



L'électricité joue un rôle de plus en plus important à bord des bateaux de plaisance : indispensable au niveau de la navigation et des instruments de communication, et nécessaire aussi au nombre croissant d'appareils de confort. Durant une course transatlantique, la bonne gestion de l'énergie électrique est primordiale pour naviguer de façon efficace et dans de bonnes conditions de sécurité. En l'absence d'éléments de confort à bord, le consommateur d'énergie le plus important est sans conteste le pilote automatique, le reste étant consommé par l'électronique.



Tous ces équipements sont alimentés par un pack de batteries de servitude, distinct du pack de batteries d'alimentation des moteurs. En effet, les caractéristiques et profils d'utilisation sont tout à fait différents.

Le propriétaire souhaite que la recharge de la batterie de servitude se fasse à l'aide d'énergies douces (photovoltaïques).

Première partie : choix des batteries

L'ingénieur chargé d'étude doit choisir la technologie de la batterie de servitude et dimensionner sa capacité.

Hypothèse d'étude : consommation journalière de 40 Ah sous 12 V.

Q1 : À l'aide des documents DT1 et DT2, **compléter** le tableau ci-dessous en cochant les cases qui caractérisent une batterie de servitude.

	Débite une intensité de courant très forte	Délivre du courant de manière ponctuelle	Support des décharges profondes	Recharge très rapide dans le cas du voilier étudié
Oui				
Non				

Q2 : À l'aide des documents DT1 et DT2 :

- **Citer** les deux technologies les plus appropriées pour une batterie de servitude parmi les batteries Plomb-Acide proposées.
- **Indiquer** la technologie la plus adaptée aux décharges profondes.

Q3 : En s'autorisant une profondeur de décharge de batterie de 80%, et compte tenu de la consommation journalière, **calculer** la capacité théorique $C_{THÉO}$ en Ah que doit avoir la batterie pour avoir une autonomie d'une journée.

Lors d'essais en simulation pour différents scénarios de parcours de skippeur, l'ingénieur a pu se rendre compte que les performances de la batterie en termes de capacité n'étaient pas celles attendues.

Q4 : À l'aide du document DT3 :

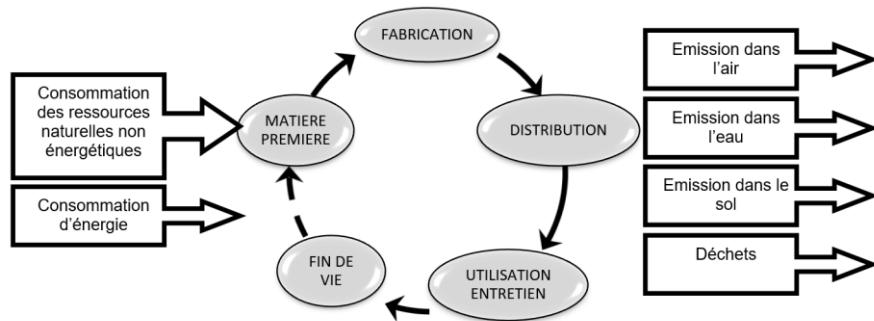
- **Indiquer** la cause la plus probable de cette anomalie, et **expliquer** ;
- **Proposer** une solution afin de résoudre le problème et permettant de naviguer partout.



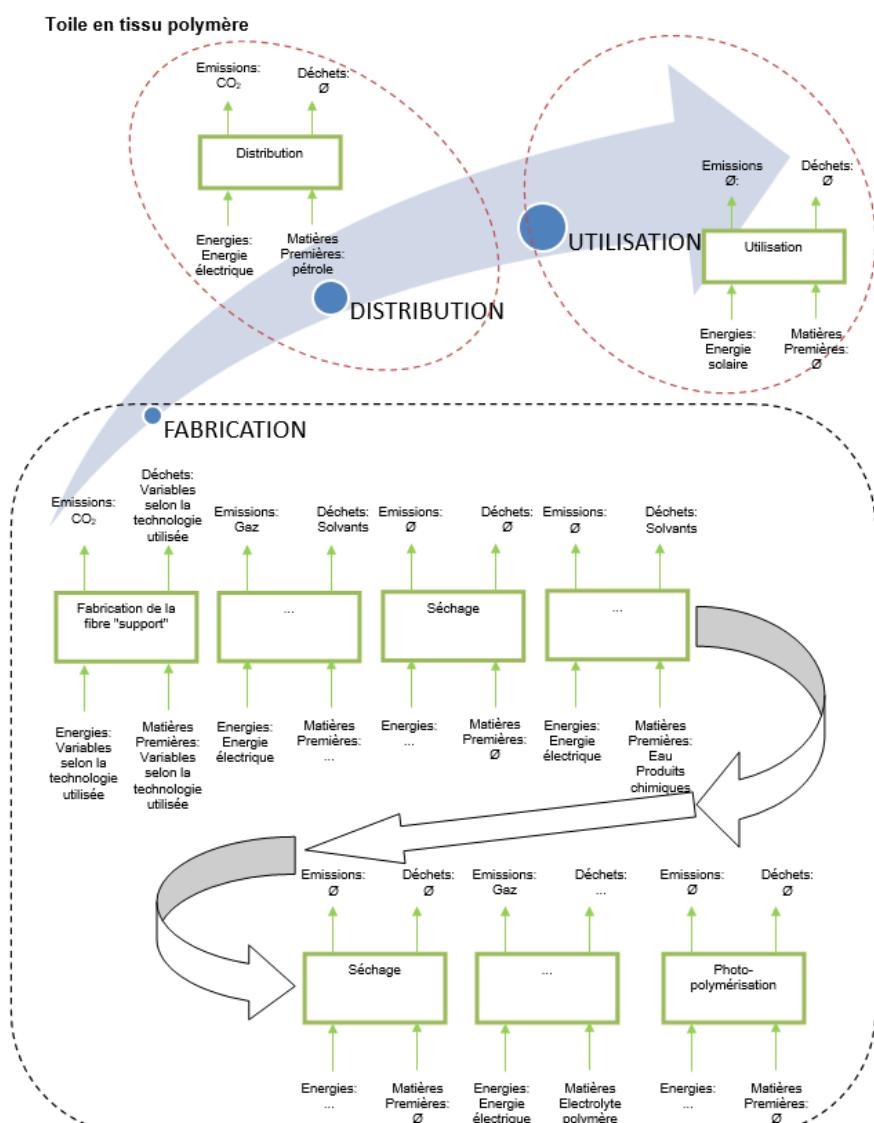
Deuxième partie : étude de l'impact environnemental des solutions photovoltaïques

Pour répondre à la charte pavillon bleu, le choix de la solution photovoltaïque se fera après une étude d'impact environnemental de différents panneaux solaires :

- Un panneau rigide au silicium monocristallin
- Un panneau en couche mince au silicium amorphe
- Une toile en tissu polymère



Q5 : À l'aide des documents DT4 et DT5 et en vous aidant des informations insérées dans le tableau de la page suivante, compléter les diagrammes des différentes étapes du cycle de vie du produit : Toile en tissu polymère.

