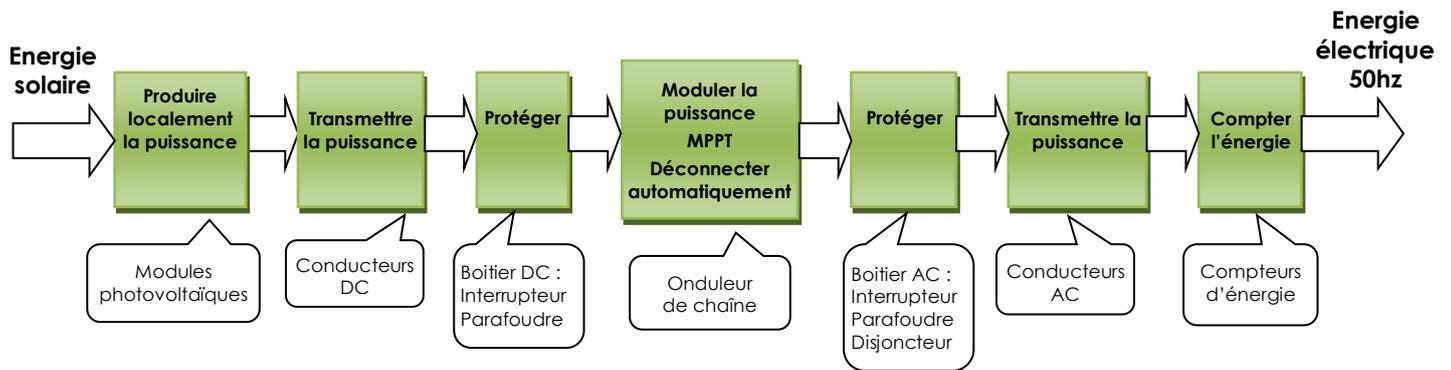
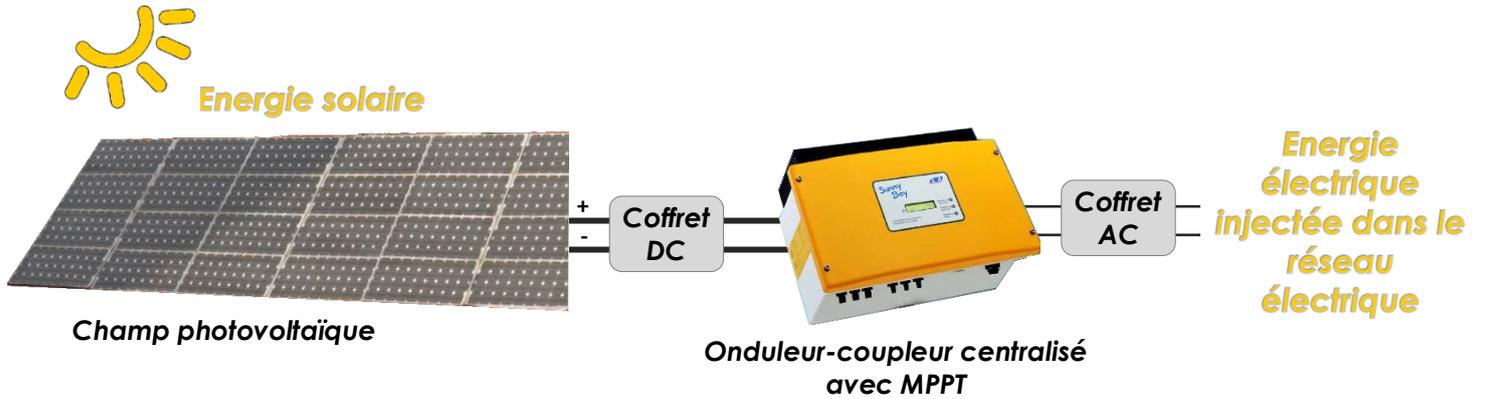


La réduction de l'impact environnemental de la consommation électrique d'un bâtiment peut être assurée en partie par la production d'électricité photovoltaïque la plus importante possible (et avec le maximum d'efficacité) par rapport à la consommation intrinsèque du bâtiment.

