



Système Multi-Agents pour la modélisation du volume englobant solaire

Khaoula Raboudi, Alia Belkaïd, Abdelkader Ben Saci

► To cite this version:

Khaoula Raboudi, Alia Belkaïd, Abdelkader Ben Saci. Système Multi-Agents pour la modélisation du volume englobant solaire. Biskra Architecture And Sustainability International Conference 2011, Université Mohamed KHIDER de Biskra, Dec 2011, Biskra, Algérie. <hal-04870132>

HAL Id: hal-04870132

<https://hal.science/hal-04870132v1>

Submitted on 7 Jan 2025

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.



HAL Authorization

Système Multi-Agents pour la modélisation du volume englobant solaire

Khaoula RABOUDI¹, Alia BELKAÏD², Abdelkader BEN SACI³

¹ Equipe M2a , Ecole Doctorale SIA, ENAU, Sidi Bou Saïd, Tunisie, khaoularaboudi@yahoo.fr

² Equipe M2a , Ecole Doctorale SIA, ENAU, Sidi Bou Saïd, Tunisie, a.belkaid@gnet.tn

³ Cresson, ENSA, Grenoble, France, bensaci@grenoble.archi.fr

RÉSUMÉ. *Ce papier présente une modélisation multi-agents du volume englobant solaire (V_{es}). Celui-ci est le volume optimum conditionné à la fois par les règles urbaines de la forme et les règles d'accès solaire. Les règles urbaines sont définies par le règlement d'urbanisme d'une ville. Les règles d'accès solaire sont définies par le volume de l'enveloppe solaire. L'enveloppe solaire étant le volume maximal qui pourrait être construit sans projeter d'ombres indésirables sur le milieu avoisinant pendant les périodes critiques d'ensoleillement. Il s'agit ici d'appliquer les systèmes multi-agents dans le domaine de la conception architecturale des bâtiments durables.*

MOTS-CLÉS : *Accès solaire, Enveloppe solaire, Système multi-agents, Volume englobant solaire.*

ABSTRACT : *This paper present a multi-agents modeling of the Solar Bounding Box (SBB) which is the volume conditioned by both the urban rules of form and solar access rules. The urban rules are defined by the urban zoning regulations of a city. Solar access rules are defined by the volume of the solar envelope. The solar envelope is the maximum buildable volume that does not cast undesirable shadows on surroundings during critical periods of solar access. We would like to apply, here, the multi-agents system in the field of architectural design of sustainable buildings.*

KEYWORDS: *Solar envelope, Solar access, Multi-agent system, Solar bounding box*

1. Introduction

Ce papier présente une application des systèmes multi-agents (SMA) dans le domaine de la conception architecturale des bâtiments durables. Il pose comme objectif la modélisation du volume englobant solaire (V_{es}).

Le soleil est considéré, depuis la crise énergétique des années 70, comme une importante source d'énergie à explorer. L'accès à l'ensoleillement devient alors le souci de tout concepteur de bâtiment durable. Une forme de contrôle de cet accès se fait essentiellement par le biais d'une réglementation spécifique (limites de hauteur, de servitudes entre les bâtiments, etc.).

Au moment de la conception d'un bâtiment sur une parcelle, l'architecte se réfère à un cahier des charges qui définit les règles urbaines à respecter par le bâtiment. Notamment, celles de la forme (alignement, hauteur maximale, prospect ...) se traduisent en des volume(s) constructible(s). Il sera amené également à respecter les règles d'accès solaire. Cependant, la tâche qui consiste à traduire manuellement les règles d'accès solaire, tout en respectant les règles urbaines de la forme s'avère complexe. C'est pourquoi nous proposons ici une modélisation multi-agents qui transforme toutes ces règles en un ou plusieurs volume(s) englobant(s) solaire(s) (V_{es}).

Un V_{es} est le volume optimum conditionné à la fois par les règles urbaines de la forme et les règles d'accès solaire.

Les règles urbaines de la forme sont définies par le règlement d'urbanisme d'une ville. Ils peuvent se traduire en un volume englobant réglementaire (V_{er}) (Belkaïd & Ben Saci, 2010) qui présente le volume maximal autorisé par un règlement d'urbanisme dans lequel l'architecte insère sa production architecturale. Le(s) V_{er} permet(tent) de caractériser les potentialités réglementaires d'une parcelle donnée située dans une ville, c'est-à-dire il détermine le(s) volume(s) maximal possible(s) autorisé(s) pour la construction d'un bâtiment compte tenu des règles urbaines de la forme.