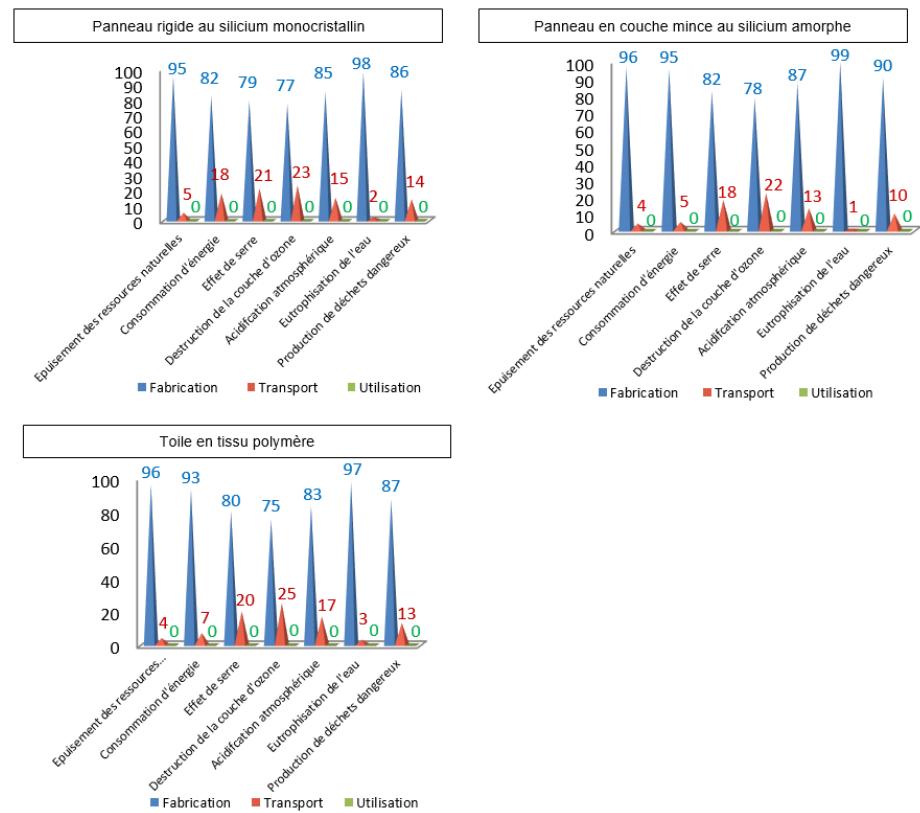


Voilier : photovoltaïque innovant



Énergies et Environnement

Q6 : Au regard des résultats précédents et des graphes ci-contre, citer l'étape la plus appropriée pour mener l'étude comparative. Justifier votre réponse.



Afin d'estimer les impacts environnementaux liés à la fabrication des systèmes de production électrique d'origine photovoltaïque, il est nécessaire d'utiliser une unité comparable.

Q7 : En vous appuyant sur les valeurs du document ci-dessous, proposer une unité équivalente permettant de réaliser une ACV sur les systèmes de production électrique d'origine photovoltaïque.

	Unité équivalente de Qté de matière première /production attendue.	Consommation énergétique	Unité équivalente d'énergie consommée /production attendue	Consommation d'eau	Unité équivalente de consommation d'eau /production attendue	Potentiel de réchauffement climatique	Acidification de l'air	Production de déchets
Epuisement des ressources non renouvelables	Indiquer ici l'unité équivalente comparable							
Panneau rigide $\eta \approx 22\%$	3 Kg de sable pour 1kg de Si (eq 95Wc) 2,6 Kg charbon coke bois pour 1kg de Si 3,7 kg de produits chimiques et gaz pour 1 m ² de plaque (eq 140Wc) 0,4 kg de quartz pour 1 m ² de plaque 0,06 kg produit chimique et gaz par cellule (156 mm x 156 mm) (eq 3,6 Wc) 0,035 kg de solvants organiques par module de 60 cellules (eq 220 Wc)	0,031 0,027 0,026 0,0028 0,016 $1,59 \cdot 10^{-4}$	150 kWh pour 1 kg Si 30 kWh pour 1 m ² de plaque 0,74 kWh par cellule 10,7 kWh par module de 60 cellules	1,57 0,21 0,205 0,048	65 l par m ² de plaque 27 l par cellule 34 l par module de 60 cellules	0,46 7,5 0,15	35g CO ₂ -eq/kWh Correspondant à la quantité de gaz à effet de serre émis lors de la fabrication du système sur sa production électrique pendant 30 ans $35 \text{ g CO}_2\text{-eq/kWh}$ Rejets d'oxyde de soufre et d'oxyde d'azote	Poussières fines 2 kg de produits chimiques Silicium Boue solvant
Panneau souple $\eta \approx 12\%$	2 kg de sable pour 1 kg de Si (eq 52 Wc) 3,5 kg charbon coke bois pour 1 kg de Si 3,7 kg de produits chimiques et gaz pour 1 m ² de plaque (eq 76 Wc) 0,4 kg de quartz pour 1 m ² de plaque 0,06 kg produit chimique et gaz par cellule (eq 2 Wc) 0,035 kg de solvants organiques par module de 60 cellules (eq 120 Wc)	0,038 0,03 ...	210 kWh pour 1 kg de Si 30 kWh pour 1 m ² de plaque	80 l par m ² de plaque 29 l par cellule 30 l par module de 20 cellules	305g CO ₂ -eq/kWh Correspondant à la quantité de gaz à effet de serre émis lors de la fabrication du système sur sa production électrique pendant 30 ans $305 \text{ g CO}_2\text{-eq/kWh}$ Rejets d'oxyde de soufre et d'oxyde d'azote	Poussières fines 2 kg de produits chimiques Silicium Boue solvant
Tissu polymère $\eta \approx 4\%$	4 g de produit chimiques pour 1 m ² de tissu 0,6 g de quartz pour 1 m ² de tissu 120 g de solvants pour 1 m ² de tissu	... 0,035 ...	90 kWh pour la fabrication du fil + 4,5 kWh par m ² pour le tissage	1,26 l par m ² de tissu	25g CO ₂ -eq/kWh Correspondant à la quantité de gaz à effet de serre émis lors de la fabrication du système sur sa production électrique pendant 30 ans $25 \text{ g CO}_2\text{-eq/kWh}$ Résidus de solvants	



