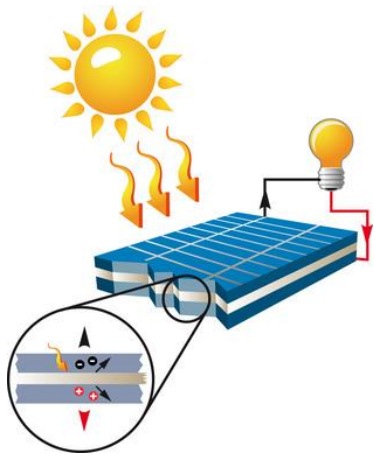




Cours de l'énergie solaire photovoltaïque

Partie II : Conception et dimensionnement des installations PV

Taïb AJZOU,
Professeur au Département de Physique (FS de Tétouan)

Chapitre **II-1** : Relevé de situation et prise en compte de l'ombrage en vue de la conception des installations PV

Chapitre **II-2** : Conception et dimensionnement des installations PV en site isolé

Chapitre **II-3** : Conception et dimensionnement des systèmes PV raccordés aux réseaux

Chapitre **II-4** : Marché des installations PV - Cas du Maroc

Ce cours a été préparé en se basant sur plusieurs références. Particulièrement pour l'illustration par des figures et des images, on distingue l'utilisation du guide du photovoltaïque DGS, réalisée par EdiSun Power.

Plan du Chapitre II-1

Chapitre II-1 : Relevé de situation et prise en compte de l'ombrage

I-1- Visite sur site

I-2- Relevé de situation

- Documents et matériel nécessaires
- Analyse de l'ombrage
- Espacement optimal entre un objet et un module PV
- Détermination de la hauteur et de l'angle d'azimut d'un objet

I-3- Prise en compte de l'ombrage lors de la conception de l'installation

- Ombrage dans le cas de branchement en série des modules
- Ombrage dans le cas de branchement en parallèle des modules
- Ombrage dans le cas des installations solaires montées sur châssis

Relevé de situation et analyse de l'ombrage - Visite sur site

Une inspection sur site est nécessaire pour pouvoir commencer la conception d'une installation PV.

Pour vérifier si le site prévu convient pour construire une installation PV, il faut tenir compte des données suivantes :

- Puissance souhaitée et consommation prévue (consommation électrique annuelle, appareils électriques, etc.),
- Contexte financier en tenant compte des aides accessibles,
- Surface utilisable de toiture, de façade ou de sol,
- Forme du toit et structure de la toiture,
- Orientation et inclinaison,



Visite sur site

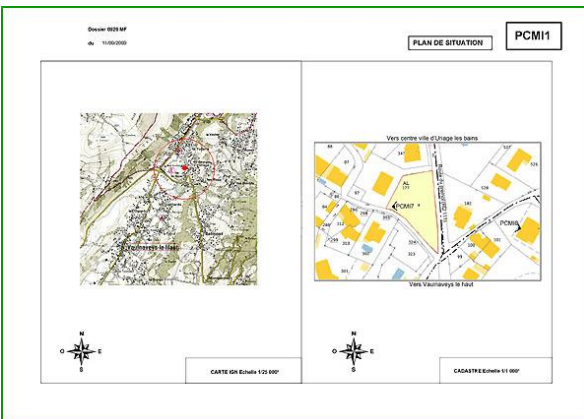
Il faut tenir compte aussi :

- Indications relatives aux ombrages,
- Emplacement possible pour le boîtier de connexion du générateur :
 - pour le dispositif de déconnexion,
 - pour le compteur, etc.
- Longueur, cheminement et type de pose de câbles,
- Accès des véhicules, notamment si des moyens supplémentaires sont nécessaires (grue, échafaudage, etc.).

Documents et matériel nécessaires

Les documents suivants peuvent faciliter l'élaboration du projet :

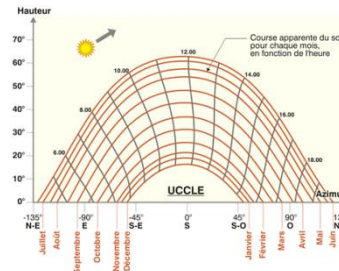
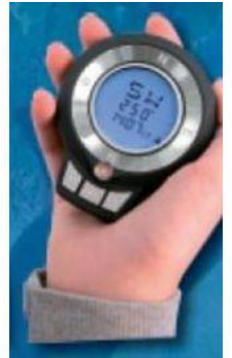
- Plan de situation de la maison pour déterminer l'orientation,
- Plan de construction de la maison pour déterminer l'inclinaison du toit, la surface utilisable et les longueurs des câbles,
- Photographies du toit et de l'emplacement du compteur.



Documents et matériel nécessaires

Il est utile aussi de disposer du matériel suivant lors de la visite sur site :

- Boussole et Clinomètre,
- Pantomètre pour déterminer l'inclinaison du toit,
- Mètre pliant et ruban de mesure,
- Appareil photo,
- Analyseur d'ombre ou diagramme de la trajectoire solaire sur film.



Analyse de l'ombrage

Une ombre sur une installation PV à beaucoup plus de répercussions sur la productivité solaire que dans le cas des installations thermiques solaires (Pour les PV, les pertes de productivité annuelle sont de l'ordre de 5 à 10%). Les ombrages peuvent être classés en catégories :



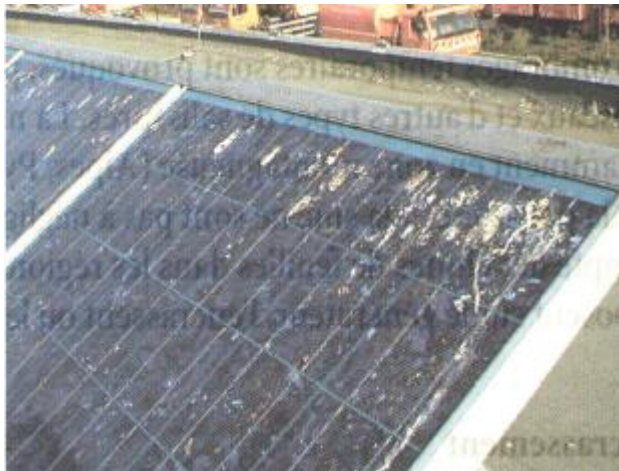
Types d'ombrage d'une installation PV

- Les ombres sont provoquées par des obstacles (des masques) qui empêchent le rayonnement solaire d'atteindre le module photovoltaïque.
- Il est nécessaire d'évaluer précisément les pertes induites par ces ombrages
- On distingue deux types d'ombrages :
 - Le masque proche correspond à l'ensemble des obstacles proches : arbre, câble électrique, bâtiment voisin, etc.
 - Le masque lointain correspond aux obstacles lointains qui se trouvent à l'horizon, c'est-à-dire les montagnes, les collines, etc.

Analyse de l'ombrage

Les ombrages temporaires, provoqués, par exemple, par :

- la neige,
- les feuilles,
- les salissures
- les feints d'oiseaux, etc.



Il convient de nettoyer les modules lorsqu'ils sont encrassés par les salissures et par les fientes d'oiseaux.



Analyse de l'ombrage

➤ **Les ombrages liés au site**, résultant de l'environnement du bâtiment : les bâtiment voisins, les immeubles en hauteur qui se trouvent plus loin, les arbres (il faut tenir compte que les arbres poussent et que avec les années leurs ombres peut affectés l'installation).



Analyse de l'ombrage

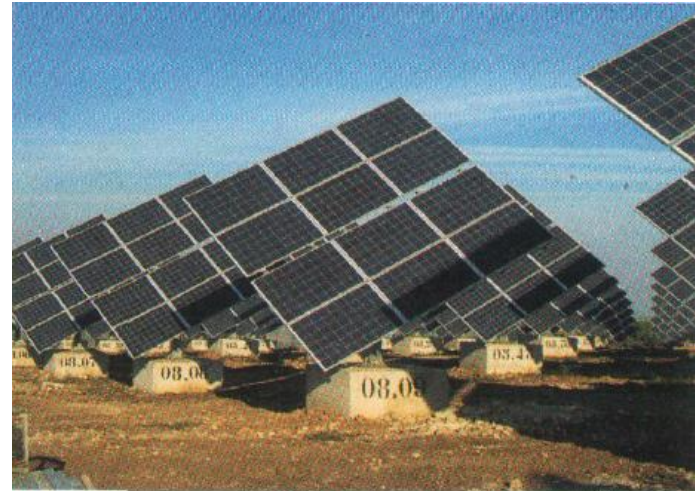
Les ombrages liés au bâtiment :
sont des ombres provoquées par les éléments appartenant au même bâtiment :

- Cheminée,
- Antenne,
- Paratonnerre (qui empêche la foudre de tomber),
- Antenne parabolique,
- Avancée de toiture ou de façade, etc.



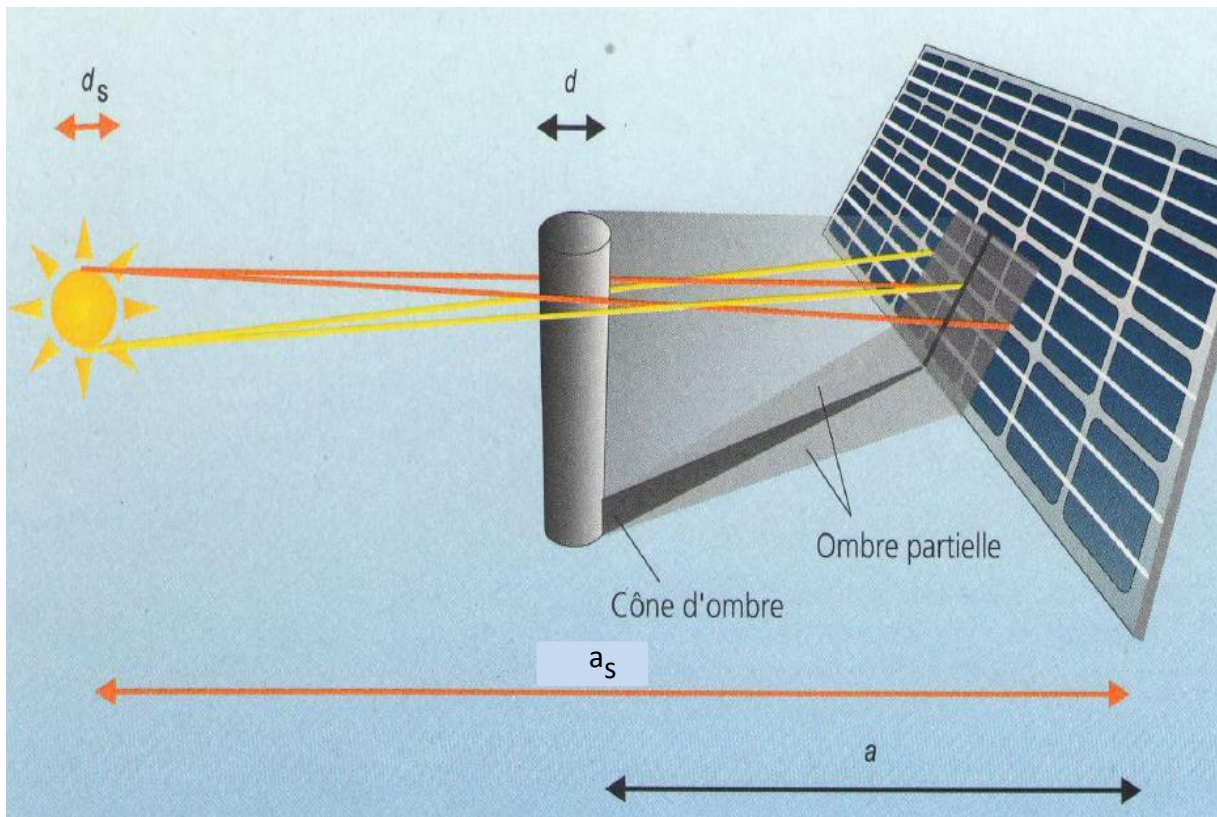
Analyse de l'ombrage

- **Les ombrages spécifiques des modules** se produisent sur les installations (montées sur bâti ou sur les systèmes à poursuite) en raison de la rangée de modules située à l'avant ou en raison des unités de poursuite voisines.
- Une réduction des pertes liées à l'ombrage est possible en optimisant l'angle d'inclinaison et les écarts entre les rangées de modules ou entre les unités de poursuite.



