

**2I2D Enseignement Spécifique**

**Énergies et Environnement**

**Solar Impulse 2**



**Constitution du sujet :**

- Dossier sujet et questionnaire.....Pages 26 à 31
- Dossier technique .....Pages 32 à 37
- Document réponse.....Pages 38

**Le document réponse DRS1 est à rendre agrafé avec votre copie.**

## Mise en situation

La première problématique est la collecte d'énergie. L'avion a été conçu pour pouvoir voler 24 h sur 24 dans des conditions favorables, et il faut avoir une majorité de ciel bleu pour collecter un maximum d'énergie et pouvoir passer la nuit.

Les ingénieurs de l'équipe Solar Impulse 2 ont pour mission de trouver la meilleure route pour l'avion afin d'optimiser les périodes de charge solaire entre 9 h et 23 h. L'idée est ensuite qu'il puisse continuer de voler la nuit en mode propulsion, avec des batteries en décharge, jusqu'au lever du jour.

« La météo est un élément critique et doit être préparée, calculée, évaluée, planifiée, réestimée, soupesée », détaille le responsable de la stratégie et des prévisions de vol pour Solar Impulse.

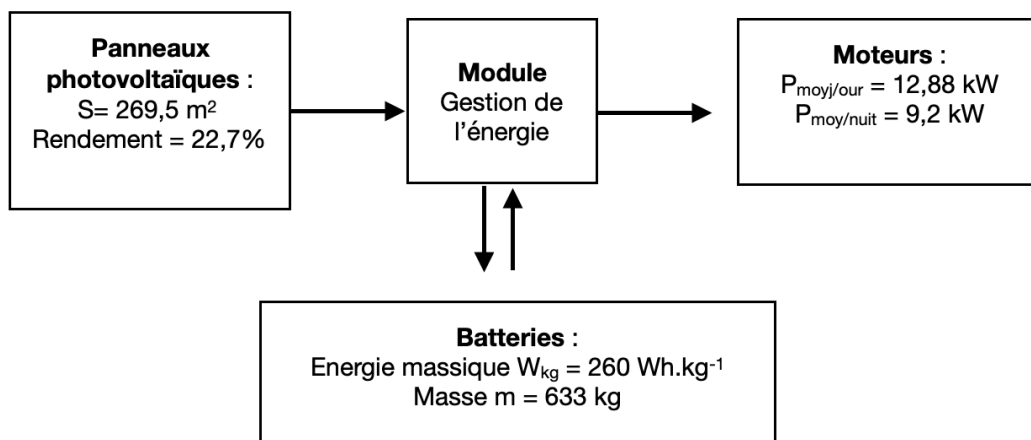
Aucune situation n'est identique à la précédente. « Les calculs dépendent de la latitude de vol, de la saison, du profil de vol, de très nombreux facteurs. »

(<https://ignition.altran.com/fr/article/solar-impulse-5-challenges-pour-reussir-le-tour-du-monde/>)

Le choix des constituants de la chaîne de puissance est essentiel pour mener à bien ce projet. Il nécessite la prise en compte de paramètres dont l'influence serait négligeable dans d'autres circonstances.

Une connaissance des variabilités des performances de ces éléments et une gestion des puissances échangées entre générateurs et récepteurs d'énergie pour tous les scénarios de vols permettent d'anticiper les aléas de fonctionnement.

Les échanges d'énergie entre les constituants de la chaîne de puissance sont représentés de manière simplifiée ci-dessous.



## ***Travail demandé***

### **Partie A : Gestion de la puissance et scénarios de fonctionnement**

De nombreux scénarios de gestion de la puissance peuvent être proposés en fonction des conditions de vol, de la consommation d'énergie et de l'état de charge de la batterie pendant 24 heures.

Un algorithme de gestion de la puissance permet de déterminer à chaque instant le fonctionnement des différents éléments constituant l'alimentation en énergie des moteurs.

