



Chapitre d'actes

1994

Published version

Open Access

This is the published version of the publication, made available in accordance with the publisher's policy.

PVSYST: logiciel pour systèmes photovoltaïques

Mermoud, André

How to cite

MERMOUD, André. PVSYST: logiciel pour systèmes photovoltaïques. In: Techniques de dimensionnement des systèmes énergétiques solaires: actes du colloque international. Coopération Méditerranéenne pour l'Energie Solaire (Ed.). Perpignan. Perpignan : Université de Perpignan, Institut universitaire de technologie, Laboratoire de thermodynamique et énergétique, 1994. p. 1-9.

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:119363>



PVSYST : Logiciel pour systèmes photovoltaïques

Dr. André MERMOUD

Groupe de Physique Appliquée (GAP) et
Centre Universitaire d'Etude de Problèmes de l'Energie (CUEPE)
Université de Genève
4, ch. de Conches, 1231 Conches (Genève), Suisse
Tél (+41) 22 789 13 11 - Fax (+41) 22 347 86 49

Résumé

Nous développons un logiciel P.C. de simulation/dimensionnement/analyse de systèmes photovoltaïques, équipé d'une interface-utilisateur conviviale sous Windows, destiné à l'usage des chercheurs, ingénieurs, architectes, en général non informaticiens. Ce logiciel fait référence à un cahier des charges défini à la suite d'une consultation des utilisateurs potentiels en Suisse, et tente de prendre en compte tous les effets perturbateurs intervenant sur un système PV. Outre le dimensionnement et l'étude de systèmes, il poursuit également un objectif didactique, par un usage intensif de graphiques visualisant le comportement de divers composants, des champs de capteurs ou de nombreux paramètres solaires. Il est actuellement disponible en français, des traductions anglaise et allemande sont envisagées.

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque se développe rapidement en Suisse, non seulement pour de petites installations isolées, mais aussi pour de moyennes et grandes installations de production d'énergie liées au réseau; ceci nécessite évidemment de développer des outils de conception, dimensionnement et analyse appropriés.

Or dans un premier temps, le calcul des performances d'un tel système optimisé pouvait se résumer en première approximation à une évaluation de l'ensoleillement dans le plan des capteurs, affecté d'une efficacité (panneaux + conditionnement de puissance) constante. Ceci était justifié par le fait que, dans des conditions optimales d'utilisation, les cellules PV fournissent une énergie pratiquement proportionnelle à l'énergie incidente. L'ensoleillement sur plans inclinés peut être déterminée grâce à de nombreux outils existants (par ex. tables/logiciel Météonorm pour la Suisse), et on obtient ainsi immédiatement des résultats d'une précision de l'ordre de 10% proches des fluctuations annuelles de la météo et de la détermination des paramètres des composants.

Mais avec l'augmentation de la taille des systèmes, la baisse du coût relatif des panneaux PV dans le prix de l'installation, et l'intégration dans le bâtiment, on construit actuellement des systèmes dans des conditions de plus en plus diverses, s'éloignant des conditions optimales. C'est pourquoi il est apparu nécessaire de pouvoir quantifier non seulement l'énergie brute délivrée (mensuelle ou annuelle), mais aussi l'effet relatif de diverses perturbations dues aux performances des composants, aux choix constructifs du système, ou aux conditions d'utilisation.

Après une étude très détaillée de quelques systèmes réels [1], où nous avons pu identifier et modéliser les diverses perturbations pouvant affecter le fonctionnement de ces systèmes, nous avons analysé et évalué les logiciels de simulation disponibles sur le marché [2]. Mais aucun ne nous a paru susceptible de prendre en compte l'ensemble des phénomènes observés. Nous avons donc entrepris d'élaborer ce nouveau logiciel PVSYST, en essayant d'y incorporer et modéliser chaque effet significatif, tout en soignant l'interface-utilisateur de manière à rester accessible aux ingénieurs et architectes non spécialistes de l'informatique.

Le financement de ce projet est assuré par l'OFEN (Office Fédéral de l'Energie, Suisse).

