

Transition énergétique des bâtiments grâce à la production électrique photovoltaïque avec onduleurs de chaîne (onduleurs-coupleurs MPPT centralisés)

Phébus
du lycée Hippolyte
Fontaine de Dijon



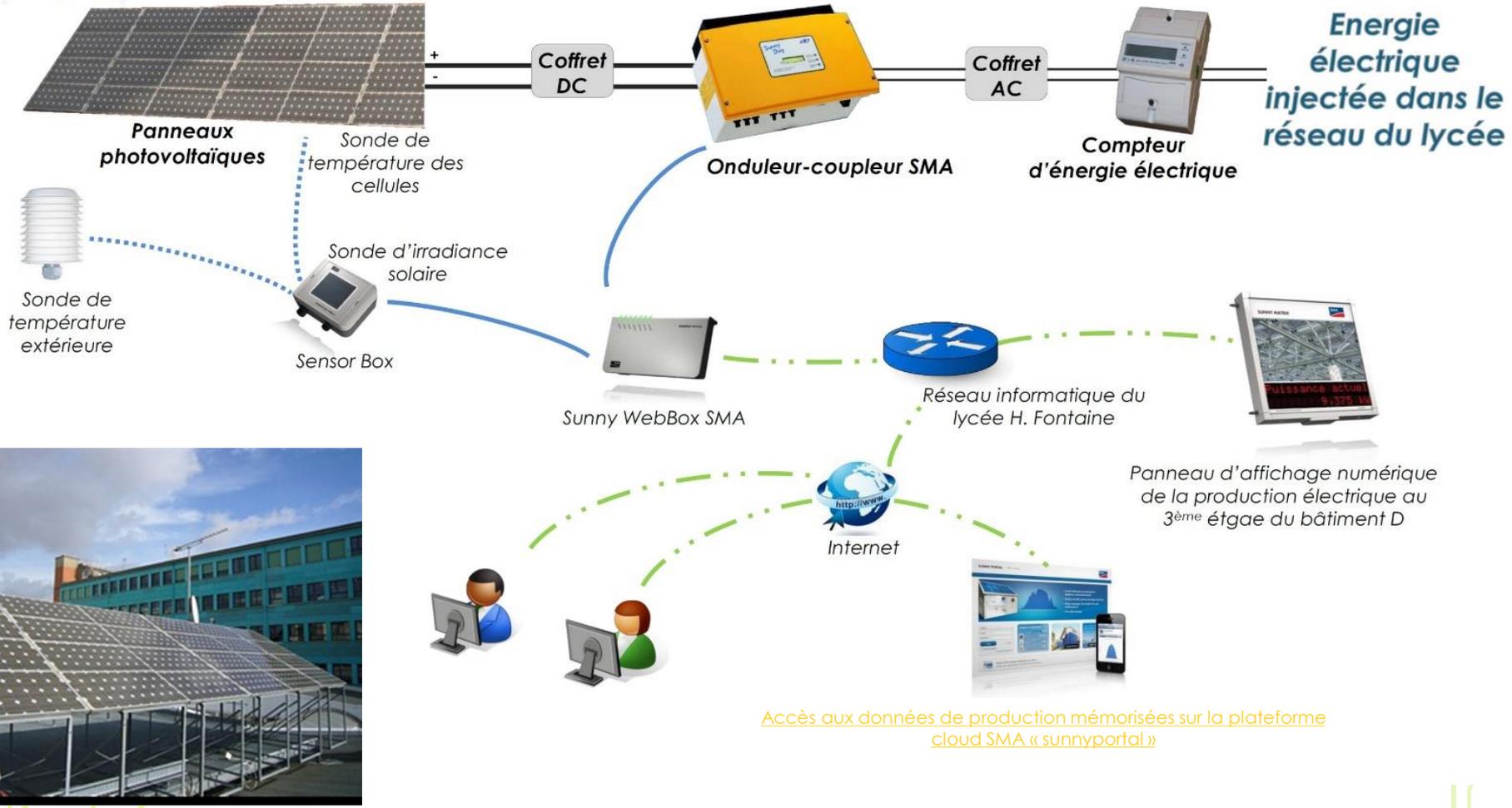
Tour Elithis
de Dijon



Installation photovoltaïque Phébus

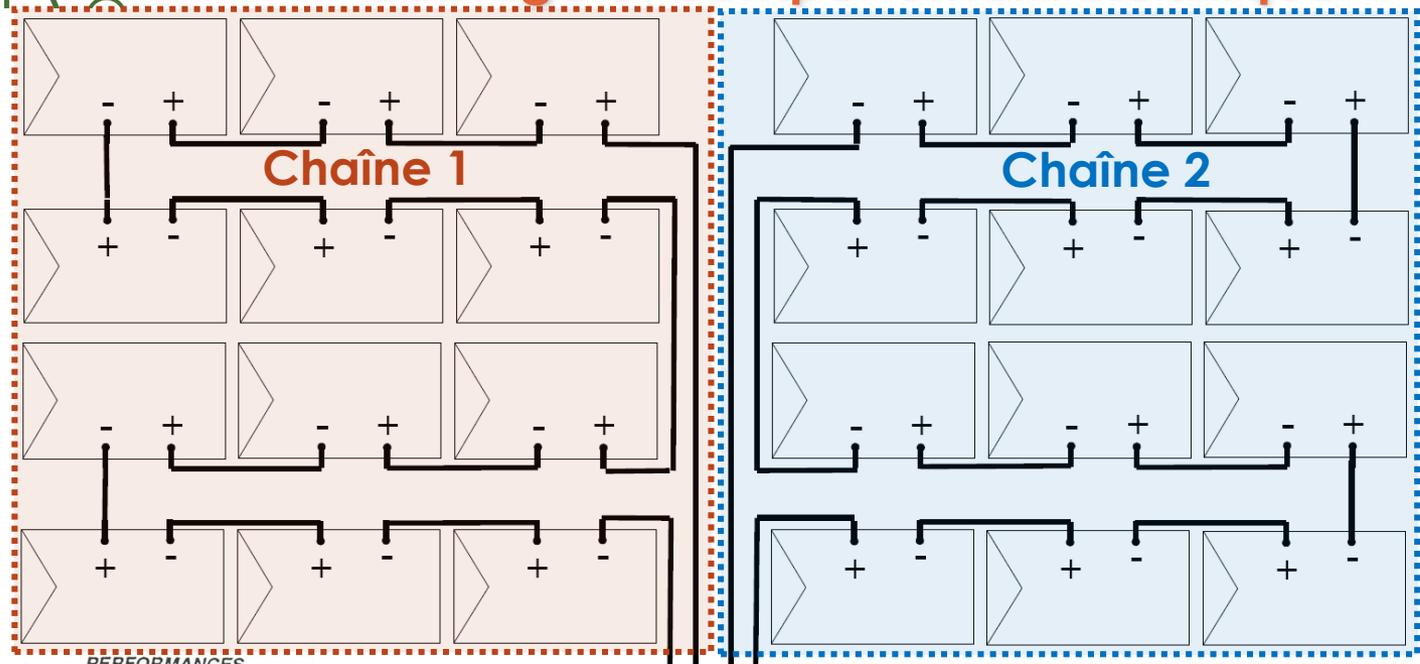
Structure matérielle

Energie solaire

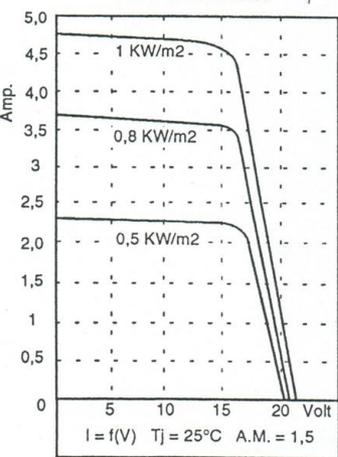


Installation photovoltaïque Phébus

Câblage et comportement électrique



- Champ photovoltaïque
- 24 modules BP275 (75Wc* 12V)
 - inclinés de 30°
 - orientés au sud
 - surface totale de 15,5m²
- Puissance nominale = **1800Wc***
- * Eclairage_{solaire} = 1000W/m²
 - * T_{cellulesPV} = 25°C
 - * Masse d'air AM = 1,5



CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

Température de jonction (°C)	25
Puissance maximale (W)	75
Tension à puissance max. (V)	17.0
Courant à puissance max. (A)	4.45
Courant de court circuit (A)	4.75
Tension de circuit ouvert (V)	21.4

Valeurs typiques à 1 KW/m2, AM 1.5



Injection de l'énergie dans le réseau AC du lycée

Onduleur-Coupleur Sunny Boy 1700

- Puissance DC max = 1850W
- Tension DC max = 400V
- Plage de tension PV, MPPT = 139V – 400V
- Courant d'entrée max = 12,6A
- Tension nominale AC = 220V – 240V
- Fréquence nominale AC = 50Hz / 60Hz
- Rendement maximal = 93,5% Rendement euro-eta = 91,8%

Installation photovoltaïque Phébus

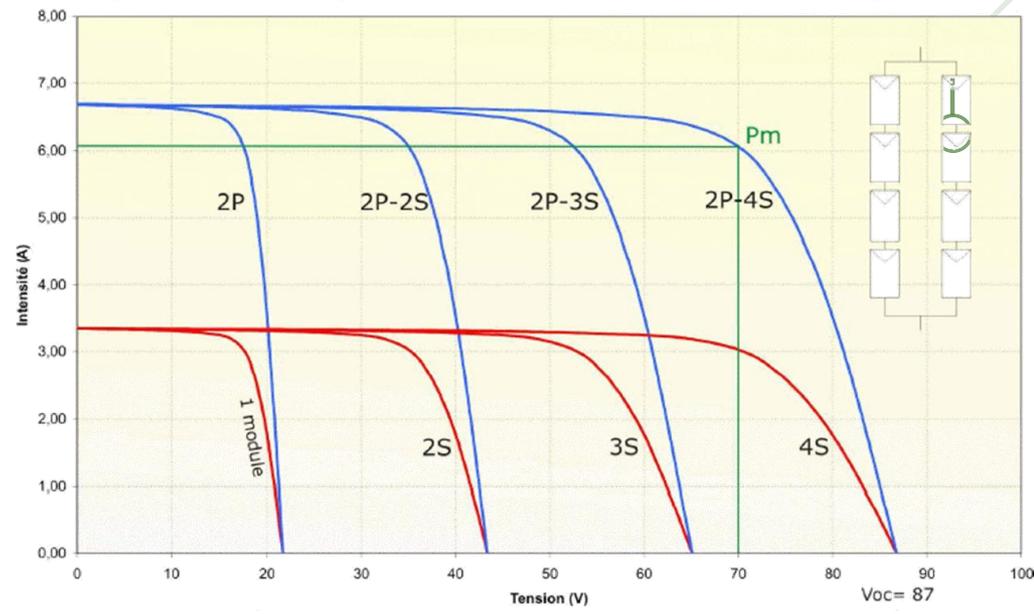
Câblage des panneaux photovoltaïques adapté à l'onduleur-coupleur

- 1 Nombre maximal de modules photovoltaïques à relier à l'onduleur-coupleur sur le critère de puissance :

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

- 2 Nombre minimal et maximal de modules photovoltaïques à câbler en série à l'onduleur-coupleur pour un fonctionnement MPPT avec une température des cellules photovoltaïques de 25°C (calcul simplifié sans tenir compte des coefficients de dérive en température des modules PV) :

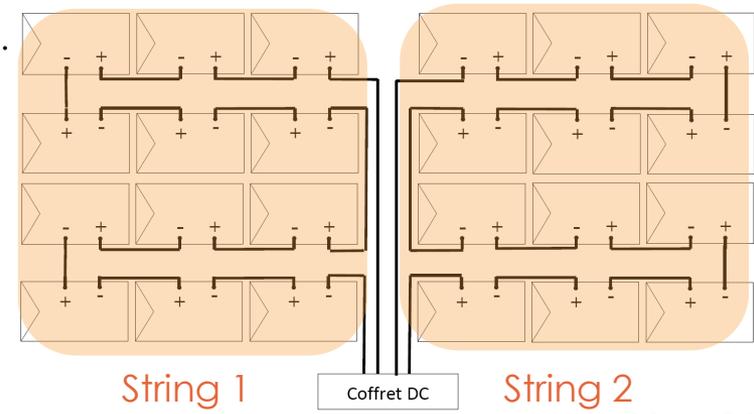
Temperature coefficient of Isc : 0,065%/°C
 Temperature coefficient of voltage : -80mV/°C
 Temperature coefficient of power : -0,5%/°C



Tension à vide totale dans les conditions les plus défavorables < $U_{DC\ max\ onduleur}$

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

- 3 Câblage des modules photovoltaïques en fonction du masque solaire.