Les règles d'accès solaire se traduisent en une «*enveloppe solaire*». Le concept de «*l'enveloppe solaire*» présenté par Knowles¹ (1981) depuis les années 80, explore la relation entre l'accès à l'ensoleillement et la forme architecturale. Cette enveloppe définit les limites maximales d'un volume permettant d'assurer l'accès à la lumière directe du soleil sans projeter d'ombres indésirables sur le milieu avoisinant pendant les périodes critiques d'ensoleillement.

2. Pertinence du concept du volume englobant solaire

En Tunisie, la réglementation urbaine utilisée se base sur des règles régissant la hauteur des constructions par rapport à l'argureur de la rue. Nous avons essayé de tester la pertinence de ces règles sur une section du plan d'aménagement d'El Mrazka à Nabeul (figure.1). Dans ce test exploratoire nous avons pu attester que l'accès au soleil est difficile à réaliser en utilisant la réglementation urbaine existante (Raboudi, 2011). Les résultats de l'étude démontrent, la possibilité de surmonter les problèmes de «*droits solaire* » dans les codes urbains en fonction des exigences particulières de chaque région. L'enveloppe solaire produit un gain important en termes d'ensoleillement ce qui se reflète directement sur la consommation énergétique des bâtiments, le confort thermique et la qualité de vie des occupants. En même temps, il est possible d'atteindre des niveaux de densité urbaines intéressants tout en protégeant les «*droits solaires*», ce qui va de pair avec les politiques actuelles de densification urbaine d'une part, et les objectifs du développement durable d'autre part.

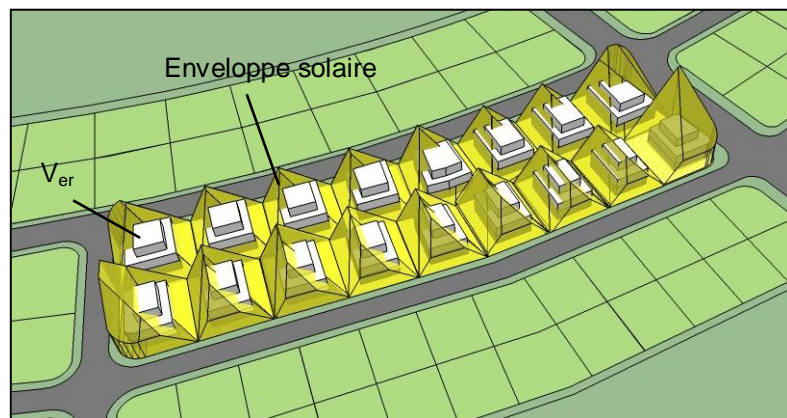


Figure 1. Comparaison du V_{er} et de l'enveloppe solaire

¹ De l'Université Californie du Sud (USC)

Cette étude exploratoire montre que les règles urbaines ne sont pas suffisantes compte tenu de l'accès à l'ensoleillement. Pour cette raison, nous proposons une modélisation multi-agents du volume conditionné à la fois par les contraintes urbaines et les contraintes d'accès solaire à travers le concept de l'enveloppe solaire. Ce volume est appelé « *volume englobant solaire* V_{es} ».

L'enveloppe solaire permet d'assurer l'accès à l'ensoleillement dans le bâtiment en fonction des exigences climatiques spécifiques de chaque région. Elle traduit la course apparente du soleil en fonction du contexte géographique d'un lieu. En Argentine, Casablanca, Evans et Schiller (1991) de la faculté d'architecture et urbanisme, étudient la possibilité d'introduire l'enveloppe solaire dans le processus de la planification urbaine dans les différentes régions de l'Argentine en mettant l'accent sur les climats froids où la consommation énergétique pour le chauffage est très importante. Ils utilisent le concept de l'enveloppe solaire pour définir *des critères d'accès solaire* selon les caractéristiques climatiques, la latitude et les besoins énergétiques de chaque région. D'autres recherches, suggèrent la systématisation de l'utilisation de l'enveloppe solaire pour la planification urbaine. L'enveloppe solaire constitue, selon Pereira et Nome Silva (1998) de l'Université Fédérale de Santa Catarina en Brésil, une forme de contrôle de l'accès à l'ensoleillement en milieu urbain et un moyen efficace pour la gestion de l'occupation du sol. Les chercheurs affirment que l'application du concept de l'enveloppe solaire produit des gains importants en termes d'ensoleillement, particulièrement pendant les mois d'hiver, quand l'ensoleillement est souhaitable.