II. DESCRIPTION DU LOGICIEL PVSYST

II.1. Interface-utilisateur

L'expérience acquise lors de la manipulation des divers logiciels testés, les difficultés rencontrées et leurs points forts, nous ont été une aide précieuse pour la conception de ce nouveau logiciel. Le programme est écrit en Turbo Pascal, et tourne sur PC-compatibles (386 ou supérieurs), sous Windows 3.1. Il fait un large usage des techniques d'"orientation-objet", permettant une simplification de la conception générale et une facilité accrue pour les adaptations ultérieures (nouveaux types de systèmes ou composants, extensions de la présentation des résultats, etc.). La manipulation de l'interface sera familière aux utilisateurs de Windows, avec ses menus déroulants, boutons, dialogues, etc. La compatibilité avec les divers matériels (écrans, imprimantes, etc..) est gérée par Windows, ce qui garantit une portabilité maximale.

Les paramètres sont regroupés dans des boîtes de dialogue par affinité logique, et une présentation graphique est proposée partout où cela peut être utile. La gestion des fichiers est assurée par le programme; chaque fichier dispose d'un commentaire explicite qui apparaît dans toute liste de choix. L'utilisateur dispose d'une aide en ligne de type "hypertexte".

Le logiciel est actuellement disponible en français. Des versions en anglais et éventuellement en allemand sont envisagées. Grâce à l'utilisation de ressources indépendantes, la traduction sera effectuée sans toucher au code.

La version actuelle ne traite encore que des systèmes couplés au réseau. Les systèmes autonomes avec stockage seront introduits dans une prochaine version.

L'organisation générale apparaît comme la fenêtre principale du logiciel, sous la forme d'un menu général (fig 1).

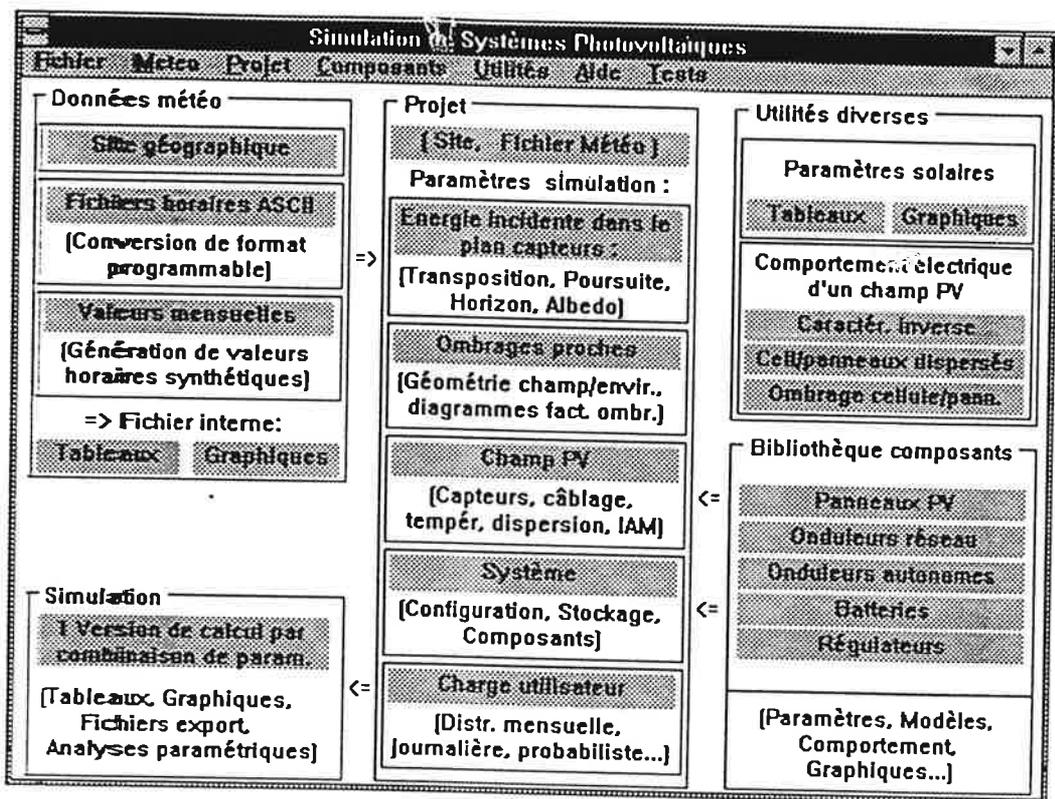


Fig 1. - Organisation du logiciel, apparaissant comme le menu principal.