On considère que :

- Les panneaux photovoltaïques (PV) représentent la source principale de production d'énergie. Ils produisent une puissance  $P_{PV}$ .
- Les packs de batteries sont utilisés à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction. Leur puissance est notée  $P_{bat}$ .
- La grandeur Soc (State of charge) définit l'état de charge des batteries. Celui-ci ne doit pas être inférieur à un niveau minimum ( $Soc_{min}$ ) et supérieur à un niveau maximum ( $Soc_{max}$ ).
- Le niveau de charge  $Soc_{min}$  doit permettre une autonomie supplémentaire de 5h minimum.
- Les moteurs représentent la principale consommation d'énergie (charge principale). Ils sont alimentés en permanence et consomment une puissance notée  $P_{mot}$ .
- Chaque composant peut prendre deux états : actif (✓) et inactif (X) en fonction des périodes du jour. La consommation d'énergie et l'état de charge des batteries étant variables, il existe plusieurs scénarios de fonctionnement du système.

Le tableau ci-dessous récapitule les états des différents composants en fonction des conditions rencontrées :

| Etat              |                               | Actif (✓)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Inactif (X)                                                                                                                                                                        |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Source principale | Panneaux photovoltaïques (PV) | Pendant un jour ensoleillé                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1. Pendant la nuit<br>2. Pendant un jour nuageux<br>3. En cas de panne                                                                                                             |
| Source secondaire | Batteries                     | Pendant l'incapacité de la source principale, par exemple lorsque :<br><br>1. Les conditions climatiques sont faibles<br><br>2. La demande des moteurs est supérieure à la production<br><br>3. En cas de panne de la source principale<br><br>4. Lorsque l'état de charge est compris entre Soc <sub>min</sub> et Soc <sub>max</sub> | 1. Pendant le fonctionnement normal de la source principale (PV)<br><br>2. La demande de la charge est égale ou inférieure à la production ( $P_{\text{mot}} \leq P_{\text{PV}}$ ) |
| Charge principale | Moteurs                       | La charge est toujours alimentée                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                    |
| Charge secondaire | Batteries                     | En cas d'excès d'énergie et Soc est inférieur à Soc <sub>max</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                    | Lorsque Soc est supérieur à Soc <sub>max</sub>                                                                                                                                     |

L'algorithme de gestion des puissances est donné dans le DTS1.

Question A.1

DTS1, DRS1

**Compléter** sur le DRS1 le tableau des différents scénarios de fonctionnement pour les cas 2, 3, 4 et 5.

Question A.2

DTS1

**Identifier** la grandeur permettant d'éviter le scénario dans lequel les batteries seraient déchargées et les panneaux photovoltaïques non fonctionnels (scénario non évoqué dans le tableau DRS1).

On impose une marge de sécurité sur la décharge des batteries afin que celle-ci ne descende pas en dessous de  $Soc_{min} = 30\%$  de leur capacité maximale.

Question A.3 | **Calculer** alors l'autonomie restante  $T_{sécurité}$  (en heures) si les moteurs fonctionnent au minimum de puissance  $P_{moy/nuit}$ .

Question A.4 | **Expliquer** en quoi la valeur de  $T_{sécurité}$  respecte le cahier des charges.

## **Partie B : Choix des cellules photovoltaïques**

Lors du vol du Solar Impulse 2, les panneaux solaires photovoltaïques sont soumis à des conditions climatiques et environnementales variables.

La technologie des cellules photovoltaïques évolue sans cesse pour arriver aujourd'hui aux cellules de 3ème génération.

Dans leur recherche de l'optimisation énergétique, les concepteurs de l'avion Solar Impulse ont utilisé des cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs au silicium.

Question B.1 | **Déterminer** quel type de technologie a été utilisé dans l'avion Solar Impulse 2 pour le choix des cellules photovoltaïques.

DTS2, DTS3

Question B.2 | En vous plaçant du point de vue efficacité énergétique, **donner** le principal argument pour le choix de cette technologie.

DTS2, DTS3

Question B.3 | Une évolution technologique est-elle encore possible pour améliorer l'autonomie du Solar Impulse 2. **Justifier** votre réponse.