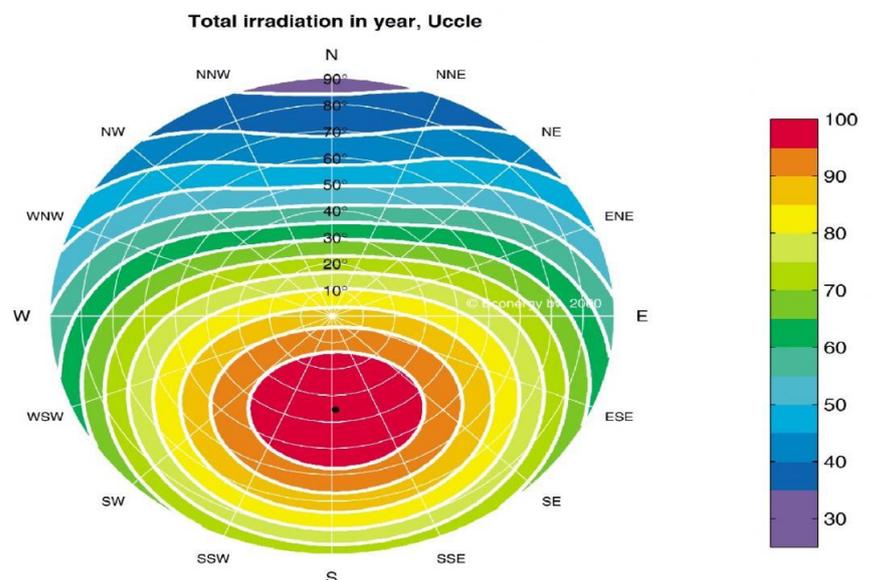
## A/ Chaîne d'énergie des installations photovoltaïques avec onduleur de chaîne (onduleur-coupleur MPPT centralisé) raccordé au réseau



## B/ Placement du champ photovoltaïque associé à un onduleur de chaîne

Pour atteindre l'objectif de réduction maximale de consommation électrique du bâtiment avec un impact environnemental minimal, il faut :

- Disposer d'un **nombre suffisant de panneaux photovoltaïques** pour une production électrique se rapprochant le plus possible de la consommation électrique intrinsèque du bâtiment.
- Positionner le champ photovoltaïque de préférence au **sud** avec un **angle de 30°** environ (pour Dijon) pour une production maximale sans contrainte de surface (cas de l'installation Phébus).



Exemple d'irradiation solaire annuelle en fonction de l'inclinaison et de l'orientation.

- Positionner le champ photovoltaïque avec un **angle de 5°** environ **sans contrainte d'orientation** pour une production maximale sur une surface limitée de toiture plate (cas de l'installation de la tour Elithis).
- Positionner les panneaux avec une **orientation et/ou une inclinaison sensiblement identique** pour chaque panneau d'un string en entrée de l'onduleur de chaîne (pour une bonne recherche de point de fonctionnement maximal des panneaux).
- Veiller à une **bonne ventilation des modules PV** pour réduire les pertes d'énergie.
- Placer le champ photovoltaïque dans un **environnement sans masque solaire** (au minimum en face).

La présence d'un masque solaire limite la production photovoltaïque (cas de l'installation Phébus).