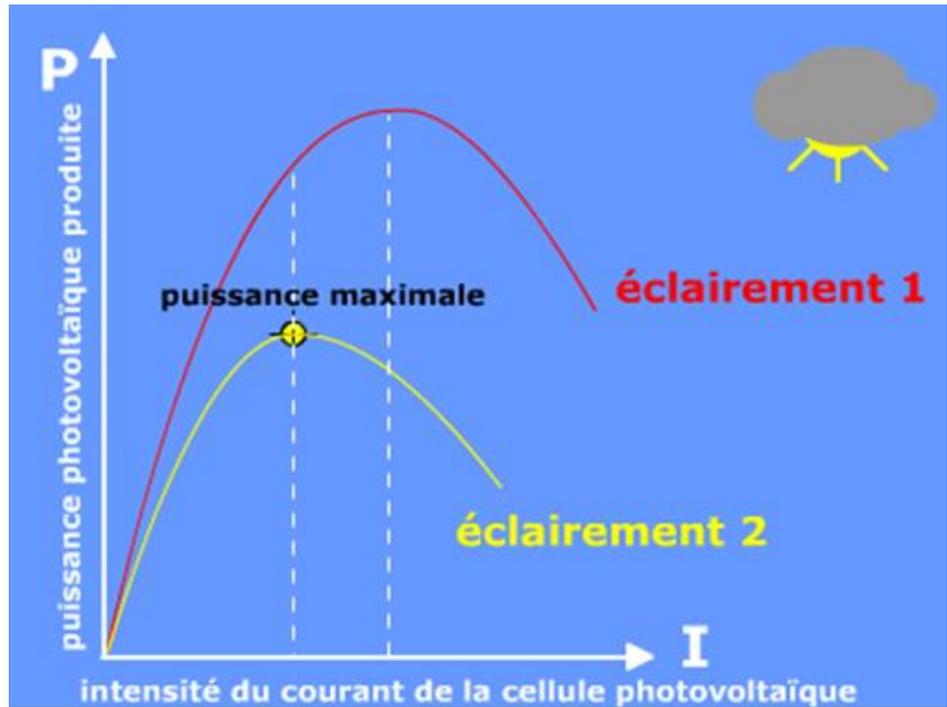
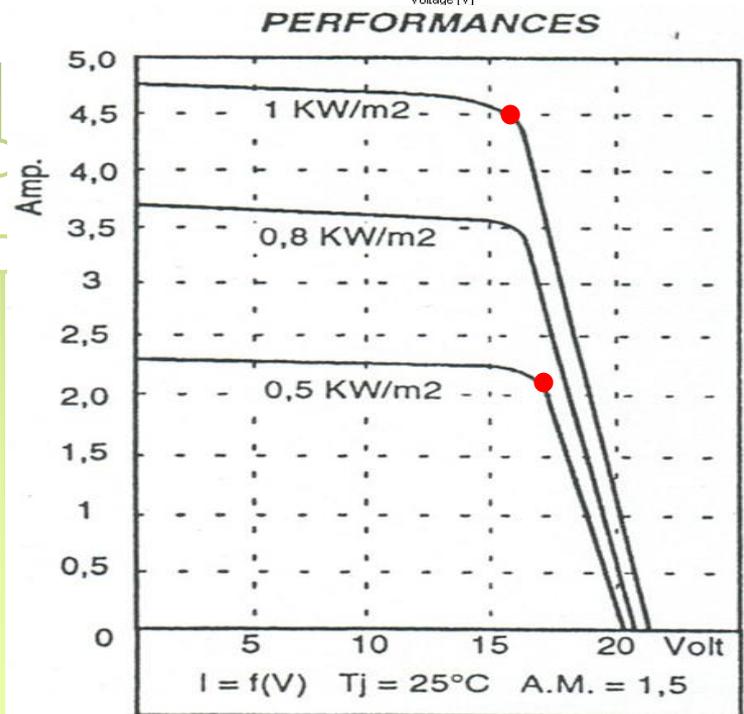
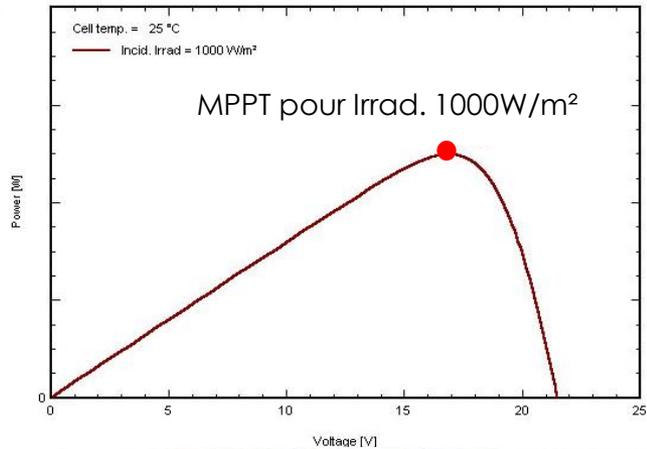


Installation photovoltaïque Phébus

Exploitation de la puissance maximale des panneaux photovoltaïques

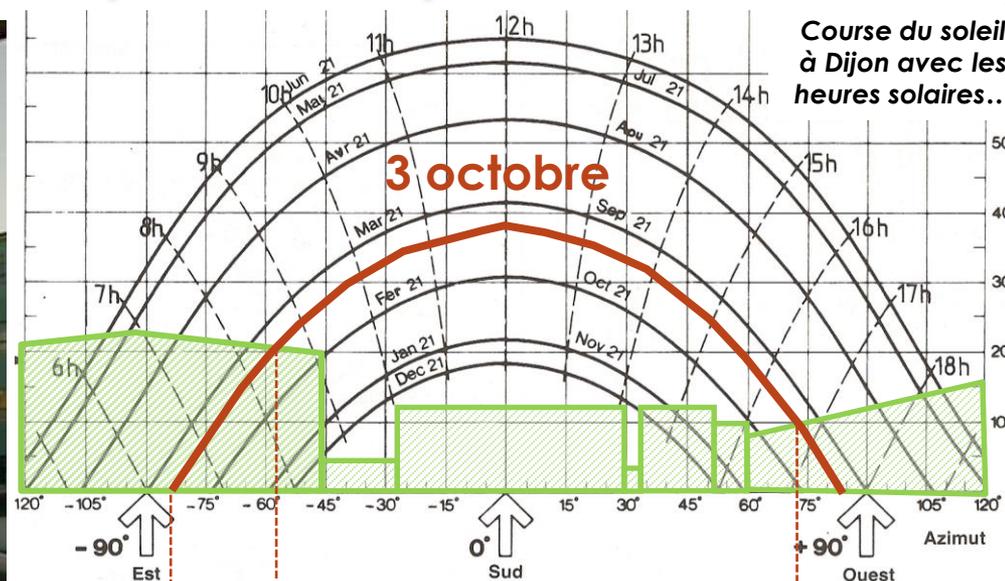
Pour s'assurer que les cellules produisent leur puissance maximale, il faut veiller à ce que l'onduleur-coupleur puisse imposer ce point de fonctionnement optimal (MPPT = Maximum Power Point Tracking).

L'onduleur fonctionne suivant la logique MPPT.



Installation photovoltaïque Phébus

Masque solaire des panneaux photovoltaïques le 3 octobre



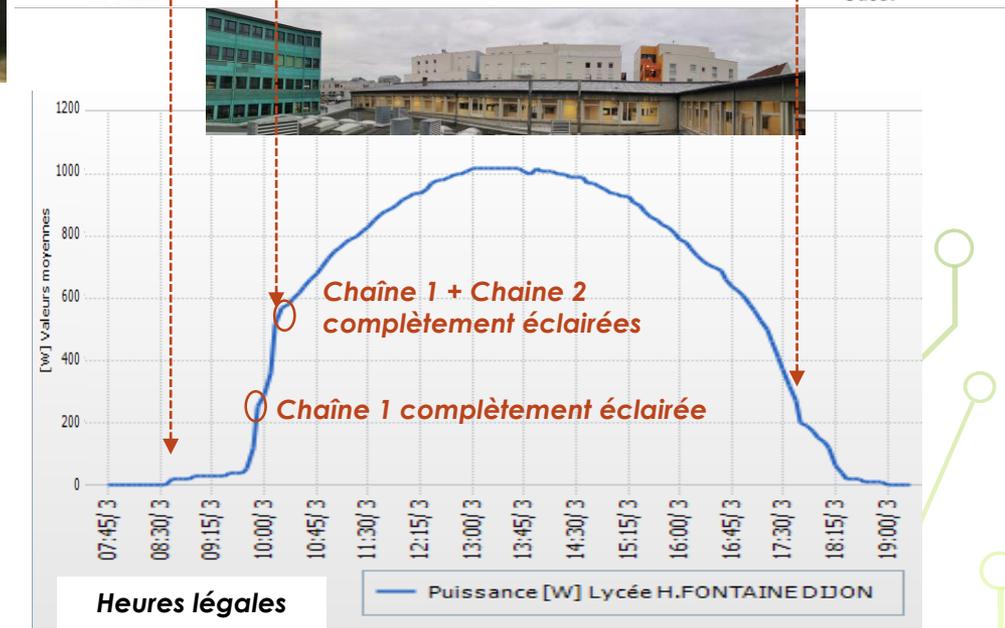
10h10

3 octobre = heure d'été

Heure légale été = Heure solaire été + 1h40

Heure légale de fin de masque = Heure solaire été + 1h40
 = 8h30 + 1h40
 = 10h10

Un panneau photovoltaïque moins éclairé que les autres réduit la production électrique de l'ensemble de la chaîne de panneaux photovoltaïques auquel il appartient !