L'enveloppe solaire peut aussi être un excellent outil pour contrôler les densités urbaines et pour assurer une croissance urbaine durable. Dans ces recherches sur le logement en milieu urbain, Knowles défend l'idée qu'il est possible d'atteindre des niveaux de densité élevés tout en respectant le droit à l'ensoleillement. Il atteste alors que pour économiser l'énergie et préserver la qualité de vie en milieu urbain, les bâtiments ne doivent être *ni trop grands ni trop petits* (Knowles, 1999). Dans la ville Tel Aviv, on a pu tester quelques interventions urbaines, en utilisant l'enveloppe solaire comme un outil pour la planification urbaine. Une étude sur un immeuble de logement a été menée par Capeluto et al. (2006). Les résultats montrent que l'on peut atteindre un FSI² de 3,8 par rapport à une norme de 2,0.

3. Outils numériques de modélisation de l'enveloppe solaire

Les travaux sur le concept de l'enveloppe solaire ont été entamés depuis une trentaine d'années par Ralph Knowles (1981). Bien que pertinente d'un point de vue théorique, l'enveloppe solaire n'a pas encore été largement utilisée en architecture et urbanisme, principalement en raison des difficultés de visualisation et de calcul. Avec le développement des moyens informatiques, plusieurs approches de modélisation de l'enveloppe solaire ont été proposées. Ces outils sont passés par différentes phases de développement. On peut distinguer des méthodes proposant le calcul de l'enveloppe à partir d'une grille en surimpression sur le site (Schiller & Uen-Fang, 1993; Cotton, 1996; Kensek & Knowles, 1997; Juyal, Kensek, &

² Le FSI (Floor Space Index), ou FAR (Floor Area Ratio) étant le rapport entre la somme des planchers d'un site et la superficie du site, il est équivalent au CUF (coefficient d'utilisation foncière)

Knowles, 2003). La hauteur de chaque point de cette grille est calculée de façon à ne pas jeter son ombre en dehors de la limite de la parcelle à construire. D'autres approches proposent des méthodes descriptives en couplant le calcul de l'enveloppe avec des logiciels de CAO traditionnels (Stasinopoulos, 2000; Pereira, Nome Silva, & Turkienkz, 2001). Ratti et Morello (2005) proposent une méthode de calcul en se basant sur le principe de traitement d'image raster de formes urbaines, appelée « *Digital Elevation Models (DEM)* » ou « *Urban DEM's* », une technique utilisée principalement dans le domaine de la géomatique. Cependant, les méthodes et outils proposés ne donnent pas des résultats très précis et ne prennent pas en compte la complexité géométrique des formes.

Des approches plus poussées proposent d'intégrer le concept de l'enveloppe solaire avec d'autres contraintes. Houpert (2003) propose de calculer avec le logiciel SVR les volumes de contraintes solaires, dont l'enveloppe solaire, et de contraintes visuelles. Grazziotin et al proposent de générer sur une même interface avec le logiciel CityZoom, le volume de contraintes réglementaires et l'enveloppe solaire. L'approche présentée ne permet pas de produire directement le volume de contraintes urbaines et d'accès solaire. L'utilisateur devrait procéder par tâtonnement, par essai successifs pour modifier le volume réglementaire et l'inclure dans l'enveloppe solaire.

L'avancée technologique actuelle nous pousse à rechercher des approches qui permettraient d'améliorer le calcul de et la modélisation de l'enveloppe solaire, d'une part, et de prendre en compte simultanément les contraintes urbaines réglementaires de la forme et les contraintes d'accès solaire, définies par le volume l'enveloppe solaire, d'autre part. Nous pensons alors qu'une approche multi-agents est bien adaptée à ce type de problématique

4. Justification du choix de l'approche des SMA

Le Système Multi-Agents (SMA) est généralement défini comme étant un ensemble d'*agents* en interactions les uns avec les autres et avec leur *environnement*. La notion d'agents est primordiale dans le système. Chaque agent, situé dans un environnement évolue de manière autonome et en interactions avec les autres agents afin d'atteindre son objectif ou la solution à un problème donné (Jennings, Sycara, & Wooldridge, 1998).