Espacement optimal entre un module et un objet

➤ **Les ombrages de proximité** : Plus l'objet projetant une ombre est proche, plus l'ombre est sombre (cône d'ombre) et réduisant l'énergie irradiée de 60 à 80%. Alors que cette réduction est de moitié dans le cas de l'ombre partielle.



$$a_{opti} = \frac{(a_s + a_{opti}) \times d}{d_s}$$



Espacement optimal entre un objet et un module PV

L'espacement optimal entre l'objet et les module est déterminé comme suit :

$$a_{opti} = \frac{(a_s + a_{opti}) \times d}{d_s} \quad \text{devient :} \quad a_{opti} \approx \frac{a_s \times d}{d_s} \quad \text{comme } a_{opti} \ll a_s$$

avec

a_s - distance Terre - soleil :

d_s - diamètre du soleil :

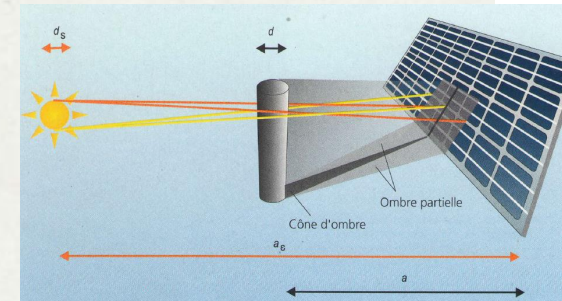
il en résulte :

$a_s = 150$ millions de km

$d_s = 1,39$ million de km

$$a_{opti} = \frac{a_s \times d}{d_s} = 108 \times d$$

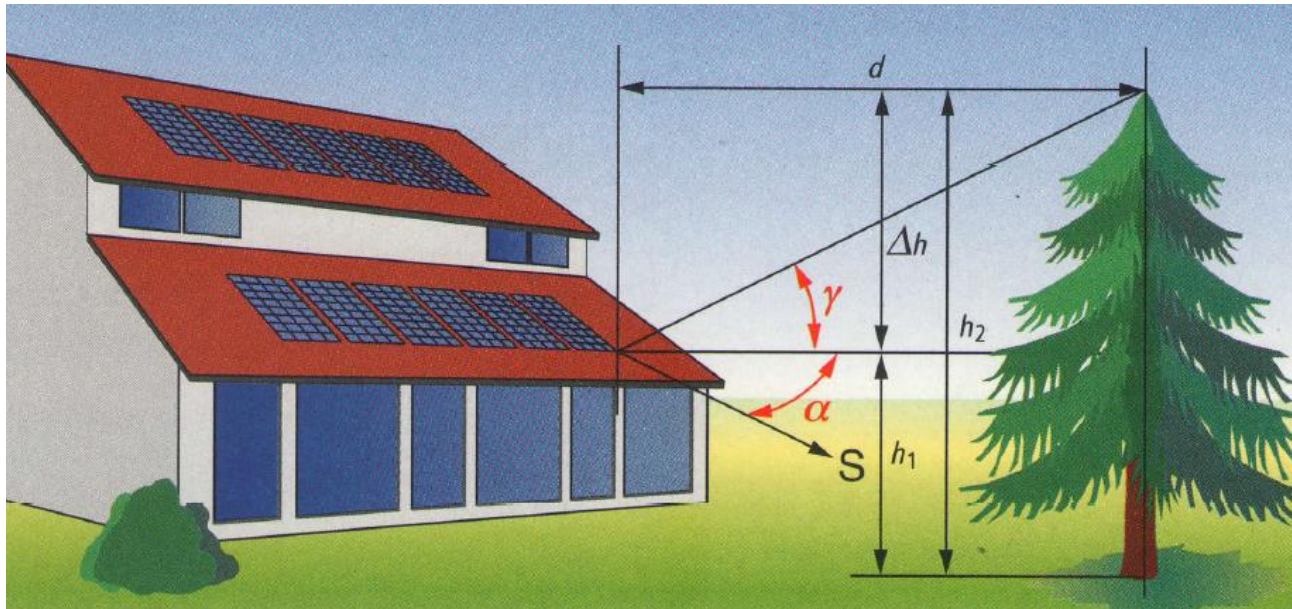
Ainsi, une ligne aérienne ayant un diamètre $d = 5$ cm, par exemple, doit être éloignée d'au moins 5,4 mètres pour qu'aucun cône d'ombre ne soit projeté sur les modules.



Détermination de la hauteur et de l'angle d'azimut d'un objet

Le tracé de l'ombre due à l'environnement, à un point donné de l'installation, peut être effectué avec :

- Un analyseur d'ombre (appareil photo numérique et logiciel spécifique),
- Diagramme de la trajectoire solaire sur film,
- Plan de situation et diagramme de la trajectoire solaire.
- La mesure de l'azimut et de la hauteur



Pour des installations de grande taille, il convient de réaliser ce tracé à partir de plusieurs points de l'installation.

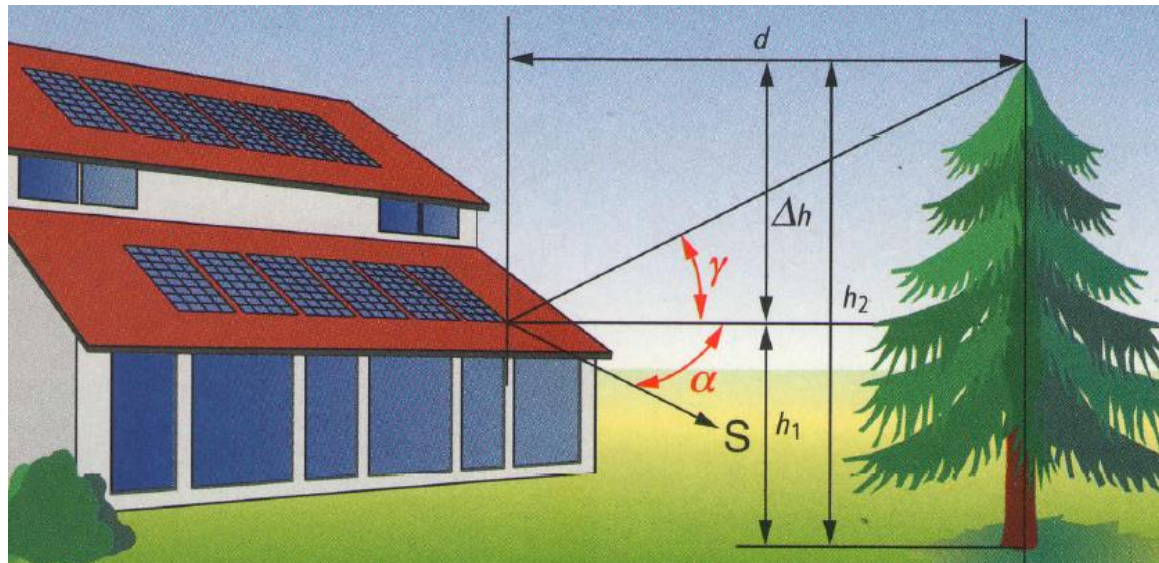


Détermination de la hauteur et de l'angle d'azimut d'un objet

L'angle de hauteur γ est calculé à partir de la différence (Δh) entre la hauteur de l'installation PV h_1 , et la hauteur de l'objet projetant une ombre h_2 , et de sa distance d .

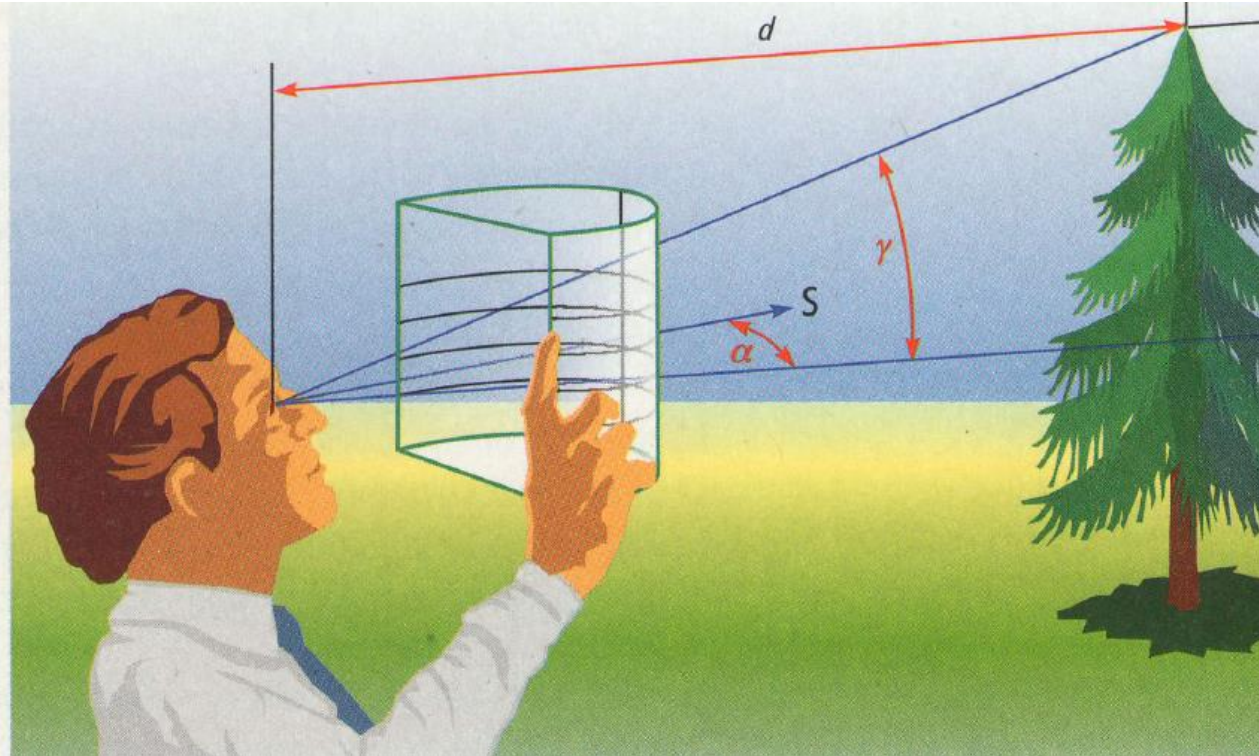
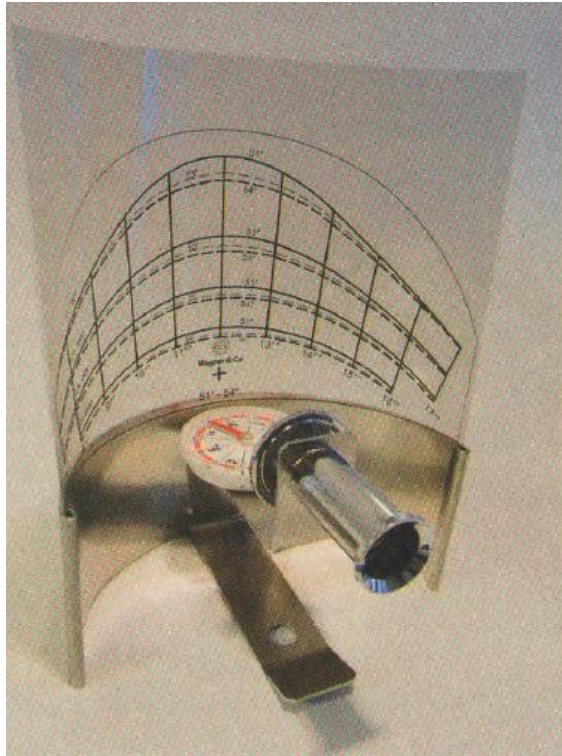
$$\tan \gamma = \frac{h_2 - h_1}{d} \rightarrow \gamma = \arctan \left(\frac{h_2 - h_1}{d} \right) = \arctan \left(\frac{\Delta h}{d} \right)$$

La détermination de l'angle de hauteur est effectuée pour tous les obstacles présents dans l'environnement proche de l'installation solaire. Il faut à cet effet connaître la hauteur et la distance de chacun des objets par rapport à la position de l'observateur.