Q8 : Reformuler les valeurs du tableau ci-dessus en utilisant l'unité fonctionnelle proposée dans la question précédente à l'endroit des pointillés.

Q9 : Conclure sur le système de production électrique le moins impactant.

Troisième partie : Détermination de la puissance des panneaux photovoltaïques

Nous allons à présent nous intéresser à la recharge de la batterie de servitude par panneau photovoltaïque.

Hypothèse d'étude : consommation journalière de 40 A·h sous 12 V.

La production d'énergie électrique des panneaux variera en fonction de l'ensoleillement, due à la situation géographique et à la période de l'année. Il faut donc appréhender ces variations d'ensoleillement.

Une surface exposée au soleil reçoit, à un instant donné, un rayonnement solaire en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

L'irradiation désigne la quantité d'énergie reçue du soleil en une journée sur une surface de 1 m^2 . Elle s'exprime donc en $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ et par jour.

Q10 : À l'aide du document DT6 :

- **Indiquer** l'énergie solaire quotidienne minimale et maximale en $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$ reçue sur la France.
- **Calculer**, en pourcentage de la valeur maximale, l'écart entre ces deux valeurs.
- Pour la ville de Brest, **indiquer** les valeurs d'énergie solaire quotidienne minimale et maximale ainsi que les mois correspondants.
- **Calculer** l'écart entre ces valeurs d'énergie solaire, en pourcentage de la valeur maximale.

Parmi les spécifications du cahier des charges, et afin de limiter les surcoûts inutiles, le propriétaire habitant Brest a précisé que :

- le bateau ne serait amené à sortir que sur la période du 1^{er} mars au 1^{er} novembre.
- la référence d'ensoleillement pour assurer l'autonomie de la batterie de servitude doit être l'ensemble du littoral français.

Q11 : À l'aide du document DT6, **donner** la valeur de l'énergie solaire E_{SOL} à prendre en compte, dans le cas le plus défavorable, pour le dimensionnement des panneaux.

Q12 : L'énergie solaire E_{SOL} reçue au bout d'une journée est l'équivalent d'une puissance de rayonnement de 1 000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ reçue pendant un temps T_e . A partir de la valeur trouvée à la question précédente, **déterminer** ce temps T_e en heures, durant lequel le panneau photovoltaïque sera soumis à une puissance de 1 000 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.



Quand un panneau photovoltaïque reçoit une puissance de rayonnement solaire de $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, il produit une puissance électrique P_c (W).

Cette puissance électrique, appelée puissance crête est donnée par le fabricant du panneau.

Q13 : Déterminer l'expression littérale de l'énergie électrique E_{ELEC} produite au bout d'un temps T_e (h) par un panneau photovoltaïque de puissance électrique P_c , et exposé à un rayonnement solaire de $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Q14 : À partir de la consommation journalière en A·h, **calculer** le besoin journalier d'énergie électrique E_J (en $\text{kW}\cdot\text{h}$).

Q15 : À partir du besoin journalier en énergie électrique E_J , et de l'expression de l'énergie électrique E_{ELEC} produite quotidiennement par le panneau photovoltaïque, **déterminer** la puissance électrique crête théorique $P_{c_théo}$ (W) que doit avoir le panneau photovoltaïque.

La voile ne permet pas un angle d'incidence optimum du rayonnement solaire et le panneau photovoltaïque doit donc être surdimensionné. Des simulations, à travers différents scénarios, ont permis de mettre en évidence que globalement, il existe un coefficient de performance (CP) de 0,9.

Q16 : En déduire la puissance électrique crête P_c (W) que doit avoir le panneau photovoltaïque en tenant compte du coefficient de performance.

L'ingénieur choisit une toile photovoltaïque de puissance crête $P_c = 220\ \text{W}$.

Q17 : Justifier si ce choix est convenable.

Q18 : À l'aide de la documentation du panneau photovoltaïque, **déterminer** :

- la tension à vide délivrée par le panneau (pour un éclairement de $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;
- le courant de court-circuit (pour un éclairement de $1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;
- comment évoluent ces valeurs lorsque l'éclairement diminue ;
- comment évoluent ces valeurs lorsque la température augmente ;
- **En déduire** les conditions idéales de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.

Q19 : À l'aide de la documentation du panneau photovoltaïque, **estimer** le rendement η_e de la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique en supposant que le panneau délivre la puissance maximum. On supposera un éclairement $E = 1\ 000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. **Conclure**.



Quatrième partie : Étude des conditions optimales de fonctionnement du GPV (Générateur PhotoVoltaïque)

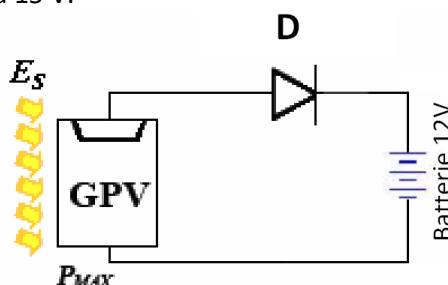
Hypothèse d'étude :

Sauf mention contraire, par défaut, les Conditions Standards de Test (STC) sont remplies, c'est-à-dire :

- $AM = 1,5$
- température de 25°C
- éclairement de $1\,000\,\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

☞ Branchement direct de la batterie au GPV

La batterie est supposée être connectée directement au panneau photovoltaïque comme l'indique le schéma ci-dessous. Nous allons nous intéresser à la puissance que transmet le panneau photovoltaïque à la batterie lorsque la tension de celle-ci évolue de 10 V à 15 V.