II.2. Données météorologiques

La simulation nécessite des valeurs horaires pour les rayonnement global et diffus, la température ambiante et la vitesse du vent. S'il n'est pas disponible, le rayonnement diffus est estimé selon le modèle de Maxwell. La vitesse du vent n'est pas capitale, et peut être fournie en valeurs mensuelles.

Un générateur de valeurs horaires synthétiques permet de créer des séquences horaires à partir de moyennes mensuelles. Des corrections pour l'horizon réel du site de mesures météo, ainsi que pour la différence d'altitude entre les sites des mesures météorologiques et celui du système, sont proposées suivant les directives de Météonorm ([3],[4]), la référence suisse en matière de traitement de données météorologiques.

Dans le courant de 1995, la nouvelle base de données Météonorm'95 sera directement accessible depuis PVSYST. Cette base fournit, pour n'importe quel commune de Suisse, le global et la température en valeurs mensuelles. Elle dispose également de données annuelles de référence (DRY), en valeurs horaires, pour 16 stations répartie sur le territoire suisse.

Enfin PVSYST dispose d'un module d'interprétation programmable, permettant d'exploiter directement une grande variété de formats de fichier météo ASCII (la principale contrainte étant que les données d'une heure résident sur la même ligne). Les données météorologiques, converties au format interne de PVSYST, peuvent être contrôlées et analysées au moyen de tableaux et graphiques variés.

II.3. Librairie de composants

Les caractéristiques des composants (modules PV, onduleurs, et plus tard batteries, régulateurs, etc.) sont stockés dans une librairie. Les données (spécification des fabricants ou mesures personnelles) peuvent être entrées très facilement par l'utilisateur.

Concernant les **modules PV**, une base de données très complète (plusieurs centaines de modèles), élaborée par le TISO (Tessin, Suisse) à partir de leurs propres mesures et des mesures du laboratoire européen d'ISPR, sera annexée au logiciel et périodiquement mise à jour. La caractérisation des modules PV requiert 4 paramètres électriques usuels (I_{sc} , V_{co} , V_{mpp} et I_{mpp} mesurés dans des conditions arbitraires de rayonnement et température), la résistance parallèle, le coefficient de température μI_{sc} (et éventuellement μV_{co}), et les caractéristiques géométriques pour l'évaluation des efficacités. Un paramètre quadratique (grossier), décrivant le courant d'une cellule sous polarisation inverse, est nécessaire seulement pour les graphiques de dispersions de caractéristiques et ombrages partiels en annexe du logiciel. PVSYST travaille avec la modélisation classique à "une diode" des cellules ou panneaux PV. L'utilisateur peut à tout moment visualiser le comportement électrique de ses modules PV grâce à divers graphiques (I/V , P/V , P_{max}/G_{inc} , etc.), et en varier les paramètres.

Les **onduleurs pour le réseau** peuvent travailler avec recherche du point de puissance maximum (MPPT) ou à tension fixe. Pour chaque appareil, on doit définir des limites de tension et puissance, et un profil d'efficacité en fonction de la puissance (d'entrée ou de sortie, au choix). Le profil est donnée par 9 points au maximum, et visualisé sur un graphique selon diverses variables. Durant la simulation, les pertes dues aux dépassements des limites de tension/puissance sont comptabilisées indépendamment.

Batteries et régulateurs seront définis dans une version ultérieure.

II.3. Projet

La simulation est effectuée dans le cadre d'un "projet". Le projet est une entité centrale de PVSYST: il est caractérisé par un lieu géographique et une base de données météorologique, qui ne seront en principe pas modifiés dans la suite.

Les paramètres nécessaires à une simulation sont regroupés en 5 catégories:

- **L'énergie incidente:** cette partie contient les paramètres pour le calcul de l'énergie disponible dans le plan des capteurs. Le plan des capteurs peut être fixe, suiveur un ou deux axes, ou avec ajustement saisonnier; les plans suiveurs sont munis de limites de course. La transposition est effectuée selon le modèle de Perez [5], avec un albédo qui peut être défini en valeurs mensuelles. L'horizon est défini dans cette section par un profil polygonal (pas de 15° ou moins), et visualisé sur un diagramme hauteur/azimut de la trajectoire du soleil. Il est supposé suffisamment lointain pour occasionner un ombrage global du champ en un instant donné (fonctionnement en "tout ou rien" pour le rayonnement direct).
- **Les ombrages d'objets proches:** par opposition, les objets proches du site projettent des ombrages sur une partie du champ seulement. Cette situation est beaucoup plus complexe à modéliser; elle nécessite de définir la géométrie détaillée du système et de son environnement en 3 dimensions. Le système PV est construit et visualisé en perspective grâce à une interface CAO simplifiée, et les ombrages peuvent être dessinés et calculés pour n'importe quel instant ou position du soleil. La simulation applique la correction

d'ombrage instantanée au direct, et calcule une correction intégrale d'ombrage pour le diffus. Ce processus sera décrit en détail dans la section suivante.