Les approches multi-agents ont suscité dernièrement beaucoup d'intérêt que ce soit en aménagement du territoire (Ferrand, Demazeau, & Baeijs, 1998), en urbanisme (Bura, Guerin-Pace, Mathian, Pumain, & Sanders, 1996; Sembolonia, Assfalgb, Armenib, Gianassib, & Marsonic, 2004) ou encore en architecture (Juchmes, Leclercq, & Azar, 2004; Lecourtois & Guéna, 2009; Belkaïd & Ben Saci, 2010). Ces approches ont montré leur pertinence dans la résolution de problèmes complexes. L'autonomie des agents permet de gérer et d'analyser les différentes données du problème, leur caractère distribué permet de bien décrire la complexité du processus de modélisation. A notre connaissance, il n'existe aucune approche basée sur un système multi-agents permettant de gérer, en même temps, des contraintes urbaines réglementaires et des contraintes d'accès solaire.

5. Le volume englobant Solaire (V_{es})

Notre approche consiste à faire évoluer le modèle du *volume englobant réglementaire* V_{er} (Belkaïd & Ben Saci, 2010). Il s'agit ici d'une *régulation morphologique*³ du V_{er} basée sur les contraintes d'accès à l'ensoleillement (Teller, 2001). Le modèle proposé par Belkaïd & Ben Saci (2010) s'inscrit dans la classe des problèmes spatialisés, tel que défini par Ferrand (1998). Ce modèle est défini par :

- **Une Forme urbaine F_u** , équivalente à la **Carte C** dans le formalisme du modèle des problèmes spatialisés. Une forme urbaine se décompose en trois éléments physiques : le maillage, le parcellaire, et le tissu constructif.
- **Des Valeurs A**, qui sont les **Descripteurs** ou l'ensemble des attributs des points de l'espace.
- **Une Zone d'intervention Z**, correspondant à l'**Environnement E**, c'est à dire toute application d'un ouvert de F_u –dite de référence– dans A.
- Un système de **contraintes Internes I**, défini par un prédicat opérant sur le volume constituant la solution V_{er} . Les contraintes Internes dans le modèle du V_{er} correspondent aux règles urbaines de la forme.
- Un système de **contraintes Externes X**, défini par un prédicat opérant sur l'ensemble des couples (Zone d'intervention, volume englobant réglementaire). Elles correspondent ici aux choix et pertinences du concepteur
- **Des Descripteurs D_v** , un ensemble d'attributs de la solution du V_{er} .
- **Une solution S** du problème de modélisation du V_{er} .

Par rapport à notre problématique, nous transcrivons les données du V_{es} dans la structure du modèle du V_{er} . Nous adoptons alors la même structure du modèle ; **Forme urbaine F_u** , des **Valeurs A**, **une Zone d'intervention Z**, **de contraintes Externes X**, **des Descripteurs D_v** , **une solution S** et nous intervenons au niveau de la (définition des contraintes internes). Nous proposons alors d'intégrer au modèle du V_{er} une nouvelle couche de contraintes internes, à savoir les contraintes d'accès solaires traduites par le volume de l'enveloppe solaire.

5.1 Les règles urbaines

Selon le modèle proposé par Belkaïd & Ben Saci (2010), les contraintes internes correspondent aux règles urbaines de la forme. Les chercheurs effectuent une classification de ces règles selon trois catégories ;

- **Règles gérant le domaine public** : Elles identifient les limites et fixent les rapports entre l'espace public de l'espace privé.
- **Règles gérant le domaine de voisinage** (règles inter-parcelles) : Elles définissent les relations entre les constructions appartenant à des parcelles voisines.
- **Règles gérant le domaine privé** (règles intra-parcelle) Elles définissent les conditions liées à une ou plusieurs constructions appartenant à une même parcelle.

³ La *régulation morphologique* est un concept, présenté par Teller, qui « se consacre à la gestion de la forme urbaine, à travers un processus associant différents partenaires et différentes échelles de temps » (Teller, 2001, p. 4).

Belkaïd & Ben Saci (2010) proposent une classification de ces règles selon un ordre hiérarchique en se basant sur l'histoire de l'urbanisme et leur prépondérance dans les règlements urbains (cas de l'Algérie, la France et la Tunisie) (tableau.1a). Chaque contrainte est définie par son statut, son rang et sa *valeur cible*, c'est-à-dire la valeur maximale à atteindre.