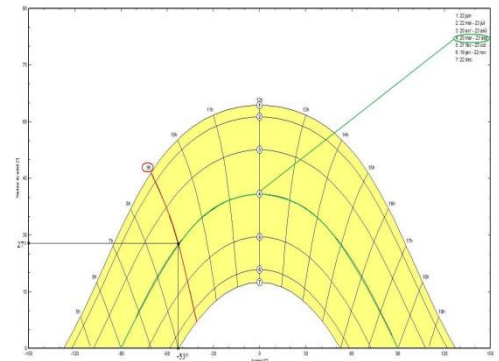
Détermination de la hauteur et de l'angle d'azimut d'un objet à l'aide du diagramme de la trajectoire solaire sur film

Diagramme de la trajectoire solaire (graphe de la course du soleil) sur film transparent.



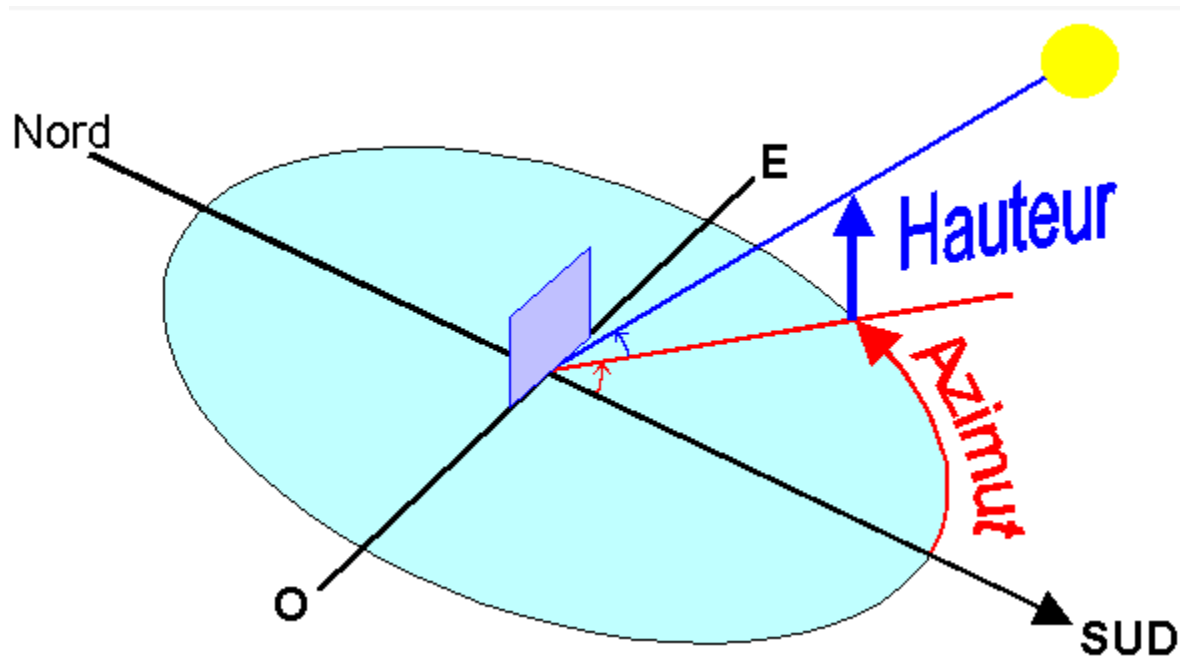
Il est aussi possible d'analyser l'ombrage à l'aide des logiciels.

- ❑ Méthode de détermination du graphe de la course du soleil (diagramme de la trajectoire solaire)
- ❑ Détermination expérimentale de la hauteur et de l'angle d'azimut d'un objet
- ❑ Relevé des heures de la journée et période de l'année pendant lesquelles le module solaire est à l'ombre.

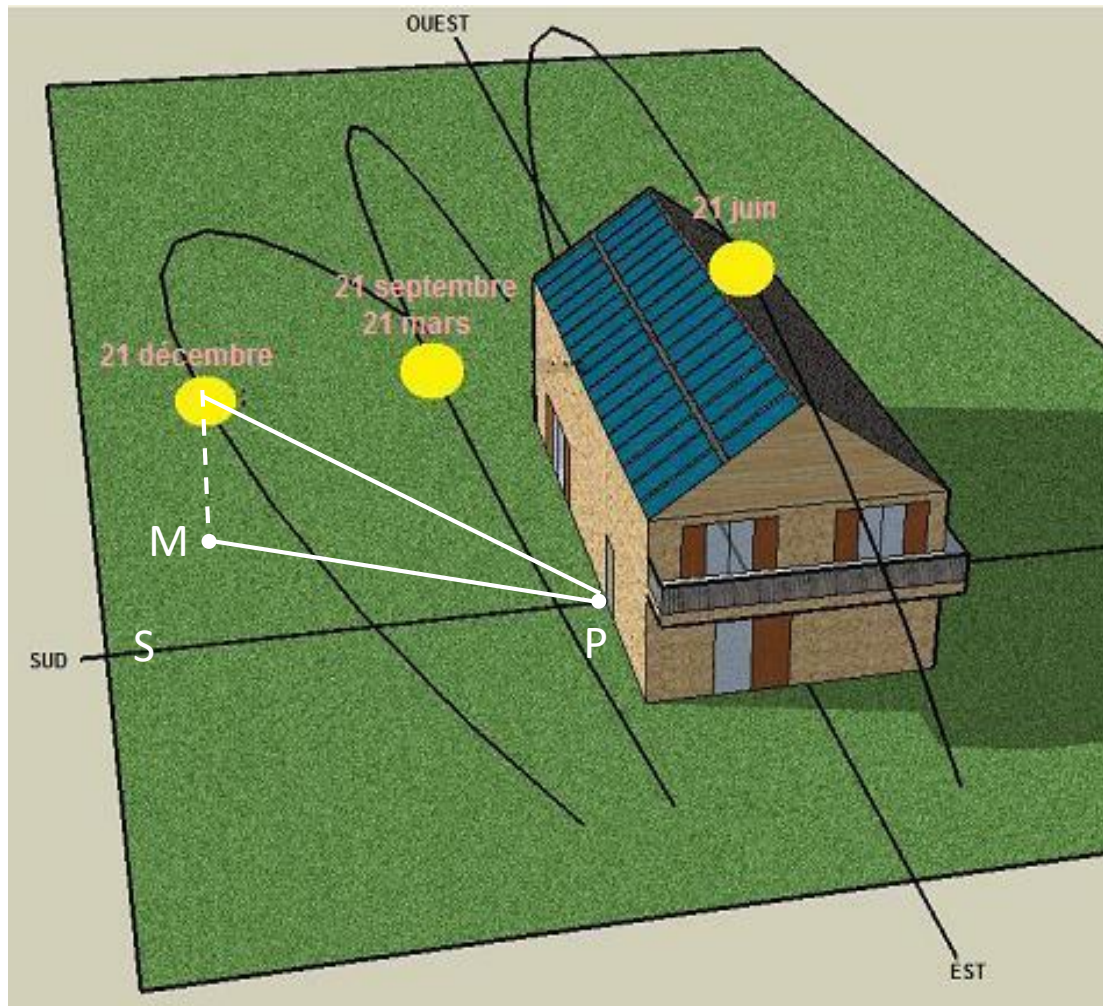


☐ Méthode de détermination du graphe de la course du soleil (diagramme de la trajectoire solaire).

- La position du soleil dans le ciel est entièrement déterminée par la mesure de l'azimut et la hauteur du soleil.



□ Azimut et hauteur du soleil



L'azimut représente l'angle entre la demi-droite [PS) et la demi-droite [PM).

La hauteur représente l'angle entre la demi-droite [PM) et la demi-droite partant du point P en direction du soleil dans le ciel .

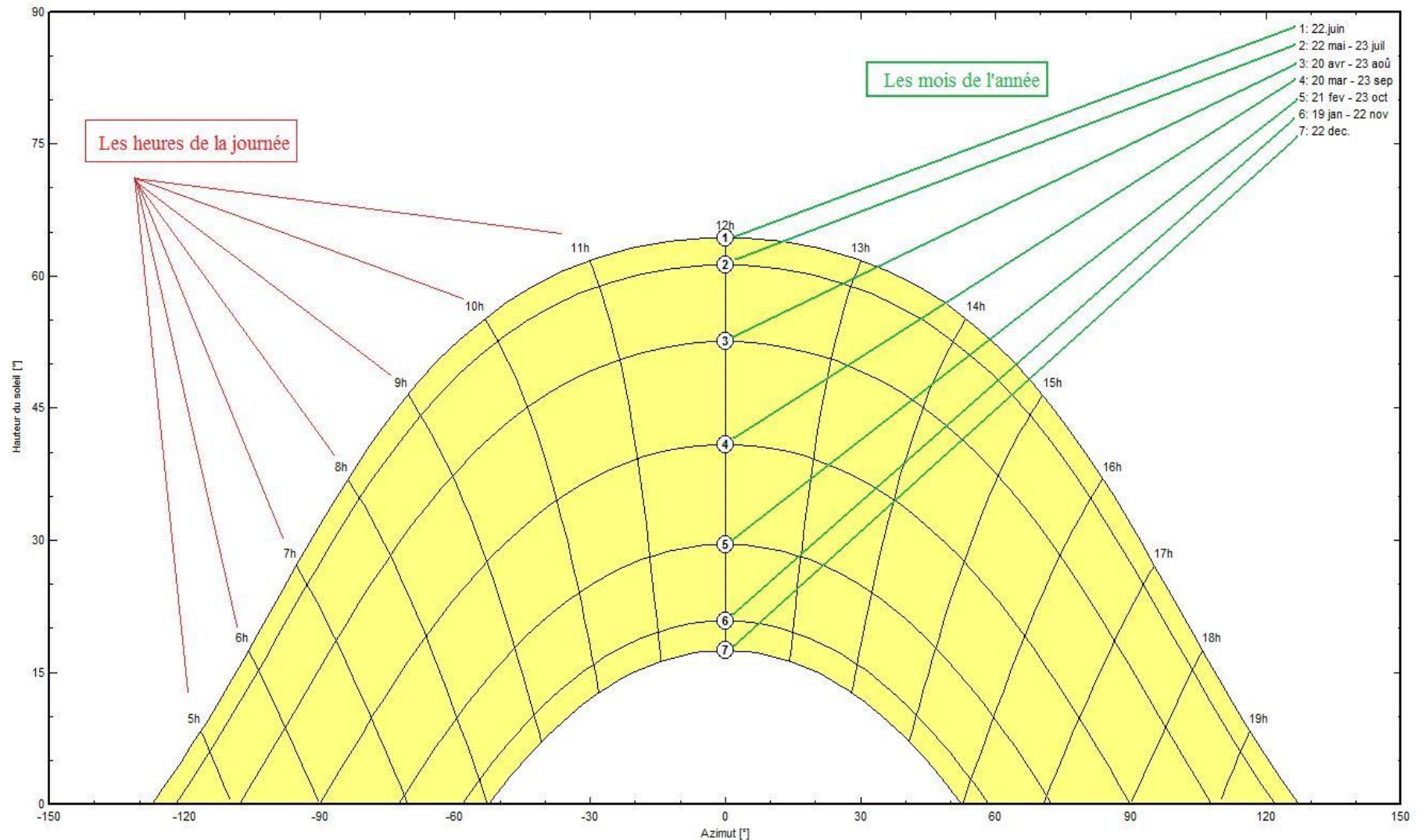
L'azimut et la hauteur s'expriment en °.

L'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul à midi et positif l'après-midi (direction Ouest).