- La définition du **champ PV** fixe le choix du type de module PV, l'organisation du câblage, et définit les paramètres nécessaires aux corrections sur l'énergie fournie par le champ: facteurs de pertes thermiques pour le calcul de la température instantanée des cellules (déterminés par le genre de montage des panneaux), résistances parasites du câblage et diodes de protection, pertes dues à la dispersion statistique des caractéristiques des modules (avec un outil graphique pour les évaluer), correction selon l'angle d'incidence (IAM pour "Incidence Angle Modifier).
- La **configuration du système**; pour l'instant, seuls les systèmes couplés au réseau sont disponibles. Ce dialogue donne le choix du type d'onduleur, et le genre de montage (un, trois ou N onduleurs connectés sur des champs identiques).
- La **charge-utilisateur** peut être définie de multiples manières: valeur constante, mensuelle, profils journaliers avec modulation mensuelle, saisonnière ou selon le jour de semaine, ou encore profil de probabilité instantanée. Pour les comparaisons avec des données réelles, l'utilisateur peut également introduire un fichier de valeurs horaires.

Pour un projet donné, l'utilisateur peut définir autant de variantes qu'il le désire pour chacun de ces groupes, et exécuter la simulation pour diverses combinaisons.

II.4. Simulations

Pour une variante donnée, la simulation sur une année dure environ 1 à 2 minutes sur un 486. Outre quelques tableaux et graphiques standard, les résultats peuvent être obtenus sous forme de graphiques et tables de valeurs, choisies parmi plus de 60 paramètres calculés au cours de la simulation. Seules les valeurs mensuelles sont mémorisées, mais il est possible d'établir des graphiques divers (scatterplots, histogrammes, évolutions temporelles détaillées) en valeurs journalières ou horaires, pourvu qu'on définisse le graphique désiré avant d'effectuer la simulation.

Pour l'exportation des résultats dans d'autres logiciels (tableurs, etc.), il est également possible de créer des fichiers standards ASCII de valeurs journalières ou horaires, avec des paramètres choisis.

Pour les versions ultérieures, nous prévoyons la possibilité d'effectuer directement des études paramétriques, ou encore des calculs d'"élasticité" (sensibilité à un paramètre donné).

II.5. Utilités diverses

Le logiciel PVSYST inclut quelques outils à caractère pédagogique, qui peuvent se révéler très utiles pour l'ingénieur.

- Des tables et graphiques de plus de 40 paramètres solaires, pour n'importe quel lieu géographique. Ces paramètres incluent la géométrie solaire sur plan horizontal et incliné, un modèle de ciel clair avec global et diffus, les effets d'incidence et d'ombrages mutuels de sheds, etc.
- L'analyse du comportement de la caractéristique d'un panneau ou d'un champ, lorsqu'une cellule est déficiente ou ombrée, et les phénomènes d'échauffement associés ("hot spot"), l'effet de protection des diodes de by-pass.
- Les effets de la dispersion statistique des paramètres de cellules ou panneaux, sur la caractéristique globale du panneau, respectivement du champ complet. Ces outils

permettent de visualiser et d'évaluer l'effet réel des pertes de désadaptation ("mismatch"), ainsi que l'efficacité d'un tri préalable des modules lors du montage d'un champ.

III. OMBRAGES PROCHES

Le traitement des ombrages proches constitue l'originalité principale de PVSYST: Par opposition aux ombrages lointains, occasionnés par l'horizon, et qui affectent l'ensemble du champ simultanément, les ombrages proches produisent un ombrage partiel des collecteurs, variable au cours du temps.

III.1. Géométrie du système

Les calculs d'ombrage proches sont basés sur une définition précise de la géométrie du champ et de son environnement, en 3 dimensions. Il a donc fallu créer un outil CAO pour élaborer le système dans l'espace, avec diverses facilités et simplifications spécifiques aux applications PV. En effet, contrairement aux applications architecturales, les détails complexes n'ont ici pas beaucoup d'importance: seule l'enveloppe susceptible de projeter une ombre doit être correctement définie.