Montage en connexion directe.

Q20 : À l'aide de la documentation du GPV (DT7), compléter la ligne " $I_{\text{Bat}}(\text{A})$ " du tableau ci-dessous en y reportant la valeur de l'intensité du courant en Ampère générée par le panneau solaire pour chacune des tensions de batterie U_{Bat} mentionnées.

$U_{\text{Bat}}(\text{V})$	10	12	15
$I_{\text{Bat}}(\text{A})$			
$P_{\text{Bat}}(\text{W})$			
$\eta_{\text{TRANSFERT}}(\%)$			

Q21 : En déduire le type de générateur que représente le panneau solaire lorsque la batterie se charge. Justifier.

Afin de prolonger la durée de vie de la batterie, le constructeur recommande de stopper la charge dès lors que la tension dépasse 14,7 V.

Q22 : Indiquer si cette contrainte sera respectée. Justifier votre réponse.

Q23 : Indiquer le rôle de la diode (du schéma ci-dessus) et préciser dans quelles circonstances elle intervient.

Q24 : Compléter la ligne " $P_{\text{Bat}}(\text{W})$ " du tableau précédent en y reportant la puissance en Watt transmise du GPV vers la batterie pour chacune des tensions mentionnées.



Q25 : Compléter la ligne $\eta_{TRANSFERT}$ (%) du tableau précédent en y reportant le rendement du transfert énergétique calculé de la manière suivante :

$\eta_{TRANSFERT} = \frac{P_{BAT}}{P_c} \times 100$ où P_c représente la puissance crête, c'est-à-dire la puissance maximum que peut délivrer le panneau.

Q26 : Conclure quant à l'efficacité énergétique de ce dispositif de transfert d'énergie.

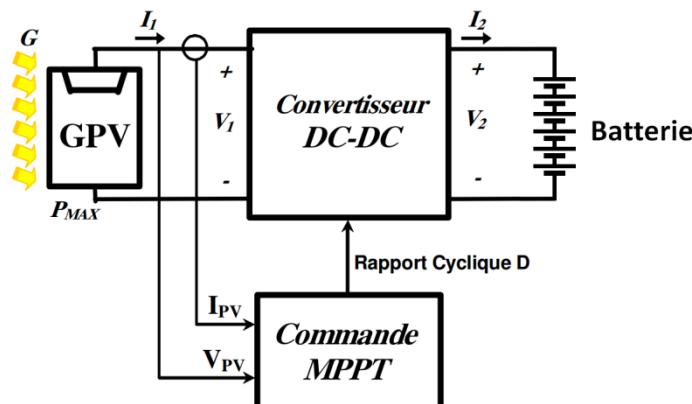
☞ Branchement de la batterie au GPV (Générateur PhotoVoltaïque) avec un régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Un panneau solaire est capable de fournir une puissance qui dépend directement de l'ensoleillement mais aussi pour une part non négligeable, de la tension qui se trouve à sa sortie, comme constatée précédemment.

Ainsi, la puissance crête P_c ne peut être obtenue que pour un seul point donné de la courbe $I = f(U)$ caractérisé par :

- V_{MPP} : tension lorsque le GPV produit le maximum de puissance
- I_{MPP} : intensité du courant lorsque le GPV produit le maximum de puissance

La tension de la batterie, variable en fonction de son état, ne correspondant pas à la tension V_{MPP} , il convient d'insérer un étage d'adaptation entre les deux éléments permettant d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV. La figure suivante illustre le principe :



Montage en connexion à travers un régulateur MPPT.

L'étage d'adaptation, appelé régulateur MPPT, applique un coefficient K d'amplification ou de réduction entre la tension V_1 aux bornes du GPV et la tension V_2 aux bornes de la batterie de façon à ce que la puissance délivrée par le panneau soit optimale. La méthode de détermination du coefficient K est appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking) et sera abordée ultérieurement.

$$K = \frac{V_2}{V_1}$$

Nous allons tout d'abord nous intéresser au comportement énergétique du système.

Q27 : À l'aide du DT7, indiquer les valeurs de tension V_{MPP} et de courant I_{MPP} nécessaires en sortie du GPV pour délivrer la puissance maximale P_c .

Q28 : En supposant que la tension V_2 aux bornes de la batterie soit de 12 V, en déduire la valeur du coefficient K.



Q29 : Déterminer l'expression littérale de :

- la puissance P_1 délivrée par le GPV en fonction V_1, I_1 ;
- la puissance P_2 reçue par la batterie en fonction V_2, I_2 .

Q30 : En supposant qu'il n'y ait aucune perte de puissance dans le convertisseur :

- **Ecrire** la relation liant V_1, I_1, V_2, I_2 ;
- **Déduire** l'expression du courant I_2 en fonction de I_1 et de K .
- **Calculer** alors la valeur de I_2 pour la valeur de K trouvée précédemment lorsque le panneau travaille à son maximum de puissance.

Nous allons à présent nous intéresser au transfert de puissance au cours de la charge de la batterie.

Q31 : Compléter sur le tableau ci-dessous, pour chacune des tensions de batterie U_{Bat} mentionnées :

- la ligne K en y reportant la valeur à donner au coefficient K pour que le GPV travaille à puissance maximale, c'est-à-dire avec une tension à ses bornes égale à V_{MPP} ;
- la ligne $I_{\text{Bat}} (\text{A})$ en y reportant la valeur de l'intensité du courant de batterie ;
- la $P_{\text{Bat}} (\text{W})$ en y reportant la puissance reçue par la batterie calculée à partir de U_{Bat} et I_{Bat} .

$U_{\text{Bat}} (\text{V})$	10	12	15
$K = \frac{V_2}{V_1}$			
$I_{\text{Bat}} (\text{A})$			
$P_{\text{Bat}} (\text{W})$			
η transfert (%)			

Q32 : Compléter la ligne $\eta_{\text{TRANSFERT}} (%)$ du tableau ci-dessus y reportant le rendement du transfert énergétique calculé de la manière suivante :

- $\eta_{\text{TRANSFERT}} = \frac{P_{\text{BAT}}}{P_C} \times 100$ où P_C représente la puissance crête, c'est-à-dire la puissance maximale que peut délivrer le panneau.

Q33 : À partir du tableau précédent et du document DT7, et en se situant dans des conditions qui ne sont pas nécessairement les conditions standards de test, citer trois facteurs qui vont influer sur la valeur de K au cours du processus de charge de la batterie.