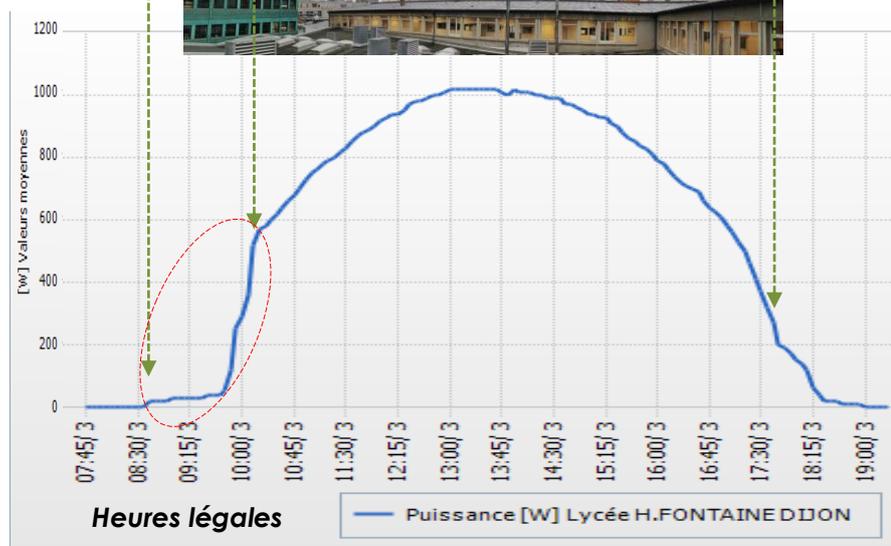
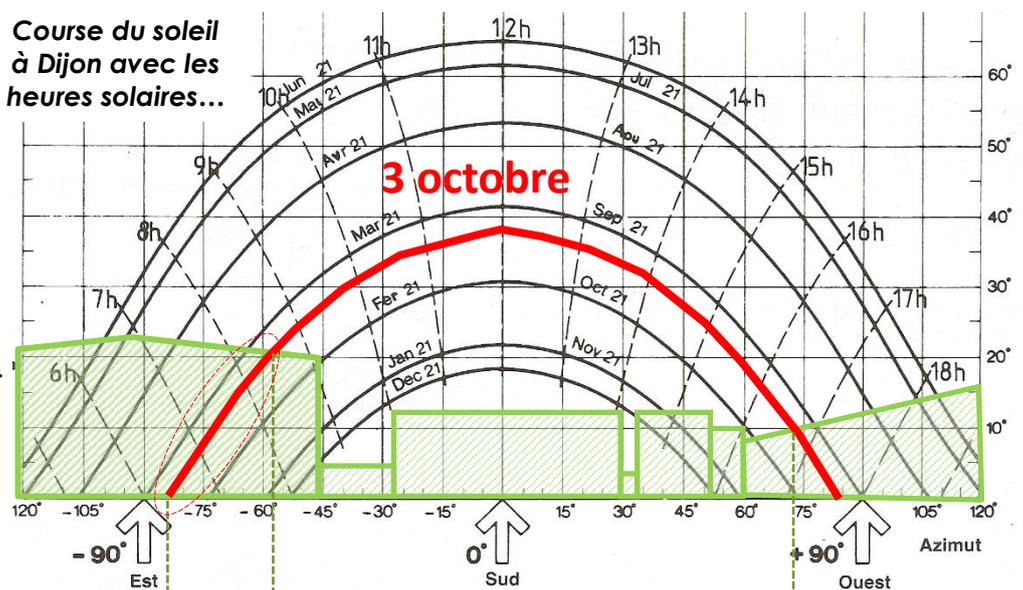


### Course du soleil à Dijon avec les heures solaires...

L'heure appliquée le 3 octobre en Europe est l'heure d'été.

A Dijon, il y a, à cette période, 1h40 de décalage entre l'heure légale et l'heure solaire.

$$\begin{aligned} \text{Heure}_{\text{légale de fin de masque}} &= \text{Heure}_{\text{solaire}} + 1\text{h}40 \\ &= 8\text{h}30 + 1\text{h}40 \\ &= 10\text{h}10 \end{aligned}$$



Les pertes engendrées par le masque solaire de l'installation Phébus sont de 5,3%.

Les pertes sont faibles car le masque solaire n'intervient qu'en début et en fin de production, moments où la puissance qui serait produite est faible.

Un panneau photovoltaïque moins éclairé que les autres (en raison d'un masque solaire, avec des salissures, couvert de feuilles...) ou un panneau avec des cellules hors service réduit nettement la production électrique de l'ensemble de la chaîne de panneaux photovoltaïques auquel il appartient !

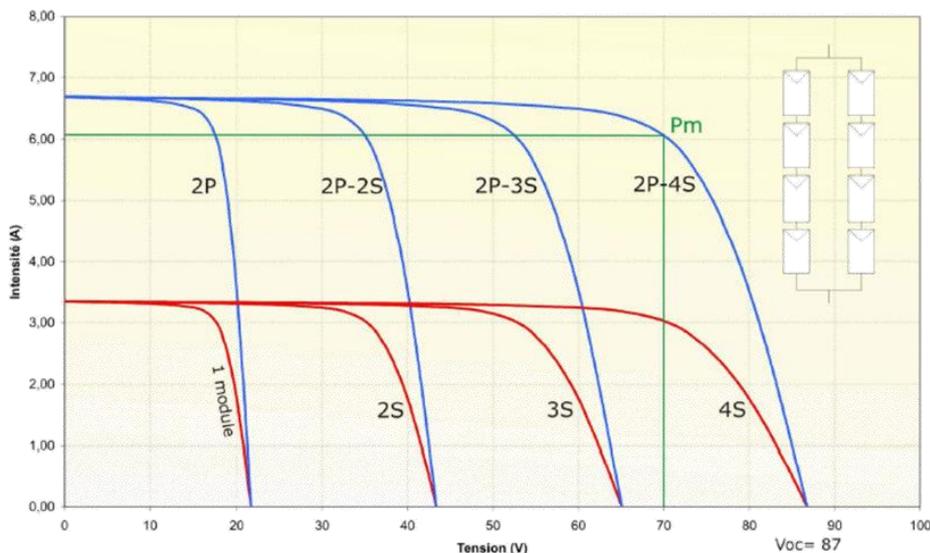
## C/ Câblage du champ photovoltaïque pour être compatible avec l'onduleur de chaîne