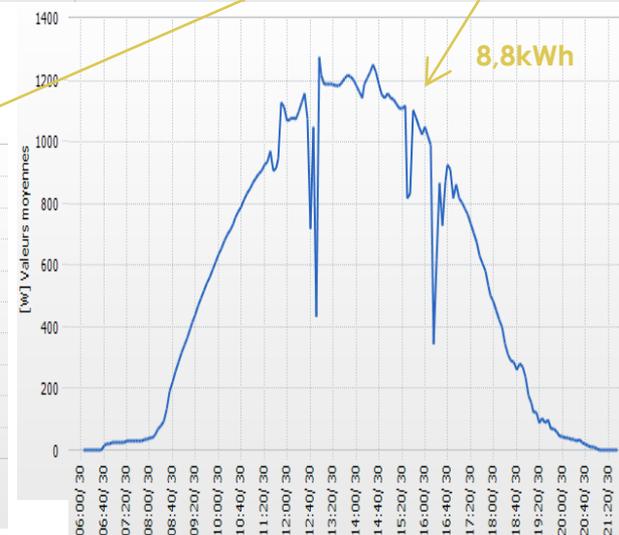
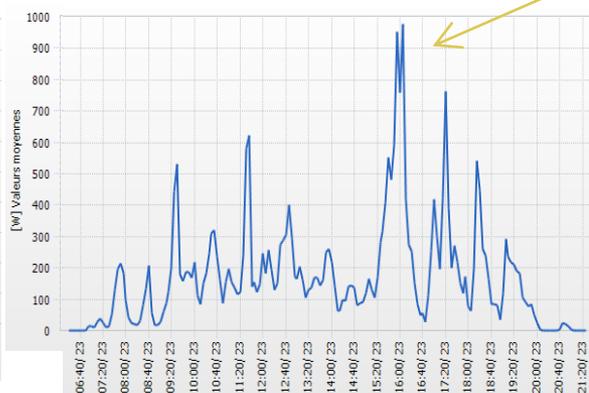
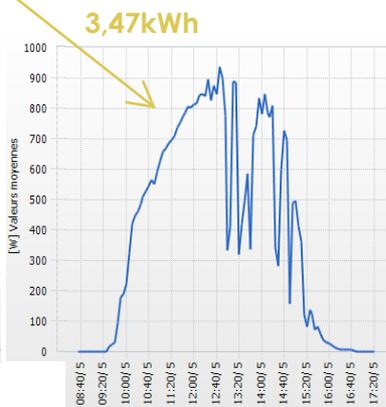
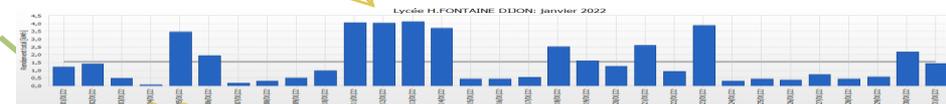
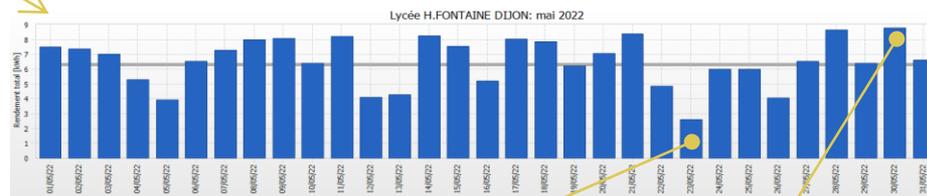
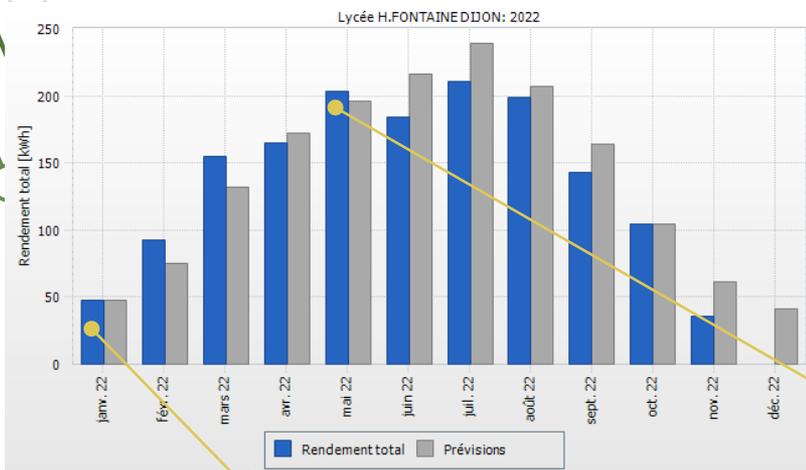
Installation photovoltaïque Phébus

Variation de production électrique suivant la saison et dans la journée

Plateforme cloud SMA

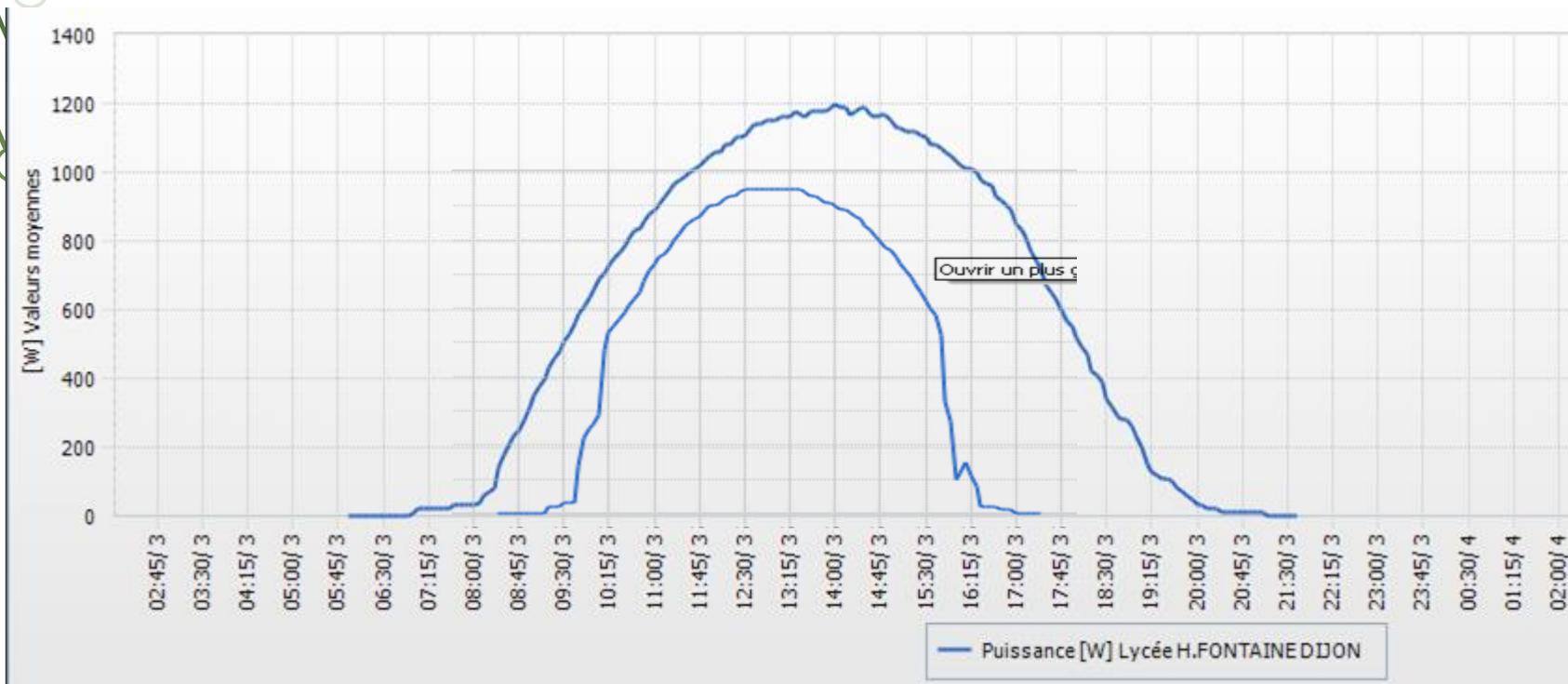
Influence de la course solaire et des conditions climatiques