Q34 : Conclure quant à l'intérêt de ce dispositif de transfert d'énergie.



DT1 : Batterie Marine, servitude, traction ou démarrage

Batterie de démarrage

Ce type de batterie privilégie le rapport intensité maximale disponible par rapport au volume. Une batterie de démarrage comme celles vendues pour les voitures est conçue pour délivrer un courant important pendant un court instant (le CCA est calculé pendant une durée de 30s, durée considérée comme maximale pour démarrer un moteur). Lorsqu'il s'agit d'une batterie à électrolyte liquide, elle ne peut pas être déchargée de plus de 20% au risque de déformer les plaques minces de façon irréversible.

Batterie de servitude (ou décharge lente)

Ce type de batterie alimente des systèmes électriques soumis à des sollicitations répétées, et est donc conçue pour une utilisation en décharge profonde (80%) et un nombre de cycles de charge/décharge important (jusque 1200 cycles pour une batterie de qualité en fonction de la profondeur de décharge).

Ce sont les batteries à électrolyte AGM ou gélifié qui sont le mieux adaptées même si certaines batteries liquides répondent à ce besoin.

Batterie de traction

C'est une batterie capable de délivrer de fortes intensités pendant une longue durée. Elle est utilisée par exemple pour des chariots élévateurs. Les batteries AGM et gel répondent à ce besoin, des batteries liquides à entretien (possibilité de rajouter de l'eau) sont aussi conçues pour cet usage.

Batterie marine

Une batterie marine est conçue pour prendre en compte toutes les contraintes de la navigation. C'est une batterie de servitude qui peut également être utilisée pour le démarrage (même si pour des raisons de sécurité, il est préférable de dédier une batterie au démarrage). Une batterie marine doit de plus être étanche et avoir un niveau d'électrolyte suffisant pour que les électrodes soient toujours immergées, ceci quelle que soit la gîte du bateau. Elle doit de plus avoir une bonne résistance mécanique et être conçue pour limiter les dégagements gazeux pour des raisons de sécurité et de longévité.

Les batteries à électrolyte gélifié (AGM ou gel) sont par leur technologie les mieux adaptées à une utilisation marine.

DT2 : Performance typique en fonction de la technologie de batterie

Technologie		Utilisation				
Types de plaques	Types d'électrolyte	Servitude	Démarrage	Décharge profonde (50%)	Décharge profonde (80%)	Décharge complète (100%)
Plaques minces	Liquide	---	+++	---	---	---
Plaques épaisses	Liquide	++	+-	350 cycles	---	---
Plaques épaisses	AGM	+++	++	450 cycles	275 cycles	200
Plaques épaisses	Gel	+++	+	650 cycles	420 cycles	350

Nota : la décharge complète à 100% est à éviter. Les cas positifs apparaissant dans ce tableau signifient qu'en cas de décharge totale de la batterie celle-ci est récupérable. La décharge à 80% est tolérée sans détérioration de la batterie mais le nombre de cycles s'en trouve réduit.



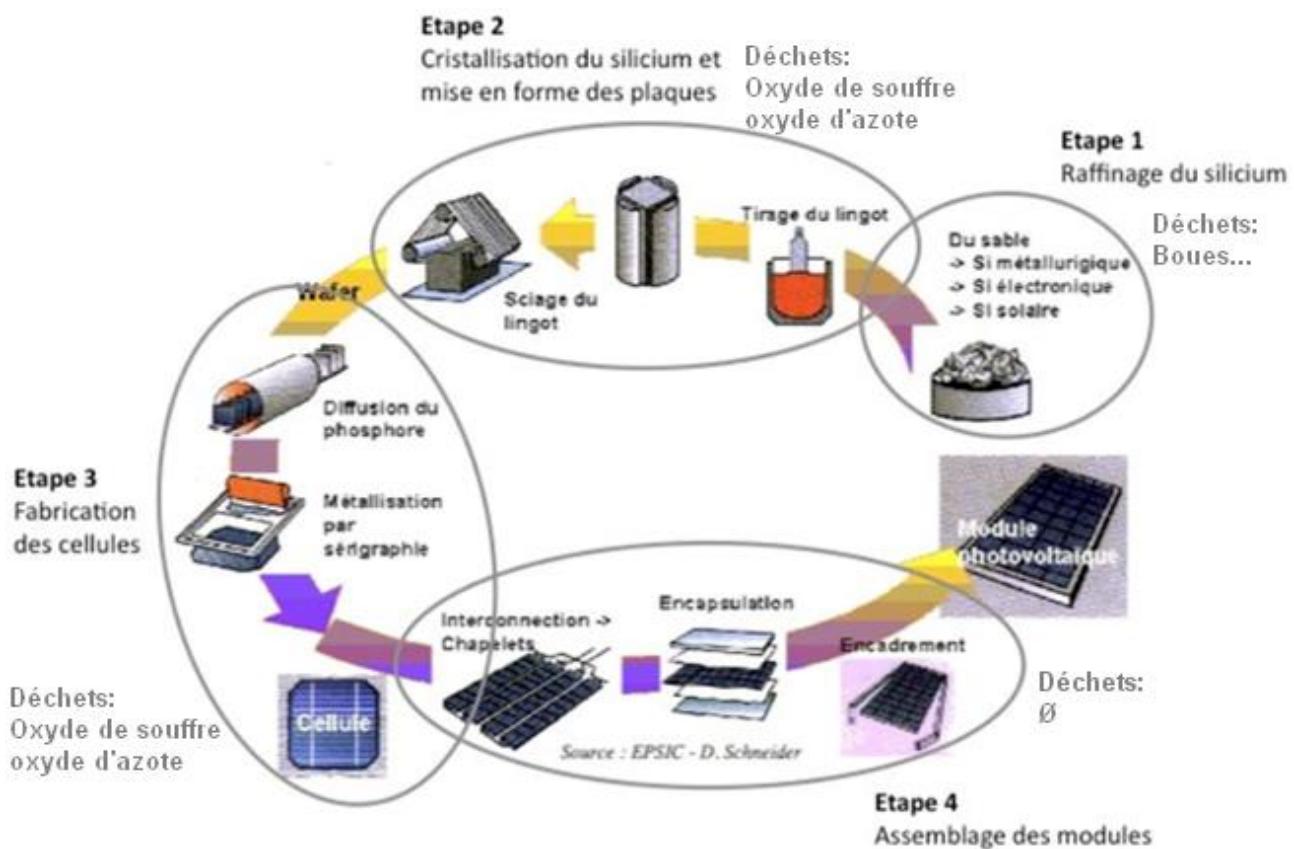
DT3 : Effet de la température sur la capacité d'une batterie au plomb