Le champ photovoltaïque est composé de plusieurs chaînes de modules photovoltaïques (panneaux câblés électriquement en série). De plus, il est parfois nécessaire de câbler des panneaux photovoltaïques en dérivation (même nombre de panneaux photovoltaïques dans chaque branche).

Pour une conversion DC/AC efficace de l'onduleur de chaîne (réduction du temps de retour énergétique de l'installation photovoltaïque), il faut :

- Une **puissance crête totale des panneaux photovoltaïques compatible** avec la puissance nominale DC de l'onduleur de chaîne (léger sous-dimensionnement possible de l'onduleur, utilisation de plusieurs onduleurs si besoin).

$$P_{DC \text{ max onduleur}} = 0,8 \text{ à } 1x P_{DC \text{ totale panneaux}}$$

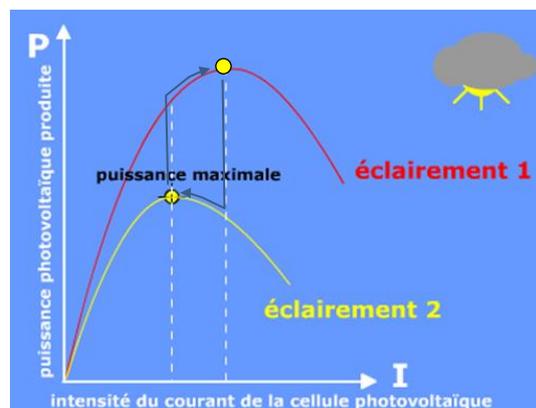
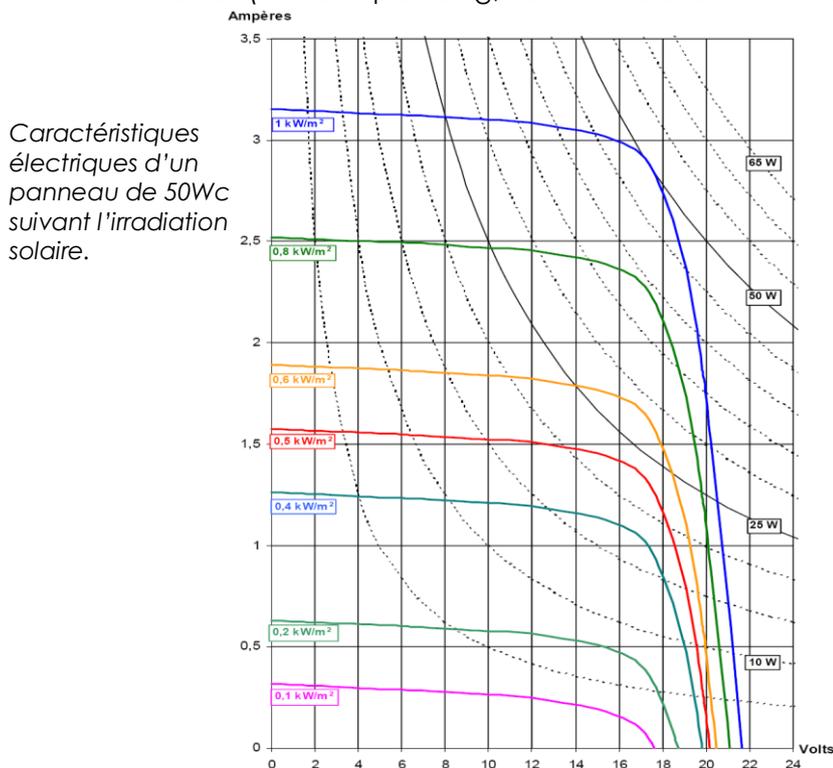


- Un **câblage électrique des panneaux photovoltaïques compatible** en tension DC et courant DC en entrée de l'onduleur pour un bon fonctionnement de la conversion DC/AC.