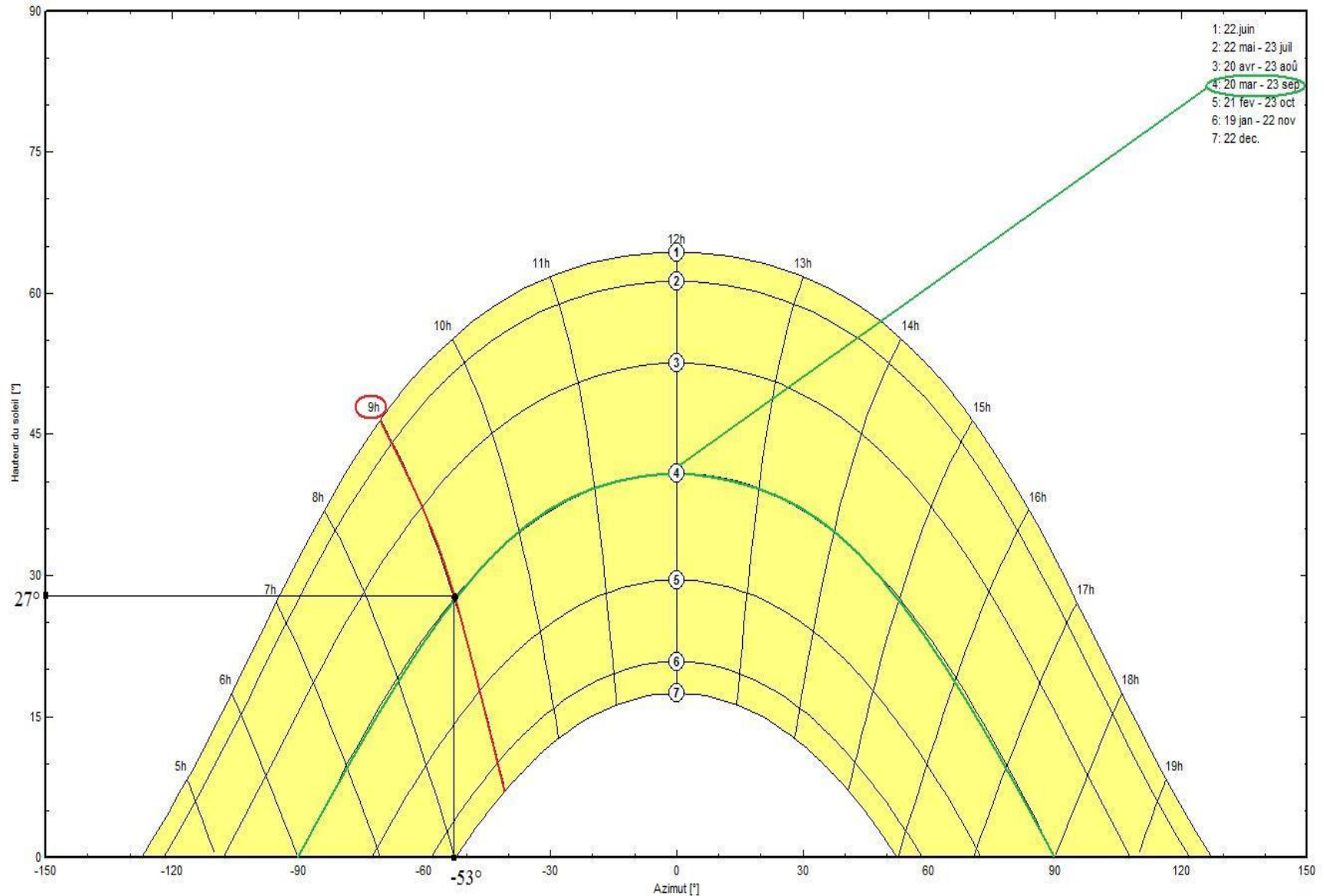
Graphe de la course du soleil (diagramme de la trajectoire solaire)

- Le graphe de la course du soleil représente la position du soleil dans le ciel à toute heure de la journée (de janvier à décembre).
- Ce graphe de la course du soleil s'obtient à partir des valeurs de l'azimut et de la hauteur correspondant à la position du soleil dans le ciel.
- Dans le graphe de la course du soleil, l'heure indiquée est l'heure solaire, et non-pas l'heure légale.
- Au Maroc, en été, l'heure légale est en avance d'une heure par rapport à l'heure solaire.

Exemple : Graphe de la course du soleil à Paris



Exemple : Déterminer la position du soleil le 20 mars à 9 heures

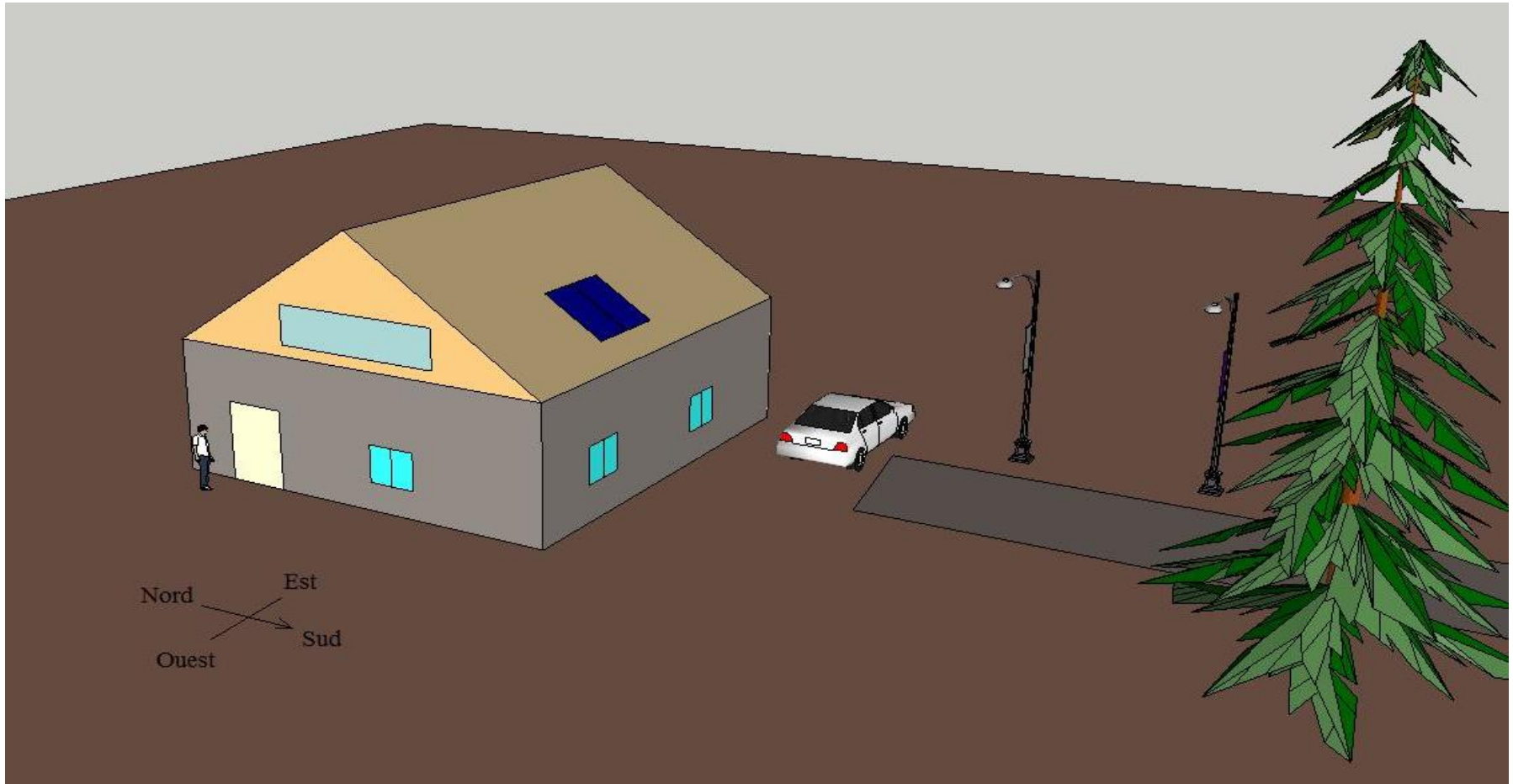


L'azimut du soleil est donc de -53° et sa hauteur est de 27° .

Détermination expérimentale de la hauteur et de l'angle d'azimut d'un objet

- Afin d'évaluer les pertes induites par les ombrages, Il est nécessaire d'effectuer un relevé de ces ombrages en déterminant les heures de la journée et la période de l'année pendant lesquelles le module solaire est à l'ombre.
- Ce relevé se réalise en notant pour chaque obstacle (objet), son azimut ainsi que sa hauteur.
- L'azimut et la hauteur sont ensuite reportés sur le graphe de la course du soleil.

Exemple comment reporter les obstacles sur le graphe de la course du soleil.



On veut savoir à quelles périodes de l'année et de la journée les deux objets (arbre + lampadaires) vont faire de l'ombre aux modules solaires photovoltaïques placés sur la toiture de la maison.

Les outils nécessaires pour réaliser cette étape

- Une boussole, qui va permettre de mesurer l'azimut d'un point.
- Un clinomètre (inclinomètre), qui est un appareil destiné à mesurer les angles par rapport à la ligne horizontale.

Ce clinomètre va permettre donc de mesure la hauteur d'un point.

- Ce relevé doit se faire au niveau des modules photovoltaïques. Il faut donc monter sur le toit à l'endroit où les modules photovoltaïques vont être posés.



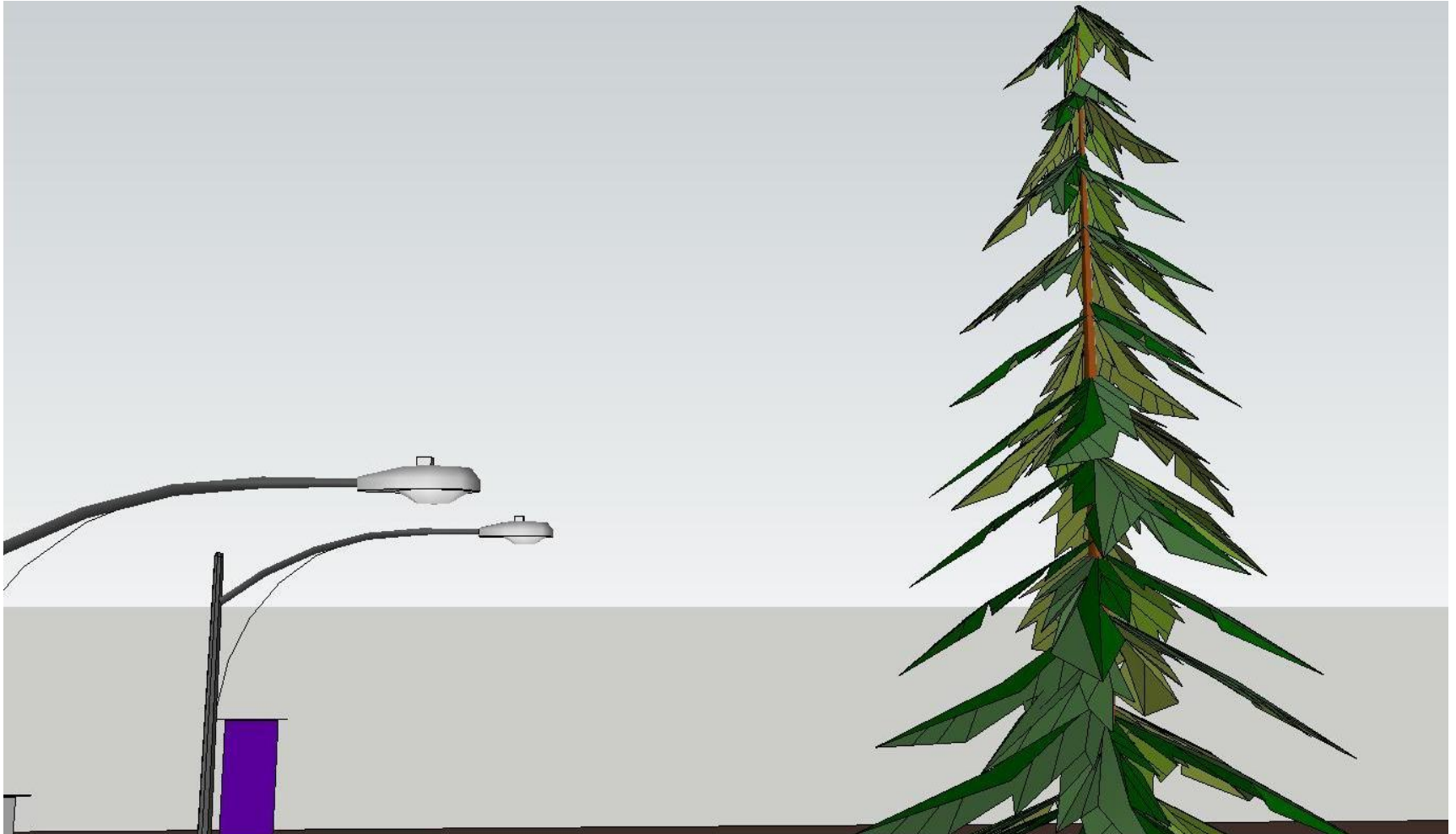
Position pour réaliser les mesures

Une fois qu'on se situe au point où les modules photovoltaïques vont être posés, on se place face au sud (Utilisation de la boussole).