- > Forte variation d'énergie produite suivant la saison
- > Forte variation d'énergie produite d'une journée à l'autre
- > Forte variation de puissance dans la journée



Installation photovoltaïque Phébus

Variation de production électrique suivant la saison et dans la journée



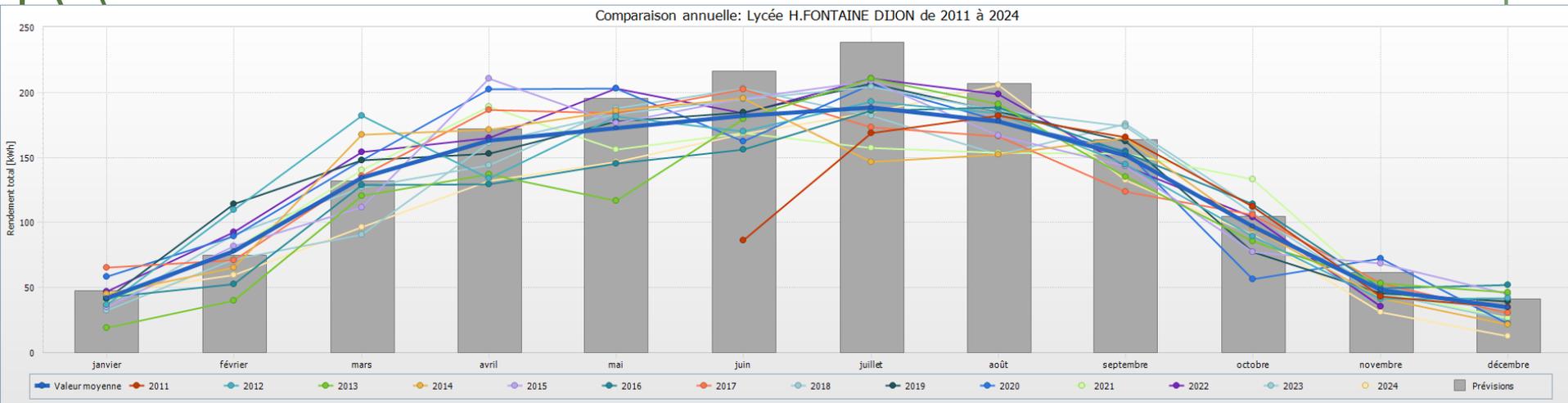
> Forte variation d'énergie produite suivant la saison avec un ensoleillement total

	03/07/11	15/01/12
Production journalière	9,16kWh	4,8kWh
Puissance maximale produite vers le réseau	1200Wac	940Wac
Heure de production maximale	14h	13h05

Installation photovoltaïque Phébus

Production électrique au bout de plus de 30 années de production

Plateforme cloud SMA



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

Production annuelle moyenne entre les années 2017 et 2021 = 1502kWh/an.

Production annuelle 2023 = 1479kWh/an.

Valeur inférieure à 10% par rapport à la production du site en début de fonctionnement.

Pertes de production = $(1639 - 1479) / 1639 = 0,097 = 9,7\%$

Données incomplètes

Installation photovoltaïque Phébus

Production électrique au bout de plus de 30 années de production

Plateforme cloud SMA

Comparaison annuelle: Lycée H.FONTAINE DIJON de 2011 à 2024

Degrés-Jours et ensoleillement en 2020 à Dijon-Longvic

Ecart aux normales 1991-2020 d'ensoleillement : **+16% (+297.1h)**

Degrés-Jours et ensoleillement en 2021 à Dijon-Longvic

Ecart aux normales 1991-2020 d'ensoleillement : **+4% (+82.6h)**

Degrés-Jours et ensoleillement en 2022 à Dijon-Longvic

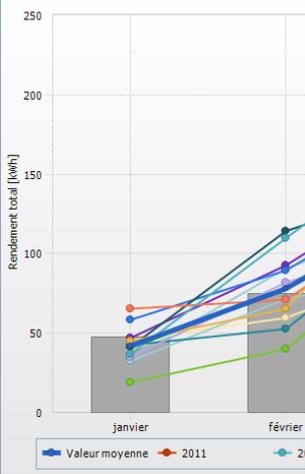
Ecart aux normales 1991-2020 d'ensoleillement : **+17% (+326.9h)**