**Tension à vide totale dans les conditions les plus défavorables < UDC max onduleur**

**UMPP min. onduleur < Tension totale en fonctionnement < UMPP max. onduleur**

- Si possible, une **connexion de chaque string** (chaîne de panneaux) directement aux différents strings d'entrée de l'onduleur de chaîne si celui-ci dispose d'une gestion séparée de la puissance DC sur chacun d'eux (un MPPT par string, MPPT = Maximum Power Point Tracking).



Pour s'assurer que les cellules produisent leur puissance maximale, l'onduleur de chaîne impose ce point de fonctionnement optimal en contrôlant l'intensité du courant DC demandé aux panneaux photovoltaïques (fonction MPPT = Maximum Power Point Tracking).

- Un onduleur de chaîne avec un bon **rendement de conversion**. Le rendement euro est environ de 96,5% pour des onduleurs de quelques kW et de 98% pour des onduleurs de plusieurs dizaines de kW.

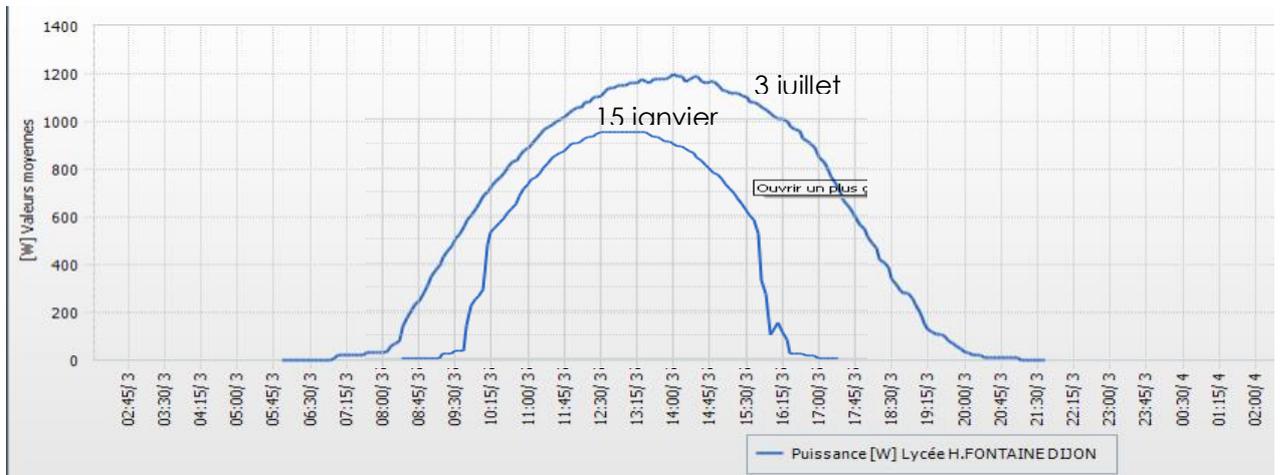
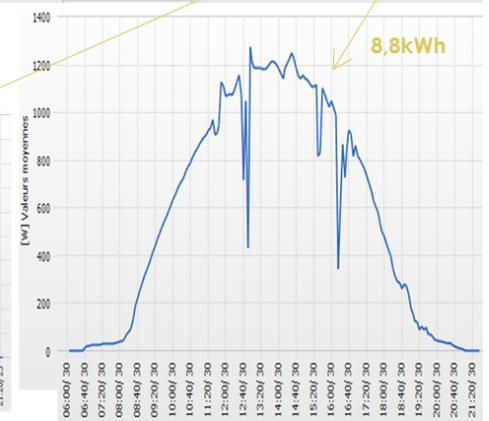
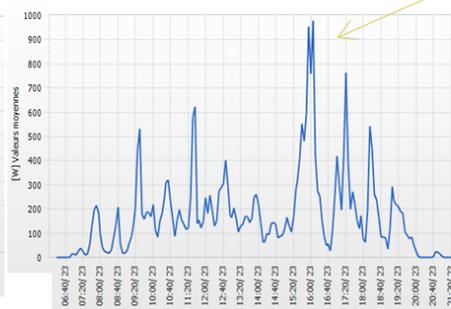
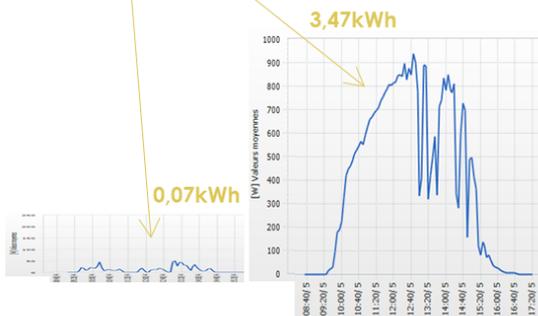
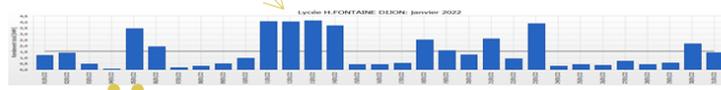
Il est à noter qu'il faut choisir une section suffisante des conducteurs DC (entre les panneaux photovoltaïques et l'onduleur de chaîne) pour limiter au maximum les pertes énergétiques de transport de l'énergie produite.