La température est un catalyseur des réactions chimiques : une augmentation de 10°C double les cinétiques des réactions. Ainsi, l'augmentation de la température permet une amélioration de la capacité réelle de la batterie. On introduit donc un coefficient de température $K_T(C)$ lié à l'évolution de la capacité réelle en fonction de la température de la batterie. Comme les fabricants indiquent la capacité pour une température de 20°C, le coefficient $K_T(20)$ est pris égal à 1 pour cette température. Les valeurs des coefficients de température de la capacité sont données ci-dessous à titre indicatif :

Température :	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Coefficient K_T (appliqué à C_{20})	0.8	0.85	0.85	0.95	1	1.04	1.1	1.13

$$C_{\text{réel}} = C_{20} \times K_T$$

DT4 : Procédés de fabrication panneaux photovoltaïques (Folio 1/2)



Fabrication cellules souples

Pour la fabrication de ce type de cellules photovoltaïques, on utilise **des cristaux de silicium sous forme monocristalline ou polycristalline**. Les processus de fabrication de ces cellules photovoltaïque sont similaires. Cependant, les procédés d'obtention des matériaux de base (silicium monocristallin ou polycristallin) sont différents.

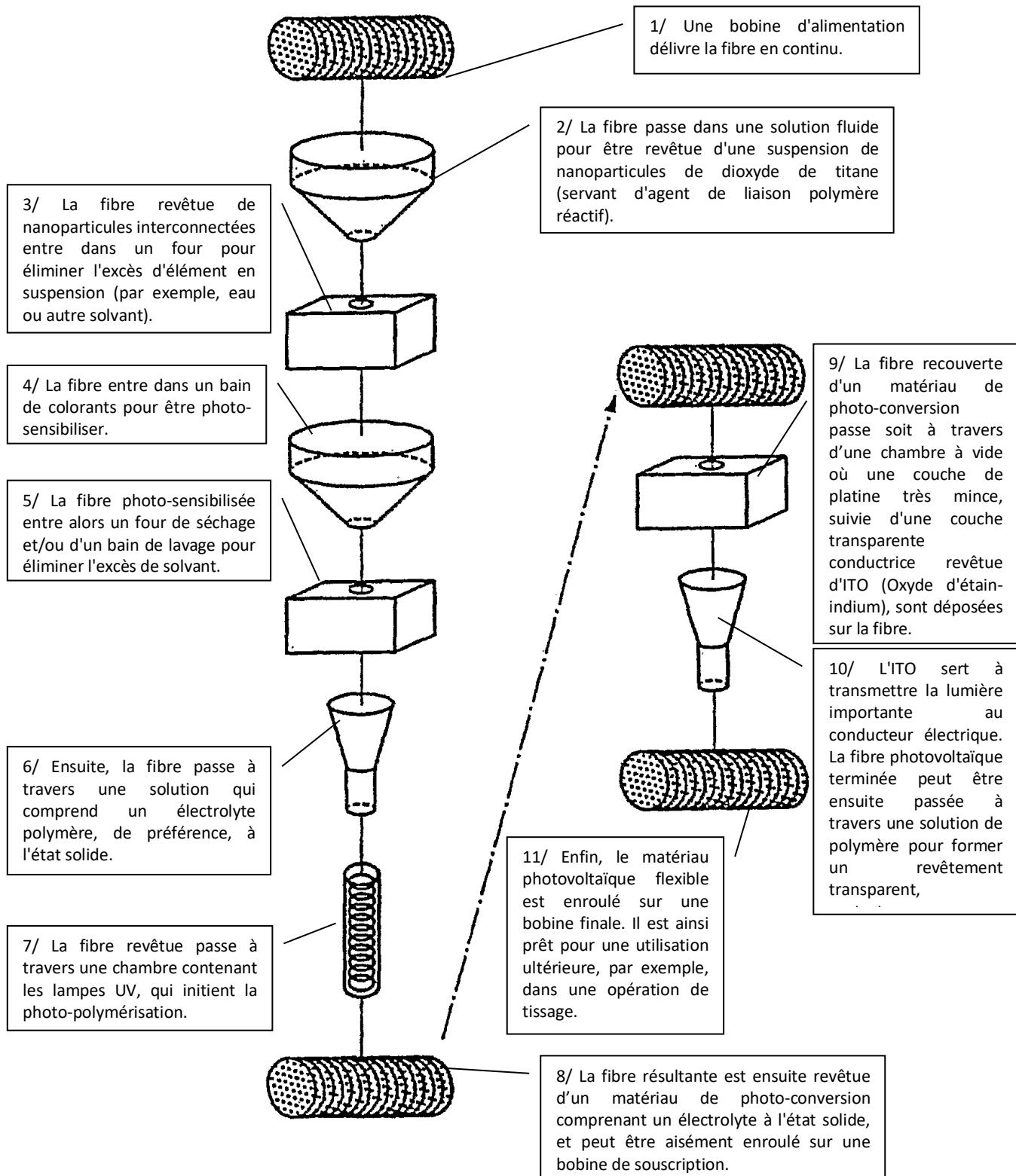




DT4 : Procédés de fabrication panneaux photovoltaïques (Folio 2/2)

Procédé de fabrication d'une fibre photovoltaïque polymère extrait du brevet n° WO 2007/047190 A2