DTS2

## **Partie C : Contrôle de la température des batteries**

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est stockée dans 4 packs de 70 batteries (1 pack par moteur).

Tout comme les panneaux photovoltaïques, les batteries sont soumises aux contraintes environnementales, certains phénomènes d'échauffements peuvent apparaître lors des cycles de charge/décharge notamment si un incident perturbe le plan de vol.

Question C.1 | **Préciser** pourquoi les batteries au lithium ont un avantage considérable sur les autres batteries pour le projet *Solar Impulse 2*.

DTS4

Question C.2 | **Indiquer** les avantages qui ont vraisemblablement guidé les ingénieurs de *Solar Impulse 2* dans le choix des batteries Lipo plutôt que Li-ion.

DTS5

Question C.3 | **Expliquer** comment l'équipe de Solar Impulse a résolu le problème de surchauffe des batteries.

DTS6

**Préciser** quel type de transfert d'énergie est utilisé.

Afin de contrôler les variations de la température, les ingénieurs ont mis en place une régulation de celle-ci par la commande Tout Ou Rien (TOR) de l'ouverture de l'orifice du conteneur porte-batteries, gérant ainsi l'entrée d'air frais extérieur.

Le principe de la régulation et sa commande TOR sont donnés au DTS8.

La mesure de température est effectuée par l'intermédiaire d'une sonde de température PT-100 et d'un conditionneur. Celui-ci permet d'obtenir la tension  $U_{Tbat}$  image de la température.

Question C.4 | **Indiquer** le rôle de la sonde PT-100.

DTS7, DTS8

**Préciser** quelle est la grandeur physique qui varie en fonction de la température dans ce type de capteur.

**Préciser** le rôle du conditionneur.

Question C.5 | **Donner** l'expression de l'écart  $\epsilon$ .

DTS8

**Indiquer** son unité.

Les batteries ont un rendement optimum pour une température de consigne de 25°C.

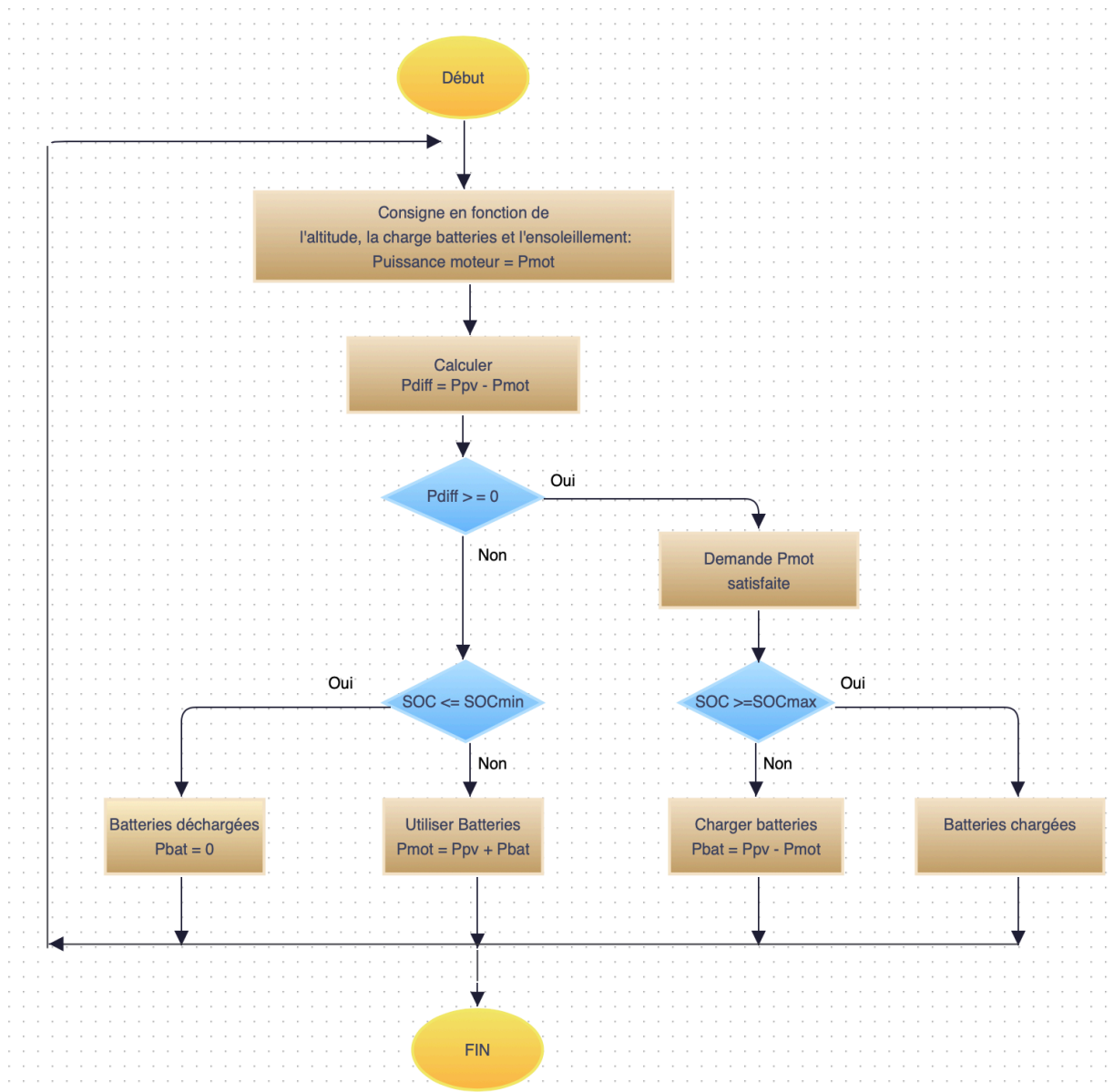
Question C.6 | **Indiquer** les valeurs des températures d'ouverture  $T_{ouv}$  et de fermeture  $T_{fer}$  de l'orifice du conteneur.