## D/ Production électrique suivant la saison et la période de la journée (installation Phébus)

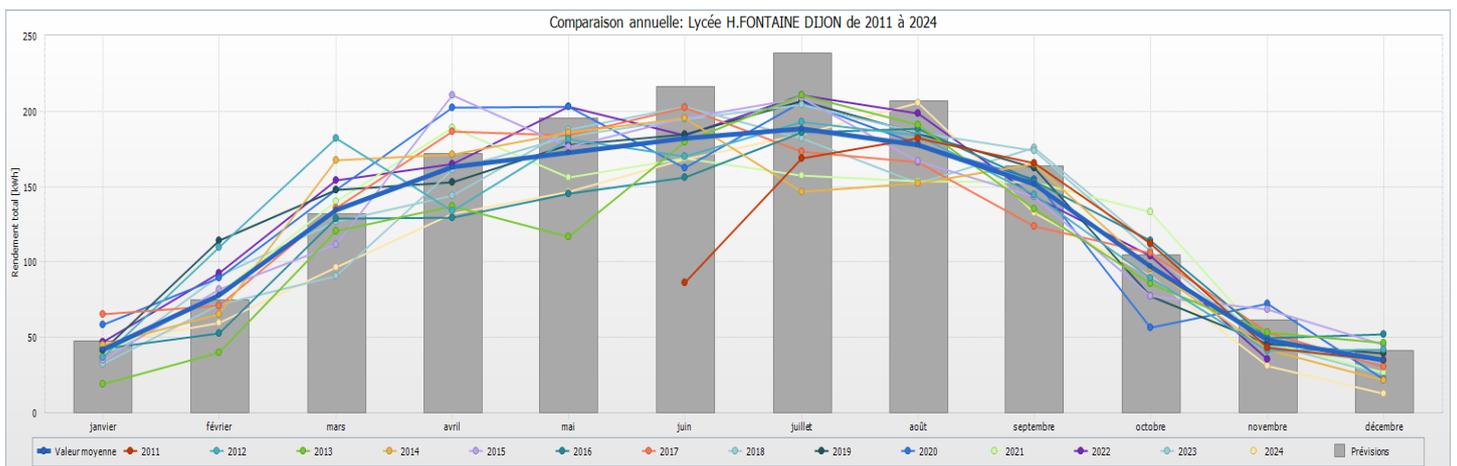


Il y a une forte variation d'énergie produite suivant la saison en raison de la variation de la durée journalière d'ensoleillement et de la variation de l'inclinaison du soleil par rapport aux panneaux.

Il y a une forte variation de puissance durant la journée, donc d'énergie journalière produite, en raison des variations des conditions climatiques et de la présence éventuelle de masque.