Position pour réaliser les mesures

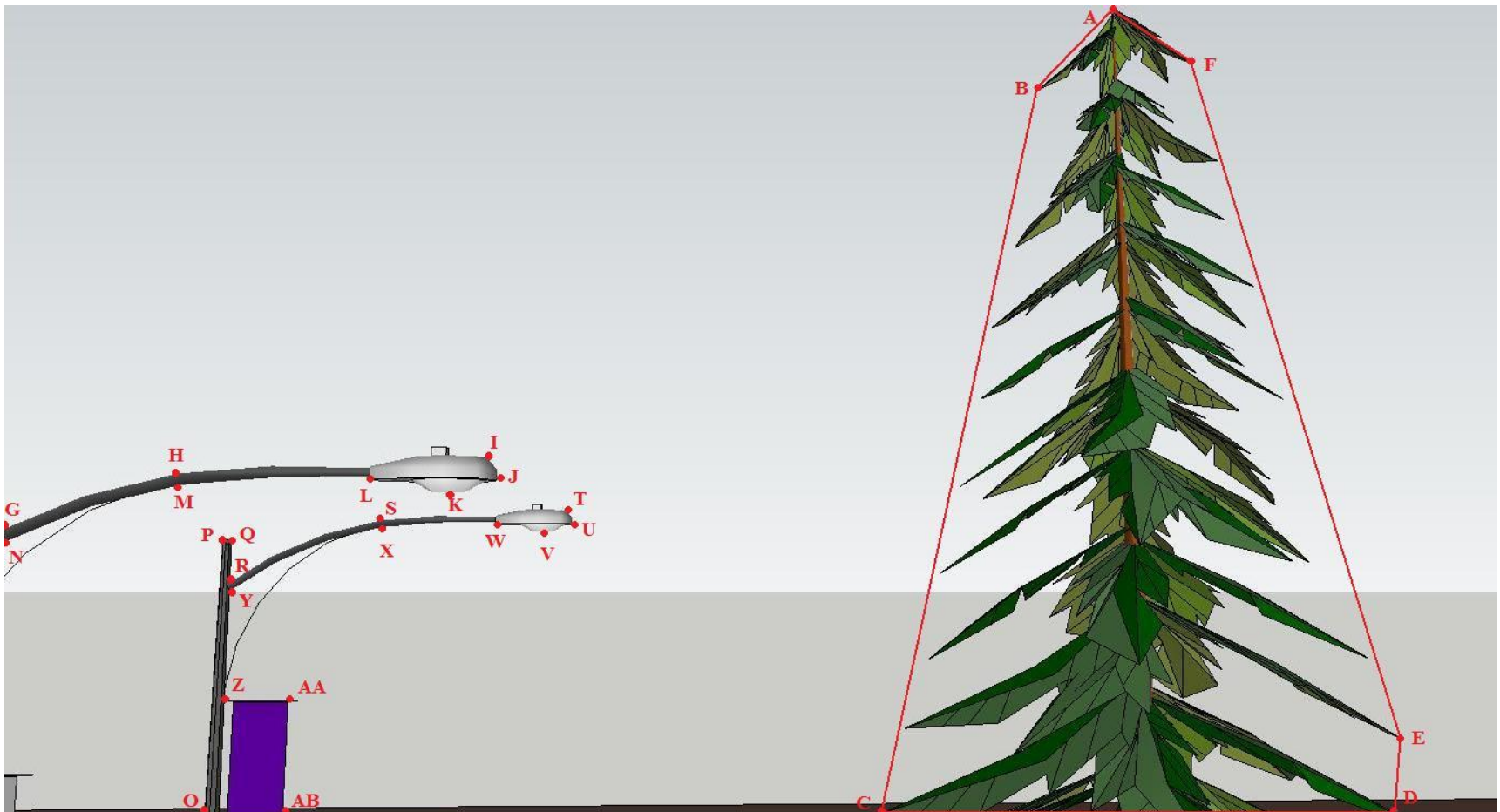
Depuis cette position, voici ce qu'on pourrait voir :



Points caractéristiques de la géométrie des obstacles

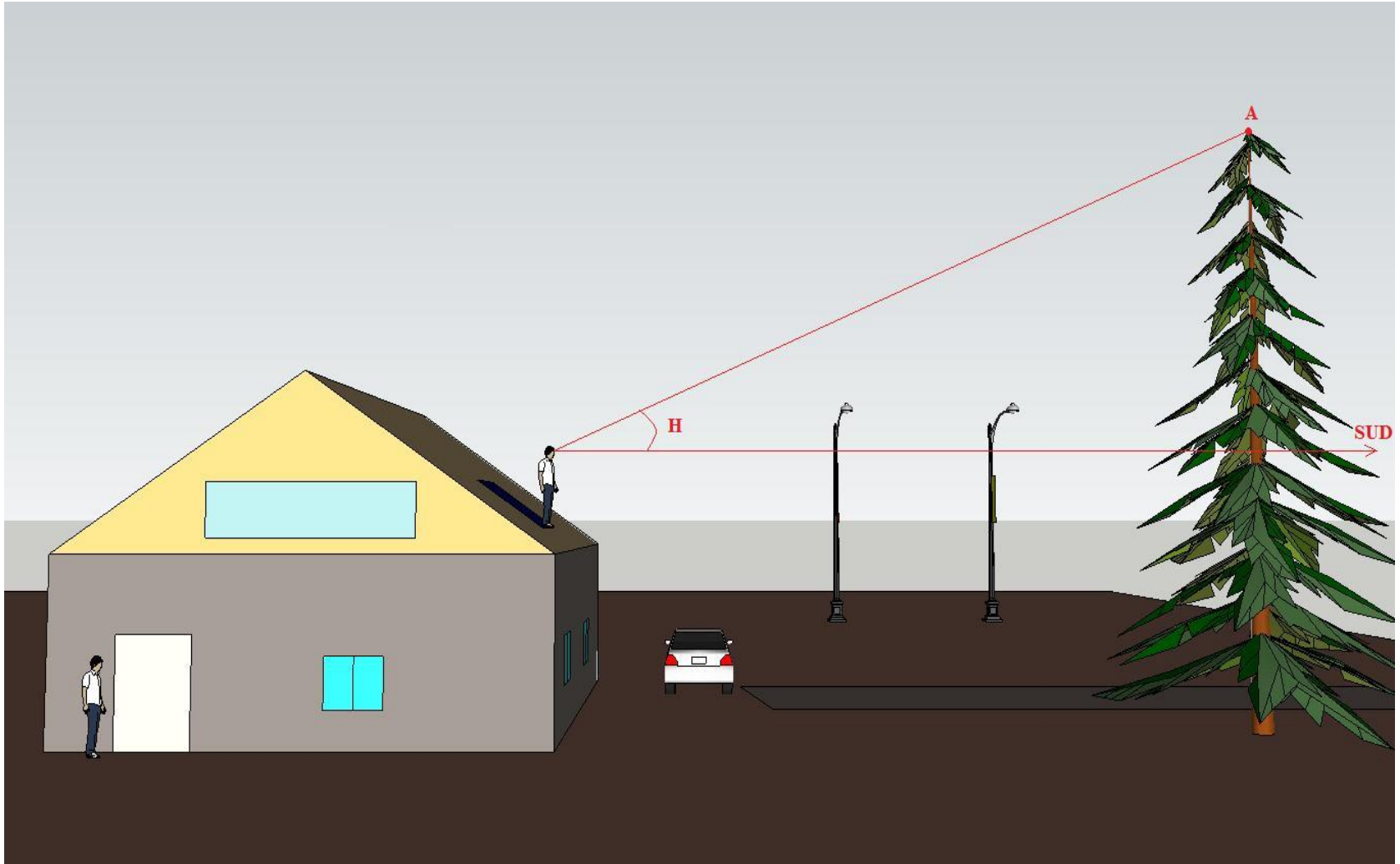
Par exemple, pour l'arbre, on peut définir 6 points caractéristiques de sa géométrie.

De même pour les lampadaires, on définit des points caractéristiques de leur géométrie.



Report des points caractéristiques sur le graphe de la course solaire

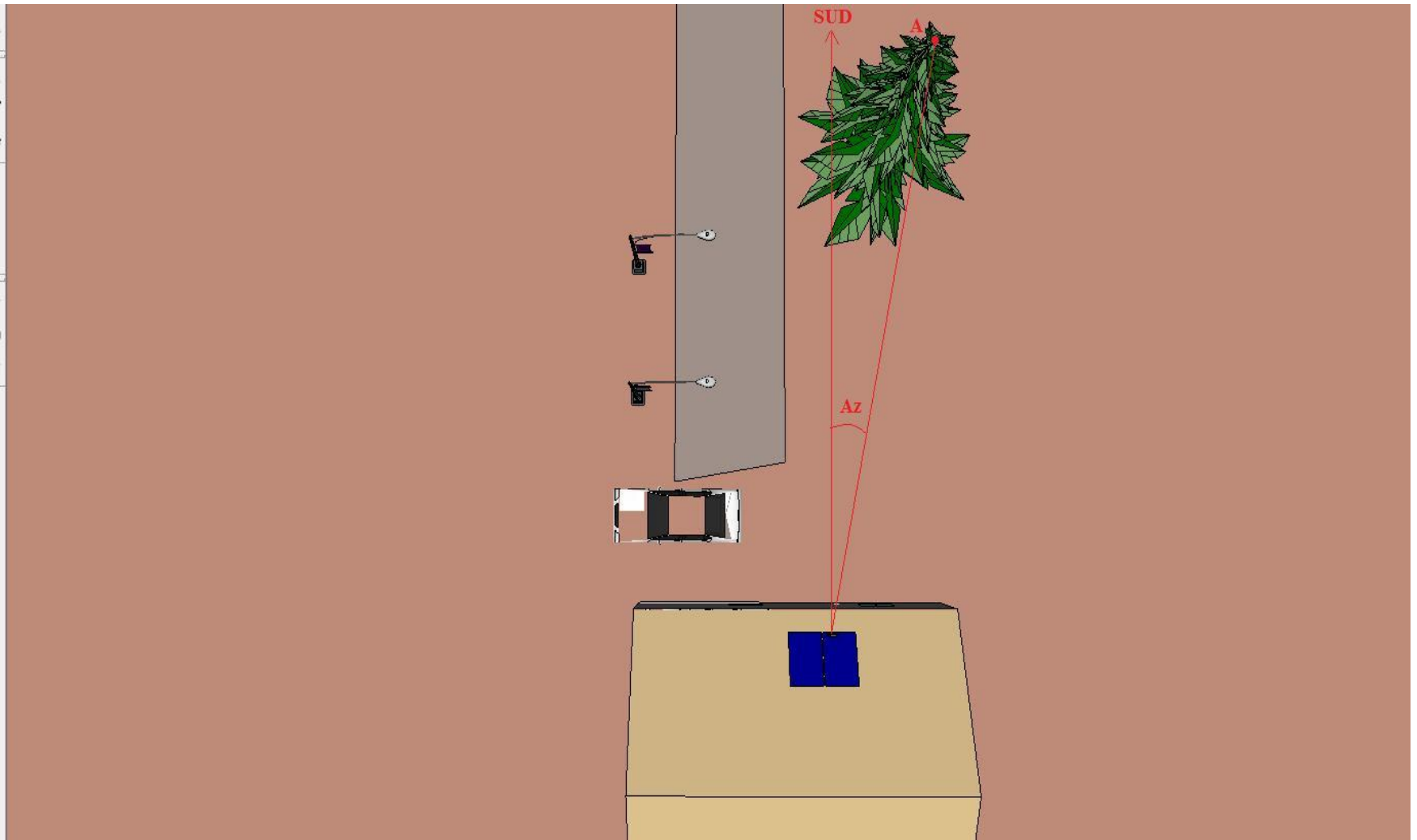
La suite consiste à reporter ces points sur le graphe de la course solaire. On mesure l'azimut avec la boussole et la hauteur avec le clinomètre.



