants en troisième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes ont utilisé cette technique et ont affirmé que des croquis main levée leur suffisaient pour justifier le parti architectural qu'ils avaient choisi, au stade de proposition d'amélioration du confort intérieur de leur maison. Dans certains cas, nous le voyons ici, tout le travail de simulation inverse peut donc être réduit *in fine* à de simples croquis classiques d'architecte. Mais c'est aussi un gage de bonne adéquation entre des simulations inverses parfois complexes et l'attente qu'en ont les concepteurs. Les volumes de contraintes, les percements ou les brise-soleil calculés avec notre outil sont donc aussi réutilisés sous formes de croquis comme les autres volumétries des modélisations réalisées par les concepteurs. A ce niveau, la précision ne semble pas la première préoccupation, mais ceci n'est pas contradictoire avec le fait de relever quelques distances très précises sur les simulations, ce que les étudiants se sont d'ailleurs empressés de faire afin de compléter les croquis de quelques commentaires (hauteur de l'écran végétal réalisé pour protéger la baie du soleil, et position exacte de l'écran par rapport à la façade).

Ainsi, même si la finalité des simulations est un simple croquis, celui-ci semble être accompagné de quelques notes précises, fruit des simulations, et qui justifient à elles

seules le temps passé sur les calculs *SVR*. D. Faucher [Faucher 2001] relate d'ailleurs des observations du même ordre dans son mémoire de thèse sur un outil de modélisation déclarative des enveloppes urbaines réglementaires. Il explique comment un architecte décide de réutiliser des simulations inverses de gabarits urbains sous forme d'impressions sur papier pour les retravailler en croquis après.

3.3.1.5 Les principales déceptions des concepteurs

Les principales déceptions des utilisateurs sont toujours du même ordre. Les concepteurs sont étonnés de ne pas avoir le même type de présentation que sur les logiciels actuels et particulièrement *AutoCAD*. Par exemple, les comparaisons entre le modeleur et notre macro – qui dans ces premières versions était peu interactive – aboutissent à des critiques du type : *"si lorsque l'on clique sur le type 1 de brise-soleil [option écrans solaires], le n° 1 du schéma s'allumait, ce serait encore mieux peut-être"*. Cette demande de plus d'interactivité de l'interface s'accompagne aussi d'une recherche d'informations sur la "ligne de commande" du modeleur en bas de l'écran ou dans des fenêtres séparées. Ainsi A1 a émis le souhait d'être renseigné en temps réel sur le décompte des points à sélectionner lors de la saisie des bases et cibles de contraintes. Certains concepteurs auraient aimé voir apparaître le nom des volumes de contraintes dans la fenêtre du modeleur réservée à la gestion des "calques". D'autres trouvent *"un peu dommage que l'on soit obligé de cliquer l'option"* d'une fenêtre *SVR* pour avoir accès aux autres options de cette même fenêtre, contrairement à ce qui se fait sur la plupart des logiciels actuels (par basculement d'un bouton à un autre). Toutes ces remarques ont été prises en compte dans l'évolution des versions de notre logiciel. Ainsi apparaît désormais sur la ligne de commande le numéro du point que le concepteur doit cliquer par rapport au nombre total de points choisis par le concepteur. Le message suivant apparaît : *"cliquez sur le point i/n de la base"*. Depuis cette évolution, seul l'architecte A4 ne s'attendait visiblement pas à être informé de la sorte puisqu'il ne se rappelait plus de la présence de la ligne de commande (*"je n'ai pas trop l'habitude d'utiliser AutoCAD, mais c'est vrai que c'est ici que ça se passe"*). De même les schémas correspondant aux options s'allument lorsque ces dernières sont sélectionnées (cf. Figure 3-11 et Figure 3-12).

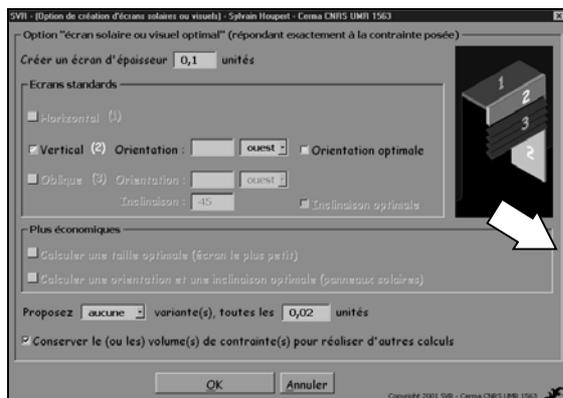


Figure 3-11 : Interface du logiciel SVR, option "écran solaire ou visuel optimal" – à une sous-option correspond un schéma explicatif. Ici l'option choisie par l'architecte est un écran vertical (type 2)

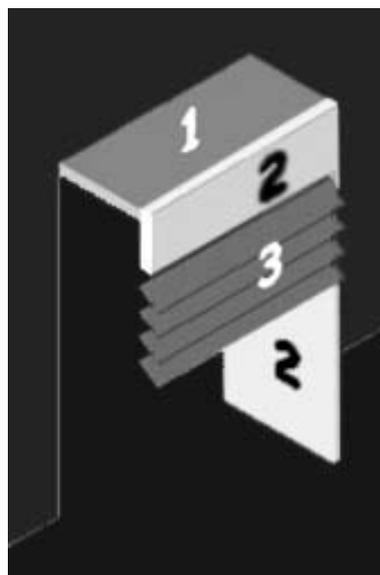


Figure 3-12 : Type de schéma qui s'allume lorsque l'architecte coche une option d'écran optimal pour une orientation et une inclinaison donnée (ici écran vertical d'azimut libre)

3.3.1.6 Les améliorations apportées ou devant être apportées à l'outil

Dans une même logique d'adaptation de l'outil aux attentes des concepteurs et comme nous l'avons dit plus haut, le code du prototype a été changé de façon à placer automatiquement les volumes de contraintes sur les calques spécifiques, rangés par noms et par couleurs pour répondre précisément à une homogénéité entre la logique du logiciel mère et celle de la macro.

Le fait que SVR soit une "sur-couche" d'AutoCAD permet généralement aux architectes qui utilisent ce logiciel mère pour concevoir leurs projets, de garder leurs habitudes et leurs astuces. Ainsi ils n'ont aucun mal à saisir les points des bases et cibles de contraintes avec un type d'accrochage propre à eux. Certains utilisent les treize paramètres d'accrochage aux *poignées* des objets et gardent une main sur la touche F3 de leur clavier (raccourci de la désactivation de l'accrochage) pour de temps en temps saisir des points sur une altitude précise sans prendre le risque de cliquer sur un point qui semble bon en plan mais pas en altitude car superposé à celui recherché. C'est le cas typique de la saisie des points d'un masque environnant à partir d'une image *fish-eye* chargée.

Nous avons ainsi remarqué que sur ce point ergonomique, tous les concepteurs semblaient très à l'aise avec l'environnement *SVR-AutoCAD*. Les plus réticents d'entre eux (E23 et E13), connaissant peu le logiciel mère, ont pourtant réalisé des simulations aussi rapides que celles produites par les autres architectes. Le fait que notre prototype ne rajoute pas de nouvelles fonctionnalités de base, semble donc rassurer les concepteurs les moins à l'aise dans l'environnement mère, qui sont aussi ceux qui recherchent la facilité d'utilisation de l'outil.

Parmi les attentes formulées par les concepteurs, certaines ont été prises en compte par la suite, d'autres pourraient faire l'objet de développements futurs. Ainsi les noms d'options mal choisis ont été modifiés aussitôt. Les tailles de scènes se sont avérées trop petites. Nous avons donc modifié le code de notre prototype pour permettre à des volumes de contraintes visuelles urbaines de se "projeter" à des distances allant jusqu'à dix kilomètres (contre un kilomètre avant). Cette attente émanait de trois étudiants de l'Ecole d'Architecture de Nantes, E21, E22 et E23 qui ont réalisé des simulations visuelles sur des scènes urbaines de 800 mètres à 1,5 kilomètres de distance. Un autre souhait émanait de l'autre groupe d'étudiants de l'Ecole d'Architecture. Alors qu'ils viennent de trouver la solution optimale d'un brise-soleil horizontal et d'un autre vertical, pour un même point d'accrochage (sections horizontales et verticales du volume de contrainte solaire, passant par un point choisi), et remarquant qu'il y a aussi possibilité de calculer un brise-soleil oblique, leur questionnement est tout naturellement de savoir s'il est possible de demander à notre outil de calculer l'écran minimal pour un point donné sans lui imposer son inclinaison ni son orientation, évitant ainsi de comparer une infinité de résultats pour trouver le meilleur. "*Ce serait bien que le logiciel trouve le meilleur brise-soleil*", tel était donc leur attente pour leur projet d'optimisation d'un écran brise-soleil. Ce souhait leur semblait être une perspective idéale or il s'agissait exactement de la dernière option développée dans *SVR* mais pas encore testée. Ainsi ces remarques sont précisément celles qui étaient un choix de développement. Désormais, le concepteur a la possibilité de faire calculer au logiciel un écran optimal pour une orientation donnée, une inclinaison donnée et/ou un point d'accrochage donné (cf. Figure 3-13 et Figure 3-14).

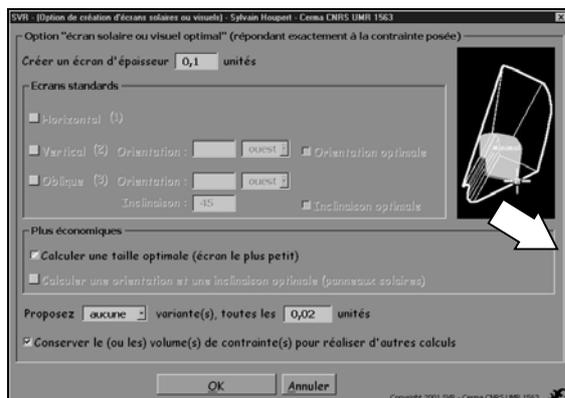


Figure 3-13 : Interface du logiciel *SVR*, option "écran minimal" – à une épaisseur d'écran et un point d'accrochage choisis correspond un volume d'écran minimal.

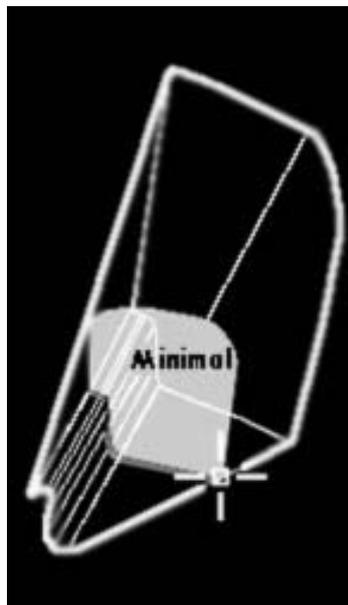


Figure 3-14 : Icône de l'option "écran minimal"

Deux attentes pourraient faire l'objet de développements futurs. Premièrement, la notion de porosité des écrans solaires ou visuels et deuxièmement, la prise en compte en temps réel des modifications des contraintes (déplacement de la base de contrainte par exemple). Ainsi A1 aurait aimé pouvoir calculer des pourcentages de "porosité" d'un brise-soleil "du type 45 % de porosité" dit-il. Il semble que le climat local des îles Canaries influence cette demande de l'agence d'architecture. La porosité des parois est très recherchée sous ces latitudes quasiment tropicales (28,4° nord), mais ce n'est pas la seule raison qui a poussé l'architecte à parler de porosité. En effet, il nous livre de lui-même une réflexion qui semble être le fruit d'un questionnement antérieur, montrant ainsi qu'il avait de réelles attentes sur ce sujet qu'est la simulation inverse de l'ensoleillement. Il nous affirme ainsi qu'un pourcentage de porosité, "c'est mieux pour parler avec le client", dans le sens où celui-ci se trouve sur un même pied d'égalité avec le maître d'œuvre. Il comprend mieux ce qu'est une paroi à moitié ajourée que ce qu'est un plan de travail recevant 500 lux. Toujours en séance d'observation, alors qu'il était soumis au protocole (*think aloud method*), A1 déclare : "je ne suis pas pour les lux" et enchaîne sur le rapport qu'il entretient avec ses clients avec qui il ne se permet pas de parler de façon trop théorique. Le deuxième souhait qui pourrait être pris en compte sous réserve que la technologie le permette, est celui de E22 qui idéalement aurait attendu du prototype que celui-ci modifie en temps réel les volumes de contraintes pour qu'ils s'adaptent au déplacement des bases ou des cibles de contraintes par exemple. Il déclare : "si on tourne l'image [la modélisation] il faut refaire le calcul... ça ne se

modifie pas si on tourne la boîte là [un des nombreux parallélépipèdes qui constituent les salles d'exposition du musée qu'il a conçu avec ses collègues]". Effectivement l'intérêt d'un tel outil serait énorme car il permettrait de faire évoluer un volume de contrainte de façon dynamique dans une scène donnée juste en déplaçant sa base ou sa cible. Néanmoins notre outil avance déjà dans ce sens puisqu'il permet de manipuler de réelles volumétries de contraintes solaires par exemple sans faire bouger leurs cibles solaires puisque celles-ci sont considérées à l'infini. Notre outil répond donc en partie à cette attente mais il reste à étudier les possibilités de généraliser l'approche aux contraintes visuelles qui pour une cible donnée et une base libre par exemple ne donnent pas les mêmes volumes de contraintes.

3.3.1.7 L'exploitation et la hiérarchisation des contraintes facilitées par leur représentation 3D

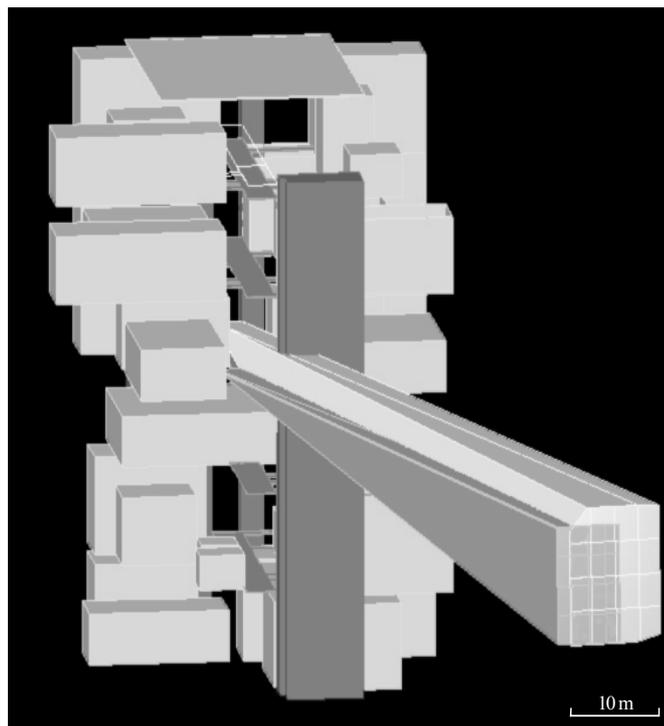


Figure 3-15 : Interpénétration de deux volumes de contraintes visuelles de bases adjacentes – astuce utilisée par les étudiants en 5^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes pour qualifier et quantifier l'importance d'une contrainte visuelle sur l'autre. Cible des contraintes : la Tour de Bretagne. Base des contraintes : passerelle en T, au 3^{ème} étage. Le projet de musée laisse apparaître ici l'esquisse de la volumétrie des salles d'exposition mais pas la structure ni l'enveloppe vitrée de l'édifice.

Nous avons noté que notre prototype de logiciel répond semble-t-il bien aux souhaits de certains concepteurs qui aiment identifier pour une base donnée, quelles zones auront un impact plus important sur la "volumétrie" de la contrainte. Ainsi certains étudiants ont découpé des bases clairement composées de plusieurs zones (un axe principal et des parcours secondaires afin d'identifier par "discrétisation" de la contrainte, quelle était l'importance de la contrainte "secondaire" par rapport à la "principale"). L'approche est d'une part visuelle et quantitative puisqu'ils se sont aperçus que les volumétries étaient clairement hiérarchisées (cf. Figure 3-15), et d'autre part, qualitative puisque par analyse en élévation et en plan, les concepteurs ont remarqué que le volume "secondaire" était dans certains cas complètement inclus dans le volume principal (cf. Figure 3-16 et Figure 3-17). Ce type d'information recherché par ces concepteurs est directement exploitable à l'écran moyennant le cas échéant une ou deux mesures avec les outils du modelleur.

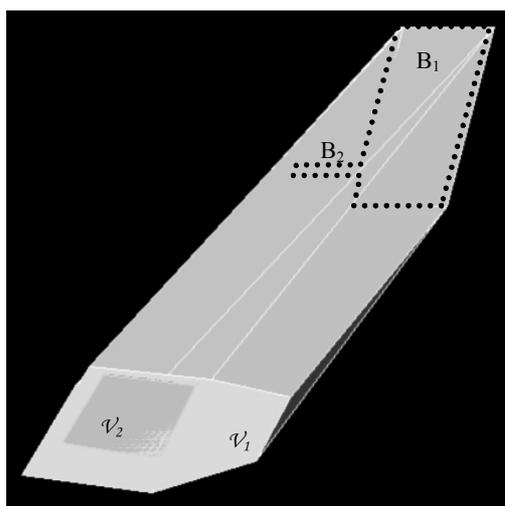


Figure 3-16 : Deux volumes de contraintes enclavés (V_2 intérieur à V_1) – V_2 correspondant à la contrainte visuelle depuis la passerelle secondaire (B_2) vers le Château des ducs de Bretagne et V_1 correspondant à la contrainte depuis l'axe principal de la passerelle (B_1) vers le château.

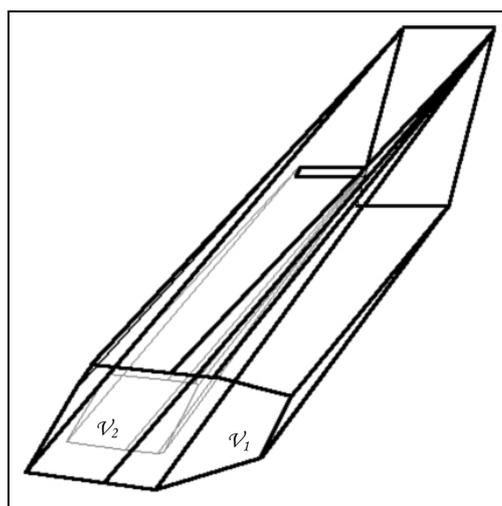


Figure 3-17 : Vue filaire des deux volumes de contraintes enclavés. Conclusion des concepteurs : disparition de la hiérarchie des contraintes visuelles qu'ils avaient remarquée sur la figure précédente (Figure 3-15).

Au vu des observations, il semble possible de généraliser au moins un point sur lequel tous les concepteurs sont d'accord : les résultats des simulations solaires ou visuelles produits par notre outil sont toujours exploitables sous la forme de volumes, à partir du moment où les contraintes posées ne sont pas excessives (vues panoramiques trop importantes, périodes solaires de la totalité de l'année, etc.). Tous les concepteurs ont

travaillé avec les volumes de contraintes comme ils l'ont fait avec les autres volumes produits par le modéleur.

Les concepteurs sont conscients dès le début des simulations semble-t-il, que l'impact volumique d'une contrainte peut vite être énorme si les cibles choisies sont très larges. Cette intuition est probablement le fruit d'architectes habitués par leur formation, leur bon sens ou leur expérience, à se représenter dans l'espace une scène urbaine ou architecturale avec ses principales proportions. En effet, les cibles n'ont jamais été choisies au hasard ou par curiosité (hormis un cas relaté plus loin) ou même par défi. Elles sont le résultat d'une première recherche sur l'intervisibilité potentielle entre la base et la cible de contrainte et répondent toujours à un projet précis même si certaines données du projet restent encore floues au stade de l'esquisse. Les concepteurs n'ont pas produit d'erreurs du type : réalisation d'un volume de contrainte solaire hivernale d'une fenêtre orientée au nord, sous une latitude européenne. Cela n'aurait aucun sens puisque l'on considère uniquement les rayons solaires directs qui ne peuvent provenir du nord en hiver, en Europe. Un des enseignements de ces séances d'observation est que notre prototype donne pour une contrainte non fantaisiste, une réponse volumique "de l'ordre du possible, de l'exploitable, du concevable". Il ne donne évidemment aucune indication d'ordre conceptuel, mais propose d'exploiter les volumes de contraintes en calculant des brise-soleil optimaux (options) et invite l'architecte à réaliser des opérations booléennes entre ces volumes et la scène. Tout ceci semble avoir bien été intégré par l'ensemble des architectes. Aucun n'a bloqué sur la partie conception, probablement car les contraintes n'étaient jamais disproportionnées, mais aussi car ces volumes semblent avoir un effet "révélateur" comme nous le montrons dans la section 3.3.5.

Les résultats des simulations inverses semblent être à la hauteur des attentes des concepteurs car ils n'ont pas d'*a priori* sur l'importance et la forme que peuvent prendre les volumes de contraintes. Ils n'ont donc jamais eu de déception sur des calculs, tout au plus quelques étonnements. Ils ont tous, soit composé leur esquisses avec la contrainte volumique, soit trouvé des compromis entre forme, intentions, orientations, économie ou esthétique. A3, préoccupée par le gain de matière de ses lattes brise-soleil, par leurs propriétés mécaniques et leur optimisation, s'est imposée de respecter au plus juste le dimensionnement que fournissait les simulations. "*Bien, c'est super... donc là je n'avais pas de soucis [...] bon, bien c'est parfait... Je vais quand même faire un petit zoom pour voir la forme de la latte. Elle [la forme de la latte] part par là... mais c'est pas gênant*" affirme-t-elle alors que visiblement la forme obtenue est très différente des formes de lattes brise-soleil standardisées par l'industrie. Sa conception est ainsi étroitement liée aux simulations, même si *in fine* la forme des lattes en coupe transversale est légèrement

adaptée pour satisfaire une propriété mécanique. En coupe, la forme triangulaire des lattes évolue vers un triangle tronqué (cf. Figure 3-60 – § 3.3.5.6). Le volume total des lattes augmente proportionnellement mais il s'agit d'un compromis de l'architecte pour satisfaire aussi des contraintes techniques et budgétaires. L'architecte s'exprime sur ce point : "*à mon avis il faut quand même essayer de faire optimal, après... après on trouve des compromis*".

3.3.1.8 La simulation de l'accessibilité visuelle : un complément aux simulations de contraintes visuelles

A deux reprises, des concepteurs ont émis le souhait de pouvoir réaliser ce qu'il est convenu d'appeler des cartes d'accessibilité visuelle d'un bâtiment dans une ville, à l'instar des travaux réalisés au Laboratoire Cerma sur l'intervisibilité dans la ville de Nantes et plus particulièrement sur l'accessibilité visuelle de la Tour de Bretagne [Morin 1995]. *SVR* ne permet pas de réaliser un "lancer de rayons" pour produire de telles cartes, mais la fonction *lumières* du modèleur peut être détournée de son utilité première pour placer un "soleil" virtuel (*source distante*) sur un point donné de la ville afin de réaliser une simulation de l'intervisibilité de ce point avec la ville. Ainsi sur la carte d'accessibilité visuelle de ce point "éclairant", les zones "à l'ombre" sont celles d'où il n'est pas possible de voir ce point et celles "au soleil" sont celles d'où il est possible de le voir. Cette méthode de simulation déjà testée avec le logiciel *Solène* [Morin 1995], peut être utilisée ici avec le modèleur. Cela permet à l'architecte de rester sous le même environnement informatique pour pouvoir tester ponctuellement l'accessibilité visuelle d'un point. Pour un ensemble de point, la méthode doit être réalisée autant de fois qu'il y a de points. Ceci n'étant généralement pas possible (infinité de points), l'architecte doit tester l'accessibilité visuelle de quelques points pertinents de l'édifice visé. Si un édifice est visible à sa mi-hauteur depuis une rue, il le sera aussi pour sa partie supérieure. L'architecte A2 s'exprime sur notre approche dans cette optique, alors qu'elle n'a pas connaissance de cette méthode de simulation de l'accessibilité visuelle. "*Mon patron a toujours cherché à répertorier toutes les rues d'où on pouvait voir les monuments les plus hauts de Prague, c'est vraiment un outil qui pourrait l'intéresser*" nous déclare-elle. A ce stade de l'observation, l'architecte pense pouvoir utiliser notre outil pour simuler l'accessibilité visuelle dans la ville de Prague. Or, dans ce cas précis où les cibles visuelles ne sont pas identifiées, la méthode de "lancer de rayons" est complémentaire à l'outil de simulation inverse. Ce dernier qualifie et quantifie une contrainte visuelle sur la ville et le "lancer de rayons" identifie les cibles de contraintes potentielles. L'architecte A2 n'est pas spécialiste de l'ensoleillement, mais elle semble très intéressée

par l'approche visuelle de l'outil. Cependant il semble que la politique de l'agence d'architecture pour laquelle elle travaille soit avant tout une analyse *in situ* de la visibilité et de la lisibilité des façades de la capitale tchèque même si elle est équipée du logiciel *AutoCAD* et possède une bonne partie de la modélisation 3D de Prague. Les cartes d'accessibilité visuelle ont aussi répondu aux attentes des étudiants en cinquième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes qui avaient comme premier souhait, avant de retravailler les premières esquisses 3D de leur musée, de répertorier les "zones de la ville d'où il est possible de voir le musée". La volumétrie ébauchée leur semblait "faire de la concurrence à la Tour de Bretagne" de 130 mètres de haut "vu les proportions que nous avons données à notre musée, soixante-dix mètres de haut..." affirmaient-ils en début de séance d'observation. La carte de visibilité du point le plus haut de leur édifice, révèle que sur l'ensemble du secteur sauvegardé de la ville de Nantes, seuls deux zones de circulation (cf. Figure 3-18) et quelques façades (cf. Figure 3-19) laissent des échappées sur le sommet du musée. La surprise fut de taille pour les étudiants architectes, mais cela leur a permis de sélectionner aussitôt les bonnes cibles de contrainte visuelle et des zones de vues.

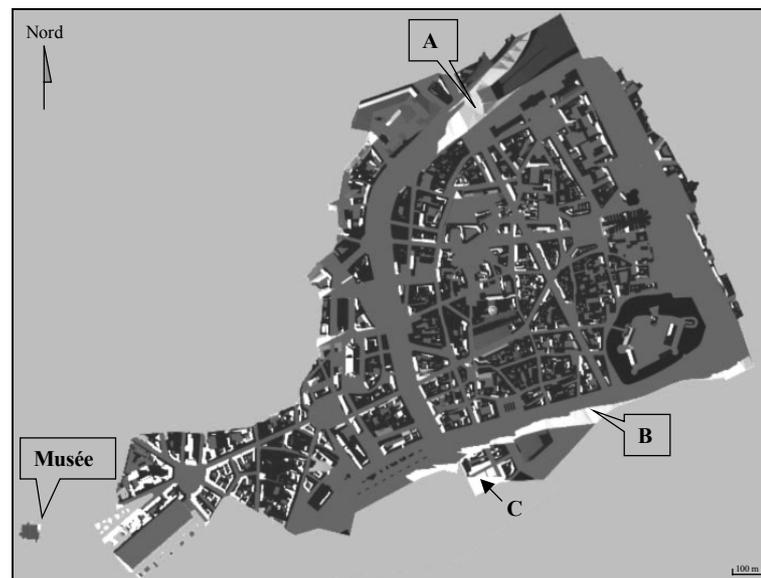


Figure 3-18 : Carte d'accessibilité visuelle du projet de musée depuis le secteur sauvegardé de Nantes. Vues en plan, les zones "à l'ombre" sont celles d'où il n'est pas possible de voir le point de référence du musée (point "éclairant" au sommet du musée) et celles "au soleil" sont celles d'où il est possible de voir le musée (au moins son sommet). Les concepteurs ont identifié deux portions d'axes de circulation (A – Cours des 50 Otages et B – Cours Franklin Roosevelt) d'où il serait théoriquement possible de voir en partie le musée. A noter que la place "éclairée" en bas de la figure (C) n'est pas à priori un lieu d'où il est possible de voir le musée (effet de bord avec aucun immeuble ne pouvant porter ombre sur lui).

Cette première carte d'accessibilité visuelle a permis aux concepteurs de localiser des lieux d'où l'édifice qu'ils concevaient pouvait apparaître comme "un signal dans la ville" tandis que celle qui suit leur a permis d'identifier trois cibles visuelles potentielles (la Tour de Bretagne, la Cathédrale et le Château des ducs de Bretagne).

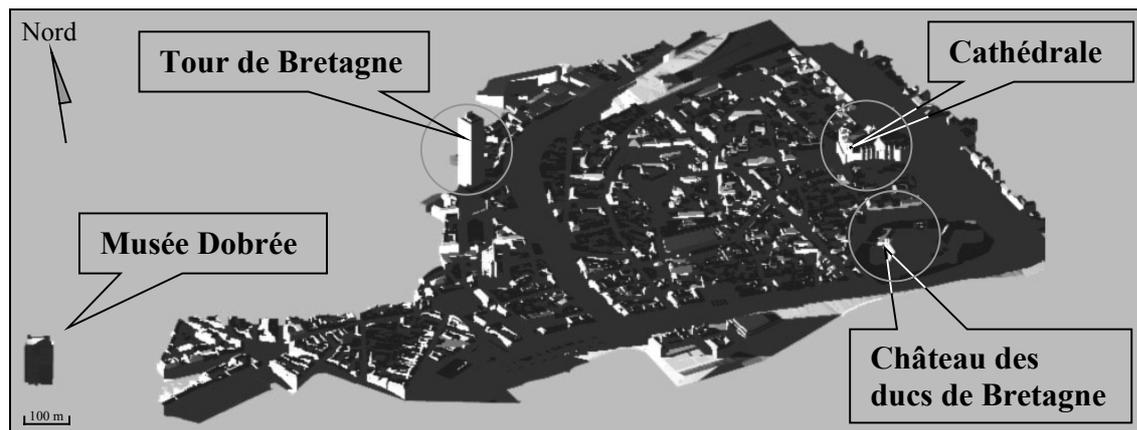


Figure 3-19 : Identification par les concepteurs de trois façades devant être vues "même partiellement" depuis le projet de musée : la Tour de Bretagne, la Cathédrale et le Château des Ducs de Bretagne

Notre outil permet donc aussi de répondre indirectement (via le logiciel mère) à des recherches de cibles visuelles potentielles, comme il permet d'ailleurs grâce à deux options, de calculer les cibles solaires ou de réverbérations solaires potentielles pour une base et une scène donnée ou à partir de photographies *fish-eye* prises *in situ* depuis la base (lorsque celle-ci n'est pas uniquement de l'ordre du projet et existe réellement). Cette hypothèse de réduction des cibles potentielles semble donc confirmée par les observations. Il nous reste à signaler dans cette section que les étudiants architectes ont souhaité prendre quelques photographies *in situ* afin de resituer les vues dans le contexte existant et non plus uniquement dans le contexte virtuel de la modélisation de la ville. Quelques différences majeures sont apparues principalement dues à la présence de plantation d'alignement d'une vingtaine de mètres de hauteur sur les axes d'où il était possible de voir la partie haute du musée. La vérification *in situ* semble devoir être bien plus qu'une précaution d'architecte consciencieux mais bien un réflexe obligé tant que les plantations et leur évolution (croissance, taille, abattage...) ne seront pas prise en compte par les modèles numériques. Les photographies et analyses de ce groupe d'étudiants font l'objet d'un paragraphe particulier de la section 3.3.5.7. On remarque en particulier que les incrustations du projet sur les relevés photographiques pris *in situ*

différent des vues de la modélisation obtenues depuis les axes de circulation répertoriés plus haut.

3.3.1.9 L'apport de réponses globales et optimales aux contraintes données

Les trois concepteurs E13, E11 et E12 cherchaient quant à eux, dans le cadre d'un travail sur la protection solaire d'une salle à manger double hauteur et très vitrée, la taille optimale d'un ou de plusieurs écrans solaires. Or durant plus d'une heure ils n'ont pu trouver une solution optimale par une approche directe de simulation.

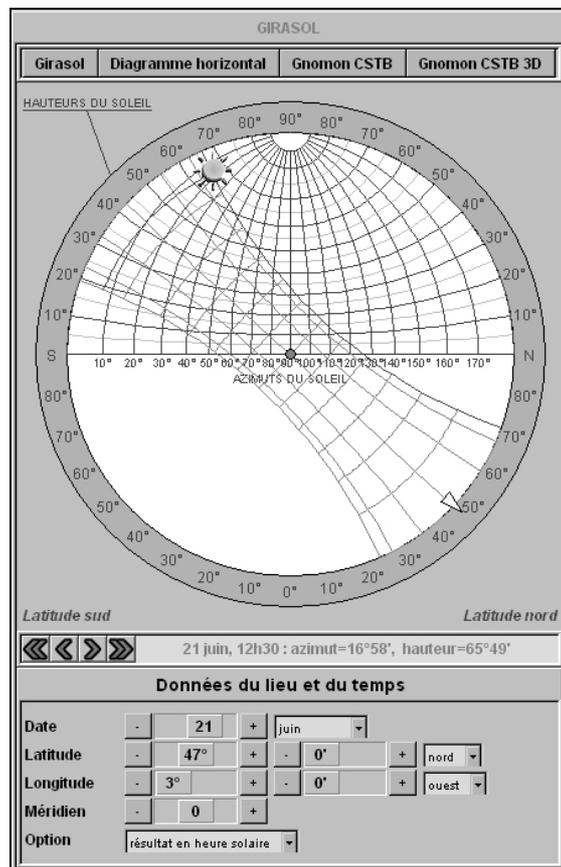


Figure 3-20 : *Girasol* utilisé par les étudiants en 3^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes

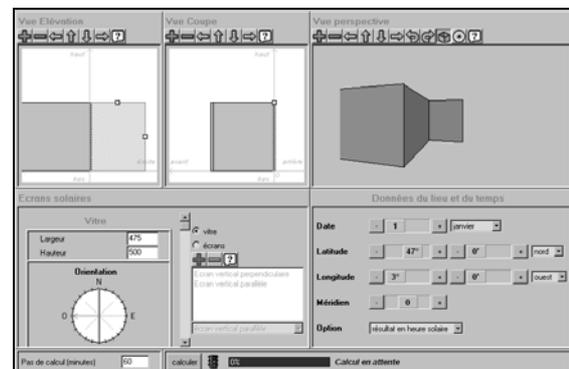


Figure 3-21 : *Outils Solaires* appliqués au modèle de baie vitrée de la maison

Les outils qu'ils utilisaient, le *Girasol* [CRMAA 1979] (cf. Figure 3-20), les *Outils Solaires*²⁸ (cf. Figure 3-21), la règle et le rapporteur n'ont pu les aider à dimensionner au plus juste un dispositif de protection solaire. Travaillant en croquis et en coupe en parallèle pour positionner les rayons solaires les plus critiques, ils s'apprêtaient à arrêter un brise-soleil de type vertical ouest sans être convaincus qu'ils avaient là, une solution optimale.

Nous avons réalisé la modélisation de cette maison en modélisant avec précision les parties importantes de la scène (cf. Figure 3-22) pour ne pas faire perdre aux étudiants trop de temps durant cette phase "charrette" de rendu de projet. Ensuite l'observation a pu commencer et ils ont tour à tour réalisé des simulations avec notre prototype.

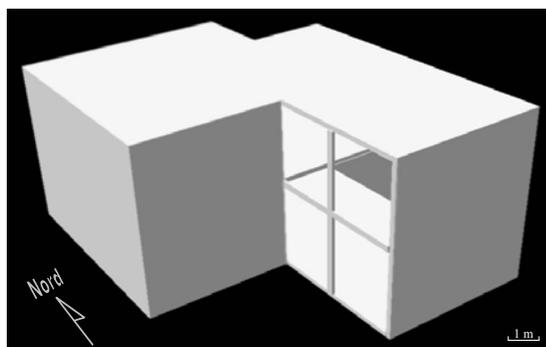


Figure 3-22 : Modélisation numérique de la Maison Équerre des architectes Henriksen et Levring – baie vitrée ouest de la salle à manger en double hauteur

Le choix des périodes de protections solaires, du positionnement de la base de contrainte, de l'orientation et de l'inclinaison de l'écran brise-soleil ne faisant pas l'unanimité dans le groupe, il fallut environ vingt-cinq minutes au groupe pour trouver un compromis. Les calculs du brise-soleil optimal ont pris quant à eux moins d'un quart d'heure. Ainsi en moins de temps (modélisation comprise) qu'il ne leur a fallu pour calculer un premier brise-soleil de façon non optimale "à la main", ils ont conçu un écran solaire optimal pour un point d'accrochage, une orientation et une inclinaison de leur choix. Cela leur a paru très rentable, en terme de rapport temps/résultat.

²⁸ Outils développés dans le cadre du programme européen *Léonardo* d'auto-formation à distance des concepteurs. Voir notamment le site Internet du projet *Audience* à l'adresse suivante : <http://audience.cerma.archi.fr/index.html>

Pour ce cas précis de conception d'écrans solaires nous pouvons dire que l'outil de simulation inverse a permis à ces concepteurs de dimensionner correctement un élément du projet, certes un élément paysager car interprété comme un écran végétal par les concepteurs (cf. Figure 3-24 et Figure 3-25), mais qui aurait très bien pu être un prolongement de la façade si le résultat des simulations avait été moins volumineux, comme ils l'avaient envisagé en utilisant les outils de simulation directe. Les concepteurs ont utilisé notre outil comme un outil d'aide à la conception architecturale pour esquisser une volumétrie qu'ils ont aussitôt interprétée comme un masque végétal capable de masquer le soleil l'été et de le laisser passer l'hiver puisqu'ils ont choisi des arbres à feuilles caduques. L'outil de simulation inverse semble avoir déclenché une intention de conception uniquement par la forme et la position de l'écran obtenu par les simulations inverses. En effet, comme nous le verrons plus loin dans la section 3.3.5, l'outil apparaît souvent comme un "déclencheur" d'intentions de conception. Ici par exemple, la forme pointue et la hauteur de l'écran calculé semblent avoir inspiré une forme végétale aux concepteurs.

Notre outil semble répondre aux attentes des concepteurs en terme d'aide à la conception surtout grâce à la "symbiose" entre un modeleur utilisé couramment par les architectes et un outil de simulation qui propose des solutions exploitables directement dans ce modeleur. Cette complémentarité plaît aux concepteurs car l'exploitation des résultats se fait en 3D. En effet, les étudiants architectes auraient pu utiliser une méthode de simulation inverse 2D apprise un an avant, en 2^{ème} année d'architecture, (cf. § 1.1.1.1) qui permet à partir d'un *Gnomon* de simuler les masques solaires d'une surface pour des heures précises et une inclinaison choisie. Cela demande quelques constructions précises (une coupe et une élévation) et d'être attentif durant tout le déroulement du tracé. Visiblement, les étudiants n'avaient même pas envisagé l'utilisation de cette méthode, cherchant moins la précision que l'efficacité. Le résultat du tracé, un ensemble de masques, aurait délimité approximativement la surface brise-soleil optimale. Or les étudiants ne pouvaient pas ne pas se souvenir de cette méthode puisqu'ils comptaient parmi ceux qui avaient rendu les meilleurs dossiers de Travaux Dirigés l'année précédente. Et pourtant aucun n'a pensé à l'utiliser. Il est vrai qu'en temps passé, elle est équivalente à la construction d'une perspective par exemple, or il est plus rapide actuellement (hormis un croquis perspectif "à main levée") de modéliser la volumétrie d'un bâtiment sous un modeleur comme *AutoCAD* et de la visualiser ensuite en *projection perspective*. Les étudiants le savent et l'utilisent dès qu'ils en ont la possibilité. Cela permet de réaliser autant de vues que de positions de caméras choisies à partir du modèle du bâtiment, alors que changer de point de vue en construction géométrique 2D sur papier, signifie refaire complètement le tracé.

Les simulations inverses réalisées avec notre outil ont plu aux concepteurs car, comme en vue perspective, à partir d'un même modèle (le bâtiment pour la perspective ou le volume de contrainte pour la simulation inverse) il est possible de réaliser une infinité de simulations. Le gain de temps est incomparable. Il ne leur restait plus qu'à imprimer des solutions de masques sous différents points de vues en réalisant des "captures d'écran" avec le bouton *imprime écran* de leur clavier (voir les vues sélectionnées par les concepteurs, Figure 3-23, Figure 3-24 et Figure 3-25).

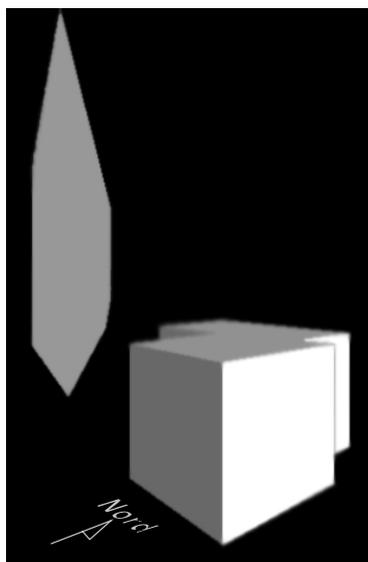


Figure 3-23 : Vue sud-est de la Maison Équerre avec l'écran solaire simulé (à gauche)

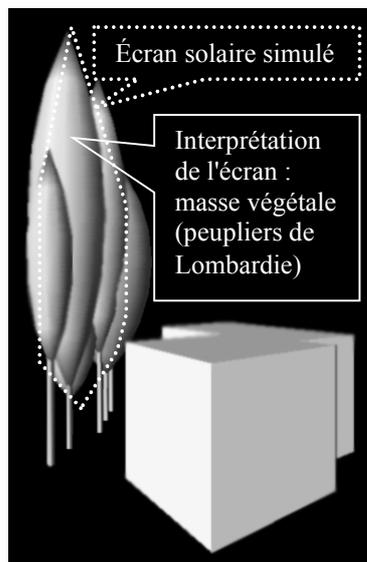


Figure 3-24 : Interprétation de l'écran solaire par les concepteurs

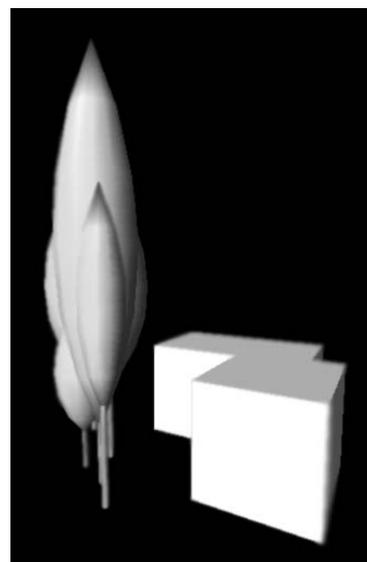


Figure 3-25 : Vue de la masse végétale dans son axe d'alignement

Plus précis que le croquis à main levée, plus rapide que la méthode inverse 2D et plus révélateur en conception semble-t-il que de simples tracés solaires en coupe, notre prototype a permis en moins d'une heure la conception d'une solution architecturale et paysagère optimale et justifiée.

Avant de clore cette section, signalons que notre prototype fut utilisé par A3 durant plusieurs semaines, en complète autonomie. Cela répond aussi à l'attente particulière de cette architecte qui dans le cadre de son travail de thèse, cherche à simuler un maximum de cas de figures sur l'enveloppe "double peau" d'une façade de bureaux nantais. La prise en main du logiciel finie, l'architecte a pu seule réaliser autant de simulations qu'elle souhaitait "*sans avoir de bug*" dit-elle.

3.3.2 Le besoin ou non d'assistance

Dans cette partie, il est question des compléments d'informations apportés durant les séances d'observation pour pallier certains blocages des concepteurs face à l'outil. Nous relatons de simples difficultés rencontrées par les concepteurs mais nous signalons aussi les observations qui aboutissent à des incompréhensions totales des concepteurs face à des "bugs" du prototype ou face à des choix d'options. Nous signalons aussi les observations qui montrent nettement que là où nous nous attendions à intervenir, le concepteur nous a surpris par sa compréhension intuitive des logiques propres à la simulation inverse.

Entre la première observation d'un architecte utilisant *SVR* en juillet 2001 et les dernières observations en mai 2002, nous avons amélioré le prototype en modifiant son interface et ses modalités, soit parce que les auto-évaluations l'imposaient, soit justement grâce à l'analyse des difficultés rencontrées par des concepteurs. Ce critère d'analyse nous a donc permis de pallier certaines défaillances du prototype, mais aussi de trouver des astuces d'utilisation de notre outil dans l'environnement de modélisation puisque certaines difficultés sont directement dues aux choix ergonomiques de ce logiciel de CAO. Les difficultés rencontrées sont peu nombreuses. Elles sont généralement de l'ordre de l'oubli des recommandations de départ exprimées au tout début du protocole (vocabulaire *SVR*, vérifications du nord, astuces d'accrochage aux points, unités utilisées, sens de rotation pour la saisie des points, etc...), ou d'ordre ergonomique.

3.3.2.1 Les difficultés d'ordre ergonomiques

Parmi les difficultés d'ordre ergonomique, il y a tout d'abord celles issues de l'environnement de modélisation qui ne permet pas par exemple lorsque l'on est en train d'exécuter la macro *SVR*, d'utiliser les icônes du modeleur comme celles des zooms ou des vues prédéfinies. Sur les onze concepteurs qui ont manipulé notre outil, seuls A3 et E22 ont rencontré cette difficulté en voulant utiliser l'icône de la *vue orbitale* pour faire tourner leurs volumes de contraintes ou celle du *zoom avant / zoom arrière* pour pointer un détail de la scène, faisant ainsi échouer les calculs d'écrans brise-soleil avant la fin de la simulation. "*Ça par contre, je pense que c'est important de le spécifier*" affirme un des concepteurs, tandis que l'autre déclare : "*là j'ai voulu faire un zoom et là j'ai pris un bouton de commande [cliqué sur une icône]... il n'a pas accepté*".

Il aura suffi à ces concepteurs de faire l'erreur une seule fois pour ne plus rencontrer ce type de difficulté. Les autres concepteurs semblent n'avoir eu aucune difficulté pour déplacer les objets qui les intéressaient ou même pour zoomer sur ceux-ci, sans passer par les icônes du modelleur puisqu'ils utilisaient en temps normal la souris comme moyen plus rapide que les icônes pour le recalage des vues par exemple (molette pour *zoom avant* ou *zoom arrière* et clic central pour se déplacer dans les fenêtres). Ainsi, ils n'ont jamais fait échouer des simulations alors même que nous ne leur avons pas recommandé de se passer des icônes du modelleur.

Enfin, il semblerait que la fenêtre de l'interface elle-même ne pose aucune difficulté dans le sens où il est très facile de la bouger pour avoir accès dessous, aux données de l'interface du modelleur (nombre de points de la base, nombre de cibles, etc...) même s'il n'est pas possible de la "réduire". Ainsi les concepteurs ont d'eux-mêmes déplacé la fenêtre *SVR* sans exprimer la moindre gêne.

Comme nous l'avons signalé dans la section 3.3.1.6, les architectes n'hésitent pas à tester sous *SVR*, les astuces qu'ils utilisent avec le modelleur. Ils paraissent très à l'aise dans l'environnement de notre prototype puisque certaines fonctionnalités sont celles du logiciel mère. Les astuces utilisées par les concepteurs sont principalement les "raccourcis clavier" pour saisir des points particulièrement difficiles d'accès (touche F3 pour désactiver l'accrochage aux objets lors de la saisie des points d'une image *fish-eye* par exemple), l'utilisation de la molette de la souris pour zoomer ou déplacer des objets, et la gestion des calques, des vues et des rendus dans les fenêtres de visualisation afin de ne pas surcharger les modélisations. Ainsi le "rendu Gouraud" est souvent utilisé pour avoir une vue d'ensemble assez réaliste des volumes de contraintes (cf. Figure 3-26). L'interpénétration des volumes de la scène et des volumes de contraintes est alors très lisible. Le rendu "filaire" est quant à lui plus utilisé pour lire en coupe ou en plan, heure par heure, l'inclinaison ou l'azimut des différents rayons solaires que compose un volume de contrainte solaire par exemple (cf. Figure 3-27).

Ainsi il n'a pas été nécessaire d'assister les architectes sur ce point. Pour les moins à l'aise d'entre eux, mis à part quelques difficultés évoquées au début de cette section (simulations avortées pour cause d'utilisation des icônes du modelleur durant les calculs), le temps de prise en main fut légèrement plus long que pour les autres concepteurs et les dessins étaient généralement chargés de volumes gênant la compréhension des simulations.

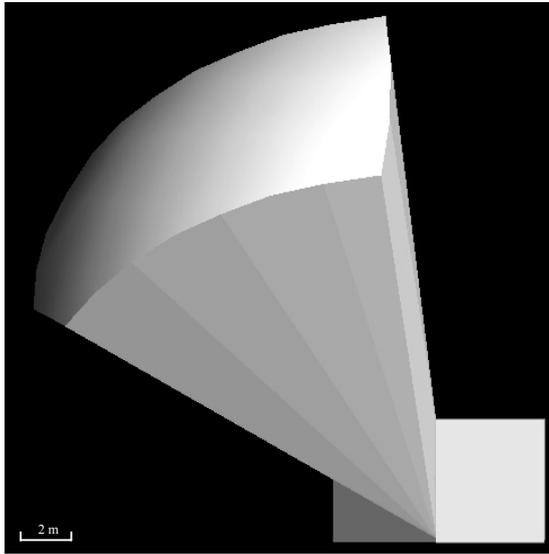


Figure 3-26 : Maison Équerre et volume de contrainte solaire du 21 avril au 21 août, de 12 h 30 à 16 h (heures solaires) – élévation sud, rendu Gouraud

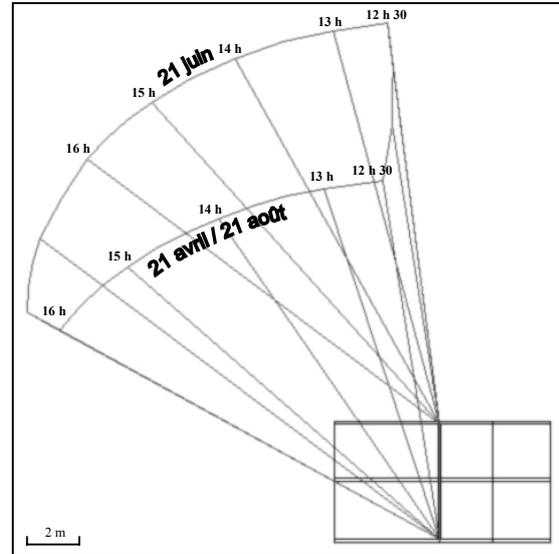


Figure 3-27 : Élévation sud du volume de contrainte en rendu filaire. Les arêtes correspondent aux rayons solaires des heures (solaires) choisies comme cibles de la contrainte.

La demande ou la nécessité d'assistance pour pouvoir continuer les simulations ou comprendre la logique de l'outil est venue en premier de la part de ceux qui ont le plus exploités les options *SVR* (masques environnants, gestion des écrans...) mais aussi de ceux qui ont travaillé sur les premières versions du logiciel. Cependant, tous les concepteurs n'ont pas eu besoin d'assistance. C'est le cas de A1 qui a pourtant utilisé la première version du prototype. Par exemple, alors qu'il avait indiqué à l'interface une cible de six points, il n'a pas eu besoin d'aide technique pour comprendre pourquoi il n'avait pu saisir que cinq points sur le modèle de voûte solaire. Il a compris de lui-même qu'il avait cliqué deux fois sur le même point et qu'il était donc impossible pour lui de réaliser la simulation. Il a recommencé les calculs sans que nous intervenions pour l'aider à comprendre son erreur.