## E/ Production électrique au bout de plus de 30 années de production (installation Phébus)



| Année | Janvier | Février | Mars   | Avril  | Mai    | Juin   | Juillet | Août   | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre | Production annuelle (kWh) |
|-------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|-----------|---------|----------|----------|---------------------------|
| 1995  | 69      | 97      | 130    | 146    | 131    | 222    | 256     | 227    | 142       | 116     | 50       | 53       | 1639                      |
| 2017  | 65,19   | 71,09   | 136,08 | 186,53 | 183,79 | 202,21 | 173     | 166,51 | 123,96    | 106,12  | 53,22    | 30,7     | 1498,39                   |
| 2018  | 32,51   | 71,71   | 90,74  | 161,18 | 183,31 | 194,78 | 204,15  | 185,94 | 173,62    | 106,95  | 43,01    | 33,57    | 1481,46                   |
| 2019  | 41,17   | 114,47  | 147,94 | 153,16 | 177,41 | 184,85 | 207,04  | 185,39 | 162,23    | 77,49   | 45,98    | 39,45    | 1536,58                   |
| 2020  | 58,6    | 89,69   | 148,05 | 202,58 | 203,11 | 162,69 | 206,07  | 178,06 | 154,8     | 56,26   | 72,62    | 21,96    | 1554,48                   |
| 2021  | 38,84   | 79,59   | 140,16 | 189,4  | 155,78 | 168,85 | 157,41  | 153,74 | 152,99    | 133,17  | 47,1     | 26,58    | 1443,6                    |
| 2022  | 47,2    | 92,64   | 154,38 | 165,19 | 202,86 | 184,01 | 210,94  | 198,5  | 143,16    | 104,35  | 35,67    |          | 1538,89                   |
| 2023  | 34,36   | 90,77   | 126,69 | 143,98 | 188,08 | 203,27 | 181,93  | 151,99 | 175,86    | 111,65  | 45,54    | 25,34    | 1479,46                   |
| 2024  | 45,47   | 59,53   | 96,62  | 131,93 | 146,82 | 167,85 | 184,54  | 205,7  | 132,74    | 90,79   | 31,19    | 28       | 1321,19                   |

Entre 1995 et 2023 (29 années de production), les pertes de production sont de 9,7% :  $(1639-1479)/1639 = 0.097$

Une forte disparité de la production apparaît en raison des pertes ou dysfonctionnements dans la partie DC, pertes liées à une différence de points MPPT, de la salissure des panneaux photovoltaïques, de la présence de neige, du vieillissement des panneaux et surtout des variations climatiques (ensoleillement, température, vent).

Cette étude approximative démontre tout de même que les installations photovoltaïques réduisent clairement la consommation électrique d'un bâtiment dans la durée (au moins 30 ans de fonctionnement des panneaux photovoltaïques pour l'installation Phébus, même avec le remplacement de l'onduleur-coupleur en 2011).

Le temps de retour énergétique est de quelques années (environ un an en 2025 en raison de l'amélioration du processus de fabrication des panneaux photovoltaïques).

## F/ Optimisation de production pour les bâtiments avec surface disponible limitée

### Tour Elithis

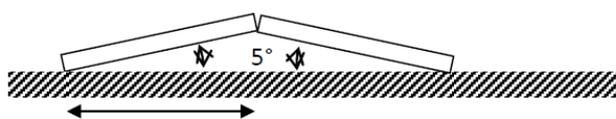


129 kWh/m<sup>2</sup>

880 kWh/kWc

**Efficacité énergétique optimisée en regard de la surface disponible**

**Energie produite la plus importante sur la surface disponible !**



$$lg \times \cos 5^\circ = 990 \times 0,996 = 986 \text{ mm}$$

Il est possible d'utiliser un seul onduleur de chaîne pour des panneaux avec orientation et/ou inclinaison sensiblement identiques.

Un onduleur de chaîne par ensemble de panneaux de même orientation optimise légèrement la production des panneaux mais avec plus de longueur de câble DC...

Pour réduire l'impact environnemental de la consommation électrique d'un bâtiment, il sera nécessaire de placer le champ photovoltaïque avec une inclinaison faible s'il y a peu de surface disponible.