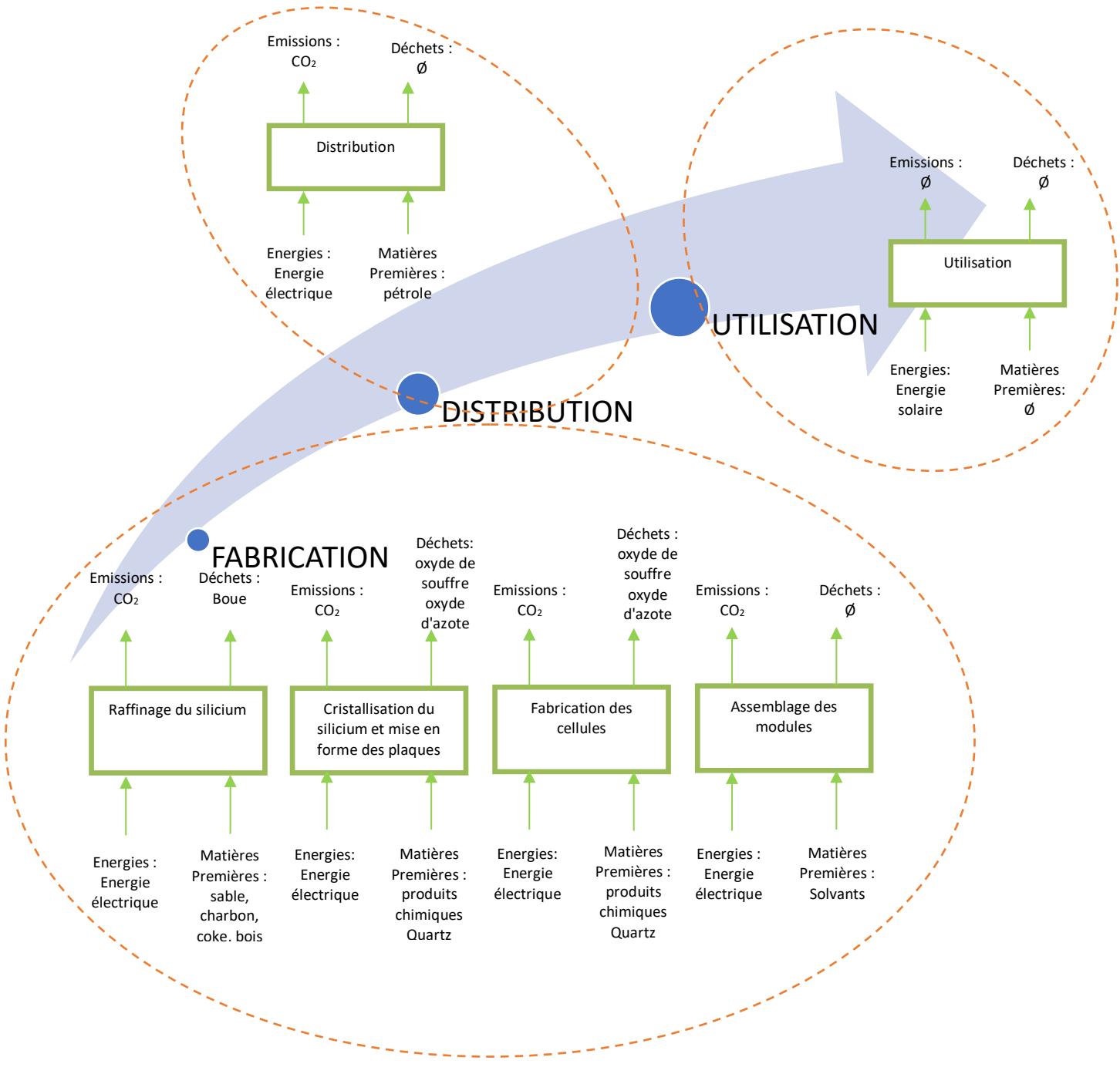
La figure ci-dessous montre un procédé de fabrication de fibre photovoltaïque en utilisant une méthode de fabrication en continu.





DT5 : Différentes étapes du cycle de vie d'un produit

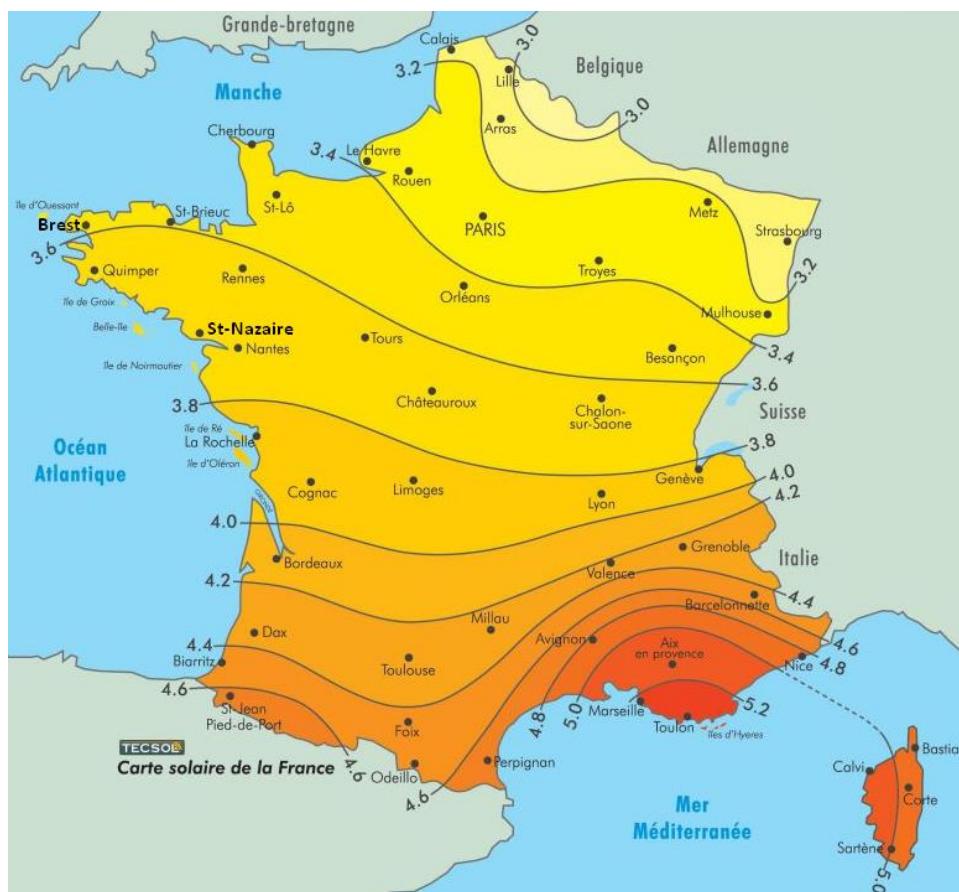
Panneau rigide au silicium monocristallin / Panneau en couche mince au silicium amorphe