De même, d'autres architectes n'ont pas eu besoin d'assistance alors que la situation semblait critique. Ainsi l'architecte A3 s'interrogeant à voix haute sur la prise en compte du coucher du soleil par le modèle de voûte solaire, trouve la réponse à sa question d'elle-même en déclarant ceci : "*alors [...] est-ce que dans le système SVR quand je clique sur mes points [ceux du modèle] est-ce que je peux avoir le coucher du soleil... ah oui, si, je vois où est-ce qu'il est ! Alors la voûte, je l'ai affichée ou pas... en fait le coucher du soleil il est là, c'est ça ? Le 21 décembre, il est là.*" et aussi : "*maintenant*

*que j'ai ma voûte je fais... janvier de 16 h à 17 h... En fait, ce n'est pas jusqu'à 17 h mais jusqu'au coucher du soleil... [l'architecte s'aperçoit en regardant la voûte solaire 3D que le soleil est couché à 17 h en janvier] donc c'est un peu ridicule de faire ça, même à 16 h". Elle effectue tout de même le calcul. "Effectivement c'est complètement aberrant" déclare-t-elle en observant la simulation en coupe. "En coupe, l'utilisation [la lecture des résultats] est aisée" nous dit-elle. Cette même architecte soumise au protocole d'observation (*think aloud method*), découvrant notre interface pour la première fois, n'a pas hésité à lancer certaines options. Elle s'est exprimée ainsi : "Donc là je vais créer une voûte solaire, puisque je n'ai pas de voûte solaire témoin [du nom de l'autre option apparaissant à côté]. Je suis dans l'hémisphère nord, donc je clique sur hémisphère nord, la latitude du lieu c'est bien 47,2 puisque nous sommes à Nantes... limiter aux périodes solaires visibles depuis une base de contrainte [l'architecte lit les lignes suivantes de l'interface] il me semble qu'il faut cocher, oui... Ok, d'après ce que je vois, je vais avoir... enfin ce qui m'intéresse c'est les périodes d'ensoleillement alors donc... masque environnant depuis... image fish-eye... donc il n'y a pas de masque environnant puisqu'une des hypothèses c'est d'être complètement dégagé de bâtiment, donc il n'y a vraiment pas de masque. J'arrive donc aux volumes de contraintes. Créer 1, 2 ou 3 volumes de contraintes... [l'architecte lit l'option], euh... donc là par contre je veux en créer un, je vais en créer un seul en fait puisque je vais prendre un volume de contrainte entre deux lattes...je vais réduire le problème. Donc... option de création d'écrans solaires ou visuels... effectivement j'ai envie d'en créer un...". Ces quelques phrases montrent combien il fut instructif de laisser parler l'architecte. Pour elle au moins, il n'y eut aucun blocage dans cette première étape de prise en main de l'outil.*

Au niveau ergonomique, il nous a fallu intervenir une fois pour expliquer à l'architecte (A3) qu'il est préférable de dessiner la base d'un volume de contrainte sur un calque supplémentaire et d'éteindre les autres calques afin de simplifier la scène et du même coup la saisie des points de la base. Elle dessina une base à 1,20 m sur toute la surface de la cellule, "*dans un premier temps pour qu'[elle] puisse voir sur l'ensemble [et pour qu'en] position assise... il n'y ait pas de contrainte au niveau visuel"*. Remarquons qu'il ne s'agit pas d'un réel blocage lié à notre interface mais bien d'un problème ergonomique du logiciel mère que tout architecte rencontre s'il ne se force pas à classer et dessiner ses objets sur des calques différents, comme il le fera sur du papier calque.

3.3.2.2 Les oublis des recommandations et les erreurs d'inattention

Nous avons observé tout d'abord des blocages mineurs causés par des oublis de validation des options (bouton "ok"), des oublis de mise à l'échelle des objets importés (erreur dans le choix des unités, le millimètre au lieu du mètre par exemple) ou bien des erreurs de lecture. Ainsi l'architecte A3 découvrant un message *SVR* sur la limitation des périodes solaires, lit "*vous avez demandé à ne voir que les périodes solaires visibles. La voûte solaire va donc être réduite à sa simple portion visible depuis le plan de base que vous avez sélectionné*", or il était écrit "... *base que vous allez sélectionner*". L'architecte s'est donc trouvée dans l'incompréhension lorsqu'elle a fait échouer les calculs en reprenant naturellement la main, alors qu'il lui était demandé sur la ligne de commande de sélectionner le plan de la base de contrainte. Autre exemple du même type, l'architecte A4 n'ayant pas vu l'instruction de la ligne de commande s'est retrouvé bloqué et nous a demandé assistance pour enfin déclarer : "*je n'ai pas trop l'habitude d'utiliser AutoCAD, mais c'est vrai que c'est ici [sur la ligne de commande] que ça se passe*".

Un autre blocage mineur fut rencontré deux fois, il s'agit de l'inversion du sens de saisie des points des bases ou des cibles (sens horaire, rappelé au début du protocole d'observation). Même s'il n'y a pas de bug systématiquement, cette inversion n'est pas reconnue par notre outil qui génère alors des volumes de contraintes non pleins qui ont interpellé et bloqué les utilisateurs. Ce blocage peut être provoqué par une mauvaise lisibilité de la scène due au mode filaire qui rend plus difficile la vision dans l'espace. E22 nous a ainsi demandé de l'aide pour pouvoir continuer la simulation d'un volume de contrainte visuelle depuis le dernier étage du projet du musée Dobrée vers le Château des Ducs de Bretagne ("*alors, là par contre j'ai un peu plus de mal à voir dans quel sens il est [le château]*").

Dans notre approche, le modèle de "voûte solaire" est placé sur une voûte céleste virtuelle de cent kilomètres de diamètre pour des scènes en mètres (unité par défaut), il est donc indispensable de procéder uniquement à des simulations sur des scènes dont l'unité est le mètre. Or, au premier essai, alors que l'architecte A3 avait été prévenue de cette obligation, les résultats n'apparaissent pas. Le volume de contrainte solaire n'est pas visible à l'écran car il est toujours de la "*taille de la scène*", c'est-à-dire que pour une base de 300 unités de côté (baie de largeur 300 cm – le centimètre ayant été choisi à tort comme unité par l'architecte), le volume de contrainte a par défaut 20 unités (ici, 20 centimètres) pour une scène architecturale théoriquement en mètres. De même, avec les

premières versions de notre prototype, les volumes de contraintes n'apparaissent pas car les concepteurs ont omis "d'allumer" le calque zéro sur lequel apparaissent par défaut les volumes de contraintes. "*Donc là il faudrait que j'affiche le calque... ah non, je vais prendre la moitié de... non... non en fait oui j'aurai du rallumer le calque zéro avant de lancer ça*" affirme A3 qui avait éteint ce calque afin de rendre plus lisible la scène et de lui permettre de trouver un point d'insertion d'un écran brise-soleil. Durant les observations qui ont suivi celle de l'architecte A3, ce type de difficultés n'a jamais été rencontré, car le code du prototype a été changé de façon à placer automatiquement les volumes de contraintes sur les calques spécifiques, rangés par nom et par couleur.

Dans le cadre "*créer 1, 2 ou 3 volumes de contraintes*" de notre interface, lors de l'entrée des paramètres des volumes de contraintes (nombres de points des cibles et couleur des volumes), il est proposé de sélectionner jusqu'à trois cibles pour une même base de contraintes afin de calculer trois volumes de contraintes d'un coup. L'architecte A1 est le seul concepteur à avoir ressenti une ambiguïté pour ce choix car *SVR* par définition propose de traiter les trois types de contraintes Solaires, Visuelles, et de Réverbérations solaires. Or il n'y a pas de lien entre ces trois types de contraintes et la possibilité de calculer jusqu'à trois volumes de contraintes du même type par exemple. Malgré la mise en garde, au début du protocole d'observation, de cette possible ambiguïté, nous avons modifié le code du logiciel afin de clarifier les termes employés dans l'interface. Dorénavant dans ce cadre de l'interface consacré à la création des volumes de contraintes, le concepteur trouve l'icône correspondant à l'option de réverbération (saisie d'un "*plan miroir*"...). Ainsi, il ne semble plus y avoir d'ambiguïté, puisque les volumes de contraintes de réverbérations sont calculés avec une option différente des autres volumes et clairement identifiable sur l'interface (cf. Figure 3-28).

Il faut aussi signaler dans cette section que les erreurs produites par le concepteur lors d'une mauvaise interprétation des résultats, ont toujours donné lieu à des vérifications rassurantes. Ainsi, A3 a recalculé un volume de contrainte solaire qu'elle avait simulé une semaine avant, afin de vérifier avec la fonction *distance* du modèleur, une mesure qui lui semblait erronée. "*J'avais quand même bien vu qu'il y avait une erreur*" nous dit-elle. Elle s'est ainsi aperçue que les chiffres étaient bons, mais que la virgule était décalée d'une dizaine. La distance du brise-soleil qu'elle avait créé était donc dix fois plus petite que celle qu'elle avait relevée. Mise à part cette erreur de virgule, l'architecte n'a pas eu de difficultés à retrouver une valeur correcte, grâce à la fiabilité des calculs qui ont donné des chiffres identiques (au centième près) pour deux calculs opérés dans des conditions différentes (ordre de saisie des points cibles différent...)

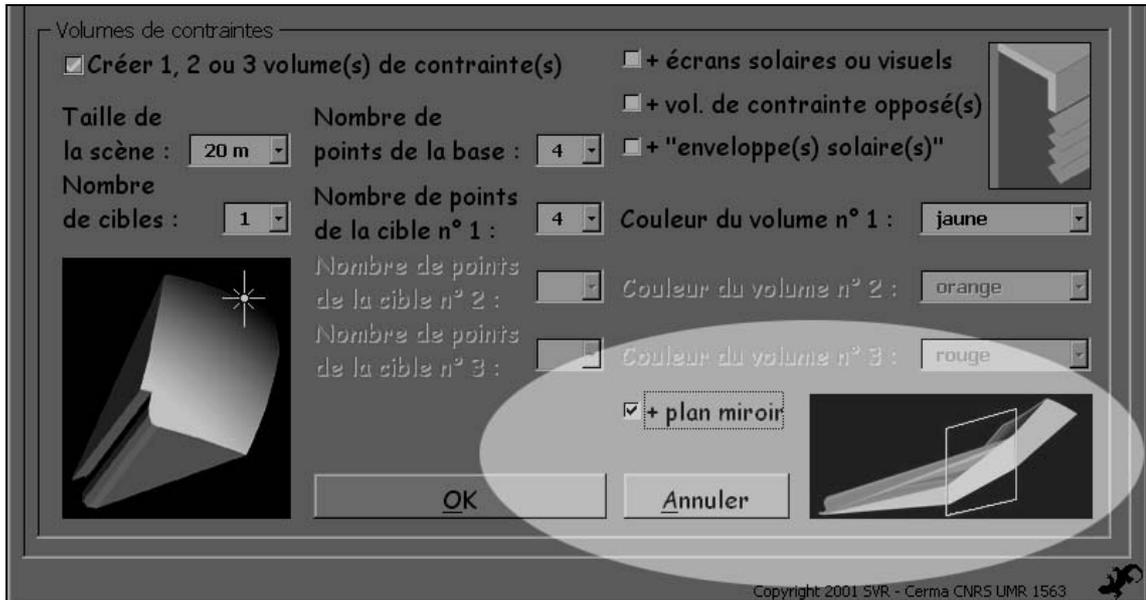


Figure 3-28 : Option de réverbération solaire – identification de l'option par une illustration permettant une meilleure lisibilité de l'interface

Nous signalons aussi un blocage rencontré une seule fois. Il s'agit probablement d'une notion mal comprise pas l'architecte à qui nous avons pourtant dit – comme à tous les autres concepteurs au début du protocole d'observation – que le modèle de "voûte solaire" de cent kilomètres de diamètre était toujours centré sur la scène (cf. Figure 3-29 et Figure 3-30 et Figure 3-31 et Figure 3-32).

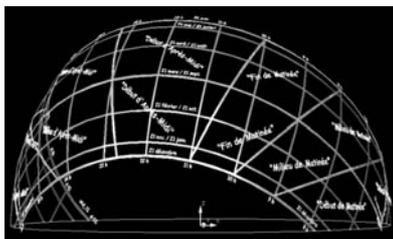


Figure 3-29 : Exemple de voûte solaire centrée sur une scène – hémisphère de cent kilomètres de diamètre

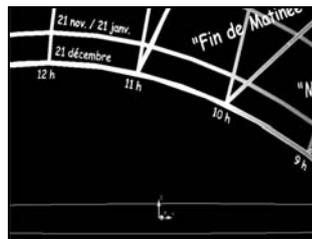


Figure 3-30 : Premier zoom de l'architecte sur le centre de l'hémisphère solaire (repère x, y, z)

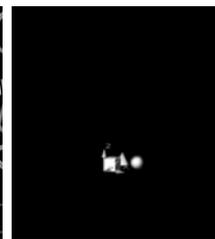


Figure 3-31 : Deuxième zoom de l'architecte laissant apparaître la scène

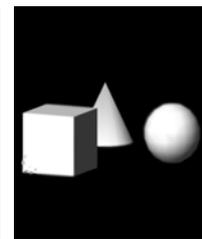


Figure 3-32 : Dernier zoom de l'architecte sur la scène

L'architecte avait donc la possibilité à tout instant de zoomer sur le centre de la voûte solaire pour voir les simulations qui étaient beaucoup trop petites à l'échelle de la "voûte solaire" mais il n'a pas eu l'idée de le faire alors qu'en terme d'ergonomie cela est très aisé.

D'autres situations furent handicapantes pour la suite des simulations. Nous pouvons citer des "bugs" produits par des aberrations du type : le plan d'une surface à protéger du soleil est choisi comme base d'une contrainte dont la cible est intersectée par celui-ci (cf. Figure 3-33).

Pour une contrainte visuelle le cas est moins aberrant mais aussi problématique car comme pour des erreurs de sens de saisie des points de bases et de cibles, si ces surfaces ou leur plan support se coupent, alors les volumes de contraintes présenteront quelques aberrations. Pourtant, en terme de contrainte visuelle il n'est pas illogique de viser une cible depuis une base dont le plan horizontal par exemple (base de parcours sur une même altitude) coupe la cible, car un observateur potentiel représenté par un point de la base peut regarder à la fois au-dessus et au-dessous de la ligne d'horizon, si la cible l'impose (cf. Figure 3-34).

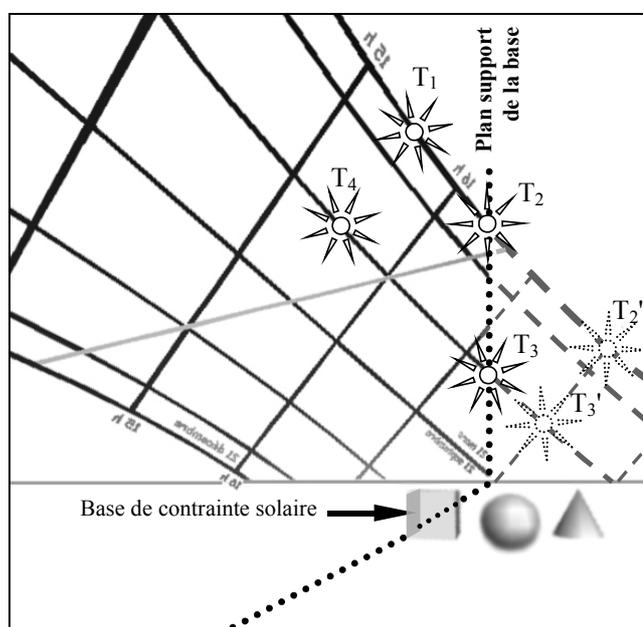


Figure 3-33 : Illustration d'une cible de contrainte solaire $[T_1T_2T_3T_4]$ conduisant à une aberration puisque le plan support de la base (la face sud du cube) partage cette période solaire en deux $[T_1T_2T_3T_4]$ et $[T_2T_2'T_3'T_3]$. Seule la période $[T_1T_2T_3T_4]$ est potentiellement une période d'ensoleillement de la base. L'architecte doit donc "limiter" le modèle de voûte solaire aux périodes potentielles uniquement.

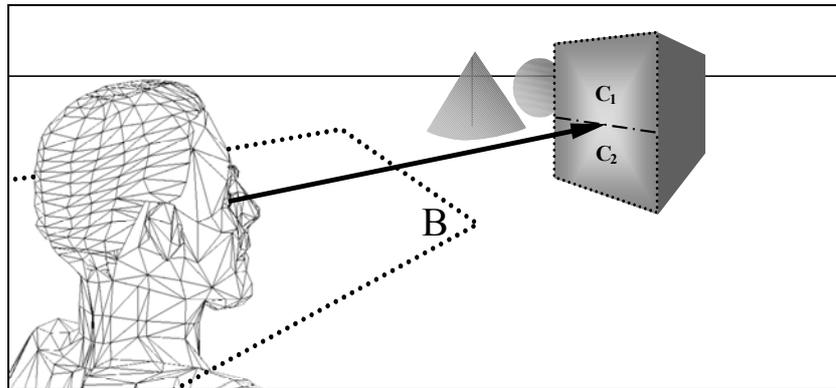


Figure 3-34 : Schéma théorique d'un plan de base (B) partageant une cible visuelle ($C_1 + C_2$) en deux. La contrainte posée reste plausible contrairement à la contrainte solaire de la Figure 3-33 précédente (cible solaire $T_1T_2'T_3'T_4$).

Les limites du prototype dans ce cas obligent l'architecte à décomposer la cible en deux parties et à réaliser deux simulations d'un coup puisque notre outil permet de simuler en un seul calcul, pour une même base, jusqu'à trois contraintes différentes (trois volumes de contraintes solaires, visuels et/ou de réverbérations solaires ou visuelles partant d'une même base).

Signalons aussi quelques cas d'assistance qui ont permis, non pas de débloquer une situation critique, mais de conseiller le concepteur sur un point mal compris. Ainsi il nous a fallu expliquer à A1 par exemple qu'il était illogique de considérer qu'à 11 h du matin (heures légales) le soleil était trop haut pour être jugé comme pouvant pénétrer au mois de juin dans une habitation canarienne exposée plein sud, alors qu'à 17 h à la même époque il pensait que les rayons solaires pouvaient être gênants. Nous avons donc expliqué qu'il y a symétrie des courbes solaires par rapport au midi solaire, aux environs de 14 h, en été. Donc si à 11 h le soleil est déjà considéré par l'architecte comme trop haut pour avoir un impact sur l'ambiance solaire d'une habitation, il le sera aussi à 17 h. Nous avons aussi conseillé ponctuellement les concepteurs sur la manière d'enchaîner les différentes étapes de simulation ou d'enregistrer de nouvelles vues pour gagner du temps lorsqu'il faut revenir souvent sur une même vue, ou encore de ne pas hésiter à utiliser des calculs de variantes d'écrans (un écran passant par un point d'accroche choisi, plus deux, quatre ou six variantes espacées d'une distance choisie – cf. Figure 3-35).

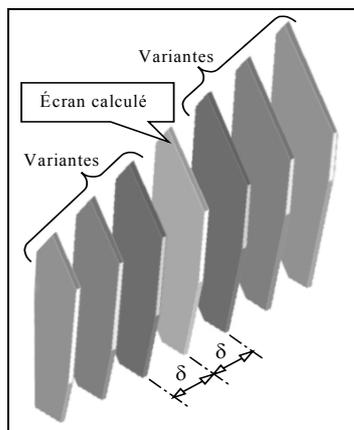


Figure 3-35 : Illustration des variantes d'un écran calculées par SVR à partir d'un espacement choisi par l'architecte (δ , entre axes). Les épaisseurs sont les mêmes mais la surface de protection évolue selon la position de la variante dans le volume de contrainte.

La plupart des concepteurs avaient ces conseils en tête lors des simulations puisqu'ils avaient été donnés au début du protocole, mais certains concepteurs les avaient visiblement oubliés. Enfin nous avons aussi conseillé au groupe d'étudiants en cinquième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes de procéder à une simulation d'intervisibilité entre le musée qu'ils projetaient et la ville de Nantes (cf. § 3.3.1.8). Cette technique déjà utilisée par le Laboratoire Cerma pour simuler l'accessibilité visuelle de la Tour de Bretagne de Nantes, leur a permis de préparer les simulations inverses de contraintes visuelles potentielles (cibles relevées sur les cartes d'accessibilité visuelle – cf. Figure 3-18 et Figure 3-19 – § 3.3.1.8).

Enfin, la principale difficulté rencontrée par les concepteurs laissés seuls face au prototype est temporaire mais aboutit à un blocage total. Ne connaissant pas l'outil, les concepteurs n'utilisent pas d'office la notion de "limitation" des cibles visuelles ou solaires par le plan de la base par exemple, car elle est perçue comme une fonction secondaire du prototype. Ainsi, même si cette option "*se limiter aux périodes solaires visibles*" est expliquée au début du protocole, elle n'est jamais utilisée, dès le premier test pour simplifier les calculs. Par exemple, lorsque l'architecte A1 utilise notre outil pour simuler une contrainte solaire estivale ("*entre juillet et août*") sur une fenêtre standard de Ténérife afin de calculer la taille exacte d'un brise-soleil placé au niveau de son linteau, il s'intéresse à la période solaire "*14 h / 16 h*" car "*on ne va pas aller trop loin*" dit-il. Or même si au-delà de 17 h (heures solaires), les rayons solaires lui semblent peu gênants (ce qui est vrai puisqu'ils se trouvent à moins de 10° au-dessus de l'horizon), pour la fenêtre choisie, exposée plein sud, 17 h correspondent entre juillet et

août à un soleil ouest-nord-ouest, donc à des rayons solaires provenant de derrière la base de contrainte qu'est la fenêtre. Ainsi il existe bien une partie de cette période solaire définie par l'architecte durant laquelle les rayons solaires ne pourront pas arriver sur la fenêtre. Évidemment, le concepteur comprend vite l'intérêt de l'option "*limiter aux périodes solaires visibles*" après avoir provoqué un "bug" dans le calcul. Les architectes ne semblent pas comprendre de façon intuitive la signification de l'option de limitation du modèle de voûte solaire aux périodes solaires visibles. Il nous faut soit expliquer la notion durant l'observation, soit insister sur l'explication au début protocole afin de faire ressortir l'information. En revanche, une fois cette notion comprise grâce à un schéma du type de la Figure 3-33, la mise en pratique de l'option ne pose plus de problème par la suite.

3.3.2.3 L'évidence et la logique de la notion de simulation inverse des contraintes

Le groupe d'étudiants en troisième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes, nous a surpris par la facilité d'appréhension de la notion inverse de la simulation et particulièrement de l'approche temporelle que permet la simulation inverse solaire et visuelle (intégration d'un phénomène physique dans le temps). Ainsi, à la vue de l'illustration de l'option "*volumes de contraintes*" (un volume de contrainte solaire – voir en bas à gauche de la première fenêtre *SVR*, Figure 3-36) et alors que c'était la première fois que les étudiants voyaient ce type de volume, E12 fronce les sourcils, tandis que E11 semble comprendre. "*C'est parce qu'on a intégré... le temps*" dit-il. Et les deux autres étudiants de répondre : "*ha oui*", "*je vois...*".

Aucun architecte n'a bloqué sur la notion 4D des simulations. Les volumes de contraintes sont bien appréhendés comme des solides 3D intégrant la quatrième dimension du temps. Cette intégration dans le temps est aussi bien comprise pour ce qui est des bases de contraintes qui prennent en compte le déplacement potentiel d'un observateur dans l'espace. Le fait qu'un observateur ne soit ainsi pas considéré uniquement comme un point fixe, mais comme une zone, ne perturbe pas les architectes. Cependant, même si le principe est compris, il n'est parfois pas utilisé avec rigueur. Ainsi, la plupart des architectes ont choisi des bases de contraintes visuelles ou solaires très régulières alors que la réalité est souvent plus irrégulière. L'architecte A4 a par exemple choisi comme base de la contrainte visuelle sur l'église Saint-André, les quatre tables groupées de la salle dans laquelle se tenait la séance d'observation. Or l'œil d'un observateur se trouve rarement au centre d'une telle disposition de tables, mais il

est par contre souvent au-delà de telles limites, en retrait. De même, si l'œil est généralement bien positionné en altitude, il n'est pris en compte qu'une unique altitude moyenne. Les architectes en sont conscients. Ce sont eux qui le disent avant de commencer les simulations, montrant ainsi qu'ils ont bien intégré la notion de position potentielle de l'œil (visibilité) ou d'un objet (ensoleillement). Sur ce point, les concepteurs prennent toujours l'initiative de choisir leurs bases ou cibles de contraintes sans demander d'assistance.

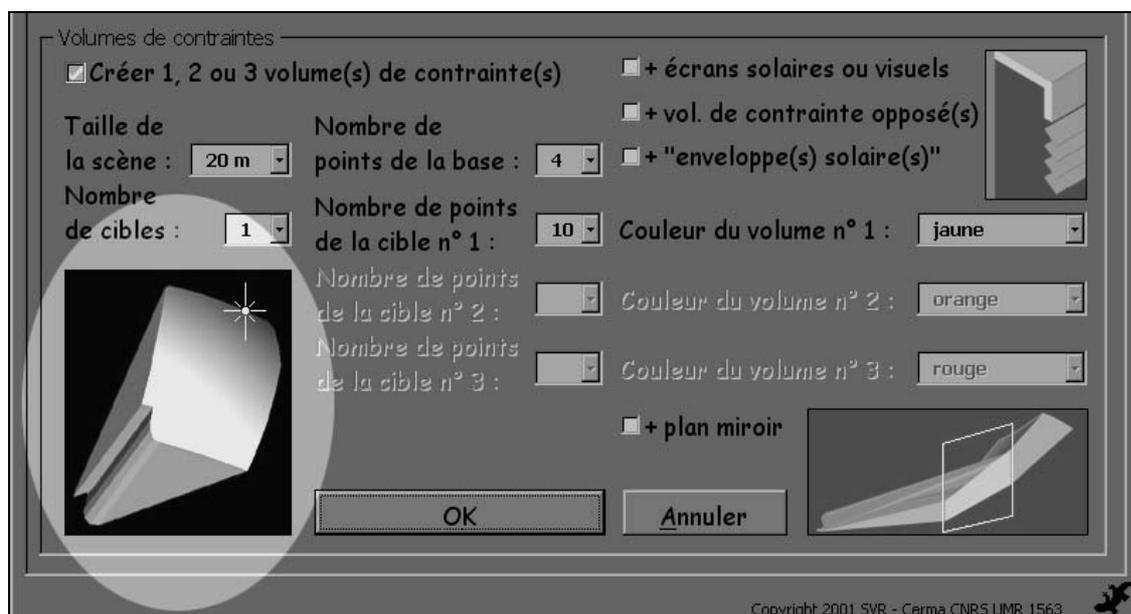


Figure 3-36 : Option de création de volumes de contraintes – illustration par un volume de contrainte solaire de base concave (sentier en forme de S)

3.3.2.4 L'interprétation des résultats des simulations par les concepteurs

Les concepteurs prennent des initiatives montrant qu'ils anticipent bien la phase d'interprétation des résultats, mais qu'ils s'autorisent avant cela, une phase intermédiaire de vérification des résultats. Ils ont tous vérifié en coupe ou en plan ce que donnaient les résultats des simulations. Il y avait dans cette opération une part de curiosité certaine mais l'essentiel était pour les concepteurs de vérifier l'envergure des volumes de contraintes par rapport à la scène étudiée. Le groupe d'étudiants de cinquième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes a par exemple dépassé le stade de l'assistance pour vérifier en élévation (vue sud de la ville) si effectivement les volumes de contraintes

visuelles n'étaient pas intersectés par le "bâti" modélisé. "Le seul truc c'est que là... il faudra mettre le bâti" remarque ainsi E22. En effet, la modélisation de l'ensemble du secteur sauvegardé de Nantes étant "gourmande" en mémoire sur notre disque dur, il nous a fallu réaliser les simulations sur une version simplifiée (uniquement l'édifice projeté et les cibles potentielles déterminées préalablement par simulation d'intervisibilité sur l'ensemble de la modélisation de la ville).

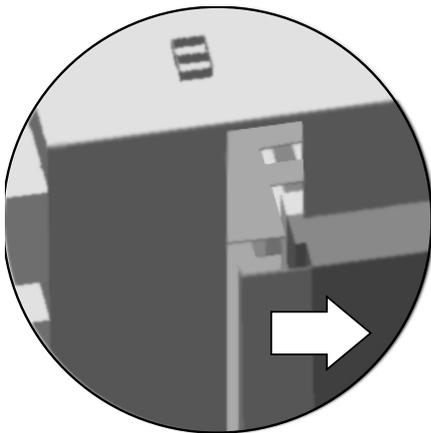


Figure 3-37 : Zoom sur le dernier étage du projet de musée, avant soustraction du volume de contrainte

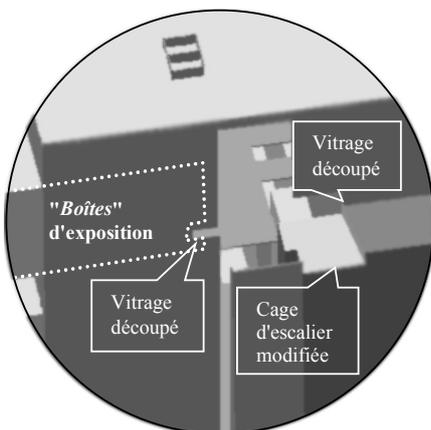


Figure 3-39 : Zoom sur la solution exacte à la contrainte visuelle posée. Une partie de la cage d'escalier est supprimée, les vitrages voisins le sont aussi, ainsi que les "boîtes" d'exposition qui se situent derrière.

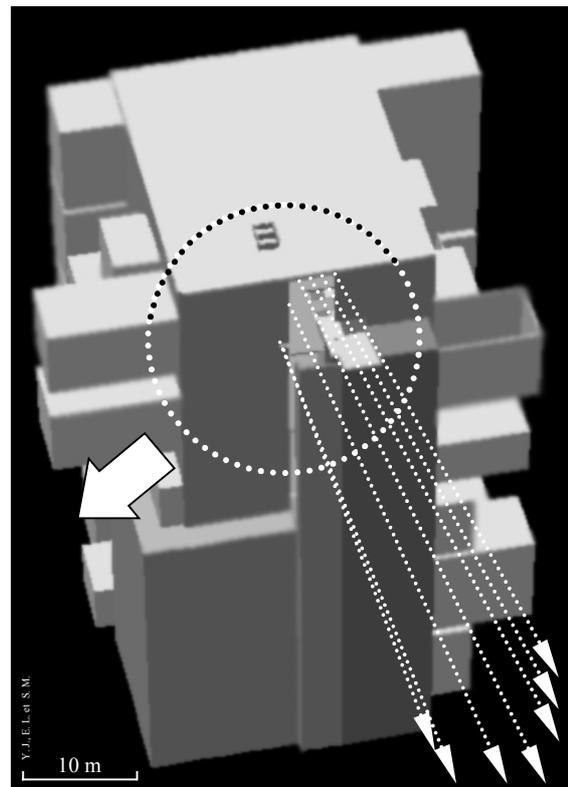


Figure 3-38 : Vue générale du projet de musée avec soustraction du volume de contrainte. Les flèches sont les arêtes du volume de contrainte. Elles délimitent l'ensemble des rayons visuels potentiels d'un observateur se trouvant sur la passerelle du dernier étage du musée.

De ce fait, les étudiants ont pris l'initiative d'une part de vérifier si effectivement l'ensemble des rayons visuels formalisé par les volumes de contraintes n'était pas intersecté par le bâti comme le prouvait la carte d'accessibilité visuelle, et d'autre part, ils ont réalisé des intersections entre les volumes de contraintes visuelles et les différentes ébauches des volumes du musée (cf. Figure 3-37 et Figure 3-38 et Figure 3-39). Ils ont calculé et mesuré de combien ils pouvaient déplacer leurs "boîtes" d'exposition.

3.3.2.5 L'option de génération d'écrans solaires ou visuels

Nous signalons dans cette section un autre point sur lequel les concepteurs n'ont eu besoin d'aucune assistance. Il s'agit de la manipulation des angles d'inclinaison des écrans solaires ou visuels calculés par le prototype par rapport à l'horizon, comme il est courant de le faire pour la hauteur du soleil. Certains concepteurs n'étant pas très sûrs de leur choix, des erreurs ont été commises alors qu'apparaît en permanence une ligne de texte lorsque l'utilisateur maintient le pointeur de sa souris sur une option de l'interface, lui expliquant la démarche à suivre (cf. Figure 3-40).

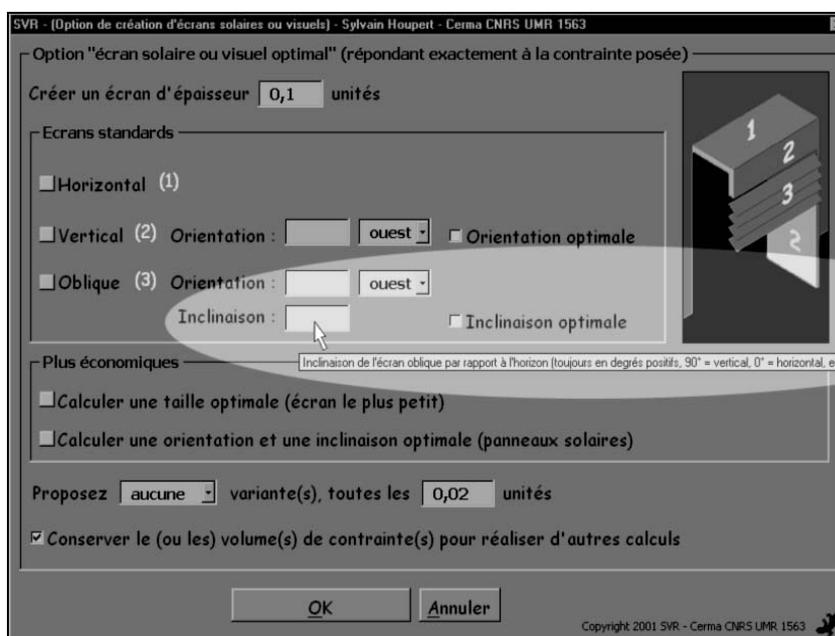


Figure 3-40 : Aide au choix des options grâce à une ligne de texte apparaissant sous le pointeur de la souris de l'architecte. Deux exemples d'inclinaison des écrans permettent au concepteur de ne pas se tromper d'inclinaison (en degrés positifs par rapport à l'horizontale)

Cependant les erreurs n'ont pas abouti à un blocage total des concepteurs, car ceux qui ont commis l'erreur de référentiel (la verticale au lieu de l'horizon – comme indiqué par le pointeur de la souris), ont corrigé d'eux-mêmes leur erreur, car ils ont réussi à lire très vite dans l'espace, la scène en choisissant les rendus adéquats pour la lisibilité et l'utilisation des volumes de contraintes (rendu Gouraud généralement).

Nous le voyons ici, les simulations des écrans solaires ou visuels aboutissent parfois à des erreurs de calcul mais les concepteurs ont toujours la possibilité de garder le volume de contrainte sur lequel est réalisé la génération d'écran afin de réaliser d'autres tentatives. Il est aussi arrivé que s'ajoute à cela des erreurs d'orientation (azimut ouest / azimut est) ou d'épaisseur des écrans.

3.3.3 La terminologie employée par les concepteurs

3.3.3.1 Les termes employés pour désigner les périodes de contraintes solaires

Les observations portant sur les simulations solaires révèlent un corpus de mots et expressions relatifs à la mémoire collective. Les formules les plus usitées par les concepteurs pour définir des instants de la journée, des dates ou des périodes de l'année sont toujours en relation avec des événements de la journée ou de l'année qui semblent imprécis (les saisons, la matinée, le midi, l'après-midi, les équinoxes...). Nous avons noté pour les périodes de la journée, les expressions suivantes : "*l'heure du repas ici [à Ténérife]*", "*le coucher de soleil*", "*la fin de journée*", "*la journée de travail*", "*à midi*"... et pour les périodes de l'année : "*de mars à juin*", "*de juin à septembre, de septembre à décembre...*[autrement dit les saisons]", "*le 21 juin*", "*l'été*"... Ce corpus fait clairement référence à une culture du temps commune à toute civilisation. Certes notre panel d'observation ne permet pas de conclure définitivement mais il semble raisonnable, au regard de ce qui vient d'être dit et des affirmations des sections précédentes, de poursuivre notre hypothèse de départ sur les "périodes élastiques" de l'années qui discrétisent la journée en six grandes périodes quelle que soit la saison (et la latitude, semble-t-il). Les heures de simulation choisies par les concepteurs sont très souvent des heures entières ou arrondies à la demi-heure (midi, 14 h, 16 h 30...) et jamais des heures du type : 15 h 36 ou même 17 h 15. Les probables raisons de ces arrondis ont été évoquées dans les sections précédentes. D'abord, il semble que les architectes ne se posent pas de contraintes solaires plus précises qu'à la demi-heure près et n'intègrent jamais dans leurs calculs de conversion heures légales / heures solaires

l'équation du temps, alors qu'ils en sont informés au début du protocole d'observation. Cette conversion aurait permis aux architectes observés d'affiner les heures de leurs simulations. Il s'agit donc d'une initiative des concepteurs. "17 h, heure solaire, en heure légale on arrive à... quasiment à 19 h" nous dit l'architecte A3. Le "quasiment" illustre bien l'approximation volontaire de l'architecte qui doit pourtant concevoir un dispositif solaire optimal, dans le cadre d'une recherche lancée par un industriel.

Les dates choisies, au vingt-et-un du mois ("*21 décembre*", "*21 février*", "*21 mars*", "*21 avril*", "*21 mai*", "*21 juin*", "*21 juillet*", "*21 août*" et "*21 septembre*"), semblent clairement influencées par le modèle de voûte solaire sur lequel sont inscrites ces dates importantes de l'année solaire (équinoxes, solstices et mois intermédiaires). La saison d'automne n'est pour autant jamais évoquée. Il est vrai que les architectes s'intéressent prioritairement à l'hiver et à l'été, car, comme nous l'avons vu plus haut, ils ont compris grâce au modèle de voûte solaire que ces deux saisons représentaient à elles seules l'ensemble de l'année solaire. De plus les dates inscrites sur le modèle sont dans cet ordre : 21 du mois d'hiver / 21 du mois d'automne et 21 du mois de printemps / 21 du mois d'été (superposition des saisons solaires hiver / automne et printemps / été), les concepteurs ont donc juste relevé les premiers mois, sachant très bien que les simulations d'apports solaires, par un dimensionnement optimal de baie par exemple, étaient aussi valables pour l'automne.

3.3.3.2 Les expressions utilisées pour désigner les contraintes solaires et visuelles

La répartition des simulations solaires entre contraintes de protection solaire et d'apports solaires est environ de moitié pour les deux types de contraintes. La conception d'écrans solaires optimaux n'a pas été une priorité pour l'agence A1 alors que le climat quasi tropical des Canaries aurait pu le laisser penser. "*Avoir du soleil de 14 h à 16 h du 21 février au 21 mars*" fut la première contrainte simulée par A1. Pour justifier son choix, il a évoqué la période du repas sur l'île ("*entre 14 h et 16 h en moyenne*") et la période de "fin d'hiver" où le soleil est le plus recherché dans cet archipel ibérique puisque les onze jours de pluie en moyenne sur le mois de mars sont un évènement exceptionnel qui est ressenti comme "*désagréable*" et "*trop frais*".

Les termes employés pour décrire les contraintes solaires sont généralement techniques et d'un vocabulaire, soit propre à l'interface, soit très personnel. Nous avons ainsi relevé des expressions reprises de l'interface *SVR*, telles que : "*je me déplace sur la voûte solaire*", "*par rapport aux périodes*", "*contre l'éblouissement*", "*mettre une cible*", "*une*

voûte solaire témoin"... mais aussi des expressions personnelles choisies par les concepteurs pour les circonstances de l'enregistrement audio. Elles sont typiquement des expressions orales mais collent généralement bien à l'approche "déclarative" du logiciel. En voici quelques unes : "*protéger totalement des rayons du soleil*", "*ça protège*", "*le soleil passe derrière la façade à midi*", "*une première approche par rapport à l'accumulation de soleil*", "*c'est le [soleil de] 17 h qui gêne un peu*", "*ça me paraît être une bonne limite*", "*tolérable*", "*pour répondre de manière optimale*", "*faire le solaire et le visuel*", "*retailer [dans la volumétrie pour répondre à une contrainte visuelle]*", "*les petites passerelles gênent [les volumes des salles d'exposition gênent les vues depuis les passerelles]*", "*sinon l'axe principal [la coursive centrale] en bien dégagé*", "*on voit bien*", "*ça va gêner*", "*l'espace entre les deux lattes*"... Il est intéressant de remarquer que, remise dans son contexte de simulation d'une contrainte visuelle, l'expression "*on voit bien*" ne signifie pas que l'architecte est allé vérifier si la contrainte était bien satisfaite pour tous les points de vues choisis, en plaçant une caméra par exemple. Au contraire, il fait confiance aux calculs du logiciel car la simulation de la contrainte visuelle de manière volumique lui a permis de repérer très rapidement les possibles intersections entre le volume de contrainte visuelle et la scène. N'ayant pas trouvé d'intersection en utilisant la fonction *soustraction* du modelleur, il a affirmé que dans cette situation, les vues étaient possibles.

Enfin il semblerait que les architectes qui ont le plus manipulé les volumes de contraintes durant la conception, emploient des termes de sculpture pour parler de conception architecturale. Ce serait peut-être là la meilleure preuve de l'utilisation du prototype comme outil de conception en phase d'esquisse. Le groupe d'étudiants en cinquième année parle ainsi de "*pivoter le bâtiment*", "*retailer dedans*", "*découper dedans*", "*le reculer*", "*la pousser un peu*", "*la décaler*"... et l'architecte A2 parle de "*sculpter*" et de "*tailler des masses*".

3.3.3.3 La personnalisation de l'outil informatique par les concepteurs

Le corpus des concepteurs expliquant leurs raisonnements cognitifs face à notre interface est celui d'une conversation avec la machine considérée comme intelligente. Il s'agit d'un monologue avec attente de réponses écrites (fenêtres d'options, messages d'erreurs, ligne de commande, nom des calques créés par le logiciel...) ou graphiques (volumes de contraintes, écrans, masques environnants...).

Nous assistons à la personnalisation de la machine et observons que les concepteurs emploient les termes suivants : *"on m'indique..."*, *"on me donne des indications [sur la ligne de commande]"*, *"ça calcule..."*, *"il me met dans la bande de commande « cliquez sur le point... »..."*, *"je lui en mets quatre [points de base]"*, *"on m'interdit le reste [grisé car accessible uniquement si plusieurs cibles sont choisies]"*, *"là je vais faire « ok »".* *Donc là il me demande donc de cliquer sur le... sur la base donc là je vais cliquer une fois. J'y suis déjà, ... je donne le premier point, il me demande après le deuxième point, le troisième point..."*, *"Donc ça calcule... hop j'ai un écran [la fenêtre option de gestion des écrans solaires ou visuels] qui apparaît. « Option écran solaire ou visuel optimal répondant exactement... »... « Créer un écran d'épaisseur... ». C'est là que je vais donner l'épaisseur de ma latte. Donc je vais lui donner..."*, *"je ne sais plus combien de points j'ai déjà sélectionné [l'architecte se rappelle uniquement le nombre de points qu'il avait choisi]... ha si évidemment il y a la ligne de commande"*, *"là j'ai voulu faire un zoom et là j'ai pris un bouton de commande [cliqué sur une icône]... il n'a pas accepté"*, *"ils vont peut-être me demander un point"...*

3.3.3.4 Le caractère intuitif du logiciel

Certaines expressions semblent montrer le caractère intuitif du logiciel. En effet dans ce protocole d'observation, l'architecte dit à voix haute ce qu'il pense lorsqu'il conçoit avec l'outil et rares sont les interruptions dans le raisonnement du concepteur (cf. la section précédente traitant des difficultés rencontrées). Ainsi les enregistrements audio sont ponctués de formules du type : *"donc je suis d'accord"*, *"je dis « ok »"*, *"je vais sélectionner la base"*, *"je vais commencer là"*, *"donc ça c'est moi qui choisis la couleur..."*, *"alors maintenant... bien oui comme j'ai dit que je voulais une cible forcément après..."*, *"le quatrième point... Voilà, alors après maintenant je change de cadre puisqu'il faut que je donne le premier point de la cible. Donc je clique une fois..."*, *"je vais commencer par là"*, *"là j'ai déterminé la base et j'ai déterminé la cible"*, *"là je mets ok... l'option miroir, on va pas regarder cela tout de suite"...*

Ces formules s'enchaînent durant les enregistrements comme si l'interface avait déjà été utilisée régulièrement par les concepteurs, prouvant que le logiciel est relativement intuitif dans son approche graphique au moins.

L'interface est bien comprise et les différentes options sont enchaînées "à vue" par les concepteurs. Notons encore cet enregistrement de l'architecte A3 : *"maintenant je veux déterminer la cible donc je fais « Alt F8 » [raccourci clavier pour lancer la macro] donc*

comme je n'ai pas à créer de masque je saute cette étape. Je crée « 1, 2 ou 3 volumes de contraintes », donc je fais « option de création d'écran solaire » oui, euh « taille de la scène » alors on me donne... oui bien 100 m [par défaut] ça ira bien. « Nombre de cibles » pour l'instant je vais en faire qu'une. « Nombre de points de la base »... je lui en mets quatre. « Nombre de points de la cible numéro 1 » donc alors là je vais calculer parce que comme je veux pour 13 h, 14 h, 15 h, 16 h, 17 h donc : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10... je mets 10"... et plus loin : "je vais créer une cible, du coup je m'arrête à 16 h en décembre et 17 h en juin... et mars en fait. Donc la cible est à cinq points". A3 a d'ailleurs employé le terme "instinctivement" pour parler d'une de ses actions intuitives.

3.3.3.5 L'enthousiasme des concepteurs et l'appropriation des objets modélisés

Notons une série d'expressions d'enthousiasme des architectes face à l'outil informatique, telles que : "oh, c'est magique", "on n'aurait jamais pu le prévoir s'il n'y avait eu cette simulation", "je n'en reviens pas", "c'est super parce que du coup on peut mesurer la taille [de l'écran directement avec la fonction *distance* du modèleur]", "le schéma est bien fichu", "c'est génial cette affaire"...

Nous avons aussi relevé les expressions qui relèvent plus de l'appropriation des objets modélisés. Ainsi, les architectes semblent s'attribuer systématiquement les objets que le logiciel modélise. Ceci est un signe encourageant d'appropriation des résultats et plus généralement de notre interface. Notons par exemple ces quelques expressions : "ma voûte solaire", "mon orientation", "mon premier point", "mon bureau [base de contrainte]"...

3.3.4 La vitesse de compréhension et le temps de prise en main

3.3.4.1 La compréhension rapide de l'approche inverse

La prise en main de l'interface se déroule généralement comme l'exemple suivant. "Je crée une voûte solaire déclare l'architecte A3, je prends l'hémisphère nord, latitude 47,2... je limite aux périodes solaires visibles depuis une base de contrainte... donc je vais valider. Voilà, j'ai l'impression que ça calcule... le reste est grisé donc je n'ai pas encore la main pour faire autre chose [...] « Couleur du volume numéro 1 », donc ça

c'est moi qui choisis la couleur... admettons jaune ça me paraît très bien. Alors maintenant... comme j'ai dit que je voulais une cible forcément après on m'interdit le reste [grisé car seulement accessible si plusieurs cibles sont choisies]. Donc là je vais faire « ok ». Donc là il me demande donc de cliquez sur... la base donc là je vais cliquer une fois. J'y suis déjà... je donne le premier point, il me demande après le deuxième point, le troisième point... le quatrième point. Voilà, alors après maintenant je change de cadre puisqu'il faut que je donne le premier point de la cible [...] je vais commencer par là..." etc. Nous le voyons dans cet exemple, la prise en main est très aisée pour l'architecte A3 et de manière générale pour l'ensemble des concepteurs qui découvrent l'interface.

Dès les premières explications des notions de modélisation inverse, au début du protocole, nous sommes généralement agréablement surpris de la compréhension rapide des concepteurs tels E22 qui nous déclare avant même de commencer les premières simulations : *"s'il faut tester tous les endroits d'où l'on voit notre tour [le musée projeté], on va tâtonner, ça va être difficile. Il vaut mieux utiliser une méthode plus simple [sous-entendu la méthode inverse proposée]."*

La notion de masque environnant, est très vite comprise peut-être parce que les images très grand angle du type *fish-eye* sont couramment employées dans les agences d'architecture. Ainsi la prise en main de cette option fut aisée pour l'architecte A1 qui, il est vrai, est le seul à l'avoir expérimenté. Les autres architectes ont de suite compris l'intérêt d'une telle démarche sans pour autant la tester, argumentant que leurs projets étaient dégagés de tous bâtiments ou masses végétales pouvant constituer des masques solaires ou visuels.

3.3.4.2 Le temps moyen de prise en main

Partant de l'hypothèse que les bases du logiciel mère sont connues par les architectes, nous avons estimé qu'il a fallu en moyenne moins d'une heure aux concepteurs observés pour se familiariser avec la première fenêtre de notre interface (création d'un modèle de voûte solaire et réalisation de volumes de contraintes) afin de réaliser une série de simulations simples suivies de la conception de dispositifs architecturaux ou dispositions urbaines répondant à ces contraintes solaires ou visuelles simulées.

Pour concevoir un dispositif complexe comme celui que A3 a réalisé, il lui a fallu plusieurs jours de travail de conception. La prise en main de l'ensemble des options de l'interface par l'architecte a duré le temps des observations, soit deux jours et demi.

Mis à part les quelques difficultés énoncées plus haut, le temps de prise en main fut très satisfaisant. Les perfectionnements réalisés progressivement sur les versions successives de notre outil ont permis d'améliorer la vitesse de compréhension de l'interface par les concepteurs. Ainsi nous avons diminué le temps de recherche d'informations – nombres de points à sélectionner par exemple – en ajoutant des messages sur la ligne de commande et dans les fenêtres de l'interface.

3.3.4.3 Les notions qu'il a fallu approfondir durant les observations

La compréhension des méthodes utilisées avec notre outil pour réduire le champ d'investigation des contraintes (intervisibilité, "périodes solaires visibles depuis une base", etc.) ne sont pas toujours comprises au début du protocole ; nous devons parfois redonner une explication supplémentaire durant les séances d'observation. Les architectes que nous avons observés n'ont visiblement jamais rencontré de notion incompréhensible.

Généralement, les utilisateurs de l'outil perdent peu de temps sur la prise en main de l'interface car les méthodes de simulation, même si elles restent "énigmatiques" pour le calcul des volumes de contraintes complexes, utilisent les fonctionnalités du modéleur qui sont connues des architectes (saisie de point via les paramètres d'accroche du modéleur).