### Phébus

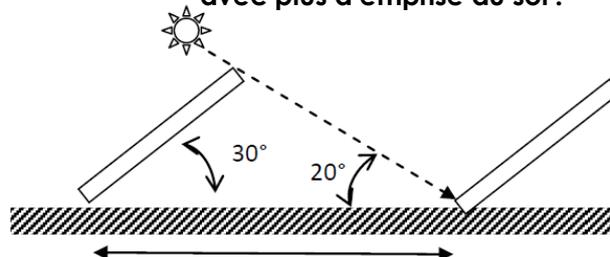


66 kWh/m<sup>2</sup>

1020 kWh/kWc

**Efficacité énergétique maximale (sans contrainte de surface)**

**Energie produite la plus importante possible mais avec plus d'emprise au sol !**



$$lg \times \cos 30^\circ + lg \times \sin 30^\circ / \tan 20^\circ = 857 + 1360 = 2217 \text{ mm}$$

Il est nécessaire de disposer de plus de surface au sol si on place les panneaux photovoltaïques avec un angle de 30°.

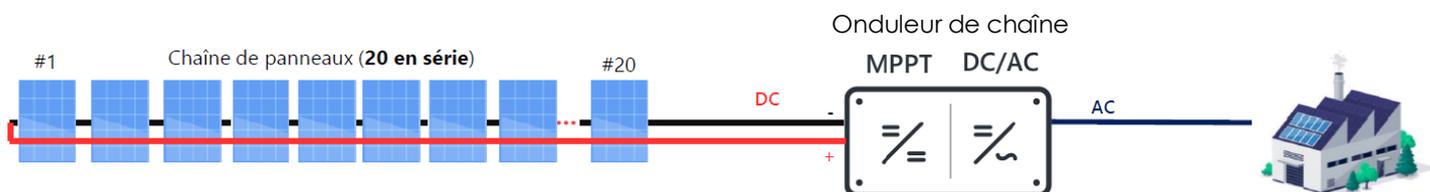
Dans ce cas, il y a une distance non négligeable à respecter pour éviter un masque solaire inter-panneau : la valeur ci-dessus tient compte de la hauteur solaire à 12h au solstice d'hiver qui est de 20° à Dijon.

## G/ Structures pour des situations avec masques et/ou positions différentes des panneaux

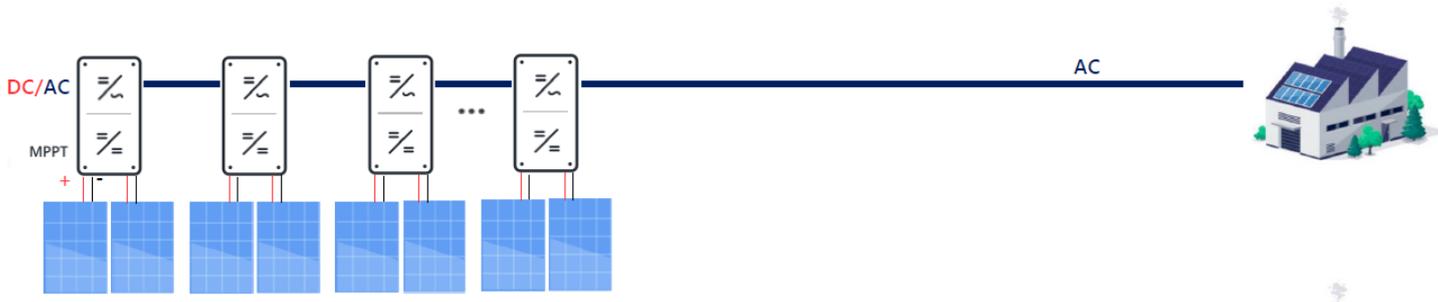
L'ombrrière de parking photovoltaïque du lycée Hippolyte Fontaine (85kWc) est composée de 6 champs photovoltaïques avec des orientations et inclinaisons nettement différentes. De plus, il y a plusieurs masques solaires...



La structure avec onduleur de chaîne est peu adaptée à cette situation. L'utilisation d'un onduleur de chaîne par champ photovoltaïque serait envisageable mais l'impact du masque solaire sur 3 d'entre eux est non négligeable.



L'utilisation de microonduleurs (associés à un à 4 panneaux photovoltaïques suivant les cas) permet de répondre au besoin. Cette structure est plus adaptée aux installations de faible puissance (moins de 5 à 10kWc) d'un point de vue technico-économique.



L'utilisation de la structure composée d'optimiseurs de puissance associés à un onduleur centralisé est adapté aux installations de fortes puissance. C'est le cas de l'ombrrière de parking photovoltaïque du lycée Hippolyte Fontaine (85kWc)...