Par exemple, la hauteur du point A est l'angle noté H.



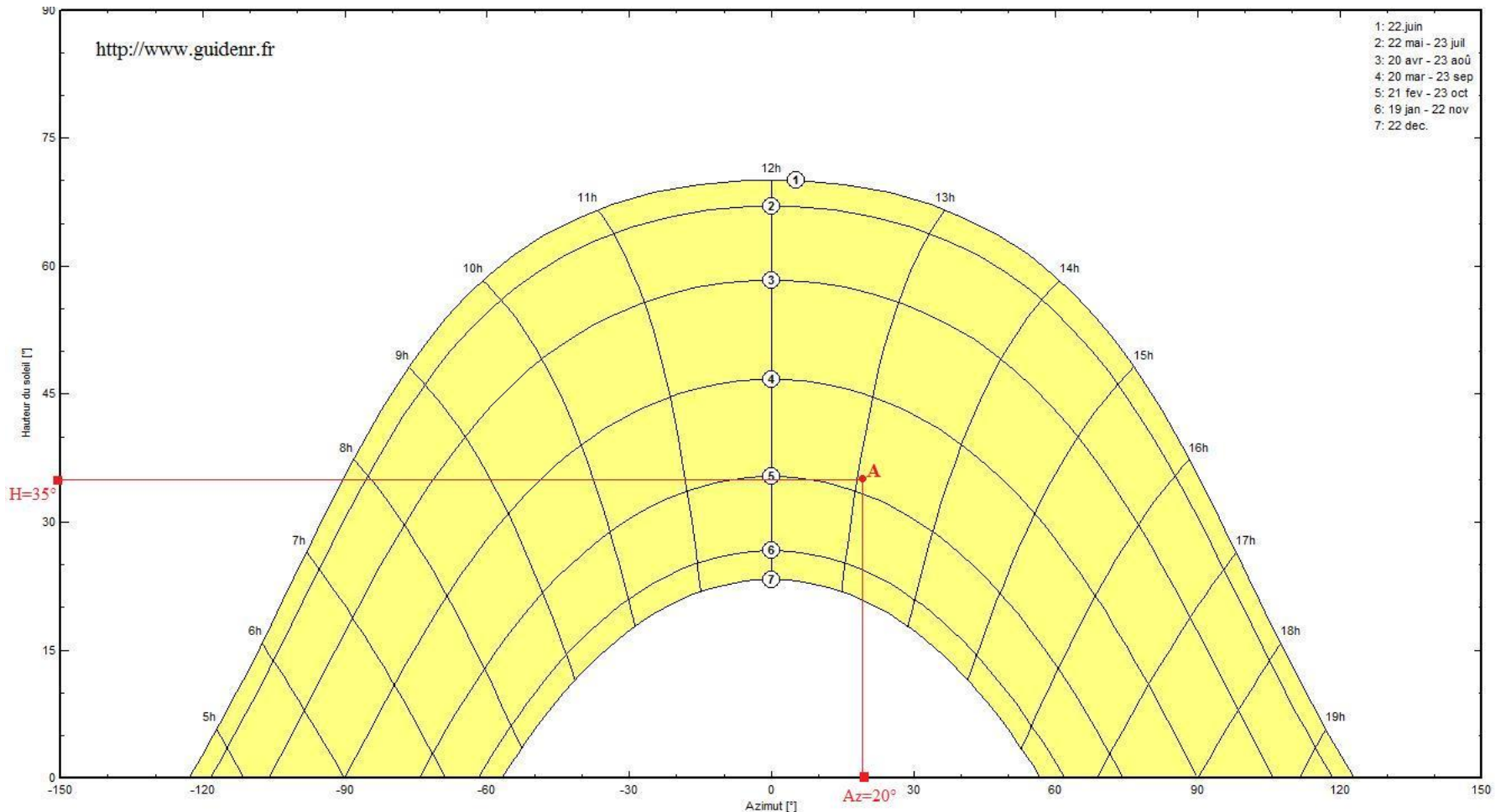
Report des points caractéristiques sur le graphe de la course solaire



L'azimut du point A est l'angle noté A_z .

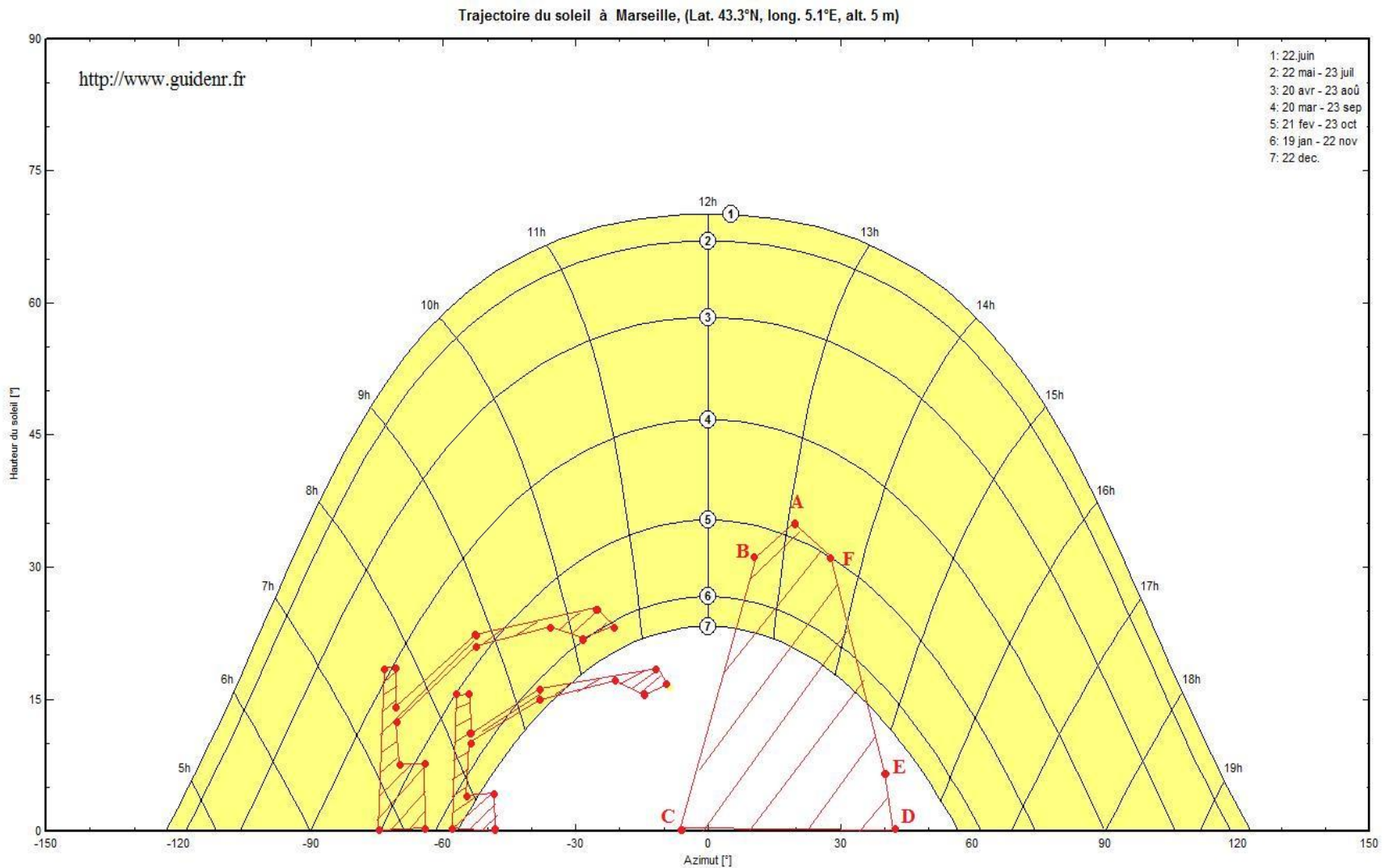
Report des points caractéristiques sur le graphe de la course solaire

La mesure de l'azimut et de la hauteur est à effectuer pour tous les points définis précédemment. Ensuite, il suffit de reporter les points sur le graphe de la course du soleil. Exemple : $A_z=20^\circ$ et $H = 35^\circ$.



Report des points caractéristiques sur le graphe de la course solaire

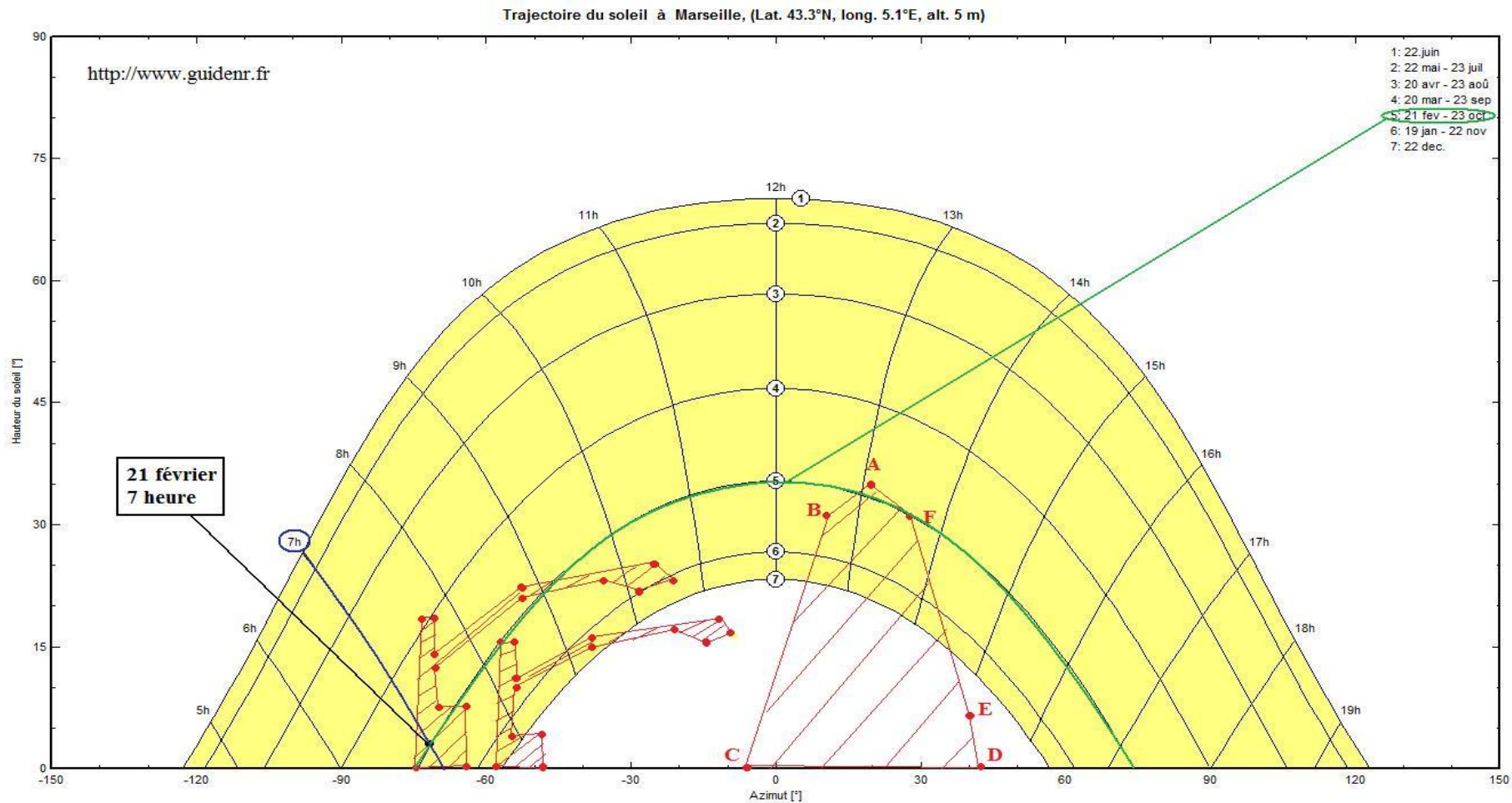
On reporte ensuite tous les autres points sur le graphe de la course du soleil :



Report des points caractéristiques sur le graphe de la course solaire

L'intersection entre la zone hachurée (en rouge) et la course du soleil correspond aux périodes pendant lesquelles les modules sont à l'ombre.