5.2 Les règles d'accès solaire

Les règles d'accès solaires, telles que définies par Knowles (1981) sont le *temps de coupure* et les *clôtures d'ombre* ;

- Le temps de coupure :

Le *temps de coupure* est la période de temps, noté **T** pour laquelle une condition d'accès solaire doit être assurée. Chaque limite du temps, définie par l'heure, le jour et le mois, détermine une position précise du soleil. La position du soleil dans le ciel est déterminée par son Hauteur, noté **H** et son Azimut, noté **A_z**, on a donc :

$$\mathbf{T}=[\mathbf{T}_{xi}(\mathbf{A}_{zi}, \mathbf{H}_i), \mathbf{T}_{xf}(\mathbf{A}_{zf}, \mathbf{H}_f)] \text{ avec } \mathbf{T}=\{t_1, t_2, t_3\} \text{ et où } i=\mathbf{T} \text{ initial et } f=\mathbf{T} \text{ final}$$

(t_1) correspond au temps d'ensoleillement utile selon les besoins énergétiques spécifiques à chaque région. (t_2) correspond au temps d'ensoleillement utile en se basant sur l'*équilibre des besoins en ensoleillement* tout au long de l'année. Cette notion d'équilibre a été développée par Pereira (Pereira, Nome Silva, & Turkienkz, 2001). Elle se base la notion du *rayonnement solaire désirable ou indésirable* représentée par le *facteur de pondération (PF)*, une fonction de la différence entre la *température de l'air extérieur* et la *température neutre*. La méthode permet de déterminer les heures d'ensoleillement bénéfiques en hiver et d'éviter le rayonnement indésirable en été. Enfin, (t_3) étant le temps d'ensoleillement utile selon la fonction du bâtiment

- Les clôtures d'ombre

Les clôtures d'ombre sont les limites restrictives de projection d'ombre. Le bâtiment à construire ne doit pas projeter son ombre en dehors de cette limite. La délimitation des clôtures d'ombre peut se faire selon l'affectation des éléments de l'environnement avoisinant (voie de circulation, parcelle résidentielle, hangar,...). Ces éléments affectent considérablement la taille de l'enveloppe solaire. Selon le besoin ou non d'accès solaire des éléments avoisinants de la parcelle à construire, les clôtures d'ombres peuvent être définies. Un hangar, une voie de circulation ou un espace de stationnement n'ont pas besoin d'accès solaire, contrairement à un espace d'habitation. Il serait pertinent alors, dans le cadre d'une étude spécifique, de spécifier où et quand doit-on assurer l'accès au soleil.

5.3 Organisation des règles urbaines et des règles d'accès solaire

Après avoir déterminé les règles d'accès solaires nous passerons à leur intégration dans le modèle du V_{er} . Nous tentons alors de revoir l'organisation des règles urbaines (tableau.1a) et de chercher quel rang et quel statut attribuer aux contraintes d'accès solaire. Les règles d'accès solaires, interviennent à la fois au niveau du *domaine public*, du *domaine de voisinage* et du *domaine privé*. Les éléments du domaine public (voirie, creux urbain..) permettent de

définir le *temps de coupure* et de délimiter les *clôtures d'ombre* et en conséquence déterminent l'enveloppe solaire. Cette dernière constitue en même temps une restriction de certaines *règles gérant le domaine public* (par exemple, la hauteur maximale). De même, les règles d'accès solaires interviennent au niveau du domaine de voisinage et du domaine privé et le volume de l'enveloppe solaire constitue une restriction pour certaines *règles gérant le domaine de voisinage* (par exemple, le prospect par rapport à la limite mitoyenne) et les règles *gérant le domaine privé* (par exemple, le coefficient d'utilisation foncière).

Afin d'éviter une redondance entre ces règles nous proposons de doter le modèle du V_{er} une nouvelle classe de règles, à savoir les règles d'accès solaires définies par le volume de l'enveloppe solaire. Nous proposons, par rapport à l'organisation des règles urbaines du V_{er} une nouvelle classification des règles urbaines et règles d'accès solaire selon l'ordre suivant (tableau.1);

Statut Rang	-A- Règles urbaines			-B- Règles d'accès solaire
	A ₁	A ₂	A ₃	Règles de l'enveloppe solaire
	Règles gérant le domaine public	Règles gérant le domaine de voisinage	Règles gérant le domaine privé	
1	Alignement	Prospect par rapport à la limite mitoyenne	Contexte de constructibilité des terrains	<i>Temps de coupure</i>
2	Prospect d'alignement		Coefficient d'occupation du sol	<i>Clôtures d'ombres</i>
3	Hauteur maxi- male		Coefficient d'utilisation foncière	
4	Pente des toi- tures	Règle de servi- tude de vue	Distance entre les bâtiments appartenant à une même par- celle	
5		Servitude de clair du jour	Taille des patios	