Degrés-Jours et ensoleillement en 2023 à Dijon-Longvic

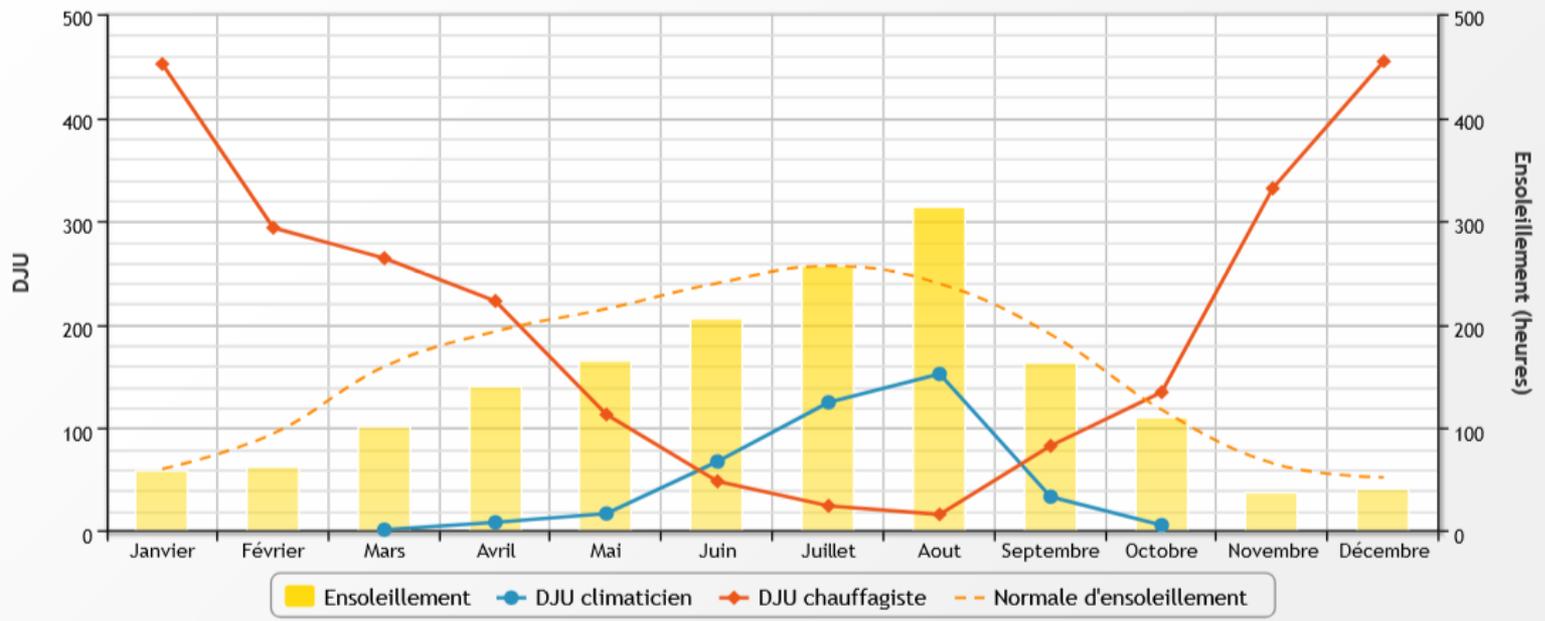
Ecart aux normales 1991-2020 d'ensoleillement : **+5% (+102.6h)**

Degrés-Jours et ensoleillement en 2024 à Dijon-Longvic

Ecart aux normales 1991-2020 d'ensoleillement : **-12% (-233.3h)**



Année	Production annuelle (kWh)
1995	1639
2017	1498,39
2018	1481,46
2019	1536,58
2020	1554,48
2021	1443,6
2022	1538,89
2023	1479,46
2024	1321,19



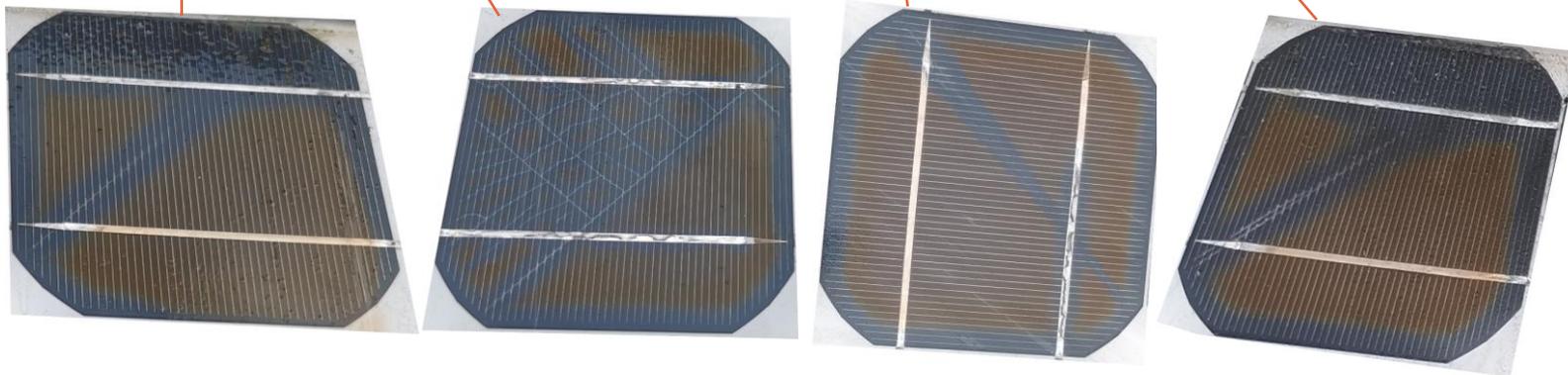
Installation photovoltaïque Phébus

Production électrique au bout de plus de 30 années de production



Dysfonctionnement de la partie DC : 4 cellules endommagées repérées en janvier 2025 (grêle ?)

Année	Production annuelle (kWh)
1995	1639
2017	1498,39
2018	1481,46
2019	1536,58
2020	1554,48
2021	1443,6
2022	1538,89
2023	1479,46
2024	1321,19



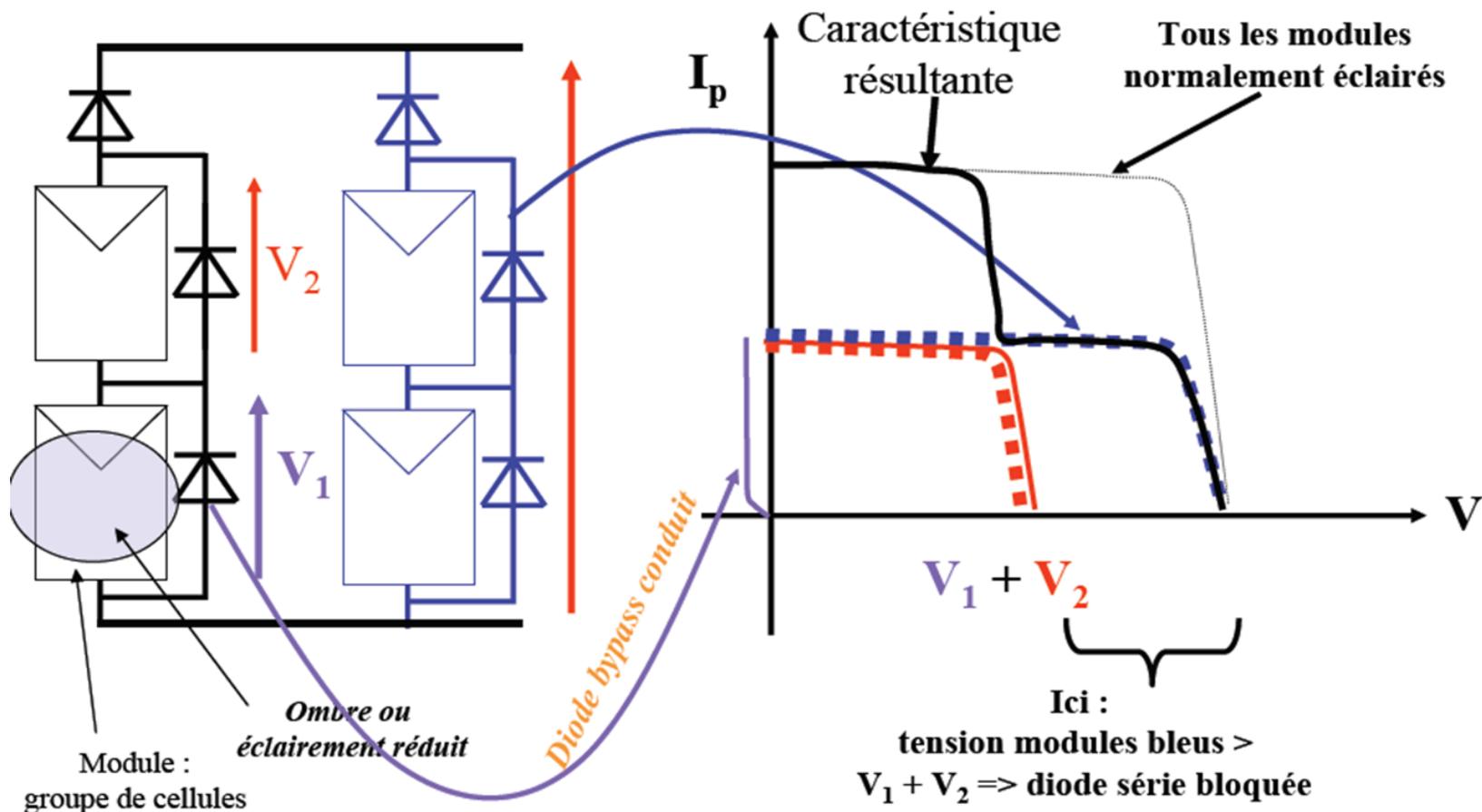
Probabilité de réduction de la production électrique au niveau de 2 panneaux photovoltaïques (un panneau endommagé par string)