Les concepteurs prennent plus leur temps lorsqu'ils ouvrent les fenêtres d'options. Ce ne sont pas toujours les mêmes options sur lesquelles les concepteurs s'attardent, cela dépend de leurs choix. Parfois, nous avons été étonnés de la rapidité de compréhension de l'architecte tel A1 qui, après avoir calculé un volume de contrainte visuelle entre une fenêtre traditionnelle (une base de contrainte potentiellement visible depuis les fenêtres des voisins) et une cible englobant les fenêtres d'où il est possible de voir cette base, s'interroge ainsi : "*est-ce que le volume de contrainte intègre la maison devant ?*". Mais, aussitôt sans notre intervention, l'architecte en déduit que "*ha, si... le fait qu'il y ait la cible intègre déjà seulement les fenêtres visibles*".

L'architecte a donc compris très rapidement une notion loin d'être évidente : un test sur quelques cibles potentielles (ici, les fenêtres du bâtiment voisin) permet de présélectionner en plaçant des caméras une zone de jardin visible (la base) depuis ces cibles au lieu de calculer des volumes de contraintes qui seront de toute manière en partie inexploitable car intersectés par le petit immeuble qui se trouve entre la base et la cible.

Dans l'ensemble nous l'avons déjà dit, la notion de limitation des périodes solaires représente un temps de compréhension important. La prise en main des modèles de voûtes solaires n'est pas automatique, mais son intérêt est toujours apprécié.

3.3.4.4 Les initiatives des concepteurs dans la logique de l'approche inverse du logiciel

Lorsque les concepteurs exploitent toutes les fonctionnalités d'une option, nous sommes parfois surpris de la rapidité d'assimilation d'une notion. Prenons l'exemple de cet étudiant de troisième année, s'inquiétant d'une simulation qui semblait donner des résultats trop ambitieux (écran protecteur extrêmement grand), fait une proposition à ses collègues. *"Et si l'on réduisait les heures d'ensoleillement [pour réduire les volumes de contraintes et donc les solutions d'écrans solaires]"* déclare-t-il. Cette proposition montre que la compréhension du rapport qu'il existe entre "taille" des périodes solaires et envergure des volumes de contraintes liés à ces périodes fut instantanée puisque la proposition du concepteur suivait directement la phase de simulation. Nous pouvons d'ailleurs généraliser cette affirmation car ce rapport a toujours semblé logique à l'ensemble des concepteurs. Dans un souci didactique, nous sommes intervenus pour leur proposer de simuler une période de protection solaire plus petite en passant d'avril-août à mai-juillet. Un des étudiants intervint alors de manière intelligente et spontanée en déclarant : *"non, les heures [il voulait modifier uniquement les heures d'ensoleillement]... puisque comme ça les rayons seront moins hauts [d'où un écran solaire plus petit et plus facilement constructible]"*. La remarque est très judicieuse puisque pour une façade ouest, à 12 h le soleil est au plus haut en été et étant donné que leur type de brise-soleil choisi est vertical, il est plus adapté aux rayons dont l'inclinaison est proche de l'horizontale. De plus, le choix des étudiants en architecture est motivé et justifié par le fait qu'à 12 h l'angle d'incidence des rayons solaires arrivant sur la baie ouest est très important (proche de 90°). Le décrochement de la baie dans la façade semble donc pouvoir de lui-même empêcher les rayons de rentrer. Les étudiants ont donc décidé de prendre en compte les rayons solaires uniquement à partir de 12 h

30, ce qui prouve leur maîtrise des périodes solaires et leur facilité d'interprétation des contraintes. Signalons encore que les concepteurs n'hésitent jamais à prendre des initiatives durant les observations. Ils ne se limitent pas à une démarche simulation / conception. Ils vérifient en coupe ou en plan, des distances, des positions, des chevauchements, des rayons particuliers, etc. Ils testent des vues, en enregistrent certaines qui leur serviront plus tard, gèrent leurs calques, explorent les modèles de voûtes solaires, croisent les types de contraintes (visuelles et solaires), etc. Il semble bien que notre interface ne déstabilise pas les concepteurs. Bien au contraire, l'outil semble provoquer chez eux la curiosité et l'envie d'apprendre à maîtriser certains facteurs d'ambiances, d'une manière non empirique.

Rappelons avant de clore cette section que l'architecte A3 a utilisé notre outil durant plusieurs semaines, en complète autonomie, pour simuler un maximum de cas de figures d'enveloppe "double peau" d'une façade de bureaux. Nous n'avions pourtant pas envisagé une utilisation autonome du logiciel avant de commencer la phase d'observation des architectes concevant. Ceci pourrait donc nous encourager à proposer l'utilisation de notre outil en agence à des concepteurs autonomes après quelques heures de formation passées à leur côté.

3.3.5 Les révélateurs d'intentions

Dans cette partie nous essayons d'expliquer quand et comment notre outil de simulation inverse peut intervenir dans les processus cognitifs des architectes.

3.3.5.1 Une meilleure représentation des positions solaires

D'une part, il semble que l'outil utilisé comme aide à la représentation dans l'espace permette aux architectes de mieux se représenter les positions potentielles du soleil (trajectoires solaires durant l'année) et l'impact des masques environnants sur l'ensoleillement potentiel d'une scène. Ces masques réalisés à partir de projections d'images *fish-eye* ainsi que les diagrammes solaires 3D que sont les modèles de voûtes solaires, permettent aux concepteurs d'identifier rapidement les périodes de l'année où les volumes environnants (bâtiments, végétation, relief...) empêcheront le soleil d'arriver sur la scène quel que soit le projet réalisé (cf. Figure 3-41 et Figure 3-42).

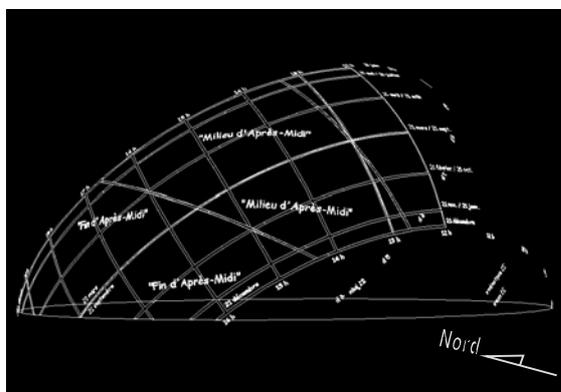


Figure 3-41 : Le modèle de voûte solaire révèle parfois des intentions et modifie certaines contraintes. Dans cet exemple, l'architecte doit composer avec les périodes solaires restantes (dans le demi hémisphère ouest pour une base de contrainte ouest)

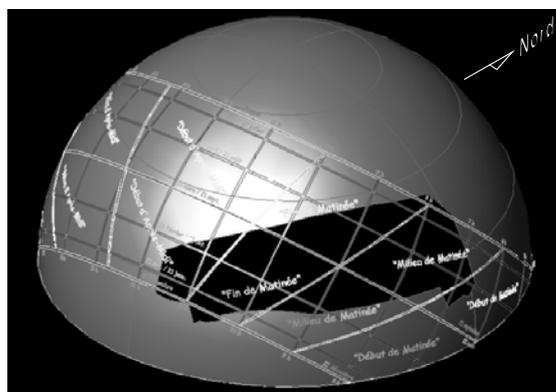


Figure 3-42 : Cette fois la contrainte solaire est modifiée par l'application de l'option "création de masques environnants" d'après une photo *fish-eye*. L'architecte ne doit utiliser uniquement la partie de la voûte solaire non masquée (approximativement le milieu de la matinée au printemps et en été, et la fin de la matinée en automne et en hiver)

L'architecte est déjà aidé dans sa démarche de conception grâce à ces diagrammes, avant même d'avoir commencé les simulations solaires et d'avoir conçu à partir de volumes de contraintes. Tous les concepteurs qui ont abordé notre outil sous l'angle solaire ont d'abord vérifié quelques-unes de leurs impressions qui se sont souvent avérées fausses. Leurs vérifications spontanées ont souvent changé le cours du processus de conception, parce qu'elles aboutissaient à des étonnements ou des révélations qui n'auraient pas eu lieu sans cette démarche propre à notre outil.

De plus, à de nombreuses reprises, l'architecte A3 nous a fait part de la modification de son raisonnement. Par exemple, elle ajusta le choix de la période solaire ciblée directement en visualisant le modèle de voûte solaire. Elle déclara ainsi : *"comme je veux étudier l'été par exemple... je vais prendre une date, le 21 juin voilà... il faudrait que ça protège entre 13 h puisqu'en fait le soleil passe derrière la façade à midi donc de 13 h à... admettons à 17 h"*. L'épaisseur de la baie, comparée à une vue en plan de notre modèle de voûte solaire (dans une autre fenêtre du modèleur) a donc décidé l'architecte à négliger la contrainte solaire comprise entre 12 h et 13 h. L'architecte A3 réagissant directement à la vue de notre modèle, nous pouvons affirmer que ce dernier a modifié le raisonnement de l'architecte et donc son comportement de concepteur. Si A3 n'avait pas ajusté son raisonnement au cours de l'observation, la contrainte solaire aurait été bien plus importante mais pas justifiée pour autant. Notre modèle semble donc apporter une aide précieuse directement durant la conception.

D'autres cas rencontrés avec l'architecte A3 semblent étayer cette observation. Ainsi, cette architecte nous a affirmé qu'elle avait relevé à partir de ses propres diagrammes solaires, l'heure approximative du coucher du soleil en hiver (*"j'ai calculé le 21 décembre... 15 h correspond à 16 h [légales]... il [le soleil] se couche entre 15 h et 16 h"*), mais elle s'est empressée de vérifier cette heure sur notre modèle de voûte solaire. Ainsi, depuis cette vérification, l'architecte ne consulte plus, lorsqu'elle utilise notre outil, de diagramme solaire autre que le diagramme 3D que constitue notre modèle de voûte solaire. Cette dernière observation est aussi valable pour les concepteurs E11, E12 et E13 qui ont, de même, affiné les heures ciblées pour leur contrainte solaire. Ils sont passés du midi solaire à 12 h 30 (en heures solaires), afin de mieux coller aux observations faites toujours à partir de notre modèle.

3.3.5.2 L'effet révélateur des simulations de l'accessibilité visuelle

Nous notons que la carte d'accessibilité visuelle, réalisée avec des fonctionnalités détournées du modelleur pour identifier des cibles potentielles, a permis aux concepteurs de prendre des décisions avant de commencer réellement la conception. Ils ont choisi uniquement des cibles qui étaient potentiellement visibles, prenant ainsi des décisions qui ont eu un impact décisif sur le projet.

La carte d'accessibilité visuelle a donc un effet révélateur certain, tandis que des recherches par tâtonnement (approche par essais répétitifs) ne permettent pas aux concepteurs de prendre des options définitives sur le projet.

3.3.5.3 Les formes des volumes de contraintes ou des écrans modélisé à l'origine d'idées conceptuelles

Il semble que les formes des volumes de contrainte, de leur intersection ou soustraction avec la scène, ainsi que la forme des écrans calculés, soient eux-mêmes révélateurs d'intentions. Ainsi les écrans calculés avec notre outil semblent de par leur forme déclencher automatiquement des interprétations chez les concepteurs. Ces derniers ont tous conçu des dispositifs architecturaux ou paysagers non pas à partir des écrans mais grâce aux écrans, car rien ne laissait présager aux étudiants en troisième année d'architecture que le brise-soleil qu'ils cherchaient à réaliser allait devenir un alignement d'arbres par exemple. C'est bien la forme pointue et très élancée de l'écran qui a révélé

aux concepteurs l'idée de masse végétale, alors que leurs premières esquisses (d'après des tracés solaires classiques) prévoyaient plutôt un prolongement de la façade sous la forme d'un portique en béton armé. Dans ce cas, l'idée de l'écran végétal ne semble pas être le fruit d'une réflexion intense mais plutôt de l'ordre de la solution préconçue, de l'imagination ou de l'expérience collective, car chacun de nous peut avoir en mémoire un exemple ou une expérience d'alignements d'arbres très efficaces contre l'ensoleillement.

Citons quelques intentions de projet nées des calculs de volumes de contraintes ou d'écrans solaires ou visuels, mais qui n'ont pas abouti, car les architectes n'ont pas toujours eu assez de temps à nous consacrer durant les séances d'observation que nous analysons. L'architecte A1 nous a personnellement parlé d'un concept de "*pourcentage de porosité*" du brise-soleil "*du type 45 % de porosité*" qui lui semblait "*mieux pour parler avec le client*" que de parler de Lux. Certes, cette intention lui est apparue en référence aux pergolas espagnoles qui filtrent le soleil plus ou moins selon leur porosité, mais l'initiative d'appliquer ce concept aux écrans brise-soleil calculés par la macro est bien propre à l'architecte et est intervenue lors de la manipulation d'un écran (cf. de la Figure 3-43 à la Figure 3-48).

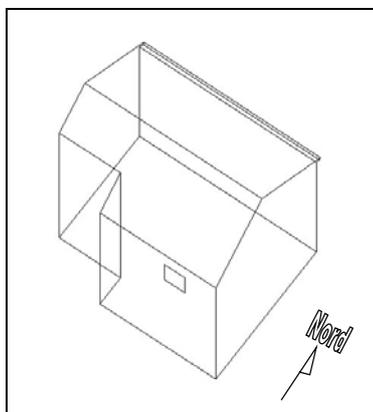


Figure 3-43 : Objet de la simulation : une fenêtre traditionnelle canarienne dans son contexte (maison individuelle à toiture deux pentes). Le débord de toit sud est inexistant pour permettre la conception d'un écran solaire dans le prolongement du toit.

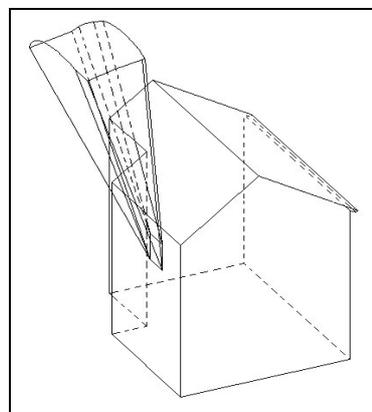


Figure 3-44 : Premier volume de contrainte solaire réalisé par l'architecte. La base est la fenêtre. L'architecte décide premièrement de choisir comme cible "*l'heure du repas*" (i.e. de 14 h et 16 h) "*du mois de juillet au mois d'août*".

Durant ce maniement, l'architecte s'est aperçu que l'optimisation solaire de ce dernier allait parfaitement empêcher la pénétration du soleil, ce qui semblait le gêner dans une démarche de mise en scène du lieu (luminosité, contraste, panachage, jeu d'ombre et de lumière, etc.).

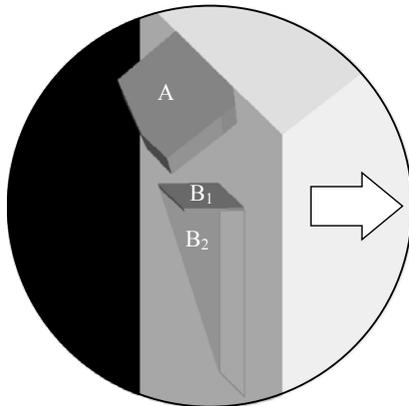


Figure 3-45 : Deux dispositifs optimaux conçus par l'architecte pour répondre à la première contrainte solaire (de 14 h à 16 h, de juillet à août). A est un débord de toit (même épaisseur et même inclinaison que la couverture) de 62 cm (pour 2,69 mètres de largeur optimale mais pouvant être prolongée sur toute la longueur de la sablière). B₁ et B₂ composent une protection d'épaisseur 2 cm accolée à la fenêtre. Remarquons que la hauteur du soleil à cette période de l'année sous cette latitude, autorise des protections solaires horizontales de faible profondeur, ce qui ne serait pas le cas sous des latitudes européennes.

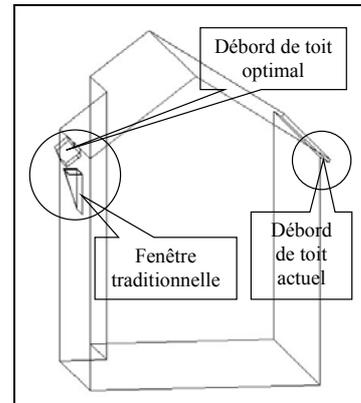


Figure 3-46 : Dispositifs brise-soleil calculés avec SVR dans leur contexte traditionnel. La comparaison faite entre le débord de toit optimal et le débord actuel (traditionnel) montre que quelques centimètres supplémentaires permettraient d'optimiser parfaitement la protection solaire de la fenêtre durant les deux mois les plus chauds et à cette latitude de 28,4° nord. Une solution composée d'une protection verticale et d'une protection horizontale, placée contre la fenêtre traditionnelle serait de dimension plus petite et passerait pour innovante sur cet archipel ibérique.

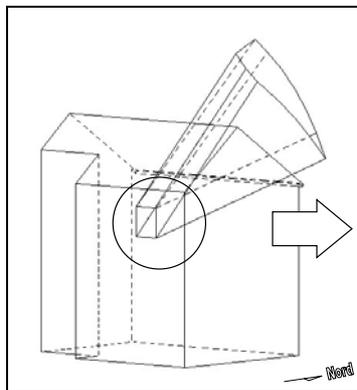


Figure 3-47 : Deuxième volume de contrainte solaire réalisée par l'architecte. La base est toujours la fenêtre. La cible est la période solaire de 9 h et 11 h de juillet à août.

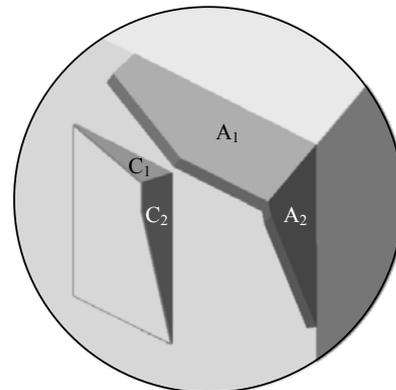


Figure 3-48 : L'architecte a conçu deux dispositifs optimaux pour répondre à la deuxième contrainte solaire (de 9 h à 11 h, de juillet à août). A₁ et A₂ composent un débord de toit de 49 cm et un prolongement du pignon est. C₁ et C₂ composent une protection d'une largeur maximum de 24 cm.

La séance d'observation n'ayant pas duré assez longtemps, nous n'avons pas le résultat de l'intention de projet de l'architecte sous la forme d'esquisses volumétriques par exemple. L'interprétation de l'architecte est donc restée sous forme de concepts, mais l'intention était bien réelle.

Autre intention révélée mais non aboutie, l'étude de cas réalisée avec l'architecte A4. L'architecte se propose de simuler une contrainte d'ensoleillement pour une heure et une date précise (le 21 décembre à 15 h). Il exécute l'opération et la macro calcule le premier volume de contrainte solaire. La cible ainsi choisie est la position du soleil représentée par les quatre points d'intersection de la double trajectoire apparente du soleil le 21 décembre avec celle de 15 h (cf. Figure 3-49 et Figure 3-50).



Figure 3-49 : Intersection des trajectoires mensuelles du soleil avec les trajectoires horaires virtuelles

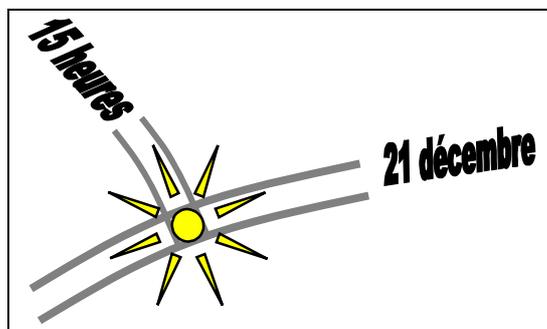


Figure 3-50 : Position du soleil le 21 décembre à 15 h. L'intersection entre les deux trajectoires définit quatre points que l'architecte sélectionne.

Par curiosité, l'architecte soustrait au volume de l'îlot Boucherie sur lequel est réalisée l'étude de cas, le volume de contrainte. Le résultat est un percement de l'enveloppe de part et d'autre du volume. L'architecte réaliste s'empresse alors de déclarer que *"ça n'a pas vraiment de sens, parce que ça ne dure qu'un instant, mais c'est juste pour voir"*. Pourtant il trouve aussitôt une réelle justification à cette étude. Il propose d'adapter ce type de calculs *"pour simuler les contraintes solaires de stands, de foires, d'expositions, etc..."*. *"C'est bien pour des structures temporaires"* dit-il en expliquant que dans ce cas de figure on a généralement besoin d'un ensoleillement minimum pour des heures précises, ou des dates ne dépassant pas la journée ou le week-end par exemple.

3.3.5.4 Des rayons solaires en 3D

Le test rapide réalisé avec l'architecte A5 est un autre exemple d'intention révélée par notre outil. L'observation a duré moins d'une heure. Elle portait sur la conception d'un élément architectural pouvant s'intégrer à la façade ouest de la maison *Joglo*²⁹ (cf. Figure 3-51).

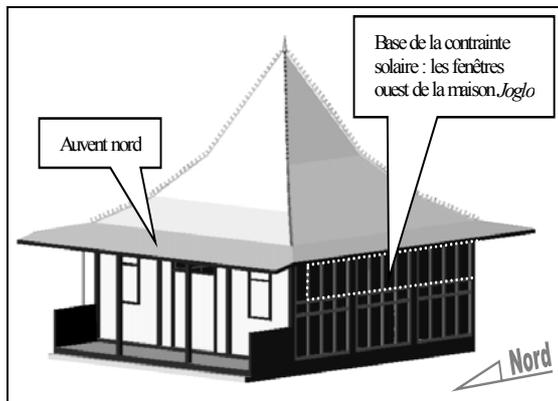


Figure 3-51 : Maison *Joglo* (Indonésie, latitude 7° sud). L'auvent de la maison traditionnelle *Joglo* (2 mètres d'avancée) est toujours tourné vers le centre de l'île ; dans ce cas d'étude au nord.

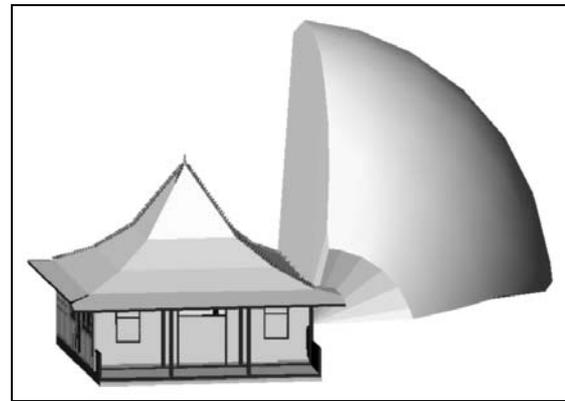


Figure 3-52 : Volume de contrainte solaire annuelle à partir de 12 h 30 et jusqu'à 18 h (heures solaires) pour les fenêtres ouest de la maison *Joglo*

La façade ouest fut choisie par l'architecte car il s'agit de "*la façade la plus exposée aux surchauffes solaires [apports solaires directs l'après-midi cumulés aux fortes chaleurs à cette période de la journée]*". La latitude du lieu est 7° sud. L'architecte simule donc une contrainte solaire pour l'ensemble de l'année, l'après-midi. Il choisit comme base de contrainte, les fenêtres de bois sculpté exposées à l'ouest et partiellement protégées du soleil par le débord de toit d'un mètre (pas d'auvent à l'ouest). Son objectif est d'optimiser la protection solaire des baies à l'ouest.

L'architecte a l'habitude de manipuler des logiciels de simulations solaires non déclaratifs, et face à notre prototype, il semblerait que les arêtes des volumes de contraintes solaires l'aient beaucoup aidé (cf. Figure 3-53).

²⁹ Maison traditionnelle Indonésienne

En effet, ces arêtes qui ne sont autres que les rayons horaires (à une heure sélectionnée sur le modèle de voûte solaire correspond un rayon horaire) ont permis à l'architecte de prendre quelques dimensions d'auvents horizontaux, pouvant protéger l'intérieur de la maison pour les heures identifiées précédemment. Ainsi, cette fois les arêtes des volumes de contraintes vues en élévation et en rendu filaire ont révélé au concepteur une interprétation possible. Il a alors décomposé la protection solaire en un élément architectural horizontal et un élément paysager vertical (cf. Figure 3-54).

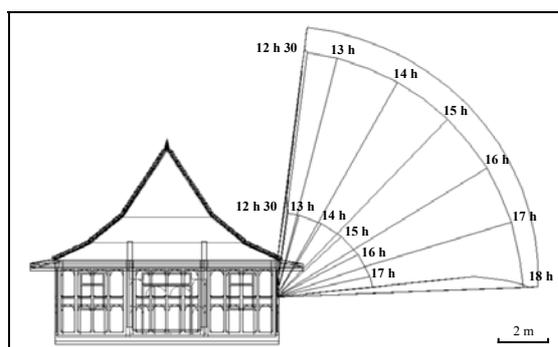


Figure 3-53 : Volume de contrainte solaire en rendu filaire – élévation nord. Chaque arête du volume correspond à un rayon solaire pour une heure fixe ou une demi-heure (12 h 30, 13 h, 14 h, 15 h, etc.)

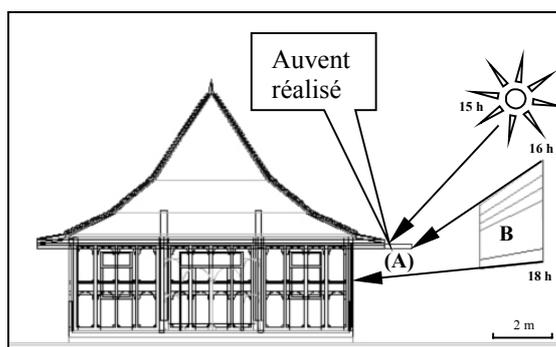


Figure 3-54 : Interprétation de l'architecte d'après les écrans calculés : un auvent (A) de même taille que celui de la façade nord (protection de 15 h à 16 h) associé à une masse végétale (B) protégeant les fenêtres ouest de 16 h à 18 h.

L'architecte A5 a ainsi conçu un brise-soleil ouest horizontal dans le prolongement du débord de toit (faisant ainsi passer ce dernier de un mètre à deux mètres de large) et un écran vertical végétal ouest à cinq mètres de la façade et de cinq mètres de haut (bananeraie de la Figure 3-55).



Figure 3-55 : Vérification de l'ensoleillement des fenêtres ouest de la maison *Joglo* pour la journée du 21 décembre à 17 h. Simulation réalisée par lancer de rayon, avec le logiciel mère *AutoCAD*. Les fenêtres ouest sont totalement à l'ombre.

Notons que les deux mètres de débord de toit ne sont pas pris au hasard, ils correspondent à un compromis formel (référence aux deux mètres de débord sur la façade orientée au nord, porte-à-faux acceptable, continuité de la pente...) et fonctionnel (répondant à la contrainte solaire, permettant la ventilation naturelle et acceptant le passage des personnes).

3.3.5.5 Les volumes de contraintes comme outils de modelage

Signalons enfin une intention révélée par notre prototype mais non finalisée pour des questions d'emploi du temps de l'architecte. Il s'agit de la proposition de l'architecte A2 qui souhaitait simuler des contraintes solaires et visuelles pour des aménagements paysagers. Son objectif était de pouvoir manier la maquette numérique d'un projet paysager *"à la manière d'une maquette que l'on peut sculpter"*. *"On doit pouvoir tailler des masses végétales"* nous a-t-elle affirmé après avoir découvert notre interface. Cette intention semble bien être le fruit d'un effet révélateur de l'approche volumique proposée par notre outil puisque à aucun moment durant le protocole d'observation nous avons parlé d'approche paysagère du logiciel. L'architecte semble avoir interprété les possibilités du logiciel comme de potentiels moyens de satisfaire ses préoccupations paysagères.

3.3.5.6 La recherche de l'optimisation solaire et visuelle d'un dispositif architectural

Les séances d'observation de l'architecte A3 furent riches en constatations. L'architecte a commencé à travailler sur les esquisses 3D (cf. Figure 3-56 et Figure 3-57) d'un dispositif de lattes brise-soleil qu'elle avait modélisé avec le logiciel *AutoCAD*, pour *"avoir une première approche par rapport à l'accumulation de soleil avec une latte carrée"*.

Elle a donc simulé deux dates importantes de l'année solaire, le 21 décembre et le 21 mars. Son objectif était de *"prendre une option sur la forme des lattes et après pourquoi pas faire [d'autres calculs] sur des périodes... de mars à juin, de juin à septembre, de septembre à décembre..."* nous a-t-elle affirmé.

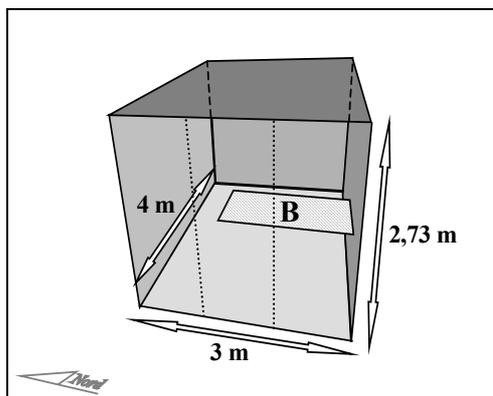


Figure 3-56 : Modélisation 3D de l'objet d'étude de l'architecte A3 : une cellule de bureau mono orientée à l'ouest. Le plan de travail du bureau (B) est collé à la paroi sud. La façade ouest est entièrement vitrée.

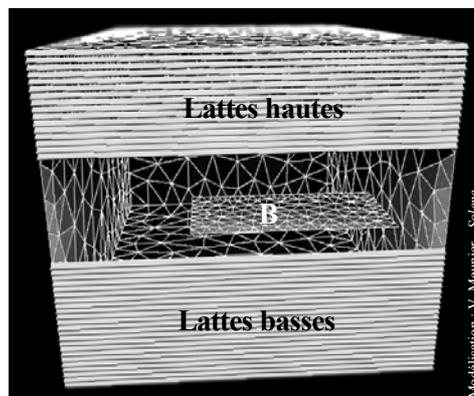


Figure 3-57 : Premières esquisses de l'enveloppe brise-soleil réalisée par l'architecte avant la séance d'observation. Seule la partie centrale reste non protégée. Les lattes hautes et basses sont toutes de section carrée (3 x 3 cm) espacées de 1,5 cm et protègent théoriquement la cellule du soleil.

Les retranscriptions qui suivent montrent bien que l'architecte cherche dans un premier temps, si possible à se rassurer sur son choix de lattes de section carré (3 x 3 cm), ou bien de trouver un compromis entre la forme des lattes (leur section) et leur fonctionnalité (voire leur constructibilité). "En fait la largeur optimale est de 3,88 centimètres pour 16 h, en fait ça viendrait ici" affirme l'architecte qui s'empresse de mesurer "la largeur de la latte" avec la fonction *distance* du logiciel mère. Et de poursuivre : "j'en reviens pas que ça soit si important...". A ce moment précis de l'observation, l'architecte décide de trouver le meilleur compromis possible pour l'élément de paroi qu'elle conçoit et déclare : "à mon avis il faut quand même essayer de faire optimal, après... après on trouve des compromis" entre le coût du dispositif et l'optimisation solaire, lumineuse et visuelle de celui-ci, nous dit-elle. Pour arriver à ses fins, l'architecte va chercher durant une matinée les heures critiques de l'année, où les rayons solaires sont tellement proches de l'horizon que les lattes horizontales seraient impossibles à industrialiser (largeur trop importante par rapport à l'épaisseur et la longueur des lattes et l'espacement de 1,5 cm entre les lattes pour laisser passer la vue). De plus de telles proportions aboutiraient à un flambement certain des lattes, quelle que soit la matière utilisée, nous dit-elle. L'architecte poursuit l'après-midi ainsi : "j'ai fait des simulations avec SVR sur des périodes très restreintes pour essayer de délimiter les cas critiques, les heures critiques en fait, les moments où le soleil est très bas et où finalement la largeur de latte obtenue est considérable et complètement aberrante puisque souvent les rayons bas finalement sont en période hivernale, et en hiver les rayons sont peu puissants. Donc mettre par exemple 91 centimètres en largeur de latte

pour le 21 décembre entre 15 h et 16 h, ça n'a vraiment... vraiment aucun sens. Donc, je réalise les simulations pour des périodes très restreintes. J'ai fait pour le 21 décembre, 21 janvier, 21 février, 21 mars, 21 avril, 21 mai et 21 juin, pour les heures qui vont donc de 12 h 30 à 13 h, puis de 13 h à 14 h, puis de 14 h à 15 h, puis de 15 h à 16 h et de 16 h à 17 h. Donc en fait on obtient des résultats. J'ai décidé d'enlever... afin d'éliminer certains cas qui sont pour le 21 décembre, une largeur [de latte] de 91 centimètres, pour le mois de janvier... [...] Pour le mois de février de 16 h à 17 h on a une épaisseur... une largeur de latte de 54,63 centimètres ce qui est énorme aussi et puis on arrive pour le 21 mars à 16 h et 17 h... on obtient finalement 8,57 centimètres qui restent tolérables mais peuvent sembler une limite vraiment supérieure à ce qu'on peut envisager. On trouve d'autres résultats, comme pour 21 décembre entre 14 h et 15 h. Le résultat c'est 6,85 centimètres. On trouve ce même résultat pour le 21 janvier entre 14 h et 15 h, donc finalement... et on trouve également 6,83 centimètres pour le 21 février entre 15 h et 16 h. Donc finalement on s'aperçoit qu'en période hivernale, on peut peut-être considérer que la limite de 6,85 centimètres est la limite supérieure puisque... enfin est une bonne limite puisqu'elle répond à trois périodes [d'une heure chacune] de la période d'hiver... pour le mois de décembre, le mois de janvier et le mois de février. Donc ça me paraît être une bonne limite pour répondre de manière optimale. Alors une autre information également... j'avais pensé après l'esquisse, le système [enveloppe "double peau" conçue par l'architecte] étant tellement flexible dans le positionnement des lattes... que j'avais réduit l'étude à deux cas, donc le cas hiver et le cas été. Donc finalement je me suis dit d'après les résultats obtenus sur le tableau précédent dont je viens de parler [cas limites décrits ci-dessous - Tableau 3-1] que finalement il serait peut-être bon de considérer des largeurs de lattes différentes entre... et donc obtenir une limite de 6,85 centimètres que l'on a vu dans les trois cas que j'ai cités précédemment pour la paroi intérieure. Et donc lorsque l'on regarde les résultats pour la période estivale, finalement on s'aperçoit qu'une limite de 3,35 centimètres [erreur rectifiée plus tard à 4,65 cm] finalement permettrait de protéger totalement des rayons du soleil pour la période estivale."

	21 déc.	21janv./nov.	21fév./oct.	21mars/sept.	21avril/août	21mai/juil.	21 juin
12h30-13h	1.18	1.0	0.78	0.61	0.5	0.43	0.41
13h-14h	2.86	2.86	1.72	1.3	1.04	0.89	0.84
14h-15h	6.85	6.85	3.21	2.24	1.73	1.43	1.35
15h-16h	91.13	18.97	6.83	3.91	2.74	2.18	2.0
16h-17h			54.63	8.57	4.65	3.35	3.27

Tableau 3-1 : Détermination par l'architecte, de la largeur optimale (en centimètres) des lattes pour des périodes d'une heure. Trois cas critiques ont été exclus (cases grisées) par l'architecte car présentant une largeur trop importante par rapport à l'espacement de 1,5 cm entre chaque lattes.

Après avoir exclu les cas critiques, l'architecte s'exprime à voix haute sur la forme optimale de la latte obtenue avec notre macro pour les périodes solaires qu'elle a choisies. "On n'aurait jamais pu le prévoir dit-elle s'il n'y avait pas eu cette simulation. La forme de latte optimum est une forme non régulière [cf. Figure 3-58 et Figure 3-59 – forme d'écran brise-soleil horizontal, optimale pour l'épaisseur de trois centimètres choisie par l'architecte], donc là en fait dans les simulations j'ai vraiment retenu que la largeur parce que c'est ce qui me semble le plus important actuellement et j'ai parlé de la largeur basse [cf. Figure 3-59] de la latte pour un souci d'économie de matière car si l'on prenait la largeur haute [cf. Figure 3-59] en fait on aurait des lattes beaucoup plus importantes [plus larges], alors après c'est vrai que... on verra peut-être que pour assurer un confort... enfin... une certaine luminosité dans la pièce, il serait peut-être nécessaire de combiner la largeur haute et la largeur basse pour certaines... configurations. "

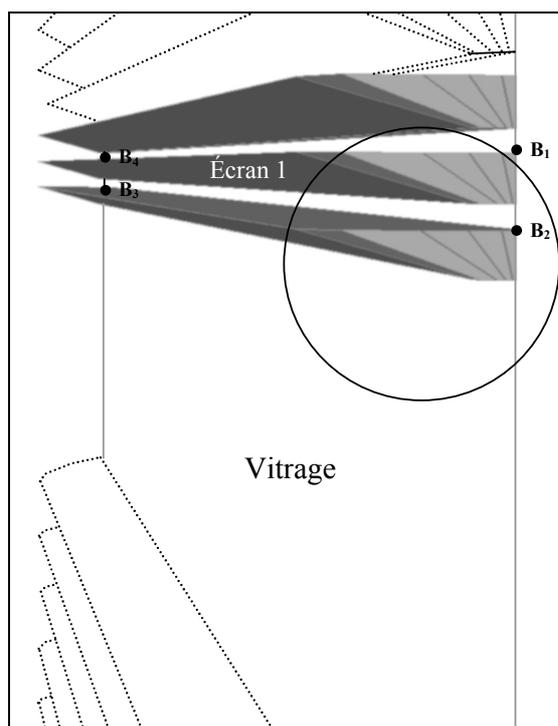


Figure 3-58 : Calcul d'écrans brise-soleil réalisés avec *SVR* pour une épaisseur de 3 cm et un espacement de 1,5 cm (les écrans sont identiques, ils sont des copies translattées de l'écran 1). La base de la contrainte solaire choisie par l'architecte pour créer l'écran 1 est [B₁B₂B₃B₄].

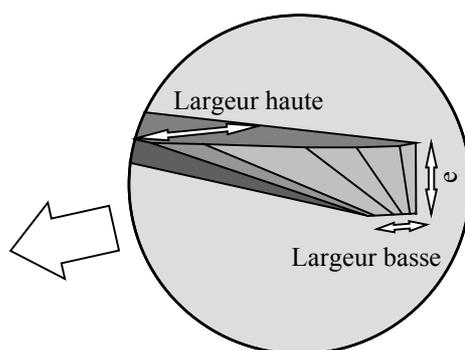


Figure 3-59 : Détail d'un écran montrant que l'optimisation de celui-ci aboutit à une solution non standard (extrémités de forme prismatique avec des faces complexes). L'architecte parle de "largeur haute" et de "largeur basse" pour désigner respectivement la face du dessus et la face du dessous de l'écran. La face verticale accolée au vitrage a une épaisseur (e) de 3 cm.

A ce stade de l'observation, l'architecte A3 n'a pas encore conçu une forme personnelle de latte. L'architecte possède un écran brise-soleil horizontal optimal pour l'épaisseur choisie, mais le volume que représente cet écran peut être remodelé par l'ajout de matière ou le retrait de certaines parties du volume, sans pour autant diminuer l'efficacité de l'écran solaire. L'architecte a bien compris qu'elle pouvait jouer sur l'épaisseur de la latte à certains endroits (cf. Figure 3-60) tout en satisfaisant ses exigences (contrainte solaire) et décide de ne rien rajouter mais au contraire de partir de l'enveloppe optimale du volume pour y placer à l'intérieur, une forme de latte nouvelle et personnelle, prenant en compte deux contraintes supplémentaires. L'architecte veut en effet satisfaire la visibilité des usagers de la cellule de bureau et l'éclairage du plan de travail (le bureau).

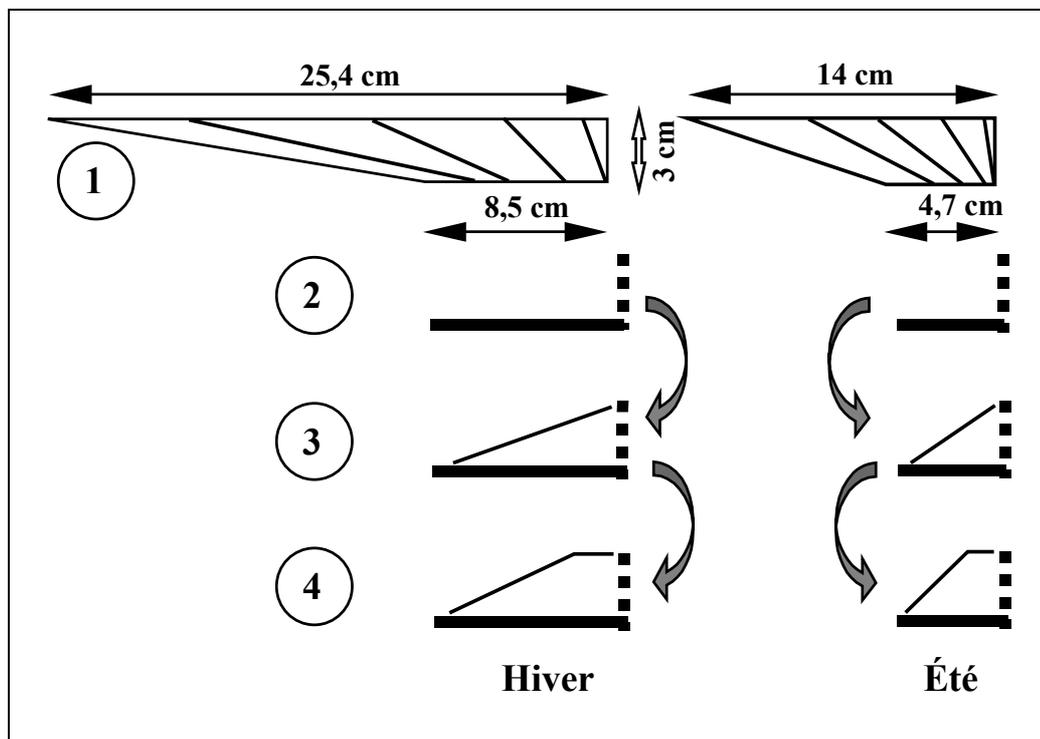


Figure 3-60 : Évolution de deux écrans conçus par l'architecte pour protéger du soleil les usagers en hiver et au printemps (à gauche) et en été et en automne (à droite). En haut, se trouve l'élévation de l'écran calculé par *SVR* qui constitue une enveloppe optimale. L'architecte remarque (2) que la face du dessous associée à la face verticale de cette enveloppe bloquent les rayons solaires par exemple pour les périodes choisies aussi bien que la face du dessus qui elle, est beaucoup plus large (donc moins économique, pouvant fléchir...). L'architecte décide donc dans un premier temps de retenir une solution triangulaire (3) puis dans un second temps (4) de "tronquer l'angle supérieur" pour permettre l'empilement des lattes. L'écran calculé par *SVR* (1) est devenu la latte conçue par l'architecte (4).

L'architecte décide dans un premier temps de "*changer l'espacement [entre les lattes]... pour permettre la vue*" puis déclare : "*avant je pense qu'il serait peut-être plus intelligent de faire le solaire et le visuel parce que si ça donne de bons résultats ce n'est peut-être par la peine non plus d'aller changer l'épaisseur [l'espacement entre les lattes] [...] Autant qu'on essaye de voir si la forme des lattes permet d'optimiser [les deux contraintes visuelles et solaires].*"

Dans un deuxième temps l'architecte simule deux contraintes visuelles à partir de deux bases (la zone de position potentielle des yeux des usagers en position assise au bureau et en position debout, derrière et sur le côté du bureau – cf. Figure 3-61).

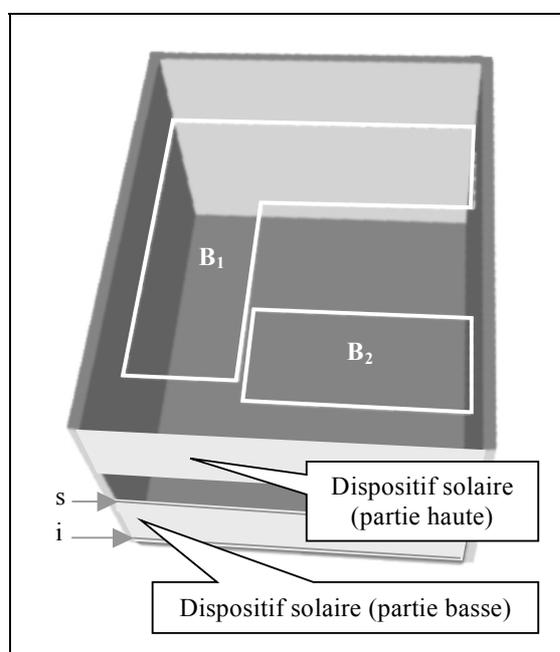


Figure 3-61 : Deux bases de contraintes visuelles pour prendre en compte le "*confort visuel des usagers*" en position debout à 1,60 m du sol (B₁) et en position assise à 1,30 m du sol (B₂). Les cibles de ces contraintes sont les espaces – espace inférieur (i) et supérieur (s) – afin de calculer un angle moyen des rayons visuels devant passer entre les lattes sans être gênés par l'épaisseur de celles-ci.

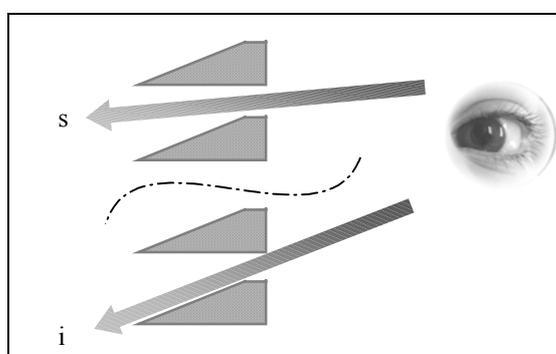


Figure 3-62 : Coupe est-ouest des lattes conçues par l'architecte et affinées par les simulations visuelles pour permettre les vues plongeantes vers l'extérieur entre chaque latte – partie basse du dispositif de protection solaire, à hauteur d'allège (s) et au niveau du sol (i).

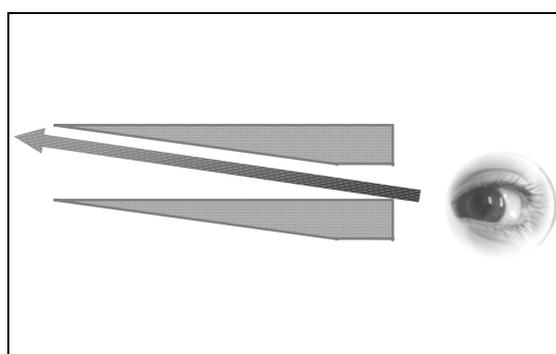


Figure 3-63 : Forme de latte envisagée puis abandonnée par l'architecte pour permettre les vues "montantes" vers l'extérieur entre les lattes – partie haute du dispositif de protection solaire.

Ces dernières simulations ont naturellement amené l'architecte à concevoir des lattes triangulaires à partir de la forme optimisée. *"Ça peut être intéressant de voir vers quelle forme [de latte] il vaut mieux s'orienter. Le cas le plus défavorable se situe là affirme-t-elle [devant la baie avec des rayons visuels qui s'éloignent de l'horizon, à environ 15° au-dessus ou au-dessous d'un plan horizontal passant par les yeux de l'utilisateur]... d'où l'intérêt peut-être d'une latte comme ça [cf. Figure 3-62]... oh, c'est génial, ou ça peut même être ça [cf. Figure 3-63]... bon, à empiler c'est pas génial"*. Puis l'architecte affine la position et les proportions de la base de contrainte visuelle en position debout. *"Dans la zone où il y a des taches solaires [correspondant à la partie non protégée du soleil où l'architecte a conçu un écran mobile pour protéger les usagers] je pense qu'il faut éviter [d'y placer la base de contrainte] affirme-t-elle. On ne va pas se mettre tout près de la façade, donc peut-être que l'on peut délimiter une base plus petite"*, ce qu'elle fait. Cela entraîne des modifications car les volumes de contraintes visuelles sont modifiés. L'architecte affine donc à nouveau la forme des lattes en coupe est-ouest. Au final, A3 n'a donc pas jugé nécessaire de garder une épaisseur constante sur toute la latte. Elle a décidé de biseauter cette dernière en respectant l'angle visuel moyen qui permet des vues plongeantes sur l'extérieur, entre les lattes de la partie basse du dispositif solaire. Les volumes de contraintes visuelles lui ont permis de visualiser rapidement et de mesurer en coupe est-ouest cet angle moyen. La latte conçue par l'architecte a donc une section triangulaire, qui ne modifie pas *"sa largeur basse"* et son épaisseur. L'architecte gardera finalement la version de lame brise soleil de la Figure 3-62 car des simulations d'éclairement intérieur réalisées indépendamment de nos simulations (avec le logiciel *Solène*) lui ont permis de conclure que cette version de latte apportait plus d'éclairement par réflexion que celle de la Figure 3-63 et plus encore que la version (1) non biseautée de la Figure 3-60 (jusqu'à 18 % d'éclairement supplémentaire sur le plan de travail [Meunier, Houpert et Brec 2002]).

Un des principaux constats sur cette observation est la recherche de compromis de l'architecte entre coût industriel (gain de matière, minimum de découpes et standardisation de l'ensemble des lattes) et fonctionnalité des lattes brise-soleil (empilement, bonne visibilité et protection solaire optimale). Ainsi, comme nous l'avons vu sur la Figure 3-60, l'architecte a encore apporté une modification d'ordre technique lors de notre dernière observation. Pour améliorer l'empilement des lattes hautes et des lattes basses du dispositif solaire, elle a laissé une partie plane sur leur surface supérieure. De plus, il lui a semblé impossible d'optimiser chaque latte selon sa position (hauteur de la latte par rapport au sol), car si en terme de protection solaire cette hauteur ne change pas l'angle des rayons solaires, en terme de visibilité, cette hauteur modifie

l'angle des rayons visuels. Il semble donc que les impératifs commerciaux et industriels n'ont pas permis d'arrêter une forme différente pour chaque latte, comme l'optimisation stricte le voudrait. Pour finir, A3 a décidé d'avoir un même type de lames sur tout le dispositif de protection solaire pour des questions de coût (standardisation des lames). Ces lames prennent donc en compte une valeur moyenne de l'inclinaison des rayons visuels calculée à partir des volumes de contraintes visuelles. L'architecte étant consciente que la protection solaire n'est pas nécessaire sur toute la façade, les simulations inverses lui ont permis de calculer exactement la surface à protéger ; celle où seront installées les lattes. Elle nous affirme que son but est de visualiser les parties du prototype de paroi (double peau) sur lesquelles elle devra "*absolument*" placer des lamelles brise-soleil afin de "*ne pas être ébloui par le soleil durant l'année*" depuis la zone de travail sélectionnée (base de la contrainte). En plan et en coupe, les rayons solaires représentés par les arêtes du volume de contrainte lui ont indiqué que ses intuitions de départ étaient assez proches de la réalité. En plan par exemple, les simulations inverses renforcent une de ses hypothèses qui était de limiter la protection solaire de la façade de la cellule aux deux tiers droits (vue de l'extérieur), afin de ne pas obstruer l'ensemble de la baie. Mais en vue perspective ou en élévation, la position inattendue du volume de contrainte par rapport à la baie (Figure 3-64 et Figure 3-65) semble étonner l'architecte. L'étonnement fut aussitôt suivi par la curiosité de voir le résultat de l'intersection du volume de contrainte avec la baie à des dates et heures fixes, afin d'en tirer le maximum d'informations. Signalons que la décomposition de la contrainte solaire annuelle en deux contraintes printemps / été et automne / hiver avait déjà permis à l'architecte de visualiser et de comparer l'importance des deux volumes correspondants (Figure 3-65).