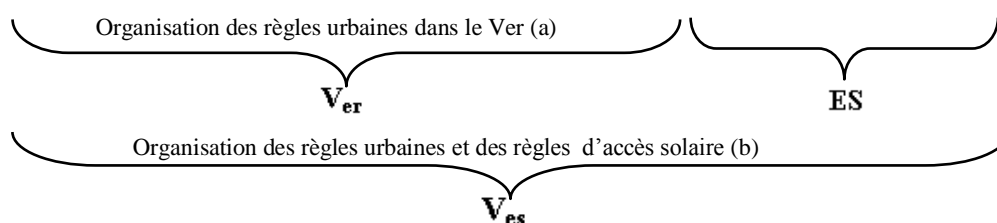


Tableau 1. Organisation des règles urbaines et des règles d'accès solaire

Parallèlement, Belkaïd & Ben Saci (2010) proposent de générer le volume du V_{er} selon selon trois ordres. Le volume d'ordre 1 représente le premier niveau de traduction des règles urbaines. Il correspond aux règles de la première classe (classe A_1). Le volume d'ordre 2 correspond au volume qui intègre les règles de la première classe (classe A_1) et de la deuxième classe (classe A_2). Le volume d'ordre 3 est le volume qui satisfait l'ensemble de règles urbaines de la forme (classe A_1, A_2 et A_3), c'est-à-dire *les règles gérant le domaine public*, *les règles gérant le domaine de voisinage* et *les règles gérant le domaine privé*. Notons ici que le passage d'un ordre à un autre ne se fait pas d'une façon linéaire et déterministe (Belkaïd & Ben Saci, 2010). En continuité, nous proposons un volume d'ordre 4 qui est le volume le plus restrictif qui satisfait l'ensemble des règles urbaines de la forme (classe A_1, A_2 et A_3) et des règles d'accès solaire (Classe B) (Figure. 2).

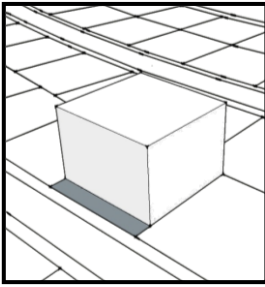
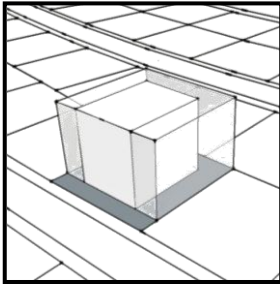
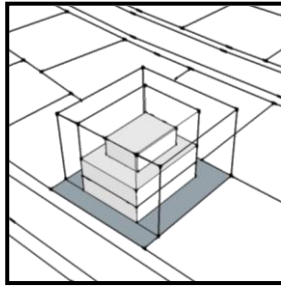
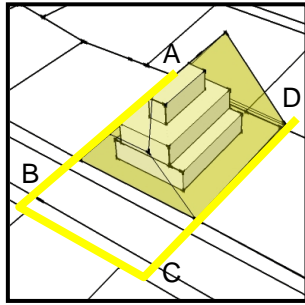
Règles			
Classe A_1	Classe A_2	Classe A_3	Classe B
Alignement : 3m Hauteur maximale : 12m	Alignement : 3m Hauteur maximale : 12m	COS : 0,3	Tems de coupure : De 10h à 14h le 21 décembre Clôture d'ombre : ABDC
V_{es} d'ordre 1	V_{es} d'ordre 2	V_{es} d'ordre 3	V_{es} d'ordre 4
			

Figure 2. Modélisation du V_{es} selon la notion d'ordre

6. Illustration et résultats

Nous allons ici passer à l’illustration de notre modèle par cas réel situé au lotissement de la cité des pins au lac nord de Tunis. Cette illustration va nous permettre de visualiser différentes situations de production de V_{es} .

Pour la production du V_{er} , trois situations sont proposées ;

- un V_{er} unique-maximal satisfaisant les valeurs cibles (les valeurs maximales à atteindre) de toutes les contraintes
- des V_{er} multiples maximaux satisfaisant les valeurs cibles de toutes les contraintes
- des V_{er} multiples optimaux satisfaisant au mieux toutes les contraintes (Belkaïd & Ben Saci 2010)

Pour la modélisation de la ou les solutions du V_{es} , nous avons pu relever deux situations de production ;

- $V_{es} \subset V_{er}$: dans ce cas le V_{er} (optimal ou maximal) dépasse les limites de l’enveloppe solaire. La solution du V_{es} est alors un V_{er} affiné (figure 3.).