Installation photovoltaïque Phébus

Production électrique au bout de plus de 30 années de production

Plateforme cloud SMA

Dysfonctionnement de la partie DC : 4 cellules endommagées repérées en janvier 2025 (grêle ?)



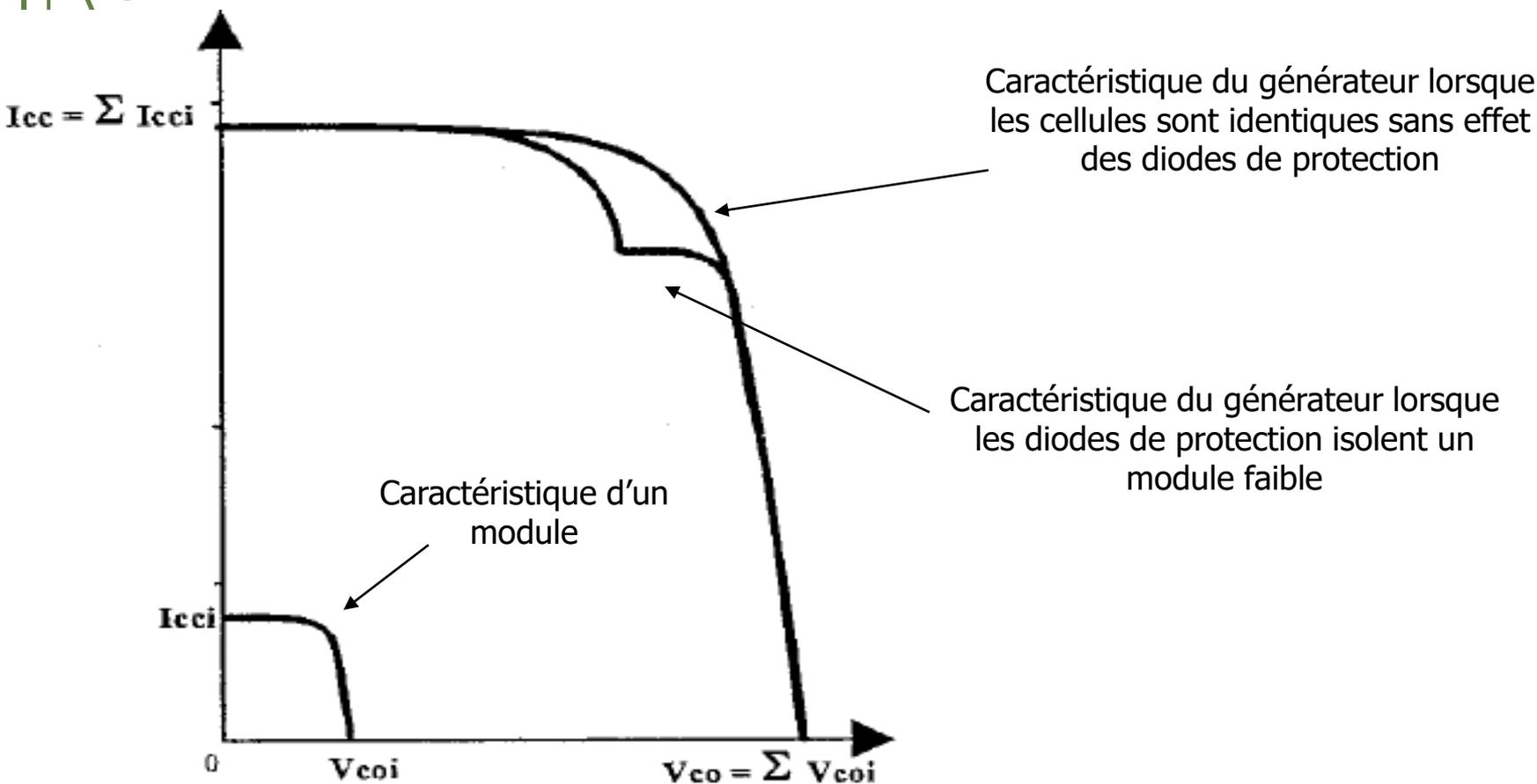
Probabilité de réduction de la production électrique au niveau de 2 panneaux photovoltaïques (un panneau endommagé par string)

Installation photovoltaïque Phébus

Production électrique au bout de plus de 30 années de production

Plateforme cloud SMA

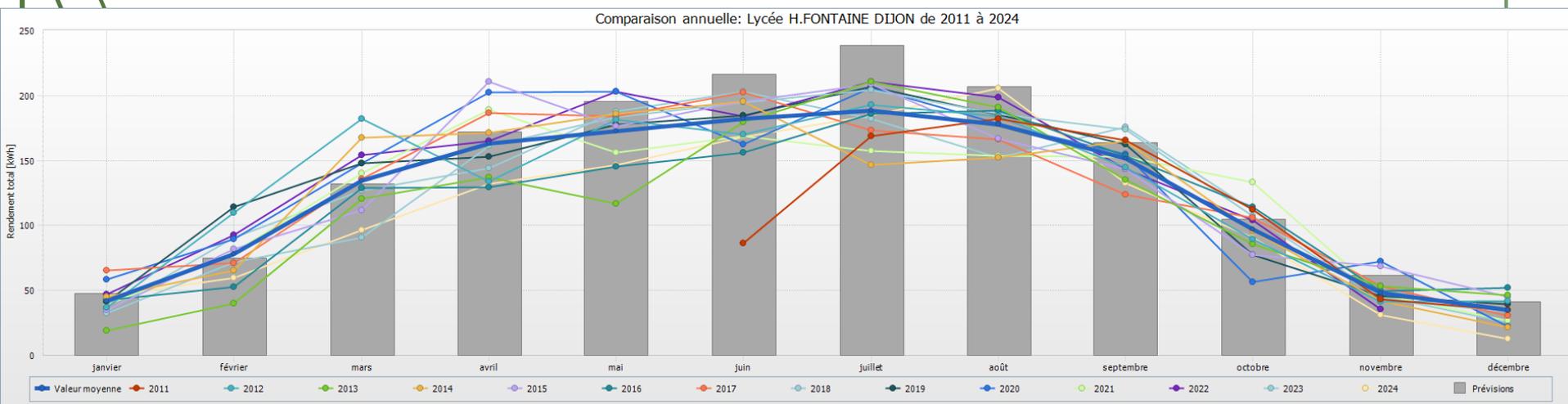
Dysfonctionnement de la partie DC : 4 cellules endommagées repérées en janvier 2025 (grêle ?)