DTS8

Question C.7 | En tenant compte des réponses aux questions précédentes, **expliquer** le principe de fonctionnement de la régulation de température et **conclure** quant à son utilité.

DTS8

## DTS1 : Algorithme de gestion des puissances



## DTS2 : Comparatif types de technologies cellules photovoltaïques

| Type                                | Rendement cellule (en labo) | Module (en labo) | Module (commercial) | Niveau de développement                                                        |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1ère génération</b>              |                             |                  |                     |                                                                                |
| Silicium monocristallin             | 24,70%                      | 22,70%           | 12-20%              | Production industrielle                                                        |
| Silicium polycristallin             | 20,30%                      | 16,20%           | 11-15%              | Production industrielle                                                        |
| <b>2e génération</b>                |                             |                  |                     |                                                                                |
| Silicium amorphe                    | 13,40%                      | 10,40%           | 5-9%                | Production industrielle                                                        |
| Silicium cristallin en couche mince |                             | 9,40%            | 7%                  | Production industrielle                                                        |
| CIS                                 | 19,30%                      | 13,50%           | 9-11 %              | Production industrielle                                                        |
| CdTe                                | 16,70%                      |                  | 6-9%                | Prêt pour la production                                                        |
| <b>3e génération</b>                |                             |                  |                     |                                                                                |
| Cellule organique                   | 5,70%                       |                  |                     | Au stade de la recherche                                                       |
| Cellule de Grätzel                  | 11%                         | 8,40%            |                     | Au stade de la recherche                                                       |
| Cellules multi-jonctions            | 39%*                        | 25-30%**         |                     | Au stade de la recherche, production exclusivement pour applications spatiales |

\*sous concentration de 236 soleils

\*\* Module triple jonction GaInP/AsGa/G/Ge

Source : Systèmes Solaires – hors série spécial recherche solaire –

## DTS3 : Les technologies cristallines Silicium

(source : planete-energie.com)

Deux familles peuvent être distinguées dans la filière silicium :