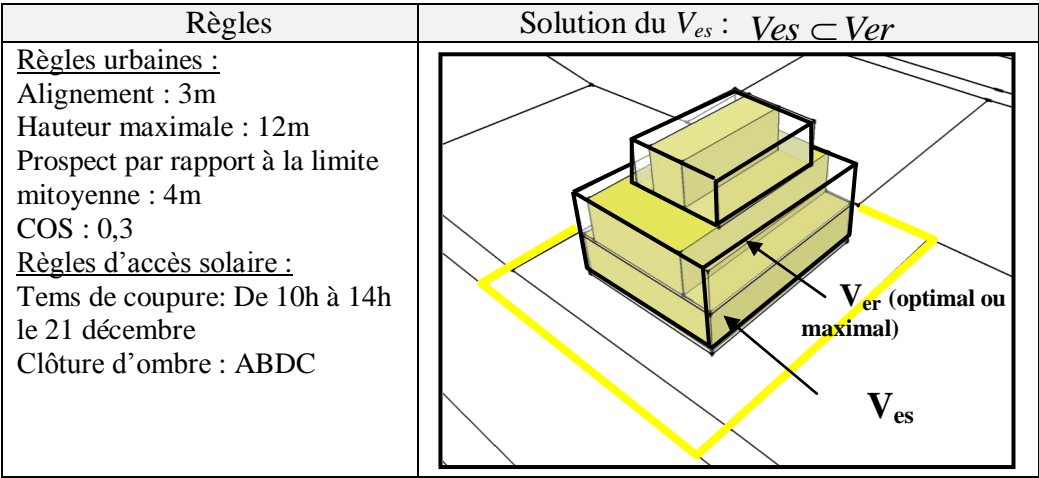


Figure 3. Solution du V_{es} inclut dans le V_{er}

- $V_{es} \equiv V_{er}$: dans ce cas le V_{er} (optimal ou maximal) est inclut dans le volume de l’enveloppe solaire. La solution du V_{es} est alors confondue avec le V_{er}

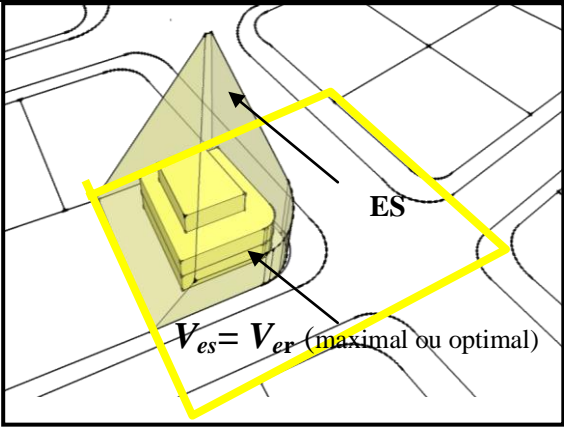
Règles	Solution du $V_{es} : V_{es} \equiv V_{er}$
<u>Règles urbaines :</u> Alignement : 3m Hauteur maximale : 12m Prospect par rapport à la limite mitoyenne : 4m COS : 0,3 <u>Règles d'accès solaire :</u> Tems de coupure: De 10h à 14h le 21 décembre Clôture d'ombre : ABDC	

Figure 4. La solution du V_{es} est le V_{er}

7. Conclusion

L'enjeu de ce travail est la modélisation du volume de contraintes urbaines et d'accès solaire. Ce volume de contraintes est extrêmement complexe (plusieurs règles doivent être gérées en même temps). Il est donc difficile, voire impossible, de calculer ou d'imaginer mentalement ce volume. L'approche informatique prend donc ici tout son sens. Pour parvenir à cette fin, nous nous sommes basés sur les approches multi-agents et spécifiquement sur une approche existante de modélisation du *volume englobant réglementaire* V_{er} . Nous avons intégré alors dans le modèle proposé une nouvelle couche de contraintes, à savoir les contraintes d'accès solaire traduits par l'enveloppe solaire. Nous pouvons également étendre cette approche avec d'autres types de contraintes (visibilité, éclairage naturel, ventilation...).

Dans ce travail nous avons essayé de préparer les éléments de base pour le développement informatique d'un outil d'aide à la conception. Cet outil est dirigé à la fois aux architectes et aux urbanistes. Il permettra de surmonter les problèmes de « *droits solaires* » dans les codes urbains en fonction des exigences particulières de chaque région. En même temps il permettra aux planificateurs et aux urbanistes de tester la pertinence des règles urbaines compte tenu de l'accès solaire et de proposer leur reformulation à l'aide du concept de l'enveloppe solaire

Au final, notre travail constitue une première ébauche pour suivre une voie prometteuse et ambitieuse dans le domaine de la recherche en architecture, celle des approches multi-agents. Il serait intéressant, de notre point de vue, de développer ces approches pour résoudre la complexité qui caractérise le processus de conception architecturale.