Exemple : Le 21 février à 7 heure (heure solaire), les modules seront à l'ombre, car à cet instant, le soleil est dans la zone rouge hachurée :

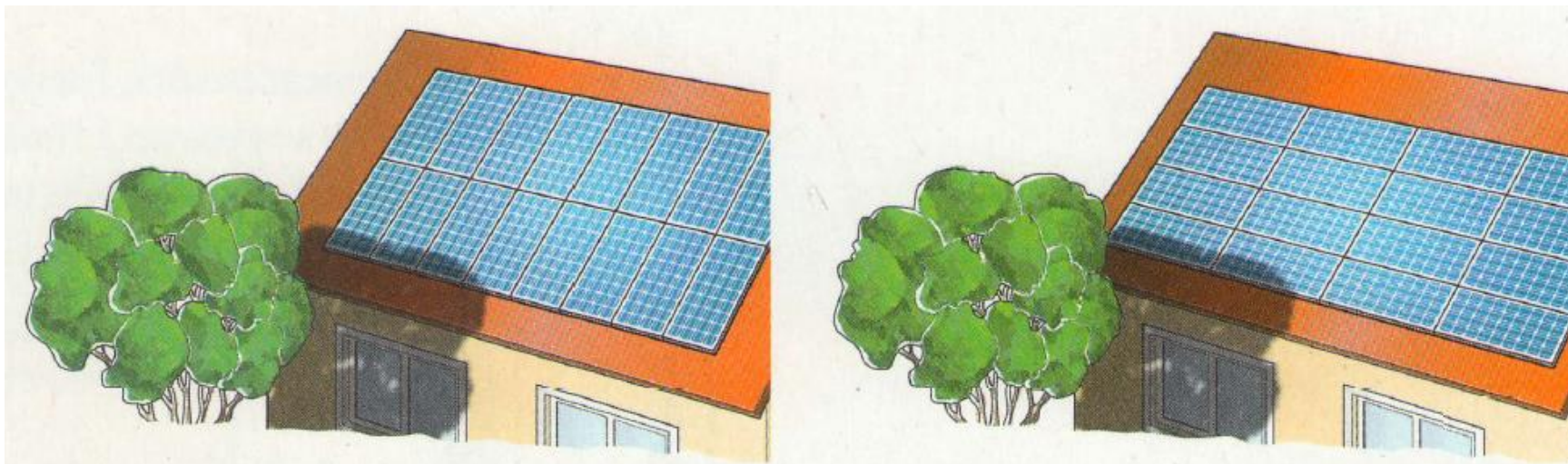


Prise en compte de l'ombrage lors de la conception de l'installation

L'effet des ombres d'une installation PV dépend des facteurs suivants :

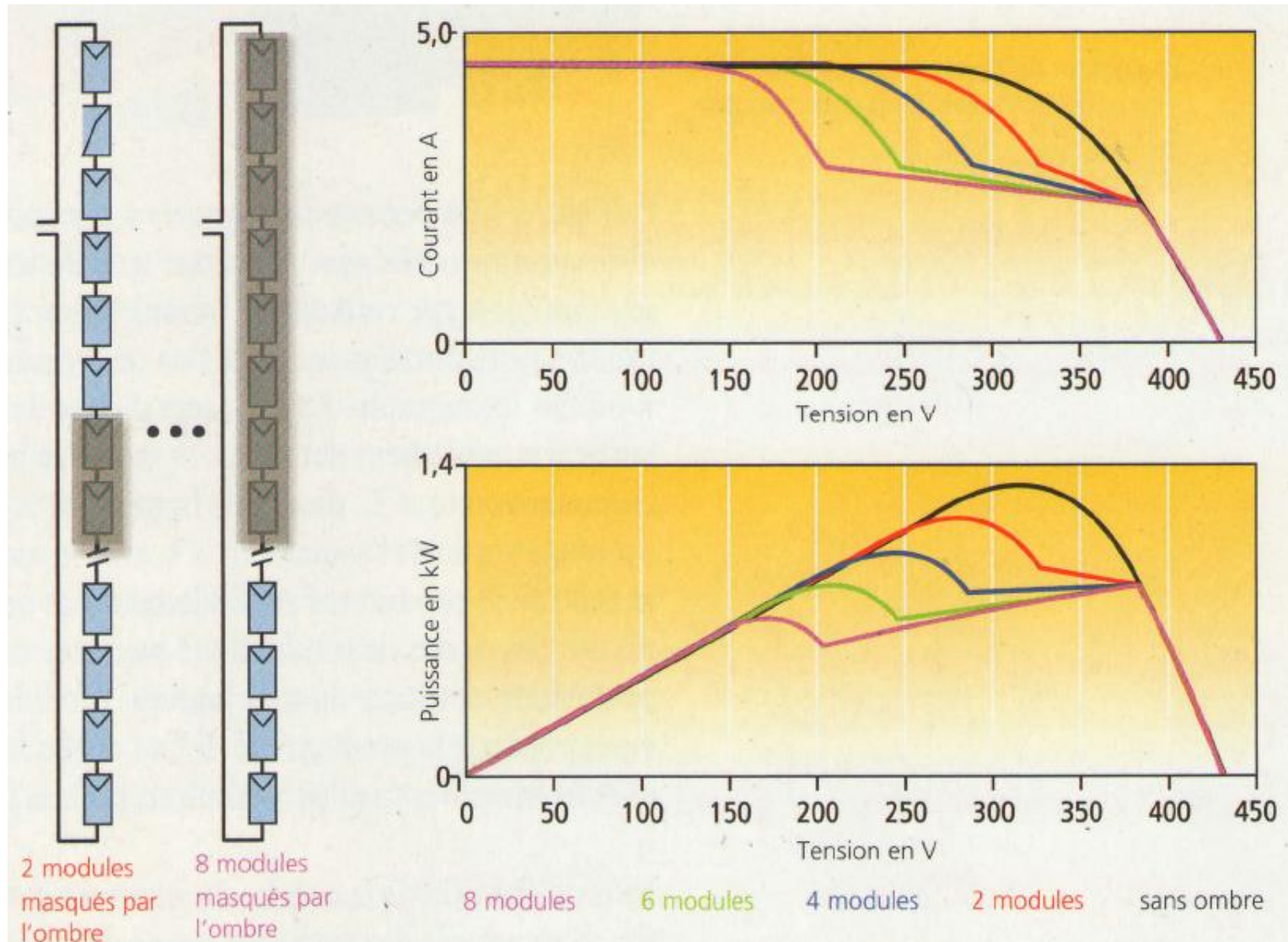
- Le nombre de modules masqués par l'ombre,
- L'interconnexion des cellules et des diodes de bypass,
- Le degré d'ombrage,
- La répartition dans l'espace et l'évolution dans le temps de l'ombrage,
- La connexion du générateur,
- La conception des onduleurs.

Ombrage sur un montage vertical/horizontal des modules

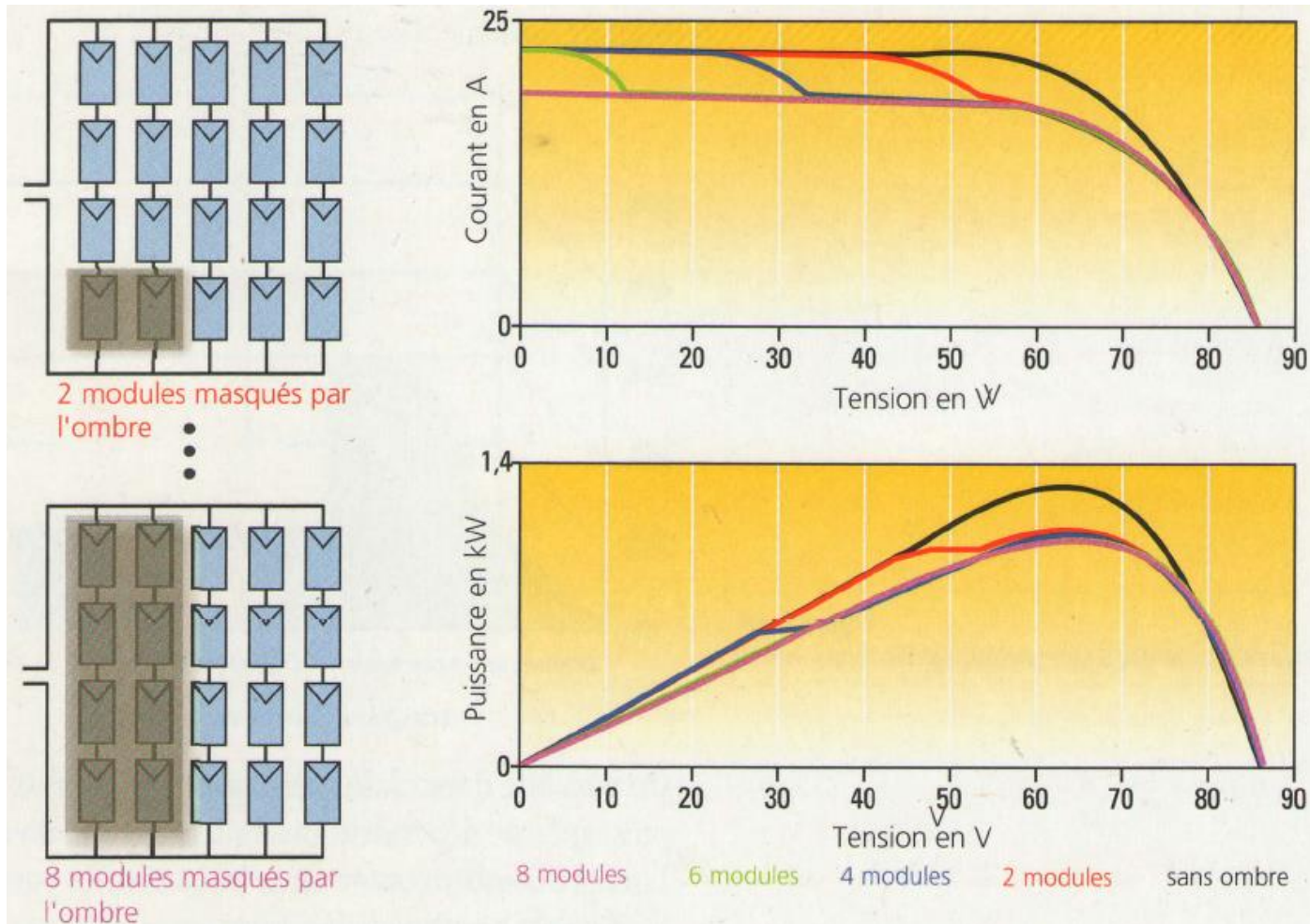


- **Montage vertical** : les cellules de 4 modules sont masquées par l'ombre.
- **Montage horizontal** : les cellules uniquement de 2 modules sont masquées par l'ombre