● la première est constituée de plaquettes de silicium monocristallin, élaborées à partir d'un bloc de silicium très pur, formé d'un seul cristal. Le procédé industriel pour l'obtenir est lourd et coûteux, mais il permet d'obtenir des cellules avec quelques 20 % de rendement (qui est le rapport entre la **puissance** électrique de sortie et la puissance lumineuse incidente). Le record en phase industrielle, sur une pièce de 125x125 mm<sup>2</sup>, est détenu par SunPower (24,2 %). En outre, le circuit électrique est placé sur la face arrière de la cellule, ce qui améliore sa performance. Ainsi, on ne verra pas sur ces modules le rainurage qu'on observe sur les autres types. L'avion solaire Solar Impulse a été fabriqué avec de telles cellules.

● la seconde est constituée de cellules de silicium multicristallin. C'est un matériau moins pur et meilleur marché, mais le rendement tourne autour de 15 %. Les groupes chinois sont leaders sur ce segment. Le coût inférieur de la cellule a assuré son fort développement mondial, mais le niveau de rendement électrique est bien sûr un élément déterminant dans le calcul final de la rentabilité financière des installations photovoltaïques.



## **DTS4 : Tableau comparatif de 4 technologies de batteries**

| Type de batterie                     | Énergie massique (W.h.kg <sup>-1</sup> ) | Nombre de cycles | Auto-décharge par mois en % | Tension d'un élément (V) | Avantages                                        | Inconvénients                             |
|--------------------------------------|------------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Au Plomb (Pb)                        | 30-50                                    | 400-1200         | 5                           | 2,1                      | Faible coût                                      | Faible puissance                          |
| Nickel – Cadmium (NiCd)              | 45-65                                    | 1000-2000        | 20                          | 2,3                      | Performance à froid                              | Effet mémoire, toxicité, peu de puissance |
| Nickel Métal Hydrure (NiMH)          | 55-80                                    | 500-1500         | 30                          | 1,3                      | Énergie massique correcte                        | Coût                                      |
| Batterie au Lithium (Li ion et Lipo) | 150-200                                  | 500-1200         | 10                          | 3,6                      | Pas d'effet mémoire, énergie massique importante | Coût                                      |

Tableau comparatif technologies batterie

## **DTS5 : Batteries Lithium**

La batterie lithium occupe aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable (téléphone et ordinateur) et des véhicules électriques. On distingue deux types de batteries : les batteries Lithium ion (Li-ion) et les batteries Lithium ion polymère (Lipo). Dans la batterie Li-ion, l'électrolyte est constitué de sels de lithium dissous dans un solvant liquide. Dans la batterie Lipo, l'électrolyte est un gel polymère contenant également des sels de lithium.

Les avantages de la Lipo par rapport à la Li-ion sont :

- batterie pouvant prendre des formes fines et variées,
- batterie pouvant être déposée sur un support flexible,
- faible poids (la Lipo permet d'éliminer l'enveloppe de métal lourde du Li-ion),
- plus sûre que les Li-ion (plus résistante à la surcharge et aux fuites d'électrolytes).

Les faiblesses de la Lipo par rapport à la Li-ion sont :

- plus chère,
- charge soumise à des règles strictes en terme de charge/décharge.

<http://www.velo-electrique.com/Pages/batteries.htm> On distingue deux catégories d'électrolytes

Types de batteries au lithium

## **DTS6 : Un système de stockage de l'énergie amélioré pour Solar Impulse**

(<http://www.kokam.com>)

Pendant l'étape la plus difficile du vol autour du monde de Solar Impulse 2 - le vol record de 5 jours et 5 nuits entre Nagoya, au Japon et Hawaï - la température des batteries de Solar Impulse 2 s'est élevée en raison d'un profil de vol différent de celui prévu et de la sur-isolation des gondoles (boîtiers des moteurs) par rapport à la température extérieure.

Par conséquent, les batteries NMC ultra-haute puissance de Solar Impulse 2 ont atteint une température proche des 50 degrés Celsius pendant une période prolongée, une température plus élevée que celle des normes de conception.