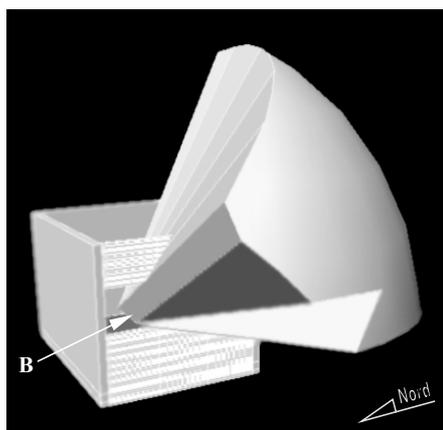


Figure 3-64 : Vue perspective de la cellule de bureau et du volume de contrainte solaire annuelle pour la base B.

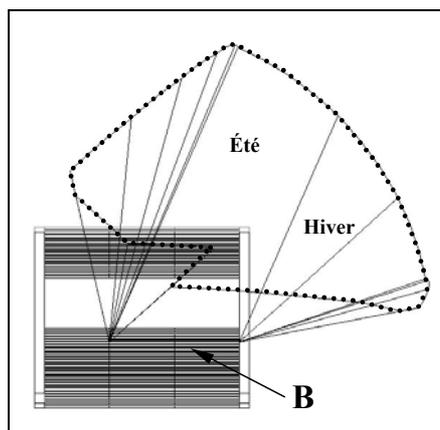
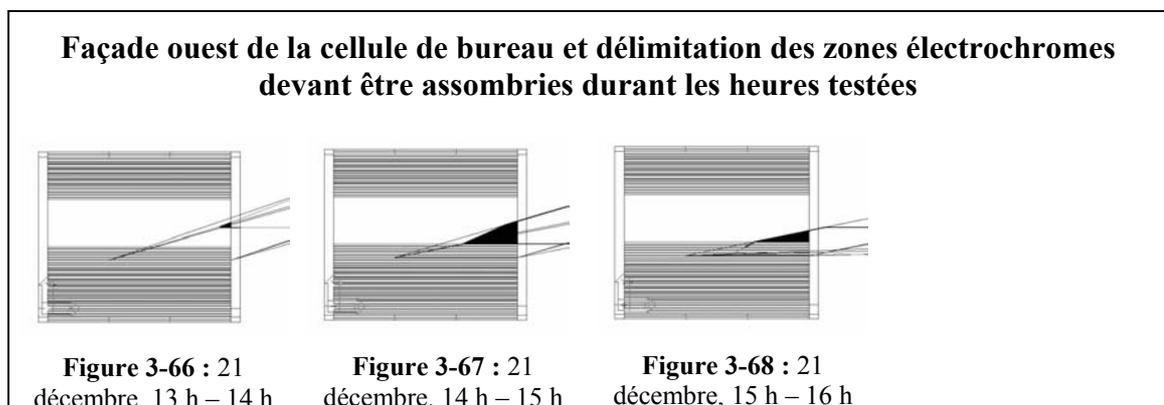


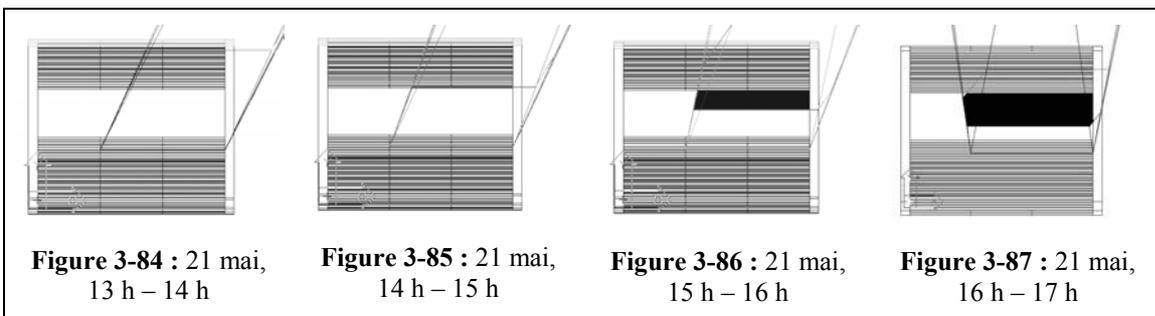
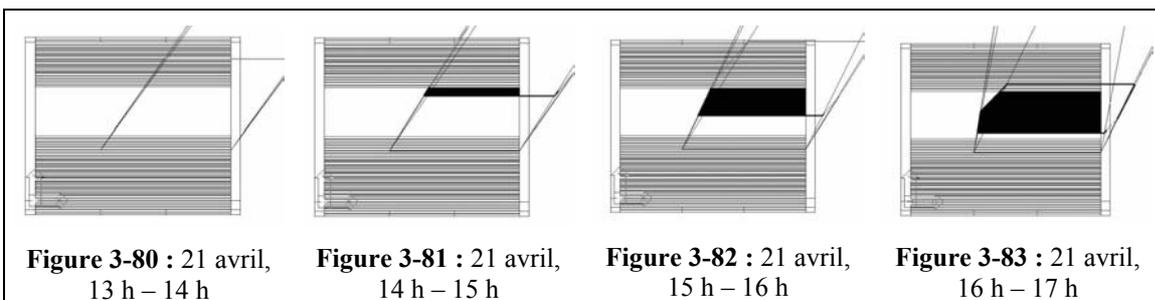
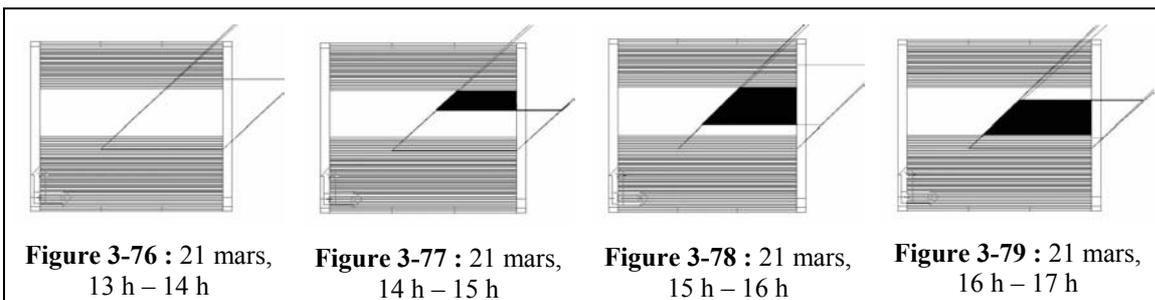
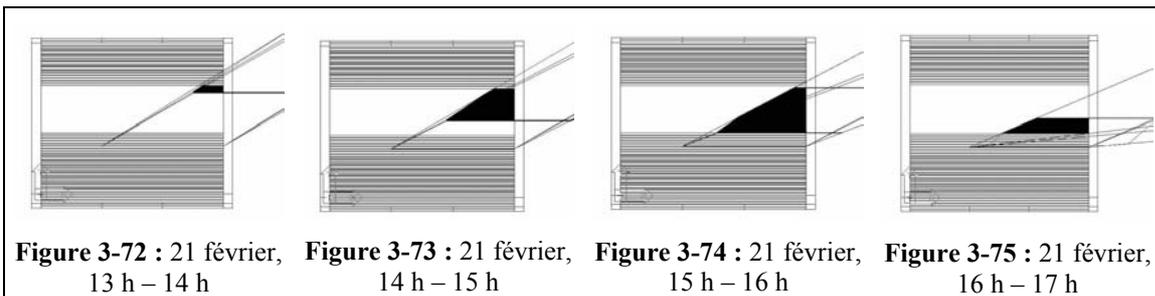
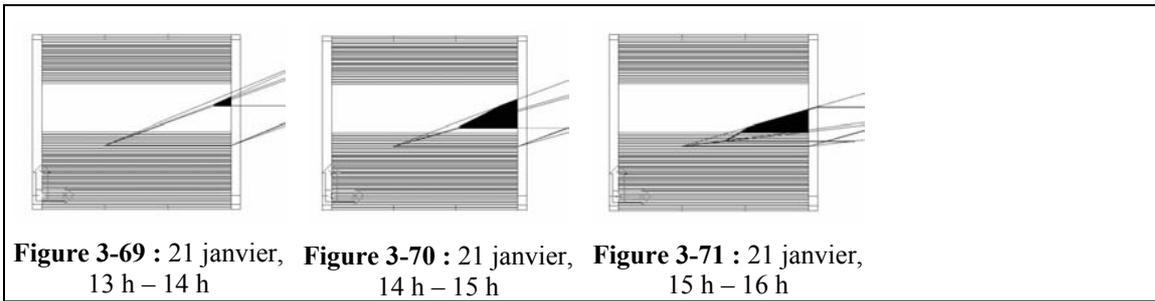
Figure 3-65 : Elévation ouest de la cellule de bureau et des deux volumes de contraintes solaires printemps / été et automne / hiver pour la base B.

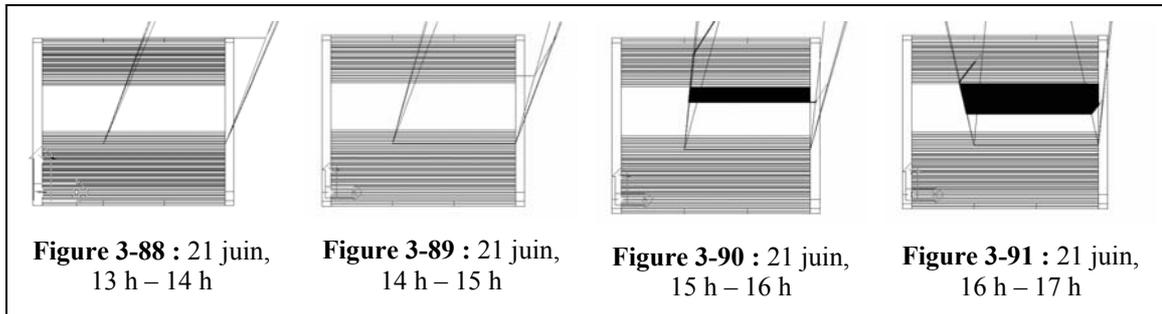
De la Figure 3-66 à la Figure 3-91 nous présentons le résultat de l'intersection des volumes de contraintes des heures indiquées dans les légendes, avec la baie vitrée de la cellule de bureau. Ainsi, l'ensemble de ces zones couvre la surface totale à protéger où se situeront les lattes brise-soleil. Les différentes figures répondent donc à une contrainte d'une durée d'une heure. L'architecte a pour cela, sélectionné la cible de quatre points représentée par la portion de la double trajectoire apparente du soleil durant une heure donnée (cf. Figure 3-106, § 3.3.6.2).

A3 interprète ces figures comme autant d'informations concrètes permettant de réaliser son deuxième objectif solaire qui consiste à protéger la partie horizontale et centrale de la baie grâce à l'utilisation d'un verre électrochrome [Meunier, Houpert et Brec 2002]. L'enthousiasme de l'architecte montre combien l'outil lui fut utile pour la conception de ce second dispositif architectural qu'elle avait imagé dans un premier temps sous la forme d'un module rectangulaire mobile sur la baie.

Le verre électrochrome découpé en un quadrillage a la propriété de s'assombrir lorsqu'il est soumis à un courant électrique, uniquement à l'intersection de ses lignes et de ses colonnes sous tension. A3 a donc réalisé que notre outil pouvait effectuer le calcul de zones électrochromes devant être assombries pour répondre exactement à la contrainte solaire de la partie centrale de la baie. Même si l'idée d'exploiter les propriétés du verre électrochrome ne s'est pas révélée à l'architecte grâce à la manipulation de notre outil informatique, celui-ci a au moins contribué à la mise en forme définitive de l'intention puis du dispositif. Au final, l'architecte aimerait utiliser les données heure par heure des figures suivantes pour programmer l'assombrissement optimal du verre électrochrome de la partie centrale de la baie.







Il semble donc se confirmer que notre outil déclenche chez les concepteurs : soit directement des intentions nouvelles non envisagées avant de commencer les observations, soit des concepts qui confortent les intentions de départ. Dans le cas présent, la discrétisation des journées d'ensoleillement par pas de temps d'une heure (unité de base pour notre modèle de voûte solaire) semble être l'élément qui a déclenché chez A3 la conception d'un dispositif électrochrome optimal.

3.3.5.7 La hiérarchie et l'emprise des volumes de contraintes

Revenons un instant sur le cas des étudiants en troisième année d'architecture. Ces trois concepteurs ont utilisé notre prototype comme un outil d'aide à la conception architecturale pour esquisser une volumétrie qu'ils ont aussitôt interprétée comme une masse végétale capable de masquer le soleil en été mais pas en hiver (peupliers de Lombardie – arbres à feuilles caduques). Notre outil apparaît donc comme un "déclencheur" d'intentions de conception. Ici par exemple, la forme et les dimensions de l'écran calculé semblent avoir inspiré une forme végétale aux concepteurs, mais ces derniers ont dû vérifier si le recul par rapport à la façade était suffisant pour des arbres de cette envergure. S'apercevant qu'un premier écran passant par le centre de la terrasse sud-ouest (point d'accrochage de l'écran), ne permettait pas un recul suffisant pour une masse végétale de 12 mètres de haut (altitude prise avec la fonction *distance* du modèleur), les concepteurs ont décidé de reculer l'écran à 4,75 mètres de la façade (angle sud-ouest de la terrasse – point d'accrochage de l'écran). Puis ils ont mesuré l'envergure du nouvel écran. Les 19,29 mètres de haut ont inspiré la conception d'une masse végétale très élancée et de croissance rapide, de type peupliers. C'est bien la forme pointue et très haute de l'écran qui a révélé aux concepteurs l'idée de masse végétale, alors que leurs premières esquisses (d'après des tracés solaires faits à la main) prévoyaient plutôt un prolongement de la façade sous la forme d'un portique. Mais nous

le voyons sur cet exemple, le logiciel *SVR* ne propose pas de solutions "clé en main" évidentes et définitives, il propose uniquement la solution optimale sous forme d'un volume. Après, l'architecte doit interpréter, manipuler et redessiner une solution architecturale, urbaine, paysagère ou plastique qui "tienne debout". Le logiciel semble être avant tout une aide à la représentation de contraintes projectives. Rappelons que seule la verticalité de l'écran fut choisie par les concepteurs. Le volume de contrainte orienté au sud-ouest (période solaire estivale de milieu d'après-midi, choisie comme cible) a quant à lui, incité ces concepteurs à orienter l'écran vertical au sud-ouest pour obtenir une surface protectrice minimale (selon eux). S'ils avaient privilégié l'alignement de la façade (soit ouest, soit sud), il est très probable que l'écran solaire aurait été conçu comme un élément de façade à part entière, ce qui était leur première intention. L'important n'est pas de savoir quel aurait été le résultat architectural si l'orientation et le point d'accrochage avaient été différemment choisis par les concepteurs (solution moins paysagère, plus architecturale...), mais bien de retenir l'effet "révélateur d'intentions projectives" que semble déclencher notre outil informatique.

Pour finir sur cet exemple, il semble aussi que la vue 3D du volume de contrainte simulé, prenant en compte l'intégration dans le temps (simulation inverse), ait permis aux concepteurs de mieux appréhender dans son ensemble, l'évolution des rayons solaires dans la journée (ici l'après-midi). En effet, dans un premier temps lors de la phase de test avec les *Outils Solaires* et à partir d'un croquis en coupe est-ouest, ils ont pris en compte uniquement les rayons solaires provenant de l'ouest alors que dans un deuxième temps le modèle de voûte solaire que nous proposons les a forcé à s'interroger sur la direction possible des rayons solaires. Ils ont d'ailleurs affiné leur période solaire cible en estimant qu'avec le décrochement de la façade, les rayons à midi solaire ne pouvaient pas pénétrer dans la salle à manger. Cette révélation de contrainte a une incidence directe sur le projet (taille de l'écran, importance donnée à la contrainte solaire par rapport à d'autres contraintes...) mais elle a aussi un effet indirect car elle n'a pas révélé d'objet pouvant être conçu. Nous pourrions plutôt classer cet effet révélateur dans le champ de la pédagogie, car il aide à comprendre certains phénomènes ou certaines notions, tandis que les effets présentés précédemment sont réellement dans le champ de l'aide à la conception architecturale assistée par ordinateur (CaAO).

Pour finir cette section, nous analysons les observations réalisées avec le groupe d'étudiants en cinquième année d'architecture. Comme nous l'avons dit précédemment les cartes d'accessibilité visuelle ont un effet pédagogique certain (aide à la représentation de l'intervisibilité dans une scène donnée - ici le secteur sauvegardé de Nantes et le projet de rénovation du musée Dobrée). Elles révèlent aux concepteurs des contraintes potentielles et influencent donc la conception de l'architecte.

Pour autant nous ne dirons pas qu'elles ont un effet "révélateur d'intentions projectives" puisque dans ce cas, l'effet révélateur a plutôt été déclenché par les différents volumes de contraintes visuelles. En effet, le modelage des volumétries du projet semble être le fruit de compromis entre les premières esquisses volumiques des concepteurs (structure acier poteaux et poutres avec un ensemble de "*boîtes tiroirs*" insérées plus ou moins en porte-à-faux dans la structure – voir Figure 3-92) et les quatre volumes de contraintes réalisés (Figure 3-93).

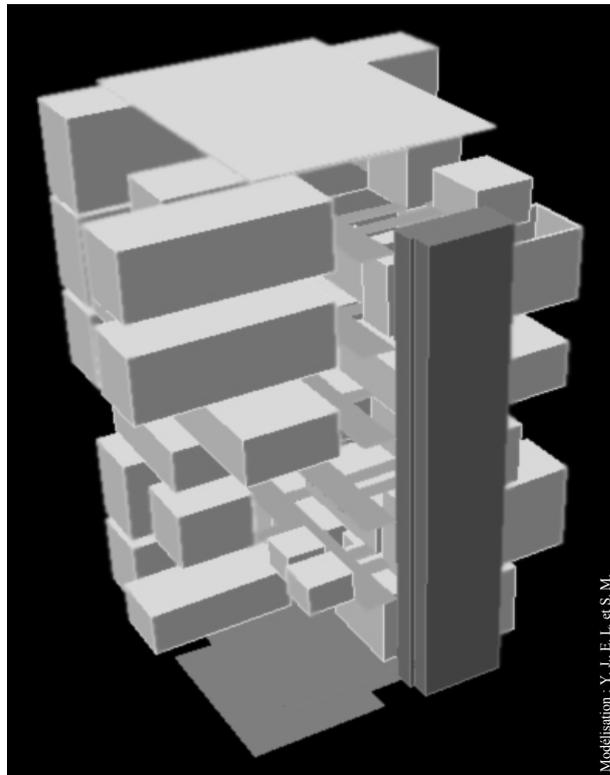


Figure 3-92 : Projet du nouveau musée Dobrée à Nantes. Premières esquisses volumétriques réalisées par les étudiants de 5^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes. Sur cette vue, l'absence de la structure permet de mieux voir le système de "*boîtes tiroirs*" qu'ils proposent.

Les cartes d'accessibilité visuelle ont révélé aux concepteurs des contraintes visuelles potentielles puis leur ont permis de réaliser une première analyse de leurs esquisses, sous forme de simulations. En ce sens, elles ont influencé leur choix de contraintes visuelles.

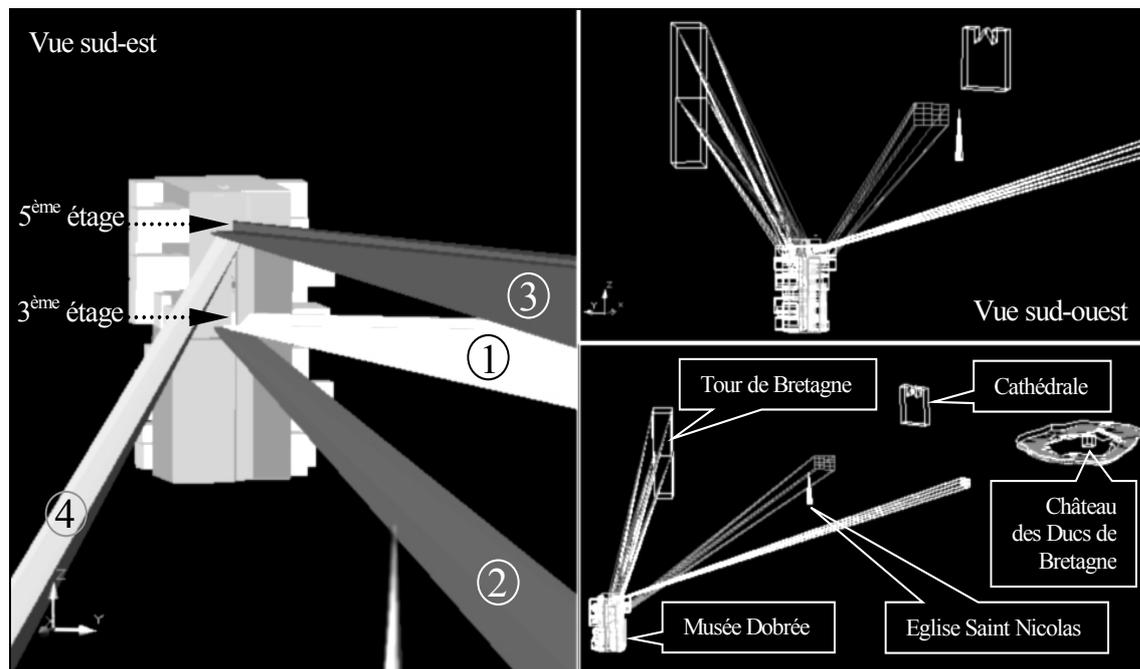


Figure 3-93 : Trois vues axonométriques du projet de musée Dobrée dans son environnement nantais (présence sur le même calque des cibles visuelles sélectionnées que sont la Cathédrale, la Tour de Bretagne et le Château des Ducs de Bretagne). 1 : volume de contrainte sur la Tour de Bretagne depuis la coursive du 3^{ème} étage. 2 : volume de contrainte sur la Cathédrale depuis la coursive du 3^{ème} étage. 3 : volume de contrainte sur la Tour de Bretagne depuis la coursive du 5^{ème} étage. 4 : volume de contrainte sur le Château des Ducs de Bretagne depuis la coursive du 5^{ème} étage.

"Vu les proportions que nous avons données à notre musée, soixante-dix mètres de haut, on devrait faire de la concurrence à la Tour de Bretagne" affirmaient-ils avant de commencer les simulations. Mais comparé à cette tour signal et emblématique de Nantes, le musée projeté n'était visible, dans le secteur sauvegardé de Nantes, que depuis des axes de circulation très larges (cf. Figure 3-18, § 3.3.1.8– Cours des cinquante otages et Cours Franklin Roosevelt) ou des façades très hautes (cf. Figure 3-19, § 3.3.1.8 – Tour de Bretagne, Château des ducs de Bretagne, Cathédrale, Eglise Saint-Nicolas...) Les étudiants en architecture se sont donc mis d'accord pour retenir quatre contraintes visuelles majeures sur la ville depuis leur projet de musée : des vues depuis deux coursives en T aux 3^{ème} et 5^{ème} étages du musée, vers la moitié supérieure de la Tour de Bretagne (l'ensemble des 140 mètres de façade de cette tour nantaise leur semblait une cible de contrainte trop importante), puis sur la Cathédrale de Nantes depuis la coursive du 3^{ème} étage, et enfin des vues depuis le tiers sud-est de la coursive du 5^{ème} étage (base rectangulaire) vers le Château des Ducs de Bretagne (cf. Figure 3-93).

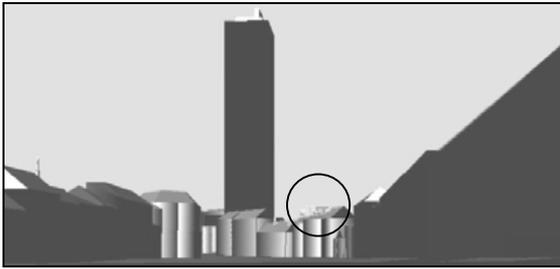


Figure 3-94 : Vue perspective de la modélisation du projet de musée Dobrée à Nantes, depuis une des zones retenues sur la carte d'accessibilité visuelle (A de la Figure 3-18).



Figure 3-95 : Insertion de la modélisation du musée Dobrée à partir de la figure précédente. Vue *in situ* depuis l'angle de la rue Bellamy et du Cours des cinquante otages à Nantes.

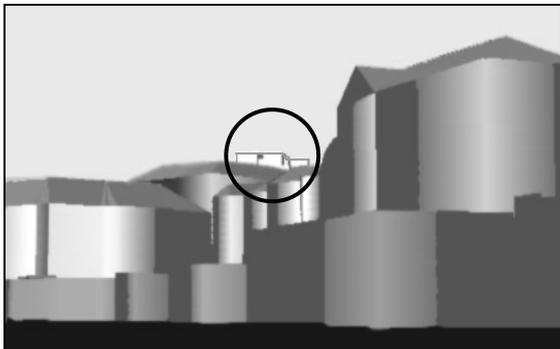


Figure 3-96 : Vue perspective de la modélisation du projet de musée Dobrée à Nantes, depuis la deuxième zone retenue sur la carte d'accessibilité visuelle (B de la Figure 3-18).



Figure 3-97 : Vue *in situ* depuis le même angle de vue que la figure précédente – Cours Franklin Roosevelt, arrêt Commerce du tramway.

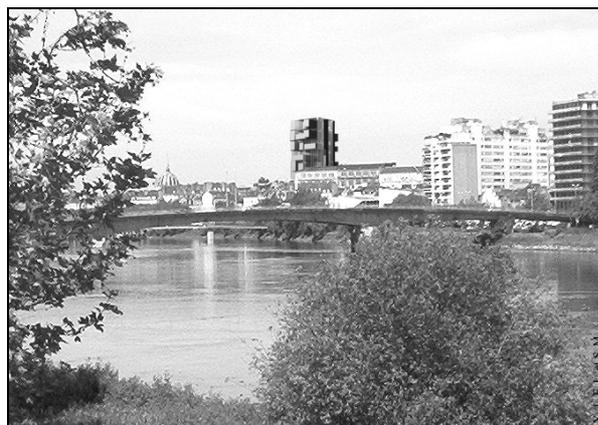


Figure 3-98 : Insertion de la modélisation du musée Dobrée dans le paysage nantais. Vue *in situ* depuis le Pont du Général Audibert.



Figure 3-99 : Insertion du projet de musée Dobrée sur une vue *in situ* depuis la place Jean V. Première orientation souhaitée par les étudiants avant la séance d'observation.



Figure 3-100 : Insertion de la nouvelle orientation du musée, après simulation par les étudiants des volumes de contraintes visuelles. Le résultat fut obtenu par rotation de la modélisation d'un angle de 33° calculé par les étudiants. Cet angle correspond en plan de masse à un angle moyen entre les différentes solutions de contraintes visuelles depuis les coursives vers les cibles.

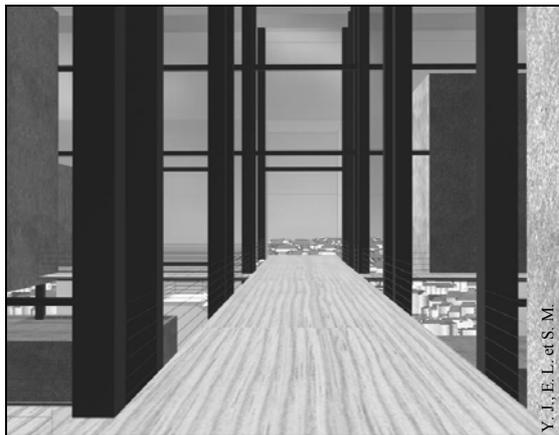


Figure 3-101 : Vue sur le centre de Nantes depuis la dernière coursive du projet de musée, avant la simulation des volumes de contraintes et la décision des étudiants de faire pivoter leur projet de 33° vers la gauche.

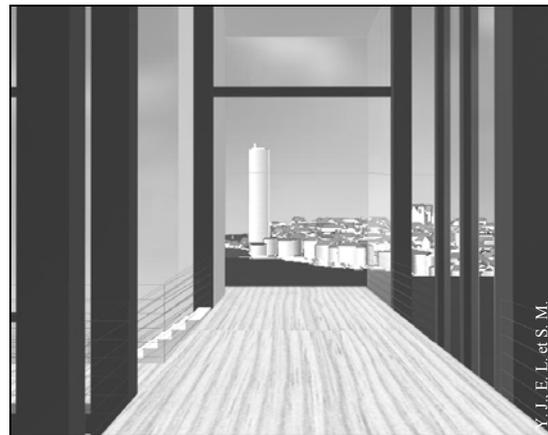


Figure 3-102 : Vérification de la nouvelle vue depuis la dernière coursive du musée. La contrainte visuelle sur la Tour de Bretagne est pleinement satisfaite sur cette image.



Figure 3-103 : Vue sur le centre de Nantes depuis le 3^{ème} étage du projet de musée, avant la décision des étudiants de faire pivoter leur projet de 33° vers la gauche.



Figure 3-104 : Vérification de la nouvelle vue depuis le 3^{ème} étage du projet de musée. Les contraintes visuelles sur la Tour de Bretagne et la Cathédrale sont pleinement satisfaites sur cette image virtuelle.

La recherche de points de vues sur le musée depuis le secteur sauvegardé de Nantes, à partir d'une carte d'accessibilité visuelle, a éveillé la curiosité des étudiants qui ont vérifié *in situ* leurs résultats. Les photographies qu'ils ont prises leur ont montré l'importance de la prise en compte de la végétation dans les simulations directes de la visibilité (voir Figure 3-95 et Figure 3-97). Cela leur a donc révélé des intentions visuelles nouvelles. Ainsi après ce travail, il n'était plus question pour les concepteurs de revendiquer la "concurrency" visuelle de leur projet avec la Tour de Bretagne de Nantes. Le "signal" que devait représenter leur projet ne pouvait s'imposer dans le paysage nantais que depuis les rives de la Loire (Figure 3-98) ou au pied de l'édifice.

A l'évidence, les quelques vues sur le musée identifiées au centre ville par les simulations, ne peuvent exister qu'en hiver, lorsque les platanes du Cours Franklin Roosevelt ont perdu leurs feuilles (voir Figure 3-97). Les étudiants ont donc adapté leur discours avec ces premières conclusions, afin d'argumenter le jour de la présentation de leur projet, sur le fait que le musée est fait avant tout pour montrer de l'intérieur, le monde extérieur. Nous pourrions parler là, de révélateur d'intention par défaut, puisque à défaut d'avoir découvert une idée nouvelle, les simulations ont révélé aux concepteurs

la réalité située du projet. La principale révélation dans cette phase de conception fut la décision des étudiants de modifier l'implantation générale du bâtiment afin de satisfaire aux quatre contraintes visuelles émises (Figure 3-93). Cette décision fut prise à l'unanimité par les étudiants et de façon naturelle, après avoir modélisé les quatre volumes de contraintes.

Le premier volume de contrainte visuelle modélisé par les concepteurs présentait une intersection apparente avec la cage d'escalier et deux "boîtes" du 3^{ème} étage. La réaction d'un des concepteurs fut alors : *"on peut peut-être décaler l'escalier"*. L'étudiant E22 répondit alors à E21 : *"si on pivote le bâtiment, on aura... toutes les boîtes"* [puisqu'elles-ci seront du même coup décalées et ne seront donc plus intersectées par le volume de contrainte]. L'idée est bien reçue par les deux autres concepteurs. E21 fait remarquer que de toute façon, *"ça ne change pas grand chose par rapport à l'orientation, vis-à-vis des alentours, vis-à-vis de la petite place qui est devant [Place Jean V]... on tourne légèrement... comme on était sur un plan d'eau déjà, on était assez libre [plan de masse et implantation au stade des premières esquisses]"*. Les concepteurs s'interrogent alors sur la nécessité de déplacer la "boîte" nord-est qui gêne une partie des vues sur la Tour de Bretagne. Ils interprètent alors la contrainte volumique selon l'importance de l'intersection entre son volume et la scène (voir Figure 3-37, Figure 3-38 et Figure 3-39, § 3.3.2.4). La "proportion" d'intersection par rapport à la totalité d'une section du volume, leur indique s'il est possible de satisfaire à la contrainte sans modifier fondamentalement leur esquisse de départ ou si celle-ci est totalement irréaliste (suppression d'éléments porteurs...). Le concepteur E22 déclare alors : *"les boîtes, ... pour retailler dedans [leur soustraire le volume de contrainte] ou même les reculer, ça va être difficile... et encore que... on peut peut-être la pousser un peu mais pas la pousser d'autant [4 mètres de porte-à-faux supplémentaires pour satisfaire à la contrainte]"*. *"Oui mais si on tourne un peu le bâtiment, enchaîne E21, on peut peut-être la décaler un peu..."*. Enfin E22 en déduit que *"si on tourne suffisamment, ça n'aura plus lieu d'être..."*. La solution semble alors trouvée lorsque le troisième concepteur E23 intervient : *"en fait, avant, il faudrait essayer sur la Cathédrale pour voir si... [le deuxième et dernier volume de contrainte ayant pour base la même coursive du 3^{ème} étage, ne contredit pas la solution précédente]"*. C'est ainsi qu'est née l'intention de tourner le musée sur lui-même vers la gauche en plan de masse. L'angle moyen pour répondre aux quatre contraintes à la fois, fut calculé lorsque les quatre volumes de contraintes furent modélisés (Figure 3-93). E23 propose de *"calculer l'angle entre [les volumes de contraintes visuelles], pour voir... de combien on doit tourner le bâtiment..."*. *"On va faire une moyenne"* affirme-t-elle. L'angle moyen entre la normale de la façade et les volumes de contraintes est calculé avec la fonction distance du modeleur. E21 interroge ses deux autres collègues : *"quarante et un plus vingt-cinq*

[degrés] divisés par deux, c'est ça ?" Le bâtiment est finalement tourné de 33° sur sa base de façon à réduire au maximum l'intersection des volumes de contraintes avec la cage d'escalier (voir Figure 3-99 et Figure 3-100). "*C'est pas trop mal ça...*" affirment-ils en remarquant tout de même qu'un volume de contrainte semble encore être intersecté par la cage d'escalier nord-est malgré la rotation du musée (voir Figure 3-39, § 3.3.2.4). E23 interroge ses collègues : "*l'escalier... il ne peut pas venir dans ce sens là ? Ah non ça va gêner ! Oui ça va gêner*". Mais après quelques secondes de réflexion, E22 déclare : "*on peut peut-être le reculer [l'escalier]*". E23 demande à voir. Finalement une décision complémentaire à la rotation du projet est prise ; l'escalier est reculé de quelques centimètres sans que cela pose de problème structurel ou fonctionnel pour le musée.

Dans cette observation d'étudiants en phase d'avant-projet, il semble donc que les volumes de contraintes aient été les principaux révélateurs d'intentions conceptuelles. Leur emprise et leur position en trois dimensions ont renseigné les concepteurs sur l'importance des contraintes respectives. Toutefois, la hiérarchie des volumes de contraintes (du moins contraignant au plus contraignant) a permis aux étudiants de prendre conscience qu'ils avaient là un argument pour défendre un concept fort. En effet, en réfléchissant à cette hiérarchie des cibles visées, l'étudiant E21 eut l'idée de classer les collections du musée dans un ordre croissant (du premier étage au dernier) selon les vues possibles sur les cibles visuelles. Ainsi les collections classées par périodes correspondraient aux dates de construction des bâtiments vus depuis les coursives. Au premier étage, une collection contemporaine serait associée à une vue contre-plongante sur la Tour de Bretagne, puis les niveaux supérieurs accueilleraient des collections bien plus anciennes et des vues sur la Cathédrale et le Château des Ducs de Bretagne. Certes, l'idée de classer de manière chronologique les collections par époques et par étages (premier étage, première époque...) fut mise en œuvre par les étudiants dans la phase d'Avant-Projet Sommaire (APS), c'est-à-dire avant cette phase d'observation pouvant correspondre à un Avant-Projet Définitif (APD). Mais le concept d'inverser l'ordre de découverte des collections (pour "*découvrir parallèlement et graduellement les périodes de la ville*" grâce aux vues ciblées sur celle-ci depuis les coursives du musée, semble être né au moment de la manipulation des volumes de contraintes. Le fait que les trois étudiants n'aient pas eu l'idée d'inverser la chronologie des collections lors de leurs premières esquisses afin d'y faire correspondre une graduation des vues sur la ville, mais que cette idée soit née précisément lors de l'utilisation de notre outil montre qu'au minimum l'outil les a forcés à s'interroger sur le choix des contraintes visuelles, et qu'ensuite leur raisonnement a abouti à ce concept de graduation. Mais il semble aussi que l'approche très graphique de notre outil leur ait

révélé rapidement l'envergure et la hiérarchie des contraintes choisies. Ensuite la mise en forme de l'idée même de graduation des vues semble avoir comme origine une image sur laquelle le concepteur s'est arrêté, car parmi l'infinité de vues virtuelles qu'a manipulée le concepteur en utilisant la *vue orbitale* du modeleur, certaines accentuaient plus l'idée de hiérarchie que d'autres.

3.3.6 L'adaptation aux situations imprévues

3.3.6.1 L'adaptation aux matériels

Signalons tout d'abord que nous n'avons pas eu de difficulté pour installer notre macro sur une version espagnole d'*AutoCAD2000* (agence A1) puisque les fonctions d'accès à la macro et d'ouverture de celle-ci sont placées dans le menu principal du modeleur au même endroit, que ce soit pour la version espagnole ou pour la version française. L'architecte A1 parlant couramment le français, il n'a pas été utile de traduire le texte de notre interface.

Une des premières situations imprévues rencontrées dans l'agence A1 fut l'absence de molette sur la souris de l'ordinateur utilisé par l'architecte. Cette molette qui en temps normal permet rapidement de zoomer ou de se déplacer dans une fenêtre du modeleur sans utiliser les icônes "zoom" ou "panoramique", permet surtout au concepteur d'utiliser ces fonctions lorsque notre outil tourne, sans interrompre les calculs de volumes de contraintes par exemple. Ainsi l'architecte gagne en ergonomie de travail. L'architecte A1 a donc adapté ses habitudes pour utiliser au mieux l'outil que nous lui proposons. Il a simplement fait attention à cadrer les fenêtres du logiciel mère sur les éléments qu'il était certain d'utiliser avec notre outil. S'il le fallait, il créait une fenêtre supplémentaire pour avoir à l'écran, "*sous la main*", l'ensemble des éléments utiles au calcul de volumes de contraintes solaires. L'architecte a donc contourné un handicap qui aurait pu être fatal à l'utilisation de notre outil. Ceci illustre la flexibilité du logiciel mère et l'habitude du concepteur à faire face à des situations imprévues en CAO. Cette situation fut unique car les autres concepteurs observés, soit utilisaient notre ordinateur portable, soit connaissaient et utilisaient déjà avant notre rencontre la molette de leur souris à l'exception près de l'architecte A3 qui a compris dès le premier obstacle, la nécessité de l'utilisation de la molette.

3.3.6.2 La flexibilité du modèle de voûte solaire

Dans sa démarche de test sur l'îlot Boucherie pour des périodes clés de l'année, l'architecte A4 a voulu simuler l'ensoleillement de la vitrine du salon de coiffure situé au voisinage nord de l'îlot, le 21 décembre de 14 h à 15 h (correspondant à "une heure passée chez le coiffeur" – cf. Figure 3-105). Or, *SVR* a été conçu initialement pour simuler des périodes solaires annuelles dépassant largement la journée afin de représenter les phénomènes solaires et visuels en 4D (intégration du temps dans l'espace). L'outil n'ayant pas été conçu pour calculer des volumes de contraintes solaires pour une journée uniquement, l'adaptation de l'architecte à cette situation imprévue n'était pas certaine. Ainsi, le concepteur devant sélectionner une portion de l'hémisphère céleste en cliquant sur les points qui la délimite, il aurait été impossible de sélectionner une portion de la trajectoire solaire le 21 décembre de 14 h à 15 h (uniquement un segment et non plus une surface) si le modèle de voûte solaire n'avait pas pris en compte l'épaisseur apparente du soleil en représentant les trajectoires solaires par des doubles traits. En effet une telle représentation a permis à l'architecte de sélectionner les quatre points qui délimitent le contour extérieur de la double trajectoire solaire du 21 décembre entre 14 h et 15 h comme le montre la Figure 3-106. Dans ce cas, la période solaire traduite dans notre modèle par une surface de la voûte céleste, se résume à la surface ABCD, reconnue comme la cible de la contrainte solaire posée par l'architecte.

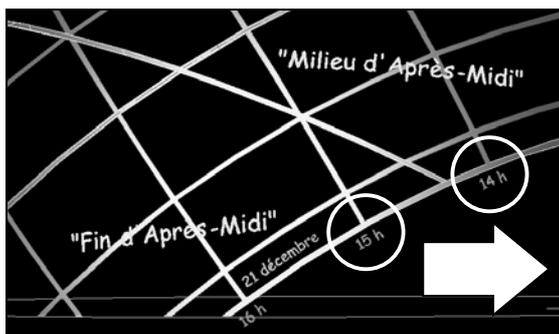


Figure 3-105 : Sélection d'une période solaire limitée à une seule heure le 21 décembre de 14 h à 15 h.

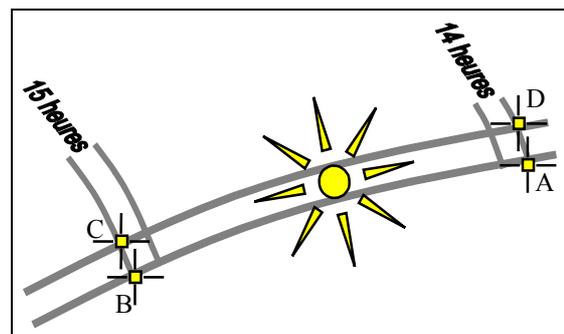


Figure 3-106 : Saisie de la période solaire limitée à une heure de 21 décembre. L'architecte saisit simplement les quatre points A, B, C et D positionnés sur la double trajectoire du soleil le 21 décembre. La double trajectoire correspond à l'épaisseur apparente du soleil.

Le concepteur s'est visiblement posé moins de question sur cet obstacle que l'observateur et auteur du logiciel qui n'avait pas envisagé un cas de figure aussi restreint. L'obstacle s'est donc traduit par une proposition du concepteur pour essayer une sélection des points extérieurs (ABCD sur la Figure 3-106).

Le modèle de voûte solaire fut aussi l'objet d'une interrogation de l'architecte A3 face à une situation imprévue d'oubli de limiter ce modèle aux seules parties "visibles" depuis la base de contrainte. Après avoir créé une voûte solaire pour la latitude de Nantes ($47,2^\circ$), l'architecte nous a interrogé sur la possibilité de revenir sur l'option de limitation de celle-ci qui consiste à supprimer la partie des périodes solaires qui ne peuvent être choisies comme cible d'une contrainte (situées derrière la base si celle-ci est verticale ou oblique). Dans son cas, la base de contrainte étant une partie d'une baie orientée à l'ouest, la voûte solaire aurait dû être limitée au demi-hémisphère ouest dès la phase de création de ce modèle. Ce fut un oubli de la part de l'architecte. Pourtant, cette situation imprévue n'a pas posé de problème pour la suite de l'observation car nous avons proposé à cet architecte en attente de réponse, d'utiliser les fonctions du logiciel mère pour réduire le modèle aux seules périodes solaires ouest. L'architecte A3 aurait pu relancer notre outil afin de recréer un modèle de voûte solaire, mais elle s'est adaptée avec nous à la situation. Cette adaptation a été possible parce que notre modèle est un objet *AutoCAD* solide (solide 3D) qui peut donc être coupé comme tout autre solide du logiciel mère. Nous avons donc pu remarquer que d'un point de vue didactique, notre modèle avait l'avantage de mieux représenter la scène dans son espace environnant. L'architecte a ainsi pris conscience visuellement des seules périodes solaires élastiques susceptibles de provoquer des apports solaires sur la baie ouest, en se questionnant sur la manière dont allait être délimité le modèle de voûte solaire, au lieu de subir cette délimitation (si l'opération avait été faite par *SVR*) sans en vérifier l'exactitude. La manipulation de la demi-voûte solaire ouest a visiblement été très rapide, montrant ainsi que la notion de délimitation en deux demi-voûtes solaires était assez simple à se représenter. Or, si la baie avait été orientée au sud-sud-est ou à 43° ouest par exemple, cela aurait été probablement encore plus utile au concepteur. Dans tous les cas, cela montre que notre modèle s'adapte bien à une utilisation 3D, faisant de lui un abaque solaire en trois dimensions. Nous avons observé que l'architecte A3 utilisait aussi une vue en plan pour vérifier que la découpe du modèle de voûte solaire s'était bien effectuée selon un plan vertical ouest (ligne de coupe nord-sud en plan). Le concepteur a ainsi pris l'habitude par la suite de vérifier que l'outil informatique entre ses mains ne réalisait pas d'erreur d'interprétation de ses données d'entrée (points de la base délimitant la partie de la voûte solaire visible), ce qui lui permettait de comprendre en même temps quelles étaient les seules périodes solaires potentiellement source d'apports solaires. Toujours soucieuse de vérifier la logique des résultats de ses très nombreuses

simulations, l'architecte A3 fut amenée à évaluer si les rayons solaires au 21 du mois m à l'heure h étaient ou non plus gênants que les rayons solaires au 21 du mois m' à l'heure h' . Or comme les résultats de ses simulations lui semblaient illogiques par rapport à ses intuitions, elle semblait bloquée. Cette situation de recherche d'erreur potentielle a pu être résolue grâce à la mesure de certaines altitudes sur le modèle de voûte solaire. Ainsi, A3 a pu vérifier quelles étaient les dates (heures et mois) les plus "néfastes" d'un point de vue solaire en relevant les altitudes des points $p(m,h)$ et $p'(m',h')$. Ceci fut possible car le logiciel mère donne ce type d'information lorsque le concepteur clique sur les points du modèle de voûte solaire. L'altitude n'est alors autre que la hauteur du soleil pour la date donnée. Ainsi comme avec un diagramme solaire 2D, l'architecte avait sur le modèle de voûte solaire, la solution à ce qu'elle recherchait : la hauteur du soleil le 21 mars à 17 h est plus importante que celle du 21 décembre à 15 h. L'architecte a su s'adapter à une situation imprévue car notre modèle de voûte solaire est avant tout un diagramme solaire 3D qui possède une multitude de renseignements exploitables grâce aux fonctionnalités du modéleur.

3.3.6.3 La flexibilité du logiciel *AutoCAD*

Parmi les exemples de situations inattendues dans le cadre de nos observations d'approche inverse des simulations, signalons le problème posé par les étudiants en cinquième année à l'Ecole d'Architecture de Nantes. Il s'agissait pour les concepteurs E21, E22 et E23 de visualiser dans un premier temps les cibles visuelles potentielles depuis le sommet de leur projet de musée. Or, mise à part le détournement de la fonction "masques environnants" de notre outil afin de visualiser et positionner des cibles visuelles d'après une ou plusieurs photographies *fish-eye*, il est impossible à notre outil de répertorier toutes les cibles potentielles. D'ailleurs, même cette technique aurait obligé nos concepteurs à prendre une photographie *fish-eye* à soixante-dix mètres de haut (hauteur du projet). Par définition, un projet n'étant pas encore réalisé, cela leur était impossible. La solution aurait pu être l'utilisation du logiciel mère pour visualiser une à une les différentes faces de la ville (façades, rues, toitures...) depuis le sommet du projet. Cela aurait été extrêmement fastidieux. Une autre solution aurait pu être de choisir uniquement les cibles visuelles sûres comme les flèches d'une église, le sommet de la Tour de Bretagne... Nous avons donc décidé d'intervenir pour proposer une méthode de simulation de l'accessibilité visuelle. Cette méthode utilisée avec le logiciel *Solène* [Morin 1995] n'était pas *a priori* adaptée à notre environnement de modélisation. Or, dans le cas présent, cette méthode a permis aux concepteurs E21, E22 et E23 de

sortir de l'impasse que constitue la recherche de cibles visuelles potentielle. Le choix de l'environnement *AutoCAD* s'est donc avéré plutôt pratique pour s'adapter à cette situation imprévue. Rappelons que les résultats de la simulation de l'accessibilité visuelle ont révélé que sur l'ensemble du secteur sauvegardé de la ville, seules trois zones de circulation et quelques façades laissaient échapper des vues sur le sommet du musée et inversement.

3.3.6.4 Le format numérique des documents de travail des concepteurs

Nous relatons aussi une situation imprévue qui aurait pu empêcher toute séance d'observation mais qui illustre finalement la souplesse d'utilisation de notre outil dans son environnement de modélisation. Il s'agit de l'observation de l'architecte A4 à la Mairie de Niort, qui avait affirmé avant notre séance d'observation, que le test de conception serait réalisé sur une volumétrie du bâtiment de la Mairie de Niort, enregistrée au format *AutoCAD* (.dwg). Or, le jour de l'observation, seul un plan de ce bâtiment était disponible. Outre le fait que la volumétrie espérée pour réaliser nos observations n'était pas disponible, le plan support de cette volumétrie était issu du logiciel *DesignCAD* et n'était donc pas reconnu par notre environnement de modélisation. Le plan était donc *a priori* inexploitable par notre prototype. Or, même si le logiciel *AutoCAD* possède quelques lacunes et inconvénients, son implantation très large dans les services des collectivités et de l'État en font un outil incontournable. De ce fait, la plupart des logiciels de DAO ou CAO permettent un enregistrement de leurs fichiers au format .dwg. *DesignCAD* fait partie de ces logiciels. L'obstacle imprévu de départ fut donc rapidement contourné en extrudant les murs des pièces sur lesquelles portait la conception (cf. Figure 3-9 et Figure 3-10, § 3.3.1.3). Ainsi la modélisation de la volumétrie, même sommaire a permis à l'architecte de concevoir une nouvelle configuration de la pièce en utilisant notre outil. La contrainte visuelle définie, le travail de conception a pu commencer sans problème. Dans le contexte de l'observation de praticiens n'ayant généralement que très peu de temps à consacrer à ce type de test, il fut intéressant de constater que les outils qu'ils utilisaient, pouvaient s'adapter à un obstacle de ce type.

3.4 Complément personnel d'utilisations applicatives

Nous avons nous-même réalisé des tests durant la phase de développement du logiciel afin de valider ou d'amender certains choix de programmation. Nous nous sommes efforcés d'exploiter systématiquement toutes les options de notre outil et de corriger ce qui n'allait pas dans le sens d'un logiciel intuitif. Nos observations portent sur cinq objets d'études : le nouvel îlot Boucherie à Nantes comme objet de tests de contraintes visuelles et solaires, une maison nantaise avec une contrainte visuelle, un bureau présentant des problèmes d'éblouissement solaire à son utilisateur, l'église de Noirlac avec une contrainte intérieure sur un pupitre devant être éclairé directement, et pour finir, des écrans de billetteries SNCF qui exposent les utilisateurs à des éblouissements durant toute l'année, quel que soit l'ensoleillement extérieur.

Pour analyser nos propres observations, nous proposons de nous intéresser uniquement aux deux derniers critères d'analyse de la section 3.3 consacrée à l'analyse des observations d'architectes concevant, à savoir : les révéléteurs d'intentions et l'adaptation de l'outil aux situations imprévues. Les réponses ou non à nos attentes furent systématiquement notées pour améliorer l'outil durant la phase de programmation. Elles n'ont donc pas lieu d'être mentionnées ici. De même, le besoin ou non d'assistance, la terminologie que nous avons employée lors de nos tests et la vitesse de prise en main n'y sont pas signalés.