Ombrage dans le cas de branchement en série des modules

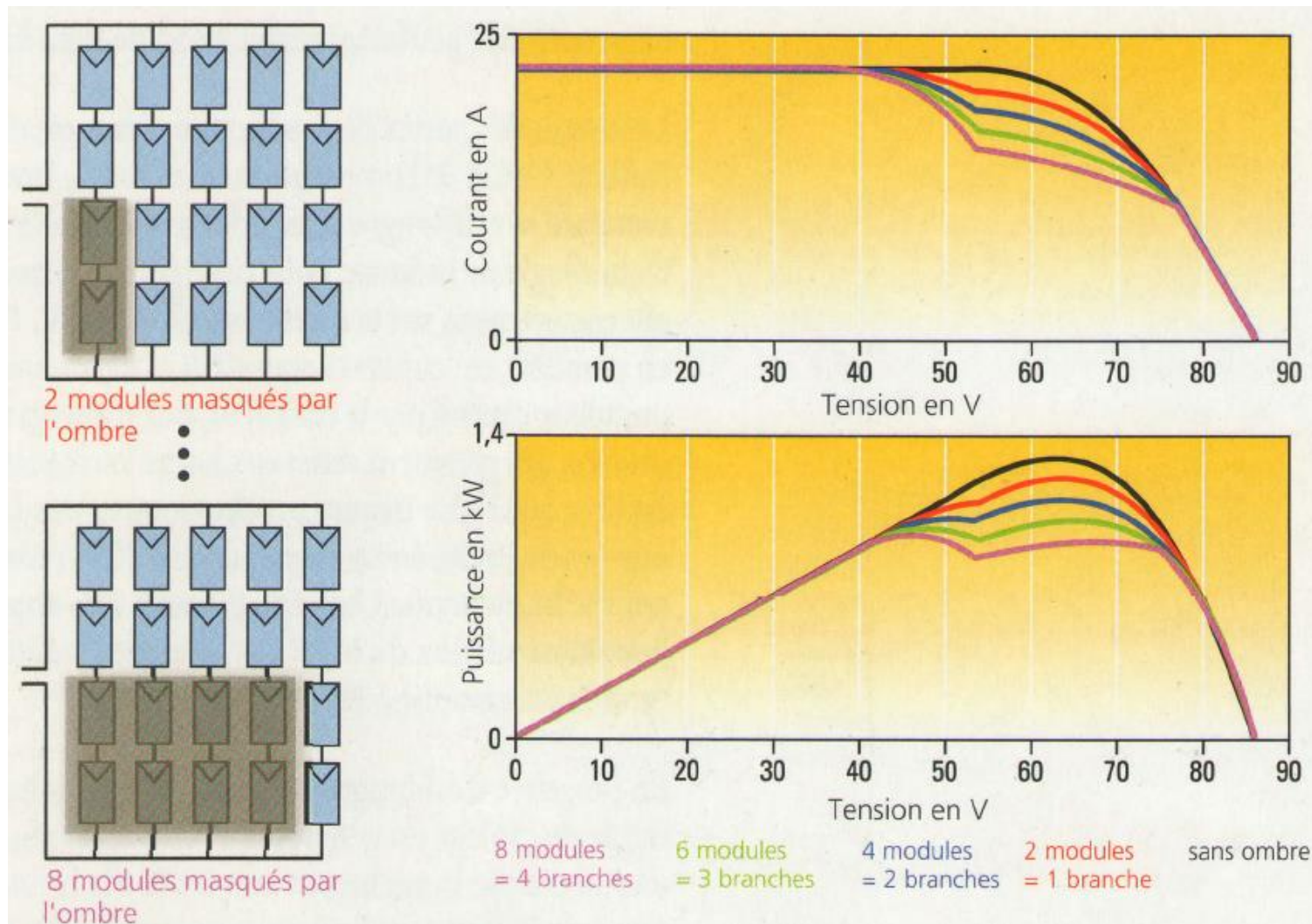


Ombrage dans le cas de branchement en parallèle des modules



Etude en fonction du nombre de modules masqués dans les mêmes branches

Ombrage dans le cas de branchement en parallèle des modules



Etude en fonction du nombre de branches affecté par l'ombre₃₉

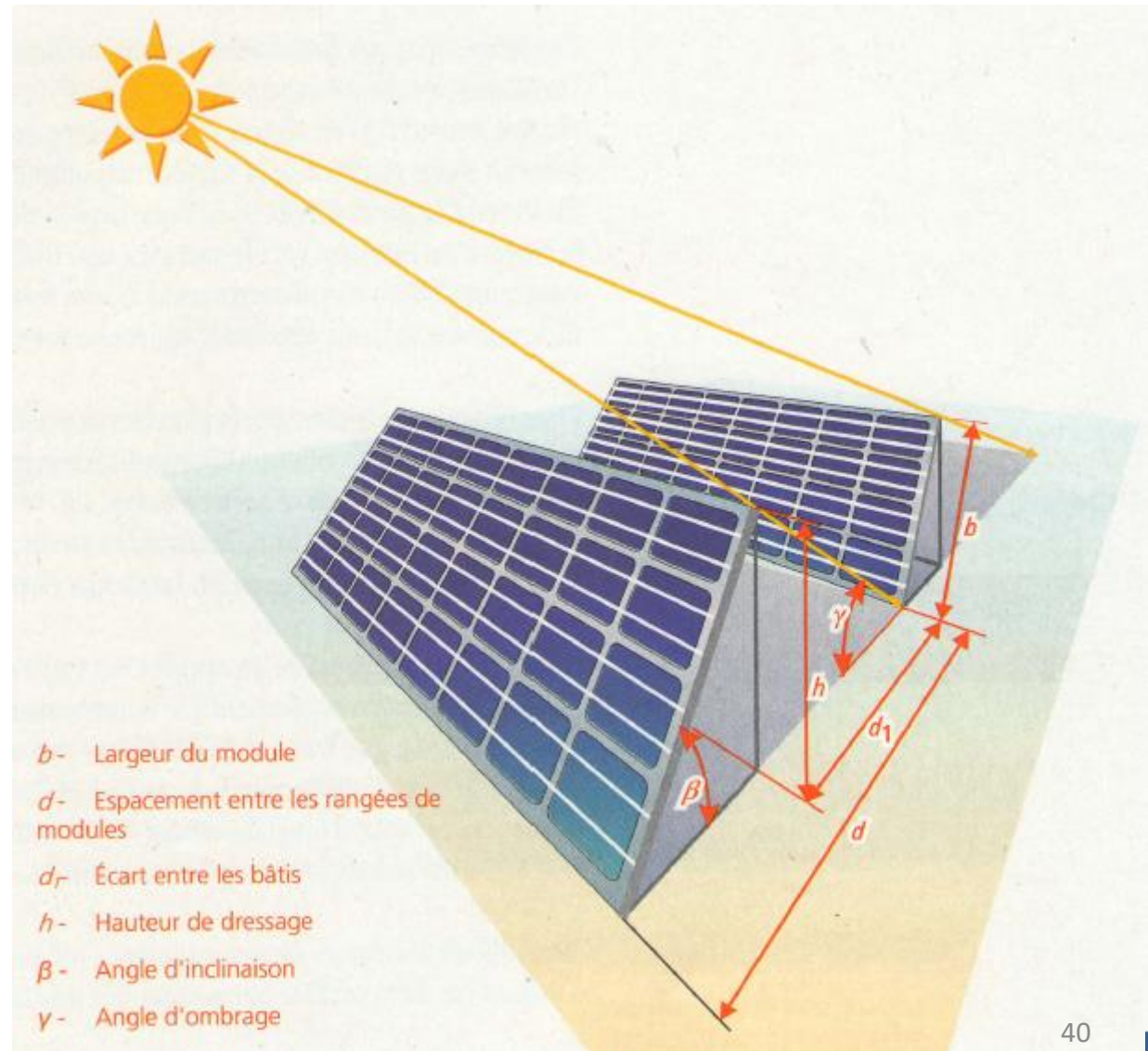
Ombrage dans le cas des installations solaires montées sur châssis

L'angle d'inclinaison choisi est en général compris entre 15° et 30°.

Le taux d'utilisation de la surface

$$f = \frac{b}{d}$$

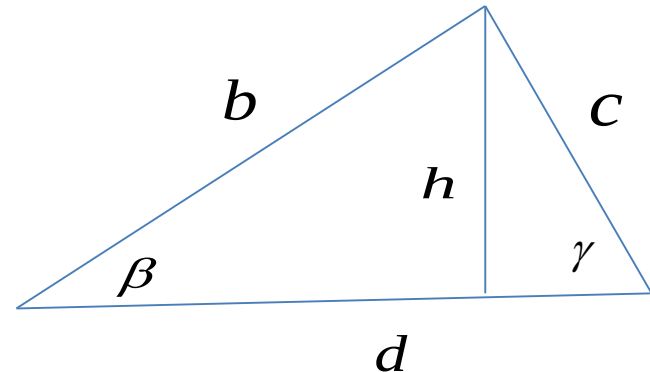
se situe entre 30 % et 45 %.



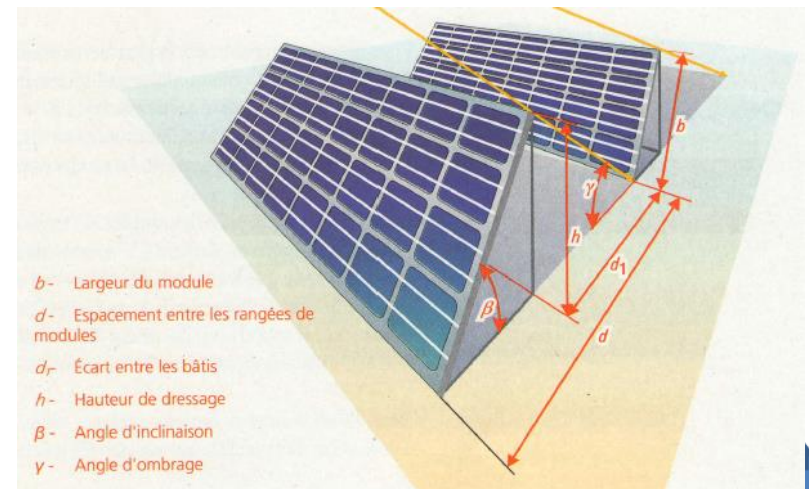
Ombrage dans le cas des installations solaires montées sur châssis

L'espacement entre les rangées des modules dépend de la largeur des module ainsi que de l'angle d'inclinaison et de l'ombrage (relation des sinus dans un triangle quelconque):

$$\frac{d}{\sin(\pi - \beta - \gamma)} = \frac{b}{\sin \gamma} = \frac{c}{\sin \beta}$$



$$d = b \frac{\sin(\pi - \beta - \gamma)}{\sin \gamma}$$



Ombrage dans le cas des installations solaires montées sur châssis

Comme le montre le tableau suivant, la situation optimale est obtenue avec un faible taux d'utilisation de la surface dans la plage des angles d'inclinaison les plus élevés. Par contre, dans le cas des taux d'utilisation de la surface plus élevés, cette situation optimale se décale vers une inclinaison plus faible des modules, car l'influence de l'ombrage augmente de manière exponentielle.

		Taux d'utilisation de la surface f en pour cent											
		0 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %	80 %
Inclinaison du module β	10,0°	7,6 %	7,9 %	8,0 %	8,1 %	8,3 %	8,6 %	9,0 %	9,7 %	10,9 %	12,2 %	13,9 %	16,0 %
	12,5°	6,3 %	6,8 %	7,0 %	7,2 %	7,5 %	8,0 %	9,0 %	10,3 %	11,7 %	13,4 %	15,6 %	18,3 %
	15,0°	5,0 %	5,7 %	6,0 %	6,3 %	7,0 %	8,0 %	9,5 %	10,9 %	12,6 %	14,7 %	17,1 %	20,6 %
	17,5°	3,9 %	5,0 %	5,4 %	6,0 %	7,0 %	8,6 %	10,2 %	11,9 %	13,9 %	16,2 %	19,2 %	23,3 %
	20,0°	3,0 %	4,4 %	4,9 %	5,8 %	7,4 %	9,2 %	10,9 %	12,9 %	15,1 %	17,7 %	21,1 %	25,6 %
	22,5°	2,1 %	4,0 %	4,8 %	6,3 %	8,1 %	9,9 %	12,0 %	14,2 %	16,7 %	19,6 %	23,5 %	28,1 %
	25,0°	1,4 %	3,8 %	4,9 %	6,8 %	8,9 %	10,8 %	13,1 %	15,4 %	18,0 %	21,3 %	25,4 %	30,2 %
	27,5°	0,9 %	4,0 %	5,4 %	7,7 %	9,8 %	11,9 %	14,4 %	16,9 %	19,8 %	23,3 %	27,4 %	32,5 %
	30,0°	0,4 %	4,0 %	6,1 %	8,5 %	10,7 %	13,2 %	15,5 %	18,4 %	21,2 %	25,1 %	29,2 %	34,4 %
	32,5°	0,1 %	4,5 %	7,1 %	9,6 %	11,9 %	14,6 %	17,2 %	20,0 %	23,0 %	27,1 %	31,2 %	36,4 %
	35,0°	0,0 %	5,3 %	8,1 %	10,6 %	13,1 %	15,9 %	18,6 %	21,4 %	24,7 %	28,9 %	32,9 %	38,1 %

Pertes liées à l'ombrage au Nord de l'Allemagne.

Fin du chapitre I