Pour éviter une éventuelle surchauffe de ses batteries à l'avenir, l'équipe de Solar Impulse a installé un nouveau système de refroidissement conçu pour éviter tout problème lié à la température si le profil de la mission de vol change.

Par ailleurs, au cas où le système de refroidissement tombe en panne, un nouveau système de secours permet au pilote d'ouvrir manuellement l'orifice du conteneur, ce qui lui permet d'utiliser l'air extérieur pour refroidir les batteries sans les laisser trop se refroidir et geler.

En outre, quelques ajustements ont été faits sur le boîtier du moteur (ou gondole), qui abrite à la fois la batterie et le moteur : une prise d'air a été ajoutée pour permettre l'écoulement de l'air dans le système de refroidissement de la batterie.

L'équipe de Solar Impulse a également veillé à ce que les futurs plans de vol offrent suffisamment de temps aux batteries pour refroidir entre les vols, et a ajusté son programme de vol pour éviter la surchauffe des batteries dans les climats tropicaux.

« Lorsque l'on conçoit un avion expérimental, tout système supplémentaire est une source potentielle d'échec. C'est la raison pour laquelle nous n'avons initialement pas intégré de système de refroidissement.

Comme nous avons eu ce moment de remplacement des batteries à Hawaï, nous avons décidé d'intégrer le système de refroidissement pour donner plus de flexibilité à l'avion, en particulier dans des environnements à très haute température », a déclaré M. Borschberg.

### Sonde de température modèle PT-100



#### APPLICATIONS

La sonde de température modèle PT-100 sert à mesurer la température, autant dans l'environnement que dans une structure liée au génie civil.

Elle est utilisée pour le contrôle à long terme de bâtiment et d'ouvrage sur lesquels la variation de température a une forte influence, ou lorsque la valeur de la température est une information indispensable pour les calculs ou pour permettre une corrélation avec les autres données physiques collectées.

#### DESRIPTIF

La sonde de température PT-100 est constituée d'une résistance de platine enchâssée dans un tube de protection en inox habituellement gainée de quartz dans sa partie intérieure.

La valeur de la résistance du platine variant de manière connue en fonction de la température, ce type de capteur permet d'obtenir une grande précision dans la mesure de température.

Sur les sondes 4 fils, une résistance de référence permet de connaître avec précision le courant généré. La mesure se fait alors en utilisant cette source de courant connue, et en mesurant la tension aux bornes de la sonde. Aucun courant ne circulant dans les fils de mesure de tension, il n'y a aucune chute de tension, et donc aucune erreur sur la mesure de la résistance. La tension lue est directement proportionnelle à la valeur de la résistance de la sonde.

La lecture sur 4 fils permet de s'affranchir de la longueur du câble par compensation directe, et ainsi de conserver une grande précision de mesure.

#### CARACTERISTIQUES

Gamme de mesure :  
-50 à +300°C

Précision :  
>0.01°C

Résolution :  
0.1°C

Résistance :  
100  $\Omega$   $\pm$  0.1 à 0°C

Facteur de température :  
0.385  $\Omega$ /°C

Diamètre :  
6 mm

Longueur :  
50 mm (standard)