3.4.1 Les révéléteurs d'intentions projectives

3.4.1.1 Une représentation plus aisée des positions solaires en trois dimensions

Nous avons remarqué comme les concepteurs, que le modèle de voûte solaire était très pratique pour visualiser les différentes positions solaires pour une latitude donnée et permettait de repérer très facilement les heures de coucher et de lever du soleil durant l'année sans devoir utiliser un diagramme solaire sur une feuille de papier ou un *Girasol* (cf. Figure 3-107 – modèle de voûte solaire toujours en vue dans une fenêtre secondaire du modeleur). D'ailleurs, l'option d'importation d'un modèle de voûte solaire "témoin" facilite encore ce travail de recherche d'heures solaires, puisque ce modèle témoin est ouvert sur un nouveau document dans le modeleur. Ainsi, il peut être commun à

plusieurs documents ouverts dans une même session *AutoCAD*. Il peut même servir de comparaison des périodes solaires pour une autre latitude. Il suffit alors d'importer le modèle de la nouvelle latitude à la manière de calques de diagrammes solaires que l'architecte positionne sur sa table à dessin. M. Twarowski proposait ce type de diagrammes sur calque à la fin de son ouvrage *Soleil et Architecture* [Twarowski 1962] publié en 1962. Aujourd'hui les calques de diagrammes solaires que nous proposons sont numériques et en trois dimensions. C'est précisément ce dernier point qui nous a révélé des intentions que nous n'aurions probablement pas eues, si nos modèles de voûte solaires avaient été en deux dimensions. En effet, il fut très aisé pour nous, de placer des caméras aux quatre angles de la base de contrainte (quatre positions extrêmes des yeux au-dessus du clavier d'ordinateur), afin de visualiser en vue perspective les périodes de l'année, durant lesquelles le soleil était vu depuis ces positions (périodes d'éblouissement – cf. Figure 3-109).

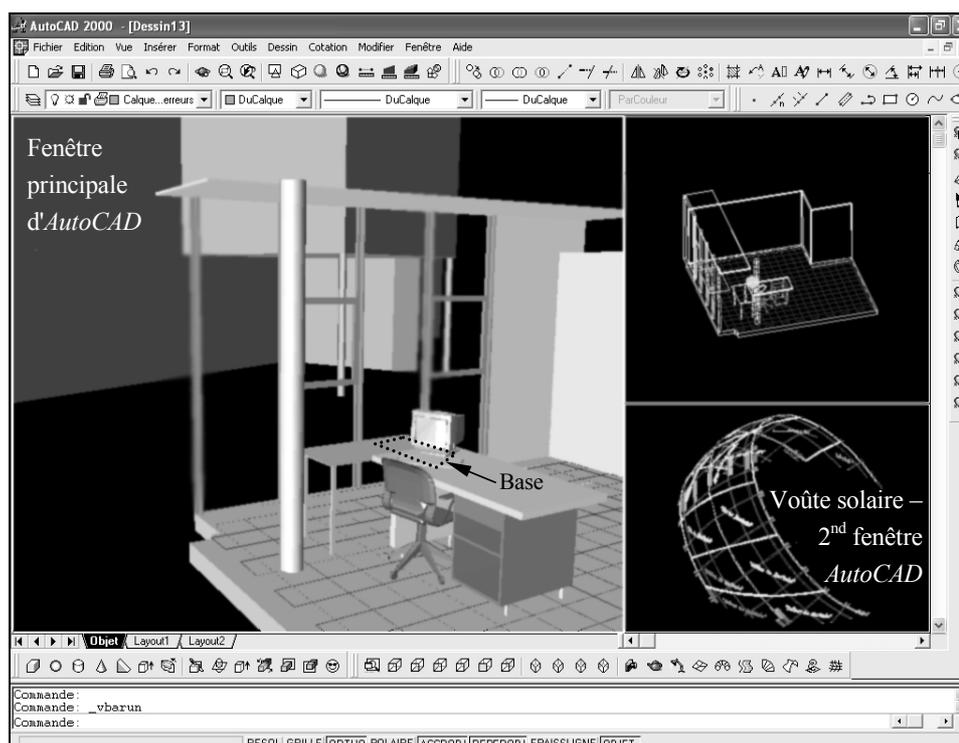


Figure 3-107 : Exemple de document *AutoCAD* multifenêtres. Fenêtre principale à gauche : une modélisation d'une scène architecturale composée d'un bureau avec une grande baie vitrée donnant sur un parc et un bâtiment. En bas à droite : fenêtre secondaire où est disponible en permanence le modèle de voûte solaire calculé par *SVR*.

Ainsi, le travail de sélection des cibles de contraintes (périodes solaires) fut facilité par ce type de projection perspective. Le choix des périodes était alors un compromis entre durée de la gêne potentielle et période de l'année où elle intervient.

Ce travail nous a donc permis de ne pas prendre en compte la période solaire située entre le 21 décembre et début février (donc entre le 10 novembre et le 1^{er} février car il y a superposition des trajectoires du 21 janvier avec celles du 21 novembre – cf. Figure 3-109).

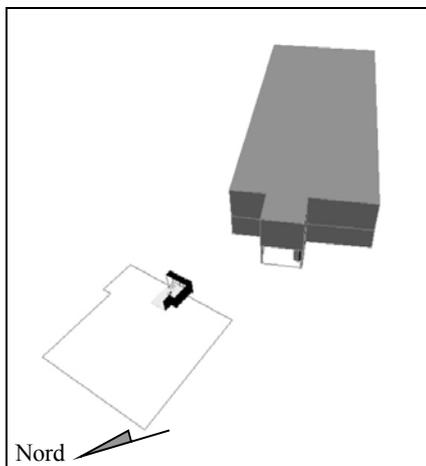


Figure 3-108 : Vue aérienne du bureau et de l'emprise du bâtiment au sol. Présence d'un bâtiment en face du bureau.

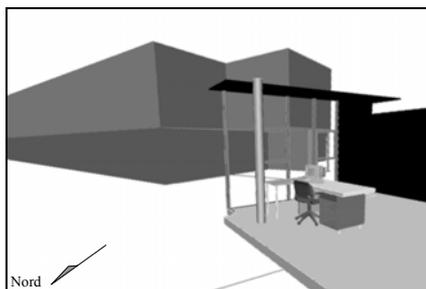


Figure 3-110 : Le bâtiment qui fait face au bureau est potentiellement un masque solaire. La vérification en est faite Figure 3-109 avec la projection perspective du modèle de voûte solaire.

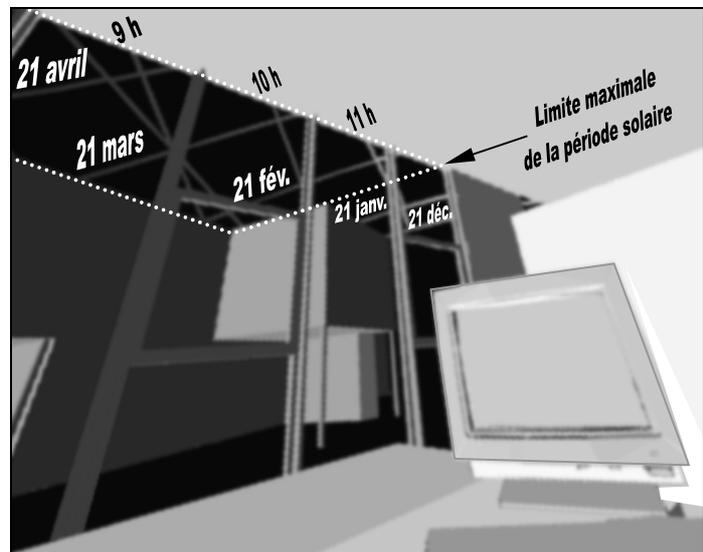


Figure 3-109 : Positions du soleil potentiellement gênantes pour l'utilisateur de bureau (éblouissement). La vue perspective de la modélisation permet d'y projeter aussi les trajectoires solaires à la latitude donnée. Le modèle de voûte solaire non visible sur la Figure 3-108 et sur la Figure 3-110 est automatiquement centré sur la scène architecturale et visible depuis l'intérieur du bureau, à travers la baie vitrée. Les doubles trajectoires solaires des 21 de chaque mois ont l'épaisseur apparente du soleil.

En effet, la gêne occasionnée par le soleil entre mi-novembre et début février n'a pas été considérée comme extrême, car elle ne dure qu'au maximum une heure (cf. Figure 3-109) à une période de l'année où certes le soleil éblouit encore, mais où il nous a semblé bon de percevoir la sensation des apports solaires. De plus, à partir de 11 h (solaires), soit environ midi en heures légales, le bureau n'est plus censé accueillir son utilisateur, ce qui réduit l'éblouissement potentiel à une demi-heure (dans le cas d'un ciel serein évidemment).

Nous le voyons par cet exemple, la représentation du modèle de voûte solaire en trois dimensions nous a incités à limiter le plus possible la période solaire ciblée. Ainsi cette représentation est directement à l'origine de choix de conception puisque l'optimisation du brise-soleil recherché dépend de l'envergure de la période solaire que nous avons ciblée.

Notre recherche d'optimisation fut aussi facilitée par l'option de "*masques environnants*" du prototype. En effet, quatre photographies *fish-eye* ont été prises *in situ* (cf. Figure 3-111) au-dessus du bureau de l'utilisateur aux endroits relevés pour définir les quatre angles de la base de contrainte. Ces images *fish-eye* ont été importées dans le logiciel mère et projetées sur notre modèle de voûte solaire (cf. Figure 3-112 et Figure 3-113) grâce à l'option *SVR*. Cela nous a permis d'ajouter des masques solaires supplémentaires dus à la présence de nombreux arbres dans le parc qui fait face au bureau. Ces arbres n'avaient pas été modélisés ; ils n'étaient donc pas pris en considération dans la Figure 3-109. Nous sommes arrivés partiellement aux mêmes conclusions que précédemment puisque les masses végétales masquent les trajectoires solaires de la deuxième moitié du mois de décembre. Si ces masses végétales étaient plus imposantes, peut-être que ce type d'option nous aurait permis de limiter encore plus la période solaire ciblée et donc d'optimiser d'autant la taille du brise-soleil.

Nous pouvons affirmer que le passage de masques solaires en deux dimensions à des masques en trois dimensions (associés à des trajectoires solaires 3D), nous a révélé de manière dynamique la cible exacte de notre contrainte. La diminution de cette période ciblée a pu s'effectuer, car nous avons tous les éléments nous permettant d'argumenter notre choix.

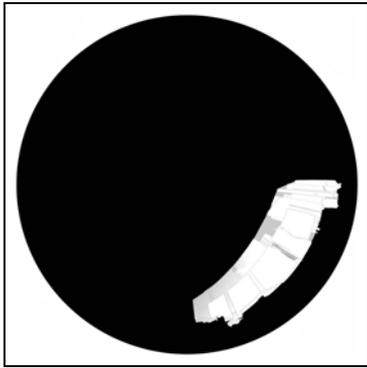


Figure 3-111 : Compilation de quatre photographies *fish-eye* prises *in situ* depuis les quatre angles de la base de contrainte (cf. Figure 3-107)

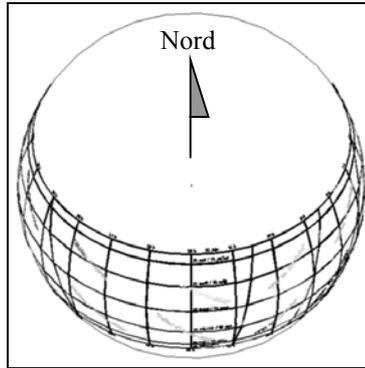


Figure 3-112 : Modèle de voûte solaire 3D créée par SVR

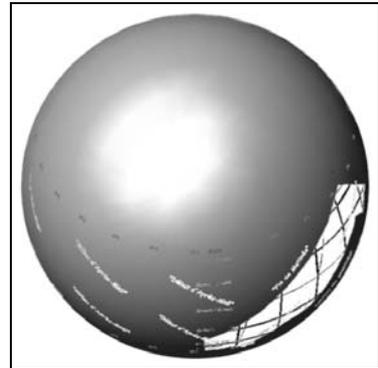


Figure 3-113 : Projection 3D du masque de la Figure 3-111 (image *fish-eye*) sur le modèle de voûte solaire de la Figure 3-112. Seules les périodes non "masquées" restent lisibles. Il s'agit de périodes d'éblouissement potentiel.

3.4.1.2 L'effet révélateur de la simulation de l'accessibilité visuelle

Dans le cas du projet de l'îlot Boucherie à Nantes, nous avons opté pour une méthode de simulation de l'accessibilité visuelle pour définir les zones d'où il était possible de voir la moitié supérieure de la flèche de l'église Saint-Nicolas. Cette cible visuelle étant un triangle (la face nord-est de la flèche), nous avons positionné trois sources lumineuses à ses trois sommets afin de simuler les parties de la ville "à l'ombre" des constructions et celles "à la lumière". Les trois ombres furent quasiment superposées (sources lumineuses proches). Les parties "à la lumière" furent considérées comme toujours éclairées quelle que fut la source lumineuse positionnée entre les trois sommets du triangle. Ainsi sur la carte d'accessibilité visuelle de la Figure 3-114 nous avons identifié la terrasse (T) d'un restaurant comme étant toujours "éclairée". Soit T' la copie du polygone T translaturée à la hauteur moyenne des yeux d'une personne en position assise (1,25 m). Nous avons supposé que si T était toujours "éclairé" alors T' le serait aussi (car au-dessus de T). En ne raisonnant plus sur des zones "à la lumière" ou "à l'ombre", mais sur les zones d'où il est possible ou non de voir l'église Saint-Nicolas, nous avons choisi de prendre le polygone T' comme base d'une contrainte visuelle et le triangle F (la moitié supérieure de la flèche de l'église – cf. Figure 3-118) comme cible

de cette contrainte. Le volume résultant de cette contrainte fut calculé par notre macro. Il s'agit d'un volume concave (cf. Figure 3-115).

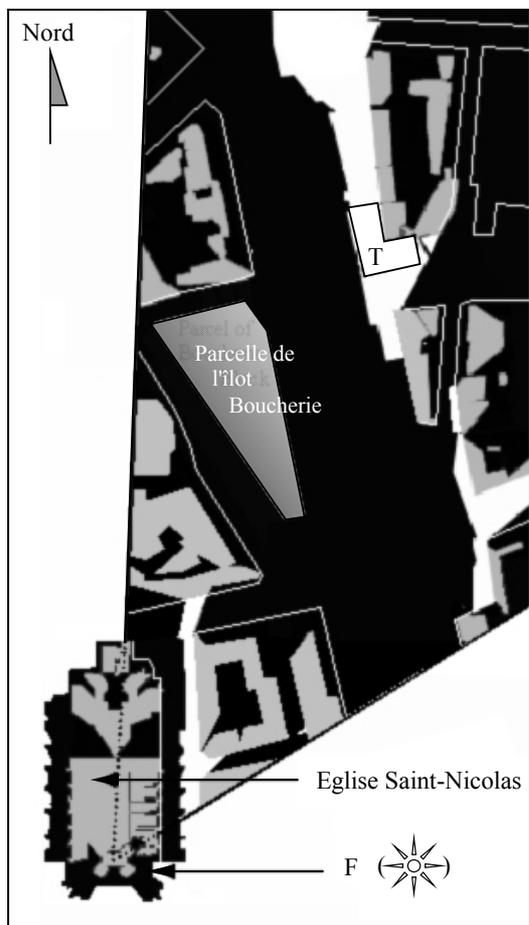


Figure 3-114 : Simulation de l'accessibilité visuelle pour le projet de l'îlot Boucherie à Nantes. La fonctionnalité *source lumineuse* du logiciel mère est détournée pour analyser quelles zones de la ville sont "à l'ombre" (ne voyant pas la source) ou "à la lumière" (voyant la source). La contrainte visuelle imaginée pour le test a donc pour cible la flèche F de l'église Saint-Nicolas ("source lumineuse") et pour base une surface "à la lumière". Ici la surface choisie est la translattée (T') de la terrasse T à hauteur des yeux en position assise.

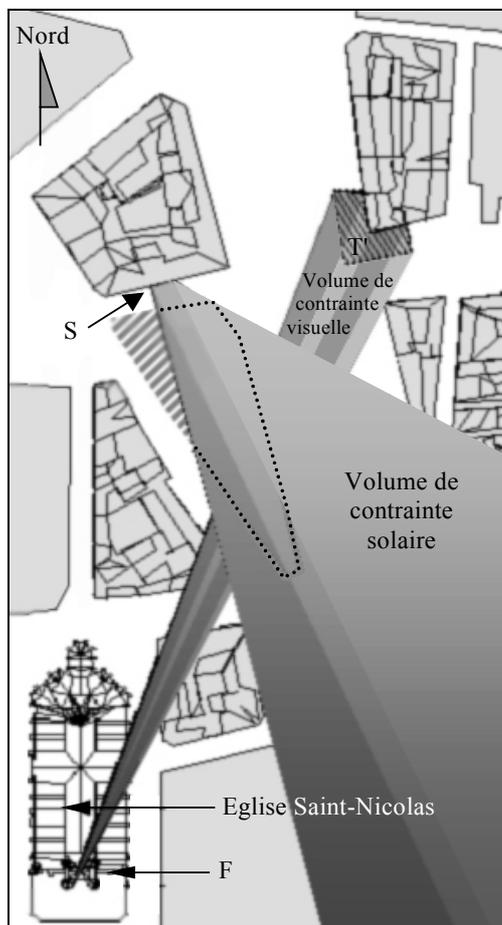


Figure 3-115 : Simulation de deux volumes de contraintes sur l'îlot Boucherie à Nantes. T' et F sont respectivement la base et la cible du volume de contrainte visuelle, et la vitrine du salon de coiffure S est la base du volume de contrainte solaire donc la période ciblée est le milieu de matinée en automne et en hiver.

A cette contrainte visuelle nous avons ajouté une contrainte solaire dont la base est la vitrine d'un salon de coiffure (S) comme nous pouvons le voir sur la Figure 3-115 et la Figure 3-116.

Le résultat le plus important de cette analyse est que sans la carte d'accessibilité visuelle (Figure 3-114) nous n'aurions probablement pas pu définir aussi rapidement et aussi précisément la position de la base de contrainte visuelle T'. Cette carte nous a évité une démarche de tâtonnement pour tester des zones pressenties comme ayant des vues sur l'église ou encore un déplacement *in situ* pour vérifier ces intuitions. C'est en ce sens que cette méthode de simulation de l'accessibilité visuelle, déjà utilisée avec le logiciel *Solène*, peut être considérée comme une méthode complémentaire aux simulations que réalise un outil de simulation inverse comme *SVR*.

Notre outil ne permet pas de réaliser directement ce type de simulation de l'accessibilité visuelle, mais l'environnement dans lequel il est inscrit l'autorise. Nous l'avons dit, le modéleur permet de positionner des sources lumineuses, donc de simuler l'accessibilité visuelle via cette astuce. Cette méthode était déjà utilisée avec d'autres logiciels, dorénavant sous *SVR* il est possible d'avoir recours à elle sans changer d'outil. Il nous a suffi de basculer sur le logiciel mère. Ceci montre combien une telle méthode influence le choix des simulations visuelles. Elle a révélé dans notre cas que le choix de la base T' était justifié.

Comme nous pouvions le supposer, la base étant très proche de la limite ombre-lumière sur le plan de la Figure 3-114, le projet de l'îlot Boucherie a une influence sur la contrainte visuelle. En effet, nous le voyons sur la Figure 3-117, le volume de contrainte visuelle est intersecté par le volume de l'îlot Boucherie qui culmine à plus de trente mètres de haut. La solution minimale aux deux contraintes est illustrée Figure 3-117. Cette solution est la soustraction des deux volumes de contraintes au gabarit de l'îlot Boucherie.

Nous pouvons affirmer que la simulation de l'accessibilité visuelle de notre cible (flèche de l'église Saint-Nicolas) a permis de révéler rapidement et précisément notre base de contrainte et par conséquent de définir aussi vite notre volume de contrainte visuelle. La vérification *in situ* (cf. Figure 3-118) a montré que la végétation ne s'interposait pas entre la base et la cible. La méthode des cartes d'accessibilité visuelle est donc à associer à une prise en compte de la végétation d'une scène urbaine.

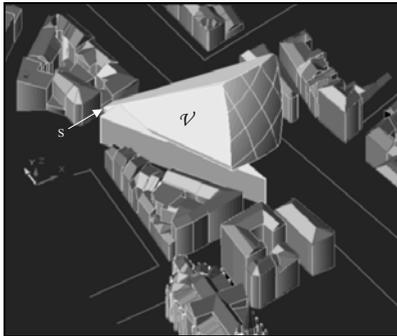


Figure 3-116 : Résultat de l'emprise 3D du volume de contrainte solaire V sur le gabarit de l'îlot Boucherie. S est la base de la contrainte solaire.



Figure 3-118 : Photographie *in situ* de la parcelle de l'îlot Boucherie (derrière le tramway) depuis la base T' (cf. Figure 3-117) vers la moitié supérieure de la flèche de l'église Saint-Nicolas. Notons que la végétation n'a pas été prise en considération dans nos simulations car elle ne s'interpose pas entre la base et la cible de contrainte.

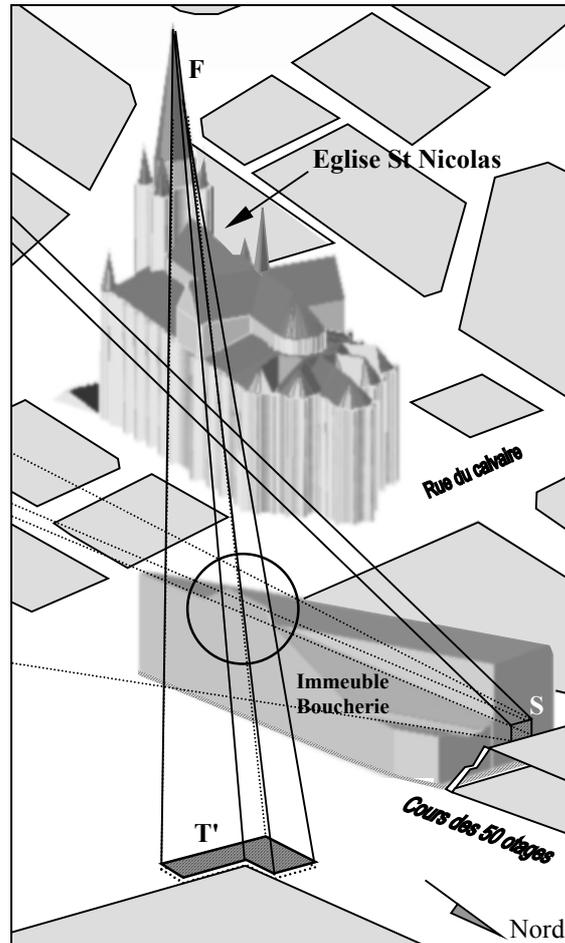


Figure 3-117 : Emprise volumétrique des deux contraintes sur le gabarit de l'îlot Boucherie. L'emprise de la contrainte solaire sur le parallélépipède du gabarit est flagrante. L'emprise de la contrainte visuelle est plus réduite (cf. cercle).

3.4.1.3 La forme d'un gabarit urbain

Dans l'étude du projet de l'îlot Boucherie à Nantes, le gabarit auquel nous avons appliqué les deux contraintes prend une forme peu ordinaire avant même d'avoir

commencé la phase d'esquisses (cf. Figure 3-117). Pour autant, le chaos que provoquent les contraintes sur la volumétrie de départ n'est pas très éloigné de celui qu'a réalisé volontairement l'architecte sélectionné pour ce projet (F. Borel). Ainsi, la Figure 3-119, la Figure 3-120 et la Figure 3-121 illustrent bien l'évolution des esquisses de l'architecte F. Borel qui aboutit à un îlot disloqué en plusieurs blocs.

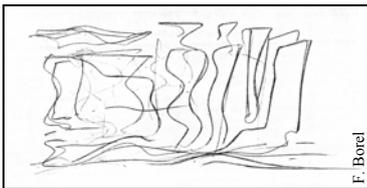


Figure 3-119 : Première esquisse de l'architecte F. Borel pour son projet d'immeuble Boucherie à Nantes

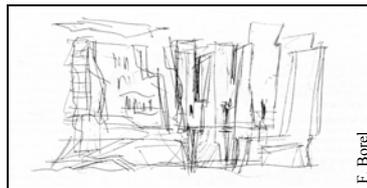


Figure 3-120 : Esquisse intermédiaire

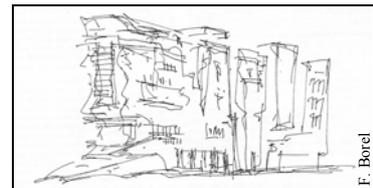


Figure 3-121 : Esquisse finale correspondant au permis de construire 2001

Nous avons réalisé notre propre esquisse à partir du nouveau gabarit de l'îlot Boucherie en tentant de respecter cette idée de dislocation (cf. Figure 3-122 et Figure 3-123).

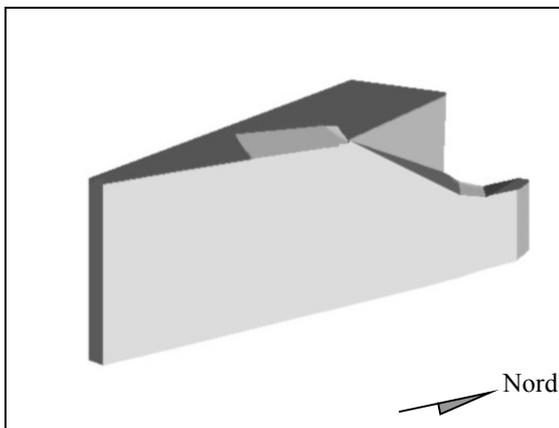


Figure 3-122 : Gabarit de l'îlot Boucherie résultant de la simulation inverse des deux contraintes énoncées plus haut

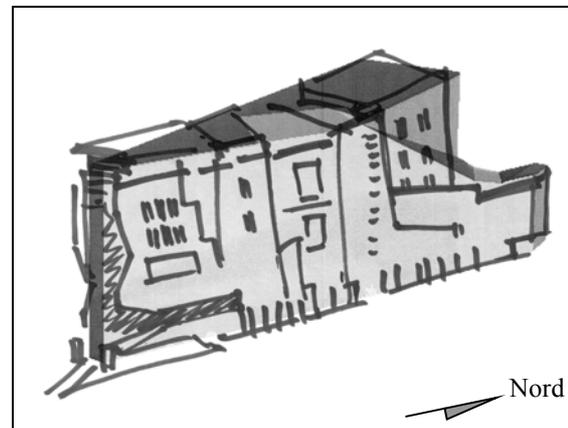


Figure 3-123 : Retranscription possible (personnelle) du projet de l'architecte F. Borel sous forme d'esquisse (cf. Figure 3-121) avec adaptation du bloc aux découpes du gabarit de la Figure 3-122.

Cela montre combien il est possible de composer avec des volumétries d'emblée très contraignantes. De plus ces volumétries s'avèrent finalement être des vecteurs d'idée de conception grâce à leur singularité qui en font des objets uniques avant même de rentrer dans la phase d'esquisses.

3.4.1.4 Inclinaison optimale des lames brise-soleil

Dans le cas de l'étude d'un poste de travail et de l'optimisation de lames brise-soleil en façade, nous avons simulé plusieurs inclinaisons de ces lames. Il s'agissait d'un test pour une période d'éblouissement solaire relevée durant l'année *in situ* (antérieure aux simulations de la section 3.4.1.1 – Figure 3-109).

Notre choix de conception s'est porté dans un premier temps vers des lattes inclinées à 45° (cf. Figure 3-124) et disposées à cinquante centimètres de la façade. Un compromis fut ainsi trouvé pour permettre la réalisation du dispositif brise-soleil. Ainsi la latte la plus haute étant de dimension négligeable (cf. Figure 3-124), nous l'avons supprimée. La solution était quasi optimale et constructible. Nous aurions pu nous satisfaire de cela, mais l'option "*écran brise-soleil*" de notre outil, fut testée pour optimiser encore plus notre dispositif.

Nous avons donc dans un deuxième temps simulé l'inclinaison optimale des lattes de notre dispositif brise-soleil positionné à cinquante centimètres de la façade (cf. Figure 3-127) et nous l'avons comparée à la solution précédente (cf. Figure 3-126) et à une version sans latte de notre dispositif (écran vertical plein – cf. Figure 3-125).

Notre choix fut d'optimiser au maximum la quantité de matière des lattes et donc de diminuer potentiellement le coût du dispositif. La solution de la Figure 3-127 fut retenue même si la diminution du coût d'un tel dispositif par rapport à une solution verticale pleine (cf. Figure 3-125) n'était pas certaine. Ce fut avant tout la diminution de matière qui guida notre choix.

Ainsi, nous pouvons dire que la conception de notre dispositif solaire fut révélée par notre recherche de l'optimisation de ce dispositif via l'outil *SVR*.

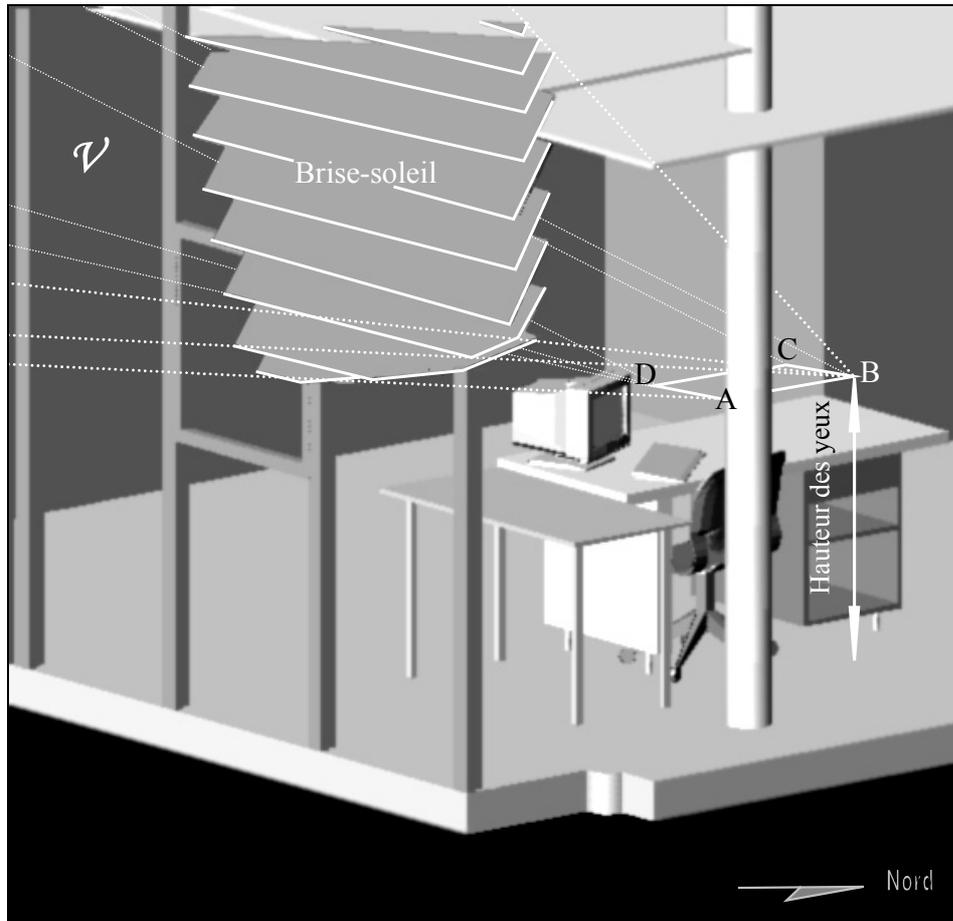


Figure 3-124 : Première solution de lames brise-soleil inclinées à 45° calculées avec SVR à partir du volume de contrainte solaire ν

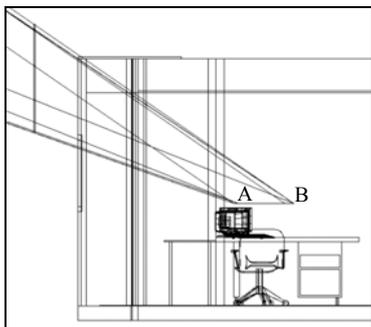


Figure 3-125 : Solution de brise-soleil unique vertical

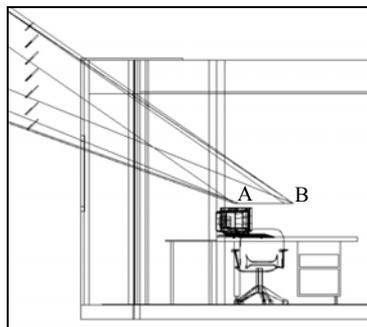


Figure 3-126 : Solution de lames brise-soleil inclinées à 45°

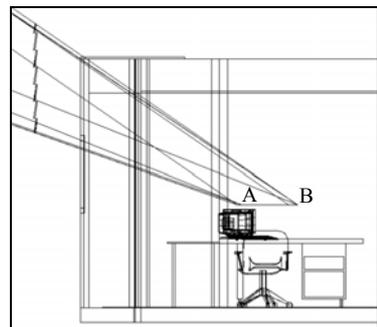


Figure 3-127 : Solution de lames brise-soleil d'inclinaison optimale

3.4.1.5 Les volumes de contraintes opposés

Les volumes de contraintes solaires opposés, lorsqu'ils sont projetés sur le modèle de voûte solaire à la manière de masques solaires donnent de précieuses informations aux concepteurs. Nous avons noté qu'ils nous permettaient dans le cas d'une scène intérieure, d'identifier les périodes de l'année durant lesquelles le soleil peut atteindre en partie la base de contrainte en passant à travers des ouvertures.

Dans le cas suivant, la base de contrainte est un pupitre de l'église de Noirlac et les ouvertures sont trois fenêtres de la travée sud et trois fenêtres du bas-côté sud (voir l'explication de la méthode pour choisir ces ouvertures – section 3.4.2.2). Le pupitre mesure un mètre sur cinquante centimètres. Les six ouvertures sont les seules qui permettent un éclairage direct du pupitre par la façade sud. Elles sont aussi potentiellement source d'ensoleillement directe du pupitre. C'est pour cette raison que nous avons simulé grâce aux six volumes de contraintes opposés, les six périodes potentielles d'ensoleillement du pupitre. Le résultat de la simulation est le masque solaire du pupitre, projeté sur la voûte céleste (intersection des volumes opposés avec la voûte céleste – cf. Figure 3-128).

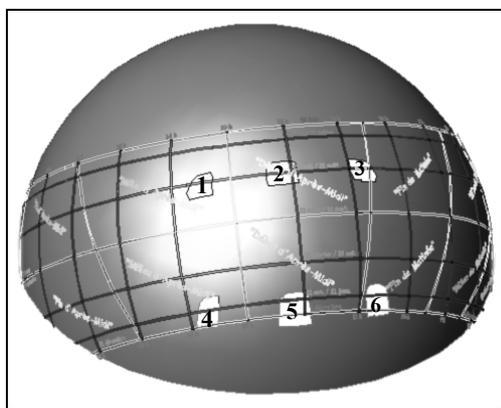


Figure 3-128 : Représentation des périodes d'ensoleillement d'un pupitre de l'église de Noirlac. L'hémisphère céleste est masqué en quasi-totalité (en gris). Seules les périodes 1, 2, 3, 4, 5 et 6 permettent un ensoleillement partiel du pupitre durant trois fois une demi-heure au maximum. Les périodes 1, 2 et 3 permettent cet ensoleillement potentiel du 10 avril au 1^{er} mai et du 10 août au 1^{er} septembre, tandis que les périodes 4, 5 et 6 le permettent du 10 novembre au 1^{er} février.

Ce masque nous indique les périodes potentielles d'ensoleillement direct du pupitre. Par manque de temps, l'analyse de ces périodes n'a pas abouti à une véritable conception de

la scène intérieure. Elle a juste servi à qualifier le lieu, du point de vue des ambiances solaires et lumineuses.

3.4.2 L'adaptation aux situations imprévues

3.4.2.1 La limitation des cibles

Comme pour les contraintes solaires, nous avons remarqué que les cibles de contraintes visuelles devaient parfois être limitées pour les réduire à leur portion "visible" depuis les bases de contraintes. Ceci n'ayant pas été pris en compte dans notre outil, il nous a fallu trouver une méthode pour limiter les cibles visuelles en partie cachées par l'environnement d'une scène.

C'est le cas d'une étude portant sur la cour d'une maison nantaise. La base de contrainte était le jardin de la maison, et la cible, l'ensemble des fenêtres de l'immeuble voisin. La maison cachait en partie l'immeuble voisin. Les modélisations suivantes (de la Figure 3-129 à la Figure 3-136) illustrent notre propos. Nous avons mis au point une méthode afin de limiter le nombre de fenêtres de l'immeuble voisin ciblé et en parallèle, de limiter le jardin à sa seule partie "visible" depuis ces fenêtres. Cette méthode consiste à visualiser le maximum de la base potentielle depuis le maximum des cibles potentielles (l'inverse aboutissant au même résultat).

Le logiciel mère, via son interface graphique nous permet de manipuler aisément la modélisation de la scène en question. Ainsi il nous fut facile de visionner le jardin depuis les fenêtres de l'immeuble voisin (caméra derrière les rectangles représentant les fenêtres – cf. Figure 3-131 à Figure 3-135). En identifiant les positions extrêmes d'où il était possible de voir le jardin et du même coup quelles parties extrêmes de celui-ci, nous pouvions voir depuis ces positions, nous avons délimité à la fois une première cible visuelle et sa base. La base fut en plus limitée à la seule partie du jardin utilisée par le propriétaire – cf. Figure 3-136).

Une fois de plus l'adaptation de notre outil à une situation imprévue fut possible. Désormais, cette méthode de limitation des cibles de contraintes visuelles fait partie intégrante des recommandations d'utilisation de notre logiciel.

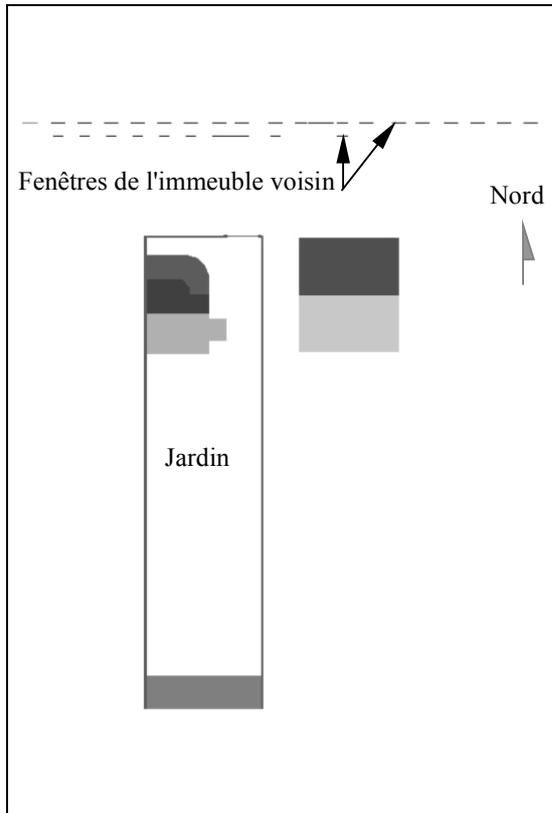


Figure 3-129 : Plan de masse d'une maison nantaise et de sa parcelle. Présence dans le voisinage direct de la maison, d'un immeuble dont uniquement les fenêtres sont représentées (cf. Figure 3-130).

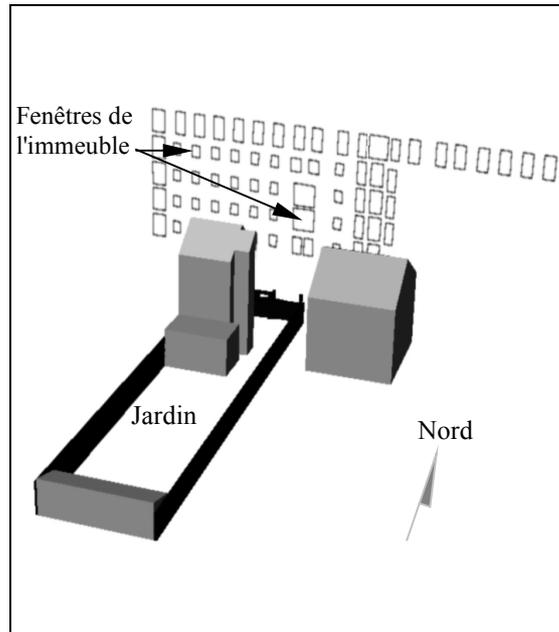


Figure 3-130 : Vue perspective de la modélisation de la maison et de son jardin. Représentation des 69 fenêtres de l'immeuble potentiellement sources de vis-à-vis avec le jardin.

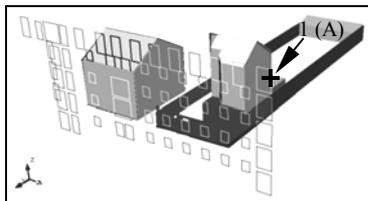


Figure 3-131 : Première étape : recherche de cibles réelles depuis le jardin (base pour des usagers en position debout). Première étape, premier angle de la cible (1). A est le premier angle de la base.

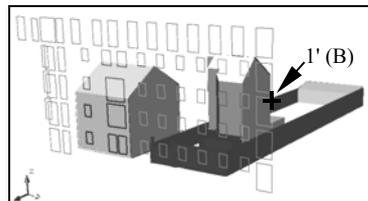


Figure 3-132 : Deuxième étape : recherche d'un point intermédiaire de la cible (1'). AB est la limite nord-est de la base (cf. Figure 3-136).



Figure 3-133 : Troisième étape : recherche du deuxième angle de la cible (2) et du troisième angle de la base (C)

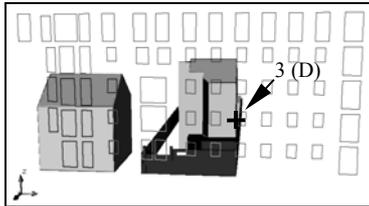


Figure 3-134 : Quatrième étape : recherche du troisième angle de la cible (3) et du quatrième angle de la base (D)

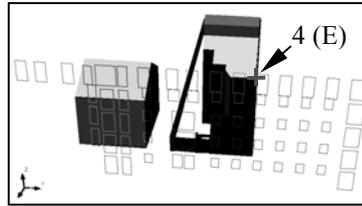


Figure 3-135 : Cinquième étape : recherche du quatrième angle de la cible (4) et du cinquième angle de la base (E)

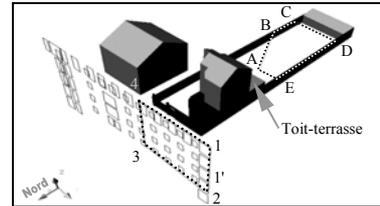


Figure 3-136 : Etape finale : liaison des sommets de la première cible [1234] et de sa base [ABCDE]. AE est la limite nord de la base, elle tient compte de la présence du toit-terrasse. AB tient compte du pignon ouest.

3.4.2.2 La simulation de contraintes lumineuses

L'enseignant de l'Ecole d'Architecture de Nantes pour lequel nous avons réalisé les simulations sur l'église de Noirlac (France), avait pour objectif de qualifier les espaces intérieurs de cette église et d'analyser la hauteur d'une cloison intérieure afin de savoir si celle-ci n'empêchait pas l'éclairage d'un pupitre (cf. Figure 3-137).

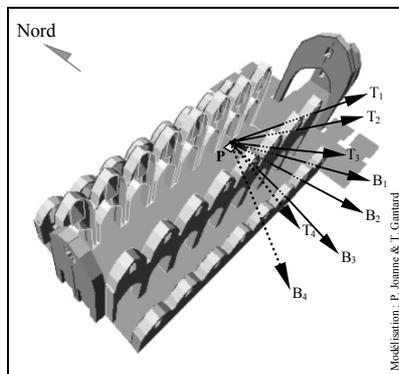


Figure 3-137 : Vue perspective de l'intérieur de l'église de Noirlac (la charpente et la toiture ont été retirées pour faciliter la lisibilité). Un pupitre (P) de 0,5 m sur 1 m est pris comme base de contrainte "lumineuse", à 0,8 m du sol. Les flèches T indiquent les "vues" vérifiées depuis P vers les fenêtres de la travée sud. Les flèches B indiquent les "vues" vérifiées depuis P vers le bas-côté sud. T₄ et B₄ (et au-delà) ne permettent plus de "vues" à travers les fenêtres.

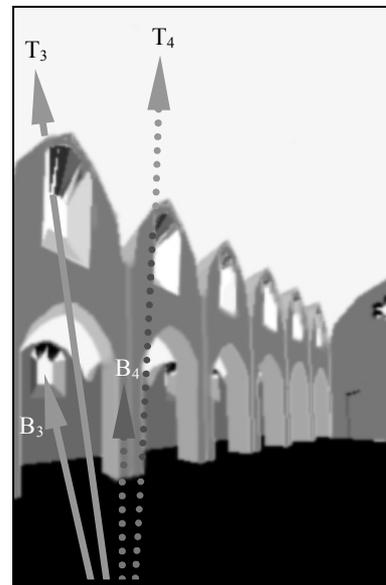


Figure 3-138 : Exemple de vérification en vue perspective depuis le pupitre vers les fenêtres sud. Les vues T₄ et B₄ n'aboutissent pas aux fenêtres.

Après avoir défini les ouvertures – au nombre de six – à travers lesquelles il était possible de voir la voûte céleste depuis le pupitre (première adaptation – cf. Figure 3-138), nous avons considéré les baies comme des cibles lumineuses (deuxième adaptation). La contrainte posée par l'enseignant étant de voir les baies depuis le pupitre, il nous a fallu modéliser les volumes de contraintes lumineuses que sont les volumes \mathcal{V} joignant le pupitre aux fenêtres (Figure 3-140) auxquels nous avons retiré les parties arrêtées par les ébrasures des baies (Figure 3-139 et Figure 3-141) afin de ne garder que les rayons non intersectés par les ébrasures. *In fine*, la méthode mise au point pour cette étude consista à réaliser l'intersection entre les volumes de contraintes de cibles les fenêtres, d'une part, et les ébrasures, d'autre part. Cette opération booléenne n'a posé aucune problème dans l'environnement du modéleur. Elle montre la capacité d'adaptation de notre approche inverse qui permet de manipuler les objets solides que sont les volumes de contraintes. Nous pouvons aussi ajouter à cela que cette approche révèle quantitativement l'importance des volumes de contraintes les uns par rapport aux autres, puisqu'elle fait apparaître leur hiérarchie (volumes centraux plus larges que ceux de droite et de gauche).

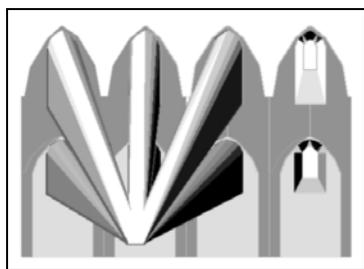


Figure 3-139 : Volumes de contraintes depuis le pupitre vers les six ébrasures des fenêtres visibles

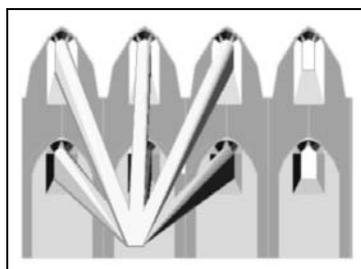


Figure 3-140 : Volumes de contraintes depuis le pupitre vers les six fenêtres visibles

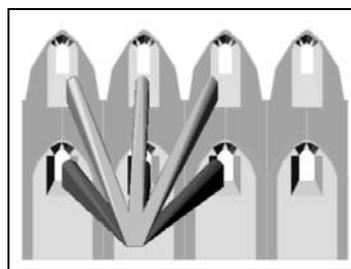


Figure 3-141 : Volumes de contraintes "lumineuses" des six fenêtres visibles, par soustraction des volumes de la Figure 3-140 aux volumes de la Figure 3-139 .

Ces volumes représentent uniquement la partie des rayons visuels ou lumineux (ou solaires) directs reliant directement le pupitre aux cibles sans être intersectés par l'ébrasure des fenêtres.

Dans une autre étude, nous avons adapté notre méthode à la modélisation de volumes de contraintes de réflexion lumineuse. Nombreuses sont les situations architecturales (ou urbaines) du type de celle que nous prenons en exemple : un distributeur automatique de

billets (SNCF dans notre cas) dont la surface vitrée de son écran tactile reflète la lumière d'une baie (ou du soleil dans un site urbain). Ce reflet est très souvent désagréable car il éblouit l'utilisateur ou l'empêche de lire sur l'écran. L'inclinaison et l'orientation de ce dernier étant fixes, la position et le périmètre de la baie étant aussi considérés comme fixes (même si l'environnement extérieur peut évoluer – de par sa végétation par exemple), et la position moyenne des utilisateurs devant le distributeur étant difficilement modifiable, la seule solution pour pallier l'éblouissement ou la gêne des utilisateurs est la modélisation d'écrans à l'intérieur des volumes de contraintes lumineuses.

Concrètement, dans cet exemple, la base de contrainte de réflexion est l'ensemble des localisations des yeux des utilisateurs en position debout ou en fauteuil roulant devant un distributeur de la gare nord de Nantes (Figure 3-144). La cible de contrainte de réflexion est l'ensemble des baies nord (cf. Figure 3-142 – limitées à leur partie supérieure puisque leur partie basse est protégée par le tissu bâti et végétal). Le plan miroir est l'écran tactile du distributeur (cf. Figure 3-144). Le volume de contrainte de réflexion lumineuse (Figure 3-143 et Figure 3-145) calculé par notre prototype, à partir de la base, de la cible et du plan miroir, a pu être exploité grâce à la modélisation d'écrans (Figure 3-146) dans sa partie en aval (i. e. entre le plan miroir et les baies, puisque la partie amont – entre la base et le plan miroir – doit rester libre et permettre la lecture de l'écran tactile).

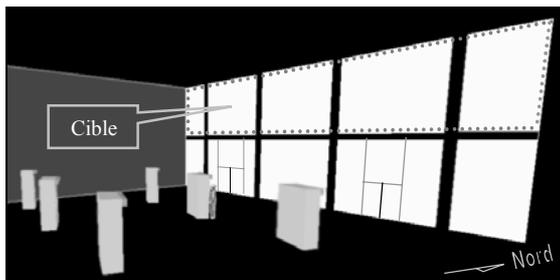


Figure 3-142 : Hall de la gare nord de Nantes. Les dix grandes baies vitrées sont orientées au nord. En journée, seules cinq créent l'éblouissement des usagers des distributeurs SNCF alors que le soleil n'est pas la source des réflexions sur les écrans tactiles. Ces baies, par leur luminosité sont donc les cibles d'une contrainte de réflexion "lumineuse".