Pour la construction de son système, l'opérateur dispose d'une collection de surfaces et volumes élémentaires (triangles, rectangles, polygones, dièdres, parallélépipèdes, prismes, etc.), modulées sous forme paramétriques (hauteur, largeur, etc.), qu'il peut disposer, assembler, tourner sur son écran de manière à construire des objets plus complexes. Ces objets (champs, groupes de sheds, objets d'ombrage tels que bâtiments) sont eux-mêmes disposés les uns par rapport aux autres dans le référentiel général défini par les points cardinaux. A tous les stades, ces objets peuvent être visualisés en plan, élévation, ou en perspective selon un angle de vue quelconque.

Une fois cette "scène" bien définie, le programme calcule le **facteur d'ombrage** (fraction de surface ombrée par rapport à la surface sensible) pour une position donnée du soleil. Il effectue un changement de référentiel pour placer l'axe oz' dans la direction du soleil, et projette tous les obstacles amonts dans le plan des capteurs. La surface de champ ombrée est alors l'intersection des polygones d'ombrage (2D) avec ceux du champ.

Pour obtenir une meilleure précision et rapidité, le calcul est effectué analytiquement. Mais le traitement des interactions entre polygones est un problème informatique très complexe dans le cas général, et certaines configurations aboutissent à des impasses. Dans ces cas, le traitement est relayé par un calcul point par point, moins précis mais plus sûr.

Si le champ est multiple (par exemple en sheds), le programme répète l'opération pour tous ses éléments. La figure 2 montre un exemple de champ, ombré par une cage d'escalier adjacente. L'opérateur pourra visionner ainsi l'ombrage pour n'importe quelle position du soleil ou date/heure de l'année.

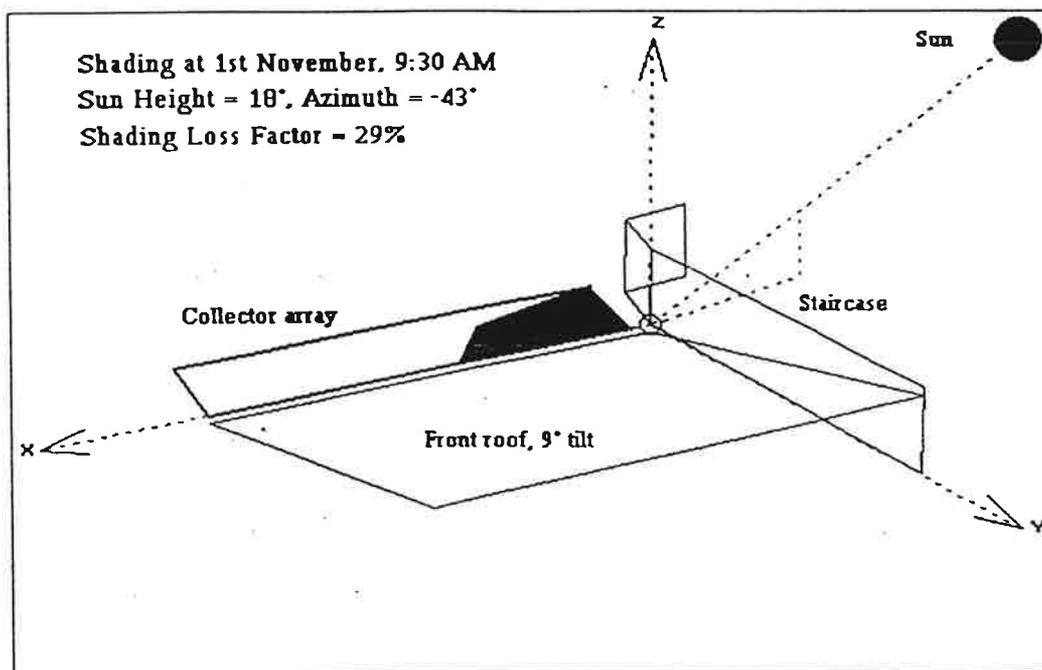


Fig 2. Exemple de la représentation géométrique d'un système PV avec son environnement. Le champ de capteurs est disposé à l'arrière d'une toiture peu inclinée, et ombrée par une cage d'escalier.