Bibliographie

- Belkaïd, A., & Ben Saci, A. (2010). Système multi-agents pour la fabrication de la forme urbaine. *JFSMA'10 : Les Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*. Mahdia (Tunisie): Cepadues.
- Bura, S., Guerin-Pace, F., Mathian, H., Pumain, D., & Sanders, L. (1996). Multi-agents system and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 38(2), pp. 161-178.
- Capeluto, I. G., Yezioro, A., Bleiberg, T., & Shaviv, E. (2006). Solar Rights in the Design of Urban Spaces. *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. suisse .
- Casabianca, G., Evans, J. M., & Schiller, S. (1991). Solar right and planing codes. *PLEA 91 – The 9th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Sevilla (Espagne).
- Cotton, J. F. (1996). Solid modeling as a tool for constructing solar envelopes. *Automation in Construction* N°5 (pp. 185-192). Amesterdam: Elsevier.
- Ferrand, N., Demazeau, Y., & Baeijs, C. (1998). Système Multi-Agents Réactifs pour la Résolution de Problèmes Spatialisés. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 12(I), pp. 37-72.
- Jennings, N. R., Sycara, K., & Wooldridge, M. (1998). A Roadmap of Agent Research and Development. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pp. 275–306.
- Juchmes, R., Leclercq, P., & Azar, S. (2004). A Multi-Agent System for the Interpretation of Architectural Sketches. *EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. Grenoble.
- Juyal, M., Kensek, K., & Knowles, R. (2003). SolCAD: 3D Spatial design to generate Solar envelope. *ACADIA22: connecting the cross roads of digital discourse* (pp. 410-417). Muncie, Indiana: Bal State University.
- Kensek, K., & Knowles, R. (1997). Solar Access Zoning: Computer Generation of the Solar Envelope. *ACSA Southwest Regional Meeting*. Mexico: University of New Mexico.
- Knowles, L. R. (1981). *Sun Rhythm Form*. Cambridge: MIT Press.
- Knowles, L. R. (1999). *On being the right size: An Urban Housing Study for Los Angeles*. Consulté le juin 20, 2010, sur http://www-bcf.usc.edu/~rknowles/right_size/right_size.html
- Lecourtois, c., & Guéna, F. (2009). Eco-conception et esquisse assistée. *SCAN'09: Séminaire de Conception Architecturale Numérique*. Nancy.
- Pereira, F. O., & Nome Silva, C. A. (1998). A proposal for the implementation of the solar envelope in urban planning as a concept for regulating the occupation of urban area. *PLEA 98 – The 15th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (pp. 611–614). Lisbon, Portugal.
- Pereira, F. O., Nome Silva, C. A., & Turkienkz, B. (2001). A Methodology For Sunlight Urban Planning: A Computer based Solar And Sky Vault Obstruction Analysis. (Elsevier, Éd.) *Solar Energy*, 70(3), pp. 217–226.
- Raboudi, K. (2011). *Système multi agents pour la modélisation du volume englobant solaire*. mémoire de mastère, Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme, tunis.
- Ratti, C., & Morello, E. (2005). Sun Scapes: extending the 'solar envelopes' concept through 'isosolar surfaces'. *PLEA 2005- the 22nd International Conference on Passive and Low Energy Architecture* (pp. 815-820). Beirut: NDU.
- Ratti, C., & Richens, P. (2004). Raster analysis of urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), pp. 297 -309.
- Schiller, M., & Uen-Fang, Y. (1993). Solvelope: An interactive Computer Program for defining and drawing solar envelopes. *Proceedings of the American Soalr Energy Society Conference*.
- Sembonia, F., Assfalgb, J., Armenib, S., Gianassib, R., & Marsonic, F. (2004). CityDev, an interactive multi-agents urban model on the web. (ELSEVIER, Éd.) *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, pp. 45–64.
- Stasinopoulos, T. (2000). *Solar envelope: a construction method using AutoCAD 200*. Consulté le Decembre 20, 2009, sur <http://www.oikotekton.net/solvelope/>
- Teller, J. (2001). *La régulation morphologique dans le cadre du projet urbain*. Thèse de doctorat, Université de Liège: Faculté de Sciences Appliquées, Liège.