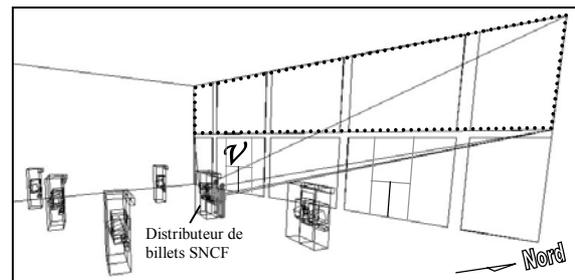


Figure 3-143 : Vue filaire de la modélisation du volume de contrainte "lumineuse" ayant pour base les positions potentielles des yeux d'un usager devant le distributeur de billets SNCF (D), pour cible les cinq baies vitrées supérieures du hall de la gare et pour plan miroir l'écran tactile du distributeur.

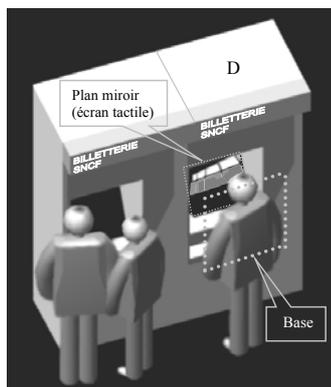


Figure 3-144 : Distributeur, écran tactile (reflet des baies tel que le voit l'utilisateur) et base de la contrainte de réflexion (position des yeux des utilisateurs en position debout ou en fauteuil roulant)

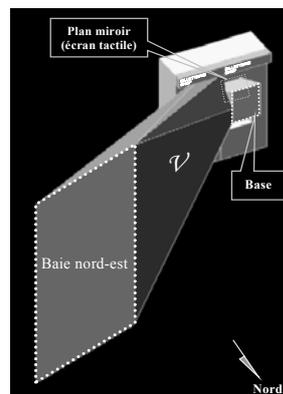


Figure 3-145 : Vue d'une partie du volume de contrainte de réflexion "lumineuse" (V ayant pour cible uniquement la baie nord-est)

L'opération de modélisation fut identique aux précédents exemples, même si nous nous sommes adaptés à cette cible particulière : saisie des points du plan miroir, puis saisie des points de la base, puis saisie des points de la cible, et enfin choix d'un type d'écran et de son point d'accrochage. Avec un tel exemple, nous montrons le caractère générique de notre approche de modélisation inverse et en particulier des volumes de contraintes qui ont toujours pour cibles des surfaces (planes pour les contraintes visuelles ou lumineuses, et gauches pour les contraintes solaires). Comme pour les autres types de contraintes, une solution exacte peut être une section transversale du volume de contrainte (Figure 3-146). Ici, nous avons interprété cette section qui commence à 2,5 m du sol (point d'accrochage) comme un écran publicitaire suspendu.

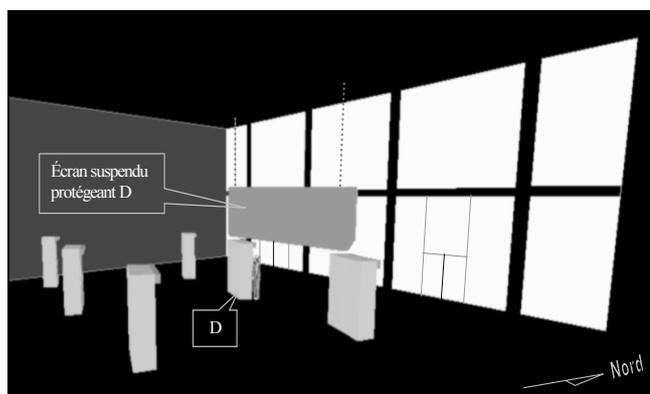


Figure 3-146 : Une solution exacte et optimale au problème d'éblouissement par réflexion lumineuse sur l'écran tactile du distributeur D. L'écran suspendu protège D en journée contre l'éblouissement des baies vitrées. De tels écrans sont déjà utilisés dans cette gare comme supports publicitaires mais pas dans cette position. Il s'agit donc d'une solution réaliste et peu coûteuse.

Remarquons que de tels écrans existent déjà dans cette gare mais pas dans cette position. Il s'agit donc de solutions réalistes et faciles à mettre en œuvre, quitte à vérifier que notre solution ne cache pas la lecture du panneau central d'affichage des départs et arrivées des trains, en modélisant un second volume de contrainte.

3.4.2.3 La vérification en simulation directe

Nous abordons maintenant le détournement de la fonction première de notre modèle de voûte solaire à des fins de vérification de nos modélisations inverses. Cette option va de pair avec l'utilisation de la fonction *lumières* du modèleur *AutoCAD* qui permet de placer des sources lumineuses simulant le soleil (*sources distantes*).

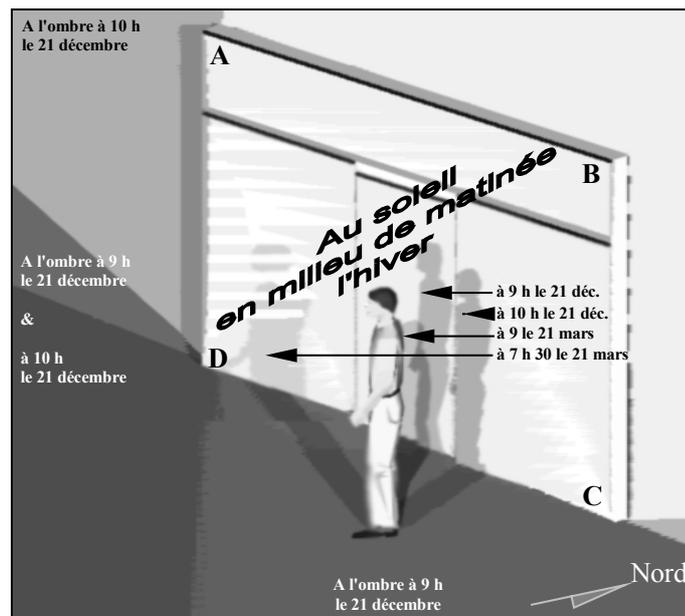


Figure 3-147 : Vérification de la solution à la contrainte solaire de l'îlot Boucherie à Nantes (cf. Figure 3-117, § 3.4.1.2). La vitrine [ABCD] est ensoleillée aux instants extrêmes de la période solaire choisie (9 h et 10 h le 21 décembre, 7 h et 9 h le 21 mars). Les ombres de l'immeuble de l'îlot Boucherie projetées en limite de la vitrine et celles du personnage confirment que notre solution est exacte.

Comme ces sources apparaissent dans la scène numérique 3D sous la forme de symboles, il est possible de les sélectionner et de les déplacer. Ainsi, dans l'exemple suivant, nous avons utilisé cette opportunité pour quadrupler le nombre de soleils

"virtuels" et les placer précisément à l'intersection des dates et heures choisies sur notre modèle de voûte solaire (le 21 décembre à 9 h, le 21 décembre à 10 h, le 21 mars ou septembre à 7 h et le 21 mars ou septembre à 9 h – Figure 3-147).

La simulation directe de l'ensoleillement que nous avons ainsi pu réaliser avec le module de "lancer de rayons" du modeleur nous a permis de comparer l'ensoleillement de la modélisation de l'îlot Boucherie à Nantes (cf. Figure 3-122) avec les résultats théoriques que nous devions obtenir. En cumulant les taches solaires des quatre dates (simulation directe), il est possible de vérifier si la modélisation inverse du projet de l'îlot Boucherie répond bien à la contrainte que nous avons appliquée à la vitrine du salon de coiffure ("voir le soleil en milieu de matinée en automne et en hiver").

La Figure 3-147 montre clairement que les taches solaires des quatre dates extrêmes de la période solaire choisie (et par extrapolation, du reste des dates incluses dans la période) sont conformes à nos intentions. La vitrine appartient bien à l'intersection des quatre taches solaires. Elle est potentiellement (si le temps le permet) ensoleillée en automne et en hiver, en milieu de matinée.

Pour clore cette partie, signalons les trois simulations solaires directes que nous avons réalisées avec le modeleur et la technique précédente, mais cette fois pour vérifier la contrainte que nous évoquions à la section 3.4.1.4 (Figure 3-124 – lames brise-soleil pour protéger un poste de travail entre le 1^{er} février et le 10 novembre). La Figure 3-148 représente les conditions d'ensoleillement du poste de travail aux quatre dates extrêmes de la période citée précédemment, sans protection solaire. La superposition non-réaliste des quatre simulations directes confirme que la zone de position potentielle des yeux est ensoleillée (éblouissement de l'utilisateur). En revanche, la Figure 3-149 représente la vérification de notre solution à la contrainte solaire. Toujours pour les mêmes dates, l'utilisateur n'est plus ébloui lorsqu'il regarde l'écran de son ordinateur.

D'aucuns pourront nous rétorquer qu'il aurait suffi de déplacer l'écran d'ordinateur (le bureau ne pouvant pas bouger de place). La Figure 3-150 montre que cette variante ne réglerait pas le problème, car même si l'utilisateur regardait à l'opposé de la baie, il serait, soit ébloui par le reflet du disque solaire sur son écran d'ordinateur, soit gêné par l'illisibilité de ce dernier. De plus, la position serait peu ergonomique pour un droitier. Alors, pourquoi ne pas disposer des rideaux devant les baies ? Pour des raisons de luminosité laquelle risquerait d'être trop faible avec des rideaux opaques, et parce qu'ils ne seraient pas efficaces, voire éblouissants s'ils étaient trop fins (état actuel).

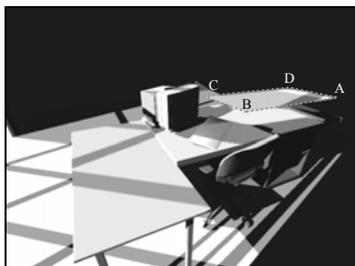


Figure 3-148 : Eblouissement de l'utilisateur du bureau. Les positions potentielles de ses yeux sont modélisées par la surface [ABCD]. Simulations directes pour les quatre dates définissant la période solaire choisie. [ABCD] est ensoleillée.

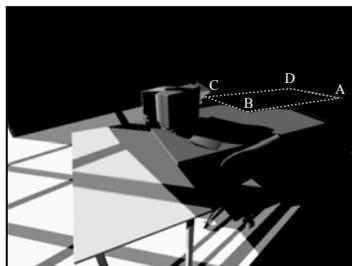


Figure 3-149 : Vérification de la protection contre l'éblouissement de l'utilisateur du bureau. Solution de brise-soleil optimal – simulations directes pour les quatre dates de la période solaire choisie. La surface [ABCD] est totalement à l'ombre.

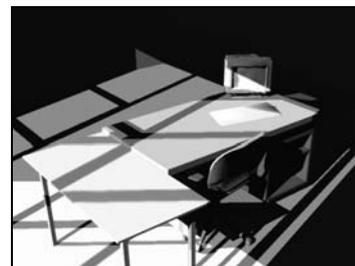


Figure 3-150 : Vérification d'une solution potentielle : le déplacement de l'écran d'ordinateur. La solution n'est efficace qu'à moitié.

Conclusion

Dans un premier temps, nous avons évoqué les principales pistes de recherche concernant l'observation des concepteurs à l'œuvre. Tous les travaux cités dans l'état de l'art que nous dressons portent sur des démarches directes de conception. D'après cet état de l'art, il semble donc que nos observations de quelque onze architectes et étudiants en architecture, concevant avec un outil de modélisation inverse, soient une première pierre apportée à l'édification d'une analyse de cette démarche inverse et de ses applications en architecture. Nous remarquons, tout d'abord, que la plupart des travaux d'observation sont anglo-saxons et portent sur les raisonnements cognitifs des concepteurs via l'analyse de leurs croquis et des modélisations informatiques qu'ils produisent. Notre deuxième remarque est que les architectes ne sont pas les seuls sujets d'observation. Ils sont l'objet d'environ la moitié des travaux d'observation cités dans cette dernière partie. L'autre moitié porte sur l'observation de designers et d'ingénieurs concevant. Après avoir abordé les croquis pensés (pour guider et focaliser une pensée non verbale), les croquis de prescription (intermédiaire), les croquis parlés (produits durant les échanges avec d'autres acteurs du projet), les croquis d'analyse (pour tester une idée), les croquis d'étude (pour rechercher une réponse architecturale à un programme), la visualisation basée sur la mémoire (en référence à des événements déjà expérimentés ou observés par l'architecte) et la visualisation basée sur l'imagination (de l'ordre de l'invention), nous affirmons premièrement, que le flou du croquis d'architecte fait à main levée est un passage obligé vers le projet définitif, et deuxièmement, que l'outil informatique "traditionnel" (de modélisation directe) est trop précis pour la phase d'esquisses du projet. De plus, les travaux de recherche que nous avons évoqués convergent vers l'idée que les architectes manipulent un nombre limité de concepts, à un instant donné. Les choix de conception des architectes semblent être effectués à la fois, selon des critères personnels et les caractéristiques du projet. Excepté les travaux de P. Boudon et de son équipe, les recherches citées précédemment concluent que le dessin d'architecte est une situation de résolution de projet où l'auteur est mis en demeure de produire une solution. Le raisonnement de l'architecte converge donc vers une solution personnelle et unique qui résout un système de contraintes, et le dessin est un puissant moyen de simulation et de coordination des solutions aux contraintes. Le dessin d'architecte peut donc être considéré comme un réducteur d'incertitudes, et le processus de conception comme un enchaînement de résolution de problèmes. Les travaux de recherche sur les processus de conception des architectes montrent que l'ensoleillement et la lumière sont des facteurs récurrents dans la conception architecturale. Ils font aussi apparaître clairement que les outils actuels d'aide à la conception sont inadaptés à ce processus. Quelques auteurs appellent de leurs vœux des outils de simulation inverse.

Le deuxième point important de notre état de l'art sur les observations des concepteurs, est le relevé des différents protocoles d'observation. D'après nos lectures, nous distinguons deux types : le protocole simultané ("*think aloud protocol*") et le protocole rétrospectif.

- Le protocole simultané de raisonnement à voix haute force les architectes à verbaliser leurs pensées. Ses principaux inconvénients sont la situation artificielle qu'il impose puisque les concepteurs observés font des efforts inhabituels de verbalisation, et l'isolement de l'environnement de travail qui peut déstabiliser les concepteurs.
- Le protocole rétrospectif est, quant à lui, une démarche *a posteriori* du processus cognitif des concepteurs à l'œuvre. Il utilise l'enregistrement vidéo pour recueillir les explications des concepteurs sur leurs gestes et leurs temps d'attente. Il a comme avantage de ne pas déstabiliser les individus observés, mais il a aussi comme inconvénient de ne pas retranscrire le cheminement des pensées oubliées.

Pour nos propres observations, nous avons employé le protocole "*think aloud*" et retranscrit les enregistrements audio de la verbalisation de la quasi-totalité des architectes observés (cf. Annexe 2). Notre analyse de l'échange d'informations et d'idées opéré entre les architectes et notre outil (via son interface graphique) n'a pas la prétention de conclure sur tous les fondements des principes cognitifs qui sont mis en action lors de la conception assistée par ordinateur. Pour autant, nous pouvons extraire les quelques tendances suivantes.

Concernant les réponses ou non de notre outil aux attentes des concepteurs :

- Notre modèle de voûte solaire est, en terme d'ergonomie, maniable dans l'environnement du modelleur et utile en terme de didactique. Il permet aux concepteurs, de visualiser de manière permanente la différence entre heures solaires (ne dépendant que de la latitude du lieu) et heures légales (périodes élastiques), de réaliser des vues *héliodon* (ce que "voit" le soleil), d'identifier les trajectoires apparentes du soleil à travers des ouvertures (par projection perspective des courses solaires depuis l'intérieur d'un bâtiment), et de leur offrir une représentation en 3D des trajectoires solaires, à la manière d'un diagramme solaire interactif en trois dimensions.
- La précision de notre modèle de voûte solaire limitée à la demi-heure près, semble convenir aux architectes qui n'ont pas souhaité une précision plus importante. Nous remarquons que l'environnement du modelleur rassure les concepteurs, sur le plan des échanges de fichiers entre logiciels de DAO ou CAO, des fonctionnalités couramment utilisées par les architectes, ou de l'impression sur papier des solutions

modélisées afin de les retravailler graphiquement. De plus, dans une démarche complémentaire à la simulation inverse de la visibilité, le modeleur permet de réaliser des cartes d'accessibilité visuelle en détournant sa fonction "lancer de rayon", ce qui rend service aux architectes dans certaines recherches de cibles visuelles potentielles.

- Les principales déceptions des concepteurs sont d'ordre ergonomique (manque d'interactivité entre le texte et les icônes, informations manquantes sur les calques du modeleur et sur le nombre de points sélectionnés). Elles ont été prises en compte durant les développements successifs de notre logiciel et ont donné lieu à des reprogrammations de la macro. Dans sa version actuelle, *SVR* ne présente plus les désagréments constatés par les concepteurs. D'autres améliorations ont été réalisées durant les différentes phases de programmation de notre outil. Elles se basent sur des remarques pertinentes des concepteurs (choix des tailles de scènes trop restreint) ou sur nos propres constats confirmés par les concepteurs (opportunité d'ajouter une option de calcul de l'écran minimal). D'autres améliorations suggérées par les concepteurs pourraient faire l'objet de futurs développements. Il s'agit de la notion de porosité des brise-soleil qui devrait tendre vers des écrans ajourés laissant passer un pourcentage de rayons solaires défini par le concepteur, ou la mise en œuvre de volumes de contraintes pouvant être modifiés de façon interactive, en temps réel, lorsque leur base ou leur cible est modifiée.
- Notre prototype répond à une attente des concepteurs qui souhaitent hiérarchiser les contraintes et donc les volumes de contraintes, selon leur importance. D'après nos observations, la possibilité de discrétiser une base permet de dissocier les volumes de contraintes correspondant à chaque "sous-base". Certains architectes utilisent ainsi cette possibilité pour identifier quelles contraintes visuelles sont les plus importantes quantitativement. Dans ce cas, comme dans de nombreux autres, la représentation en 3D des volumes de contraintes permet aux architectes de prendre conscience de cette hiérarchie, en visualisant la scène de manière dynamique (fonction *vue orbitale* du modeleur). La visualisation en 3D permet aussi aux concepteurs de faire des choix ou des compromis entre plusieurs variantes d'une solution solaire ou visuelle dont les représentations en 2D pourraient sembler identiques.
- Enfin, d'après notre analyse, en phase d'esquisses ou d'avant-projet, les concepteurs apprécient fortement le fait que les solutions à leur contrainte, obtenues dans une démarche de simulation inverse 3D, soient globales et optimales. Elles sont valables, quels que soient le plan de coupe de la scène et les rayons solaires ou visuels appartenant à ce plan ; ce qui n'est pas le cas pour une solution obtenue par une simulation 2D, même inverse (valable uniquement pour la direction des rayons correspondant au plan ou à la coupe). Sachant que la solution modélisée par notre outil répond de manière exacte à la contrainte que posent les architectes, il semble

que ces derniers respectent au plus juste la forme de la solution, même si elle est souvent complexe. Tel écran vertical effilé donnera naissance à une masse végétale de type peupliers ou bouleaux, tandis que tel écran combiné (vertical et horizontal) sera gardé tel quel par l'architecte qui y verra une part d'innovation argumentée par la démarche inverse. Mais certains architectes aiment aussi s'approprier et retravailler les solutions modélisées par le logiciel. Ainsi, nous avons observé un travail de conception par une recherche de compromis entre la forme, l'efficacité et la technicité de la solution.

Concernant les besoins ou non d'assistance :

- L'analyse des interrogations et des raisonnements à voix haute des concepteurs (protocole *think aloud*) nous permet de dire que ces questionnements sont généralement transitoires. Ces derniers semblent plutôt de l'ordre du prolongement d'une pensée intermédiaire dans le processus de découverte de l'outil de modélisation inverse, car les concepteurs trouvent d'eux-mêmes les réponses à leurs interrogations peu de temps après. Ceci tendrait à montrer que notre outil est plutôt intuitif.
- La notion de simulation inverse et l'intégration du temps dans les contraintes solaires ou visuelles (bases non ponctuelles, périodes solaires non limitées à une position unique du soleil, etc.) sont généralement bien comprises. Même si ces contraintes ne sont pas évidentes pour tous les concepteurs, elles leur paraissent toujours logiques. De même, les notions de limitation des périodes solaires et de masques environnants sont appréciées pour leur utilité dans la démarche de pré-sélection des cibles solaires, alors qu'elles ne sont que rarement évidentes pour les utilisateurs.
- Quant à l'interprétation des résultats des modélisations inverses, nos observations montrent que les architectes prennent comme première initiative, de visualiser les solutions et la scène, en plan et en élévation. La deuxième initiative observée est l'opération de soustraction ou d'intersection des volumes de contraintes avec la modélisation de la scène afin d'appréhender l'impact de la contrainte sur l'environnement bâti.
- Enfin, en ce qui concerne la phase de modélisation des écrans solaires ou visuels, automatisée par la macro, les concepteurs ne semblent pas avoir besoin d'assistance. En effet, les cinq types d'écrans (horizontaux, verticaux, obliques, minimaux et de type panneaux solaires) sont facilement identifiables, soit par leur définition, soit par leur illustration disponible sur l'interface de notre outil. Si des confusions d'angles d'orientation ou d'inclinaison ont été remarquées, les concepteurs ont toujours rectifié leurs erreurs sans notre intervention.

Pour ce qui touche à la terminologie employée par les concepteurs :

- Le corpus de termes utilisés par les concepteurs pour désigner des instants de la journée ou des périodes de l'année est toujours imprécis ("*la fin de la journée*", "*l'heure du repas*", "*de mars à juin*", etc.) et fait référence à une culture collective du temps. Les heures choisies par les architectes pour définir les contraintes solaires, même avant de découvrir l'interface *SVR*, sont entières ou arrondies à la demi-heure près. Ces deux observations tendent à montrer que nos hypothèses de non prise en compte de l'équation du temps pour le calcul des heures solaires et de précision de notre modèle de voûte solaire limitée à la demi-heure près, peuvent être validées. De même, la notion de périodes élastiques peut être confortée par ce corpus qui ne distingue pas de différence entre une fin de journée d'été et une fin de journée d'hiver par exemple. De plus, les dates choisies par les concepteurs (le 21 de chaque mois) sont bien en adéquation avec notre modèle de voûte solaire. Certes ce choix est probablement influencé, d'une part, par notre modèle qui met ces dates clairement en évidence et d'autre part, par les cours d'enseillement des écoles d'architecture ou les références aux livres de géographie et d'astronomie qui ne présentent l'enseillement sous une latitude qu'à ces dates. Pour autant, les dates du 1^{er} et du 10 de chaque mois disponibles sur notre modèle ne nous semblent pas inutiles. Elles améliorent la précision des contraintes, même si les concepteurs ont l'habitude de ne considérer que les 21 des mois. N'alourdissant pas notre modèle et n'ayant pas reçu de critique, nous décidons de maintenir ces dates intermédiaires.
- Nous remarquons qu'une part importante du vocabulaire employé par les architectes pour désigner les opérations de manipulation des volumes de contraintes, est du registre de la sculpture ("*retailer dedans*", "*découper dedans*", "*sculpter*", "*tailler*", etc.). Cette remarque conforte notre approche de conception assistée par ordinateur qu'est la prise en compte des contraintes volumiques dès les premières phases du projet architectural. Comme nous l'avions imaginé, les volumes de contraintes sont manipulés par certains architectes comme des objets à part entière et servent à modéliser le projet final. Pour les autres concepteurs, les volumes de contraintes ne sont qu'une étape intermédiaire vers la recherche de solutions paramétrées (écran d'épaisseur, d'orientation et d'inclinaison données...).
- Nos observations montrent clairement un mode de verbalisation commun chez les utilisateurs de la technologie informatique : la conversation avec la machine et donc, la personnalisation de l'outil informatique, comme si celui-ci était une entité vivante ou, du moins, intelligente ("*il me demande*", "*je vais lui donner*", "*il n'a pas accepté*", etc.). Un autre mode de personnalisation est à mettre en parallèle avec ce dernier : l'appropriation des modélisations réalisées par l'outil ("*ma voûte solaire*", "*mon premier point*", "*mon volume de contrainte*", etc.), montrant par là, que les créations

de l'outil informatique sont ressenties par ces architectes comme leurs œuvres personnelles.

En ce qui concerne la vitesse de compréhension et le temps de prise en main de notre outil :

- Nous concluons qu'une durée raisonnable d'une heure est nécessaire aux architectes pour s'approprier l'interface principale de notre outil (première fenêtre, sans les options).
- Les architectes qui ont le plus exploité les différentes options de l'outil ont mis deux jours et demi pour intégrer complètement toute l'interface.
- Nous observons que certains architectes assimilent très bien le lien de cause à effet entre la réduction (ou l'élargissement) d'une période solaire et la diminution (ou l'augmentation) de la taille d'un volume de contrainte, puisqu'ils prennent des initiatives pour réduire l'impact d'une contrainte en diminuant les périodes solaires.

Quant à ce que nous appelons les révélateurs d'intentions, nous en identifions sept exemples qui peuvent provoquer une intention projectuelle chez les concepteurs :

- Nous observons que la représentation des positions solaires sous forme d'un diagramme interactif en 3D révèle aux architectes une meilleure représentation des positions potentielles du soleil, permet d'obtenir rapidement des données solaires, de souvent corriger des impressions fausses, de visualiser l'impact des masques environnants et donc de choisir des cibles et des volumes de contraintes réalistes.
- Nous identifions la simulation de l'accessibilité visuelle obtenue par le détournement de la fonction *lumières* du modèleur, comme étant un second révélateur d'intentions. Les cartes d'accessibilité visuelle permettent par exemple de prendre des décisions en amont de la conception proprement dite (délimitation des cibles ou des bases potentielles).
- Un ensemble de rayons solaires horaires représentés en 3D (arêtes des volumes de contraintes, en rendu filaire) est aussi identifié comme un révélateur d'intentions, car il permet à certains architectes de décomposer les volumes de contraintes puis les solutions selon l'interprétation visuelle qu'ils font de la pénétration de ces rayons solaires dans la scène, en coupe, en élévation ou en plan, et heure par heure.
- Les formes des volumes de contraintes ou des écrans modélisés révèlent aussi aux concepteurs des intentions, comme un alignement d'arbres pour tel écran vertical de proportions adéquates, ou encore, un débord de toit pour tel écran incliné.
- Les volumes de contraintes eux-mêmes sont parfois sources d'intentions projectuelles, puisqu'ils semblent provoquer un souhait fort chez certains

concepteurs, de les utiliser comme des éléments de découpe ou de sculpture des scènes architecturales ou paysagères.

- La recherche de l'optimisation solaire et visuelle d'un dispositif architectural est aussi considérée comme un élément révélateur. Ainsi, nous observons qu'une première intention d'optimisation d'un dispositif pare-soleil par des lames horizontales devant une baie vitrée peut aussi, par des raisonnements successifs fonctionnels et techniques (laisser une zone centrale pour permettre des vues dégagées, minimiser la portée et la profondeur des lattes, etc.) au détour de simulations inverses (de zones à protéger à des heures fixes dans le cas de notre observation), déclencher d'autres intentions projectuelles non envisagées avant la séance d'observation : la délimitation exacte et donc optimale de zones horaires ne devant pas être ensoleillées. Cette intention, réalisable techniquement grâce à un procédé industriel (le verre électrochrome), a pu être envisagée de manière pragmatique et efficace grâce à la démarche de modélisation inverse entreprise par l'architecte.
- Enfin, pour conclure cette liste provisoire de révélateurs d'intentions, nous disons que la hiérarchie et l'emprise des volumes de contraintes déclenchent, dans certains cas, une recherche de compromis pour satisfaire au mieux les différentes contraintes selon leur importance. Ainsi, entre plusieurs volumes de contraintes visuelles appliquées à une esquisse de projet, les architectes peuvent calculer un angle moyen de rotation ou une distance moyenne de recul des premières volumétries du projet afin de satisfaire les objectifs qu'ils ne s'étaient pas fixés au début de la démarche.

Pour finir, nous concluons que notre outil s'adapte plutôt bien aux situations imprévues :

- qu'elles soient matérielles (version espagnole du logiciel mère *AutoCAD*, type de pointeur et de souris utilisés, etc.)
- ou instrumentales (répondre à une demande de contrainte solaire limitée à un instant, limitation d'une voûte solaire déjà modélisée, etc.). D'une part, cette adaptation est due au fait que l'environnement du modéleur permet des échanges de fichiers provenant de logiciels de tout horizon, et d'autre part, au fait que notre modèle de voûte solaire est un objet solide 3D pouvant être retravaillé et représentant les doubles trajectoires apparentes du soleil.

Dans notre complément d'observations personnelles, nous remarquons que le modèle de voûte solaire nous révèle parfois des intentions que nous n'avions pas au début du projet. Ainsi une vue perspective depuis une base permet de délimiter les périodes solaires non masquées par la scène et si l'on ajoute à cela l'utilisation du calcul des masques environnants 3D, nous concluons que notre outil aide à délimiter les cibles de contraintes pour des scènes complexes (avec de la végétation par exemple). Comme pour les architectes observés, nous concluons que la simulation de l'accessibilité

visuelle permet de faire ressortir des bases ou des cibles de contraintes difficilement identifiables sans cette simulation. Elle participe donc à la définition des volumes de contraintes et des intentions sous-jacentes. Nous concluons aussi que les gabarits urbains obtenus par la simple soustraction des volumes de contraintes solaires et visuelles au volume constructible permettent de susciter des concepts (dissymétrie, dislocation, gradation, etc.) via les enveloppes urbaines ainsi "ébauchées". Quant aux situations imprévues survenant durant nos tests personnels de l'outil, nous nous adaptons en utilisant les fonctionnalités du modeleur (délimitation de cibles visuelles réelles par la visualisation de la scène depuis des cibles potentielles) ou en définissant de nouvelles notions telles que la simulation de contraintes lumineuses, donc la cible n'est plus une portion de la voûte solaire (ou céleste) mais une baie. Sans intégrer la totalité de la lumière diffuse, nous en concluons qu'il est possible de modéliser des volumes de contraintes lumineuses pour répondre à des intentions projectuelles du type : *"voir ou ne pas voir une baie par réflexion spéculaire sur un écran d'ordinateur ou de distributeur"*.

Conclusion générale

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Éléments de conclusion

Dans leur article intitulé *The importance of visualisation in concept design*, D.W. Dahl, A. Chattopadhyay et G.S. Gorn, [Dahl, Chattopadhyay et Gorn 2001] cherchent à faire avancer la connaissance sur l'importance de la visualisation dans la facilitation de la conception. Pour cela, ils interrogent cent quarante étudiants-concepteurs et montrent combien la force de l'utilisation de la visualisation est importante dans le processus de conception. Les réponses des concepteurs suggèrent qu'ils utilisent des images visuelles basées sur la mémoire comme principales sources d'idées au commencement du processus de conception. Les auteurs de l'article font une distinction entre la visualisation basée sur la mémoire (en référence à des événements expérimentés ou observés) et la visualisation basée sur l'imagination (événements jamais expérimentés auparavant par les concepteurs). Il est certain que la mémoire du concepteur représente une part très importante de la suggestion d'une idée projectuelle. Or, notre démarche de modélisation inverse ne propose pas de formes architecturales ou urbaines stéréotypées répondant à une contrainte, elle peut donc favoriser la visualisation par l'imagination. Nous pensons donc que les solutions modélisées par notre outil sont neutres au sens où elles n'imposent pas des choix constructifs ou structurels. Ponctuellement, ces solutions peuvent évoquer aux architectes des images ou des références de dispositifs, mais elles sont avant tout un résultat géométrique qui autorise la libre interprétation des concepteurs.

Dans notre état de l'art sur la simulation inverse solaire ou visuelle, nous mentionnons que les architectes et les chercheurs ont d'abord détourné l'utilisation de certains outils de simulation directe en 2D pour répondre principalement à l'optimisation de protections solaires et à la recherche de durées annuelles d'ensoleillement en un point afin d'ajuster un dispositif essentiellement par rapport aux périodes de surchauffes solaires. Nous remarquons que la démarche inverse 2D n'est pas totalement explorée, puisqu'elle n'est pas utilisée pour dimensionner des ouvertures. Les outils utilisés en simulation inverse 2D sont des diagrammes ou des abaques sur papier ou calque, des petits programmes informatiques qui donnent l'azimut et la hauteur du soleil pour chaque date étudiée et permettent de dimensionner la profondeur d'un brise-soleil en traçant des rayons "inverses", et des programmes informatiques plus sophistiqués capables d'optimiser généralement une protection solaire en coupe puis en plan mais toujours en 2D. En revanche, en simulation inverse 3D, nous observons des exemples d'applications très variés (*courbes de niveau solaires, enveloppes solaires, dimensionnement d'écrans brise-soleil, modélisation de volumes de contraintes visuelles*

ou solaires, etc.). Historiquement, nous constatons que M. Twarowski [Twarowski 1962] fut le premier à mettre au point une méthode de simulation inverse en 3D (les fameuses *courbes de niveau solaires*). La comparaison entre la simulation inverse 2D et la simulation inverse 3D permet de dire que cette dernière révèle mieux la globalité et la complexité des contraintes solaires et visuelles dans l'espace. D'ailleurs, les dernières recherches dans le champ de la simulation inverse ne traitent que de représentations 3D des contraintes. Les méthodes mises en œuvre dans ces recherches sont quasiment toutes graphiques ou informatiques (peu de méthodes de simulation *in situ*) ; elles imposent de réaliser des modèles graphiques ou numériques des scènes sur lesquelles portent les simulations. Les méthodes et outils que nous avons cités dans notre état de l'art s'appliquent très majoritairement aux contraintes solaires et sont exclusivement développés dans des laboratoires de recherche. Aucun de ces outils n'est commercialisé et aucun ne permet de régler en même temps, des problèmes inverses de visibilité et d'ensoleillement.

Pour ce travail de thèse nous avons développé un outil de modélisation inverse suffisamment complet pour être testé sur des projets variés (modélisation de protections solaires, optimisation d'échappées visuelles, contraintes de réflexions solaires, recherche de périodes d'ensoleillement et de masques environnants, modélisation d'*enveloppes solaires*, d'ouvertures optimales, d'écrans minimaux, de panneaux solaires idéalement inclinés, etc.). Nous disposons désormais d'un prototype de logiciel opérationnel dans l'environnement du logiciel de CAO / DAO *AutoCAD*. Nous avons montré qu'il répondait simultanément aux contraintes solaires, visuelles et de réflexion solaire ou visuelle avec une même interface, ce qui est, à notre connaissance, réalisé pour la première fois. Il s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche du Laboratoire Cerma de l'Ecole d'Architecture de Nantes et reprend les travaux de deux thèses sur la simulation inverse de l'ensoleillement [Siret 97] et de la visibilité architecturale et urbaine [Nivet 99]. Il utilise une nouvelle méthode de calcul des volumétries de contraintes, développée durant cette thèse pour "croiser" les ambiances solaires et visuelles. Nous avons évoqué les erreurs des modèles actuels d'ensoleillement dont certaines ont une influence mineure sur le calcul de l'ensoleillement, alors que d'autres ont une influence non négligeable à l'échelle de l'histoire de l'architecture (la précession luni-solaire et la précession planétaire). En revanche, à l'échelle humaine, ces erreurs sont insignifiantes. La seule source d'erreur que nous déplorons dans les modèles actuels d'ensoleillement est la non-prise en compte de l'épaisseur apparente du disque du Soleil (assimilé à un point). Elle est de $0,265^\circ$ pour la composante hauteur du soleil et est conséquente principalement pour des contraintes autour des deux solstices. Nous affirmons que les ouvertures ou les protections solaires calculées avec les logiciels actuels sont légèrement sous-dimensionnées pour les dix jours précédant et suivant le 21

juin et le 21 décembre. Considérant, qu'en terme d'éblouissement, l'erreur n'était pas négligeable, nous avons intégré l'épaisseur apparente du soleil dans notre modèle de voûte solaire. Concernant les propres erreurs de notre prototype, nous avons calculé le décalage dû à l'assimilation des trajectoires solaires infinies à leur projection sur une voûte céleste de diamètre 100 km pour une scène de 100 m. Ce décalage est de 0.05° pour la hauteur du soleil (et nulle pour l'azimut) par rapport à des rayons solaires idéalement parallèles. De plus, dans le cas de la saisie de cibles solaires uniquement, notre outil assimile les périodes solaires théoriquement courbes (portions de la voûte céleste) à des polygones. Pour une période de notre voûte solaire définie par la saisie des sommets représentant les demi-heures, l'erreur d'approximation des courbes des trajectoires solaires est, au maximum (autour des deux solstices) de $0,08^\circ$ pour la composante hauteur du soleil (et nulle pour la composante azimutale). Pour les périodes voisines des équinoxes l'erreur est nulle. Cette approximation des courbes des volumes de contraintes par des facettes planes a en revanche l'avantage de représenter, en rendu filaire, les rayons solaires pour une contrainte donnée et un pas de temps donné (la demi-heure, l'heure, etc.). Notons que d'une manière générale, la "barrière" de la demi-heure près semble difficilement surmontable. Quant à notre souhait de permettre une lecture en heures légales des voûtes solaires, nous avons employé la notion de "périodes solaires élastiques" pour identifier les début-milieu-fin de matinée et les début-milieu-fin d'après midi, plus ou moins "dilatés" selon les saisons. Ces périodes élastiques ont pour but d'aider le concepteur dans sa recherche de cibles de contraintes. Pour tester notre prototype, nous avons comparé la modélisation d'une *enveloppe solaire* réalisée, d'une part avec le prototype *SolVelo* développé à l'Université de Californie du Sud (USA) et d'autre part, avec notre outil. Nous remarquons une superposition quasiment parfaite des deux volumétries, excepté une légère différence qui correspond au fait que nous intégrons dans nos calculs l'épaisseur apparente du soleil.

Notre prototype de logiciel fut un moyen de valider ou d'amender les hypothèses de notre démarche inverse. Notre choix instrumental a pu être testé par onze concepteurs (cinq architectes et six étudiants en architecture). Un bref état de l'art sur les observations des concepteurs à l'œuvre nous a permis d'affirmer que de telles observations de la démarche inverse de la modélisation sous contraintes étaient réalisées pour la première fois. Elles contribuent donc à l'édification d'une analyse de cette démarche inverse et de ses applications en architecture. Si nous concluons que le dessin d'architecte est considéré par la plupart des auteurs que nous avons cités, comme un réducteur d'incertitudes, et le processus de conception comme un enchaînement de résolutions de problèmes, alors, la démarche inverse se situe très bien dans cet objectif de modélisation sous contraintes en phase d'esquisses ou d'avant projet. Sachant que ces

mêmes auteurs affirment clairement que les outils actuels d'aide à la conception sont inadaptés au processus de conception, que certains d'entre eux souhaitent des outils de simulation inverse, et que, de plus, l'ensoleillement et la lumière sont reconnus comme des facteurs récurrents dans le processus cognitif des concepteurs, notre démarche semble prometteuse. Après avoir relevé deux principaux protocoles d'observation (le protocole simultané ou *think aloud protocol* et le protocole rétrospectif), nous avons expliqué pourquoi nous avons employé le protocole "*think aloud*" de raisonnement à voix haute des architectes pour nos propres observations. Sans pouvoir conclure sur les fondements des processus cognitifs mis en œuvre, de manière générale, lors de la conception assistée par ordinateur, nous avons extrait de l'analyse de nos observations quelques tendances sur le processus de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle. Ainsi, notre prototype de logiciel semble répondre aux attentes des concepteurs, en terme d'ergonomie et de maniabilité dans l'environnement du modéleur, de précision du modèle de voûte solaire, de hiérarchisation des volumes de contraintes selon leur importance quantitative, et d'optimisation des solutions aux contraintes posées. Concernant ce dernier point, certains concepteurs semblent respecter et interpréter au plus juste la forme de la solution même si elle est souvent complexe, tandis que d'autres aiment s'approprier et retravailler les solutions modélisées par le logiciel et rechercher un compromis entre la forme, l'efficacité et la technicité de la solution. Excepté quelques blocages dus à l'oubli des recommandations d'utilisation du logiciel et à des erreurs d'inattention (confusions d'angles d'orientation, d'inclinaison, etc.), nous affirmons que les interrogations à voix haute des architectes suivies aussitôt de leur réponse, sont de l'ordre du prolongement d'une pensée intermédiaire dans le processus de découverte de l'outil de modélisation inverse. La notion de simulation inverse et l'intégration du temps dans les contraintes solaires ou visuelles sont généralement bien comprises. Nous concluons donc que notre outil est plutôt intuitif. Quant aux notions propres à notre démarche (limitation des périodes solaires, masques environnants, cartes d'accessibilité visuelle, etc.), elles sont appréciées pour leur utilité dans la démarche de pré-sélection des cibles solaires. La manipulation des volumes de contraintes en 3D (soustraction, intersection, sculpture, etc.) est tout aussi appréciée par les architectes, principalement car elle permet de visualiser interactivement, soit les volumes sous forme de solides 3D (rendu *Gouraud*), soit l'ensemble des rayons solaires 3D horaires (ou demi-horaires) de la contrainte posée (arêtes des volumes de contraintes, en rendu filaire). Nos hypothèses de non prise en compte de l'équation du temps pour le calcul des heures solaires et de précision de notre modèle de voûte solaire limitée à la demi-heure près, sont validées par nos observations, tout comme l'intérêt de l'utilisation des périodes solaires élastiques. Nous remarquons que, dans certains cas, la réduction des périmètres des cibles et des bases par la simulation de l'accessibilité visuelle ou par le calcul de masques environnants révèle

aux architectes des intentions projectuelles différentes (plus réalistes) de ce qu'ils prévoient au début de leur projet. L'impact des contraintes sur des enveloppes constructibles (soustraction des volumes de contraintes) semblent parfois susciter des concepts non envisagés par les architectes avant la visualisation de telles ébauches d'enveloppes constructibles. D'autres intentions révélées grâce à l'approche inverse ont été observées, comme la mise en œuvre d'un dispositif intelligent (verre électrochrome) dimensionné et programmé selon le calcul de l'évolution d'un écran solaire sur une baie, réalisé avec notre prototype, heure par heure ou demi-heure par demi-heure. Nous observons que la hiérarchie de l'emprise des volumes de contraintes déclenche aussi dans certains cas des intentions projectuelles qui tendent à répondre à un ensemble de contraintes par la recherche d'un compromis dans la modélisation des solutions volumiques. Par ailleurs, nous pensons avoir approché un équivalent numérique à la notion de flou du croquis graphique de l'architecte, décrit dans la littérature scientifique comme une étape obligée du processus de conception architecturale. Certes, notre approche numérique de modélisation inverse n'apporte pas le flou des traits de dessin, mais la notion de variantes à une solution devrait remplacer à l'écran la multiplication ou la superposition des traits que l'on observe sur le papier. Les solutions provisoires ou imprécises qui sont représentées par de nombreux dessins quasi identiques sur le papier, peuvent selon nous, être remplacées à l'écran par de multiples variantes de solutions exactes. De plus, les enveloppes que représentent les volumes de contraintes solaires ou visuelles sont, volontairement, des volumes provisoires. De manière transitoire, ils permettent à l'architecte d'exploiter l'ensemble des solutions incluses à l'intérieur des enveloppes qui représentent un "univers des solutions possibles", soit manuellement par des opérations booléennes successives, soit par des calculs automatisés de plusieurs solutions sur un même volume. Le flou dont parlent les auteurs cités dans notre état de l'art sur les observations d'architectes concevant, peut alors être cet univers des possibilités, puisque les volumes de contraintes laissent par définition la possibilité au concepteur d'exploiter à sa guise ou selon d'autres contraintes, une des solutions de cet ensemble qui deviendra *la solution* d'un projet. Il faut donc voir les volumes de contraintes comme des volumes provisoires, éphémères et donc flous au moins dans le temps, sinon dans l'espace.

Dans un souci de synthèse, rappelons que ce travail de recherche sur la modélisation géométrique et l'intégration des contraintes dans le projet architectural et urbain (voire paysager) ne s'applique qu'aux contraintes d'ensoleillement, de visibilité et de réflexions solaires ou visuelles. Rappelons aussi que l'étude des ambiances étant complexe et interdisciplinaire, il ne faut donc rechercher dans les représentations géométriques des contraintes, aucune donnée qualitative susceptible de qualifier la sensibilité solaire ou

visuelle, propre à chaque individu. Nous pensons qu'il est désormais justifié de parler de modélisation inverse et non plus seulement de simulation inverse puisqu'il est désormais montré que les architectes utilisent la démarche inverse pour produire des formes architecturales. Cette démarche consiste donc pour l'architecte, à sélectionner la surface qui sera le théâtre d'une intention d'ambiance souhaitée (voir ou ne pas voir le soleil ou une cible depuis cette base) et de viser une autre surface qui est, soit une portion d'un modèle de voûte solaire, soit un polygone cible d'une scène numérique. L'effet escompté est réalisé uniquement si la forme finale de la scène respecte le résultat de la modélisation inverse (écran, ouverture, découpe de la scène selon un volume de contrainte, etc.).

Dans notre introduction, nous organisons notre problématique sous la forme de trois questions : les outils développés depuis quelques années dans le champ de la simulation inverse ont-ils un cadre d'applicabilité ? Si oui, peuvent-ils être transposés tels quels ou bien doivent-ils être adaptés à la culture des agences d'architecture ? Et peuvent-ils être agrégés en un seul outil informatique ? Aux deux premières questions, nous répondons : oui, la démarche sur laquelle se sont développés les outils de simulation inverse de l'ensoleillement et de la visibilité puis notre actuel prototype de logiciel, peut être intégrée dans la démarche plus large du projet architectural et urbain. Nous avons montré qu'elle a précisément sa place dans le processus de résolution de contraintes et d'intentions d'ambiances, car aucun architecte observé n'a abandonné le processus de modélisation inverse mais au contraire, tous les concepteurs ont ressenti l'intérêt d'une telle démarche qui évite le "tâtonnement" d'une procédure d'essais répétitifs de simulations directes. De plus, tous les architectes ont utilisé notre démarche en phase d'esquisses ou d'avant projet, ce qui confirme notre première hypothèse : oui, notre démarche est adaptée à la culture des agences d'architecture pour la résolution de contraintes dès les premières phases du projet architectural ou urbain. Nous validons notre deuxième hypothèse en reprenant ce qui vient d'être dit (maintien de la procédure de simulation inverse pendant toute la durée des observations) et en ajoutant que les architectes observés qui avaient, préalablement aux séances d'observation, réalisé des simulations directes – qui ont duré au moins autant de temps que ces observations sans déboucher sur des résultats optimaux – ont préféré manipuler des modélisations de volumes de contraintes en 3D, plutôt que de revenir à un raisonnement 2D, en plan et en coupe, comme cela est fait pour des tracés solaires ou visuels sur papier. Par ailleurs, il semble que les conditions d'utilisation, d'ergonomie, de rapidité, et de compatibilité de notre outil avec la culture des agences d'architecture actuelles, soient suffisantes pour envisager une utilisation dès les premières ébauches d'un projet. Grâce aux volumes de contraintes qui intègrent le temps dans l'espace (angles multiples d'observation ou positions solaires évolutives) les architectes peuvent calculer des dispositifs solaires ou

visuels "intelligents", précis, optimaux et libres de toute pré-solution. Cette affirmation est notre troisième hypothèse. Celle-ci est validée alors même que nous aurions pu imaginer que des solutions pré-dimensionnées auraient pu être réclamées par les architectes. Peut-être ont-ils bien intégré que l'objectif de la démarche inverse n'était pas de produire des solutions standards mais bien des solutions optimales. Ou bien, les cinq types de solutions proposées (écrans horizontaux, verticaux, obliques, minimaux ou de type panneaux solaires idéalement orientés) leur suffisent pour modéliser ce dont ils ont besoin dans leur projet. La portée didactique que nous évoquons dans notre quatrième hypothèse semble confirmée par nos observations. Ainsi, la symétrie annuelle des trajectoires solaires, le rapport entre les heures solaires et les heures civiles, la visualisation des masques solaires environnants et la représentation de l'accessibilité visuelle semblent plus compréhensibles grâce à la représentation en trois dimensions. Enfin, nous pensons avoir répondu à la dernière question de notre problématique en développant un outil informatique pouvant être simultanément utilisé pour régler les trois types de contraintes que sont l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle. En réponse à notre dernière hypothèse, nous affirmons : oui un tel outil est plutôt bienvenu en conception architecturale et urbaine, car il permet de combiner des intentions d'ambiances différentes mais parfois étroitement liées, et ce, avec un outil unique.

Pour clore notre recherche, nous affirmons que ce présent travail est la suite logique de nombreux travaux sur la modélisation des contraintes qui commencent avec la *simulation bidimensionnelle* inverse de l'ensoleillement et de la visibilité et se poursuivent avec la *modélisation tridimensionnelle* inverse de solutions solaires et visuelles. Ces dernières n'étant pas limitées à des contraintes ponctuelles mais intégrées dans le temps, nous pourrions alors quasiment parler de modélisation inverse 4D (les trois dimensions de l'espace plus celle du temps).

Perspectives de recherche

N'ayant pas collecté suffisamment de données sur l'utilisation projectuelle des volumes de contraintes opposés \mathcal{V}_{opp} , des *enveloppes solaires* \mathcal{E} , des *enveloppes solaires* opposées \mathcal{E}_{opp} et des volumes de contraintes de réflexion \mathcal{V}_r , il nous est difficile de conclure sur leur pertinence. Pourtant, ces volumes semblent très prometteurs pour résoudre des contraintes légèrement plus complexes que celle qui consiste à "voir ou ne pas voir la totalité d'une cible depuis une base". En ce qui concerne les *enveloppes*

solaires [Knowles 1984] et [Knowles 2003], leur intérêt est prouvé par de nombreuses études nord-américaines. Toutefois, les architectes que nous avons observés n'ont pas eu à manipuler des *enveloppes solaires* car leurs intentions étaient toujours modélisées par des volumes de contraintes. Il serait donc intéressant de poursuivre nos observations sur l'utilisation des *enveloppes solaires* dans le projet urbain, ainsi que sur celle des volumes V_{opp} , E_{opp} et V_r afin de valider ou d'amender l'ensemble des possibilités offertes par notre outil de modélisation inverse.

Par ailleurs, la notion de porosité des brise-soleil évoquée par un des architectes observés mériterait d'être implémentée dans notre outil, afin de donner la possibilité aux concepteurs de modéliser des écrans ajourés laissant passer un pourcentage de rayons solaires. Ce pourcentage serait alors un paramètre supplémentaire que l'architecte pourrait modifier lors de la modélisation des écrans.

Un autre architecte a émis le souhait de manipuler des volumes de contraintes interactifs pouvant être modifiés (élargis, amincis, tournés, etc.) par simple saisie d'un des sommets de ces volumes. La mise en œuvre d'une telle interactivité permettrait à un concepteur de modifier la taille des bases ou des cibles de contraintes sans relancer un calcul de volume de contrainte. Cette évolution pourrait donner lieu à un futur développement de notre outil.

S'agissant de la notion de périodes solaires, nous rappelons que ces dernières ont été choisies arbitrairement de manière à ce qu'elles divisent les matinées et les après-midi en deux fois trois parties égales. Or, pour mieux coller à la réalité culturelle d'une région du globe, il faudrait affiner ce découpage selon les résultats d'une enquête auprès d'un panel représentatif de la population de cette région. Il est probable qu'une telle enquête aboutirait à la mise en œuvre de plusieurs types de périodes solaires élastiques qui différencieraient les modèles de voûte solaires selon leur latitude, mais aussi selon leur zone culturelle. La tâche s'annonce d'emblée difficile mais pas irréaliste.