III.2. Carte du facteur d'ombrage

Ce calcul prend évidemment trop de temps pour être répété à chaque heure lors de la simulation. C'est pourquoi le programme établit une table du facteur d'ombrage dans les deux dimensions hauteur et azimuth du soleil. La simulation n'a plus qu'à interpoler dans cette table, ce qui est très rapide. De plus l'utilisateur peut également demander une carte de courbes d'iso-ombrages dans la diagramme hauteur/azimut (fig 3). Cette figure permet d'évaluer d'un seul coup d'oeil les effets d'ombrages selon la saison et l'heure du jour.

III.3. Effet sur la production électrique

Les ombrages partiels sur un champ PV produisent en réalité des effets beaucoup plus complexes, si l'on tient compte du fait que lorsqu'une seule cellule est ombrée, c'est le courant de toute la chaîne des cellules en série avec elle qui est limité. Même avec les diodes by-pass de protection, cette chaîne ne participe plus que marginalement à la production du champ. On a ainsi des effets non linéaires pratiquement impossibles à résoudre dans le cadre d'une telle simulation. C'est pourquoi le programme offre la possibilité de partitionner le champ en rectangles (identiques), représentant chacun une chaîne de panneaux en série. On définit alors un **facteur d'ombrage "effectif"**, en supposant que tout élément touché par l'ombrage devient inactif. Cette hypothèse est certes pessimiste, mais elle donne une limite supérieure aux pertes d'ombrage réelles, le facteur d'ombrage linéaire ("brut") étant une limite inférieure.

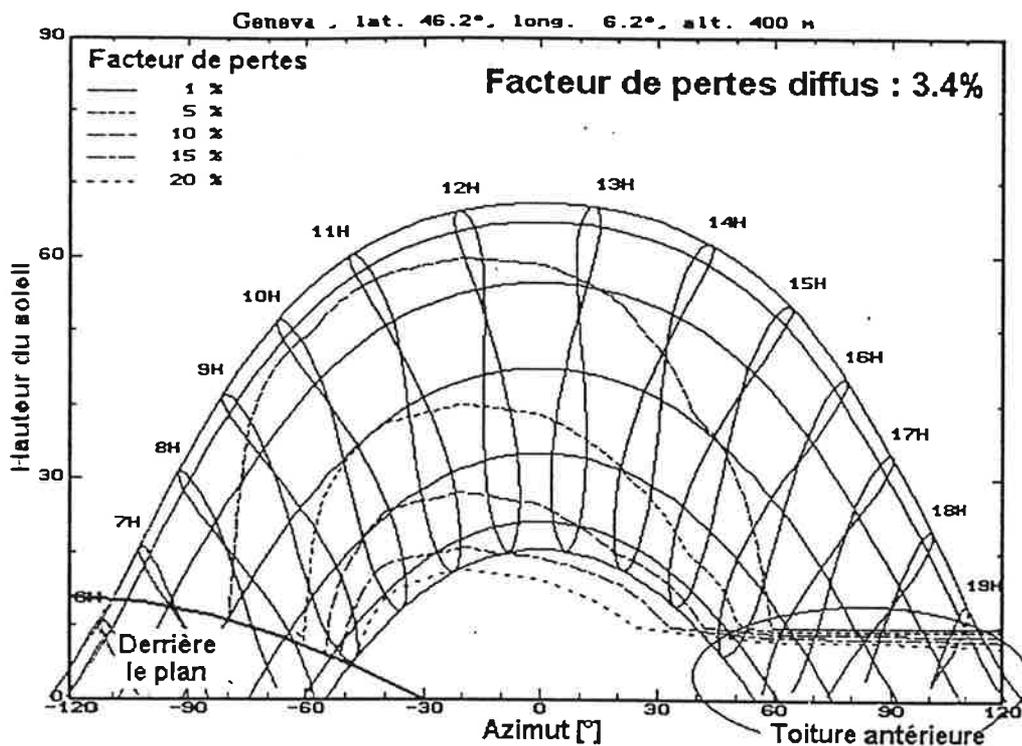


Fig 3. Courbes d'iso-ombrage correspondants, tracées dans le diagramme hauteur/azimut du soleil, et estimation de la perte d'ombrage sur le diffus.

III.4. Effets sur le rayonnement incident

Pour évaluer la perte énergétique, les pertes d'ombrage doivent être intégrées sur le temps de fonctionnement par le processus de simulation. La direction du soleil est calculée pour le milieu de chaque heure, ou le milieu de l'intervalle de temps s'il est limité par le lever ou le coucher. Ceci peut occasionner quelques erreurs d'échantillonnage, négligeables en moyenne.