DT6 : Données d'irradiation solaires en France

Carte irradiation solaire en France (source : TecSol.fr) :



Irradiations mensuelles moyennes sur quelques villes en Wh·m⁻² par jour :

Brest		Calais		La Rochelle	
Mois	H _h	Mois	H _h	Mois	H _h
Jan	1370	Jan	1150	Jan	1290
Fev	2370	Fev	2140	Fev	2320
Mar	3490	Mar	2880	Mar	3890
Avr	4860	Avr	4230	Avr	5320
Mai	5230	Mai	4680	Mai	6130
Juin	5430	Juin	4790	Juin	6860
Jui	5440	Jui	5000	Jui	6790
Aug	4950	Aug	4600	Aug	5840
Sep	4220	Sep	3570	Sep	4580
Oct	2780	Oct	2550	Oct	2750
Nov	1950	Nov	1560	Nov	1590
Dec	1220	Dec	896	Dec	1150
Année	3620	3180		4050	



DT7 : Documentation technique de la toile photovoltaïque

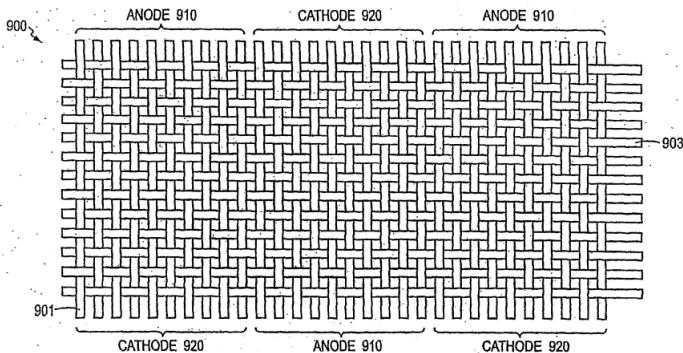


Figure : cellules photovoltaïques tissées

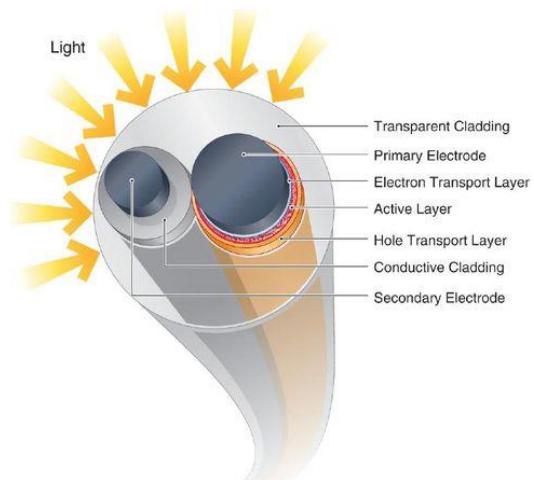
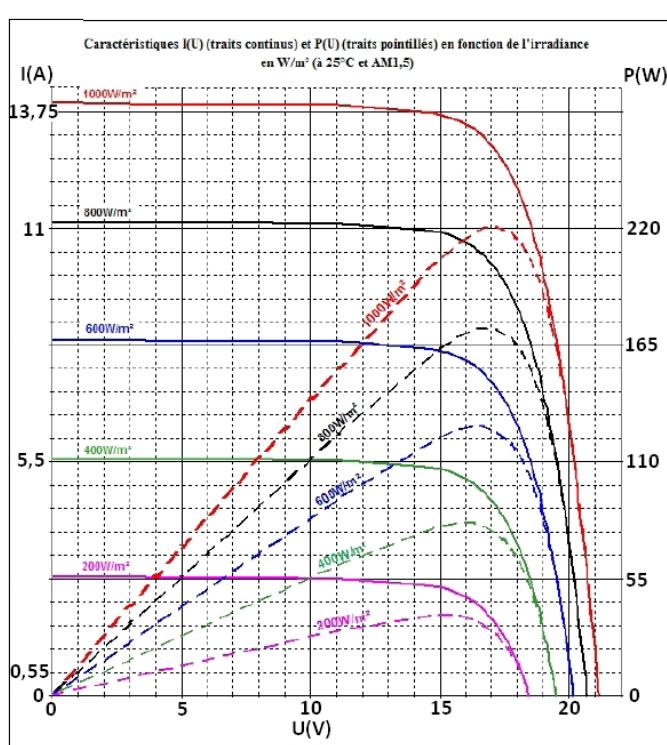


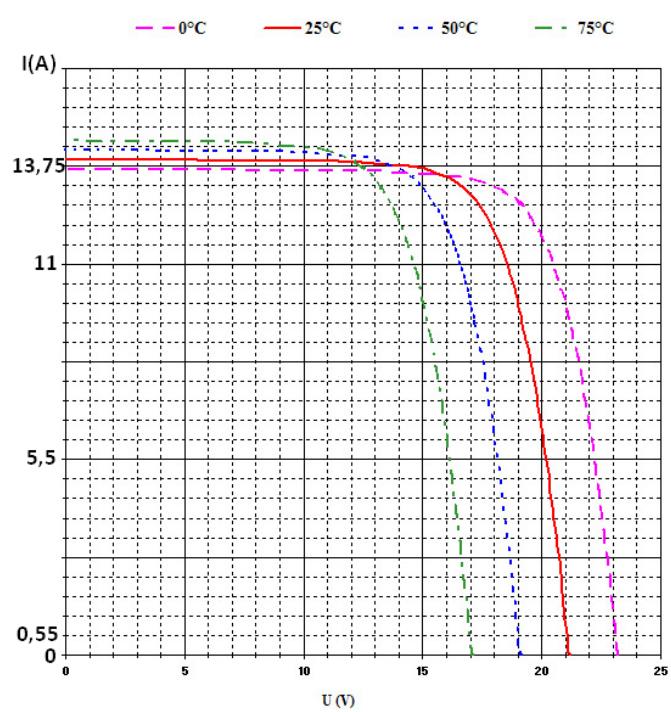
Image : fibre photovoltaïque



Spécifications	$V_{MPP}(V)$	$I_{MPP}(A)$	$P_c(W)$	Area (m^2)
	17	13	220	6,06



Caractéristiques $I(U)$ en fonction de la température (puissance rayonnée 1000W/m²)



Source : Concours général STI2D 2016