Annexes

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Annexe 1

Dans cette annexe, nous présentons une méthode graphique de tracés des volumes de contraintes solaires à partir d'une élévation et d'un plan de notre modèle de voûte solaire. Remarquons que l'envergure du volume de contrainte ci-dessous est déjà très large pour une contrainte d'une heure seulement en hiver et en automne (du 21 septembre au 21 mars).

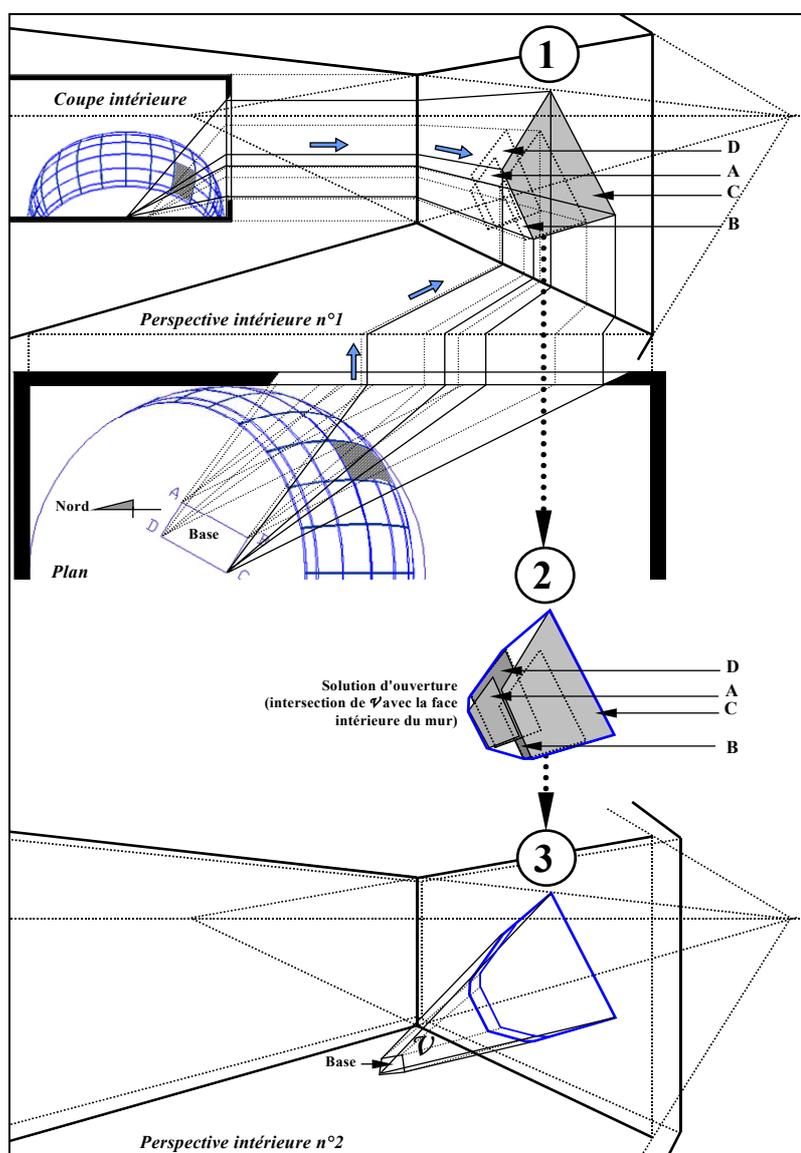


Figure A-0-1 : Tracé perspectif d'une solution d'ouverture répondant à la contrainte "voir le soleil de 9 h à 10 h, en hiver"

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Annexe 2

Dans cette annexe, nous plaçons l'ensemble des retranscriptions des enregistrements audio des architectes observés. Les enregistrements des architectes A2 et A5 sont intégralement retranscrits directement dans le texte du mémoire.

Journées d'observation du 22 et 23 juillet 2001

Y. T. Architecte – Ténérife – Espagne

SVR version 1.2

Retranscription d'après notes écrites

[L'architecte découvre l'interface et se l'approprié avec ses propres astuces (des raccourcis clavier, des vues, etc.). Sa première simulation porte sur une fenêtre standard espagnole orientée au sud (choix privilégié par l'architecte qui a de bonnes notions d'ensoleillement)]. *"Avoir du soleil de 14 h à 16 h du 21 février au 21 mars me semble bien. C'est l'heure du repas ici. [Quant au choix des dates :] c'est la période où le soleil est le plus recherché [dans cet archipel ibérique, à cette période, la fraîcheur y est même ressentie comme désagréable sous ce climat quasi-tropical]... et pour les mêmes dates, de 17 h jusqu'au coucher du soleil... pour simuler la fin de journée. C'est aussi la deuxième partie de la journée de travail des habitants de l'île, ici. Aucun problème...*

[L'architecte décide de simuler la visibilité entre une fenêtre traditionnelle et un immeuble voisin en vis-à-vis, ayant plusieurs fenêtres, et une maison entre les deux. Une cible large est définie en faisant pivoter la modélisation et en observant depuis quelles fenêtres de l'immeuble il est possible de voir la fenêtre traditionnelle]. *Est-ce que le volume de contrainte intègre la maison devant... ha, si... le fait qu'il y ait la cible intègre déjà seulement les fenêtres visibles...* [Il décide de revenir sur une contrainte d'ensoleillement, avec le calcul d'un brise-soleil pour la fenêtre standard]... *de 9 h à 11 h de juillet à août [heures où le soleil est relativement bas donc gênant, après 11 h il monte très vite vers le zénith. Les dates appartiennent à la période la plus chaude sur l'île] et un autre brise-soleil de 14 h à 17 h... on va pas aller trop loin... [après l'impact du soleil lui semble négligeable]... et un brise-soleil aux mêmes dates mais de 12 h à 16 h avec des lames horizontales... Pourquoi ne pas proposer un pourcentage de porosité du brise-soleil du type 45 % de porosité... c'est mieux pour parler avec le client. De toute façon, je ne suis pas pour les lux, c'est difficile à expliquer aux clients".*

Journée d'observation du 28 novembre 2001

V. M. Architecte – Cerma

SVR version 3.2

Retranscription d'après enregistrement audio

[L'architecte découvre l'interface de SVR pour la première fois]. "Donc là je vais créer une voûte solaire, puisque je n'ai pas de « voûte solaire témoin » [nom de l'option apparaissant sur la première ligne de l'interface]. Je suis dans l'hémisphère nord, donc je clique sur « hémisphère nord », la « latitude du lieu » c'est bien 47,2 puisque nous sommes à Nantes... « limiter aux périodes solaires visibles depuis une base de contrainte » [l'architecte lit les lignes suivantes de l'interface] il me semble qu'il faut cocher, oui... Ok, d'après ce que je vois je vais avoir... enfin ce qui m'intéresse c'est les périodes d'ensoleillement alors donc... « masque environnant depuis... image fish-eye... » donc il n'y a pas de masque environnant puisqu'une des hypothèses c'est d'être complètement dégagé de bâtiment, donc il n'y a vraiment pas de masque. J'arrive donc aux volumes de contrainte. « Créer 1, 2 ou 3 volumes de contraintes, euh... donc là par contre je veux en créer un, je vais en créer un seul en fait puisque je vais prendre un volume de contrainte entre deux lattes... je vais réduire le problème. Donc... « option de création d'écrans solaires ou visuels »... effectivement j'ai envie d'en créer un, enfin... mais bon, c'est la première partie [les premières lignes de l'interface] donc je l'ai déjà créée, ma voûte solaire ? [nous lui expliquons qu'il faut cliquer sur « ok »]. Ah, il faut valider ! Ah oui d'accord... d'accord... ça s'était pas clair... donc je recommence donc. Je crée une voûte solaire... je reprends l'hémisphère nord, latitude 47,2... je limite aux périodes solaires visibles depuis une base de contrainte... donc je vais valider. Voilà, j'ai l'impression que ça calcule... le reste est grisé donc je n'ai pas encore la main pour faire autre chose et on m'indique des... enfin on me donne des indications [sur la ligne de commande, puis dans une fenêtre SVR] : «vous avez demandé à ne voir que les périodes visibles. La voûte solaire va donc être réduite à une simple portion visible depuis le plan de base que vous avez sélectionné » [l'architecte a lu « avez » au lieu de « allez ». Nous intervenons...] euh, « vous allez » oui parce que je me disais que je ne l'avais pas sélectionné. Donc je suis d'accord, je dis « ok »... là il me met dans la bande de commande « cliquez sur le point... » le premier point en fait du plan de la base. Donc... donc je me... enfin instinctivement je me déplace sur la voûte solaire. Du coup j'ai besoin de me repérer par rapport aux périodes. [L'architecte est perdue par rapport aux vues. Nous lui conseillons de regarder dans la fenêtre qu'elle a nommée "fenêtre base" et de bien rendre visible la base afin de pouvoir la sélectionner plus tard]. Ce que j'aurais pu faire par contre, c'est qu'au lieu de prendre... non je vais la sélectionner là-dessus [en élévation] ça sera beaucoup plus simple pour moi. Donc je vais le préparer ici... Alors je recommence, ça tourne... oh, ça marche... très bien ! [Mais l'architecte,

voulant faire tourner sa vue, utilise la fonction *vue orbitale* du modeler en cliquant sur l'icône correspondante, ce qui fait échouer SVR]... *ça par contre je pense que c'est important de le spécifier* [nous lui rappelons l'intérêt de la molette de la souris pour zoomer sur le centre de la voûte afin de voir la scène]... *ah, c'est génial... d'accord... d'accord, ah c'est super... elle est là ma scène. Bon, je ne fais plus qu'avec la molette maintenant. Donc je vais sélectionner mon premier point de base. Donc je prends juste l'espace entre les deux lattes mais sur finalement toute la totalité de l'élément de paroi* [la totalité de la largeur de l'élément]. *L'architecte sélectionne son plan de base. Donc en fait je vais commencer là, donc je vais tourner dans le sens des aiguilles d'une montre* [consigne SVR]. *Donc je vais faire ça, le deuxième point je vais faire ça, le troisième... je vais le mettre là* [cliquer là]. *Voilà. En fait ma voûte elle était coupée parce que j'ai dit que j'étais limitée... parce que mon orientation est est-ouest donc de toute façon je ne vois qu'une partie. C'est ça ? Moi, comme je veux étudier l'été par exemple... je vais prendre une date, le 21 juin voilà... il faudrait que ça protège entre 13 h puisque en fait le soleil passe derrière la façade à midi* [heure solaire – façade ouest] *donc de 13 h à... admettons à 17 h. 17 h, heure solaire, en heure légale on arrive à... quasiment à 19 h donc on peut prendre une fourchette comprise entre 13 h et 17 h* [heure solaire correspondant largement à la fin de l'utilisation quotidienne de la cellule de bureau]. *Maintenant je veux déterminer la cible donc je fais « Alt F8 »... là du coup... euh je passe à... donc comme je n'ai pas à créer de masque je saute cette étape. Je crée « 1, 2 ou 3 volumes de contrainte », donc je fais « option de création d'écran solaire » oui, euh « taille de la scène » alors on me donne... oui bien 100 m [par défaut] ça ira bien. « Nombre de cibles » pour l'instant je vais en faire qu'une. « Nombre de point de la base »... je lui en mets quatre. « Nombre de point de la cible numéro 1 » donc alors là je vais calculer parce que comme je veux pour 13 h, 14, 15, 16, 17 donc, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10... je mets 10. J'en mets 10. « Couleur du volume numéro 1 », donc ça c'est moi qui choisis la couleur... admettons jaune ça me paraît très bien. Alors maintenant... comme j'ai dit que je voulais une cible forcément après on m'interdit le reste [grisé car accessible si plusieurs cibles choisies]. Donc là je vais faire « ok ». Donc là il me demande de cliquez sur... la base donc là je vais cliquer une fois. J'y suis déjà... je donne le premier point, il me demande après le deuxième point, le troisième point... le quatrième point. Voilà, alors après maintenant je change de cadre puisqu'il faut que je donne le premier point de la cible. Donc je clique une fois pour me mettre sur la fenêtre [avec une vue sur la cible]. Donc je vais commencer par là. [L'architecte clique sur les 10 points de sa cible qui a pour épaisseur uniquement celle de la trajectoire apparente du soleil le 21 juin]. Donc là j'ai déterminé la base et j'ai déterminé la cible. Donc ça calcule... hop j'ai un écran [la fenêtre SVR d'option de gestion des écrans] qui apparaît. « option écran solaire ou visuel optimal répondant*

exactement... » etc. « Créer un écran d'épaisseur... ». C'est là que je vais donner l'épaisseur de ma latte. Donc je vais lui donner... Les unités c'est en cm ? [Nous lui répondons évidemment qu'il s'agit des unités sélectionnées sous AutoCAD dans le menu Format/Contrôle_des_unités... L'architecte doit choisir parmi trois types d'écrans]. Alors « horizontal », « vertical » ou « oblique »... donc horizontal plutôt. « Variantes »... « proposer... 2 variantes... »... Ce que je pensais faire c'est refaire la même manipulation le 21 décembre te le 21 mars... et après effectivement peut-être que du coup... c'est pour avoir une première approche par rapport à l'accumulation de soleil avec une latte carrée [premières esquisses de l'architecte]... et du coup prendre une option sur la forme des lattes et après pourquoi pas faire [d'autres calculs] sur des périodes... de mars à juin, de juin à septembre, de septembre à décembre à... [L'architecte sort des documents écrits et tracés à partir d'un Girasol] j'ai calculé le 21 décembre... 15 h correspond à 16 h... il [le soleil] se couche entre 15 h et 16 h. [Le site étant dégagé de tout (hypothèse d'étude) l'architecte se demande si SVR prend en compte le couché du soleil. Elle trouve la réponse à sa question sans que nous intervenions] alors justement... justement est-ce que dans le système SVR quand je clique sur mes points est-ce que je peux avoir le couché du soleil... ah oui, si, je vois où est-ce qu'il est ! Alors la voûte, je l'ai affichée ou pas... en fait le coucher du soleil il est là, c'est ça ? Le 21 décembre, il est là, oh c'est magique, vraiment c'est super ! Et alors là... 17 h ça correspond à 19 h 09. [L'architecte choisit de simuler des périodes d'ensoleillement comprises entre 12 h 30 et 17 h]... D'abord je propose de faire des vues pour bien se repérer... donc celle-ci je vais la mettre en face, je vais d'abord mettre les SCU [système de coordonnées de repérage]... Donc là maintenant je veux mettre... je veux faire Alt F8 [pour lancer la macro SVR]... donc ça c'est bon... masque ? Toujours pas de masque... donc là je vais créer un volume de contrainte. Alors toujours 100 m [de taille de scène], une cible... « nombre de points de la base »... 4, « nombre de points de la cible » 10... euh non, il y en a 12... « option de création d'écrans » oui, on va la mettre en jaune... oui c'est bien... Ah oui bien là je vais prendre la base... donc... ok, ... quatrième point... donc voilà je me mets là... toc, toc... donc là ça calcule... « option écran solaire ou visuel optimal » on a toujours une largeur [épaisseur de latte choisie par l'architecte] de 0,03 m sur un plan horizontal, on met pas de variante, « conserver... » [option de conservation du volume de contraire] on conserve le volume de contrainte pour réaliser d'autres calculs... Voilà, donc on a la nouvelle pyramide [volume de contrainte solaire]. « Cliquez sur le point d'insertion du plan support de l'écran recherche » donc là il faudrait que j'affiche le calque... ah non, je vais prendre la moitié de... non... non en fait oui j'aurai du rallumer le calque zéro [celui qu'elle avait éteint afin de rendre plus lisible la scène et qui lui permettrait de trouver un point d'insertion] avant de lancer ça. Bon, c'est génial ça... donc là voilà, donc j'aimerais quand même prendre une mesure... [Elle prend des notes et enregistre son document].

Bien, c'est super... donc là je n'avais pas de soucis à part... qu'est ce que j'avais oublié ? J'avais oublié... non...bon, bien c'est parfait... Je vais quand même faire un petit zoom pour voir la forme de la latte. Elle part par là... mais c'est pas gênant. Super, vraiment super ! [Elle décide de simuler l'ensoleillement de la cellule le 21 mars pour les mêmes heures (12 h 30 à 17 h)]. Donc, c'est parti, Alt F8... « exécuter »... donc il y aura le même nombre... c'est la même base... on va le mettre en vert. Donc voilà, le premier point de la base, hop... voilà, hop... voilà, donc la cible est là... 14 h, 15 h... je vais regarder en coupe. Pour 16 h, en fait la largeur optimale elle est de 3,88 centimètres pour 16 h, en fait ça viendrait ici quoi. [Elle mesure] la largeur de la latte. En fait c'est le 17 h qui gêne un peu [rayons très bas donc largeur de lattes très importantes tendant vers l'infini]... oh, j'en reviens pas que ça soit si important... [Elle opère une deuxième simulation : le 21 décembre. Cette date, comme le 21 juin ou comme le 21 mars, a été choisie par l'architecte pour tester des dates clé dans l'année]... Moi je trouve que c'est à la portée de tout le monde... d'utilisation... A mon avis il faut quand même essayer de faire optimal, après... après on trouve des compromis [entre le coût et l'optimisation]."

Journée d'observation du 4 décembre 2001

V. M. Architecte – Cerma

SVR version 3.2

Retranscription d'après enregistrement audio

L'architecte choisit ses périodes solaires "de 12 h 30 à 17 h entre mars et juin [donc aussi entre juin et septembre] et de 12 h 30 à 15 h en décembre. [Elle vérifie quels sont] les dates [heures et mois] qui sont les plus néfastes [rayons solaires dont la coordonnée z est la plus petite]. C'est logique car en vérifiant le z sur la voûte solaire, la hauteur du soleil le 21 mars à 17 h est plus importante que le 21 décembre à 15 h. En coupe, l'utilisation [la lecture des résultats] est aisée."

Journée d'observation du 13 décembre 2001

V. M. Architecte – Cerma

SVR version 3.2

Retranscription d'après enregistrement audio

"J'ai fait des simulations avec SVR sur des périodes très restreintes pour essayer de délimiter les cas critiques, les heures critiques en fait, les moments où le soleil est très bas et où finalement la largeur de latte obtenue [avec SVR] est considérable et complètement aberrante puisque souvent les rayons bas finalement sont en périodes hivernales et en hiver les rayons sont peu puissants. Donc mettre par exemple 91 centimètres en largeur de latte pour le 21 décembre entre 15 h et 16 h, ça n'a vraiment... vraiment aucun sens. Donc, je réalise les simulations pour des périodes très restreintes. Je fais pour le 21 décembre, 21 janvier, 21 février, 21 mars, 21 avril, 21 mai et 21 juin, pour les heures qui vont donc de 12 h 30 à 13 h, puis de 13 h à 14 h, puis de 14 h à 15 h, puis de 15 h à 16 h et de 16 h à 17 h. Donc en fait, on obtient des résultats. J'ai décidé d'enlever... afin d'éliminer certains cas qui sont pour le 21 décembre, une largeur de 91 centimètres, pour le mois de janvier... là il faut que je vérifie quelque chose... Pour le mois de février de 16 h à 17 h on a une épaisseur, une largeur de latte de 54,63 centimètres ce qui est énorme aussi et puis on arrive pour le 21 mars à 16 h et 17 h... on obtient finalement 8,57 centimètres qui restent tolérables mais peut sembler une limite vraiment supérieure à ce qu'on peut envisager. On trouve d'autres résultats, comme pour 21 décembre entre 14 h et 15 h. Le résultat c'est 6,85 centimètres. On trouve ce même résultat pour le 21 janvier entre 14 h et 15 h, donc finalement... et on trouve également 6,83 centimètres pour le 21 février entre 15 h et 16 h. Donc finalement on s'aperçoit qu'en période hivernale, on peut peut-être considérer que la limite de 6,85 centimètres est la limite supérieure puisque... enfin est une bonne limite puisqu'elle répond à trois périodes [d'une heure] de la période d'hiver... pour le mois de décembre, le mois de janvier et le mois de février. Donc ça me paraît être une bonne limite pour répondre de manière optimale. Alors une autre information également... j'avais pensé après l'esquisse, le système [enveloppe "double peau" conçue par l'architecte] étant tellement flexible dans le positionnement des lattes... que j'avais réduit l'étude à deux cas, donc le cas hiver et le cas d'été. Donc finalement je me suis dit d'après les résultats obtenus sur le tableau précédent [Tableau 3.1] dont je viens de parler que finalement il serait peut-être bon de considérer des largeurs de lattes différentes entre... et donc obtenir une limite de 6,85 centimètres que l'on a vu dans les trois cas que j'ai cités précédemment pour la paroi intérieure. Et donc lorsque l'on regarde les résultats pour la période estivale, finalement on s'aperçoit qu'une limite de 3,35 cm [erreur rectifiée plus tard à 4,65 cm] finalement permettrait de protéger

totallement des rayons du soleil pour la période estivale. L'étude faite sur une période d'une heure chaque mois permet de donner une première évaluation de ce dimensionnement. On n'aurait jamais pu le prévoir s'il n'y avait eu cette simulation. La forme de latte optimum est une forme non régulière, donc là en fait dans les simulations j'ai vraiment retenu que la largeur parce que c'est ce qui me semble le plus important actuellement et j'ai parlé de la largeur base de la latte pour un soucis d'économie de matière car si l'on prenait la largeur haute en fait on aurait des lattes beaucoup plus importantes, alors après c'est vrai que... on verra peut-être que pour assurer un confort... enfin... une certaine luminosité dans la pièce, il serait peut-être nécessaire de combiner la largeur haute et la largeur basse pour certaines... configurations... Voilà. Il faudrait peut-être juste que je vérifie au niveau du 21 janvier... Ce qui est vraiment bien aussi c'est que... on peut revenir dessus, les données sont acquises [les volumes de contraintes sont sauvegardés comme n'importe quel volume du modeler] et donc là par exemple j'ai un petit doute sur le dimensionnement... il suffirait que je réouvre le fichier donc pour vraiment vérifier la valeur... [l'architecte attend, puis lance AutoCAD et vérifie la cote de la largeur base de la latte en vraie grandeur. Elle avait mis un zéro en trop à une valeur]... "J'avais quand même bien vu qu'il y avait une erreur." [Elle refait des simulations pour vérifier ses résultats. Ces derniers sont, toujours les mêmes au millimètre près. Puis elle décide de simuler d'autres cas d'ensoleillement et de visibilité]. Là je vais créer une voûte solaire. Par contre ils vont peut-être me demander un point. [Nous intervenons pour lui dire qu'il n'y a pas besoin de rentrer de point, car la voûte est centrée sur la scène]. Maintenant que j'ai ma voûte je fais... janvier de 16 h à 17 h... En fait, ce n'est pas jusqu'à 17 h mais jusqu'au coucher du soleil... [l'architecte s'aperçoit en regardant la voûte solaire 3D que le soleil est couché à 17 h en janvier] donc c'est un peu ridicule de faire ça, même à 16 h. [Elle effectue tout de même le calcul et observe le résultat en coupe] effectivement c'est complètement aberrant... j'avais pas de valeur [dans le Tableau 2.3] mais il y avait bien une raison, maintenant on a vérifié. Je vais changer l'espacement... pour permettre la vue... mais bon... non, avant je pense qu'il serait peut-être plus intelligent de faire le solaire et le visuel parce que si ça donne de bons résultats ce n'est peut-être par la peine non plus d'aller changer l'épaisseur... si on voit à travers... on changera l'épaisseur que si... puisque le meilleur cas c'est quand l'épaisseur est le moins bien [la plus large] puisque l'épaisseur de la latte sera plus petite. Autant qu'on essaye de voir si la forme des lattes permet d'optimiser. Alors par contre, à mon avis, du coup il faut redonner... refaire un dessin sous AutoCAD, de coupe.[Elle choisit] un élément de façade pour avoir une vue vraiment dégagée au milieu. Si je mets 1,20 m du coup je serai au milieu de la partie vitrée... [elle dessine une base à 1,20 m du sol sur toute la surface de la cellule]... dans un premier temps pour que je puisse voir sur l'ensemble... pour qu'en position assise, que je mette mon bureau

là ou là il n'y ait pas de contrainte au niveau visuel. [Elle lance les calculs, pour deux volumes de contrainte de même base. En coupe, elle observe l'inclinaison des rayons visuels]... ça peut être intéressant de voir vers quelle forme [de latte] il faut mieux s'orienter. Le cas le plus défavorable se situe là [devant la baie avec des rayons visuels à ~ 85°]... d'où l'intérêt peut-être d'une latte comme ça [de forme triangulaire]... oh, c'est génial, ou ça peut même être ça... bon, à empiler c'est pas génial. Déjà dans la zone où il y a des taches solaires [correspondant à la partie non protégée où l'architecte a conçu un autre type d'écran pour protéger les usagers] je pense qu'il faut éviter. On ne va pas se mettre tout près de la façade, donc peut-être que l'on peut délimiter une base plus petite. Ici, devant la façade il faut laisser de toute façon de quoi passer parce que le bureau ne peut pas être collé, parce que la commande de l'élément de paroi [de l'autre type d'écran] est automatique ou manuelle."

Journée d'observation du 20 décembre 2001

V. M. Architecte – Cerma

SVR version 3.2

Retranscription d'après enregistrement audio

[L'architecte définit une base convexe de 2 x 2 m à 1,20 m du sol pour la position assise d'un usager de la cellule de bureau qu'elle conçoit, et une base concave à 1,60 m du sol pour la position debout de l'utilisateur]... *"je vais créer une cible, du coup je m'arrête à 16 h en décembre et 17 h en juin... et mars en fait. Donc la cible est à cinq points."* [La macro SVR vient de calculer les volumes de contraintes ; ils apparaissent en trois dimensions sur l'interface du modèleur]... *"c'est génial cette affaire !"* [Le but de l'architecte est de visualiser les parties de son prototype de paroi "double peau" sur lesquelles elle doit absolument placer des lamelles brise-soleil afin de] *"ne pas être ébloui par le soleil durant l'année"*. [Le résultat est assez proche de ses premières intuitions et simulations directes, mais uniquement en élévation pour la hauteur des rayons solaires. En plan, les simulations inverses renforcent une de ses hypothèses qui est de limiter la protection solaire de la cellule aux deux tiers droite de la façade], *"afin de ne pas bloquer l'ensemble de la baie"*.

Journée d'observation du 22 février 2002

H. P., N. P. et G. P. – étudiants en 3^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes

SVR version 4.10

Retranscription d'après enregistrement audio

[Les étudiants doivent proposer un dispositif de lutte contre le rayonnement solaire direct. Ils découvrent l'interface *SVR* et bloquent un instant sur l'icône du volume de contrainte. Un étudiant fronce les sourcils, tandis qu'un autre semble comprendre] "*c'est parce qu'on a intégré... le temps*". Et l'autre étudiant : "*ha oui, je vois...*" "*Ce serait bien que le logiciel trouve le meilleur brise-soleil*" [remarquant qu'il y a aussi possibilité de calculer un brise-soleil oblique, leur questionnement est tout naturellement de savoir s'il est possible de demander à *SVR* de calculer l'écran optimal pour un point donné sans lui imposer son inclinaison ni son orientation, évitant ainsi de comparer les résultats pour trouver le meilleur]. [les étudiants sont extrêmement à l'aise sur le modelleur *AutoCAD*. Ils trouvent toutes les astuces pour gagner du temps lorsque *SVR* "*tourne*", pour éviter de faire échouer les calculs (utilisation de la molette de la souris pour zoomer et déplacer les objets, paramétrage du type d'accroche avec la fonction du modelleur *Accroch/Clic_droit/Paramètres/Extension...*). Ils choisissent les rendus adéquats pour la lisibilité et l'utilisation des volumes de contrainte avec la fonction *Ombre/Rendu_Gouraud/Rendu_filare_3D...*]. "*Oh c'est super parce que du coup on peut mesurer la taille* [de l'écran]." [Un étudiant, s'inquiète d'une simulation qui semble donner des résultats trop ambitieux (écran protecteur extrêmement grand)]... "*et si l'on réduisait les heures d'ensoleillement* [pour réduire les volumes de contrainte et donc les écrans solutions]". [Dans un souci pédagogique, nous intervenons et proposons de simuler une période de protection solaire plus petite en passant de "avril/août" à "mai/juillet", mais un des étudiants intervient]... "*non les heures* [il veut modifier uniquement les heures d'ensoleillement]... *puisque comme ça les rayons seront moins hauts* [d'où un écran solaire plus petit et facile à construire]. "*On va prendre de mars à juin... et aller-retour* [montrant la période d'été superposée à celle du printemps]".

Journées d'observation du 11 et 12 avril 2002

F. P., Architecte à la Mairie de Niort

SVR version 5.1

Retranscription d'après enregistrement audio

[L'architecte F. P., découvre notre interface]. *"Ok, je comprends... on va mettre une cible. [Il veut créer une cible mais l'option est "grisée". Il comprend alors qu'il faut désélectionner l'option principale de création de volumes de contraintes]... ah, d'accord... c'est un peu dommage que l'on soit obligé de cliquer l'option, mais bon peut-être que cela n'est pas gênant pour d'autres... il faudrait demandé aux autres [l'autre architecte présent dans la salle] ce qu'ils en pensent. [Pour cette première étape, nous utilisons un de nos fichiers simplifié : l'îlot Boucherie sur lequel figure uniquement l'îlot, un repère historique (l'église St-Nicolas) et la vitrine d'une boutique risquant de ne plus être ensoleillée après l'opération architecturale prévue sur l'îlot]. Taille de la scène : on va mettre 500 m [il mesure approximativement la taille de l'îlot en diagonale]. Là je mets ok... l'option miroir on ne va pas regarder cela tout de suite. [Sur la ligne de commande, il lui est demandé de cliquer sur les points de la base, mais il ne voit pas la ligne de commande. Nous intervenons pour lui montrer]. Je n'ai pas trop l'habitude d'utiliser AutoCAD, mais c'est vrai que c'est ici que ça se passe... on va simuler une contrainte d'ensoleillement pour une heure le 21 décembre à 15 h. [la contrainte est inattendue car très ponctuelle. Par curiosité, l'architecte soustrait au volume de l'îlot Boucherie, le volume de contrainte. Le résultat est un percement de l'enveloppe de part et d'autre du volume]... "ça n'a pas vraiment de sens, parce que ça ne dure qu'un instant, mais c'est juste pour voir... enfin... pour simuler les contraintes solaires de stands, de foires, d'expositions, etc... c'est bien pour des structures temporaires aussi. [L'architecte simule une contrainte solaire sur la vitrine (d'un coiffeur) au pied de l'îlot Boucherie]. On garde la même date, mais entre 13 h et 14 h cette fois... une heure chez le coiffeur par exemple... [il s'intéresse à l'option des écrans]... le schéma [l'image illustrant les cinq types d'écrans possibles] est bien fichu. Par contre, si lorsque l'on clique sur le type 1 de brise-soleil, le n°1 du schéma s'allumait, ce serait encore mieux peut-être... [intervention d'un autre architecte]". "« cliquez sur le point 1/4 de la base... »... c'est malin, je ne sais plus combien de points j'ai déjà sélectionné [il se rappelle uniquement le nombre de points qu'il avait choisi]... ha si évidemment il y a la ligne de commande." [L'architecte F. P. décide de simuler une contrainte visuelle depuis une modélisation de la salle de la Mairie de Niort où nous nous trouvons.] "Il y a une fenêtre d'angle [verticale] dans cette pièce qui donne sur l'église St-André... on va simuler le choix de l'architecte [J-F. Milou]. On va voir a posteriori si le choix de l'archi à été*

judicieux. La cible, c'est la flèche, enfin les deux flèches de l'église... depuis les tables, on veut voir en position assise [~1,40 m] les deux flèches de l'église St-André."

Journée d'observation du 14 mai 2002

Y. J., E. L. et S. M. étudiants en 5^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes

SVR version 6.1

Retranscription d'après enregistrement audio

[Un des étudiants comprend très vite l'intérêt des cartes d'accessibilité visuelle]... *"non, parce que s'il faut tester tous les endroits d'où l'on voit notre tour, on va tâtonner, ça va être difficile. Il faut mieux utiliser une méthode plus simple... Vu les proportions que nous avons données à notre musée, 70 mètres de haut... on devrait faire de la concurrence à la Tour de Bretagne." "Pourquoi on ne peut pas indiquer que la scène fait 10, 100 ou 500 mètres par exemple puisque le volume va bien relier la base à la cible ?" "Si on tourne l'image [la modélisation] il faut refaire le calcul... ça ne se modifie pas si on tourne la boîte là [un des nombreux parallélépipèdes qui constituent les salles d'exposition du musée]". [Un étudiant demande à un autre]... "on peut peut-être décalé l'escalier..." "Si on pivote le bâtiment, on aura... toutes les boîtes [qui seront du même coup décalées donc plus intersectées pas le volume de contrainte visuelle]" [L'idée est bien reçue par les deux autres concepteurs]... "et puis ça ne change pas grand chose par rapport à l'orientation, vis-à-vis des alentours, vis-à-vis de la petite place qui est devant... on tourne légèrement... comme on était sur un plan d'eau déjà, on était assez libre quoi [plan de masse et implantation au stade des premières esquisses]". "Parce que les boîtes... pour retailler dedans [leur soustraire le volume de contrainte] ou même les reculer, ça va être difficile... et encore que... on peut peut-être la pousser un peu mais pas la pousser d'autant [4 mètres de porte-à-faux supplémentaires]." "Oui mais si on tourne un peu le bâtiment, on peut peut-être la décaler un peu..." "Si on tourne suffisamment, ça n'aura plus lieu d'être..." "En fait, avant il faudrait essayer sur la Cathédrale pour voir si..." "Oui alors on le fait directement alors à partir de la même base..." "En fait les petites passerelles gênent [les boîtes gênent les petites passerelles], sinon l'axe principal [la coursive centrale] est bien dégagé, ... on voit bien..." "Donc là on essaie sur la Cathédrale... d'accord... pour la moitié supérieure non ? [il interroge les deux autres étudiants qui approuvent aussitôt]. "On ne peut pas calculer l'angle entre celle-ci [la contrainte visuelle sur la Tour de Bretagne, formalisée par le volume 1] et celle-ci [le volume de contrainte visuelle sur la cathédrale], pour voir... de combien on doit tourner le bâtiment..." "on va faire une*

moyenne entre le jaune [le premier volume de contrainte visuelle sur la Tour de Bretagne] et puis l'autre [celui sur la cathédrale]... [Les étudiants mesurent l'angle moyen entre la normale de la façade et les deux volumes de contrainte avec la fonction *distance* du modèleur]... *"quarante et un moins vingt-cinq [degrés] divisés par deux, c'est ça"* [l'étudiant interroge ses deux autres collègues et le bâtiment est tourné de 33° sur sa base de façon à réduire l'intersection des volumes de contrainte avec la cage d'escalier] *"C'est pas trop mal ça..."* [ils opèrent une soustraction du volume de contrainte qui semble encore être intersecté par la cage d'escalier nord-est malgré la rotation du musée] *"l'escalier, ... il ne peut pas venir dans ce sens là"* [l'étudiante interroge ses collègues]... *ha non ç'a va gêner, oui ç'a va gêner* "on peut peut-être le reculer", *"oui, fais voir"* [les étudiants décident de reculer l'escalier de quelques centimètres. Puis ils simulent un volume de contrainte visuelle depuis le dernier étage de leur musée, sur le *Château des Ducs de Bretagne*]. *"Là j'ai voulu faire un zoom et là j'ai pris un bouton de commande [cliqué sur une icône]... il n'a pas accepté."* *"Alors, là par contre j'ai un peu plus de mal à voir dans quel sens il est [le château en vu filaire]... qu'est ce que c'est que ça... j'ai l'impression que c'est le dessus alors que... ah oui d'accord."* *"Le seul truc c'est que là...il faudra mettre le bâti."*

Bibliographie

Références bibliographiques

Ouvrages, articles et communications scientifiques

Achard P. et Gicquel R., *European passive solar handbook, basic principles and concepts for passive solar architecture*, Commission of the European Communities, Bruxelles (Belgique), 1986, 201 p.

Adolphe L. *et al.*, *Ambiances architecturales et urbaines*, *Les Cahiers de la Recherche architecturale n° 42/43*, Editions Parenthèses, Marseille (France), 1998, 251 p.

Akin O., *Psychology of Architectural Design*, Pion, London (UK), 1986

Arumi-Noé F., *Algorithm for the geometric construction of an optimum shading device*, *Automation in Construction n° 5*, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 1996, pp. 211-217

Aubourg E. et Zignani P., *Espaces, lumières et composition architecturale au temple d'Hathor à Dendara. Résultats préliminaires*, Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale, tome 100, Le Caire (Egypte), 2000, pp. 47-77

Augenbroe G. *et al.*, *An integrated urban solar design tool*, in *Proceedings of The 3rd European Conference on Architecture, Solar Energy in Architecture and Urban Planning*, Florence (Italie), 1993, pp. 295-298

Augenbroe G. et Winkelmann F., *Integration of simulation into building design process*, in *Proceedings of International Conference on Building Simulation*, Nice (France), 1991, pp. 367-374

Bernard C., *Le soleil retrouvé, l'ajustement de la forme urbaine en regard des conditions atmosphériques qu'elle induit*, Ecole d'Architecture de Nantes, Nantes (France), 1993, 86 p.

Béguin P. et Weill-Fassina A., *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*, Octares Editions, 2001, 136 p.

Boudon P., Deshayes P., Pousin F. et Schatz F., ***Conception Architecturale Architecturologiquement Assistée par Ordinateur***, Ecole d'Architecture de Nancy, Nancy (France), 1993, 258 p.

Capeluto I. G., Yezioro A. et Shaviv E., ***Climate aspects in urban design, a case study***, *Building and Environment* vol. 38, n° 6, Pergamon, Oxford (Royaume-Uni), 2003, 8 p.

Chan C-S., ***How an individual style is generated***, *Planning and Design – environment and planning b*, vol.20, National Center for Geographic Information and Analysis, New-York (USA), 1993, pp. 391-423

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

Costa A. C., Sousa A. A. et Ferreira F. N., ***Optimisation and lighting design***, in *Proceedings of The 7th International Conference in Central Europe*, Winter School of Computer Graphics – WSCG'99, Prague, 1999, 8 p.

Cotton J. F., ***Solid modeling as a tool for constructing solar envelopes***, *Automation in Construction* n° 5, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 1996, pp. 185-192

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

Dahl D. W., Chattopadhyay A. et Gorn, G. S., ***The importance of visualisation in concept design***, *Design Studies*, Vol. 22, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 2001, 19 p.

Dourgnon J., Chauvel P. et Kokka L., ***Déterminations graphiques et mécaniques de l'ensoleillement***, *les cahiers du CSTB*, n° 407, CSTB, Paris (France), 1961, 33 p.

Dorst K., ***Describing design, a comparaison of paradigms***, Université de Delft (Pays-Bas), 1997, 219 p.

Dorst K. et Cross N., ***Creativity in the design process : co-evolution of problem-solution***, *Design Studies* n° 22, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 2001, pp. 425-437

Durand F., ***Visibilité tridimensionnelle : étude analytique et applications***, Université Grenoble 1, Grenoble (France), 1999, 306 p.

Ericsson K. A. et Simon H. A., *Protocol Analysis : Verbal Reports as Data*, MIT Press (USA), 1993

Estevez D., *Dessin d'Architecture et Infographie, l'évolution contemporaine des pratiques graphiques*, CNRS Editions, Paris (France), 2001, 188 p.

Etzion Y., *An Improved Solar Shading Design tool*, *Building and Environment* vol. 27, n° 3, Pergamon, Oxford (Royaume-Uni), 1992, pp. 297-303

Faucher D. et Nivet M-L., *Le jeu des intentions : intégration de contraintes physiques et urbaines en CAO*, in *Proceedings of ACADIA'98*, Québec, 1998a, pp. 119-137

Faucher D. et Nivet M-L., *Playing with Design Intents : Intregrating Physical and Urban Constaints in CAD*, in *Proceedings of ACADIA'98*, Québec, 1998b, pp. 119-137

Faucher D., *UrbanLab modélisation déclarative des enveloppes urbaines réglementaires*, Université de Nantes – Isitem, Nantes (France), 2001, 256 p.

Fortassin C., Léglise M. et Perez M., *Pratiques d'architectes utilisant l'informatique pour la conception*, rapport de recherche, LI2A, Toulouse (France), 1989, 36 p.

Genet P., *Enquête interne auprès de la profession*, *Les Cahiers de la Profession – Bulletin d'Information de l'Ordre des Architectes*, CNOA, 2001, pp. 5-7

Gero J. S. et Tang H-H., *Concurrent and Retrospective Protocole and Computer-Aided Architectural Design*, in *Proceedings of CAADRIA'99*, Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, Shanghai (China), 1999, pp. 403-410

Hanson J., *"Deconstructing" architects' houses*, *Planning and Design – Environment and Planning b*, vol. 21, National Center for Geographic Information and Analysis, New-York (USA), 1994, pp. 675-704

Hien W.N., Poh L.K. et Feriadi H., *The use of performance-based simulation tools for building design and evaluation – a Singapore perspective*, *Building and Environment* vol. 35, Pergamon, Oxford (UK), 2000, pp. 709-736

Hiller M., Beckman W. et Mitchell J., *TRNSHD – a program for shading and insolation calculations*, *Building and Environment* vol. 35, Pergamon, Oxford (UK), 2000, pp. 633-644

Izard J.L., *Formes architecturales, orientation et transmission du rayonnement solaire*, in *European Conference on Architecture*, Munich, 1987

Jones and Thornley, *Conference on design Methods*, Pergamon, Oxford (UK), 1963

Jorge J., Puigdomènech J. et Cusido J. A., *A Practical Tool for Sizing Optimal Shading*, *Building and Environment* vol. 28, n° 1, Pergamon, Oxford (UK), 1993, pp. 69-72

Kabre C., *Winshade : a computer design tool for solar control*, *Building and Environment* vol. 34, Pergamon, Oxford (UK), 1999, pp. 63-274

Kensek K., Noble D., Schiler M. et Setiadarma E., *Shading Mask : a teaching tool for sun shading devices*, *Automation in Construction* n° 5, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 1996, pp. 219-231

Kensek K. et Knowles R. L., *Solar Acces Zoning : Computer Generation of the Solar Envelope*, in *Proceedings of The ACSA Southwest Regional Meeting*, Albuquerque (USA), 1997, 7 p.

Khemlani L., *GENWIN : a generative computer tool for window design in energy-conscious architecture*, *Building and Environment* vol. 30, Pergamon, Oxford (UK), 1995, pp. 73-81

Knowles R. L., *The solar envelope : its meaning for energy and buildings*, *Energy and Buildings* n° 35, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 2003, pp. 15-25

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

Le Corbusier, *La Charte d'Athènes*, Editions de Minuit, Paris (France), 1957, 102 p.

Léglise M., *Art under constraint – preserving the creative dimension in computer-aided architectural design, languages of design*, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 1995, 72 p.

Léglise M., *Ordinateurs dans l'apprentissage de la conception : mental et instrumental*, in *The 16^{ième} Conférence Education in Computer Aided Architectural Design in Europe*, Paris (France), 1998, pp. 138-145

Lynch K., *L'image de la Cité*, Dunod édition, Paris (France), 1976, 221 p.

Marenne C., *Le Gnomon*, Ecole d'Architecture de Nantes, Nantes (France), 2000, 14 p.

Massé G. et al., *Le Soleil, Techniques et Architecture*, Altedia Communication, Paris (France), 1943, pp. 169-221

McGown A. et Green G., *Visible ideas : information patterns of conceptual sketch activity*, *Design Studies* 19, n° 4, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 1998, pp. 431-453

Miguet F., *Paramètres physiques d'ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*, Université de Nantes – Iitem, Nantes (France), 2000, 360 p.

Miller-Chagas P., *Le milieu physique et le projet d'architecture*, Ecole d'Architecture de Strasbourg, Strasbourg (France), 1985, 235 p.

Morin M., *Lecture de la Tour Bretagne, développement d'un outil de lecture de la ville : simulation de l'accessibilité visuelle*, TPFE, Ecole d'Architecture de Nantes, Nantes (France), 1995, 65 p.

Mounier J.-P., *Le projet UrbaFormes : modélisation déclarative de parcours pour la prise de connaissance d'un environnement architectural et urbain*, Université de Nantes – Iitem, Nantes (France), 1998, 315 p.

Mudri L., *Didacticiel pour une meilleure intégration de l'éclairage dans l'enseignement du projet*, rapport définitif au BRA – juillet 1994, Ecole d'Architecture de Paris-Tolbiac (France), 1994, 56 p.

Nishita T. et Nakamae E., *Continuous Tone Representation of Three-Dimensional Objects Taking Account of Shadows and Interreflection*, in *Proceedings of Siggraph'85*, San Francisco (USA), 1985, pp. 23-30

Nishita T., Okamura I. et Nakamae E., *Shading Models for Point and Linear Sources*, *ACM Transactions on Graphics*, vol 4, n° 2, 1985, pp. 124-146

Nivet M. L., *De Visu : un logiciel pour la prise en compte de l'accessibilité visuelle dans le projet architectural, urbain ou paysager*, Université de Nantes – Isitem, Nantes (France), 1999, 216 p.

Nivet M-L. et Siret D., *Simulation inverse de l'accessibilité visuelle en milieu urbain*, *Revue Internationale de CFAO*, Paris (France), 1998a, 15 p.

Nivet M-L. et Siret D., *Voir et concevoir : simulation inverse de l'accessibilité visuelle pour le projet urbain*, in *Proceedings of MICAD'98*, Paris (France), 1998b, 8 p.

Oh J. K. et Haberl J. S., *New Educational Software for Teaching the Sunpath Diagram and Shading Mask Protractor*, in *Proceedings of The 5th International Building Performance Simulation Association – IBPSA'97 – Building Simulation'97*, Prague (République Tchèque), 1997, pp. 307-313

Olgyay V., *Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism*, Princeton University Press, Princeton (USA), 1963, 210 p.

Olive G., *Définition des cibles de la qualité environnementale des bâtiments*, Association HQE, Paris (France), 1997, 56 p.

Péneau J. P., *Some problems relating to the numerical simulation of urban ambient environments*, *Planning and Design – Environment and Planning b*, vol. 18 n°1, New-York (USA), 1991, pp. 107-118

Péneau J. P., *Ajustement climatique des formes urbaines*, vol. 2, cours, Ecole d'Architecture de Nantes (France), (s. d.), 144 p.

Péroche B., *Les images de synthèse*, Hermes, Paris (France), 1991, 80 p.

Radford A. D. et Gero J. S., *On the design of windows*, *Environment and Planning B – Planning and design*, Vol. 6, Pion, (UK), 1979, pp. 41-45

Schoeneman C., Dorsey J., Smits B., Arvo J. et Greenberg D., *Painting with light*, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, Californie (USA), 1993, pp. 143-146

Siret D., *Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Application à l'ensoleillement*, Université de Nantes – Isitem, Nantes (France), 1997, 323 p.

Siret D., *Ensoleillement et CAO*, in *Actes de la Conférence IBPSA*, St-Denis la Plaine (France), 2002, 8 p.

Siret D. et Houpert S., *A Geometrical Framework for Solving Sunlighting Problems within CAD Systems*, *Energy and Buildings*, (à paraître), 22 p.

Stevens G., *The reasoning architect, mathematics and science in design*, McGraw-Hill, Singapore, 1990, 362 p.

Suwa M. et Tversky B., *What do architects and students perceive in their design sketches ? A protocol analysis*, *Design Studies* 18, n° 4, Elsevier, Amsterdam (Pays-Bas), 1997, pp. 385-403

Suwa M., Gero J. et Purcell T., *Unexpected discoveries : how designers discover hidden features in sketches*, , , 18 p.

Tric O., *Articulation des composantes envelope, structure, usage et coût dans la conception et au sein du système d'acteurs*, Université de Nantes – Isitem, Nantes (France), 1997, 160 p.

Tschumi B., *L'Enseignement, D'Architecture*, n° mai 2000, Paris (France), 2000, pp. 26-27

Twarowski M., *Soleil et Architecture*, Dunod, Paris (France), 1962, 175 p.

Yener A. K., *A method of obtaining visual comfort using fixed devices in rooms*, *Building and Environment* vol. 34, Pergamon, Oxford (UK), 1999, pp. 285-291

Yoo K-H., Kim D. S., Shin S. Y. et Chwa K-Y., *Linear-Time Algorithms for Finding the Shadow Volumes from a Convex Area Light Source*, *Algorithmica* n° 20, Springer-Verlag, New-York (USA), 1998, pp. 227-241

Zublena A., *La création architecturale et l'informatique*, *Le Carré Bleu* n° 1-2, Delft (Pays-Bas), 2000, pp. 26-31

Références Internet

Blateyron F., *Présentation du logiciel Shadows*, [en ligne] <http://web.fc-net.fr/frb/sundials/fr/general.html> (consulté le 8 septembre 2003), 4 p.

CADeasy, *EasySurf*, [en ligne] <http://www.cadeasy.com>, Hillsboro (USA) 2000, (consulté le 8 septembre 2003), 16 p.

Costa A. C., Sousa A. A. et Ferreira F. N., *Design de Iluminação*, [en ligne] <http://www.dei.isep.ipp.pt/~acc/radiance/epcg98/index.htm>, Porto (Portugal), 2000, (consulté le 8 septembre 2003), 13 p.

Knowles R. L., *The solar Envelope*, [en ligne] http://www-ref.usc.edu/~rknowles/sol_env.html, in *Proceedings of UIA – RIBA Conference*, 1984, (consulté le 8 septembre 2003), 11 p.

Prost R. *et al.*, *La conception architecturale confrontée à la turbulence de la pensée contemporaine*, [en ligne] http://www.archi.fr/tex/niv4_121h.htm, Paris (France), 2001, (consulté le 8 septembre 2003), 13 p.

Setiadarma E., *Shading Mask, a computer-based teaching tool for sun shading devices*, [en ligne] http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/papers/ecs/96_asemask/ases96mask.html, Los Angeles (Californie – USA), 2002, (consulté le 8 septembre 2003), 10 p.

Schiler M. et Tripathi A., *Shading Analyser*, [en ligne] <http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/>, University of Southern California – MBS Laboratory, Los Angeles (USA), 2001, (consulté le 8 septembre 2003), 6 p.

Stasinopoulos T. N., *Solar Envelope, a construction method using AutoCAD 2000*, [en ligne] <http://www.ntua.gr/arch/geometry/tns/solenvelope/>, Université Polytechnique Inter-nationale d'Athènes, Athènes, 2001a, (consulté le 8 septembre 2003), 3 p.

Stasinopoulos T. N., *Optimum Shading Device*, [en ligne] <http://www.ntua.gr/arch/geometry/tns/shadecad/index.htm>, Université Polytechnique Inter-nationale d'Athènes, Athènes, 2001b, (consulté le 8 septembre 2003), 8 p.

USC, *Solar Concepts*, [en ligne] http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/tools/vrsolar/Help/help_index.html, Los Angeles (Californie – USA), 2000, (consulté le 8 septembre 2003), 11 p.

Yeh U-F. et Schiler M., *Hoyt Street yard Redevelopment Plan : A Case Study using Interactive Computer Program for Defining and Drawing Solar Envelopes*, [en ligne] http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/papers/ecs/93_as_hoyt.html, Los Angeles (USA), 1993, (consulté le 8 septembre 2003), 5 p.

Contributions personnelles

Houpert S., Siret D. et Marenne C., *L'ambiguïté d'un dispositif solaire de référence, les loggias de l'Unité d'Habitation de Nantes-Rezé*, in *Actes de la Conférence Internationale Énergie Solaire et Bâtiment – CISBât'99*, Lausanne (Suisse), 1999, 7 p.