Pour chaque heure, le facteur d'ombrage instantané doit être affecté à la **composante directe** du rayonnement. La contribution faisant intervenir le facteur d'ombrage "effectif" est également évalué en parallèle.

Par contre, les effets de l'environnement des capteurs sur la **composante diffuse isotrope** résultent d'une intégrale du facteur d'ombrage sur toutes les directions "vues" par le champ de capteurs, c'est-à-dire sur la portion de sphère comprise entre le plan et l'horizon. Cette intégrale ne dépend plus de la direction du soleil, et reste donc constante au cours de l'année. Puisque la géométrie est diffuse à chaque instant, nous n'utilisons que le facteur d'ombrage linéaire pour cette évaluation.

La **composante d'albedo**, déterminée par la procédure de transposition, est habituellement composée de réflexions diffuses sur les régions éloignées du sol. Nous supposons qu'elle disparaît dans les directions affectées par les obstacles d'ombrage, ainsi que pour les sheds antérieurs le cas échéant. Ainsi, la perte d'albedo est obtenue par intégration du facteur d'ombrage calculé au niveau du sol, sur la portion de sphère comprises entre l'horizon et la prolongation inférieure du champ. Il reste également constant au cours de l'année.

Les réflexions spéculaires sur des bâtiments ou surfaces proches ne sont pas prises en compte par le programme. Nous pouvons cependant remarquer que ces contributions, bien que spectaculaires, n'apportent qu'une contribution énergétique négligeable. Elles n'apparaissent que pour des instants précis et en présence de direct, et surtout doivent illuminer (d'une manière homogène) au moins une série entière de cellules pour donner un appoint électrique.

IV. VALIDATIONS ET CONCLUSIONS

Les résultats de ce logiciel n'ont été validés, pour l'instant, que sur les données d'une installation de 7.5 kW des Services Industriels de Genève, soigneusement analysées par notre laboratoire [1]. Ils présentent un biais annuel de l'ordre de 1%, avec une dispersion statistique (déviation standard) de 2.1% seulement sur les valeurs mensuelles. Ces performances sont compétitives avec les différents autres logiciels disponibles que nous avons testés sur les mêmes données, dont aucun ne tient compte de toutes les perturbations simultanément, et dont les biais annuels s'étendent de -1 à 15% avec dispersions mensuelles de 3 à 6% [2].

Remarquons cependant que le résultat annuel est largement dépendant des paramètres d'entrée, et notamment des caractéristiques réelles des panneaux PV et des onduleurs, rarement connus avec une précision suffisante. Mais l'objectif principal d'un tel logiciel est moins d'obtenir des bilans prévisionnels absolus, sujets de toutes façons aux caprices de la météorologie (qui peuvent approcher 10% par année), que de pouvoir évaluer les effets de différentes sources de pertes, ou la sensibilité aux paramètres, dus aux choix constructifs ou aux conditions d'utilisation.

Le programme PVSYST est plus qu'un simple logiciel de simulation. Par les outils annexes qu'il propose (bibliothèque de composants commercialisés, graphiques de caractéristiques de composants, d'assemblage et ombrages de capteurs PV, de paramètres solaires, d'ombrages, etc.), il ambitionne de devenir un outil de base pour le concepteur de systèmes solaires PV.

Références

- [1] P. Schaub, A. Mermoud, O. Guisan. Evaluation of the Different Losses Involved in Two Photovoltaic Systems. 12th EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, avril 1994.
- [2] A. Mermoud, O. Guisan. Recensement et évaluation des logiciels de simulation photovoltaïque existants. GAP/CUEPE, Université de Genève/OFEN, Juillet 1993.
- [3] P. Bremer, S. Kunz, R. Voltz. METEONORM. Vol 1 (Théorie), Vol 2 (Données), Vol 3 (Procédures de calcul), Vol 4 (sources de données). Office Fédéral de l'Energie, Berne (1986).
- [4] S. Kunz et al, METEONORM '95, Workshop Appenberg. Meteotest, Bern, 23-24 nov. 1993.
- [5] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart. Modelling Daylight Availability and Irradiance Component from Direct and Global Irradiance. Solar Energy 44, no 5, pp 271-289, 1990.