Classe :  
A

Étanchéité :  
IP68

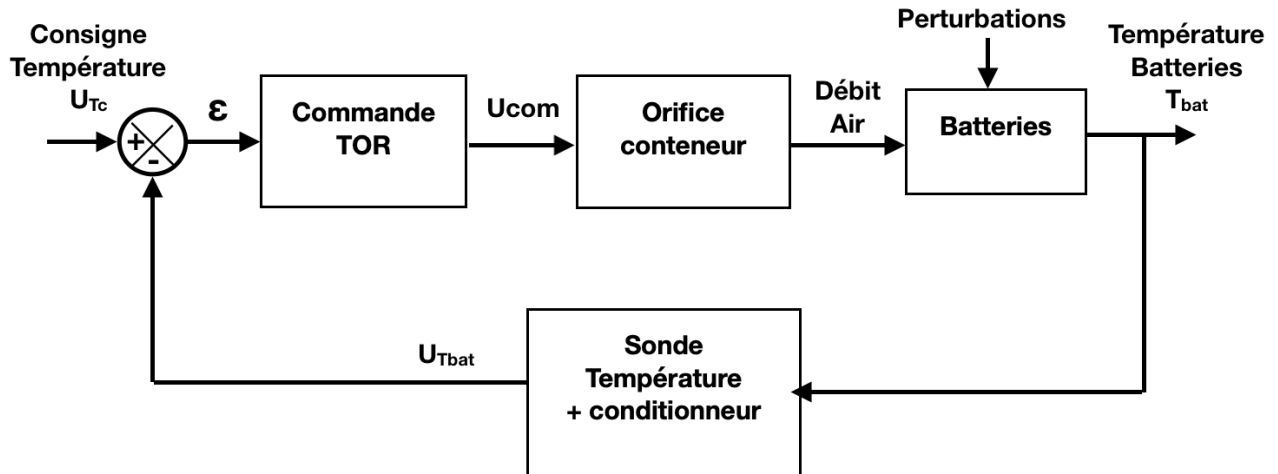
Câble :  
4 conducteurs

Options :  
Câble blindé  
Chapelet de sondes  
Prise en bout de câble  
Autres longueurs de sonde  
Sonde 3 fils

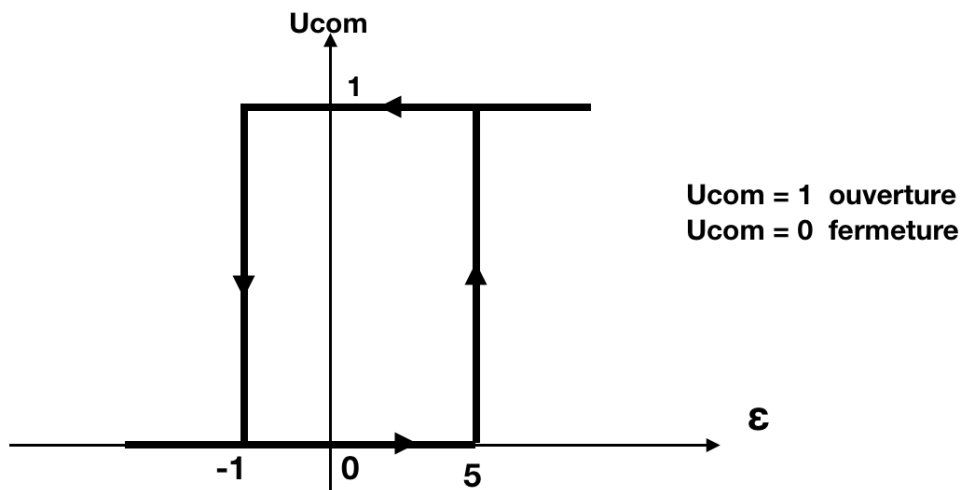
Accessoires :  
Boîtier à commutateur rotatif  
Poste de lecture

## DTS8 : Principe de régulation de la température des batteries

Schéma-bloc :



La commande TOR est représentée ci-dessous :



**DRS1 : Différents scénarios de fonctionnement**

question A.1

| cas | période                          | PV | Batteries | P <sub>diff</sub> | Soc<br>(état de charge)                    | Description                        |
|-----|----------------------------------|----|-----------|-------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| 1   | jour<br>ensoleillé ou<br>nuageux | ✓  | repos     | 0                 | Soc <sub>min</sub> <Soc<Soc <sub>max</sub> | P <sub>mot</sub> = P <sub>PV</sub> |
| 2   |                                  | ✓  | .....     | .....             |                                            | P <sub>mot</sub> = .....           |
| 3   |                                  | X  |           |                   |                                            | P <sub>mot</sub> = .....           |
| 4   |                                  | ✓  | En charge | .....             | .....                                      | P <sub>bat</sub> = .....           |
| 5   | nuit                             | X  | .....     | < 0               | .....                                      | P <sub>mot</sub> = .....           |