Houpert S., *Un outil de simulation inverse de l'ensoleillement accessible depuis un logiciel de CAO utilisé en architecture*, in *Actes de la Conférence Internationale Énergie Solaire et Bâtiment – CISBât'01*, Lausanne (Suisse), 2001, 2 p.

Houpert S., *Inverse Simulation of Sunshine, Visibility and Reflection in Architectural and Urban Spaces*, in *Proceedings of WSCG'02* (http://wscg.zcu.cz/wscg2002/wscg2002_program.htm), Plzen (République Tchèque), 2002a, 8 p.

Houpert S., *SVR, a software to solve solar constraints, a help to better take into account architectural, environmental and ecological problems*, in *Proceedings of PLEA'02*, Toulouse, 2002b, 6 p.

Meunier V., Houpert S. et Brec R., *Optimization of a sun-breaker envelope through application of an inverse approach in a CAD software*, in *Proceedings of EPIC'02*, Lyon, 2002, 6 p.

Siret D. et Houpert S., *A Geometrical Framework for Solving Sunlighting Problems within CAD Systems*, Energy and Buildings (à paraître)

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Table des matières

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Table des matières

Sommaire.....	9
Introduction générale.....	11
1 L'état de l'art de la simulation inverse de l'ensoleillement et de la visibilité ...	31
1.1 Simulation inverse de l'ensoleillement	38
1.1.1 Simulation inverse 2D de l'ensoleillement.....	39
1.1.1.1 Le <i>Girasol</i> , le <i>Gnomon</i> et le <i>Diagramme Solaire Horizontal</i>	43
1.1.1.2 Les logiciels de simulation 2D de l'ensoleillement, issus de la recherche scientifique.....	52
1.1.2 Simulation inverse 3D de l'ensoleillement.....	55
1.1.2.1 Les méthodes graphiques	55
1.1.2.1.1 Les <i>courbes de niveau solaires</i> de M. Twarowski	55
1.1.2.1.2 Les tracés solaires de J. Dourgnon <i>et al.</i>	57
1.1.2.1.3 Les <i>enveloppes solaires</i> de R. L. Knowles.....	59
1.1.2.1.4 Les <i>pyramides solaires</i> de P. Achard et R. Gicquel	61
1.1.2.2 Les méthodes numériques	65
1.1.2.2.1 Les logiciels de dimensionnement de protection solaire.....	65
1.1.2.2.2 Les logiciels simulant des volumes de contraintes solaires.....	67
1.2 Simulation inverse de la visibilité	75
2 Un outil de modélisation inverse appliquée à l'ensoleillement, la visibilité et la réflexion solaire ou visuelle	83
2.1 Présentation et caractéristiques de l'outil <i>SVR</i>	89
2.1.1 La précision des modèles d'ensoleillement.....	89
2.1.1.1 Les variations des trajectoires apparentes du soleil à moyen terme.....	90
2.1.1.2 D'autres erreurs potentielles de calcul de l'ensoleillement.....	93
2.1.2 Les notions propres à l'outil <i>SVR</i>	95
2.1.2.1 Les périodes solaires élastiques	97
2.1.2.2 L'épaisseur apparente du soleil.....	103

2.1.2.3	Le masque solaire 3D d'une base, décrit par l'environnement ou un plan miroir	108
2.1.2.3.1	Le masque solaire d'une base, décrit par l'environnement.....	108
2.1.2.3.2	Le masque solaire d'une base, décrit par un plan miroir.....	111
2.1.2.4	Le positionnement des vues "depuis le soleil" ou depuis une cible visuelle	112
2.1.3	La méthode de calcul des volumes de contraintes.	113
2.1.3.1	Les volumes \mathcal{V} , \mathcal{V}_{opp} , \mathcal{E} , \mathcal{E}_{opp} et \mathcal{V}_r	113
2.1.3.1.1	Le volume de contrainte \mathcal{V}	115
2.1.3.1.2	L' <i>enveloppe solaire</i> ou visuelle \mathcal{E}	119
2.1.3.1.3	L' <i>enveloppe solaire</i> ou visuelle opposée \mathcal{E}_{opp}	121
2.1.3.1.4	Le volume de contrainte opposé \mathcal{V}_{opp}	122
2.1.3.1.5	Le volume de contrainte de réflexion \mathcal{V}_r	124
2.1.3.2	Les bases.....	125
2.1.3.3	Les cibles	127
2.1.3.4	La saisie des bases et des cibles.....	131
2.1.3.5	Comparaison avec d'autres modèles	132
2.2	Exploitation des volumes de contraintes et de leur ensemble de solutions	135
2.2.1	Cinq types d'écrans pour une infinité de solution	136
2.2.2	Une même exploitation pour cinq types de contraintes	141
2.2.3	La combinaison de contraintes.....	146
3	L'utilisation d'un outil de modélisation inverse	155
3.1	L'état de l'art de l'observation des architectes concevant.....	158
3.1.1	L'observation de l'architecte concevant.....	158
3.1.1.1	Les différents types de croquis et de visualisation	159
3.1.1.2	Le flou du croquis d'architecte.....	161
3.1.1.3	La manipulation d'un nombre limité de concepts.....	164
3.1.1.4	La réduction des incertitudes et la résolution de contraintes.....	165
3.1.1.5	Des outils d'aide à la conception inadaptés	168
3.1.1.6	L'ensoleillement et la lumière, des facteurs constants de la conception architecturale	169
3.1.1.7	Vers la démarche inverse.....	170

3.1.2	Les protocoles d'observation.....	172
3.1.2.1	La méthode d'observation des architectes, développée par J-C. Lebahar	172
3.1.2.2	Le protocole simultané et le protocole rétrospectif.....	173
3.2	Le cadre des observations.....	176
3.2.1	Les concepteurs observés.....	176
3.2.1.1	Les étudiants en architecture et les architectes de métier	176
3.2.1.2	L'auteur testeur	178
3.2.2	Les moyens techniques et les lieux d'observation	179
3.2.3	Le protocole d'observation.....	180
3.2.3.1	Première étape : la description du vocabulaire et de la méthode inverse utilisée avec l'outil <i>SVR</i>	180
3.2.3.2	Deuxième étape : la présentation des instructions du protocole <i>think aloud</i>	182
3.2.3.3	Troisième étape : l'enregistrement audio.....	183
3.2.3.4	Quatrième étape : retour sur certains points mal compris par l'observateur.....	183
3.3	L'analyse des observations applicatives	184
3.3.1	Les réponses ou non du logiciel aux attentes des concepteurs	184
3.3.1.1	Le modèle de "voûte solaire" : un diagramme solaire 3D.....	184
3.3.1.2	Les périodes solaires élastiques et identification des heures légales .	187
3.3.1.3	L'environnement du modelleur <i>AutoCAD</i> rassure les concepteurs	188
3.3.1.4	Les résultats des modélisations inverses semblent être adaptés aux besoins des concepteurs	190
3.3.1.5	Les principales déceptions des concepteurs.....	191
3.3.1.6	Les améliorations apportées ou devant être apportées à l'outil	192
3.3.1.7	L'exploitation et la hiérarchisation des contraintes facilitées par leur représentation 3D	195
3.3.1.8	La simulation de l'accessibilité visuelle : un complément aux simulations de contraintes visuelles.....	198
3.3.1.9	L'apport de réponses globales et optimales aux contraintes données	201
3.3.2	Le besoin ou non d'assistance	205
3.3.2.1	Les difficultés d'ordre ergonomiques.....	205

3.3.2.2	Les oublis des recommandations et les erreurs d'inattention.....	209
3.3.2.3	L'évidence et la logique de la notion de simulation inverse des contraintes	215
3.3.2.4	L'interprétation des résultats des simulations par les concepteurs	216
3.3.2.5	L'option de génération d'écrans solaires ou visuels.....	218
3.3.3	La terminologie employée par les concepteurs.....	219
3.3.3.1	Les termes employés pour désigner les périodes de contraintes solaires	219
3.3.3.2	Les expressions utilisées pour désigner les contraintes solaires et visuelles	220
3.3.3.3	La personnalisation de l'outil informatique par les concepteurs.....	221
3.3.3.4	Le caractère intuitif du logiciel.....	222
3.3.3.5	L'enthousiasme des concepteurs et l'appropriation des objets modélisés	223
3.3.4	La vitesse de compréhension et le temps de prise en main.....	223
3.3.4.1	La compréhension rapide de l'approche inverse.....	223
3.3.4.2	Le temps moyen de prise en main	224
3.3.4.3	Les notions qu'il a fallu approfondir durant les observations.....	225
3.3.4.4	Les initiatives des concepteurs dans la logique de l'approche inverse du logiciel	226
3.3.5	Les révélateurs d'intentions	227
3.3.5.1	Une meilleure représentation des positions solaires.....	227
3.3.5.2	L'effet révélateur des simulations de l'accessibilité visuelle	229
3.3.5.3	Les formes des volumes de contraintes ou des écrans modélisé à l'origine d'idées conceptuelles	229
3.3.5.4	Des rayons solaires en 3D	233
3.3.5.5	Les volumes de contraintes comme outils de modelage.....	235
3.3.5.6	La recherche de l'optimisation solaire et visuelle d'un dispositif architectural.....	235
3.3.5.7	La hiérarchie et l'emprise des volumes de contraintes	245
3.3.6	L'adaptation aux situations imprévues	254
3.3.6.1	L'adaptation aux matériels	254
3.3.6.2	La flexibilité du modèle de voûte solaire	255
3.3.6.3	La flexibilité du logiciel <i>AutoCAD</i>	257

3.3.6.4	Le format numérique des documents de travail des concepteurs.....	258
3.4	Complément personnel d'utilisations applicatives	259
3.4.1	Les révéléteurs d'intentions projectives	259
3.4.1.1	Une représentation plus aisée des positions solaires en trois dimensions	259
3.4.1.2	L'effet révéléteur de la simulation de l'accessibilité visuelle	263
3.4.1.3	La forme d'un gabarit urbain	266
3.4.1.4	Inclinaison optimale des lames brise-soleil.....	268
3.4.1.5	Les volumes de contraintes opposés	270
3.4.2	L'adaptation aux situations imprévues.....	271
3.4.2.1	La limitation des cibles	271
3.4.2.2	La simulation de contraintes lumineuses	273
3.4.2.3	La vérification en simulation directe.....	277
	Conclusion générale.....	289
	Annexes.....	299
	Bibliographie.....	315
	Table des matières.....	327
	Tables des illustrations.....	335

Table des illustrations

Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain

Table des illustrations

Figure I-0-1 : Perception du temps dans l'espace	14
Figure I-0-2 : Approche de modélisation directe répondant à une intention d'ambiance précise	21
Figure I-0-3 : Approche de modélisation inverse ou déclarative répondant à une contrainte	22
Figure I-0-4 : Organisation de notre recherche en trois points : <i>poser</i> un problème, <i>proposer</i> des hypothèses et <i>disposer</i> d'un outil	23
Figure 1-1 : Etude des ombres propres et portées d'une sphère éclairée par une baie – Léonard de Vinci	33
Figure 1-2 : Calcul du <i>volume d'ombre</i> (b) inclus dans le volume de <i>pénombre</i> (a).....	35
Figure 1-3 : Construction d'un <i>volume de pénombre</i> – F. Durand.....	36
Figure 1-4 : Simulation directe de l'ensoleillement. Quelles sont les zones ensoleillées à l'instant t ? Donc, la surface B est-elle ou non au soleil ?.....	38
Figure 1-5 : Simulation inverse de l'ensoleillement. Comment dimensionner l'ouverture pour ensoleiller la surface B à l'instant t ?	38
Figure 1-6 : Simulation directe de l'ensoleillement d'un plan de travail (AB) à travers une fenêtre par tracé de rayons solaires en coupe (sud-nord).....	40
Figure 1-7 : Simulation inverse de l'ensoleillement du plan de travail (AB) afin de redimensionner la fenêtre (coupe sud-nord)	40
Figure 1-8 : Tracé d'ensoleillement de bureaux à Dresde (Allemagne) au solstice d'été – Log ID Architectes.....	42
Figure 1-9 : La simulation solaire n'a probablement pas servi à concevoir le dispositif solaire	42
Figure 1-10 : Célèbre croquis de Le Corbusier justifiant le dimensionnement des brise-soleil ouest d'une <i>Unité d'Habitation</i> , aux deux solstices annuels	42
Figure 1-11 : Le <i>Girasol</i> . A 9 h (heure solaire) le 20 février, le soleil est orienté au sud-ouest ($47^{\circ}27'$ précisément) et sa hauteur est de $19^{\circ}33'$	44
Figure 1-12 : Le <i>Diagramme Solaire Horizontal</i> . Autre type de projection pour un même résultat. Les trajectoires solaires sont vues en plan	44
Figure 1-13 : Le <i>Gnomon</i> . La projection de l'extrémité du style (la tige du <i>Gnomon</i>) indique la date et l'heure de l'ombre	44
Figure 1-14 : Utilisation inverse de <i>Gnomon</i> pour tracer les périodes d'ensoleillement en plan d'un point P situé sur la façade d'une barre d'immeuble (I_1).....	46

Figure 1-15 : Simulation inverse 2D d'un brise soleil sud-est efficace du 21 mars au 21 septembre entre 11 h et 13 h.....	47
Figure 1-16 : Etude des périodes d'ensoleillement d'un point d'une façade (ici la fenêtre du 1 ^{er} étage) à partir d'un tracé solaire en coupe, rapporté en plan sur un <i>Gnomon</i>	49
Figure 1-17 : Le <i>Vidélios</i> permet le repérage immédiat des périodes solaires d'un site.	51
Figure 1-18 : <i>Diagramme solaire horizontal</i> équidistant utilisé avec le <i>Vidélios</i>	51
Figure 1-19 : Exemple de masques solaires réalisé par le <i>Vidélios</i> sur le site d'Euralille.....	51
Figure 1-20 : Diagramme solaire horizontal de l'interface <i>Shading Analyser</i>	52
Figure 1-21 : Les masques réagissent en direct aux déplacements des éléments de la scène.....	52
Figure 1-22 : <i>In fine</i> , l'élément gênant n'a plus d'incidence sur les périodes d'ensoleillement du point d'observation.	52
Figure 1-23 : Les " <i>courbes de niveau solaires</i> " de M. Twarowski.....	56
Figure 1-24 : Vue 3D du relief délimité par les " <i>courbes de niveau solaires</i> " des trois éléments de la scène : un bâtiment (1), un stade (2) et un jardin (3).....	56
Figure 1-25 : Simulation inverse de l'ensoleillement d'une parcelle (zone hachurée) le 21 mars et le 21 septembre de 10 h à 14 h	57
Figure 1-26 : Méthode du CSTB pour simuler en 3D la protection solaire (grisée) d'une fenêtre du 21 mai au 21 septembre de 8 h à 15 h.....	58
Figure 1-27 : Brise-soleil composés soit d'un unique élément horizontal, soit de l'addition des deux joues verticales à la partie horizontale comprise entre ces deux joues. Exemples réalisés pour cinq orientations : sud-est, sud-sud-est (Figure 1-26), sud, sud-sud-ouest et sud-ouest.	59
Figure 1-28 : Vues axonométriques de l' <i>enveloppe solaire</i> d'une parcelle urbaine	60
Figure 1-29 : <i>Enveloppes solaires</i> dans un environnement urbain	61
Figure 1-30 : Conception en milieu urbain, à partir d' <i>enveloppes solaires</i>	61
Figure 1-31 : <i>Enveloppes solaires</i> dans un environnement pavillonnaire	61
Figure 1-32 : Conception en milieu pavillonnaire, à partir d' <i>enveloppes solaires</i>	61
Figure 1-33 : <i>Pyramide solaire</i> en vue axonométrique (à gauche) et en plan (à droite).	62
Figure 1-34 : A gauche : parcelle de la contrainte solaire et <i>pyramide solaire</i> lui correspondant	62
Figure 1-36 : Suite du tracé sur la volumétrie en L : les sommets sont rabattus un à un (ici A) à partir d'un quart de cercle où est portée la hauteur du soleil (α)	63
Figure 1-37 : Dernière étape : h en vraie grandeur est rapportée à sa grandeur apparente à l'instant t avec la méthode précédente	63

Figure 1-38 : Zone à protéger à 11 h le 1 ^{er} mai : AA'D'D doit être un brise-soleil dans le prolongement de ABCD (appartenant à son plan et dans sa continuité)	64
Figure 1-39 : La protection de l'ouverture à 11 h le 1 ^{er} mai grâce au brise-soleil ADD'A' (calculé avec la méthode précédente) ne permet pas une protection totale, ici, à 14 h 30 par exemple	64
Figure 1-40 : Formes de brise-soleil en entonnoir conçus par F. Arumi-Noé (USA)	65
Figure 1-41 : Asymétrie des périodes de surchauffes solaires (en gris), calculées par le logiciel <i>Winshade</i>	66
Figure 1-42 : Image <i>AutoCAD</i> des brise-soleil optimaux calculés pour six fenêtres grâce au logiciel <i>Winshade</i>	66
Figure 1-43 : <i>Enveloppe solaire</i> d'une parcelle urbaine, le 21 décembre de 10 h à 14 h	68
Figure 1-44 : <i>Enveloppe solaire</i> de la parcelle, 21 juin de 10 h à 14 h. La constructibilité potentielle de la parcelle est plus grande que précédemment.	68
Figure 1-45 : <i>Enveloppe solaire</i> de la parcelle, le 21 décembre de 9 h à 15 h	69
Figure 1-46 : <i>Enveloppe solaire</i> de la parcelle le 21 juin de 6 h à 18 h	69
Figure 1-47 : Modélisation d'une <i>enveloppe solaire</i> sur un relief. Proposition de J. F. Cotton	70
Figure 1-48 : Exploration des solutions <i>exactes</i> à une contrainte solaire modélisée par son volume de contrainte (<i>pyramides complexes d'ensoleillement</i>)	71
Figure 1-49 : Multiples solutions exactes pour une même contrainte de protection solaire	72
Figure 1-50 : Enveloppe maximum (unique, en gris) du bâtiment pour satisfaire l'ensoleillement des deux fenêtres F ₁ et F ₂ en milieu d'après-midi l'hiver	72
Figure 1-51 : Solution du concepteur, incluse dans l'enveloppe maximum de la figure de gauche	72
Figure 1-52 : Méthode de construction d'une <i>enveloppe solaire</i> simple (contrainte entre deux heures)	73
Figure 1-53 : Deuxième étape : construction des deux prismes de base la parcelle et de direction les rayons solaires	73
Figure 1-54 : Dernière étape : soustraction des deux prismes précédents au prisme vertical de base la parcelle	73
Figure 1-55 : Construction d'un brise-soleil sur une fenêtre verticale rectangulaire	74
Figure 1-56 : 2 ^{ème} étape : une fois l'opération répétée pour chacune des heures de la contrainte, le système de coordonnées est replacé dans sa position générale	74
Figure 1-57 : 3 ^{ème} étape, un profil de brise-soleil (ici, de type loggia) est extrudé à l'horizontale (perpendiculairement à la fenêtre)	74

Figure 1-58 : Dernière étape : l'intersection du profil précédent avec l'ensemble des prismes solaires donne un brise-soleil grossier (présence de crénelures).....	74
Figure 1-59 : " <i>Volume de vision probable d'un observateur de type usager</i> " dont la position peut évoluer sur l'ensemble d'une zone donnée (en gris).....	76
Figure 1-60 : " <i>Volume de vision utile d'un usager</i> " pour une zone d'observation limitée à un point.....	76
Figure 1-61 : " <i>Volume de vision utile d'un visiteur</i> " pour une zone d'observation limitée à un point et une cible concave (façade principale d'une église).....	76
Figure 1-62 : <i>Volume de vision probable</i> pour une zone rectangulaire (A). Dans cet exemple, le pignon (P) de la maison est intersecté par le volume (partie grisée)...	76
Figure 1-63 : <i>Volume utile d'un observateur visiteur</i> depuis la même zone A. Le volume englobe la totalité des rayons visuels qui relie A à P.....	76
Figure 1-64 : <i>Volume utile de l'observateur usager</i> n'est autre que l'intersection du <i>volume de vision probable</i> et du <i>volume utile d'un observateur visiteur</i>	76
Figure 1-65 : Notion de plans supports et plans séparateurs d'une contrainte visuelle [Nivet 1999]. Dans la zone 1, le masque M est inactif.....	77
Figure 2-1 : Exemple d'un cas de simulation inverse de l'ensoleillement.....	87
Figure 2-2 : Le volume de contrainte \mathcal{V} est limité à la taille de la sphère englobant la scène, que le concepteur a choisie (rayon de la scène).....	87
Figure 2-3 : Variation et influence des mouvements terrestres de périodes différentes et de la distance Terre-Soleil sur le calcul de l'inclinaison des rayons solaires durant le cycle annuel.....	91
Figure 2-4 : Non-parallélisme des trajectoires solaires apparentes sur la voûte céleste .	94
Figure 2-5 : Axonométrie de l'hémisphère céleste et trajectoires solaires apparentes à l'équinoxe de printemps.....	94
Figure 2-6 : Axonométrie de l'hémisphère céleste et trajectoire solaire apparentes à l'équinoxe d'automne.....	94
Figure 2-7 : Interface du prototype de logiciel <i>SVR</i>	96
Figure 2-8 : Modèle de voûte solaire simple.....	97
Figure 2-9 : Modèle de voûte solaire limité par le plan (vertical ici) de la base de contrainte (ombre propre de la base).....	97
Figure 2-10 : Modèle de voûte solaire limité par les masques de l'environnement extérieur.....	97
Figure 2-11 : Projection stéréographique du modèle de voûte solaire <i>SVR</i> (ici, latitude $47,2^\circ$, longitude 0°).....	99
Figure 2-12 : Zoom sur la période de début d'après-midi et sur les positions solaires aux 1 ^{er} , 10 et 21 de chaque mois.....	100

Figure 2-13 : Equation du temps (E_t) annuelle montrant la fluctuation des minutes (le 1 ^{er} , le 11 et le 21 de chaque mois) à ajouter ou à soustraire aux heures civiles (H_c) pour obtenir des heures solaires (H_s)	101
Figure 2-14 : <i>Equation du temps</i> appliquée aux heures des trajectoires solaires (voûte solaire, <i>Gnomon</i> ou cadran solaire, ici)	103
Figure 2-15 : Extrapolation de 4 volumes de contraintes solaires prenant en compte la variation des heures civiles durant l'année (<i>équation de temps</i>).....	103
Figure 2-16 : Pénombre solaire d'un volume simple	104
Figure 2-17 : Zoom de la Figure 2-12.....	105
Figure 2-18 : Influence de l'épaisseur apparente du Soleil sur le calcul de l'inclinaison des rayons solaires	106
Figure 2-19 : Modèle de voûte solaire pour la latitude 47,2° nord.....	107
Figure 2-20 : Suite des périodes solaires saisonnières propres au modèle de voûte solaire <i>SVR</i>	107
Figure 2-21 : Au sud-ouest, les dernières périodes solaires de notre modèle sont : "milieu d'après-midi" et "fin d'après-midi"	107
Figure 2-22 : Zoom sur les intersections entre les trajectoires solaires apparentes et les heures solaires.....	107
Figure 2-23 : Interface <i>SVR</i> – option "masque environnant" et "masque à partir d'un plan miroir"	108
Figure 2-24 : Masques environnants 2D d'un point à la hauteur du sol. Image <i>fish-eye</i> depuis le parvis de l'hôtel <i>La Pérouse</i> à Nantes (France).....	110
Figure 2-25 : Masques environnants 3D réalisés avec l'outil <i>SVR</i> à partir de l'image <i>fish-eye</i> ci-contre.....	110
Figure 2-26 : Type de projection des masques environnants, en 3D, d'après une photographie <i>fish-eye</i> , sur le principe de la projection stéréographique.....	110
Figure 2-27 : Exemple de masque solaire décrit par un plan miroir.....	111
Figure 2-28 : Vue d'une base et d'un élément simple de la scène depuis la voûte solaire, à un instant t	112
Figure 2-29 : L'élément triangulaire étant devant la base, on peut lui soustraire le polygone P superposé à la base.	112
Figure 2-30 : Finalement, même placée derrière le triangle, la base sera entièrement ensoleillée (visible) à l'instant t	112
Figure 2-31 : Interface <i>SVR</i> – option "volumes de contrainte"	113

Figure 2-32 : Les volumes de contraintes sont composés d'une part, des pyramides de base la "base" et de sommets les sommets de la "cible", et d'autre part, des pyramides de base la "cible" et de sommets les sommets de la " base"	115
Figure 2-33 : Les pyramides intermédiaires.....	115
Figure 2-34 : 1 ^{ère} étape	116
Figure 2-35 : 2 ^{ème} étape	116
Figure 2-36 : 3 ^{ème} étape	117
Figure 2-37 : Résultat.....	117
Figure 2-38 : Un volume intermédiaire \mathcal{V}' correspondant à la contrainte : "voir ou ne pas voir la cible, <i>depuis</i> la base"	118
Figure 2-39 : Calcul de \mathcal{E}	119
Figure 2-40 : Pyramides élémentaires à soustraire de \mathcal{V}' pour chaque segment de la base, afin d'obtenir l' <i>enveloppe solaire</i> \mathcal{E} (cf. Figure 2-28).....	120
Figure 2-41 : Calcul de la pyramide élémentaire $P1_{opp}^i$	121
Figure 2-42 : Calcul de la pyramide élémentaire $P2_{opp}^j$	121
Figure 2-43 : Calcul de la pyramide élémentaire P_{opp}^{ij}	121
Figure 2-44 : Calcul de \mathcal{E}_{opp}	122
Figure 2-45 : Calcul de \mathcal{V}'_{opp}	123
Figure 2-46 : Calcul d'un volume de réflexion \mathcal{V}_r	124
Figure 2-47 : Exemple de volume de contrainte de réflexion \mathcal{V}_r dont la base B est une fenêtre, la cible, une partie de la voûte solaire et le plan miroir, une façade vitrée d'un immeuble	125
Figure 2-48 : Rendu filaire du volume de réflexion \mathcal{V}_r précédent.....	125
Figure 2-49 : Contrainte visuelle d'un parcours paysager à travers des masses végétales taillées.....	126
Figure 2-50 : Volume de contrainte concave répondant à la contrainte visuelle posée	126
Figure 2-51 : Vue plongeante sur l'ensemble de solutions visuelles qu'est le volume de contrainte \mathcal{V}	127
Figure 2-52 : La solution minimale à la contrainte visuelle.....	127
Figure 2-53 : Choix d'une cible visuelle intermédiaire	128
Figure 2-54 : Cible visuelle vue de "3/4"	129
Figure 2-55 : Cible visuelle vue de profil	129
Figure 2-56 : Volume de contrainte solaire calculé avec les heures de la période choisie	130

Figure 2-57 : Evaluation de l'erreur e ($< 0,4^\circ$) due à l'approximation de la courbe de la trajectoire solaire par des segments tangents.....	130
Figure 2-58 : Extrapolation du volume de contrainte solaire idéal (erreur nulle)	130
Figure 2-59 : Vue axonométrique d'un volume de contrainte solaire annuelle	130
Figure 2-60 : Elévation est-nord-est du volume de contrainte \mathcal{V} précédent en rendu filaire.....	130
Figure 2-61 : Sens de saisie des points des bases et des cibles.....	132
Figure 2-62 : <i>Enveloppe solaire</i> \mathcal{E} , le 21 juin de 10 h à 14 h et de base une parcelle et ses trois rues adjacentes	133
Figure 2-63 : <i>Enveloppe solaire</i> de la parcelle, le 21 juin de 10 h à 14 h, calculée avec le logiciel <i>SolVelo</i> pe	133
Figure 2-64 : Différence minimale entre les deux <i>enveloppes solaires</i> (de même contrainte, mais calculées avec deux prototypes différents : <i>SolVelo</i> pe et <i>SVR</i>) que nous attribuons à la prise en compte de l'épaisseur apparente du soleil dans notre outil (contrainte plus forte, d'où enveloppe \mathcal{E} potentiellement constructible plus petite)	133
Figure 2-65 : Exemple simple d'une volumétrie en forme de "U" et d'un volume de contrainte hivernale \mathcal{V} ayant pour base une verrière sur une toiture bombée.....	136
Figure 2-66 : Solution optimale à la contrainte d'ensoleillement : découpe de la toiture sur les 2 ailes du bâtiment, et élagage de l'arbre le plus haut dans le jardin.....	136
Figure 2-67 : Interprétation de l'architecte : une toiture biseautée à 45° à l'est et suivant la pente générale à l'ouest. L'arbre qui gênait l'ensoleillement hivernal de la verrière a été coupé.....	136
Figure 2-68 : Interface <i>SVR</i> – option "écrans solaires ou visuels"	137
Figure 2-69 : L'écran horizontal (type 1)	138
Figure 2-70 : L'écran vertical (type 2)	138
Figure 2-71 : L'écran oblique (type 3)	138
Figure 2-72 : L'écran de taille minimale (type 4)	138
Figure 2-73 : L'écran d'orientation et d'inclinaison optimales (type 5)	138
Figure 2-74 : Plan et coupe de deux écrans passant par p , solutions à la contrainte visuelle entre les fenêtres F_1 et F_2	139
Figure 2-75 : Ecran minimal (grisé) passant par p	139
Figure 2-76 : Périodes solaires délimitées par des masques environnants du 21 décembre de 13 h 30 à 16 h, au 21 juin de 12 h 30 à 17 h, puis jusqu'au 21 décembre de 13 h 30 à 16 h (heures solaires).....	140

Figure 2-77 : Volume \mathcal{V} correspondant à la contrainte solaire de cible, la période précédente (figure de gauche) et de base, le linteau L (figure de droite).....	140
Figure 2-78 : L'outil <i>SVR</i> calcule le volume de contrainte \mathcal{V} puis, pour un point d'accroche donné (p), modélise le panneau solaire (PV) d'orientation et d'inclinaison optimale.....	140
Figure 2-79 : Solution E à la contrainte "ne pas voir <i>le soleil à tous les instants</i> compris entre t_1, t_2, t_3 et t_4 <i>depuis tous les points de B</i> "	142
Figure 2-80 : Vue axonométrique d'une situation réaliste d'une base de contrainte solaire située à 1,20 m du sol, décrivant la position des yeux de l'utilisateur d'un bureau.....	142
Figure 2-81 : Solution O à la contrainte "voir <i>le soleil à tous les instants</i> compris entre t_1, t_2, t_3 et t_4 <i>depuis tous les points de B</i> "	142
Figure 2-82 : Solution O à la contrainte "voir $t_1t_2t_3t_4$ <i>exclusivement depuis B</i> "	142
Figure 2-83 : <i>Enveloppe solaire</i> \mathcal{E} correspondant à une contrainte similaire à celle de la figure ci-contre	142
Figure 2-84 : Solution O à la contrainte "voir <i>la totalité de</i> $t_1t_2t_3t_4$ <i>à travers B</i> "	143
Figure 2-85 : Volume de contrainte opposé \mathcal{V}_{opp} similaire à la contrainte de la figure ci-contre	143
Figure 2-86 : Solution O à la contrainte "voir $t_1t_2t_3t_4$ à travers B"	144
Figure 2-87 : <i>Enveloppe solaire</i> opposée \mathcal{E}_{opp} proche de la figure ci-contre.....	144
Figure 2-88 : Solution E à la contrainte "ne pas voir la totalité de $t_1t_2t_3t_4$ depuis B, par réflexion spéculaire sur le plan miroir P_m "	145
Figure 2-89 : Volume de contrainte de réflexion \mathcal{V}_r similaire à la figure ci-contre. Les deux solutions verticales sont uniques	145
Figure 2-90 : Trois cas de doubles contraintes <i>a priori</i> contradictoires.....	147
Figure 2-91 : Volumes de double contrainte \mathcal{V}_1 (fin de matinée, début et milieu d'après-midi, en décembre, janvier et février) et \mathcal{V}_2 (toute la journée, en juin, juillet et août), et de même base B	148
Figure 2-92 : Volumes de double contrainte \mathcal{V}_1 et \mathcal{V}_2 , et de même base B	148
Figure 2-93 : Envergure très large de la solution horizontale pourtant optimale pour la double contrainte du cas n°2 (Figure 2-90).....	148
Figure 2-94 : Intersection des deux volumes de contraintes \mathcal{V}_1 et \mathcal{V}_2 (cf. Figure 2-92).....	150
Figure 2-95 : Retrait de la face transversale du volume d'intersection (figure de gauche) pour obtenir le pare-soleil E tel que l'ensemble des rayons solaires hivernaux (inverses) soient canalisés par E depuis B.	150

Figure 2-96 : Solution E plus compacte que la solution horizontale ci-dessus (Figure 2-93) : optimisation du pare-soleil par l'intersection des deux volumes V_1 et V_2 (l'architecte ne garde que les faces latérales).....	150
Figure 2-97 : Solution composée (un brise-soleil horizontal et deux verticaux – double contrainte précédente).....	150
Figure 3-1 : Simulation directe de l'ensoleillement de la base B à l'instant t	181
Figure 3-2 : Simulation inverse pour la période $t_1t_2t_3t_4$	181
Figure 3-3 : Modélisation inverse d'une solution à une protection solaire d'été.....	182
Figure 3-4 : Modélisation d'une solution l'ouverture exacte pour ensoleiller la zone B182	
Figure 3-5 : Voûte solaire à la latitude 47° nord – présence complémentaire des heures solaires et des périodes élastiques en heures légales	185
Figure 3-6 : Trajectoires solaires annuelles depuis l'angle nord-est de la salle à manger de la maison Équerre (double hauteur) à 1,6 m au dessus du sol	186
Figure 3-7 : Positions et épaisseur apparente du soleil.....	186
Figure 3-8 : Plan de l'angle nord du bâtiment de la Communauté Urbaine de Niort....	189
Figure 3-9 : Éléments de la pièce sélectionnés par l'architecte et extrudés avant de réaliser les simulations.....	189
Figure 3-10 : Extrusion des éléments de la pièce et sélection d'une base de contrainte visuelle (B) à 50 cm au-dessus des tables (1,3 m au-dessus du sol).....	189
Figure 3-11 : Interface du logiciel <i>SVR</i> , option "écran solaire ou visuel optimal" – à une sous-option correspond un schéma explicatif.....	192
Figure 3-12 : Type de schéma qui s'allume lorsque l'architecte coche une option d'écran optimal pour une orientation et une inclinaison donnée	192
Figure 3-13 : Interface du logiciel <i>SVR</i> , option "écran minimal" – à une épaisseur d'écran et un point d'accrochage choisis correspond un volume d'écran minimal.194	
Figure 3-14 : Icône de l'option "écran minimal".....	194
Figure 3-15 : Interpénétration de deux volumes de contraintes visuelles de bases adjacentes – astuce utilisée par les étudiants en 5 ^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes pour qualifier et quantifier l'importance d'une contrainte visuelle sur l'autre.....	195
Figure 3-16 : Deux volumes de contraintes enclavés (V_2 intérieur à V_1).....	196
Figure 3-17 : Vue filaire des deux volumes de contraintes enclavés.....	196
Figure 3-18 : Carte d'accessibilité visuelle du projet de musée depuis le secteur sauvegardé de Nantes.....	199

Figure 3-19 : Identification par les concepteurs de trois façades devant être vues " <i>même partiellement</i> " depuis le projet de musée	200
Figure 3-20 : <i>Girasol</i> utilisé par les étudiants en 3 ^{ème} année à l'Ecole d'Architecture de Nantes	201
Figure 3-21 : <i>Outils Solaires</i> appliqués au modèle de baie vitrée de la maison	201
Figure 3-22 : Modélisation numérique de la Maison Équerre des architectes Henriksen et Levring	202
Figure 3-23 : Vue sud-est de la Maison Équerre avec l'écran solaire simulé	204
Figure 3-24 : Interprétation de l'écran solaire par les concepteurs.....	204
Figure 3-25 : Vue de la masse végétale dans son axe d'alignement.....	204
Figure 3-26 : Maison Équerre et volume de contrainte solaire du 21 avril au 21 août, de 12 h 30 à 16 h (heures solaires) – élévation sud, rendu <i>Gouraud</i>	207
Figure 3-27 : Élévation sud du volume de contrainte en rendu filaire.....	207
Figure 3-28 : Option de réverbération solaire – identification de l'option par une illustration permettant une meilleure lisibilité de l'interface.....	211
Figure 3-29 : Exemple de voûte solaire centrée sur une scène – hémisphère de cent kilomètres de diamètre	211
Figure 3-30 : Premier zoom de l'architecte sur le centre de l'hémisphère solaire	211
Figure 3-31 : Deuxième zoom de l'architecte laissant apparaître la scène.....	211
Figure 3-32 : Dernier zoom de l'architecte sur la scène	211
Figure 3-33 : Illustration d'une cible de contrainte solaire [$T_1T_2T_3T_4$] conduisant à une aberration.....	212
Figure 3-34 : Schéma théorique d'un plan de base (B) partageant une cible visuelle ($C_1 + C_2$) en deux	213
Figure 3-35 : Illustration des variantes d'un écran calculées par <i>SVR</i> à partir d'un espacement choisi par l'architecte (δ , entre axes)	214
Figure 3-36 : Option de création de volumes de contraintes – illustration par un volume de contrainte solaire de base concave (sentier en forme de S).....	216
Figure 3-37 : Zoom sur le dernier étage du projet de musée, avant soustraction du volume de contrainte	217
Figure 3-38 : Vue générale du projet de musée avec soustraction du volume de contrainte visuelle	217
Figure 3-39 : Zoom sur la solution exacte à la contrainte visuelle posée	217
Figure 3-40 : Aide au choix des options grâce à une ligne de texte apparaissant sous le pointeur de la souris de l'architecte	218

Figure 3-41 : Le modèle de voûte solaire révèle parfois des intentions et modifie certaines contraintes.....	228
Figure 3-42 : Cette fois la contrainte solaire est modifiée par l'application de l'option "création de masques environnants" d'après une photo <i>fish-eye</i>	228
Figure 3-43 : Objet de la simulation : une fenêtre traditionnelle canarienne dans son contexte (maison individuelle à toiture deux pentes)	230
Figure 3-44 : Premier volume de contrainte solaire réalisé par l'architecte.....	230
Figure 3-45 : Deux dispositifs optimaux conçus par l'architecte pour répondre à la première contrainte solaire (de 14 h à 16 h, de juillet à août).....	231
Figure 3-46 : Dispositifs brise-soleil calculés avec <i>SVR</i> dans leur contexte traditionnel	231
Figure 3-47 : Deuxième volume de contrainte solaire réalisée par l'architecte	231
Figure 3-48 : L'architecte a conçu deux dispositifs optimaux pour répondre à la deuxième contrainte solaire (de 9 h à 11 h, de juillet à août).....	231
Figure 3-49 : Intersection des trajectoires mensuelles du soleil avec les trajectoires horaires virtuelles.....	232
Figure 3-50 : Position du soleil le 21 décembre à 15 h.....	232
Figure 3-51 : Maison <i>Joglo</i> (Indonésie, latitude 7° sud)	233
Figure 3-52 : Volume de contrainte solaire annuelle à partir de 12 h 30 et jusqu'à 18 h (heures solaires) pour les fenêtres ouest de la maison <i>Joglo</i>	233
Figure 3-53 : Volume de contrainte solaire en rendu filaire – élévation nord.....	234
Figure 3-54 : Interprétation de l'architecte d'après les écrans calculés : un auvent (A) de même taille que celui de la façade nord (protection de 15 h à 16 h) associé à une masse végétale (B) protégeant les fenêtres ouest de 16 h à 18 h.....	234
Figure 3-55 : Vérification de l'ensoleillement des fenêtres ouest de la maison <i>Joglo</i> pour la journée du 21 décembre à 17 h	234
Figure 3-56 : Modélisation 3D de l'objet d'étude de l'architecte A3 : une cellule de bureau mono orientée à l'ouest	236
Figure 3-57 : Premières esquisses de l'enveloppe brise-soleil réalisée par l'architecte avant la séance d'observation.....	236
Figure 3-58 : Calcul d'écrans brise-soleil réalisés avec <i>SVR</i> pour une épaisseur de 3 cm et un espacement de 1,5 cm (les écrans sont identiques, ils sont des copies translattées de l'écran 1).....	238
Figure 3-59 : Détail d'un écran montrant que l'optimisation de celui-ci aboutit à une solution non standard (extrémités de forme prismatique avec des faces complexes)	238

Figure 3-60 : Évolution de deux écrans conçus par l'architecte pour protéger du soleil les usagers en hiver et au printemps (à gauche) et en été et en automne (à droite)	239
Figure 3-61 : Deux bases de contraintes visuelles pour prendre en compte le " <i>confort visuel des usagers</i> " en position debout à 1,60 m du sol (B ₁) et en position assise à 1,30 m du sol (B ₂)	240
Figure 3-62 : Coupe est-ouest des lattes conçues par l'architecte et affinées par les simulations visuelles pour permettre les vues plongeantes vers l'extérieur entre chaque latte.....	240
Figure 3-63 : Forme de latte envisagée puis abandonnée par l'architecte pour permettre les vues "montantes" vers l'extérieur entre les lattes.....	240
Figure 3-64 : Vue perspective de la cellule de bureau et du volume de contrainte solaire annuelle pour la base B.	242
Figure 3-65 : Elévation ouest de la cellule de bureau et des deux volumes de contraintes solaires printemps / été et automne / hiver pour la base B.	242
Figure 3-66 : 21 décembre, 13 h – 14 h	243
Figure 3-67 : 21 décembre, 14 h – 15 h	243
Figure 3-68 : 21 décembre, 15 h – 16 h	243
Figure 3-69 : 21 janvier, 13 h – 14 h.....	244
Figure 3-70 : 21 janvier, 14 h – 15 h.....	244
Figure 3-71 : 21 janvier, 15 h – 16 h.....	244
Figure 3-72 : 21 février, 13 h – 14 h	244
Figure 3-73 : 21 février, 14 h – 15 h	244
Figure 3-74 : 21 février, 15 h – 16 h	244
Figure 3-75 : 21 février, 16 h – 17 h	244
Figure 3-76 : 21 mars, 13 h – 14 h	244
Figure 3-77 : 21 mars, 14 h – 15 h	244
Figure 3-78 : 21 mars, 15 h – 16 h	244
Figure 3-79 : 21 mars, 16 h – 17 h	244
Figure 3-80 : 21 avril, 13 h – 14 h.....	244
Figure 3-81 : 21 avril, 14 h – 15 h.....	244
Figure 3-82 : 21 avril, 15 h – 16 h.....	244
Figure 3-83 : 21 avril, 16 h – 17 h.....	244
Figure 3-84 : 21 mai, 13 h – 14 h.....	244

Figure 3-85 : 21 mai, 14 h – 15 h.....	244
Figure 3-86 : 21 mai, 15 h – 16 h.....	244
Figure 3-87 : 21 mai, 16 h – 17 h.....	244
Figure 3-88 : 21 juin, 13 h – 14 h	245
Figure 3-89 : 21 juin, 14 h – 15 h	245
Figure 3-90 : 21 juin, 15 h – 16 h	245
Figure 3-91 : 21 juin, 16 h – 17 h	245
Figure 3-92 : Projet du nouveau musée Dobrée à Nantes.....	247
Figure 3-93 : Trois vues axonométriques du projet de musée Dobrée dans son environnement nantais	248
Figure 3-94 : Vue perspective de la modélisation du projet de musée Dobrée à Nantes, depuis une des zones retenue sur la carte d'accessibilité visuelle.....	249
Figure 3-95 : Insertion de la modélisation du musée Dobrée à partir de la figure précédente	249
Figure 3-96 : Vue perspective de la modélisation du projet de musée Dobrée à Nantes, depuis la deuxième zone retenue sur la carte d'accessibilité visuelle	249
Figure 3-97 : Vue <i>in situ</i> depuis le même angle de vue que la figure précédente – Cours Franklin Roosevelt, arrêt Commerce du tramway.....	249
Figure 3-98 : Insertion de la modélisation du musée Dobrée dans le paysage nantais. Vue <i>in situ</i> depuis le Pont du Général Audibert.	249
Figure 3-99 : Insertion du projet de musée Dobrée sur une vue <i>in situ</i> depuis la place Jean V. Première orientation souhaitée par les étudiants avant la séance d'observation.	250
Figure 3-100 : Insertion de la nouvelle orientation du musée, après simulation par les étudiants des volumes de contraintes.....	250
Figure 3-101 : Vue sur le centre de Nantes depuis la dernière coursive du projet de musée, avant la simulation des volumes de contraintes et la décision des étudiants de faire pivoter leur projet de 33° vers la gauche.	250
Figure 3-102 : Vérification de la nouvelle vue depuis la dernière coursive du musée.	250
Figure 3-103 : Vue sur le centre de Nantes depuis le 3 ^{ème} étage du projet de musée, avant la décision des étudiants de faire pivoter leur projet de 33° vers la gauche.....	251
Figure 3-104 : Vérification de la nouvelle vue depuis le 3 ^{ème} étage du projet de musée	251
Figure 3-105 : Sélection d'une période solaire limitée à une seule heure le 21 décembre de 14 h à 15 h.....	255

Figure 3-106 : Saisie de la période solaire limitée à une heure de 21 décembre	255
Figure 3-107 : Exemple de document <i>AutoCAD</i> multifenêtres.....	260
Figure 3-108 : Vue aérienne du bureau et de l'emprise du bâtiment au sol. Présence d'un bâtiment en face du bureau.....	261
Figure 3-109 : Positions du soleil potentiellement gênantes pour l'utilisateur de bureau (éblouissement)	261
Figure 3-110 : Le bâtiment qui fait face au bureau est potentiellement un masque solaire	261
Figure 3-111 : Compilation de quatre photographies <i>fish-eye</i> prises <i>in situ</i> depuis les quatre angles de la base de contraint.....	263
Figure 3-112 : Modèle de voûte solaire 3D créée par <i>SVR</i>	263
Figure 3-113 : Projection 3D du masque de la Figure 3-111 (image <i>fish-eye</i>) sur le modèle de voûte solaire de la Figure 3-11	263
Figure 3-114 : Simulation de l'accessibilité visuelle pour le projet de l'îlot Boucherie à Nantes	264
Figure 3-115 : Simulation de deux volumes de contraintes sur l'îlot Boucherie à Nantes	264
Figure 3-116 : Résultat de l'emprise 3D du volume de contrainte solaire \mathcal{V} sur le gabarit de l'îlot Boucheri	266
Figure 3-117 : Emprise volumétrique des deux contraintes sur le gabarit de l'îlot Boucheri	266
Figure 3-118 : Photographie <i>in situ</i> de la parcelle de l'îlot Boucherie (derrière le tramway) depuis la base T' (cf. Figure 3-117) vers la moitié supérieure de la flèche de l'église Saint-Nicolas	266
Figure 3-119 : Première esquisse de l'architecte F. Borel pour son projet d'immeuble Boucherie à Nantes.....	267
Figure 3-120 : Esquisse intermédiaire.....	267
Figure 3-121 : Esquisse finale correspondant au permis de construire 2001	267
Figure 3-122 : Gabarit de l'îlot Boucherie résultant de la simulation inverse des deux contraintes énoncées plus haut	267
Figure 3-123 : Retranscription possible (personnelle) du projet de l'architecte F. Borel sous forme d'esquisse (cf. Figure 3-121) avec adaptation du bloc aux découpes du gabarit de la Figure 3-122.	267
Figure 3-124 : Première solution de lames brise-soleil inclinées à 45° calculées avec <i>SVR</i> à partir du volume de contrainte solaire \mathcal{V}	269
Figure 3-125 : Solution de brise-soleil unique vertical	269

Figure 3-126 : Solution de lames brise-soleil inclinées à 45°	269
Figure 3-127 : Solution de lames brise-soleil d'inclinaison optimale.....	269
Figure 3-128 : Représentation des périodes d'ensoleillement d'un pupitre de l'église de Noirlac	270
Figure 3-129 : Plan de masse d'une maison nantaise et de sa parcelle	272
Figure 3-130 : Vue perspective de la modélisation de la maison et de son jardin. Représentation des 69 fenêtres de l'immeuble potentiellement sources de vis-à-vis avec le jardin.....	272
Figure 3-131 : Première étape : recherche de cibles réelles depuis le jardin (base pour des usagers en position debout). Première étape, premier angle de la cible (1) ...	272
Figure 3-132 : Deuxième étape : recherche d'un point intermédiaire de la cible (1')...	272
Figure 3-133 : Troisième étape : recherche du deuxième angle de la cible (2) et du troisième angle de la base (C).....	272
Figure 3-134 : Quatrième étape : recherche du troisième angle de la cible (3) et du quatrième angle de la base (D)	273
Figure 3-135 : Cinquième étape : recherche du quatrième angle de la cible (4) et du cinquième angle de la base (E)	273
Figure 3-136 : Etape finale : liaison des sommets de la première cible [1234] et de sa base [ABCDE].....	273
Figure 3-137 : Vue perspective de l'intérieur de l'église de Noirlac (la charpente et la toiture ont été retirées pour faciliter la lisibilité)	273
Figure 3-138 : Exemple de vérification en vue perspective depuis le pupitre vers les fenêtres sud	273
Figure 3-139 : Volumes de contraintes depuis le pupitre vers les six ébrasures des fenêtres visibles.....	274
Figure 3-140 : Volumes de contraintes depuis le pupitre vers les six fenêtres visibles	274
Figure 3-141 : Volumes de contraintes "lumineuses" des six fenêtres visibles, par soustraction des volumes de la Figure 3-140 aux volumes de la Figure 3-139	274
Figure 3-142 : Hall de la gare nord de Nantes. Les dix grandes baies vitrées sont orientées au nord.....	275
Figure 3-143 : Vue filaire de la modélisation du volume de contrainte "lumineuse" ayant pour base les positions potentielles des yeux d'un usager devant le distributeur de billets SNCF (D), pour cible les cinq baies vitrées supérieures du hall de la gare et pour plan miroir l'écran tactile du distributeur.....	275

Figure 3-144 : Distributeur, écran tactile (reflet des baies tel que le voit l'utilisateur) et base de la contrainte de réflexion (position des yeux des utilisateurs en position debout ou en fauteuil roulant)	276
Figure 3-145 : Vue d'une partie du volume de contrainte de réflexion "lumineuse" (ψ ayant pour cible uniquement la baie nord-est)	276
Figure 3-146 : Une solution exacte et optimale au problème d'éblouissement par réflexion lumineuse sur l'écran tactile du distributeur D.....	276
Figure 3-147 : Vérification de la solution à la contrainte solaire de l'îlot Boucherie à Nantes (cf. Figure 3-117, § 3.4.1.2)	277
Figure 3-148 : Eblouissement de l'utilisateur du bureau	279
Figure 3-149 : Vérification de la protection contre l'éblouissement de l'utilisateur du bureau	279
Figure 3-150 : Vérification d'une solution potentielle : le déplacement de l'écran d'ordinateur. La solution n'est efficace qu'à moitié	279
Figure A-0-1 : Tracé perspectif d'une solution d'ouverture répondant à la contrainte "voir le soleil de 9 h à 10 h, en hiver"	301

Les tableaux

Tableau 2-1 : Exemple de "périodes solaires élastiques" en heures solaires, à la latitude 47° nord et longitude 0°	98
Tableau 3-1 : Détermination par l'architecte, de la largeur optimale (en centimètres) des lattes pour des périodes d'une heure. Trois cas critiques ont été exclus	237