Installation photovoltaïque Phébus

Production électrique au bout de plus de 30 années de production

Plateforme cloud SMA



Année	Production annuelle (kWh)
1995	1639
2017	1498,39
2018	1481,46
2019	1536,58
2020	1554,48
2021	1443,6
2022	1538,89
2023	1479,46
2024	1321,19

Salissure des panneaux du champ photovoltaïque

➔ Nettoyage le 10 janvier 2025 (10 ans après le dernier nettoyage)

Le brunissement des cellules photovoltaïques est engendré par le peroxyde organique ajouté lors de la fabrication pour accélérer la cadence de production. Il ne réduit pas à la production électrique.



Nécessité d'un nettoyage annuel !

Installation photovoltaïque Phébus

Critères à respecter pour réduire l'impact environnemental de la consommation électrique d'un bâtiment avec une installation photovoltaïque à onduleur de chaîne

→ Fournir le maximum d'électricité par rapport à la consommation intrinsèque du bâtiment avec le maximum d'efficacité

Champ photovoltaïque

1. **Nombre suffisant de panneaux photovoltaïques** pour une production électrique se rapprochant le plus possible de la consommation électrique intrinsèque du bâtiment.

Pour une production électrique DC maximale (réduction du temps de retour énergétique de l'installation photovoltaïque) :

2. **Position du champ photovoltaïque** de préférence au sud avec un angle de 30° environ (pour Dijon).

3. Un **environnement sans masque solaire** en face du champ photovoltaïque.

4. Une **orientation et une inclinaison sensiblement identiques** pour chaque panneau d'un string en entrée de l'onduleur-coupleur (pour une bonne recherche de point de fonctionnement maximal des panneaux).

5. Une **bonne ventilation des modules PV** pour réduire les pertes d'énergie.

Onduleur-coupleur

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

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

7. 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.

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

Câblage DC

9. Dimensionner la **section des conducteurs DC** pour limiter au maximum les pertes énergétiques de transport de l'énergie produite.

Installation photovoltaïque de la tour Elithis de Dijon

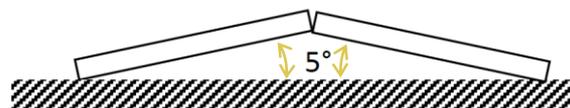


342 modules de 240Wc chacun.
82 kWc au total.

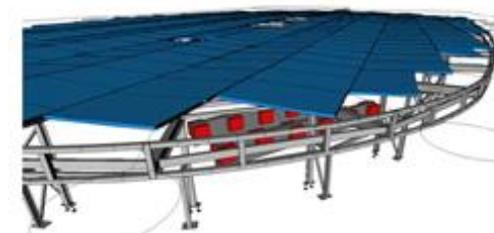
Optimisation de la surface utile pour l'installation des panneaux photovoltaïques.

Pas de problème de masque proche puisque le bâtiment est plus haut que les bâtiments environnants.

Masque lointain peu gênant (montagne des Hautes-côtes).



Modules inclinés à 5°.
50% inclinés vers l'est.
50% inclinés vers l'ouest.



Orientation \ Inclinaison	0°	SO	S	SE	E
0°	0,93	0,93	0,93 <i>Tour Elithis</i>	0,93	0,93
30°	0,90	0,96	1,00 <i>Phébus</i>	0,96	0,90
60°	0,78	0,88	0,91	0,88	0,78
90°	0,55	0,66	0,68	0,66	0,55

Position à éviter si elle n'est pas imposée par des contraintes architecturales

Facteurs de correction du gisement solaire selon une inclinaison et une orientation données des panneaux (latitude de Lyon)

Recherche d'optimisation de production



Tour Elithis



Lycée H. Fontaine



129 kWh/m² 880 kWh/kWc

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

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



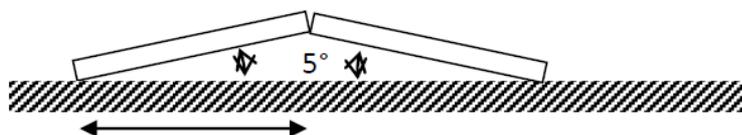
66 kWh/m² 1020 kWh/kWc

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

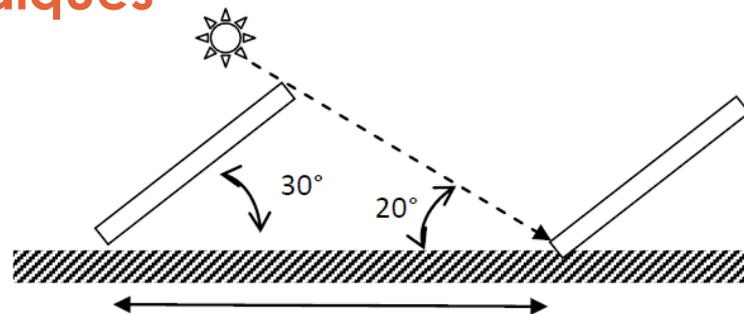
**Energie produite la plus importante possible
mais avec plus d'emprise au sol !**

Recherche d'optimisation de production

Problématique de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux photovoltaïques



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



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

Orientation et/ou inclinaison sensiblement identiques des panneaux

Même inclinaison et même orientation pour tous les panneaux

- ➔ Possibilité d'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...

- ➔ Possibilité d'un onduleur de chaîne par string pour optimiser la production
- ➔ Distance à respecter pour éviter le masque solaire inter-panneau (hauteur solaire à 12h au solstice d'hiver = 20° à Dijon)

Recherche d'optimisation de production

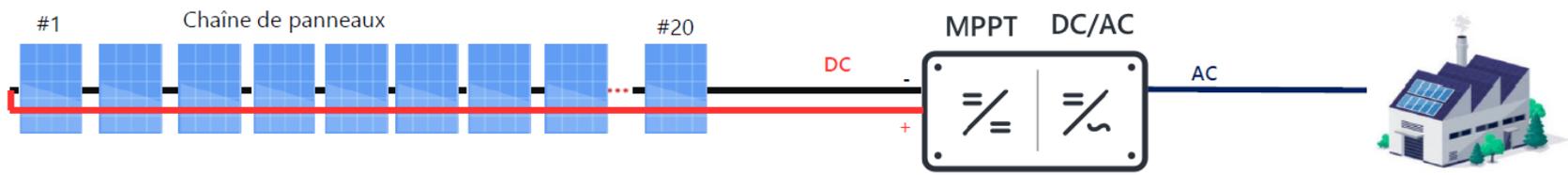
Cas d'orientation et d'inclinaison très différentes des panneaux ?

Cas de masque solaire non négligeable ?

(ombrière de parking du lycée Hippolyte Fontaine par exemple)



Onduleur de chaîne peu adapté



Utilisation de microonduleurs (installation de 3 kWc par exemple)



=> Voir l'activité d'étude de l'autoconsommation du lycée Hippolyte Fontaine avec son ombrière de parking PV !

Utilisation d'optimiseurs de puissance (ombrière de 85kWc du lycée) **solar edge**

Projet RESPONSE de Fontaine d'Ouche

Projet de rénovation énergétique de 2 îlots de bâtiments du quartier de la Fontaine d'Ouche de Dijon.

Doit permettre de produire sa propre énergie et de la consommer au travers de la plus vaste opération d'autoconsommation électrique de France.

